

Cálculo simplificado de la curva de capacidad basal carga-distorsión en edificaciones de baja altura elaboradas con mampostería confinada y ubicadas en zonas de alto peligro sísmico

Simplified calculation of the load-distortion basal capacity curve in low-rise buildings made of confined masonry and located in areas of high seismic danger

Víctor Manuel Godínez Baltazar (*), Sulpicio Sánchez Tizapa (**)

RESUMEN

El documento presenta una metodología para evaluar la curva de capacidad cortante en estructuras de mampostería confinada. Las hipótesis de colapso son: tensión diagonal en la mampostería y cortante en elementos verticales confinantes (EVC). La mampostería y EVC son sustituidos por resortes formando un sistema de un grado de libertad. La curva simplificada tiene 5 puntos, cada uno asociado a un nivel de daño y fue calibrada con resultados experimentales de muros y estructuras 3D. La precisión aumenta para rangos definidos de propiedades mecánicas y geométricas de la mampostería y EVC. La aplicación en cuatro construcciones entre uno y tres niveles muestra la capacidad del método en el cálculo rápido de la curva resistente, indicando factores de sobre-resistencia con rango 2.20-4.50 en dirección larga, 1.40-3.70 en dirección corta. El cortante resistente máximo ocurre con distorsiones entre 0.0025 a 0.0034. El modelo tiene similar aproximación a la obtenida con análisis no lineal.

Palabras clave: curva de capacidad; mampostería confinada; carga lateral; distorsión; análisis no lineal.

ABSTRACT

The document presents a methodology to evaluate the shear capacity curve in confined masonry structures. The collapse hypotheses are: diagonal stress in the masonry and shear in vertical confining elements (VCE). The masonry and VCE are replaced by springs forming a one degree of freedom system. The simplified curve has 5 points, each one associated with a damage level and was calibrated with experimental results of 3D walls and structures. Accuracy increases for defined ranges of mechanical and geometric properties of masonry and VCE. The application in four constructions between one and three levels shows the capacity of the method in the rapid calculation of the resistant curve, indicating over-resistance factors ranging from 2.20-4.50 in the long direction, 1.40-3.70 in the short direction. The maximum resistant shear occurs with distortions between 0.0025 to 0.0034. The model has a similar approximation to that obtained with nonlinear analysis.

Keywords: curve of capacity; confined masonry; lateral load; distortion; nonlinear analysis.

(*) Estudiante de la Maestría en Ingeniería para la Innovación y Desarrollo Tecnológico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Guerrero (México).

(**) Profesor-Investigador del Cuerpo Académico UAGro CA-93 Riesgos Naturales y Geotecnología, FI, en la Universidad Autónoma de Guerrero (México).

Persona de contacto/Corresponding author: victor_gb@uagro.mx (V. Godínez)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1908-350X> (V. Godínez); <https://orcid.org/0000-0002-6777-6984> (S. Sánchez)

Cómo citar este artículo/Citation: Víctor Manuel Godínez Baltazar, Sulpicio Sánchez Tizapa (2022). Cálculo simplificado de la curva de capacidad basal carga-distorsión en edificaciones de baja altura elaboradas con mampostería confinada y ubicadas en zonas de alto peligro sísmico. *Informes de la Construcción*, 74(566): e441. <https://doi.org/10.3989/ic.77920>

Copyright: © 2022 CSIC. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia de uso y distribución Creative Commons Reconocimiento 4.0 Internacional (CC BY 4.0).

Recibido/Received: 15/02/2020
Aceptado/Accepted: 23/09/2021
Publicado on-line/Published on-line: 06/06/2022

1. INTRODUCCIÓN

La mampostería confinada es una técnica constructiva extensamente empleada en edificios de baja altura y casas-habitación debido a su simplicidad, durabilidad, atractivo estético, disponibilidad de materiales y ventajas económicas (1, 2). Se compone de piezas cerámicas huecas o macizas y/o bloques de hormigón, así como de elementos confinantes de hormigón armado adheridos en el perímetro del muro de mampostería (3).

La construcción de mampostería confinada se utiliza en Europa Mediterránea (España, Italia, Eslovenia, Serbia), América Latina (México, Chile, Perú, Argentina y otros países), Oriente Medio (Irán), Asia Meridional (Indonesia) y el Lejano Oriente (China). Una característica de estas zonas es el riesgo sísmico extremadamente alto (4).

En este mismo orden, hay registros de sismos que han ocasionado daños en edificaciones de mampostería confinada. En México, el 19 de septiembre de 2017 se reportó un sismo con magnitud M_w 7.1 localizado en el límite entre los estados Puebla y Morelos, a 12 km al Sureste de Axochiapan (Morelos) y a 120 km de la Ciudad de México (5). En la Figura 1a se observan los daños generados en edificaciones, donde la mayoría corresponde al agrietamiento por cortante en la mampostería y EVC (6).

El 16 de abril de 2016 se produjo un terremoto de M_w 7.8 a 27 km de Muisne (Ecuador) y a una profundidad de 19.2 Km. La Figura 1b muestra los daños en muros de mampostería confinada por tensión diagonal (7).

Otro terremoto ocurrido el 1 de abril de 2014 de magnitud M_w 8.2 con epicentro frente a las costas de Iquique y Pisagua (Chile), profundidad hipocentral de 38.9 km., generó daños por corte en los muros de planta baja de edificaciones de 4 niveles, Figura 1c (8).

En mayo de 2008 en Wenchuan (China), ocurrió un sismo de magnitud M_w 7.9. En la Figura 1d se muestran los mecanismos usuales de rotura de la mampostería en su propio plano: por fisuración diagonal (9).

Por lo antes expuesto, es importante conocer el comportamiento de las construcciones de mampostería confinada ante eventos sísmicos. Una forma es mediante métodos simplificados que permitan calcular la envolvente de capacidad carga-distorsión lateral, de los cuales se presenta un resumen breve.

La propuesta de Crisafulli *et al.* (10) consiste en calcular la resistencia al corte de un muro de mampostería confinada utilizando un modelo macro del tipo puntal-tensor de acuerdo con la teoría de Mann y Müller (11). Considerando las condiciones de equilibrio del nudo superior, Figura 2, la resistencia al corte del muro se puede estimar mediante la fórmula [1]:

$$[1] \quad V = R_c \cdot \cos \theta = f'_{m\theta} \cdot A_{ms} \cdot \cos \theta$$

Las variables son:

V , Resistencia al corte del muro, kN



Figura 1. Daños en mampostería confinada por tensión diagonal: a) Edificios departamentales en Ciudad de México (México) (6), b) Hoteles en Bahía de Caraquez (Ecuador) (7), c) Edificios conjunto las Dunas Iquique (Chile) (8) y d) Edificios residenciales en Wenchuan (China) (9).

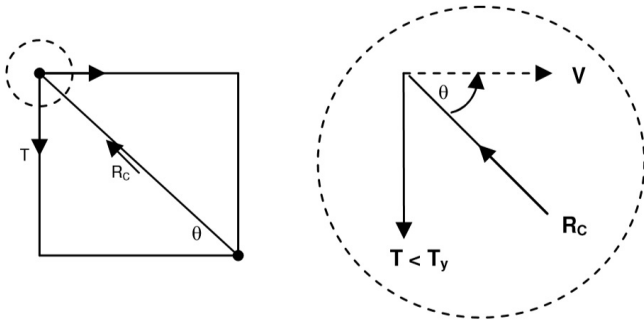


Figura 2. Equilibrio en nodo superior de muro de mampostería confinada modelado como un sistema puntal-tensor (10).

R_c , Fuerza de compresión de rotura en el puntal equivalente, kN
 $f'_{m\theta}$, Esfuerzo de la mampostería cuando se carga diagonalmente a una inclinación θ , MPa
 A_{ms} , Área del puntal equivalente, m²
 θ , Ángulo de inclinación respecto a la horizontal, radián
 T , Fuerza de tensión en el tensor, kN
 T_y , Fuerza de fluencia en el tensor, kN

La Figura 3a muestra una curva idealizada (12) donde se identifican tres zonas principales: a) Zona A, donde existe comportamiento elástico con agrietamiento horizontal en los EVC y agrietamiento mínimo en los elementos de mampostería; b) Zona B, en cuyo límite se tiene la máxima resistencia lateral, $V_{m\acute{a}x}$, y su respectivo desplazamiento, $d_{V_{m\acute{a}x}}$; y c) Zona C, en la cual hay degradación de rigidez y de resistencia, definida por la carga lateral que produce el desplazamiento último o justo antes del colapso.

