

Revisión de Normas de Diseño para Mampostería Confinada en Latinoamérica: Propuestas para la Norma Ecuatoriana de Construcción

Quinde, John A^{1,*} ; Jiménez-Pacheco, Juan¹ ; Ortega-Guamán, Erika¹ 

¹Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca, Ecuador

Resumen: La edificación de mampostería confinada (MC) es una tipología estructural de uso extendido en Latinoamérica para viviendas de baja a mediana altura, puesto que, con un adecuado diseño y ejecución en obra, ha mostrado un buen desempeño sísmico. Es importante extraer lecciones del comportamiento de esta tipología ante terremotos recientes y actualizar las normas de diseño de acuerdo al estado del conocimiento. Precisamente, la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) se encuentra en un proceso de actualización. Con tal motivación, el presente trabajo se planteó como una revisión comparativa entre los capítulos de la NEC encargados del diseño de MC y varias normas latinoamericanas. Se contrastaron las disposiciones más importantes de tres secciones específicas: 1) materiales, 2) requerimientos constructivos y 3) resistencia a carga lateral de los muros. Considerando la realidad tecnológica y la práctica constructiva del país, se identificaron deficiencias y limitaciones en la NEC. Además, con base en resultados experimentales, se corroboró la mayor fiabilidad de la fórmula con un enfoque Coulomb para estimar la resistencia a carga lateral de los muros de MC. Finalmente, se plantearon conclusiones y recomendaciones para la actualización de la norma nacional en lo tocante a MC.

Palabras clave: mampostería confinada, diseño sísmico, NEC 2015, resistencia a cortante, detalles constructivos

Review of Design Standards for Confined Masonry in Latin America: Proposals for the Ecuadorian Construction Standard

Abstract: Confined masonry (CM) construction is a structural typology widely used in Latin America for low to medium-rise buildings, since with an adequate design and execution on site, it has shown a good seismic performance. It is important to draw lessons from the behavior of this typology in recent earthquakes and update the design standards according to the state of knowledge. Precisely, the Ecuadorian Construction Standard (NEC) is in a process of updating. With such a motivation, the present work was conceived as a comparative review between the chapters of the NEC of CM design and several Latin American standards. The most important provisions of three specific sections were contrasted: 1) materials, 2) construction requirements and 3) lateral load strength of walls. Considering the technological reality and the constructive practice of the country, deficiencies and limitations in the NEC were identified. In addition, based on experimental results, the greater reliability of the formula with a Coulomb approach to estimate the lateral load strength of CM walls was corroborated. Finally, conclusions and recommendations were made for updating the national standard regarding CM.

Keywords: confined masonry, seismic design, NEC 2015, shear strength, constructive details

1. INTRODUCCIÓN

La Mampostería Confinada (MC) es una de las tipologías más usadas en Latinoamérica para viviendas de baja a mediana altura, debido a su facilidad constructiva y a su conveniencia económica (Brzev et al., 2010; Meli et al., 2011). Bien implementada, supone un proceso constructivo secuencial: primero, los paneles de mampostería, y posteriormente los elementos de confinamiento de Hormigón Armado, HA

(Figura 1). En Ecuador, junto con la tipología de marco de HA relleno de mampostería, constituyen las dos tipologías más populares para edificaciones de baja altura. López & Ushiña (2017) establecieron, a partir de información de los permisos de construcción otorgados entre 1991 y 2015, las preferencias sobre los sistemas constructivos para vivienda. El 90% de las edificaciones construidas en ese período correspondieron a una tipología de marco de hormigón armado (HA) relleno de mampostería. Si bien López & Ushiña (2017) no distinguieron

*john.quinde@ucuenca.edu.ec

Recibido: 26/10/2021

Aceptado: 27/09/2022

Publicado en línea: 02/02/2023

10.33333/rp.vol51n1.07

CC 4.0

entre edificaciones de mampostería confinada (E-MC) y edificaciones de marco relleno de mampostería (E-MRM), el grueso de ese porcentaje correspondería al primer grupo.

