



Foto: Cortesía Luis Rocha

**Luis Rocha Marhén**

(Segunda parte)

En la primera parte de este interesante artículo, nuestro Invitado especial brindó una introducción y señaló el caso de algunas investigaciones previas que se han dado en torno al tema que presenta en esta sección. Con el documento que presentamos, finaliza su valiosa colaboración.

**S**obre la normatividad y filosofías de diseño, con base en los resultados de investigaciones experimentales y analíticas desarrolladas en los últimos cuarenta años, se ha podido determinar que la filosofía de diseño para estructuras presforzadas, o bien, parcialmente postensadas, no resulta tan diferente de aquella considerada para estructuras de concreto reforzado tradicional.

# El uso de presfuerzo no adherido en la edificación

Para el caso específico del criterio para diseño sísmo-resistente de este tipo de sistemas estructurales, conviene decir que el mecanismo de falla deseado es el mismo que el que se plantea en la reglamentación para estructuras de concreto reforzado, trabe débil y columna fuerte. En este caso resulta claro que es aceptada la conformación de articulaciones plásticas en los extremos de las trabes, por lo que explícitamente se acepta la demanda de ductilidad tanto a nivel de la sección transversal, como a nivel global.

La aceptación acerca de la presencia de ductilidad global en las estructuras donde existen elementos presforzados, o parcialmente presforzados, implica la aceptación de comportamiento dúctil y disipación de energía por daño, entre otras características esenciales de los sistemas estructurales para lograr comportamientos adecuados ante la incidencia de sismo. Por lo tanto, el criterio de diseño considerando un factor de comportamiento o ductilidad  $Q$  que permite la reducción de las fuerzas laterales para diseño por sismo, resulta aplicable; sin embargo, la pregunta es: ¿Qué valor de  $Q$  se puede usar para estructuras presforzadas o parcialmente presforzadas? Parte de la respuesta la presenta el maestro en Ingeniería Reyes J. (2005).

En el trabajo de Reyes se plantea que el factor de comportamiento sísmico  $Q$  y la ductilidad " $\mu$ " del sistema se encuentran relacionadas (Chopra, 2001). De un estudio que

establezca las relaciones entre las resistencias laterales requeridas, para lograr niveles de ductilidad global prefijados representativos de sistemas estructurales de concreto reforzado tradicionales y sistemas con elementos presforzados, se puede establecer una propuesta para definir los valores del factor de comportamiento por sismo  $Q$  para éstas últimas a partir de los valores considerados para las estructuras tradicionales.

Así, a partir del espectro para diseño por sismo empleado para estructuras de concreto reforzado, se podrá determinar el espectro reducido para una estructura presforzada con base en los factores " $Q_{CR}$ " obtenidos considerando que la estructura es de concreto reforzado, y un parámetro que relaciona

las resistencias laterales requeridas para estructuras presforzadas y de concreto reforzado, denominado  $F_{CP}$ . Así, el factor de comportamiento por sismo para una estructura presforzada se puede representar, de acuerdo a Reyes como:

$$Q_{PC} = \frac{Q_{CR}}{F_{CP}}$$

Entonces, la fuerza lateral para diseño por sismo para estructuras con elementos presforzados (FL-DPC) se puede obtener como:

$$F_{LDPC} = \frac{F_E \cdot F_{CP}}{Q_{CR}}$$

donde:  $F_E$  es la fuerza lateral de diseño (ordenadas espectral) obtenida a partir del espectro reglamentario,

## Nuestro invitado

**Luis Rocha Marthén** es ingeniero civil egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (1979). Obtuvo el certificado de estudios superiores en estructuras de L'Ecole Nationale des Travaux Publics de L'Etat, en Lyon, Francia, donde sostuvo su tesis sobre el efecto de la no adherencia de los cables de presfuerzo sobre el momento resistente de las trabes postensadas del puente de L'Azergues, de la autopista París-Lyon. Posteriormente obtuvo el diploma de especialización en estructuras reforzadas y presforzadas en el Centre des Hautes Etudes de la Construction. Tiene 26 años de experiencia en el proyecto y ejecución de estructuras postensadas. Es socio fundador de Postensados Mexicanos, empresa especializada en la aplicación del presfuerzo en la edificación.



y  $Q_{CR}$ , es el factor de comportamiento para una estructura de concreto reforzado convencional de las mismas características de la que se desea diseñar con presfuerzo.

