

## **REFORZAMIENTO DE LAS COLUMNAS DEL AUDITORIO DEL LICEO MUNICIPAL “FERNÁNDEZ MADRID”**

**Dr. Roberto Aguiar <sup>1</sup>, Luis F. Rosero <sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército, Campus Sangolquí, Av. General Rumiñahui S/N, Sangolquí-Ecuador.

E-mail: [rrauiar@espe.edu.ec](mailto:rrauiar@espe.edu.ec)

<sup>2</sup> Carrera de Ingeniería Civil, Departamento de Ciencias de la Tierra y la construcción, Escuela Politécnica del Ejército, Campus Sangolquí, Av. General Rumiñahui S/N, Sangolquí-Ecuador.

E-mail: [luis\\_lfrrl@yahoo.com](mailto:luis_lfrrl@yahoo.com)

### **RESUMEN**

Las técnicas de reforzamiento pueden estar orientadas a aumentar la resistencia a una combinación de esfuerzos en los elementos, dichas combinaciones pueden ser flexión y corte, corte y torsión, flexión y compresión, etc.; pero además se puede realizar un reforzamiento sísmico al incrementar la rigidez de la estructura, lo cual disminuye las derivas de piso. En este artículo se realiza el reforzamiento de las columnas de un auditorio con diagonales metálicas y tejidos FRP SikaWrap adheridos externamente.

El diseño de columnas se trata de una simultaneidad de efectos flexionantes y de compresión axial, los principios de reforzamiento sísmico se basan en el incremento de las propiedades a carga axial de la columna con hormigón confinado y las mejoras en la capacidad a flexión logradas mediante la envoltura con SikaWrap.

### **ABSTRACT**

Reinforcement techniques may be directed to increase the resistance to combination of stresses in the elements, such combinations may be bending and shear, shear and torsion, bending and compression, etc. But also can be realized a seismic reinforcement by increasing the rigidity of the structure, which reduces floor drifts. This article makes the reinforcement of the columns of an auditorium with metal diagonal and tissue externally bonded FRP SikaWrap.

Design of columns is a simultaneity effects flexural and axial compression, seismic reinforcement principles are based on the increase in axial load properties of confined concrete and improvements in flexural capacity achieved by SikaWrap.

## Descripción de la estructura

La estructura está formada por una losa bidireccional alivianada con nervios de 10cm de ancho por 25cm de altura, que se encuentra apoyada sobre vigas embebidas de 50cm de ancho y una altura igual a la de la losa en el sentido longitudinal, y en el sentido transversal tiene vigas de 30cm de ancho por 1.15m de altura, tiene columnas de hormigón armado rectangulares pero de sección variable que empiezan siendo de 30 x 40 cm en la base y terminan en la parte superior de 30 x 55 cm, en un sentido se encuentran separadas entre 3 y 4 m mientras que en el otro la separación es de 11m y tienen una altura de 6m aproximadamente.



Figura 1 Vigas y columnas del auditorio

En la parte superior del auditorio se construyó una pequeña aula con estructura metálica que tiene mampostería y una cubierta liviana de fibrocemento como se indica en la figura 2, esta pequeña estructura aporta con un peso de 16T al peso total que soportan las columnas del auditorio que es de 265.7T.



