

Muros estructurales y diafragmas

Structural walls and diaphragms

Paredes estruturais e diafragmas

Luisa P. Viera-Arroba ¹
Universidad Central del Ecuador
Quito; Ecuador
pauliviera@engineer.com
lviera@uce.edu.ec

Pablo E. Caiza-Sánchez ^{II}
Escuela Politécnica del Ejército
Quito; Ecuador
pecaizal@espe.edu.ec

Recibido: 30 de enero de 2017 * **Corregido:** 2 de febrero de 2017 * **Aceptado:** 1 mayo de 2017

- ^{I.} Ingeniera Civil; por la Universidad Técnica de Ambato; Magister en Ingeniería Estructural Sismorresistente; por la Universidad Técnica de Ambato; Profesora titular de la Cátedra de Construcciones 1; Carrera de Ingeniería Civil; Facultad de Ingeniería, Ciencias Físicas y Matemática, Universidad Central del Ecuador, desde el año 2014.
- ^{II.} Ingeniero Civil, por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; MSc. en Ingeniería Estructural Sismorresistente, por la Escuela Politécnica Nacional; Philosophy Doctor en Ingeniería Civil, Por la University of Illinois at Urbana Champaign; Profesor titular en las Cátedras de Hormigón desde 1992 en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Resumen.

Como respuesta a los severos daños sufridos por muchas edificaciones durante el sismo de 16 de abril de 2016 se presenta una alternativa de construcción diferente a la tradicionalmente aceptada en el país. Esta alternativa da gran importancia a los muros estructurales para que junto con pórticos produzcan estructuras más seguras ante las cargas sísmicas. Se desarrolla un ejemplo de aplicación que resalta el prediseño orientado al control de derivas y cargas y luego, el diseño de diafragmas y elementos tales como cordones y colectores de esfuerzos. Se concluye que la construcción de estructuras duales con muros y diafragmas es una opción prometedora.

Palabras Clave: Muros estructurales; diafragmas.

Abstract.

In response to the severe damage suffered by many buildings during the earthquake of April 16, 2016, there is a different construction alternative to that traditionally accepted in the country. This alternative gives great importance to the structural walls so that along with porticos they produce structures more secure in the face of seismic loads. An example of application is developed that emphasizes the predesignation oriented to the control of drifts and loads and then, the design of diaphragms and elements such as cords and manifolds of efforts. It is concluded that the construction of dual structures with walls and diaphragms is a promising option.

Keywords: Structural walls; diaphragms.

Resumo.

Em resposta ao dano grave para muitos edifícios durante o terremoto de 16 de abril, 2016 alternativa diferente da construção tradicionalmente aceita no país é apresentado. Esta alternativa dá grande importância às paredes estruturais com pórticos para produzir estruturas mais seguras para cargas sísmicas. um exemplo de aplicação que destaca o monitoramento deriva orientado e cargas e, em seguida, projetar elementos, tais como diafragmas e cabos e esforços de design preliminares coletores desenvolve. Conclui-se que a construção de estruturas duplas com paredes e diafragmas é uma opção promissora.

Palavras chave: Paredes estruturais; diafragmas.

Introducción.

Luego del sismo de Bahía de 04 de Agosto de 1998, de magnitud Mb 7.1, a una profundidad de 34 km y a una distancia de 10 km de la ciudad de Bahía de Caráquez, los mejores ingenieros civiles del país ya se enfrentaron a la tarea de reparar y reforzar muchas estructuras de hormigón armado sobre todo en esa ciudad. Se distinguen dos alternativas diferentes. La primera fue reforzar columnas y vigas mediante encamisados. El objetivo, logrado, fue reducir las derivas por debajo del valor de 0.02. Una limitación fue el volumen importante de los encamisados que afectaban la concepción arquitectónica. Sin embargo, el sismo de 16 de abril de 2016 (sismo 16A), de magnitud Mb 7.8, a una profundidad de 20 km y a una distancia de 112 km de Bahía de Caráquez, volvió a afectar estas estructuras y, prácticamente con los mismos daños, de nuevo en las mamposterías. Una conclusión clara es que las estructuras aporricadas de hormigón armado no pueden ser reforzadas, dentro de límites aceptables arquitectónicamente, para soportar sismos moderados o graves con relativamente poco daño en la mampostería.

