

## COMPARACIÓN DE RESPUESTAS ESTRUCTURALES ENTRE LOS SISTEMAS DE MUROS CONFINADOS(M2) Y APORTICADO, IMPLEMENTANDO INTERACCIÓN SUELO-ESTRUCTURA

Morales Luis, W.; Manosalvas Chávez, K.; Tarapúes Marquínez, J.

Universidad Central del Ecuador

[lwmorales@uce.edu.ec](mailto:lwmorales@uce.edu.ec)

### RESUMEN

La investigación consiste en analizar y comparar las respuestas estructurales totales en edificaciones de hormigón armado y acero estructural, producidas por la acción sísmica al implementar la interacción suelo-estructura, entre un sistema aporticado y un sistema aporticado con mampostería(muros) confinada(M2). Se utilizó proyectos arquitectónicos de 3, 6 y 9 pisos, ubicados en la Ciudad de Quito, en el Sector La Carolina. El análisis estructural inicia con el prediseño de los elementos estructurales de acuerdo a la geometría en planta, elevación, ocupación y cargas actuantes, seguido de la modelación estructural en un software comercial, en donde se incluyeron todas las cargas actuantes gravitacionales y laterales para generar estructuras sismo-resistentes. Además, se usó constantes de rigidez del suelo mediante la colocación de resortes en la base de la estructura para simular el comportamiento del suelo, con la finalidad de obtener valores de cortante a nivel de piso, períodos, comportamiento modal, participación modal de masas y derivas de piso, para posteriormente realizar una verificación de la capacidad resistente de todos los elementos estructurales de acero y hormigón armado y poder compararlos cuando se implemente la mampostería (M2). Estos valores deben ser los adecuados según lo establece la NEC15. Para el cálculo de las constantes de rigidez, se utilizó el Modelo Dinámico D.D.Barkan-o. A Savinov y para la colocación de la mampostería confinada (M2) se utilizó el Método Puntal Equivalente, donde las paredes trabajen solo axialmente a compresión y no absorban cortante reflejando un comportamiento real de la mampostería en el desempeño estructural de las edificaciones.

**Palabras clave:** EMMEDUE (M2), hormigón armado, acero estructural, respuestas sísmicas, interacción suelo-estructura.

### ABSTRACT

The research consists of analyzing and comparing the total structural responses in buildings of reinforced concrete and structural steel, produced by the seismic action when implementing the soil-structure interaction, between a structured system and a consolidated system with masonry (walls) confined (M2), for that it was used architectural projects of 3, 6 and 9 floors, located in the City of Quito, Sector La Carolina. The structural analysis begins with the pre-design of the structural elements according to the geometry in plan, elevation, occupation and loads acting, followed by the structural modeling in commercial software, where all gravitational and Lateral to

generate earthquake resistant structures. In addition, soil rigidity constants were used by using springs at the base of the structure to simulate soil, with the purpose of obtaining shear values at floor level, periods, modal behavior, modal participation Masses, and floor drifts, for perform a verification of the resilient capacity of all structural elements of steel and reinforced concrete and to be able to compare when implementing masonry (M2) them, knowing that their values must be adequate as established by the NEC15, and then. For the calculation of the stiffness constants, for the soil-structure interaction, the Dynamic Model D.D. Barkan-o. Savinov and for the placement of the confined masonry (M2) were used the Equivalent Puntal Method, where the walls work only axially to compression and do not absorb shear in a way that allows to reflect a real behavior of the confined masonry in the structural performance of the Buildings.

**Keywords:** EMMEDUE (M2), concrete, steel, response, soil-structure.

## INTRODUCCIÓN

En la Ingeniería Civil, el cálculo de las respuestas estructurales siempre ha sido compleja, debido a la gran variedad de metodologías que existen, cuyo objetivo es llegar a un resultado donde la estructura sea confiable y segura. Con la invención de los sistemas computacionales, los cálculos tediosos se agilizaron permitiendo realizar pruebas con la inclusión de materiales adicionales al hormigón armado y acero estructural, con elementos que comúnmente eran destinados a un uso específico, como la mampostería que siempre fue considerada como una parte de la carga muerta y no como un elemento que puede aportar rigidez lateral a los pórticos que conforman una edificación.

Otro aspecto que no se considera es el suelo donde se va cimentar la estructura, que para efectos de facilidad de cálculo se lo hace como si estuviera sobre un lecho rocoso que por lo general no es real, y para que la investigación tenga respuestas estructurales lo más cerca a la realidad, se usaron resortes verticales y horizontales que simulen el comportamiento del suelo y que tienen relación con el tipo de cimentación.

Es por ello, que este estudio se centra en determinar cuál es la contribución de la mampostería (M2) a la rigidez lateral de las estructuras aporricadas. Para ello, el lugar que se seleccionó para el análisis es el sector de La Carolina de la ciudad de Quito, y el estudio se efectuó en base a proyectos arquitectónicos destinados a viviendas de 3, 6 y 9 pisos, en Hormigón Armado y Estructura metálica, cuya área en planta es de 317.95m<sup>2</sup>, 390.58m<sup>2</sup>, 136.57m<sup>2</sup> respectivamente con una configuración geométrica regular en planta y elevación.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Los materiales utilizados para el análisis estructural de las edificaciones de hormigón armado tienen una resistencia a la compresión simple  $f'c = 240 \text{ Kg/cm}^2$  y  $f'c = 280 \text{ Kg/cm}^2$ , acero de refuerzo con un límite de fluencia  $f_y = 4200 \text{ Kg/cm}^2$ , y para las

edificaciones de Acero Estructural perfiles Grado ASTM A36 con un límite de fluencia  $f_y = 2530 \text{ Kg/cm}^2$ .