Figura 2 Vista de la estructura sobre el auditorio

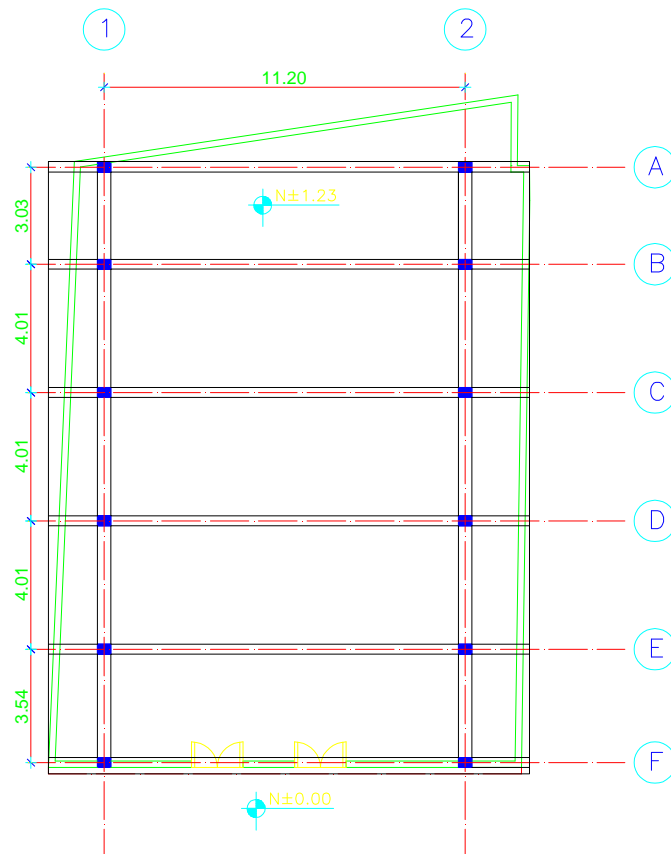


Figura 3 Planta del auditorio

## Diagnóstico del estado actual de la estructura sin refuerzo

A pesar de que al interior de la estructura no se observan fisuras, grietas o grandes deflexiones; se realiza el análisis sísmico de la estructura ya que a simple vista se tiene la sensación de una falta de rigidez por la esbeltez de las columnas y además en el sentido longitudinal no existen vigas descolgadas, todas estas situaciones se reflejan en altos valores de derivas de piso.

Para el análisis sísmico del auditorio se emplea las subrutinas del programa computacional CEINCI-LAB, se considera un modelo matemático donde los pórticos están formados por columnas totalmente flexibles y vigas axialmente rígidas. Para simular la sección variable de las columnas se divide a las mismas en tres partes, cada una con diferente altura.

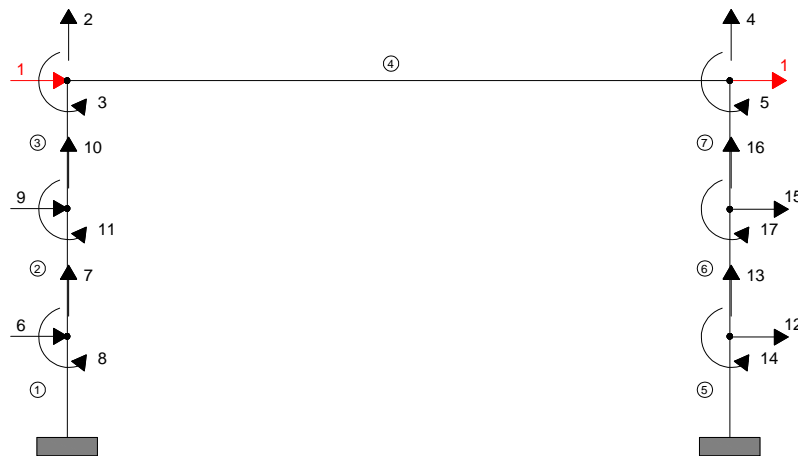


Figura 4 Pórticos A, B, C, D, E y F

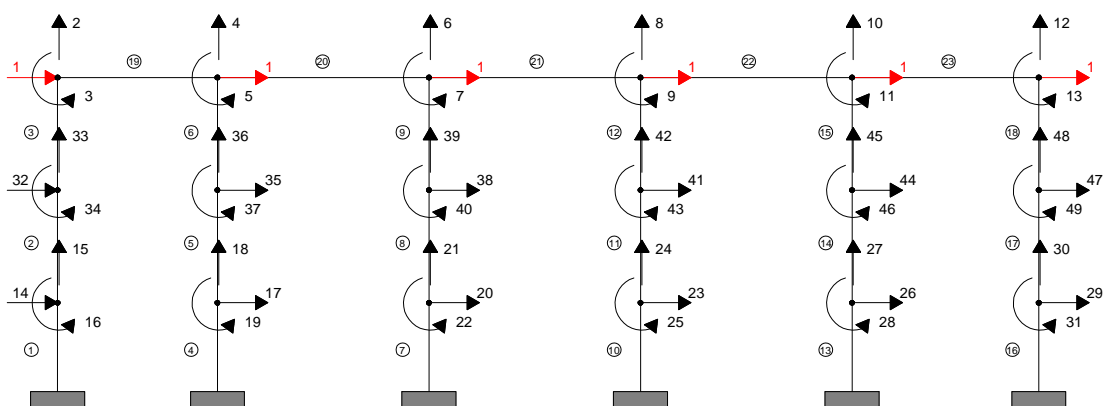


Figura 5 Pórticos 1 y 2

El procedimiento consiste en calcular la matriz de rigidez de la estructura y la matriz de masas, con estos valores se determina los períodos, modos y frecuencias de vibración, matriz de amortiguamiento y los factores de participación modal.