La segunda alternativa consistió en el reforzamiento mediante muros estructurales y la conexión adecuada de las mamposterías a los elementos resistentes. Estas estructuras, en efecto, sufrieron daños mucho menos severos como resultado del sismo del 16A.

Este artículo muestra una metodología para impulsar el uso de muros estructurales en nuestro país. Debido a su rigidez, absorben porcentajes muy importantes de las cargas sísmicas, por lo que es necesario diseñarlos con cuidado pero, además, es necesario prestar atención a sus conexiones y a su comportamiento con otros elementos estructurales tales como las losas, que en este caso, debido a que trabajan no sólo ante cargas perpendiculares sino también paralelas a su plano, se denominan diafragmas.

Análisis

Los muros estructurales en edificios de hormigón armado funcionan como cantilivers [1]. Si su relación de aspecto, alto para largo, es mayor a 2, funcionan predominantemente a flexión. Sin embargo, el cortante no puede ser ignorado si esta relación de aspecto está entre 2 y 0.5 y, controla el funcionamiento estructural si la relación de aspecto es menor a 0.5. En resumen, junto a los términos de flexión se tienen que incluir los de corte, por ejemplo, en el caso del desplazamiento lateral $\Delta_{lateral}$ de un cantiliver [2]:

$$\Delta_{lateral} = \frac{P \cdot H^3}{3EI} + \frac{P \cdot H}{G \cdot A_e} \quad (1)$$

Donde P es una carga lateral, H es la altura del cantiliver, E es el módulo de elasticidad, I es la inercia de la sección transversal, G es el módulo de cortante y A_e es el área efectiva de cortante de la sección, en el caso de secciones rectangulares igual al área gruesa reducida por $2/3$.

Hay que insistir en que lo anterior requiere que en el análisis matricial de las estructuras, no baste con los términos tradicionales de flexión sino que hay que incluir los efectos de corte.

Por otra parte, para modelar un muro con el método tradicional de análisis de pórticos, en el que se lo representa como un elemento unidimensional similar a una columna, hay que mostrar la intersección con las vigas por medio de extremos de rigidez infinita. Las matrices de rigidez que incluyen el efecto de corte y extremos de rigidez infinita pueden ser encontradas en referencias tales como [2] y [3]. Nótese que los programas de cálculo estructural incluyen de manera estándar los efectos de corte y pueden modelar fácilmente los extremos de rigidez infinita.

Es necesario recalcar que el objetivo de incluir muros en una estructura aperticada es cambiar su comportamiento, como se notaría en la reducción sustancial de las derivas de piso. En la (*Figura N° 1*), se observa la respuesta ante cargas sísmicas de un pórtico y un muro aislados y luego, cuando trabajan en conjunto.

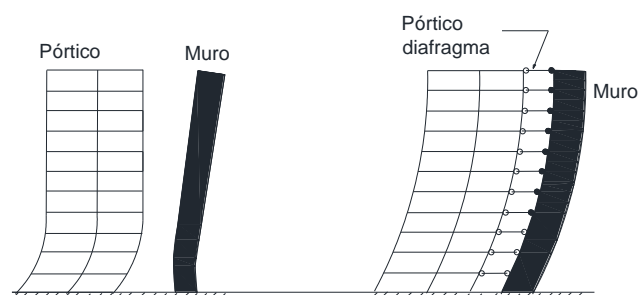


Figura N° 1.- Comportamiento estructural

La (*Figura N° 1*) muestra que muros y pórticos se complementan, puesto que los desplazamientos del pórtico son mayores en los primeros pisos, pero que los del muro lo son en los últimos. Al trabajar en conjunto, los desplazamientos se reducen en todos los pisos. Esto es posible gracias a los elementos de nexo entre el pórtico y muro. No son vigas, pues sus anchos serían muy grandes respecto al espesor del muro, dificultando su conexión. Son elementos que simplemente forman parte de los diafragmas. Nótese que se los ha modelado como barras con articulaciones en sus extremos, es decir que trabajan fundamentalmente a compresión y tracción y no a flexión.