En la actualidad, para la mampostería existen varios materiales vanguardistas que pueden aportar rigidez lateral a la estructura y disminuir su peso al mismo tiempo como el Eterboard, Ecopack, Sistema EMMEDUE (M2) entre otros.

Para incluir la mampostería, el material seleccionado es el M2 que “está basado en un conjunto de paneles estructurales de poliestireno expandido ondulado, con una armadura básica adosada en sus caras, constituida por mallas de acero galvanizado de alta resistencia, vinculadas entre sí por conectores de acero electro-soldados.” (Ing. Angelo Candiracci, Ing Gilberto Lacayo, Ing. Julio Maltez, 2014), además de su versatilidad y fácil uso hacen a este sistema que se logre reducir el costo total en la obra y el tiempo de ejecución del mismo.

### Modelación Estructural

Una vez que se dispone de la geometría de los elementos estructurales mediante un prediseño y configuración estructural en planta y elevación, se realiza un análisis estático y dinámico a todas las edificaciones, ésta última representada por un espectro inelástico que se lo construyo de acuerdo a la locación y tipo de suelo en la que se encuentran las edificaciones. Los datos usados y espectros generados se muestran a continuación:

**Tabla 1. Factores de sitio**

Ubicación:	Quito
Sector:	La Carolina
Zona sísmica:	V
n	2.48
Z	0.4
Fa	1.25
Fd	1.28
Fs	1.19
r	1

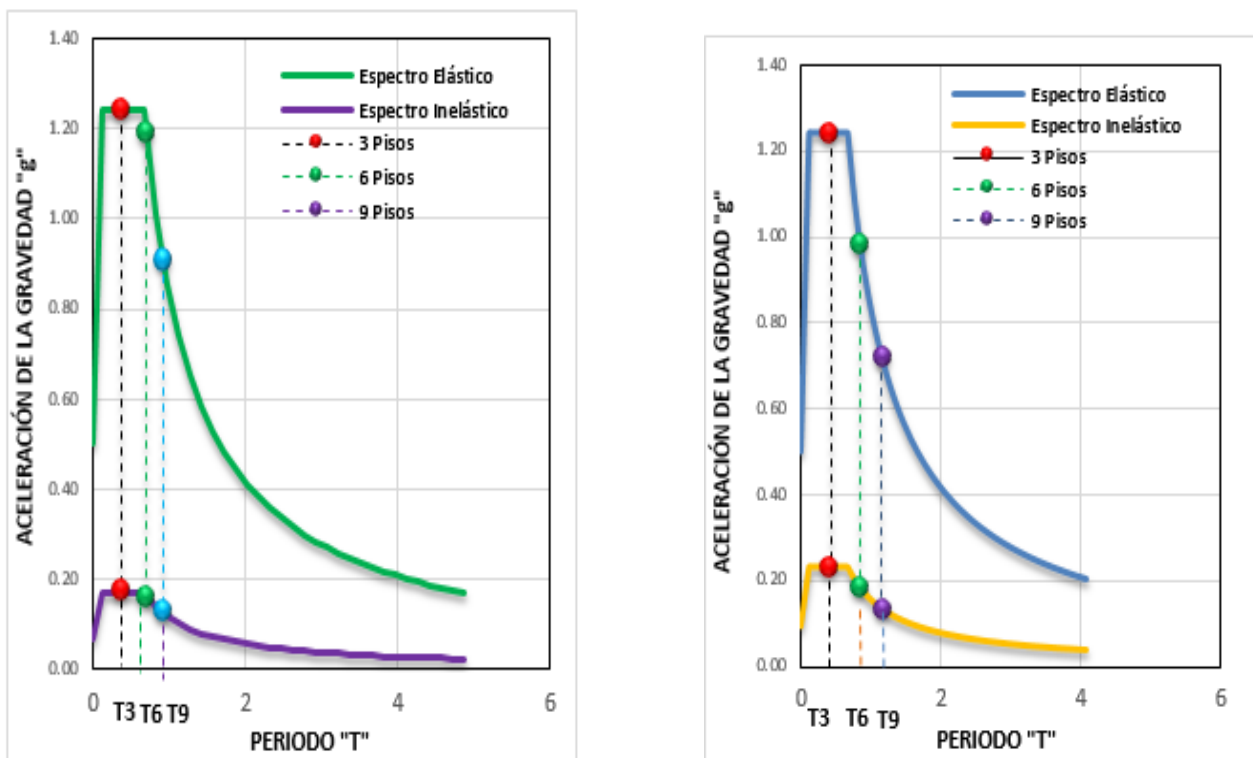
**Tabla 2. Coeficientes dependientes del tipo de edificio**

