

Reducción de la Vulnerabilidad en Estructuras Esenciales de Hormigón Armado: Hospitales, Situadas en Zonas de Alto Peligro Sísmico en el Ecuador

Medina Christian¹; Placencia Patricio²

¹ Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica Ambato, Ecuador

² Escuela Politécnica Nacional, Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental Quito, Ecuador

Resumen: El presente trabajo analiza la influencia de la mampostería de relleno en el comportamiento inelástico de hospitales de hormigón armado, tomando en cuenta su respuesta ante las patologías más dañinas atribuidas a la interacción pórtico-mampostería. Para ello se diseñan las estructuras con sistema de pórticos de manera que cumplan con los requerimientos de la NEC-SE. Posteriormente se incorpora la mampostería y se analiza su influencia. Finalmente, se propone un cambio de enfoque en el sistema estructural, a través de la inclusión de un porcentaje mínimo de muros de corte, que permita minimizar al máximo los efectos negativos atribuidos a la mampostería, a más de cumplir con los requerimientos y desempeño expuesto en la norma.

Palabras clave: Influencia mampostería, Estructuras Esenciales, Reducción vulnerabilidad

Vulnerability Reduction in Essential Occupancy Reinforced Concrete Structures: Hospitals, Located in Ecuador's High Seismic Hazard Areas.

Abstract: This paper analyzes the influence of the masonry infill in the inelastic behavior of reinforced concrete hospitals, considering their response to the most harmful pathologies attributed to the frame – masonry infill interaction. To do this, framed structures are designed so that they meet the requirements of the NEC-SE. Subsequently it is incorporated the masonry infill to analyze and its influence in the structures behavior. Finally, it is proposed a change of approach in the structural system, through the inclusion of a minimum percentage of shear walls, which minimizes to the maximum the negative effects attributed to the masonry infill, more than meet the requirements and performance exhibited at the standard.

Keywords: Masonry Influence, Essential Structures, Special Structures.

1. INTRODUCCIÓN

El Ecuador es un país de alto peligro sísmico, pues durante los últimos 470 años, se han registrado numerosos sismos que han devastado ciudades enteras como Ambato, Riobamba, Ibarra entre otras (Yépez, 2007). Como consecuencia, se han realizado varios estudios de peligrosidad sísmica con la finalidad de disminuir el riesgo en las edificaciones. Sin embargo, el enfoque del sistema estructural principal resistente a cargas laterales no se ha mejorado, siendo el sistema aporticado el utilizado en la mayoría de los diseños.

Sin embargo, desde que se emitió el primer código de construcción el Código Nacional de la Construcción en 1951 consecuencia del sismo de Ambato de 1949, hasta la actualidad, el enfoque del sistema estructural principal resistente a fuerzas laterales, no ha cambiado, siendo el Sistema Estructural de Pórticos el que ha predominado en los diseños.

Este sistema estructural es muy susceptible a cambios en su comportamiento, debido a la presencia de mamposterías, que normalmente son consideradas como elementos no estructurales, pero que en realidad provocan graves irregularidades y patologías que se atribuyen a la interacción pórtico-mampostería, con consecuencias fatales para las estructuras, evidenciadas en experiencias de sismos pasados.

Además, la arquitectura moderna y los diseños vanguardistas, dan como resultado estructuras con irregularidades y patologías ocultas que inducen a la estructura a presentar deficiencias en su comportamiento, y que a menudo son ignoradas por los diseñadores. Es por ello que es necesario, mejorar el enfoque que se le da al tratamiento de las irregularidades, de manera que se pueda dar libertad en la configuración de las estructuras y la disposición de la mampostería, sin que esto afecte ni la estabilidad, ni el desempeño bajo cargas laterales que inducen a la respuesta inelástica de las estructuras.

cd.medina@uta.edu.ec
patohpla@hotmail.com
Recibido: 05/04/2016
Aceptado: 23/10/2017
Publicado: 31/10/2017

Características De Los Hospitales En El Ecuador

El presente estudio contempló la visita a varios hospitales de las ciudades de Quito y Ambato (ciudades de alto peligro sísmico), con la finalidad de recabar información acerca de las características generales que arquitectos e ingenieros aplican en el diseño de estas estructuras. De esta observación se pudo concluir que el sistema estructural principal resistente a carga lateral utilizado en el 95% de los casos es el sistema de pórticos.

1.1 Configuración geométrica

La configuración en planta de la gran mayoría de hospitales es rectangular, con una de las dimensiones generalmente unas 3 veces mayor a la otra dimensión. En elevación, estas estructuras presentan una configuración regular de pocos pisos de altura, normalmente entre 2 y 5 pisos, a excepción de algunos casos, y una altura de piso mayor a los 3m. En cuanto a las fachadas de hospitales ecuatorianos, se puede apreciar la existencia de ventanales largos que van de columna a columna, de poca altura, lo cual posibilita la existencia de columna corta.

1.2 Características de la mampostería

En la mayor parte de los hospitales observados se presenció la existencia de mampostería de buena calidad, generalmente hecha de ladrillo industrial o bloque estructural macizo de cemento. Sin embargo, en algunos casos se vio la presencia de mampostería de baja resistencia hecha de bloque hueco de cemento. Las paredes son gruesas de espesor igual o mayor a 15cm.

La distribución de la mampostería es otro de los factores que se analizaron para el estudio. En el piso inferior existe poca concentración de mampostería, debido a que en esta área se encuentran espacios para atención al cliente, recaudación, salas de espera, y la sala de emergencias. Apenas existen pocos consultorios. En este piso la distribución en planta de mampostería es irregular. En los pisos superiores existe gran concentración de mampostería de buena calidad, para dar paso a las habitaciones, salas de terapia intensiva, quirófanos, y consultorios. La distribución en planta de la mampostería en estos pisos es regular, y consiste generalmente en un pasillo largo de luz transversal corta que separa a las habitaciones que se encuentran de lado y lado.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Modelo Matemático de la Mampostería

El efecto de interacción de la mampostería de relleno sobre las estructuras aporricadas es un tema que ha sido estudiado analítica y experimentalmente durante varios años. De estos resultados se ha concluido que, en la mayoría de los casos de estudio, bajo carga lateral, las esquinas opuestas a la aplicación

de la carga se desprenden del pórtico debido a que no se los construye monolíticamente (Rochel, 1993). Es así que realmente, del muro de mampostería solo actúa una franja diagonal de ancho variable.