A continuación, se revisará el reto de colocar muros y pórticos en modelos 3D. Se aprovechará la idea que se ha desarrollado previamente de que pórticos y muros no necesitan estar juntos sino que se los conecta con los diafragmas. Sin embargo, un criterio adicional es que, debido a que los pórticos y muros absorben mucha carga, hay que procurar que no produzcan efectos indeseables tales como torsión en planta. Por este motivo su disposición debe ser simétrica,

Muros estructurales y diafragmas

procurando que el centro de masas de los diafragmas coincida con el de rigidez. Por otra parte, se distinguirán elementos estructurales pensados para soportar cargas laterales de los que más bien resisten cargas verticales. Con estas ideas en mente, se propone la configuración estructural que se muestra en la (*Figura N° 2*).

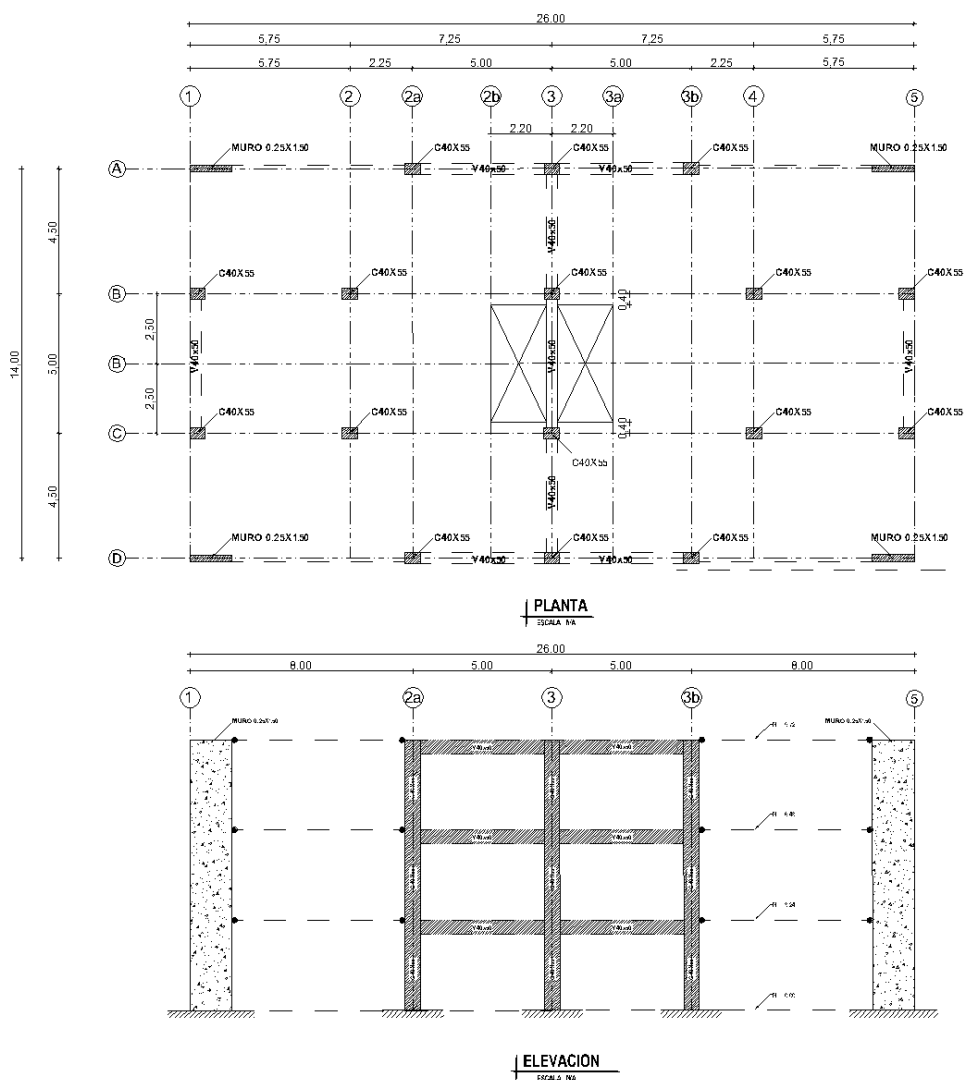


Figura N° 2.- Configuración estructural

En la (*Figura N° 2*) aún son predominantes los pórticos, pero ya no son continuos, y ya los muros juegan un papel importante. Las cargas entre pórticos y muros se distribuyen con cordones y colectores. El diafragma debe ser adicionalmente diseñado para cargas verticales. Por este motivo aparecen las columnas en los ejes 2 y 4. Aquí debe chequearse punzonamiento. Finalmente, la distribución de elementos verticales es simétrica, con el fin de que el centro de masas coincida con el de rigideces.