El criterio presentado en el trabajo de Reyes (2005), coincide sustancialmente con la propuesta para diseño por sismo de estructuras de concreto reforzado prefabricadas que establece el Código de la Unión Europea (ES, 2003) y lo mencionado por el profesor Park.

En el mismo trabajo de Reyes, considerando ductilidades globales de 1.5, 2.0, 3.0, 4.0 y 5.0, se determinaron los valores del  $F_{CP}$  para estructuras de diferentes características en la relación presfuerzo y acero de refuerzo; para estructuras parcialmente presforzadas, el factor  $F_{CP}$  se recomienda igual a 1.3, y para estructuras totalmente presforzadas el valor recomendado de  $F_{CP}$  resulta igual a 1.8.

Debe mencionarse que los valores obtenidos por Reyes resultan conservadores, dado que para valores de ductilidad global del orden de tres o menor (valores establecidos en las recomendaciones Japonesas para diseño de estructuras de concreto parcialmente presforzadas, AIJ, 2003), los valores del factor  $F_{CP}$ , tanto para estructuras parcialmente presforzadas, como presforzadas, resultan iguales a 1.2 y 1.5, respectivamente.

La información obtenida a partir de estudios de investigación experimental ha permitido que existan algunos códigos para diseño de estructuras presforzadas y parcialmente presforzadas, sujetas a cargas tanto verticales, como a cargas sísmicas.

Desde el punto de vista del diseño sismo-resistente, los códigos se avocan a proponer limitantes en los índices de refuerzo, esto con el propósito de lograr ductilidades

seccionales importantes, según la normatividad Japonesa y Neozelandesa, del orden de 6.0 (Park y Thompson, 1976, AIJ, 2003) y, por lo tanto, esperar ductilidades globales de desplazamiento del orden de 4.0 (Muguruma y colaboradores, 1980).

Las recomendaciones para diseño por sismo de elementos postensados que actualmente se mencionan en los reglamentos de Estados Unidos de América, Nueva Zelanda, Australia y Japón, se han resumido en la Tabla 1.

En esta Tabla se indican los valores de los contenidos de acero máximos para solicitaciones sísmicas pudiéndose observar que los valores comunes resultan del orden del 20% y 30% como lo había indicado Park hace casi 40 años.

Finalmente, para el proceso de diseño considerando niveles de ductilidad seccional predeterminadas, resulta necesario contar con herramientas que permitan calcular el parámetro ductilidad para cualquier tipo de configuración geométrica, con cualquier relación entre cuantía de acero de refuerzo y cuantía de acero de presfuerzo, o bien, para cualquier valor de la relación establecida entre la contribución a la resistencia por flexión proveniente del acero de refuerzo y aquella proveniente del presfuerzo. Asimismo, es importante mencionar que el conocimiento de las ductilidades seccionales permite la determinación de la capacidad al giro teórico de la rótula plástica esperada en marcos dúctiles y poderla comparar contra el giro calculado.

### Conclusiones

Tomando en cuenta los trabajos de investigación realizados a la fecha así como las propuestas de algunos de los reglamentos para

Tabla 1

Resumen del contenido de acero máximo en diferentes reglamentos.