SISTEMA APORTICADO				
EDIFICIOS	HORMIGÓN		ACERO	
	Ct	$\alpha$	Ct	$\alpha$
3 pisos	0.055	0.90	0.072	0.80
6 pisos	0.055	0.75	0.073	0.75
9 pisos	0.055	0.75	0.073	0.75
SISTEMA CON MAMPOSTERÍA				
EDIFICIOS	HORMIGÓN		ACERO	

			Ct	$\alpha$	Ct	$\alpha$
3 pisos			0.055	0.75	0.073	0.75
6 pisos			0.055	0.75	0.073	0.75
9 pisos	0.055	0.75	0.073		0.75	

Generando un espectro de diseño que se muestra en las siguientes figuras:

**Figura 1. Espectros que se usaron para las edificaciones en hormigón armado y estructura metálica**



Estos espectros de diseño son para estructuras de ocupación normal con un período de retorno de 475 años para un 10% de excedencia en 50 años.

### Coeficientes de rigidez del suelo (Modelo dinámico de D.D. Barkan)

Para el cálculo de los coeficientes de rigidez (resortes), es necesario conocer el tipo y las dimensiones de las cimentaciones, donde para las edificaciones de 3, 6 y 9 pisos se empleó zapatas aisladas, vigas y losas de cimentación respectivamente. El modelo dinámico de Barkan se muestra a continuación:

$$K_x = C_x * A \quad (1)$$

$$K_z = C_z * A \quad (2)$$

$$K_\phi = C_\phi * I \quad (3)$$

Donde:

$K_x, K_z, K_\phi$  : Constantes de rigidez del suelo.

- $c_z, c_\varphi$  : Coeficientes de compresión elástica y no uniforme.  
 $c_x$  : Coeficiente de desplazamiento elástico.  
 $A$  : Área de la base de la cimentación.  
 $I$  : Momento de inercia de la base de la cimentación respecto al eje principal.

$$c_\varphi = D_o \left[ 1 + \frac{2(\alpha + 3b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (4)$$

$$c_z = c_o \left[ 1 + \frac{2(\alpha + b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (5)$$

$$c_x = D_o \left[ 1 + \frac{2(\alpha + b)}{\Delta A} \right] \sqrt{\frac{\rho}{\rho_o}} \quad (6)$$

$$D_o = \frac{1 - \mu}{1 - 0.5\mu} c_o \quad (7)$$

Donde:

$c_o$  : coeficiente según el tipo de suelo tomado de tabla 5.

$D_o$  : coeficientes determinados a través de experimentos realizados para  $\rho = \rho_o$

$\rho = \rho_o$  : presiones a las que va a estar sometido el suelo de la cimentación

$a, b$  : dimensiones de la cimentación en el plano

$\Delta$  : coeficiente empírico, asumido para cálculos prácticos igual a  $\Delta = 1\text{m}^1$

**Tabla 3. Coeficiente  $c_o$  según tipo de suelo**

Característica de la base de fundación	Suelo	$c_o$ (kg/cm <sup>3</sup> )
Roca o suelos muy rígidos	Arcilla y arena arcillosa dura ( $I_L < 0$ )	3.0
	Arena compacta ( $I_L < 0$ )	2.2
	Cascajo, grava, canto rodado, arena densa	2.6
	Arcilla y arena arcillosa plástica ( $0.25 < I_L \leq 0.5$ )	2.0
Suelos intermedios	Arena plástica ( $0 < I_L \leq 0.5$ )	1.6
	Arena polvorosa medio densa y densa ( $e \leq 0,80$ )	1.4
	Arenas de grano fino, mediano y grueso, independientes de su densidad y humedad	1.8
Suelos flexibles o con estratos de gran espesor	Arcilla y arena arcillosa de baja plasticidad ( $0 < I_L \leq 0.75$ )	0.8
	Arena plástica ( $0.5 < I_L \leq 1$ )	1.0
	Arenas polvorosa, saturada, porosa ( $e > 0,80$ )	1.2
Condiciones excepcionales	Arcilla y arena arcillosa muy blanda ( $I_L > 0.75$ )	0.6
	Arena movediza ( $I_L > 1$ )	0.6

**Tabla 4. Coeficientes para el cálculo de resortes**

$u$	0.3	
$c_o$	1.8	kg/cm <sup>3</sup>
$D_o$	1.48	kg/cm <sup>3</sup>
$\Delta$	1	m <sup>-1</sup>
$\rho_o$	0.2	kg/cm <sup>2</sup>

A continuación, se indica el cálculo típico de los coeficientes de rigidez para resortes:

**Tabla 5. Dimensiones de la zapata**

COLUMNAS	a	b	c
UNIDADES	m	m	m
CENTRALES	1.40	1.40	0.25
PERIMETRALES	1.20	1.20	0.25
ESQUINERAS	1.20	1.20	0.25

**Tabla 6. Coeficientes de compresión elástica y no uniforme**

Ac=	1012.50	cm <sup>2</sup>
Gm=	12000	kg/cm <sup>2</sup>
Am=	2062.50	cm <sup>2</sup>
λ=	7.61	
a=	1.10	m

**Tabla 7. Coeficientes de rigidez del suelo Edificio de 3 pisos**

COLUMNAS	C <sub>x</sub> = C <sub>y</sub>	C <sub>z</sub>	C <sub>φx</sub>	C <sub>φy</sub>
UNIDADES	t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>	t/m <sup>3</sup>
CENTRALES	19810.53	24055.64	41874.64	41874.64
PERIMETRALES	21550.69	26168.70	46298.46	46298.46
ESQUINERAS	17361.57	21081.91	37298.76	37298.76