Es por ello que, para tener en cuenta la influencia de la mampostería en el comportamiento inelástico de los edificios se utiliza el método del puntal diagonal equivalente, el cual maneja un procedimiento estático no lineal. El método puede ser usado tanto para pórticos completamente rellenos como para paneles de mampostería parcialmente rellenos y con aberturas (Carrillo & González, 2007).

En cuanto al ancho de la diagonal equivalente, se adopta la ecuación expuesta en (FEMA356, 2000), que es una modificación al modelo de (Mainstone, 1971), el cual no se basa solo en la geometría sino en las propiedades mecánicas tanto de la mampostería como del hormigón del pórtico. Las ecuaciones en mención (1 y 2) son las siguientes:

$$\lambda = \left[\frac{E_m * t * \text{sen}2\theta}{4E_c * I_{col} * h} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

$$a = 0.175 * (\lambda * h)^{-0.4} * L \quad (2)$$

En donde λ es un factor de rigidez equivalente, E_m es el módulo elástico de la mampostería, t es el espesor de la pared, θ es el ángulo de inclinación del puntal, E_c es el módulo elástico del hormigón, I_{col} es la inercia de la columna del pórtico, h es la longitud de la columna, a es el ancho del puntal y L es la longitud del puntal. En la figura 1 se muestra el modelo estructural del puntal equivalente.

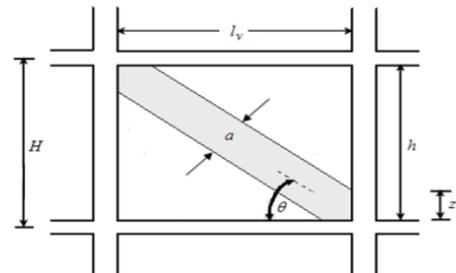


Figura 1. Modelo del Puntal Equivalente.

De acuerdo con modelos experimentales realizados por (Zabala & Zabala, 2006), y a la (Norma Ecuatoriana de Construcción, NEC-SE-DS Diseño Sismo Resistente, 2015), es aconsejable tomar un valor del módulo elástico de la mampostería dado por la ecuación 3:

$$E_m = 600 f' m \quad (3)$$

En donde $f' m$ es el esfuerzo a compresión de la mampostería. La resistencia del puntal se determina calculando la carga necesaria para alcanzar la resistencia a la compresión R_{compr} expresada en la ecuación 4:

$$R_{compr} = a * t * f' m \quad (4)$$

2.2 Modelos Constitutivos de los Materiales

El modelo utilizado para el hormigón es el modelo de Mander, el cual considera un aumento en la resistencia del hormigón de acuerdo tipo y cuantía de refuerzo transversal que se le haya dado a la sección. Es así que este modelo marca una diferencia entre el hormigón confinado y no confinado.

Por otro lado, para el acero de refuerzo, el modelo utilizado es el modelo de Park expuesto en (Priestley, Calvi, & Kowalsky, 2007) el cual considera una mesta de fluencia y el endurecimiento post-fluencia, observado en las curvas esfuerzo deformación de ensayos del acero.

2.3 Características del modelo planteado

Se plantearon varios modelos estructurales en un software especializado para análisis y cálculo estructural, basado en elementos finitos lineales que incorporan las características mecánicas del material constitutivo de la estructura. En el caso de vigas y columnas se trabajó con elementos finitos alámbricos a los cuales se les dotó de características no-lineales utilizando la metodología de plastificación concentrada en los extremos del elemento, representada mediante el diagrama momento-curvatura de cada una de las secciones analizadas. Para la representación de la mampostería como se ha mencionado previamente se utilizó la idealización del puntal equivalente, para lo cual se utilizaron elementos finitos alámbricos articulados en sus extremos que incorporan una rótula plástica en el centro del puntal trabajando a compresión axial únicamente. Se formaron tres tipos de modelos estructurales con sus respectivas variantes: Sistema Aporticado Sin Mampostería, Sistema Aporticado Con Mampostería y Sistema Dual Con Mampostería. En cada uno de los modelos generados se realizó un Análisis Lineal Estático y Dinámico (Modal – Espectral), para posteriormente proceder con el diseño de acuerdo con las normas NEC 2015 y ACI 318-14. Una vez diseñadas las estructuras, se realizó un Análisis Estático No Lineal con el fin de determinar el desempeño bajo las demandas sísmicas descritas en NEC 2015 para hospitales. Para ello se utilizó la metodología de Linealización Equivalente descrita en (FEMA440, 2005).

Los modelos generados se han realizado tomando en cuenta las características típicas de los hospitales ecuatorianos, descritas previamente. En la tabla 1 se describen las propiedades del modelo, y en la figura 2 se ilustra el mismo.

Tabla 1. Características del modelo

INDICADOR	CARACTERÍSTICA
Sistema Estructural Principal resistente a carga lateral	Pórticos de Hormigón Armado
Configuración Geométrica en Planta	Rectangular de 42m de largo X 16m de ancho
Configuración Geométrica en Elevación	Regular de 4 pisos
Luces entre ejes	7m en sentido X; 6m y 4m en sentido Y
Altura de Piso	4m
Características de la mampostería	$f_m = 10, 20, 35 \text{ kg/cm}^2$
Espesor de la mampostería	$e = 15\text{cm}$
Resistencia del Hormigón	$f_c = 240 \text{ kg/cm}^2$
Límite de Fluencia del Acero de Refuerzo	$f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$
Dimensión de Columnas	70cm x 70cm todos los pisos
Dimensión de vigas	40cm x 60cm todos los pisos

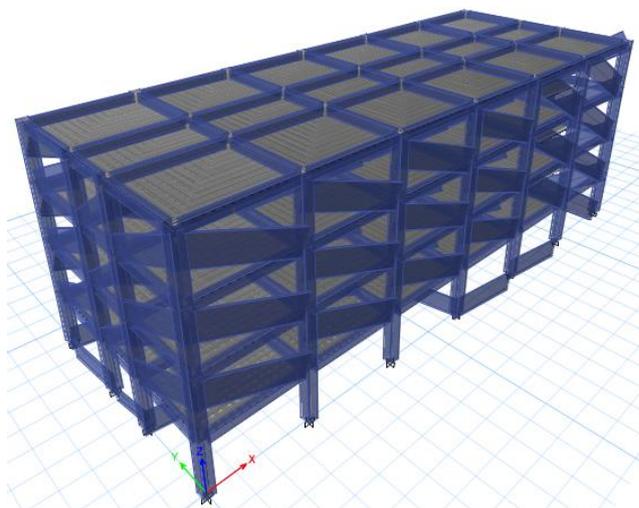


Figura2. Modelo del Puntal Equivalente.