Existe un amplio consenso respecto del comportamiento satisfactorio de las E-MC ante acciones sísmicas. Según Moroni et al. (2004), Meli et al. (2011) y Brzev et al. (2010), las campañas post-terremoto de evaluación de daños en Lillole (M=7.8), Chile, 1985, en Haití (M=7.0), 2010, y en Maule (M=8.8), Chile, febrero de 2010, revelaron que las E-MC tuvieron un comportamiento adecuado ante la acción sísmica. Los daños en las viviendas de baja altura diseñadas de acuerdo a los requerimientos fueron, en su mayoría, leves. En relación con las E-MC con daños severos, entre las causas más frecuentes para ello se destacan la mala calidad de los materiales de la mampostería y de la construcción y las deficiencias en el detallado del refuerzo de los elementos de confinamiento (Brzev et al., 2010; Meli et al., 2011).

En Ecuador, según el informe realizado por el EERI (Earthquake Engineering Research Institute) después del terremoto ocurrido en Manabí, en abril de 2016 (M=7.8) (Haro et al., 2016), las edificaciones de mampostería de hasta tres o cuatro pisos mostraron serias deficiencias constructivas. Por ejemplo, en las zonas afectadas, no fue raro observar edificaciones de muros confinados con la secuencia constructiva invertida: primero pórticos y en segunda instancia, paredes. De este modo, se generaron sistemas de pórtico flexible con paredes de relleno pesadas y mal conectadas, sin una unión efectiva entre la mampostería, el concreto y el refuerzo. En estas condiciones, los pequeños elementos de HA (de 20cm x 20cm) rara vez son capaces de resistir adecuadamente las fuerzas sísmicas, y los rellenos tienden a volcarse fuera de su plano. Por lo tanto, es evidente que un comportamiento adecuado de las E-MC ante eventos sísmicos está directamente relacionado con el cumplimiento de las normas de diseño y construcción.

La norma vigente encargada del diseño y construcción de E-MC en el Ecuador es la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), promovida por la Subsecretaría de Hábitat y Asentamientos Humanos del Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, MIDUVI, y oficializada en el año 2014 bajo el Acuerdo Ministerial 0028, como una actualización del Código Ecuatoriano de la Construcción del 2001 (NEC-SE-MP, 2015). Como parte de la NEC, existen dos capítulos que abordan el diseño sísmico y la construcción de E-MC. El primero, NEC-SE-MP (2015), establece los criterios y requisitos mínimos para el diseño de estructuras de mampostería estructural de hasta cuatro pisos. En la sección 9 de este capítulo, se recomienda aplicar directamente el Título D de la norma colombiana NSR-10 (2010) para el diseño de E-MC. El segundo capítulo, NEC-SE-VI (2015), se ocupa del diseño de viviendas pequeñas de hasta dos pisos y con luces de hasta 5 metros; está basado en la Norma Colombiana NSR-10, capítulo E, y, en menor medida, en la Norma Mexicana NTC-M (2017).

Una revisión crítica de las normas de construcción más actuales es una tarea insoslayable en el proceso de actualización de la norma de construcción de un país. Las