| REGLAMENTO                     | CONTENIDOS DE ACERO   |              |              |    |     |                 |          |              |              |                                |      |      |      |
|--------------------------------|---|--------------|--------------|----|-----|-----------------|----------|--------------|--------------|--------------------------------|------|------|------|
| ACI-318-05                     | $\omega_p \leq 0.32 \beta_1$  |              |              |    |     |                 |          |              |              |                                |      |      |      |
| IBC - 2003                     | $I_p \leq 0.25$   |              |              |    |     |                 |          |              |              |                                |      |      |      |
| NZS-3101-2002<br>Nueva Zelanda | $\frac{X_c}{D} \leq 0.20$ Zona de compresión sin confinar<br>$\frac{X_c}{D} \leq 0.30$ Zona de compresión confinada   |              |              |    |     |                 |          |              |              |                                |      |      |      |
| AIJ - 2003<br>Japón            | <table border="1"> <thead> <tr> <th>Región</th> <th>I</th> <th>II</th> <th>III</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Límite superior</td> <td><math>q_{cr}</math></td> <td><math>1.1 q_{cr}</math></td> <td><math>1.2 q_{cr}</math></td> </tr> <tr> <td>Límite superior <math>M_{cr} / M_u</math></td> <td>0.60</td> <td>0.65</td> <td>0.70</td> </tr> </tbody> </table> $q_{cr} = \frac{\text{Fuerza de Tensión}}{bDf_c}$ | Región       | I            | II | III | Límite superior | $q_{cr}$ | $1.1 q_{cr}$ | $1.2 q_{cr}$ | Límite superior $M_{cr} / M_u$ | 0.60 | 0.65 | 0.70 |
| Región                         | I   | II           | III          |    |     |                 |          |              |              |                                |      |      |      |
| Límite superior                | $q_{cr}$  | $1.1 q_{cr}$ | $1.2 q_{cr}$ |    |     |                 |          |              |              |                                |      |      |      |
| Límite superior $M_{cr} / M_u$ | 0.60  | 0.65         | 0.70         |    |     |                 |          |              |              |                                |      |      |      |
| AS-3600-2004<br>Australia      | $q_t = \frac{\text{Fuerza de Tensión}}{bdf_c} \leq 0.20$  |              |              |    |     |                 |          |              |              |                                |      |      |      |
| RCDF-2204                      | No hay recomendación  |              |              |    |     |                 |          |              |              |                                |      |      |      |

diseño de elementos de concreto presforzado y parcialmente presforzado, se puede concluir que resulta técnicamente viable el uso de sistemas estructurales de concreto en los que se emplee elementos parcialmente presforzados, e incluso totalmente presforzados para construcción en regiones de sismicidad media y alta. Resulta claro que ningún precepto de las filosofías para diseño, ya sea ante cargas verticales y/o laterales provocadas por sismo, difiere radicalmente entre las estructuras de concreto reforzado tradicional y aquellas en las que se considera el uso de presfuerzo, ya sea total o parcial.

Como debe ser con cualquier tipo de sistema y material estructural, el proceso de diseño y construcción de edificaciones en las que se emplee presfuerzo deberá ser cuidadoso y supervisado. Para el análisis y diseño de los elementos aislados se deberá contar con las herramientas adecuadas que permitan proponer geometrías y características mecánicas de las secciones transversales de tal modo que el profesional del diseño tenga conocimiento de los niveles de ductilidad local de curvatura que puede llegar a alcanzar en la condición última la sección propuesta.

Tomando en cuenta que no existe información generada en México relacionada con el comportamiento de elementos y estructuras de concreto en las que se emplee presfuerzo total o parcial, se considera importante promover la investigación tanto experimental, como analítica, relacionada con el tema. **C**

#### Nota:

El autor expresa su agradecimiento al dr. en Ing. Óscar López Bátiz. por sus valiosos consejos y desinteresados comentarios en la parte de comportamiento sísmico de estructuras parcialmente postensadas.