Las estructuras se sitúan sobre un suelo tipo C en una zona sísmica V de alto peligro, en la cual se considera una aceleración del suelo de 0.4g para un sismo cuya probabilidad de excedencia sea del 10% en 50 años, y una aceleración de 0.7g para un sismo cuya probabilidad de excedencia sea del 2% en 50 años.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ESTRUCUTURA SIN MAMPOSTERÍA

3.1 Derivas de Piso

Del análisis de las derivas de piso inelásticas, se desprende que estas son menores al 2% permitidas por la NEC-SE para los dos sentidos de análisis. La deriva máxima se produce en el segundo piso lo cual va acorde con el comportamiento de una estructura aporticada, como se muestra en la figura 3. Por

medio de las derivas se puede distinguir la existencia de un piso blando, cuando se observa una amplificación drástica de la deriva en uno de los pisos. Dado que en este análisis no se incluye la mampostería aún y que no existen cambios abruptos en la dimensión de elementos estructurales, no existe piso blando.

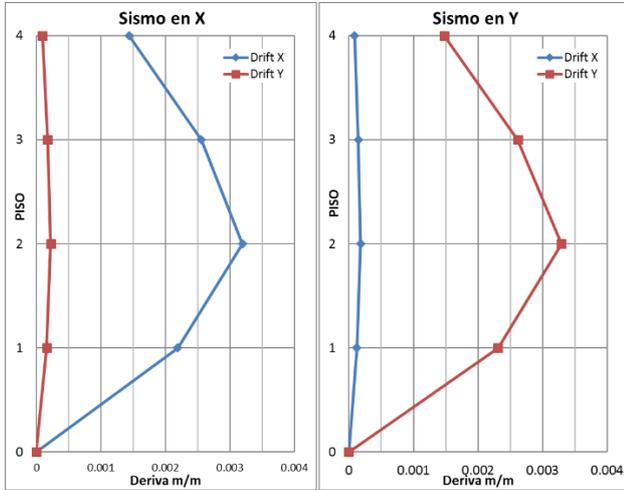


Figura 3. Derivas de Piso

3.2 Efecto de Torsión en planta

Para evaluar la torsión en planta se analiza las formas modales y el porcentaje de participación modal de la masa para los dos primeros modos de vibración. Los resultados para el modelo analizado se muestran en la tabla 2.

Tabla 2: Porcentaje de participación modal de la masa

Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ	%Torsión
1	0.695	0.832	0	0	0.036
2	0.664	0	0.831	0.005	0.601
3	0.601	0	0.005	0.832	

Como se puede observar en los dos primeros modos de vibración el movimiento es traslacional, pues en el caso del primer modo el porcentaje de masa modal predomina en el sentido en X, y en el segundo modo el sentido predominante es Y. En ambos casos la torsión no supera el 30% del porcentaje de participación predominante, por lo tanto, no existe torsión en planta.

3.3 Desempeño para el Sismo de Diseño (Tr=475años)

El punto de desempeño se lo halla para cada dirección siguiendo la metodología de la Linealización Equivalente descrita en (FEMA440, 2005). Para el sentido X la estructura alcanza el nivel de Seguridad de Vida, es decir se presentan daños limitados en los elementos estructurales, sin embargo, la probabilidad de pérdidas humanas es nula. Es decir, la estructura **cumple con el desempeño para el nivel de amenaza sísmica: Sismo de Diseño**.

En las figuras 4 y 5 se ilustran el punto de desempeño de la estructura y el nivel de daño generado en las zonas plásticas para el sentido X, respectivamente.

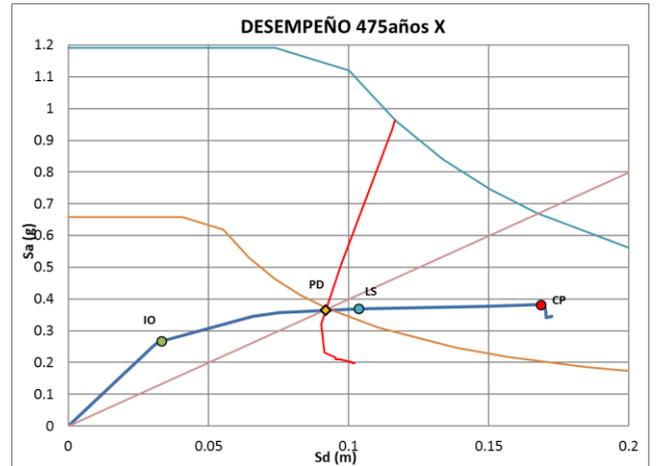


Figura 4. Punto de Desempeño para el Sismo de Diseño

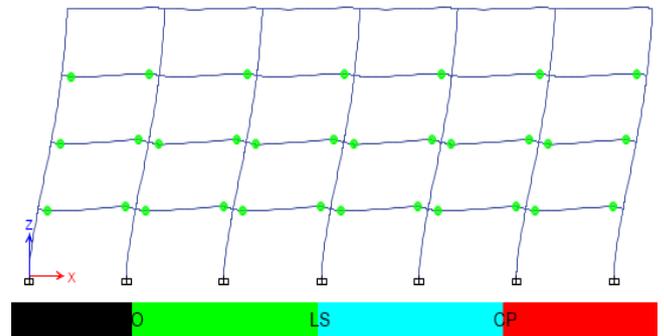


Figura 5. Nivel de Daño en el punto de desempeño

3.4 Desempeño para el Sismo Extremo (Tr=2500años)

La estructura alcanza el nivel de desempeño Prevención de Colapso a un desplazamiento de 22.40cm bajo un corte basal de 849.08Tn. La estructura **cumple con el desempeño para el nivel de amenaza sísmica: Sismo Extremo**, tal como se muestra en la figura 6.