La fuerza cortante correspondiente al primer agrietamiento diagonal de la mampostería V_{agr} y la fuerza cortante máxima $V_{m\acute{a}x}$, se evalúan con las fórmulas [2] y [3], respectivamente.

$$[2] \quad V_{agr} = (0.5v_m^* + 0.3\sigma)A_T \leq 1.5v_m^*A_T$$

$$[3] \quad V_{m\acute{a}x} = \eta V_d + V_{agr}$$

Las variables son:

v_m^* , Resistencia a compresión diagonal de la mampostería, MPa,
 σ , Esfuerzo de compresión vertical, MPa,
 A_T , Área transversal del muro (incluidos los EVC), m²,
 η , Factor de eficiencia igual a 0.30, adimensional,
 V_d , Contribución del refuerzo vertical por acción de dovela, kN,

En (13), se presenta otro modelo para el análisis sísmico de estructuras de mampostería. Se propone un muro de mampostería de longitud L , espesor T y altura H . Un resorte no lineal horizontal, identificado por un grupo de parámetros de control es propuesto para representar el comportamiento histerético de muros de mampostería confinada o no confinada con o sin aberturas, Figura 3b. Para simular el comportamiento histerético, la curva envolvente de capacidad está descrita por parámetros como: V_y , Fuerza de fluencia; V_m , Fuerza máxima; K_o , Rigidez inicial; ηK_o , Rigidez de endurecimiento y $n_{soft}K_o$, Rigidez de ablandamiento. Para muros de mampostería confinada, la fuerza máxima V_m se evalúa mediante la fórmula [4]:

$$[4] \quad V_m = 2.15\lambda^{0.256} \left[\frac{1}{1.2} \sqrt{1 + \eta_a \frac{\sigma_o}{f_{vo}}} + \mu(1 - \eta_a) \frac{\sigma_o}{f_{vo}} \right] f_{vo} A_m$$

Las variables son:

λ , Factor que considera la relación de aspecto y la relación de compresión sobre el esfuerzo lateral, adimensional,
 η_a , Coeficiente para asignar compresión vertical, adimensional,
 σ_o , Esfuerzo vertical promedio, MPa,
 f_{vo} , Resistencia al corte sin compresión vertical, kN,
 μ , Coeficiente de fricción, adimensional,
 A_m , Área horizontal de sección transversal de la mampostería, m²

En (14) se propone una curva idealizada bilineal y/o trilineal a partir de resultados experimentales en muros de mampostería. Las propiedades mecánicas de la mampostería y elementos confinantes son homogéneas e isotrópicas y permanecen en el rango elástico. La idealización de la envolvente de resistencia del comportamiento histerético de un muro de mampostería confinada, sujeto a carga vertical y lateral cíclica reversible está representada en las Figuras 3c y 3d. En general, se definen tres estados límite del comportamiento observado del muro: inicio de agrietamiento, máxima resistencia y estado último.

Las fórmulas [5] y [6] evalúan la resistencia máxima V_u y desplazamiento último d_u para la curva idealizada bilineal:

$$[5] \quad V_u = K_e \left(d_{m\acute{a}x} - \sqrt{d_{m\acute{a}x}^2 - \frac{2A_{env} V_{m\acute{a}x}}{K_e}} \right)$$

$$[6] \quad d_u = \mu d_e$$

Las variables son:

A_{env} , Área bajo la envolvente experimental, m²,
 K_e , Rigidez inicial, kN/m,
 $d_{m\acute{a}x}$, Desplazamiento máximo, m,
 μ , Factor de ductilidad última, adimensional,
 d_e , Desplazamiento en el límite elástico idealizado, m,
 $V_{m\acute{a}x}$, Resistencia máxima (obtenido de la prueba de resistencia sísmica de un muro de mampostería), kN

Para la curva idealizada trilineal las fórmulas [7] y [8] evalúan la resistencia de agrietamiento V_{cr} y resistencia última $V_{dm\acute{a}x}$:

$$[7] \quad V_{cr} = 0.70 V_{m\acute{a}x}$$

$$[8] \quad V_{dm\acute{a}x} = 0.80 V_{m\acute{a}x}$$

El valor de la resistencia máxima $V_{m\acute{a}x}$ es utilizado sin ningún factor de reducción.

2. OBJETIVO

En este trabajo se propone un método simplificado, basado en evidencia experimental, para evaluar la curva de capacidad carga lateral-distorsión de construcciones de mampostería confinada de baja altura sujetas a cargas gravitacional y sísmica. La curva se obtiene en muros de planta baja, donde actúa una mayor fuerza cortante. De acuerdo con la evidencia experimental, los muros de mampostería fallan por tensión diagonal y los EVC por cortante. La propuesta considera el fallo simultáneo de todos los muros en cada dirección principal, es decir no se considera un posible efecto de torsión.

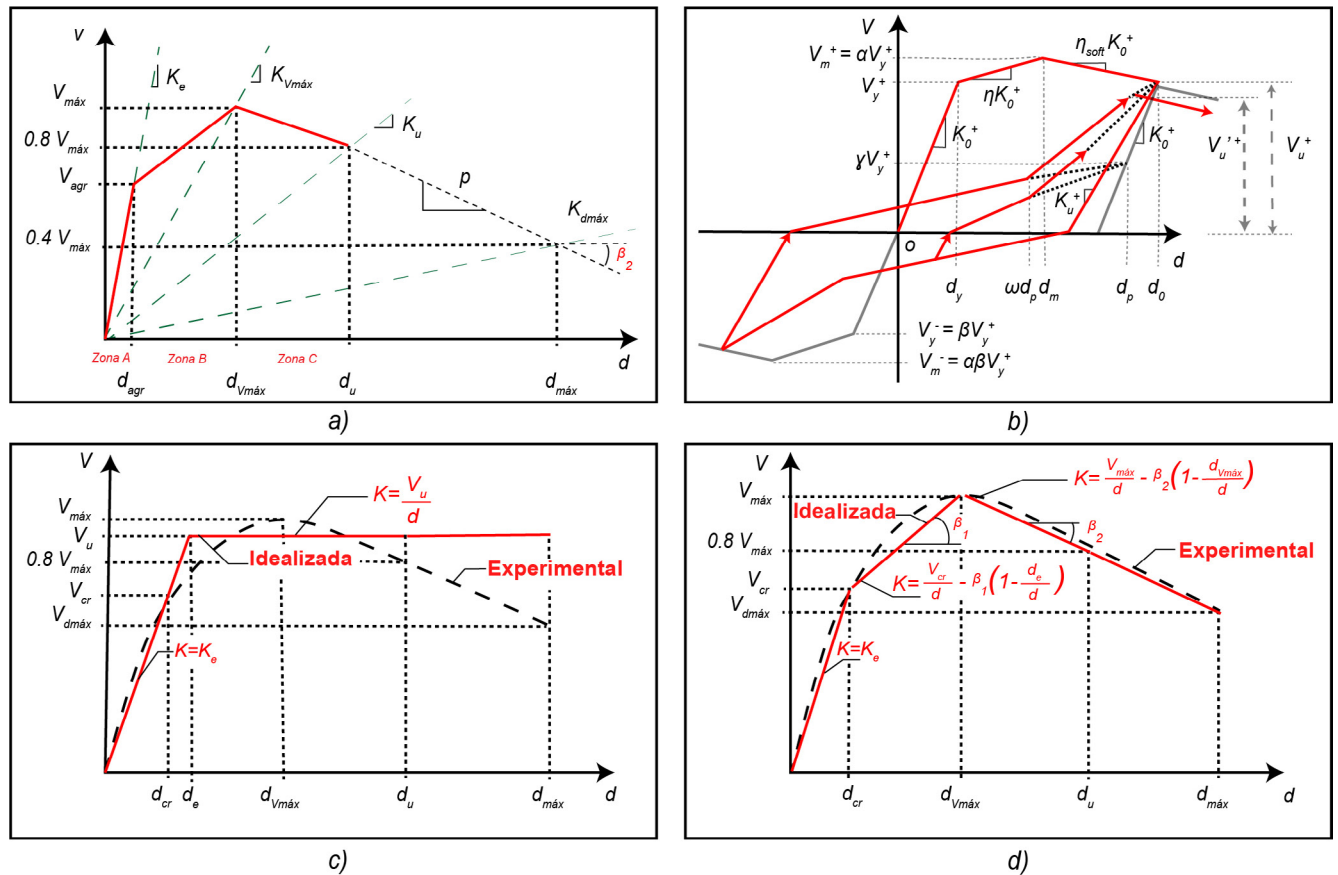


Figura 3. a) Envoltente idealizada (12), b) Parámetros de control del modelo presentado en (13), c) Envoltente bilineal (14) y d) Envoltente trilineal (14).