**Tabla 8. Coeficientes de rigidez del suelo Edificio de 6 pisos**

COLUMNAS	K <sub>x</sub> = K <sub>y</sub>	K <sub>z</sub>	K <sub>φx</sub>	K <sub>φy</sub>
UNIDADES	t/m	t/m	t/m	t/m
CENTRALES	38828.64	47149.064	13405.46	13405.46
PERIMETRALES	31032.99	37682.922	8000.37	8000.37
ESQUINERAS	25000.66	30357.94	6445.22	6445.22

**Tabla 9. Coeficientes de rigidez del suelo Edificio de 9 pisos**

COLUMNAS	K <sub>x</sub> = K <sub>y</sub>	K <sub>z</sub>	K <sub>φx</sub>	K <sub>φy</sub>
UNIDADES	t/m	t/m	t/m	t/m
PERIMETRAL MURO	8267.79	10039.46	20292.78	20292.78
CENTRALES	53904.74	65455.75	61537.61	61537.61
ESQUINERAS	30983.33	37622.61	24214.73	24214.73
PERIMETRALES	42840.11	52020.13	56836.97	56836.97

COLUMNAS	K <sub>x</sub> = K <sub>y</sub>	K <sub>z</sub>	K <sub>φx</sub>	K <sub>φy</sub>
UNIDADES	t/m	t/m	t/m	t/m



PERIMETRAL MURO	62085.83	75389.94	34763.13	34763.13
CENTRALES	156068.67	189511.96	508793.78	508793.78
ESQUINERAS	115673.89	140461.15	291017.30	291017.30
PERIMETRALES	136332.73	165546.89	445455.94	445455.94

### Implementación de la mampostería M2 (Método Puntal -Tensor Bazán)

En las edificaciones aporticadas se incluyó la mampostería (M2), y para que no absorba cortante producido por la acción sísmica y el sistema estructural se mantenga como aporticado, se optó por utilizar el método del puntal equivalente, utilizando las ecuaciones propuesta por el modelo de Tarcisio Bazán (1980). Este elemento (puntal-tensor) dentro de la modelación estructural fue considerado como elemento lineal (frame) con un ancho equivalente y espesor de la mampostería.

$$\lambda = \frac{E_c \cdot A_c}{G_m \cdot A_m} \quad (7)$$

$$G_m = 0.40 E_m \quad (8)$$

$$A_m = l_v \cdot t \quad (6)$$

Donde:

$\lambda$  = Parametro de rigidez equivalente  $0.9 \leq \lambda \leq 11$

$G_m$  = Módulo de corte de la mampostería

$A_m$  = Área de la sección transversal de la mampostería

$E_m$  = Módulo de Elasticidad de la mampostería

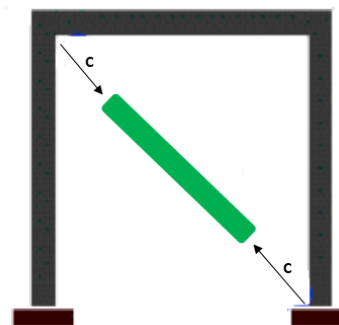
$l_v$  = Longitud libre de la viga

$A_c$  = Area promedio de columnas adyacentes

$t$  = Espesor de la mampostería

**Tabla14. Cálculo tipo de ancho equivalente**

CALCULO TIPO PARED LLENA		
h viga	0.40	m
h =	2.12	m
lv=	1.38	m
H=	2.52	m
Em=	30000	kg/cm <sup>2</sup>
Ec=	1859032	t/m <sup>2</sup>
t=	15.00	cm
Ac1=	225.00	cm <sup>2</sup>
Ac2=	1800.00	cm <sup>2</sup>



El módulo de elasticidad de la mampostería  $E_m=30000\text{kg/cm}^2$ , se utilizó en base a una evaluación experimental del sistema constructivo M2 realizado en la Pontificia Universidad Católica del Perú (Bartolome, 2009), donde se determinó este valor mediante ensayos de compresión excéntrica con la cual obtuvieron una dispersión de resultados del 15%.

A más de ello, se verificó este valor usando un software comercial donde se modelan muros mediante elementos finitos empleando los datos obtenidos de los mismos ensayos y la fuerza sísmica que se utilizó en la práctica, dando valores de desplazamiento lateral que al compararlos con los resultados experimentales hubo una diferencia del 14%, ratificando la confiabilidad del módulo de elasticidad tomado en el análisis estructural de las edificaciones.

## DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### Edificios de Hormigón Armado

Figura 2. Peso de las edificaciones aporticadas y con mampostería

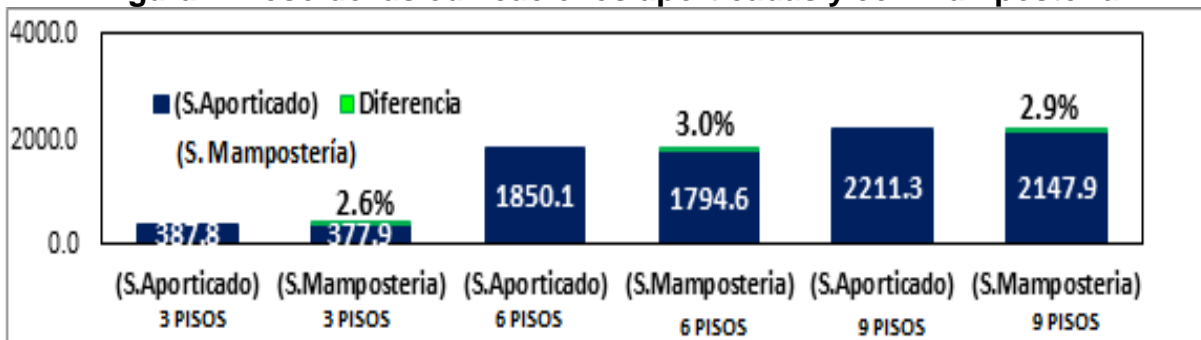


Figura 3. Cortante Basal de las edificaciones aporticadas y con mampostería

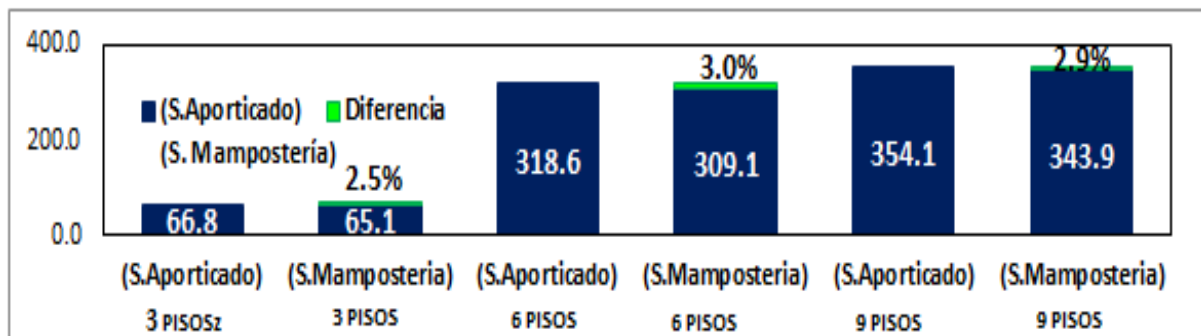


Figura 4. Período de las edificaciones aporticadas y con mampostería

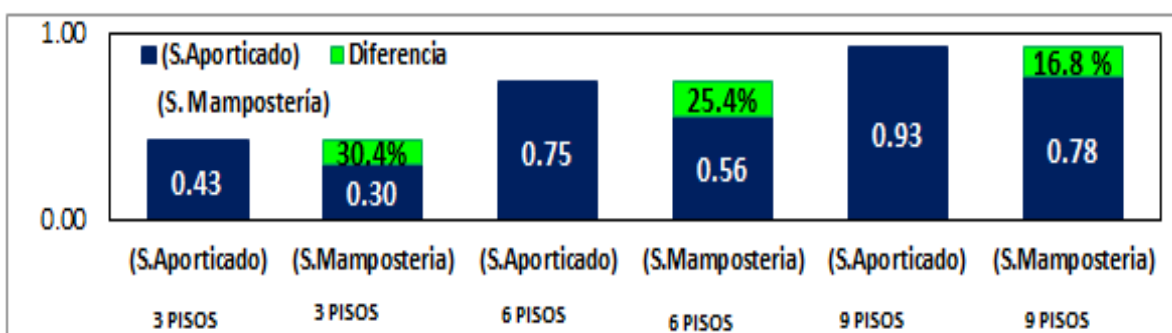




Figura 5. Cumplimiento del 90 % de la masa modal

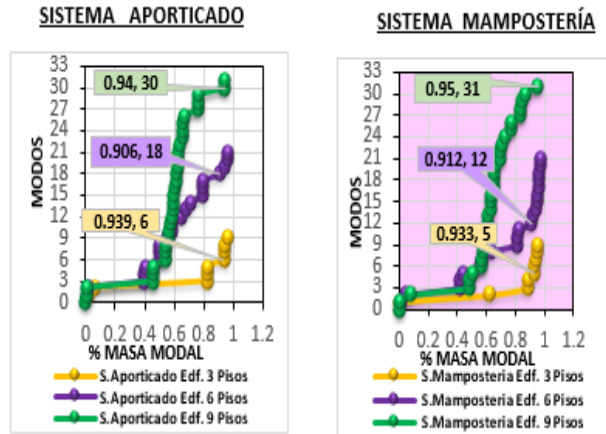
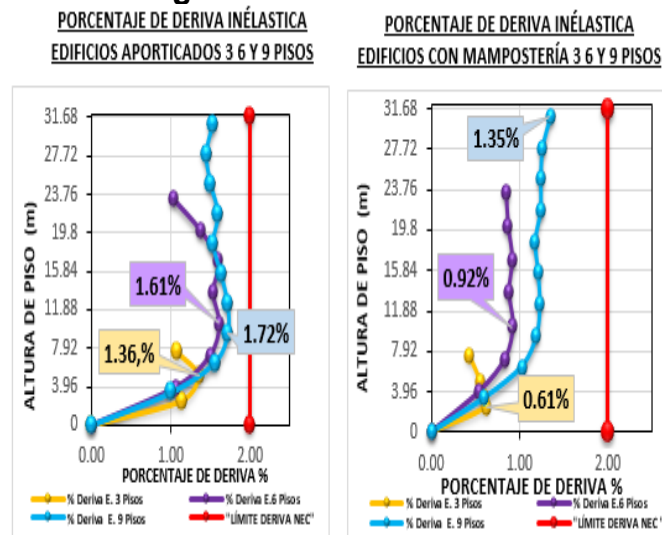