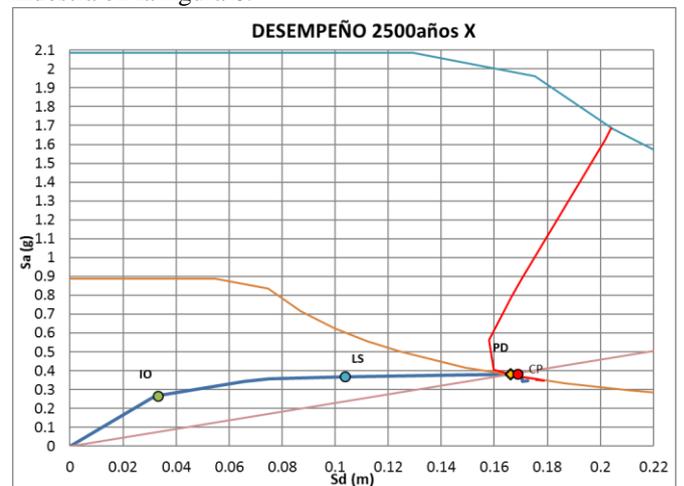


Figura 6. Punto de Desempeño para el Sismo Extremo

INFLUENCIA DE LA MAMPOSTERÍA

Como siguiente paso para este estudio, se incluirá la mampostería de relleno a los modelos analizados anteriormente, para analizar la influencia de esta en el comportamiento inelástico de las estructuras.

3.5 Análisis del Período de vibración

Al incluir la mampostería se aprecia que el periodo fundamental de vibración tiende a decrecer de manera exponencial conforme aumenta la resistencia de la mampostería. Esto es porque la mampostería aporta en gran medida a la rigidez de la estructura. Este efecto se evidencia en la figura 7.

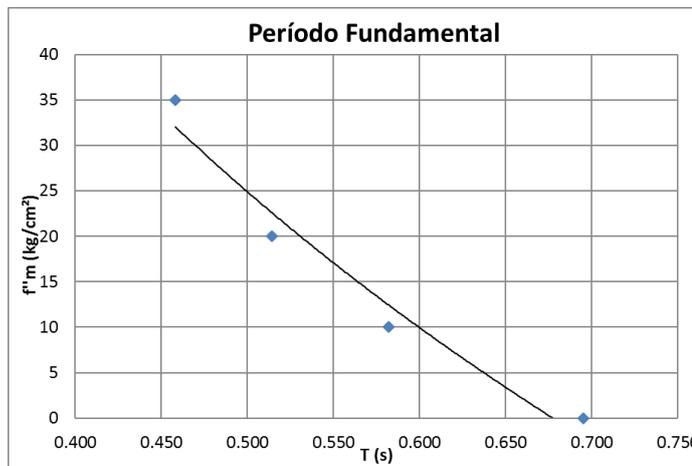


Figura 7. Variación del período fundamental

El período real de la estructura equivale a aproximadamente el 74% del período calculado sin la mampostería, resultando en un mayor input de aceleración que el suelo transmite, efecto que no es comúnmente considerado en el diseño.

3.6 Derivas de Piso y Piso Blando

Si bien las derivas de piso se reducen y cumplen con la deriva inelástica máxima de 0.02, también se debe tomar en cuenta el grado de daño generado en la mampostería. La mampostería deja de trabajar cuando se tiene una deriva de 0.01, a partir de este punto la mampostería inicia el proceso de colapso (Priestley, Calvi, & Kowalsky, 2007). En la figura 8 se puede ver que conforme aumenta la resistencia de la mampostería, las derivas del primer y segundo piso se invierten hasta que la deriva máxima se produce en el 1er Piso, notificando la presencia de un piso blando.

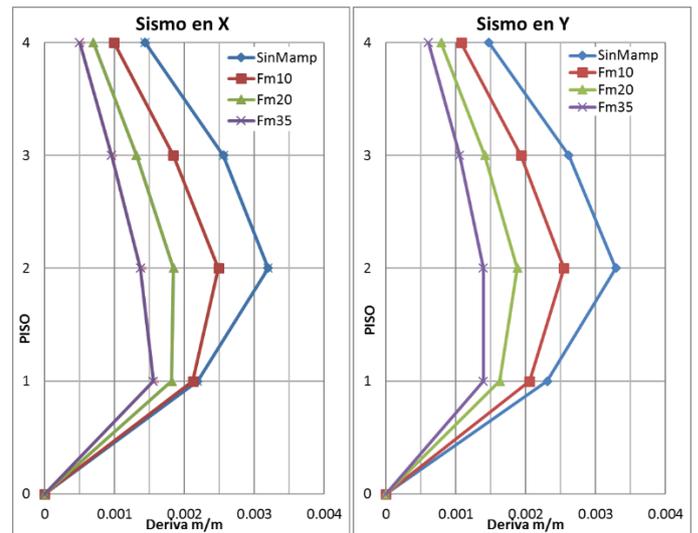


Figura 8. Derivas de Piso

Esto se ratifica al evaluar la distribución del corte en una de las columnas de la estructura, pues en la figura 9 se aprecia una amplificación drástica de la fuerza cortante en el primer piso.

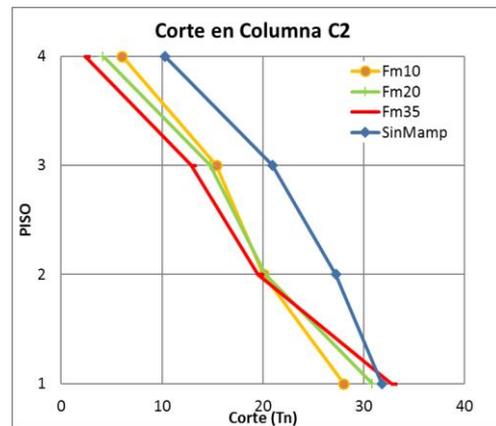
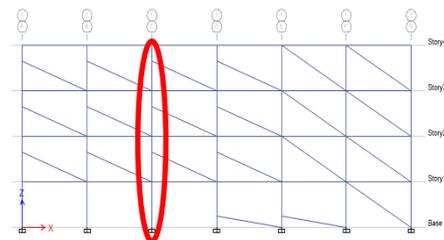


Figura 9. Corte en columna C2

3.7 Efecto de Columna Corta

En los modelos anteriores no fue posible hacer un análisis del efecto de columna corta, ya que en ellos no se incluyó la mampostería. Este es una patología oculta que la mayoría de las veces se pasa por alto por no verse reflejada en la modelación. En la figura 10 se muestra cómo la mampostería hace que el corte se amplifique de manera drástica en la sección de columna que queda libre, conforme aumenta la resistencia y rigidez de la mampostería.