En este artículo, el predimensionamiento de estos elementos estructurales se basa en el análisis aproximado de MacLeod [2], que determina el desplazamiento lateral máximo de la edificación, la fuerza cortante máxima en los pórticos y el momento de volteo en la base de los muros. Por su importancia este método se describe a continuación.

El desplazamiento lateral máximo $\Delta_{m\acute{a}x}$ de la edificación se asume igual a:

$$\Delta_{m\acute{a}x} = \frac{P}{K_f} \quad (2)$$

Donde P es la carga que resultaría si muros y pórticos están unidos únicamente a nivel del piso más alto, K_f es la rigidez lateral de los pórticos y conceptualmente es igual a

$F_{\text{último piso en los pórticos}} / \Delta_{\text{último piso}}$. Se podría calcular como:

$$\frac{1}{K_f} = \sum_n \left(\frac{1}{R_i} \right) \quad (3)$$

Donde R_i es la rigidez lateral del entrepiso i , y n es el número de pisos. K_f no es más que la rigidez equivalente de un sistema formado por resortes en serie.

Muros estructurales y diafragmas

Las rigideces laterales de entrepiso R_i se calculan de forma aproximada usando las fórmulas de

Wilbur. Si las columnas están empotradas en su base, y considerando $k = \frac{\text{Inercia}}{\text{Longitud}}$:

$$\text{Primer entrepiso, } R_1 = \frac{48E}{D_1 h_1} \quad (4a)$$

$$D_1 = \frac{4h_1}{\sum k_{c1}} + \frac{h_1+h_2}{\sum k_{t1} + \frac{\sum k_{c1}}{12}} \quad (4b)$$

Donde E es el módulo de elasticidad, h_1, h_2 son las alturas del primer y segundo entrepisos, $\sum k_{c1}$ es la suma de las rigideces de las columnas del primer entrepiso y $\sum k_{t1}$ es la suma de las rigideces de las vigas del primer entrepiso.

$$\text{Segundo entrepiso, } R_2 = \frac{48E}{D_2 h_2} \quad (5a)$$

$$D_2 = \frac{4h_2}{\sum k_{c2}} + \frac{h_1+h_2}{\sum k_{t1} + \frac{\sum k_{c1}}{12}} + \frac{h_2+h_3}{\sum k_{t2}} \quad (5b)$$

Donde h_1, h_2, h_3 son las alturas del primer, segundo y tercer entrepisos, $\sum k_{c1}, \sum k_{c2}$ son las sumas de las rigideces de las columnas del primer y segundo entrepisos y $\sum k_{t1}, \sum k_{t2}$ son la suma de las rigideces de las vigas del primer y segundo entrepisos.

Otros entrepisos,

$$R_n = \frac{48E}{D_n h_n} \quad (6a)$$

$$D_n = \frac{4h_n}{\sum k_{cn}} + \frac{h_m+h_n}{\sum k_{tm}} + \frac{h_n+h_o}{\sum k_{tn}} \quad (6b)$$

Donde el subíndice n se refiere el número del entrepiso que se calcula, m es el número del entrepiso inferior y o es el del entrepiso superior.

Según MacLeod:

$$\frac{P}{W} = 0.55 \frac{\sum K_f}{\sum K_f + \sum K_m} \quad (7)$$

Donde W es la carga lateral total aplicada [5], [6], [7], [8], [9], $\sum K_f$ es la sumatoria de las rigideces laterales globales de cada pórtico, y $\sum K_m$ es la sumatoria de las rigideces laterales globales de cada muro.

Las rigideces laterales globales de muro $\sum K_m$ se calculan como:

$$\sum K_m = \frac{3E}{H^3} \sum I_m \quad (8)$$

Donde $\sum I_m$ es la suma de las inercias de las secciones de los muros. Vale la pena resaltar que esta rigidez se calcula de la fuerza necesaria para producir un desplazamiento unitario en el tope de un cantiliver.

En la ecuación de MacLeod se controla que la rigidez de los muros sea por lo menos el 25 % de la rigidez de los pórticos.

La ecuación que determina $\Delta_{m\acute{a}x}$ se usa para controlar que la deriva sea menor a 0.015.