Una vez establecidos los valores anteriores, utilizamos el espectro dado por la nueva Normativa Ecuatoriana de la Construcción NEC-11 para establecer las aceleraciones espectrales y finalmente los desplazamientos elásticos e inelásticos con los que se calcula las derivas de piso.

- **Períodos de vibración**

Con un  $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$  y  $Ec = 15000\sqrt{f'c}$  en  $\text{kg/cm}^2$  para la estructura del auditorio se encuentra que la matriz de rigidez espacial y la matriz de masas son las siguientes:

$$KE = \begin{bmatrix} 3086.64 & 0 & -787.09 \\ 0 & 1114.42 & 0 \\ -787.09 & 0 & 165364.55 \end{bmatrix}$$

$$ME = \begin{bmatrix} 27.11 & 0 & 0 \\ 0 & 27.11 & 0 \\ 0 & 0 & 1330 \end{bmatrix}$$

Al calcular el determinante  $\det|K - \lambda M| = 0$  se encuentran las raíces del polinomio característico  $P(\lambda)$ , se hallan los valores propios  $\lambda$ ; y las frecuencias y períodos de vibración se calculan con las expresiones:

$$W_{ni} = \sqrt{\lambda_i}$$

$$T_i = \frac{2\pi}{W_{ni}}$$

Los resultados son:

$$W_n = \begin{bmatrix} 6.4115 \\ 10.6026 \\ 11.2150 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 0.9800 \\ 0.5926 \\ 0.5602 \end{bmatrix}$$

- **Aceleraciones espectrales**

Para calcular la aceleración espectral de la estructura, se sigue la normativa NEC-11 con las siguientes consideraciones:

Se utiliza un factor de reducción de fuerzas sísmicas  $R=4$ ; el factor de irregularidad en planta y elevación es 1 ya que no existen irregularidades y finalmente ya que la estructura se encuentra ubicada en Quito, ciudad de la Sierra, está en la zona sísmica V que tiene un valor de  $Z = 0.4g$  y  $\eta = 2.48$ .

El tipo de suelo en el que se encuentra es el tipo E que corresponde a arcillas blandas por lo que los factores de sitio  $Fa = 1.15$  y  $Fd = 1.6$ ; y el factor de comportamiento inelástico del suelo  $Fs = 1.9$

Como los períodos de vibración se encuentran antes del punto donde inicia la rama descendente del espectro se tiene que la aceleración espectral es  $Ad = 2.795 \text{ m/s}^2$

- **Derivas de piso**

El último paso es el cálculo de las derivas de piso para lo que es necesario primero conocer los desplazamientos modales que se determinan en base a los períodos de vibración, factores de participación modal y la aceleración espectral.

Los valores de desplazamientos obtenidos son:

$$q = \begin{bmatrix} 0.0915 \text{ m} \\ 0.2720 \text{ m} \\ 0.0065 \text{ rad} \end{bmatrix}$$

Las derivas de piso se encuentran al dividir los desplazamientos transversal y longitudinal para la altura de piso que es 6 m y se las expresa en porcentaje; se tiene derivas de 1.5251% en sentido transversal y de 4.5328% en el sentido longitudinal.

Como bien se conoce el NEC-11 limita el valor de las derivas de piso a un máximo del 2% para estructuras de hormigón armado y en ésta en particular tenemos más del doble en un sentido, con lo cual se confirman las sospechas de que a la estructura le falta rigidez.

## Reforzamiento de la estructura con FRP

En vista de los altos valores de derivas de piso determinados para la estructura del auditorio; el colocar solo refuerzo con FRP es por mucho insuficiente, ya que la fibra de carbono aporta con resistencia pero con muy poco en rigidez y por lo tanto se hace necesario antes de reforzar con FRP, rigidizar la estructura para disminuir las derivas, es por eso que se opta por colocar diagonales de acero en los vanos centrales de los dos pórticos longitudinales para mejorar el comportamiento de la estructura frente a un sismo.