3. METODOLOGÍA

3.1. Modelización de la mampostería confinada

El muro confinado sujeto a carga lateral en su propio plano y esfuerzo vertical mostrado en la Figura 4a, se puede modelar según la Figura 4b, donde K_m es la rigidez de la mampostería

sobre la diagonal y K_c es la rigidez lateral de los EVC. Considerando que el muro sufre exclusivamente deformaciones de cortante generadas por la carga lateral (V), el cerramiento puede modelarse como un sistema con elementos en paralelo y un solo grado de libertad representado por el desplazamiento lateral (Δ), Figura 4c. Para una mayor comprensión del método propuesto, se sugiere consultar en (15).

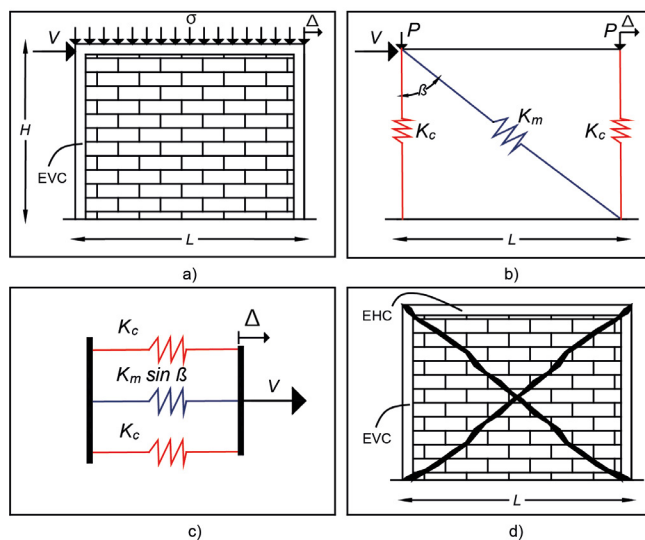


Figura 4. a) Muro de mampostería sujeto a carga lateral y vertical, b) Macro-modelo, c) Modelo simplificado de un grado de libertad con deformación de cortante y d) Modo de fallo del cerramiento.

La rigidez lateral del muro de mampostería confinada es la suma de la rigidez de los EVC y la mampostería (14). El modo de fallo se muestra en la Figura 4d.

3.2. Características de la mampostería

La curva de comportamiento del elemento resorte que sustituye a la mampostería se muestra en la Figura 5 (15) y se obtiene de pruebas realizadas en muretes de mampostería.

La carga de agrietamiento y la carga última es evaluada mediante las fórmulas [9 y 10], modificadas mediante los factores F_1 y F_2 obtenidos por calibración experimental en función del tipo de pieza, Tabla 1. El parámetro f , relaciona la rigidez vertical de la mampostería respecto a la rigidez vertical del muro.

$$[9] \quad V_{agrm} = A_{dm} \sin(\beta) [F_1 v_r + F_2 f \sin(\beta) \cos(\beta) \sigma]$$

$$[10] \quad V_{ultm} = A_{dm} \sin(\beta) [v_r + f \sin(\beta) \cos(\beta) \sigma]$$

$$[11] \quad f = A_m E_m / (A_m E_m + 2 A_c E_c)$$

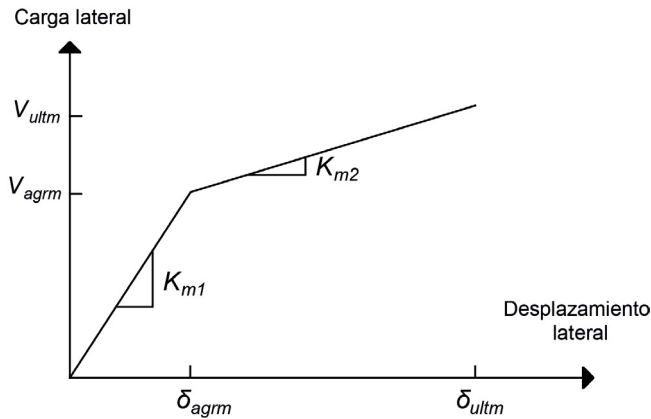


Figura 5. Curva experimental carga lateral- desplazamiento lateral para el elemento diagonal (15).

$$[12] \quad v_r = 0.676 v_m \text{ para piezas de concreto}$$

$$[13] \quad v_r = 0.635 v_m \text{ para piezas de arcilla}$$

Tabla 1. Factores según el tipo de pieza (15).

Factor y tipo de pieza	F_1	F_2
Piezas de arcilla	0.8	0
Piezas de hormigón	1	0.1

El desplazamiento de agrietamiento δ_{agrm} y el desplazamiento último δ_{ultm} , correspondientes a la carga lateral de agrietamiento y carga lateral última se calculan con las fórmulas [14 y 15].

$$[14] \quad \delta_{agrm} = \gamma_m L_{dm} \sin(\beta)$$

$$[15] \quad \delta_{ultm} = \gamma_{ult} L_{dm} \sin(\beta)$$

Las variables para el cálculo de la curva en la figura 5 son:

V_{agrm} , Carga lateral de agrietamiento de la mampostería, kN,
 V_{ultm} , Carga lateral última de la mampostería, kN,
 A_{dm} , Área de la sección diagonal del muro de mampostería sin considerar los EVC, m²,
 β , Ángulo respecto a la vertical, radián,
 σ , Esfuerzo vertical actuante, MPa,
 A_m , Área horizontal del muro de mampostería sin considerar los EVC, m²,
 E_m , Módulo elástico de la mampostería, MPa,
 A_c , Área de los EVC, m²,
 E_c , Módulo elástico de los EVC, MPa,
 v_r , Esfuerzo cortante resistente, MPa,
 v_m , Esfuerzo cortante promedio de la mampostería, obtenido del ensaye de muretes, MPa,
 L_{dm} , Longitud-diagonal del muro sin considerar los EVC, m,
 γ_m , Deformación tangencial igual a 0.007 (15), adimensional,
 γ_{ult} , Deformación última igual a 0.0015 (15), adimensional

3.3. Características de los EVC

La ley constitutiva del hormigón y del acero utilizados en los EVC requiere los siguientes factores (16):

ρ_w , Cuantía de acero transversal, adimensional,
 s , Separación de estribos, m,
 E_s , Módulo de elasticidad del acero, MPa,
 f_y , Esfuerzo de fluencia nominal del acero longitudinal, MPa,
 f'_c , Resistencia del hormigón a compresión, MPa,
 f_{yh} , Esfuerzo de fluencia del acero de refuerzo transversal, MPa,
 ρ_s , Volumen de hormigón confinado, m³,
 ρ , Cuantía de acero longitudinal, adimensional
 b , Distancia entre ramas de los estribos, m,
 ϵ_c , Deformación del concreto, adimensional,
 k , Factor de confinamiento, adimensional

El factor de confinamiento se evalúa con la fórmula 16. Las fórmulas [17-22] definen el modelo.

$$[16] \quad k = 1 + (\rho_s f_{yh} / f'_c)$$

Si $\epsilon_c \leq 0.002k$

$$[17] \quad f_c = k f'_c [(2\epsilon_c / 0.002k) - (\epsilon_c / 0.002k)^2]$$

Si $0.002k < \epsilon_c \leq \epsilon_{20c}$

$$[18] \quad f_c = k f'_c [1 - Z(\epsilon_c - 0.002k)]$$

$$[19] \quad Z = \frac{0.5}{\epsilon_{50u} + \epsilon_{50h} - 0.002k}$$

$$[20] \quad \epsilon_{50h} = 0.75 \rho_s \sqrt{b/s}$$

$$[21] \quad \epsilon_{50u} = \frac{3 + 0.29 f'_c}{145 f'_c - 1000}$$

$$[22] \quad \epsilon_{20c} = \frac{0.8k}{Z + 0.002k}$$

La Figura 7 muestra el diagrama momento-curvatura obtenido de los EVC. Finalmente, la rigidez lateral de los EVC y su cortante asociado a los dos estados límite que la definen (17): Momento de agrietamiento M_{agr} y momento de fluencia M_y , se calculan con las fórmulas [23 y 24], donde H es la altura de los EVC. EI y M varían conforme al proceso de carga de la Figura 7.

$$[23] \quad K_c = 12EI/H^3$$

$$[24] \quad V = 2M/H$$

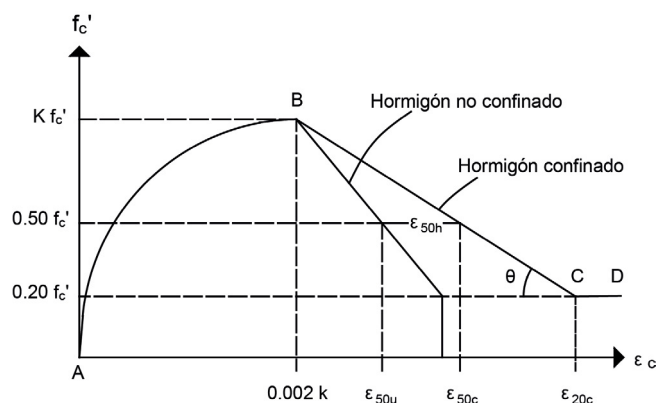


Figura 6. Modelo propuesto del comportamiento del hormigón (16).