La ecuación para calcular la fuerza cortante máxima $V_{m\acute{a}x}$ en los pórticos es:

$$V_{m\acute{a}x} = 1.3 P \quad (9)$$

Muros estructurales y diafragmas

La ecuación para calcular el momento de volteo en la base del muro M_{muro} es:

$$M_{muro} = M_{total} - P * H \quad (10)$$

Donde M_{total} es igual a la suma de las fuerzas sísmicas en cada piso por la distancia al piso, y H es la altura total de los muros.

Una vez determinada la geometría y las cargas actuantes en la estructura se continúa con el diseño de la misma. Un procedimiento estándar para los muros está descrito en la referencia [4].

El diseño del diafragma debe empezar por el cálculo de las cargas aplicadas sobre este. Obsérvese la (*Figura N° 3*).

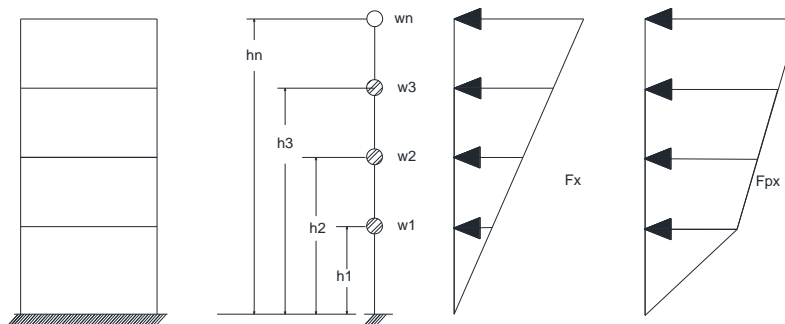


Figura N° 3.- Cargas sísmicas para el análisis de pórticos y diafragmas.

La (*Figura N° 3*) muestra que las cargas para el análisis de los diafragmas son mayores que para el pórtico porque se usan los cortantes, es decir la suma de las cargas de piso. Sin embargo, para evitar excesivo conservadurismo, cada diafragma se analiza por separado.

Según ASCE 7-10 [10]:

$$F_{px} = \frac{\sum_{i=x}^n F_i}{\sum_{i=x}^n w_i} w_{px} \quad ASCE7 - 10: 12.10 - 1$$

Donde F_{px} es la fuerza de diseño del diafragma, F_i es la fuerza de diseño aplicada en el nivel i , w_i es el peso tributario en el nivel i , w_{px} es el peso tributario al diafragma del nivel x .

La fuerza determinada en la ecuación ASCE7-10:12.10-1 no necesita ser menor que

$$F_{px} = 0.2S_{DS}I_e w_{px} \quad ASCE7 - 10: 12.10 - 2$$

Ni tampoco ser mayor que

$$F_{px} = 0.4S_{DS}I_e w_{px} \quad ASCE7 - 10: 12.10 - 3$$

Donde S_{DS} es la aceleración espectral máxima del espectro de diseño y I_e es la importancia de la estructura.

Un modelo sencillo del diafragma es el de una viga con tres apoyos y carga distribuida como se observa en la (*Figura N° 4*).