Figura 6. Derivas de Piso



Edificios en Acero

Figura 7. Peso de las edificaciones aporticadas y con mampostería

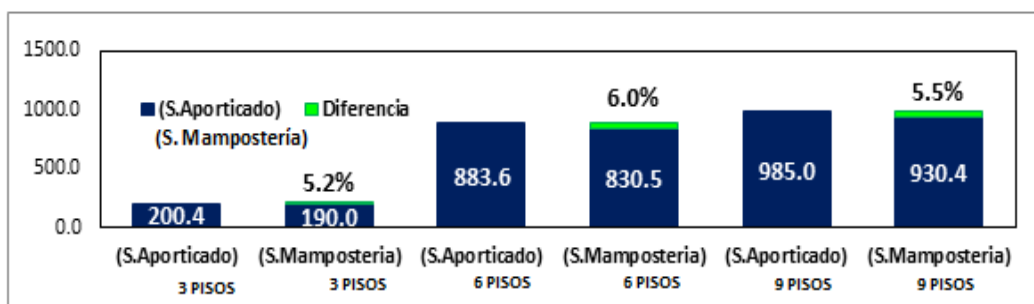


Figura 8. Cortante Basal de las edificaciones aporcionadas y con mampostería

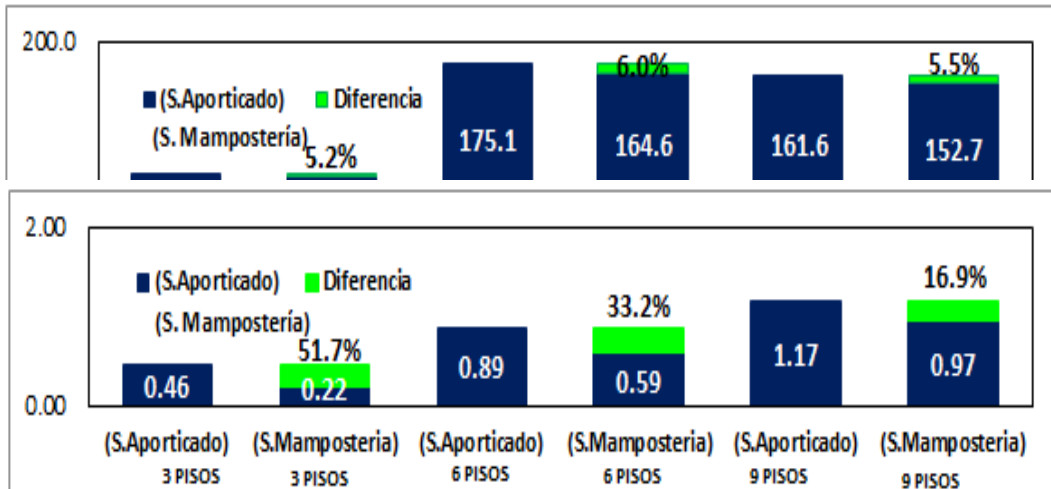


Figura 10. Cumplimiento del 90 % de la masa modal

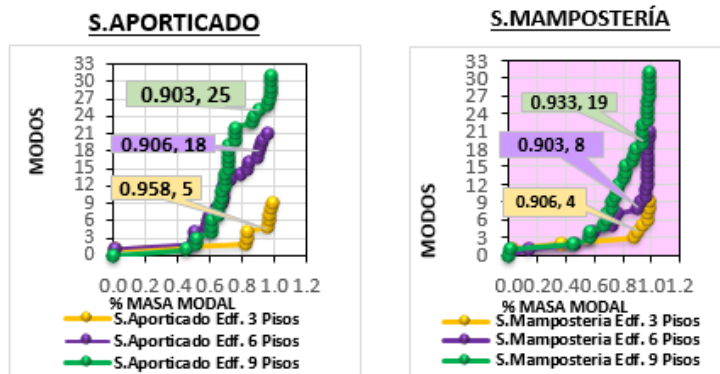
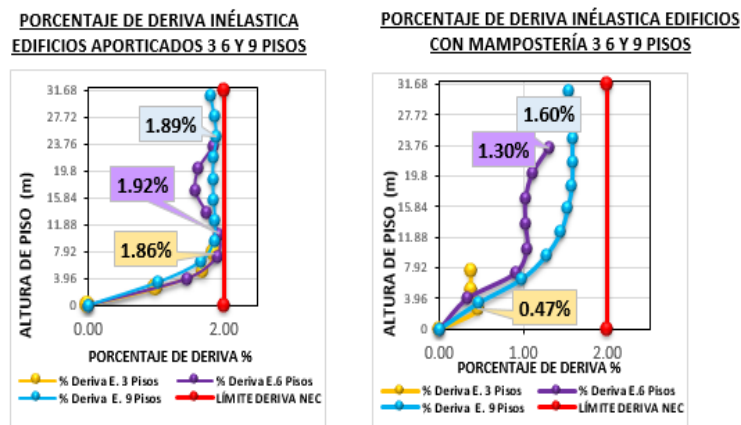