3.4. Curva envolvente propuesta

La curva resistente envolvente del muro de mampostería se muestra en la Figura 8. En los puntos 2 y 3 ocurre el agrietamiento de la mampostería y/o EVC, en los puntos 4 y 5 falla la mampostería y/o EVC. Finalmente, el punto 6 refleja el colapso del sistema. La curva es una combinación de las propuestas en las referencias (12, 14, 15).

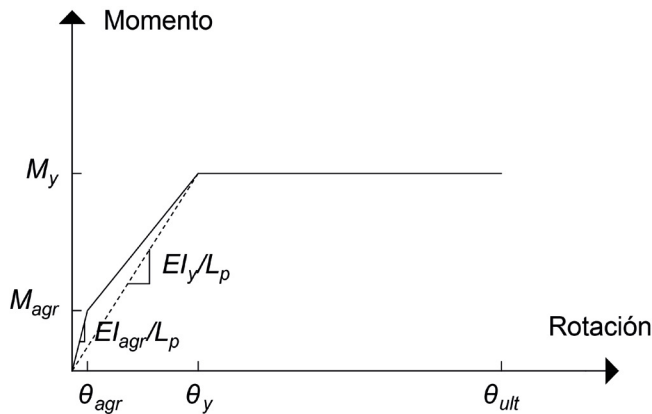


Figura 7. Diagrama momento-curvatura de los EVC (15).

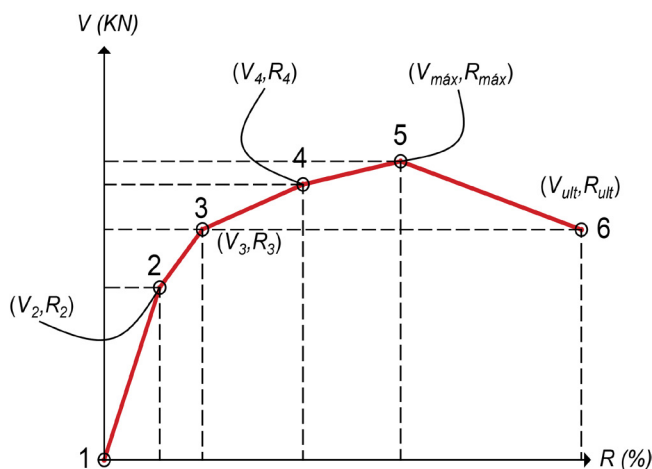


Figura 8. Curva envolvente propuesta.

Los puntos 2 al 5 de la curva propuesta, se obtienen (15):

1. Obtener la matriz de rigidez del muro a partir de la rigidez de los elementos. Ambos materiales tienen comportamiento lineal en el primer incremento.

$$[25] \quad K_T = K_{Mi} + nK_C$$

n , Número de elementos confinantes

2. Aplicar una fuerza lateral unitaria.
3. Evaluar el desplazamiento de la estructura.

$$[26] \quad \Delta_{UN} = 1/K_T$$

4. Obtener el cortante en cada elemento asociado a la fuerza unitaria, en la fórmula [27], k_i es la rigidez de cada elemento.

$$[27] \quad V_{UN} = (k_i) (\Delta_{UN})$$

5. Calcular el parámetro α para cada elemento, fórmula [28], donde V_s es el cortante resistente asociado al próximo punto de la curva de capacidad y V_T es el cortante total acumulado.

$$[28] \quad \alpha = (V_s - V_T)/V_{UN}$$

6. Evaluar el incremento de cortante (Δ_{VEL}) para cada elemento en función del menor valor de α obtenido y actualizar el cortante acumulado (V_{AC}).

$$[29] \quad \Delta V_{EL} = \alpha V_{UN}$$

$$[30] \quad V_{AC} = \sum \Delta V_{EL}$$

7. Evaluar el incremento de desplazamiento (Δ_{DES}) en función del valor de α elegido y actualizar el desplazamiento acumulado (Δ_{AC}).

$$[31] \quad \Delta_{DES} = \alpha \Delta_{UN}$$

$$[32] \quad \Delta_{AC} = \sum \Delta_{DES}$$

8. Regresar al primer paso y repetir el proceso hasta que los elementos alcancen su capacidad.
9. Se modifica el desplazamiento del muro debido al cortante máximo (punto 5) con la fórmula [33] (12).

$$[33] \quad d_{V_{máx}} = V_{máx}/0.25K_e$$

10. El valor máximo de cortante se obtiene con la fórmula [34].

$$[34] \quad V_{máx} = V_{ult_m} + 2nM_y/H$$

M_y , Momento de fluencia de los EVC,

11. Para el punto 6 se calculan el cortante último V_u y el desplazamiento último d_u con las fórmulas [35] y [36], respectivamente (14 y 12).

$$[35] \quad V_U = 0.80V_{máx}$$

$$[36] \quad d_U = d_{V_{máx}} + (0.20V_{máx}/0.0643K_e)$$

Finalmente, la curva de capacidad se obtiene al graficar la distorsión contra la fuerza cortante para cada incremento de análisis. La distorsión es la razón entre el desplazamiento lateral (Δ) y altura (H) del muro, fórmula [37].

$$[37] \quad R = \Delta/H$$

4. VALIDACIÓN DEL MÉTODO PROPUESTO EN MUROS Y ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES

La metodología se aplicó a 21 muros de mampostería confinada, cuyas características geométricas-mecánicas se obtuvieron de pruebas experimentales en muros a escala real

realizadas en Latinoamérica. Para más información al respecto se sugiere consultar en (18). El análisis estadístico muestra una relación promedio de 1.07 con un coeficiente de variación igual a 0.31 entre las energías disipadas obtenidas en la curva envolvente numérica respecto a la experimental en los muros analizados.

En este documento se extiende la aplicación a muros confinados por más de dos EVC y estructuras tridimensionales, comparando los resultados con valores experimentales y resultados de modelos de elementos finitos desarrollados por otros autores. En la Figura 9a se muestran las dimensiones de los muros ensayados en (19). Las figuras 9b, 9c y 9d muestran el resto de las estructuras analizadas. Las propiedades mecánicas de la mampostería (elaborada con piezas cerámicas) y EVC se encuentran en la Tabla 2.

La Tabla 3 presenta el cálculo implementado en una hoja de cálculo del sistema ME6 y sus envolventes experimental y numérica están en la Figura 10. Para el caso del modelo ME7, las envolventes se muestran en la Figura 11. En todos los sistemas se supone que la curva envolvente de capacidad es la misma en ambas direcciones.

Asimismo, las Figuras 12, 13 y 14 muestran las envolventes experimental y numérica de los modelos WWW, 3D y MCM, respectivamente.