#### Bibliografía:

- Antoine E. Naaman, *Prestressed Concrete Analysis and Design, Fundamentals*, McGraw-Hill Book Company, New York 1982.
- American Concrete Institute (ACI, 1999), *State-of-the-Art Report on Partially Prestressed Concrete*. ACI 423.5R-99. Joint ACI-ASCE Committee 423, pp. 37.
- American Concrete Institute (ACI, 2002), *ACI Committee 318 Building Code Requirements for Reinforced Concrete*. ACI 318-02.
- Architectural Institute of Japan (2003), *Recommendations for Design and Construction of Partially Prestressed Concrete (Class III of Prestressed Concrete) Structures (in Japanese)*, AJJ February, 2003, pp. 322.
- European Standard (2003), *Eurocode 8 Design of Structures for Earthquake Resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings*. Ref. No. prEN 1998 1:200, pp. 224.
- Hayashi M., Okamoto S., Otani S., Kato H. and Jinhua F. (1995), *Earthquake response of an eleven-story precast prestressed concrete building by substructure pseudo dynamic test*, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 22236/A/ST 38. 2000, pp. 8.
- International Building Code 2003*. International Code Council.
- Kato H., Ichisawa Y., Takamatsu K., and Okamoto N. (2000), *Earthquake response of an eleven-story precast prestressed concrete building by substructure pseudo dynamic test*, 12th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No. 22236/A/ST 38. 2000, pp. 8.
- Muguruma H., Watanabe F., and Fukai S., *Behavior of class 3 Partially Prestressed Concrete Beam under Reversals Cyclic High Over-Load*, Proceedings of FIP Symposium on Partial Prestressing, Federation Internationale de la Precontrainte (FIP). London, Sept 1980., pp. 118-127.
- Ozden S. and Ertas O. "Behavior of unbounded, postensioned, precast concrete connections with different percentages of mild steel reinforcement", *PCI Journal*, march-april 2007, pp. 32 – 44.
- Park R. y Paulay T. (1991), *Estructuras de concreto reforzado*, Limusa, pp. 796.
- Park R. and Thompson K. (1976), *Some recent research in New Zealand into aspects of the seismic resistance of prestressed concrete frames*, Proceedings of the 12th New Zealand Prestressed Concrete Institute Annual Meeting, 1976, pp. 98-108.
- Reyes J., *Espectros inelásticos para estructuras precoladas y presforzadas de concreto*. Tesis de Maestría, UNAM. 2005, pp. 158.
- Standards Association of New Zealand: 2004, *Code of Practice for the Design of Concrete Structures*.
- Asociación de Consultores Independientes de Estructuras de Edificación. *Losas Postensadas en Edificación*, Sesión Técnica Monográfica, 2004.
- ACI-ASCE Committee 423: ACI 423.3R-05, Jun 2005, *Recommendations for concrete members with unbonded tendons*.
- Antoine E. Naaman, August 2005, *Concrete Cracking Workshop*, Evanston, University of Michigan.
- Bijan O. Alami, "Design of post tension members in bending, using ACI-318-02", *ADAPT Technical Notes*, 2005.
- Bijan O. Alami, "Design of concrete floors with particular reference to post tensioning", *PTI Technical Notes*, January 2001.
- Bijan O. Alami, "Non prestressed bonded reinforcement in post tension building design", *ADAPT Technical Publication*, february, 2001.
- AS-3600-2001 Australian Standards: *Concrete Structures*, 2001.
- A. Palermo, S. Pampanin, A. Buchanan, M. Fragiaco, B. Deam, *Code Provisions for seismic design of multi-storey post-tensioned timber buildings*, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Meeting Thirty-Nine, Florence Italy, august, 2006.
- ACI Committee 318, American Concrete Institute, ACI-318-05, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. 2005, 430 pp.
- Michael P. Collins, Denis Mitchell, *Prestressed Concrete Structures*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 1991.
- Nawy, Edward G. *Prestressed Concrete a Fundamental Approach, Fifth Edition*, Pearson Prentice Hall, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, New Jersey 07458, 2006.
- R. Park. *Partially Prestressed Concrete in Seismic Design Frames*. Proceedings of FIP Symposium on Partial Prestressing, Federation Internationale de la Precontrainte (FIP). London, Sept. 1980, pp. 105-117.
- A.E. Naaman, M. H. Harajli, J.K.Wight, "Analysis of Ductility in Partially Prestressed Concrete Flexural Members", *PCI Journal*, may-jun 1986. pp. 64-87.
- Chopra A.K., (2000), *Dynamics of structures: theory and applications to earthquake engineering*, Prentice Hall, pp. 844.
- Otani S., (1981), "Hysteresis models of reinforced concrete for earthquake response analysis", *Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B)*. Vol.XXXVI, No.2. pp. 125-159.