Muros estructurales y diafragmas

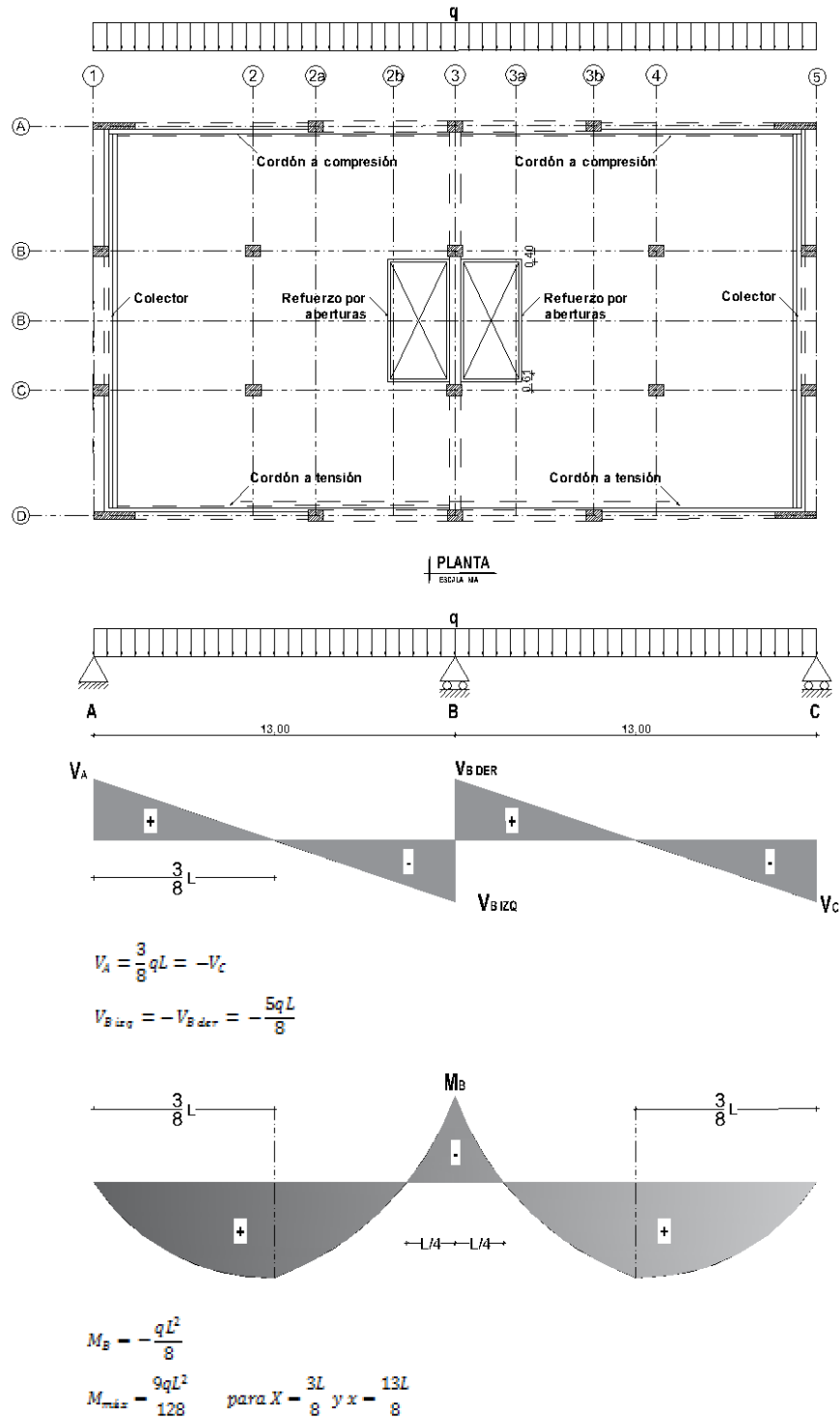


Figura N° 4.- Modelo de diafragma, cortante y momento

El momento se resiste con un par de fuerzas a compresión y tensión en los denominados cordones del diafragma. El cortante es absorbido y llevado a los elementos de soporte, los muros, por medio de los denominados colectores [11], [12], [13].

Debido a la presencia de aberturas en los diafragmas hay que crear mecanismos que transmitan las cargas alrededor de estas aberturas, ver (*Figura N° 5*).

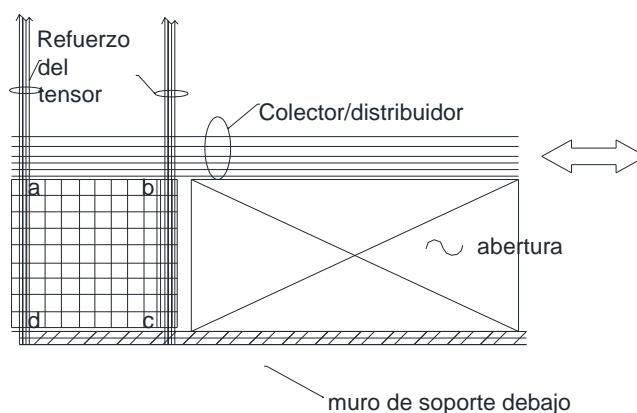


Figura N° 5.- Distribución de cargas alrededor de aberturas.