- **Descripción de la estructura reforzada**

El reforzamiento consiste primeramente en colocar dos diagonales de acero de forma cuadrada de 200x4 mm en los vanos centrales de los pórticos longitudinales, que van desde la base de las columnas al centro de la luz como se indica en la figura 6, cada diagonal tiene un área de 30.9 cm<sup>2</sup> y una inercia de 1970 cm<sup>4</sup>, hasta aquí se realiza un primer cálculo y los resultados muestran que la estructura aumenta su rigidez ya que la deriva longitudinal baja considerablemente pasando de 4.5328% a 0.9503%,

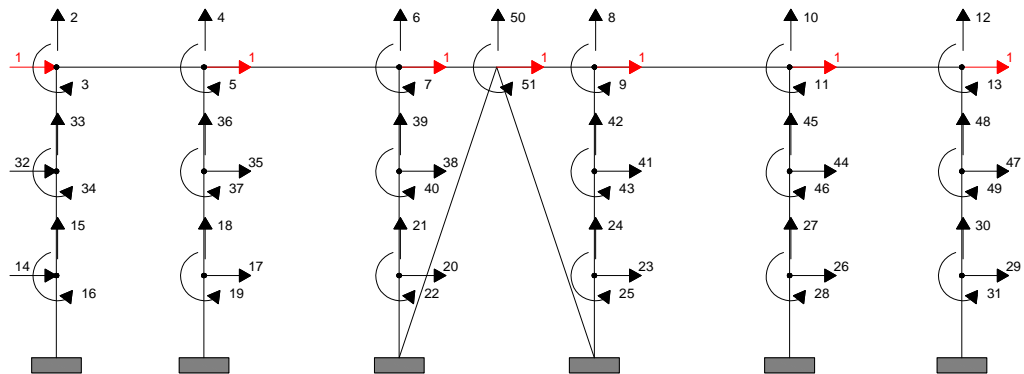


Figura 6 Pórticos 1 y 2, reforzados con diagonales metálicas

Esta redistribución de rigidez provoca que en el otro sentido la deriva de piso aumente un poco al pasar de 1.5251% a 1.6368%, esto ya no es un problema porque las dos derivas son menores al 2% que establece el código, e incluso se las puede disminuir aún más para que sean menores al 1.5%, esto se logra al envolver a las columnas con 2 o 3 capas de tejido de fibra de carbono lo cual aumenta también su capacidad resistente a flexo-compresión.

- **Períodos de vibración**

Se refuerzan todas las columnas, excepto las esquineras, con un encamisado de 3 capas de tejido SikaWrap Hex 103C cuyas propiedades son:

$$f_{fu}^* = 6510 \frac{kg}{cm^2} \quad \varepsilon_{fu}^* = 0.0091$$

$$E_f = 623540 \frac{kg}{cm^2} \quad t_f = 0.1016 \text{ cm}$$

Se obtiene un nuevo  $f'_{cc} = 350 \text{ kg/cm}^2$  y un  $E_c = 15000\sqrt{f'_{cc}}$  en  $kg/cm^2$  para hormigón confinado con FRP, con una curvatura de 3cm en las esquinas de las columnas para mejorar la adherencia y la resistencia de las mismas.

Con el aporte del acero y el aumento en la resistencia del concreto por efecto del confinamiento con FRP, la matriz de rigidez cambia como se indica a continuación, mientras que la matriz de masas es la misma.

$$KE = \begin{bmatrix} 3616.39 & 0 & -967.21 \\ 0 & 5494.49 & 0 \\ -967.21 & 0 & 313411.88 \end{bmatrix}$$

Las frecuencias aumentan por lo tanto los períodos de vibración disminuyen:

$$W_n = \begin{bmatrix} 11.5388 \\ 14.2364 \\ 15.3591 \end{bmatrix}$$

$$T = \begin{bmatrix} 0.5445 \\ 0.4413 \\ 0.4091 \end{bmatrix}$$

- **Aceleraciones espectrales**

Bajo las mismas consideraciones anteriores se realiza el cálculo de la aceleración espectral:

$$R=4; \phi_p \text{ y } \phi_e = 1; Z = 0.4g; \eta = 2.48, \\ Fa = 1.15, Fd = 1.6 \text{ y } Fs = 1.9$$



Como era de esperarse los períodos de vibración disminuyen con respecto a los anteriores y también se encuentran antes del punto donde inicia la rama descendente del espectro por lo que se tiene la misma aceleración espectral  $A_d = 2.795 \text{ m/s}^2$

- **Derivas de piso**

Finalmente se determinan los desplazamientos y derivas de piso que son menores al 1.5% con lo que la estructura se encuentra rigidizada y reforzada ante un posible evento sísmico.

$$q = \begin{bmatrix} 0.0838 \text{ m} \\ 0.0552 \text{ m} \\ 0.0007 \text{ rad} \end{bmatrix}$$

Por último, la deriva transversal es de 1.3965% y de 0.9194% en el sentido longitudinal.