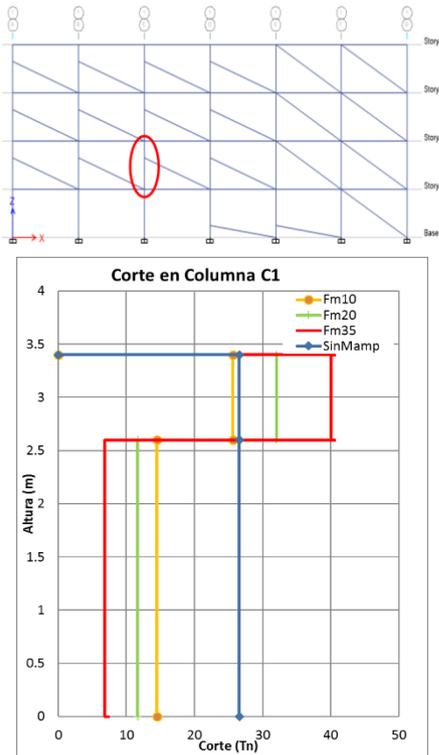


Figura 10. Corte en columna C1

Si bien la norma establece un procedimiento cuando existe la presencia de columnas cortas, este no es aplicable cuando la altura libre de la columna es menor a 4 veces el peralte del elemento, pues el elemento deja de trabajar a flexión para trabajar como un elemento de gran peralte, por lo que la analogía de la celosía para diseño a corte no es aplicable.

3.8 Efecto de Torsión en planta

Luego de realizar el análisis se observa que la mampostería influye notablemente en la torsión en planta, mostrando una tendencia lineal del aumento del porcentaje de torsión respecto al aumento de resistencia de la mampostería. Es así que, una estructura cuyos dos primeros modos de vibración eran totalmente traslacionales con un porcentaje de torsión del 0%, pueden llegar a ser totalmente torsionales por influencia de la mampostería de relleno, la cual es considerada como elemento "no estructural". En la figura 11 se observa la tendencia lineal creciente de este efecto.

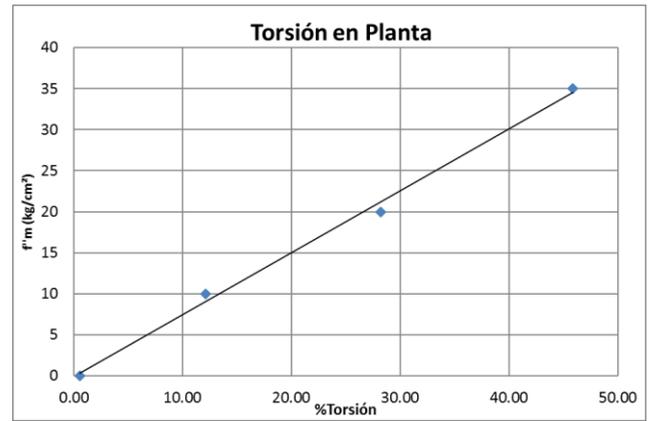


Figura 11. f'm vs %Torsión

3.9 Desempeño para el Sismo de Diseño (Tr=475años)

Después de realizar el análisis, para todos los casos en los que se incluyó la mampostería, se concluye que no se cumple con el desempeño requerido para estructuras esenciales para el nivel de amenaza: Sismo de Diseño, pues el nivel de desempeño alcanzado es Prevención de Colapso, cuando debería haberse limitado a Seguridad de Vida, como se muestra en la figura 12.

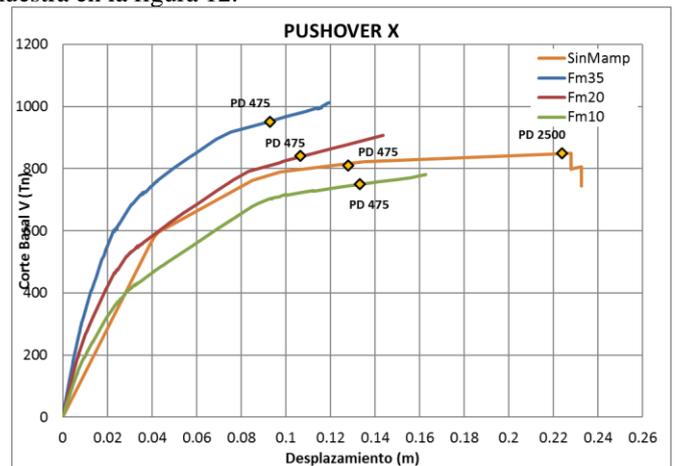


Figura 12. Punto de Desempeño para el Sismo de Diseño

En la figura 13 se aprecia que el nivel de daño alcanzado para el punto de desempeño es extenso en elementos no estructurales, toda la mampostería representada por los puntales se encuentra colapsada.

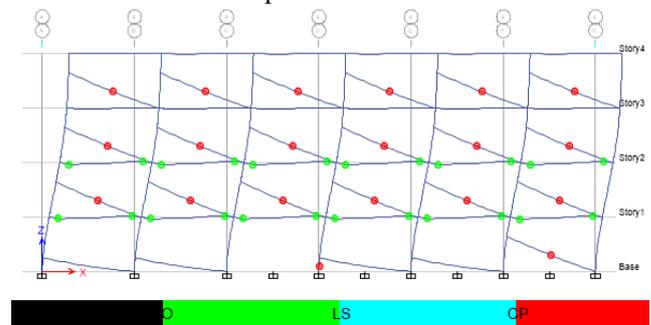


Figura 13. Nivel de Daño en el punto de desempeño

En el caso de los elementos estructurales se observa que todas las vigas del primer y segundo piso han sobrepasado la

fluencia y que incluso una de las columnas del primer piso se encuentra rotulada.

3.10 Desempeño para el Sismo Extremo ($T_r=2500$ años)

Si no se alcanzó el desempeño requerido para el sismo de diseño, peor aún se logró para el sismo extremo, pues no se pudo determinar el punto de desempeño para ningún caso ya que la estructura colapsa bajo fuerzas menores a las generadas por el sismo.

Es así que las estructuras que aparentemente están bien diseñadas y cumplen con los requisitos de desempeño establecidos en los códigos, pueden llegar a tener problemas en su comportamiento inelástico por la influencia de la mampostería, puesto que esta no se considera en el diseño.

SOLUCIÓN PROPUESTA

Luego de realizado el análisis se determinó que el porcentaje mínimo de muros de cortante que se debe incluir en los hospitales (estructuras esenciales) es del 4% del área en planta, distribuidos inversamente proporcionalmente a la longitud de cada dirección. Con este porcentaje, se reducen drásticamente las patologías ocultas atribuidas a la interacción pórtico-mampostería, es decir, se eliminan efectos de piso blando, columna corta y torsión en planta. Más importante aún, se logra alcanzar los desempeños requeridos para estructuras esenciales para los diferentes niveles de amenaza sísmica descritos en la NEC-SE 2015.