Finalmente, las cargas de elementos tales como los colectores [11],[12] deben ser transmitidos a los muros como se indica en la (*Figura N° 6*):

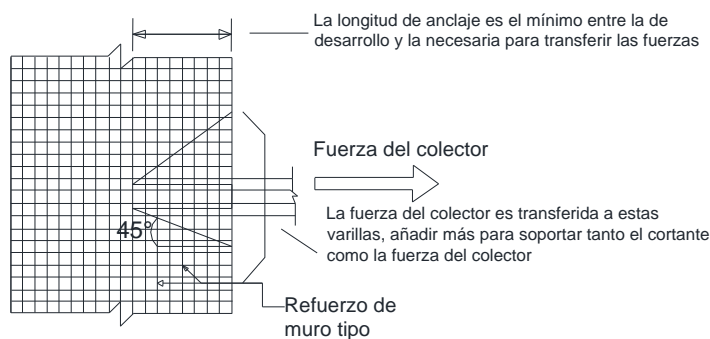


Figura N° 6.- Transferencia de carga

Conclusiones

Los sismos del año 2016 muestran la necesidad de explorar alternativas de construcción diferentes a las tradicionalmente aceptadas en el país. Este artículo examina el uso de muros estructurales junto a pórticos. Se propone construirlos separados unos de otros pero unidos a través de los diafragmas. Se presta especial atención al diseño de estos últimos.

Este artículo hace énfasis en el análisis ante cargas laterales. Las cargas verticales se absorben a través de elementos estructurales específicamente diseñados para resistirlas independientemente de las cargas laterales.

La propuesta de configuración planteada en este artículo da gran importancia a los muros estructurales, que deben absorben más del 25% de las cargas laterales sísmicas. Estas cargas son transmitidas y distribuidas a través de los diafragmas, haciendo que las cargas dentro de su plano sean tan importantes como las perpendiculares a su plano.

El diseño de elementos tales como cordones y colectores y el detallamiento de sus conexiones con los muros, es parte fundamental del diseño de los diafragmas.

La opción presentada, debido a un mejor control de derivas y cargas resultantes, es una opción prometedora respecto a la construcción tradicional de edificios de hormigón armado.

Bibliografía.

- [1] J. P. Moehle, T. Ghodsi, J. D. Hooper, D. C. Fields, R. Gedhada, Seismic design of cast-in-place concrete special structural walls and coupling beams, NIST CR 11-917-11REV-1, August 2011, Revised March 2012.
- [2] E. Bazán, R. Meli, Diseño Sísmico de Edificios, Limusa Noriega Editores, 2003.

Muros estructurales y diafragmas

- [3] R. Aguiar, *Análisis Matricial de Estructuras*, Editorial ESPE, 2010.
- [4] P. Caiza, S. Criollo, *Diseño de muros de hormigón armado en zonas sísmicas*, Memorias 1er Seminario Internacional Annual, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE y Universidad Central del Ecuador, 2015.
- [5] NEC-15, NEC-SE-CG, Norma Ecuatoriana de la Construcción – Seguridad Estructural – Cargas (no sísmicas), Norma Ecuatoriana de la Construcción, diciembre 2014.
- [6] NEC-15, NEC-SE-DS, Norma Ecuatoriana de la Construcción – Seguridad Estructural – Diseño Sismo Resistente, Norma Ecuatoriana de la Construcción, diciembre 2014.
- [7] NEC-15, NEC-SE-HM, Norma Ecuatoriana de la Construcción – Seguridad Estructural – Estructuras de Hormigón Armado, Norma Ecuatoriana de la Construcción, diciembre 2014.
- [8] NEC-15, NEC-SE-RE, Norma Ecuatoriana de la Construcción – Seguridad Estructural – Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras, Norma Ecuatoriana de la Construcción, diciembre 2014.
- [9] ACI Comité 318, *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-14)*, American Concrete Institute, USA, segunda impresión, enero de 2015.
- [10] ASCE Standard ASCE/SEI 7-10, *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures*, American Society of Civil Engineers, 2010.
- [11] J. P. Moehle, J. D. Hooper, D. J. Kelly, T. R. Meyer, *Seismic design of cast-in-place concrete diaphragms, chords, and collectors*, NIST GCR 10-917-4, 2010.
- [12] J. Moehle, *Seismic Design of Reinforced Concrete Buildings*, McGraw-Hill Education, 2015.
- [13] B. Taranath, *Tall Building Design*, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2017.