Figura 11. Derivas de Piso



## Comparación entre edificios de Hormigón y Acero

Figura 12. Cortante Basal de las edificaciones aporricadas y con mampostería

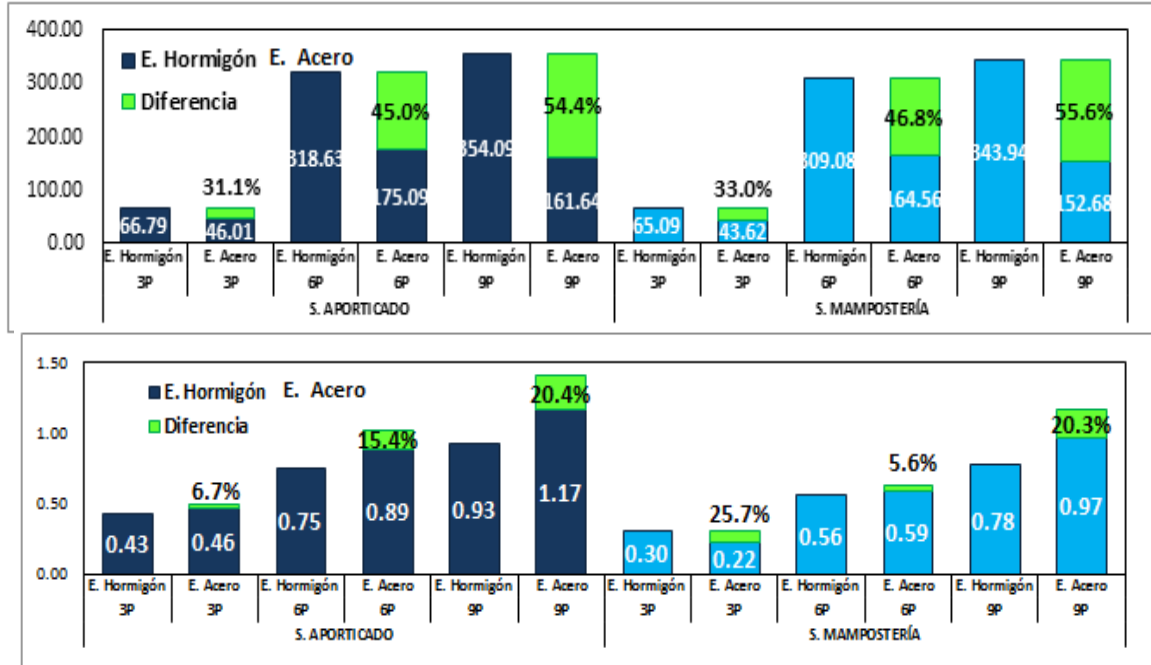
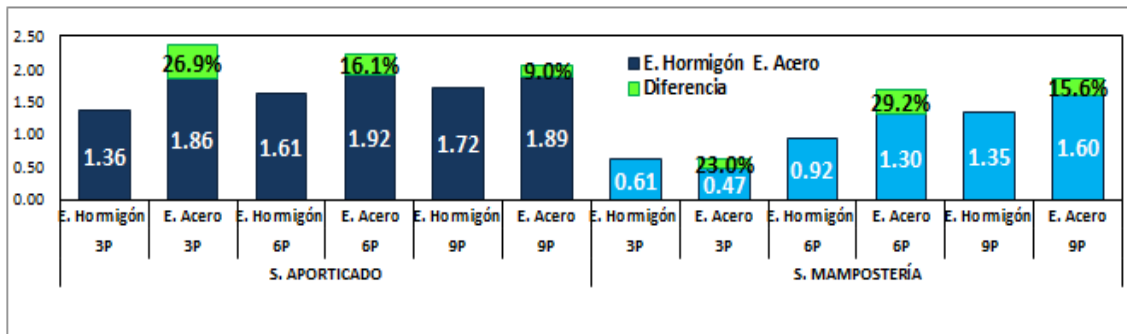


Figura 14. Derivas de Piso de las edificaciones aporricadas y con mampostería



## CONCLUSIONES

- Las derivas de piso disminuyen al incluir la mampostería M2 dentro del análisis estructural por el aumento de rigidez lateral que aporta el M2 al sistema estructural aporricado.

Tabla 15. Porcentaje de Deriva

EDIFICACIÓN		SISTEMA APORTICADO	SISTEMA CON MAMPOSTERIA	% DE REDUCCIÓN
		% Derivas Máx	% Derivas Máx	
Hormigón	3 pisos	1.36	0.61	54.69%
	6 pisos	1.61	0.92	43.10%
	9 pisos	1.71	1.35	21.75%

Acero	3 pisos	1.86	0.47	74.85%
	6 pisos	1.92	1.30	31.92%
	9 pisos	1.89	1.60	15.09%

- La participación modal de la masa dentro del análisis modal espectral, mejora al trabajar con interacción suelo-estructura (resortes) que con base empotrada.
- El porcentaje de reducción obtenido en peso, cortante y periodo de vibración de las estructuras de acero fue de un 5% – 10 % más que en las estructuras de hormigón.
- La disminución del periodo fundamental de vibración de las edificaciones de hormigón armado como de acero estructural, es resultado de la inclusión de la mampostería M2 dentro del sistema aporticado.