Así mismo, se observó que los muros son mucho más efectivos cuando su longitud es mayor, es así que de acuerdo con este resultado y de la recomendación de (Placencia, 2015), la longitud mínima de cada muro debe ser 5m. Las ecuaciones propuestas (5, 6, 7) son:

$$\%Muros_{L_{mayor}} = 4\% * \frac{L_{menor}}{L_{mayor} + L_{menor}} \quad (5)$$

$$\%Muros_{L_{menor}} = 4\% * \frac{L_{mayor}}{L_{mayor} + L_{menor}} \quad (6)$$

$$L_{muro} \geq 5m \quad (7)$$

En donde $\%Muros_{L_{mayor}}$ es el porcentaje de muros de corte en la dirección más larga, L_{menor} es la menor dimensión del edificio, L_{mayor} es la mayor dimensión del edificio, $\%Muros_{L_{menor}}$ es el porcentaje de muros de corte en la dirección más corta, y L_{muro} es la longitud de cada muro.

3.11 Modelo con Sistema Dual

Para el presente caso de estudio al aplicar las ecuaciones propuestas, el porcentaje de muros de corte adecuado es de 1.1% en la dirección X y 2.9% en la dirección Y, lo cual sumado da el 4%. Además, la sección de las columnas se redujo de 70x70cm a 45x45cm, es decir hubo una disminución del 58.67% del área bruta de columnas. Así mismo las vigas

se redujeron de 40x60cm a 30x45cm es decir una reducción del 43.75% del área bruta de vigas, por lo que la solución recomendada comienza a mostrar sus ventajas iniciales. El modelo estructural generado se muestra en la figura 14.

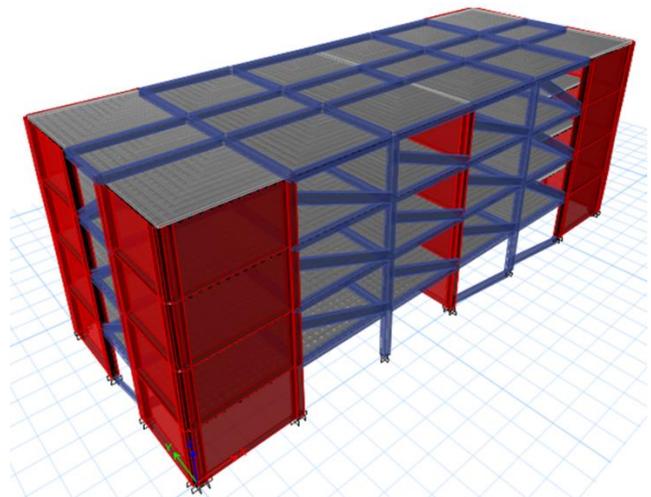


Figura 14. Modelo Estructural con Sistema Dual al 4%

3.12 Derivas de Piso y Piso Blando

Se elimina la existencia de piso blando, pues la deriva máxima ya no se encuentra en el primer piso, y se nota que no existe amplificación de la deriva en el primer piso como en el caso del modelo con mampostería. En la figura 15 se observa la diferencia en la forma de la deriva entre la estructura con mampostería y la estructura con sistema dual. La forma de la curva de las derivas se asemeja a la de un sistema dual teniendo las mayores derivas en los pisos superiores. Así mismo la amplificación drástica del corte, que se observó anteriormente, se reduce al máximo por lo que se corrobora la inexistencia de piso blando. Esta reducción del corte se muestra en la figura 16.

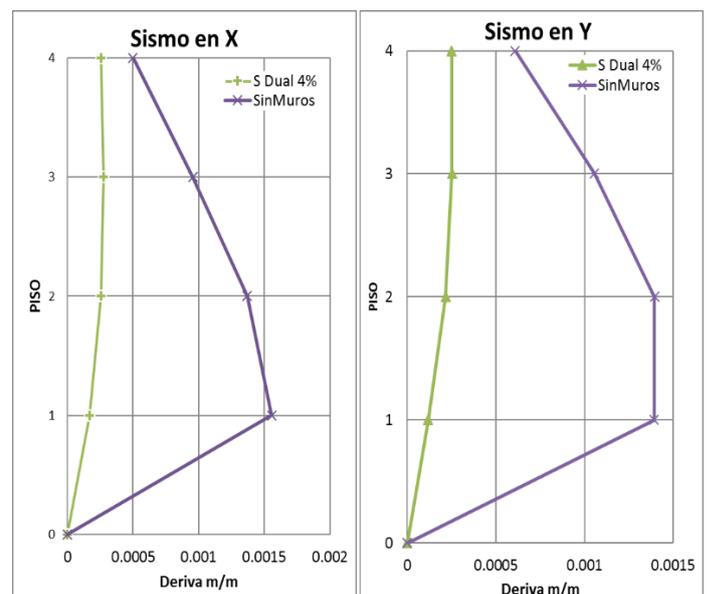


Figura 15. Derivas de Piso

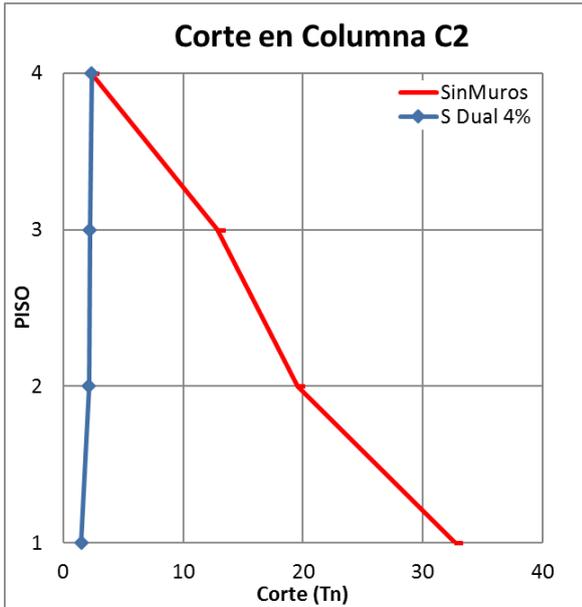


Figura 16. Corte en columna C2

3.13 Efecto de Columna Corta

Los resultados demuestran que el efecto de columna corta se elimina totalmente, pues los valores de corte en la columna en el punto de desempeño para el sismo de diseño son extremadamente bajos, y no existe una amplificación exagerada del corte en la sección libre de la columna, como previamente ocurrió, lo cual se aprecia en la figura 17.