El sistema estructural WWW (elementos confinantes y mampostería) fue modelado por Coral (20) mediante elementos finitos. Esta misma estructura fue analizada por Álvarez (21) mediante el Método de los Elementos Finitos (FEM) con un modelo de grieta giratoria y considerando

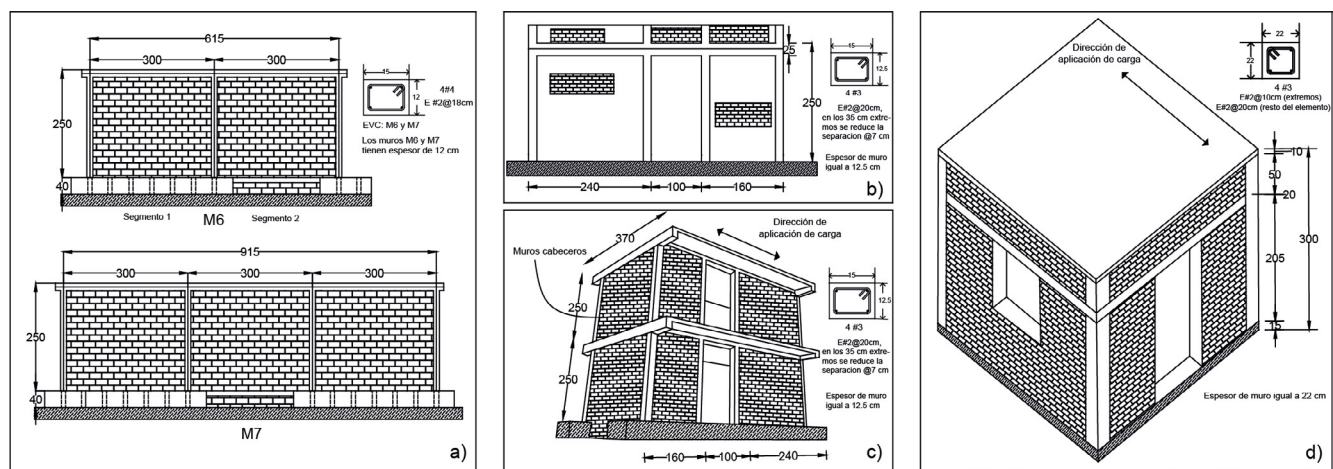


Figura 9. Características de los sistemas: a) ME6 y ME7 (19), b) WWW (18), c) 3D (18) y d) MCM (1). Dimensiones en cm.

Tabla 2. Propiedades mecánicas de la mampostería y elementos confinantes.

Muro	σ , MPa	v_m , MPa	E_m , MPa	f'_c , MPa	E_c , MPa	f_y , MPa	E_s , MPa
ME6 (19)	0.98	0.77	4,442.90	24.71	12,122.49	411.88	196,133.00
ME7 (19)	0.98	0.66	4,187.73	30.20	12,222.13	411.88	196,133.00
WWW (18)	0.49	0.59	2,965.53	19.61	18,534.57	454.05	184,365.02
3D (18)	0.49	0.59	1,494.53	21.57	13,886.22	411.88	196,133.00
MCM (1)	0.0084	0.33	1,529.84	19.12	20,888.16	412.86	196,133.00

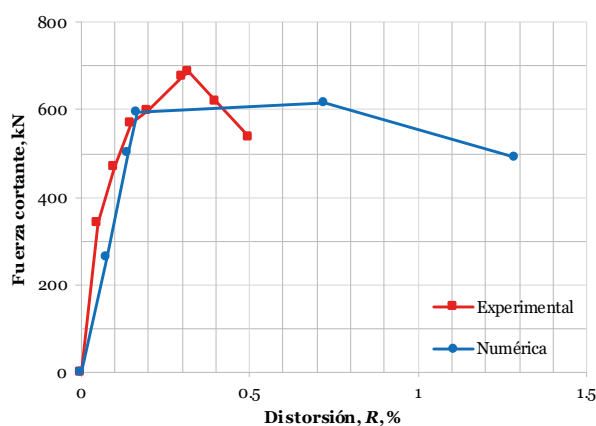


Figura 10. Envolventes sistema: ME6.

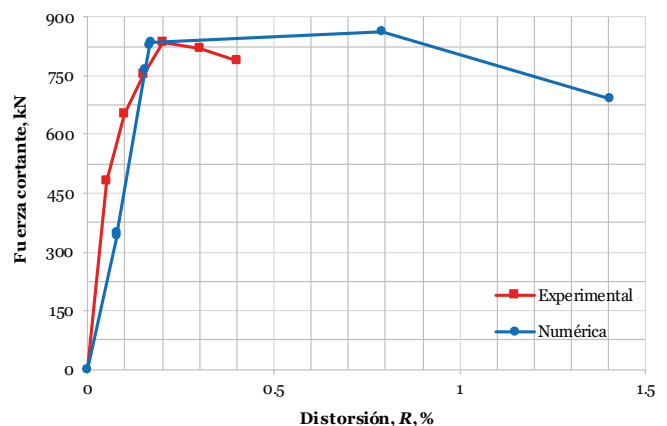


Figura 11. Envolventes sistema: ME7.

Tabla 3. Procedimiento de cálculo del muro ME6.

Elementos de hormigón armado (EVC)				Mampostería			
				Segmento 1		Segmento 2	
M_{agr} [(kN)(m)]	2.41	EI_{agr} [(kN)(m ²)]	710.53	V_{agrm} (kN)	130.06	V_{agrm} (kN)	130.06
M_y [(kN)(m)]	10.68	EI_y [(kN)(m ²)]	357.01	V_{ultm} (kN)	294.36	V_{ultm} (kN)	294.36
H (m)	2.5						
V_{agrc} (kN)	1.93	K_{c1} (kN/m)	545.69	K_{m1} (kN/m)	66,954.85	K_{m1} (kN/m)	66,954.85
V_{yc} (kN)	8.54	K_{c2} (kN/m)	274.19	K_{m2} (kN/m)	74,007.25	K_{m2} (kN/m)	74,007.25

Punto	Variable	Segmento 1		Segmento 2		Total	Daño
		Mampostería	EVC	Mampostería	EVC		
2	Rigidez (kN/m)	66,954.85	545.69	66,954.85	545.69	135,546.76	Agrietamiento de la mampostería
	Δ_{UN} (m)	$\Delta_{UN} = 1 / K_T$				7.38E-06	
	V_{UN} (kN)	0.494	0.0040	0.494	0.0040	1.00	
	α	263.30	479.39	263.30	479.39		
	ΔV_{EL} (kN)	130.06	1.06	130.06	1.06	263.30 (V2)	
	Δ_{DES} (m)	1.94E-03			$\Delta_{AC} = \Delta_2 =$	1.94E-03 (Δ_2)	
3	Rigidez (kN/m)	74,007.25	545.69	74,007.25	545.69	149,651.56	Agrietamiento de los EVC
	Δ_{UN} (m)	$\Delta_{UN} = 1 / K_T$				6.68E-06	
	V_{UN} (kN)	0.495	0.0036	0.495	0.0036	1.00	
	α	332.23	238.57	332.23	238.57		
	ΔV_{EL} (kN)	117.98	0.87	117.98	0.87	238.57	
	V_{AC} (kN)	248.04	1.93	248.04	1.93	501.87 (V3)	
4	Rigidez (kN/m)	74,007.25	274.19	74,007.25	274.19	148,837.06	Colapso de la mampostería
	Δ_{UN} (m)	$\Delta_{UN} = 1 / K_T$				6.72E-06	
	V_{UN} (kN)	0.497	0.0018	0.497	0.0018	1.00	
	α	93.14	3590.28	93.14	3590.28		
	ΔV_{EL} (kN)	46.32	0.17	46.32	0.17	93.14	
	V_{AC} (kN)	294.36	2.10	294.36	2.10	595.02 (V4)	
5	Rigidez (kN/m)	0.00	274.19	0.00	274.19	822.56	Colapso de los EVC
	Δ_{UN} (m)	$\Delta_{UN} = 1 / K_T$				1.22E-03	
	V_{UN} (kN)	0.00	0.33	0.00	0.33	1.00	
	α	0.00	19.33	0.00	19.33		
	ΔV_{EL} (kN)	0.00	6.44	0.00	6.44	19.33	
	V_{AC} (kN)	294.36	8.54	294.36	8.54	614.34 ($V_{m\acute{a}x}$)	
d5	Δ_{DES} (m)	2.35E-02			$\Delta_{AC} = \Delta_5 =$	2.8E-02 ($\Delta_{m\acute{a}x}$)	$R_5 = \Delta_5 / H$
	$K_e = V_{agr} / d_{agr} = V_2 / \Delta_2$ (kN/m)				=	135,546.76	Desplazamiento del punto 5
	$K_{Vm\acute{a}x} = 0.25 K_e$ (kN/m)				=	33,886.69	
6	$d_5 = d_{Vm\acute{a}x} = V_{m\acute{a}x} / K_{Vm\acute{a}x}$ (m)				=	1.8E-02 ($\Delta_{m\acute{a}x}$)	
	$V_u = 0.80 V_{m\acute{a}x}$ (kN)				=	491.48 (V_{ult})	Colapso del sistema ($V_{m\acute{a}x}$, $R_{m\acute{a}x}$)
	$d_u = d_{Vm\acute{a}x} + 0.20 V_{m\acute{a}x} / \beta_2$ (m)				=	3.2E-02 (Δ_{ult})	

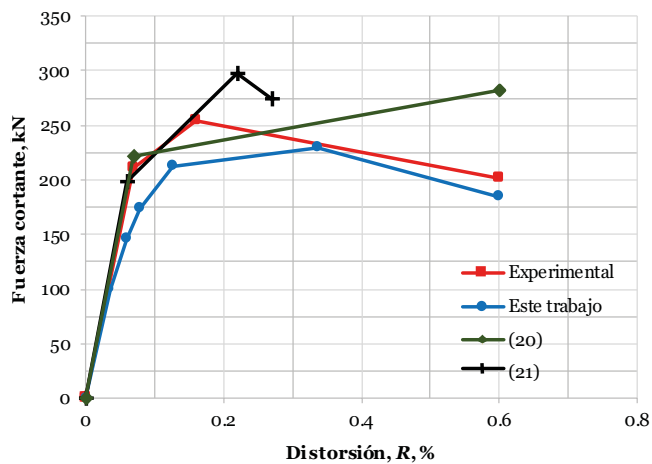


Figura 12. Envolventes mediante varios modelos sistema: WWW .