**Tabla 16. Período de vibración**

EDIFICACIÓN		PERIODO CALCULADO	PERIODO CALC+ 30 %	SISTEMA APORTICADO	SISTEMA CON MAMPOSTERIA
		(Seg)	(Seg)	PERIODO (Seg)	PERIODO (Seg)
<b>Hormigón</b>	3 pisos	0.34	0.442	0.431	0.300
	6 pisos	0.585	0.761	0.751	0.569
	9 pisos	0.721	0.937	0.931	0.775
<b>Acero</b>	3 pisos	0.36	0.472	0.462	0.223
	6 pisos	0.78	1.01	0.888	0.793
	9 pisos	0.94	1.22	1.170	0.972

- El método puntal equivalente es el más idóneo para incluir la mampostería M2 dentro del análisis estructural de sistemas aporticados cuya metodología permite que las paredes no absorban cortante y las edificaciones analizadas sigan siendo aporticadas.
- La mampostería M2 es factible usarlas en todo tipo de edificaciones mejorando el comportamiento global de los sistemas aporticados y disminuyendo el costo y tiempo de ejecución en obra en comparación con un sistema tradicional.
- El costo que demanda colocar 1 m<sup>2</sup> del panel M2 y uno de bloque de 40x20x15cm como mampostería, se puede conocer que el sistema M2 cuesta un 0.9 % más que el del bloque cuya diferencia es insignificante en comparación con los beneficios que este brinda.

**Tabla 17. Precio unitario M2**

Rubro	Unidad	Precio (\$)
Montaje de paneles Homi2	m <sup>2</sup>	18.44
Apuntalamiento de paneles	m <sup>2</sup>	2.15
Preparación del Mortero	m <sup>3</sup>	9.99
Proyección del mortero (primera capa)	m <sup>2</sup>	1.92
Proyección del mortero (Segunda capa)	m <sup>2</sup>	3.92
Terminado	m <sup>2</sup>	3.20
Costo Total		39.62

**Tabla 18. Precio unitario Bloque**

Rubro	Unidad	Precio (\$)
Mampostería bloque 40x20x15	m <sup>2</sup>	12.90
Enlucido vertical e= 1.5 cm	m <sup>2</sup>	23.88
Costo Total		36.78

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ahumada, I. (2010). *Especificaciones ANSI/AISC 360-10 para construcciones de Acero*. Santiago de Chile: Alacero.

CAMICOM, MIDUVI. (2015). NEC-SE-DS.

CAMICOM, MIDUVI. (2015). NEC-SE-MP.

Cassano, A. (2009). *Análisis de estructuras bajo acciones dinámicas*. Edutecne.

Crisafulli, I. (2014). *Diseño sismorresistente de construcciones de acero*. Mendoza: Alacero.

Emmedue. (2008). *Sistema constructivo Emmedue Manual Operativo*.

Emmedue. (2010). *Emmedue advanced bulding sistem*.

Falconi, D. (2014). *Analisis Matricial de Estructuras con CENCI-LAB*. Quito: Frontera Publicidad.

Falconi, R. (2006). *Factor de reducción de las fuerzas sismicas*. Quito: ESPE.

Falconi, R. (2014). *Emmedue*. Quito: Repositorio ESPE.

Genner, V. (s.f.). *Interacción Sísmica Suelo-Estructura en edificaciones con zapatas aisladas*. Lima: PUCP.

Bartolome, A. (2009). *Evaluación Experimental del sistema constructivo M2*. Lima: PUCP.

Candiracci, A., Lacayo, G., Maltez, J. (2014). *Sistema Constructivo EMMEDUE Manual Técnico*. Suminsa.

Candiracci, A. (2014). *Manual Técnico Emmedue*.

Institute, A. (2015). *Requisitos de reglamento para concreto estructural (ACI 318SUS-14)*.

M.Das, B. (2012). *Fundamentos de Ingenieria de Cimentaciones*. México: Cengage Learning Editorial.

Muñoz, R. (2008). *Sobre resistencia global en funcion de la Deriva Máxima de Piso*. Quito: ESPE.

NEC15. (2014). *Estructuras de Hormigón Armado*. Quito: MIDUVI.

NEC15. (2014). *Estructuras en Acero*. Quito: MIDUVI.

NEC15. (2014). *Mampostería estructural*. Quito: MIDUVI.

NEC15. (2014). *Peligro Sismico diseño sismorresistente*. Quito: MIDUVI.

NEC15. (2016). *Guía practica para el Diseño de Estructuras de Acero*. Quito: Imprenta Activa.

NEC15. (2016). *Guía practica para el Diseño de Estructuras de Hormigón Armado*. Quito: Imprenta Activa.

Tarback, E. (2001). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*. Madrid: Prentice Hall.

Zeevaert, L. (1980). *Interacción Suelo-Estructura de Cimentación*. México: LIMUSA.