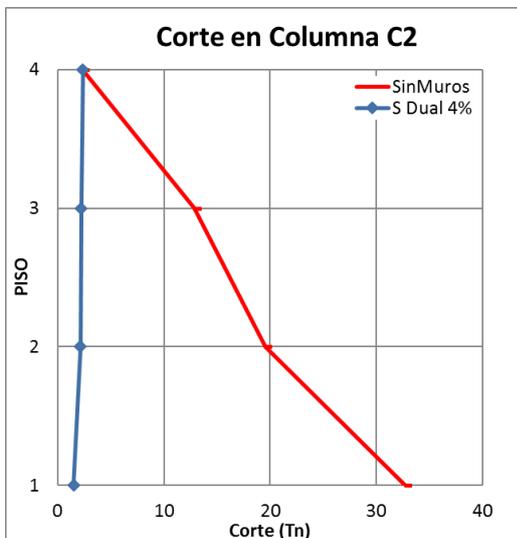
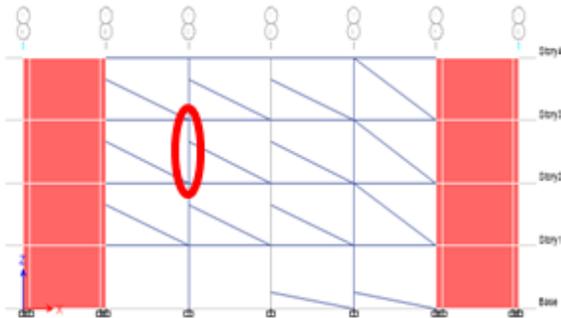


Figura 17. Corte en columna C1

3.14 Efecto de Torsión en planta

Con la inclusión de los muros de corte a la estructura, se logró que los dos primeros modos de vibración sean totalmente traslacionales, reduciendo el porcentaje de torsión del 45.87% al 0%. Cabe recalcar, que la torsión en planta es muy susceptible a la configuración de los muros, es por ello que se deben procurar configuraciones regulares y simétricas. Los porcentajes de participación de la masa se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Porcentaje de participación modal de la masa

Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ	%Torsión
1	0.193	0.741	0	0	0
2	0.173	0	0.703	0	0

3.15 Desempeño para el Sismo de Diseño ($Tr=475$ años)

El desempeño para el sismo de diseño se cumple con holgura para los dos sentidos de análisis, como se muestra en la figura 18, por lo que se demuestra la bondad de este sistema estructural. Así mismo, la demanda de ductilidad y de amortiguamiento efectivo son mucho menores que las obtenidas para las estructuras sin muros. El nivel de daño en la estructura es muy limitado, tanto así que los elementos no estructurales (mampostería) alcanzan el nivel Ocupación Inmediata, es decir fisuramientos menores.

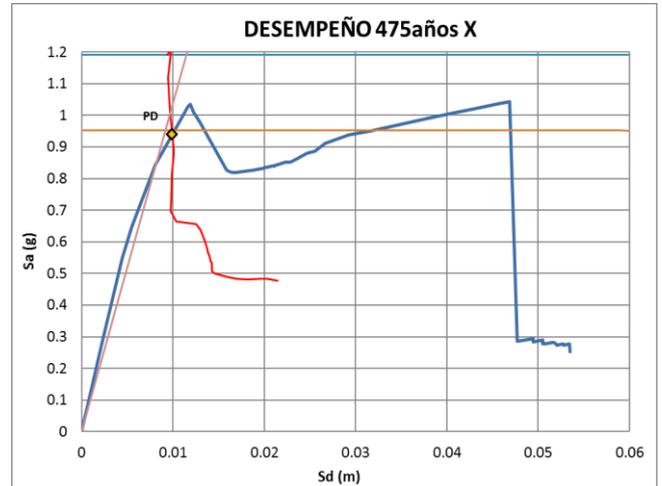


Figura 18. Punto de Desempeño para el Sismo de Diseño

3.16 Desempeño para el Sismo Extremo ($Tr=2500$ años)

Así mismo para el sismo con período de retorno $Tr=2500$ años se cumple el desempeño requerido por la norma, alcanzando el nivel de desempeño de Seguridad de Vida como se muestra en la figura 19, pues los márgenes de seguridad ante el colapso parcial o total de la estructura no se agotan por completo por lo que el riesgo de vida de los ocupantes es bajo.

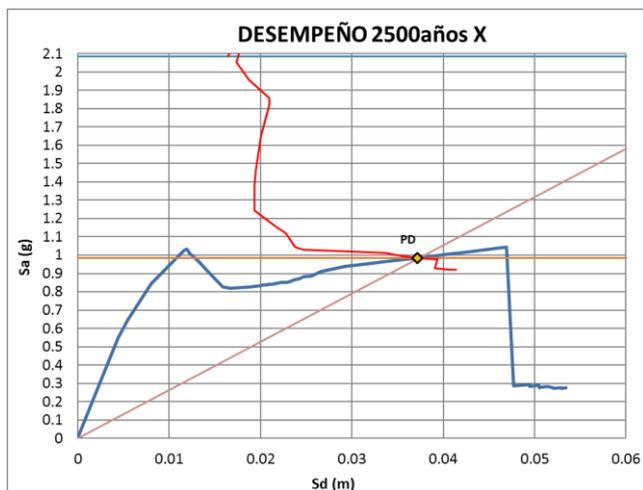


Figura 19. Punto de Desempeño para el Sismo Extremo.

En cuanto al nivel de daño se refiere, este es mucho menor al obtenido con las estructuras sin muros, además que el volumen de rótulas es menor. Esto ratifica que la estructura se torna mucho más segura para la vida de los ocupantes. Incluso el nivel de daño en elementos estructurales es mucho menor.

3.17 Análisis Económico Comparativo

Finalmente se ha realizado un análisis económico comparativo en el costo de la superestructura del Hospital, con los dos sistemas estructurales analizados. En las figuras 20 y 21, se detallan los presupuestos de los rubros estructurales para ambos casos.