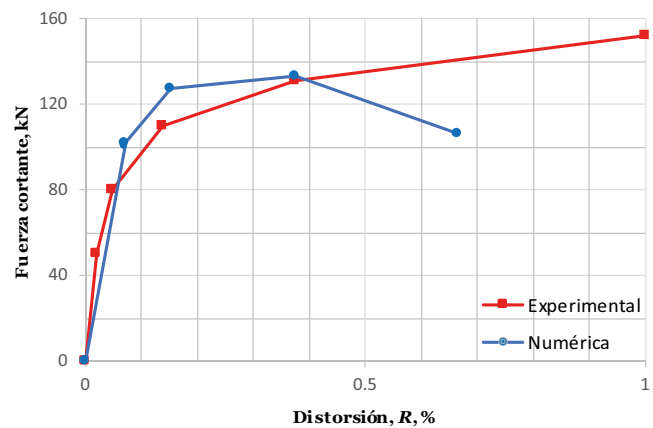


Figura 13. Envolventes sistema: MCM.

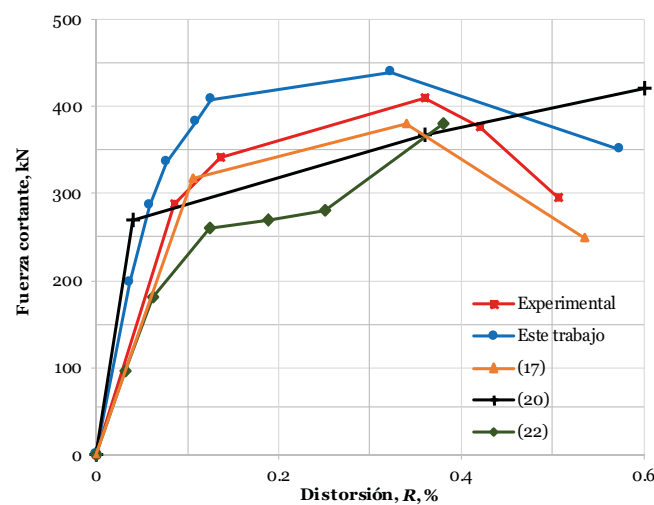


Figura 14. Envolventes de varios modelos para el sistema: 3D.

que la mampostería es homogénea ante esfuerzos de tensión, la comparación se muestra en la Figura 12.

Adicional al análisis de Coral (20) con los mismos principios del sistema WWW, la estructura 3-D fue analizada por Zúñiga y Terán (17) mediante el modelo de columna. También, Marques y Lourenco (22) propusieron un modelo analítico complejo basado en un enfoque de columna ancha que emplea una relación constitutiva fuerza lateral - desplazamiento.

5. APLICACIÓN A ESTRUCTURAS TRIDIMENSIONALES PROPIAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El método fue aplicado a estructuras, seleccionadas arbitrariamente, con diferentes niveles y complejidad. La primera es una construcción de un nivel, la segunda y tercera de dos niveles y la última está formada por tres niveles. Las cuatro edificaciones están construidas en Guerrero (México), donde se conocen las características mecánicas y físicas de los materiales (2), así como las dimensiones de las piezas, geometría y distribución del acero en los EVC. La distribución arquitectónica, alturas de entrepiso y tipo de piezas se definen por criterios ambientales y normativos, accesibilidad y tradición cultural, las piezas utilizadas

en todos los muros de las cuatro construcciones son sólidas. En el cálculo de la capacidad no se consideran los muros con longitud menor a 1.0 m porque la capacidad resistente es muy baja.

5.1. Estructura de un nivel (# 1)

Con la metodología propuesta se obtuvieron las curvas de capacidad de cortante basal-distorsión en las dos direcciones principales de una casa de salud de un nivel, área construida de 42 m². El sistema estructural está formado por muros de mampostería confinada de 15 cm de espesor y altura media de 2.75 m. La cubierta es una losa sólida de hormigón armado. La distribución de muros y sección de EVC se muestran en la Figura 15. Las propiedades de los materiales se muestran en la Tabla 4.

Para la evaluación de fuerzas sísmicas se utilizó el código local (23). El coeficiente de comportamiento sísmico es $Q=2.0$ en ambas direcciones con una aceleración espectral de 0.4.

La curva envolvente total (CET) en cada dirección, se obtiene mediante la superposición de las envolventes de resistencia de todos los muros para una distorsión dada (12),

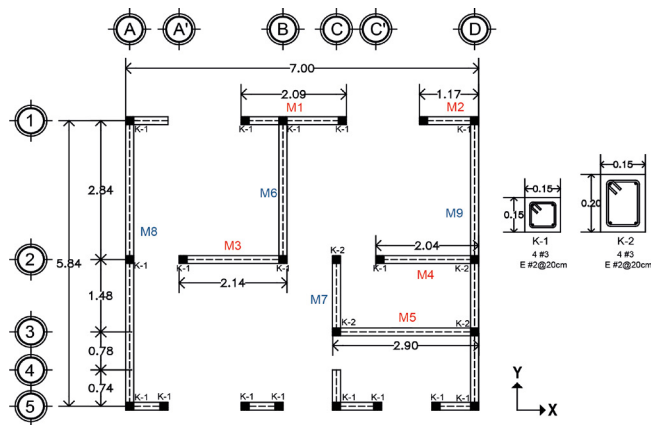


Figura 15. Distribución de muros (estructura # 1). Acotaciones en m.

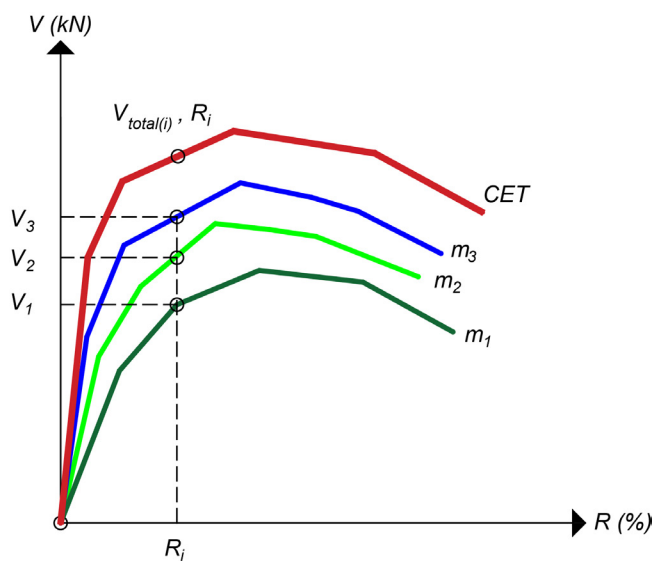


Figura 16. Curva envolvente total.

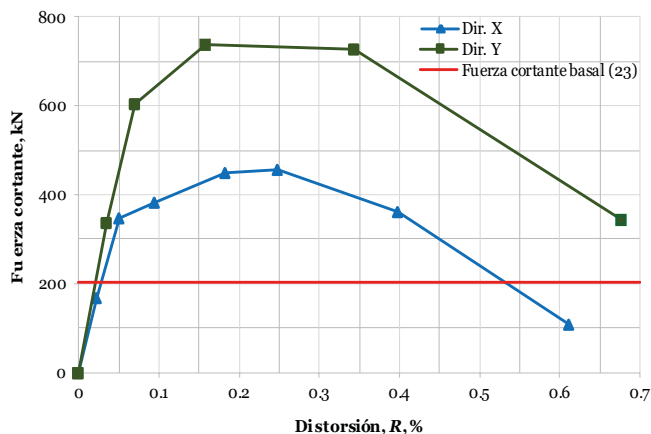


Figura 17. Curvas envolventes y fuerza cortante basal en estructura # 1.