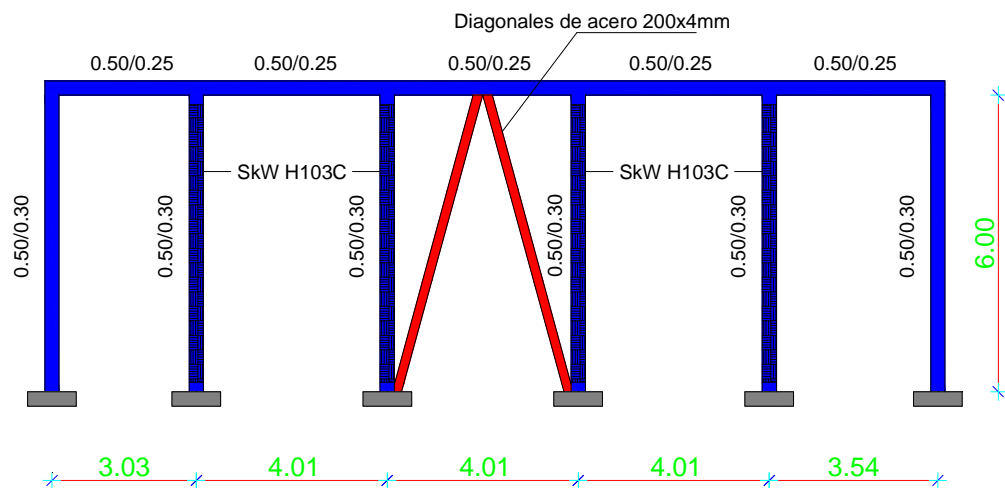


Figura 7 Plano de reforzamiento de pórticos longitudinales

## CONCLUSIONES

- El tipo de fibra y espesor óptimo dependen del propósito de la aplicación y nivel de refuerzo requerido. Pero en general, se concluye que a menor rigidez del material compuesto, se necesita mayor espesor del refuerzo.

Se debe considerar por igual el deseo de mantener o incrementar la carga de servicio o la carga última, así como la deformabilidad y la ductilidad.

- En vista de que las secciones reforzadas con FRP tienen capacidades de rotación y curvatura mucho más reducidas que aquellas que no están reforzadas, se debe tener mucho cuidado al utilizar esta metodología para mejorar la capacidad de estructuras que resisten cargas sísmicas, se deberá examinar primero el comportamiento del marco reforzado y el efecto de la inversión de las cargas sísmicas sobre el refuerzo FRP, antes de aplicarlo en zonas de articulación plástica.
- El rango de aplicación del sistema de refuerzo mediante materiales compuestos es muy amplio, se puede llevar a cabo no sólo donde los requerimientos de altas prestaciones, maniobrabilidad y rapidez de la ejecución constituyan un punto importante, sino, también, donde el planteamiento sea estrictamente económico, gracias al ahorro que se obtiene por la utilización de medios auxiliares ligeros con plazos de ejecución mínimos frente a otras alternativas de refuerzo más convencionales.

## REFERENCIAS

1. ACI 440.2R-08 *Guide for the Design and Construction of externally bonded FRP systems for strengthening Concrete Structures*. Reported by ACI Committee 440.
2. A.C.I. (2008), *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural y Comentario (ACI 318S-08)*, American Concrete Institute, Versión en Español y en sistema métrico, U.S.A.
3. Aguiar R., (2002), *Sistema de computación CEINCI 3 para evaluar daño sísmico en los Países Bolivarianos*. Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército. 302 p., Quito.
4. Aguiar R., y Rosero L., (2012), *Reforzamiento de losa de Biblioteca del Centro Educativo Fernández Madrid con CarboDur S 512, PLANMAN*, 24 p., Quito.
5. Monti G., (2003), "Seismic Upgrade of Reinforced Concrete Columns with FRP", Università La Sapienza di Roma, Italy.