PROYECTO: SUPERESTRUCTURA DE UN HOSPITAL TIPO CON SISTEMA ESTRUCTURAL APORTICADO					
Fecha: 30 de Diciembre del 2015					
RUBRO	DESCRIPCIÓN	NIDA	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. TOTAL
1	Hormigón en columnas $f_c=240\text{kg/cm}^2$	m3	219.52	\$ 220.00	\$ 48,294.40
2	Hormigón en losa alivian $e=25\text{cm}$	m3	208.25	\$ 198.95	\$ 41,431.34
3	Hormigón en vigas $f_c=240\text{kg/cm}^2$	m3	238.56	\$ 210.72	\$ 50,269.36
4	Acero de Refuerzo $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg	81914.71	\$ 2.12	\$ 173,659.18
TOTAL					\$ 313,654.28
SON: TRES CIENTOS TRECE MIL SEISCIENTOS CINCUENTA Y CUATRO CON 28/100					

Figura 20. Presupuesto de un Hospital con sistema de pórticos

PROYECTO: SUPERESTRUCTURA DE UN HOSPITAL TIPO CON SISTEMA ESTRUCTURAL DUAL					
Fecha: 30 de Diciembre del 2015					
RUBRO	DESCRIPCIÓN	NIDA	CANTIDAD	P. UNITARIO	P. TOTAL
1	Hormigón en columnas $f_c=240\text{kg/cm}^2$	m3	38.88	\$ 220.00	\$ 8,553.60
2	Hormigón en losa alivian $e=25\text{cm}$	m3	236.25	\$ 198.95	\$ 47,001.94
3	Hormigón en vigas $f_c=240\text{kg/cm}^2$	m3	108.00	\$ 210.72	\$ 22,757.76
4	Hormigón en Muro Estructural $f_c=240\text{kg/cm}^2$	m3	411.20	\$ 208.48	\$ 85,726.98
5	Acero de Refuerzo $f_y=4200\text{kg/cm}^2$	kg	70311.89	\$ 2.12	\$ 149,061.21
TOTAL					\$ 313,101.48
SON: TRESCIENTOS TRECE MIL CIENTO UN CON 48/100					

Figura 21. Presupuesto de un Hospital con Sistema Dual

El sistema estructural que resulta más costoso es el aporticado y aunque la reducción del costo es solamente un 0.18% el cambio de enfoque en cuanto al sistema estructural se justifica

totalmente debido a las enormes ventajas que presenta frente al sistema aporticado, mostradas previamente.

4. CONCLUSIONES

Se concluye que la interacción pórtico-mampostería, modifica el comportamiento dinámico de las estructuras, generando cambios en su rigidez, resistencia y ductilidad.

Además, se demostró que el sistema estructural dual minimiza la mayoría de los efectos negativos producidos por la interacción pórtico-mampostería, y mejora notablemente el desempeño de las estructuras.

El porcentaje mínimo de muros de cortante que se debe incluir en los hospitales (estructuras esenciales) es del 4% del área en planta, distribuidos inversamente proporcional a la longitud de cada dirección, ubicados en la periferia del edificio.

El costo de la superestructura del Hospital utilizando el sistema Dual es un 0.18% menor al costo utilizando sistema aporticado, justificándose aún más su utilización.

REFERENCIAS

Carrillo, J., & González, G. (2007). *Influencia de la Mampostería No Reforzada en el Comportamiento Inelástico de Pórticos de Concreto*. Dyna vol 152, 217-227.

FEMA356. (2000). *Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation Buildings*. Washington D.C.: FEMA.

FEMA440. (2005). *Improvement of Non Linear Static Seismic Analysis Procedures*. Washington D.C.: FEMA.

Mainstone. (1971). *On the stiffness and strengths of infilled frames*. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*.

Norma Ecuatoriana de Construcción. (2015). *NEC-SE-DS Diseño Sismo Resistente*. Quito: MIDUVI.

Norma Ecuatoriana de Construcción. (2015). *NEC-SE-HM Estructuras de Hormigón Armado*. Quito: MIDUVI.

Norma Ecuatoriana de Construcción. (2015). *NEC-SE-RE Riesgo Sísmico, Evaluación, Rehabilitación de Estructuras*. Quito: MIDUVI.

Placencia, P. (2015). *Apuntes de la Materia de Estructuración Sísmica*. Quito: Maestría en Estructuras EPN.

Priestley, M., Calvi, G., & Kowalsky, M. (2007). *Displacement-Based Seismic Design of Structures*. Pavia: Fondazione EUCENTRE.

Rochel, R. (1993). *Influencia de los Muros de Mampostería en el Comportamiento de las Estructuras Aporticadas*. Revista Universidad EAFIT No 90, 71-79.

Yépez, H. e. (2007). *Breves fundamentos sobre los terremotos en el Ecuador*. Quito: Corporación Editora Nacional.

Zabala, O., & Zabala, J. (2006). *Rehabilitación de Mamposterías Agrietadas de Ladrillo Artesanal*. Quito: Tesis de Grado. PUCE.



Christian David Medina Robalino.

Nacido en Ambato Tungurahua, en 1989. Obtuvo el título de Ingeniero Civil en la Universidad Técnica de Ambato. Magíster en Estructuras de la Escuela Politécnica Nacional. Experiencia laboral: - Consultor Estructural en proyectos de edificaciones sismo resistentes, puentes, viaductos y estructuras de almacenaje desde junio 2012 hasta la presente fecha. - Docente ocasional de la Universidad Técnica de Ambato desde mayo 2016 hasta la presente fecha. Publicaciones y Líneas de investigación: Ingeniería Estructural, Ingeniería Sísmica, Puentes.



Patricio Placencia Andrade.

Estudió Ingeniería Civil en la Escuela Politécnica Nacional. Obtuvo la Maestría en Ciencias en la Universidad de Texas, en Austin. Fue profesor principal en la EPN, desde 1979 hasta 2014. Actualmente es profesor Honorario de la EPN. Formuló el proyecto de creación del Laboratorio de estructuras “Centro de Investigación de la Vivienda”. Director del mismo, hasta 2014. Coordinó la creación del Postgrado de Ingeniería Estructural en la EPN. Autor de artículos técnicos urgentes en su momento, como Metodología para estudio estructural de monumentos históricos, Diseño sismo resistente de edificios aporticados, Diseño sismo resistente de edificios con vigas banda, diseño sismo resistente de edificios con muros, Vulnerabilidad sísmica en el Ecuador. Líneas de investigación: Diseño estructural, seguridad sísmica, reforzamiento de estructuras. Es asesor estructural de la OPS, PNUD, BID, Banco Mundial.