Figura 16. La fuerza cortante total asociada a la distorsión R_i es:

$$[38] \quad V_{total(i)} = V_1 + V_2 + V_3$$

Así, la fuerza cortante basal actuante en ambas direcciones sin considerar periodo natural de la estructura es 200.92 kN. En la Figura 17 se muestran las curvas envolventes de capacidad carga-distorsión y fuerza cortante basal en la planta baja del edificio.

5.2. Estructuras de dos niveles (# 2 y # 3)

La estructura # 2 tiene uso habitacional con una superficie de 42.30m² en planta baja y 41.40 m² en primer nivel. La altura de entrepiso es 2.60 m. Las Figuras 18a y 18b muestran la distribución de muros en planta baja y primer nivel.

Los muros son de mampostería confinada con EVC y EHC (elementos horizontales confinantes), las piezas utilizadas tienen 15 cm de espesor. Las losas de entrepiso y azotea son de hormigón armado con 10 cm de espesor y están armadas con varillas de 3/8" de diámetro. La fuerza cortante basal actuante en ambas direcciones es 165.15 kN. La Figura 19a se muestran las curvas envolventes de capacidad carga-distorsión y fuerza cortante basal, en la planta baja del edificio.

La estructura # 3 es una versión ampliada de la estructura # 2. Tiene las mismas características en alturas de entrepiso, piezas, mampostería confinada, losa de entrepiso y azotea. La superficie de construcción es 68.46 m² en planta baja y 63.30 m² en primer nivel. Las Figuras 18c y 18d muestran la distribución de muros, respectivamente. La fuerza cortante basal actuante en ambas direcciones es 243.47 kN. La Figura 19b muestra las curvas envolventes de capacidad carga-distorsión y fuerza cortante basal, en la planta baja del edificio.

5.3. Estructura de tres niveles (# 4)

En este caso se analizó un edificio de tres niveles con una superficie de 72 m² por cada nivel. La altura de entrepiso es 2.50 m. En la Figura 20 se muestra la planta tipo y la distribución de muros.

Los muros son de mampostería confinada con EVC y EHC, las piezas utilizadas tienen 14 cm de espesor; en el lado corto se colocaron muros de hormigón armado con 14 cm de espesor (no considerados en el análisis). Las losas de entrepiso y azotea también son de hormigón armado con 10 cm de espesor. La fuerza cortante basal actuante en ambas direcciones es 700.58 kN. Las curvas envolventes de capacidad carga-distorsión y fuerza cortante basal en la planta baja del edificio se presentan en la Figura 19c.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de materiales y fuerza cortante basal en distintitos tipos de estructura.

Estructura	v_m , MPa	E_m , MPa	f'_c , MPa	E_c , MPa	f_y , MPa	E_s , MPa	V_{basal} , kN
1	0.49	2,451.66	19.61	20,803.04	411.88	205,939.65	200.92
2	0.49	2,451.66	19.61	20,803.04	411.88	196,133.00	165.15
3	0.49	2,451.66	19.61	20,803.04	411.88	196,133.00	243.47
4	0.49	2,451.66	24.52	23,258.53	411.88	205,939.65	700.58



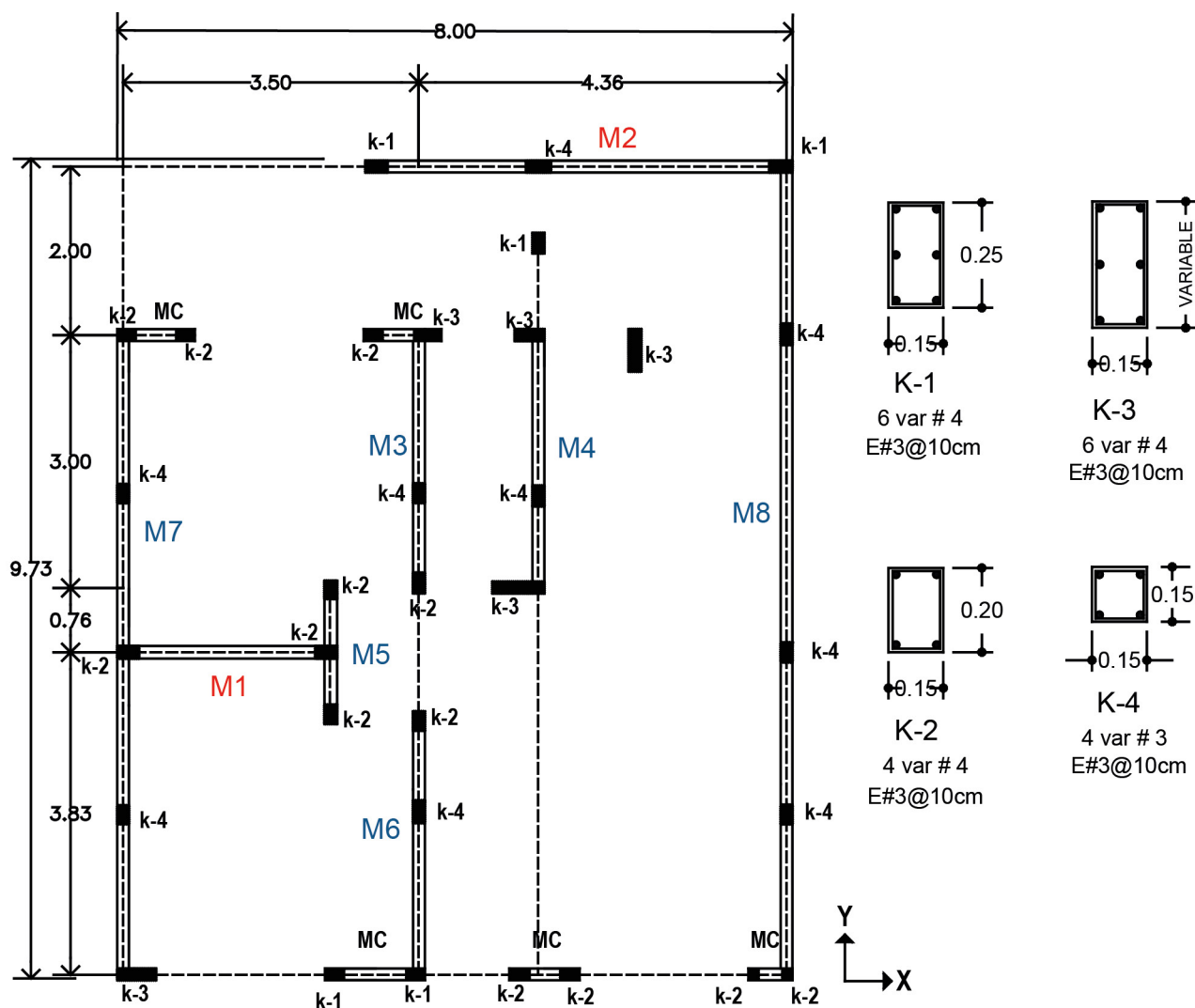


Figura 20. Planta tipo y distribución de muros (estructura #4). Acotaciones en m.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Como se observa, los resultados muestran la capacidad del método para evaluar la curva envolvente de capacidad. Sin embargo, debe comentarse lo siguiente:

- La rigidez inicial calculada es similar a la experimental.
- En los muros ME6 y ME7 se alcanzan valores de cortante máximo similares pero las distorsiones son menores, la diferencia tiene su origen en el modelo fuerza cortante-distorsión de la mampostería, Figura 5 y fórmulas 14-15, obtenidos experimentalmente en pruebas de muretes con piezas sólidas, mientras que estos muros fueron elaborados con piezas multiperforadas, las cuales tienen menor capacidad de deformación.
- En el muro (WWW) y estructura 3D, ambas curvas son similares y el procedimiento propuesto alcanza mayor o igual precisión que otros desarrollados con elementos finitos, los cuales exigen mucho esfuerzo computacional respecto al aquí utilizado.
- La estructura MCM fue ensayada en India (1), entre las diferencias principales respecto a los muros utilizados en la calibración del modelo están: espesores de muros aumentan a 22 cm, secciones transversales de EVC igual a 22 x 22 cm (columnas de hormigón armado),

detalle constructivo en la interfaz EVC-pieza donde hay una penetración de 4 cm del hormigón, colocación de EHC adicional. Lo anterior explica las diferencias entre distorsiones y cortantes resistentes respecto a los experimentales. Como se observa, la distorsión asociada al cortante máximo es 1%, un parámetro común en elementos de hormigón, pero lejano en estructuras de mampostería (24).

De acuerdo con la base de datos utilizados en la calibración (18) y los resultados obtenidos, para evaluar la envolvente de capacidad se propone un rango de las propiedades mecánicas de la mampostería y EVC en el que el modelo de cálculo será aplicable. Así, el esfuerzo cortante promedio (v_m) tiene valores entre 0.35-0.65 MPa, la resistencia a compresión del hormigón en EVC está entre 20 y 30 MPa, el esfuerzo vertical será entre 0.5 -1.0 MPa, la dimensión de los EVC paralela al muro no excede 20 cm, el espesor del muro no sobrepasa 15 cm.

Este modelo simplificado fue originalmente presentado en (15) y mejorado en (18), entre las modificaciones están: a) la deformación última de la mampostería, fórmula 15; b) las fórmulas para evaluar el punto 6; c) la modificación de la distorsión del punto 5. Inicialmente, el método fue

calibrado con datos experimentales de muros confinados por dos EVC; posteriormente, los autores realizaron una extensa búsqueda bibliográfica sobre ensayos de muros confinados por tres o más EVC y/o estructuras tridimensionales, encontrando solamente los aquí referenciados.

En otro orden, las curvas de capacidad basal carga-distorsión de las construcciones estudiadas indican valores de 2.20 a 4.50 de la relación cortante resistente vs. cortante actuante en la dirección larga, donde normalmente existe mayor cantidad de muros. Sin embargo, el proyecto arquitectónico obliga a disminuir muros en la dirección corta y la relación referida está entre 1.40 y 3.70 en las tres primeras construcciones, en la cuarta edificación (tres niveles) se reduce a 0.44, indicando un fallo estructural. Referente a la distorsión permisible asociada al estado límite de seguridad estructural, el código local define valores de 0.005, mientras que las distorsiones asociadas al cortante máximo están entre 0.0025 a 0.0034; esto implica, de acuerdo con las Figuras 17, 19, 20 y 22, que el daño en las construcciones para la distorsión normativa podría ser severo e impactar en la seguridad estructural y en costos excesivos de reparación.

8. REFERENCIAS

- (1) Chourasia, A., Bhattacharyya, S., Bhandari, N., Bhargava, P. (2016). Seismic performance of different masonry buildings: full-scale experimental study. *American Society of Civil Engineers*, 30(5), doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0000850](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000850).
- (2) Sánchez Tizapa, S., Villaseñor Franco, A., Guinto Herrera, E., Barragán Trinidad, R., & Mebarki, A. (2017). A Proposal of Reference Values for Diagonal Compressive Strength and Compressive Strength of Masonry Design in Guerrero State, Mexico. *Revista ALCONPAT*, 7(3), 231 - 246. doi: <https://doi.org/10.21041/ra.v7i3.159>.
- (3) Schacher, T. and Hart, T. (2015). General aspects of confined masonry construction. *Construction Guidelines for Low-Rise Confined Masonry Buildings* (pp. 11-20). Suiza: Confined Masonry Network.
- (4) Brzev, S., Meli, R. (2012). International guideline for seismic design of low-rise confined masonry buildings in regions of high seismic risk. *15th World Conference on Earthquake Engineering 2012*.
- (5) SSN (2017). Reporte especial del sismo del 19 de septiembre de 2017. http://www.ssn.unam.mx/sismicidad/reportes-especiales/2017/SSNMX_rep_esp_20170919_Puebla-Morelos_M71.pdf. Servicio Sismológico Nacional.
- (6) CICM (2017). *Resumen preliminar de daños de los inmuebles inspeccionados por las brigadas del CICM del sismo del 19/09/2017*. Colegio de Ingenieros Civiles de México.
- (7) Vizconde, A., Cortes, M., Macas, F. (2017). Daños y comportamiento estructural de edificación irregular en Bahía de Caraquez-Ecuador debido al sismo del 16 de abril de 2016. *XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica*. Guadalajara, Jalisco.
- (8) Valdebenito, G., Alvarado, D., Sandoval, C., Aguilar, V. (2015). Terremoto Iquique $M_w=8.2$ -01 Abril 2014: Daños observados y efectos de sitio en estructuras de albañilería. *XI Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2015*.
- (9) Qiwan, Su, Gaochuang, Cai, Si Larbi A. (2019). Seismic Damage Assessment Indexes for Masonry Structures. *Journal of Structural Engineering*, 145(7), 04019066. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0002347](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002347).
- (10) Crisafulli, F., Carr, A., Park, R. (2000). Analytical modelling of infilled frame structures- A general overview. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, 33(1).
- (11) Mann, W., Müller, H. (1982). Failure of shear-stressed masonry- An enlarged theory, test and application to shear walls. *Proceedings of the British Ceramic Society*, 1, 139-149.
- (12) Alcocer, S., Hernández, H., Sandoval, H. (2013). Envolvente de resistencia lateral de piso para estructuras de mampostería confinada. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (89), 24-54.
- (13) Xu, H., Gentilini, C., Yu, Z., Wu, H., Zhao, S. (2018). A unified model for the seismic analysis of brick masonry structures. *Construction and building materials*, (184), 733-751, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.208>.
- (14) Tomazevic, M. (2000). Seismic resistance verification of structural walls. *Earthquake-resistant design of masonry buildings* London: Editorial Imperial College Press. (pp. 109-123).
- (15) Sánchez, S., Arroyo, R., Jerez, S. (2010). Modelo de un grado de libertad para evaluar la curva carga lateral-distorsión en muros de mampostería confinada. *Revista de Ingeniería Sísmica*, (83), 25-42.
- (16) Scott, B., Park, R., Priestley, M. (1982). Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates. *ACI Journal*, 79(1), 13-27. doi: <https://doi.org/10.14359/10875>.
- (17) Zúñiga, O. y Terán, A. (2008). Evaluación basada en desplazamientos de edificaciones de mampostería confinada. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 79, 25-48.

7. CONCLUSIONES

El estudio del comportamiento de la mampostería confinada ante carga lateral es complejo, debido a la interacción existente entre los elementos componentes (mortero, piezas de mampostería y elementos confinantes) y al comportamiento no lineal para bajos niveles de esfuerzo. Una forma simplificada de evaluar la curva basal de capacidad en muros de mampostería ante cargas laterales, generadas por la frecuente presencia de sismos, es considerar la mampostería-EVC como un macro-elemento compuesto por dos resortes: a) el primero asociado a la mampostería propiamente dicha y obtenido a partir de resultados de pruebas de muretes con comportamiento elastoplástico, b) el segundo asociado a los EVC y obtenido del diagrama momento-curvatura. Los resortes forman un sistema en paralelo con un desplazamiento horizontal como único grado de libertad y el modo de fallo estructural supuesto es el agrietamiento: por tensión diagonal sobre la mampostería y por cortante de los EVC. La curva propuesta tiene 5 puntos en un espacio bidimensional: distorsión-carga lateral. El modelo aquí desarrollado permite evaluar la curva de capacidad basal en construcciones de mampostería confinada en forma aproximada pero rápida y con bajo esfuerzo computacional.

- (18) Godínez, V.M. (2019). Propuesta de curva de capacidad carga-distorsión para construcciones de mampostería confinada de baja altura, sujetas a efecto sísmico (Tesis de Maestría). México: FI- UAGro.
- (19) Pérez, J., Flores, L., Alcocer, S. (2015). An experimental study of confined masonry walls with varying aspect ratios. *Earthquake Spectra*, 31(2), 945-968. doi: <https://doi.org/10.1193%2F090712EQS284M>
- (20) Coral, M. (2004). Revisión de algunas de las hipótesis del método simplificado de análisis sísmico para muros de mampostería confinada (Tesis de Maestría). México: FI-UNAM.
- (21) Álvarez, J. (2000). Estudio analítico sobre el comportamiento no lineal de muros de mampostería confinada con y sin aberturas (Tesis de maestría). México: FI- UNAM.
- (22) Marques, R., Lourenço, P.B. (2013). A model for pushover analysis of confined masonry structures: implementation and validation. *Bull Earthquake Eng*, 11: 2133-2150. <http://doi.org/10.1007/s10518-013-9497-5>.
- (23) RCMEG (1994). *Reglamento de Construcciones para los Municipios del Estado de Guerrero*.
- (24) NTCM-RCCDMX (2017). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería. Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México*. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.