nuevas disposiciones normativas procurarán recoger la evidencia generada después de los terremotos recientes y el estado del conocimiento. En los trabajos de Marques & Lourenço (2019) y Brzev et al. (2019) se realiza una revisión de las normativas más importantes de MC y se señalan aspectos relevantes que deberían ser considerados para un diseño adecuado de las E-MC y que no son contemplados en las normativas revisadas en estos trabajos. En el país, después del terremoto del 16 de abril de 2016 (sismo 16-A, Ecuador), se publicaron guías de diseño y construcción de E-MC que incorporaban algunos aspectos descuidados en la norma nacional. En particular, los documentos elaborados por la Agencia Suiza para la Cooperación y el Desarrollo - COSUDE (2017) y por el MIDUVI y la Secretaría de Gestión de Riesgos (2017) se elaboraron con el objetivo de impulsar una construcción sismorresistente en MC para viviendas de hasta dos pisos. Ante la activación de las discusiones para actualizar la NEC en todos sus capítulos, los autores no hemos encontrado trabajos recientes de revisión en lo concerniente a las E-MC. Por lo tanto, en este trabajo se planteó como objetivo una revisión crítica de la norma nacional con respecto a algunas normas latinoamericanas y a la literatura especializada. Producto de ello, se establecieron observaciones y lineamientos de mejora a la NEC en lo relativo al diseño sismorresistente de E-MC.

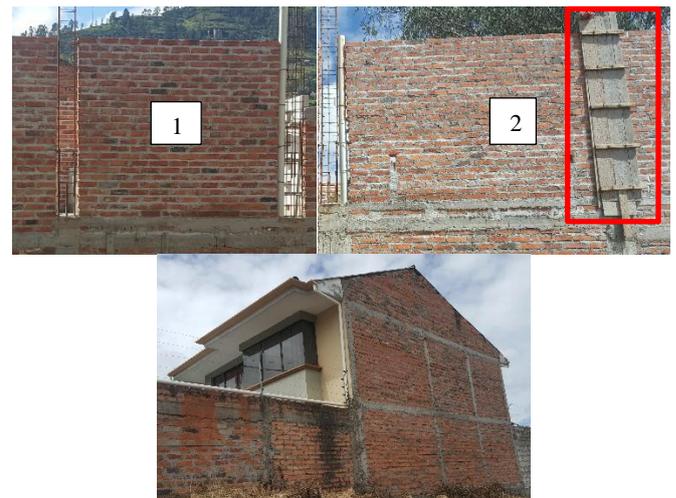


Figura 1. Proceso constructivo de las E-MC: 1) el panel de mampostería y 2) las columnas y vigas de confinamiento

Para la tarea de revisión, se tomaron los capítulos NEC-SE-MP y NEC-SE-VI de la Norma Ecuatoriana, contrastándolos con los capítulos análogos de las siguientes normas, consideradas en sus versiones más recientes:

- Reglamento Colombiano NSR-10 (2010)
- Norma Técnica Mexicana NTC-M (2017)
- Norma Chilena NCh 2123 (2003)
- Norma Técnica Peruana NTP E.70 (2006)
- Reglamento Argentino INPRES-CIRSOC 103(2018)

La selección de este grupo de normativas fue motivada por la similitud de la técnica constructiva en los países respectivos, y por su reconocimiento en la literatura especializada (Brzev et al., 2019; Marques & Lourenço, 2019; Meli et al., 2011). Además, la revisión se complementó con el estado del arte del

diseño de MC y aspectos relacionados a la realidad constructiva del Ecuador, con el objetivo de resaltar la importancia de ciertos requerimientos de diseño. Tras una ponderación de la importancia de los varios aspectos del diseño sismorresistente de E-MC, se consideraron para la discusión los tres siguientes: 1) materiales, 2) aspectos constructivos, y 3) cálculo de la resistencia/capacidad a carga lateral (también conocida como resistencia a cortante).

2. MATERIALES DE LA MAMPOSTERÍA CONFINADA

Con respecto a la sección de materiales de las normas de diseño de E-MC, se especifican los requerimientos que han de cumplir las componentes del muro: las unidades de mampostería, el mortero, el panel de mampostería, el hormigón de los elementos de confinamiento y el acero de refuerzo. Estas disposiciones tienen por objetivo garantizar, bajo los factores condicionantes de cada país (v.g. materiales, técnicas constructivas), un adecuado comportamiento sísmico en sus edificaciones. Por esta razón, en esta sección de las normas se observa una clara diferenciación de los requerimientos en cada país, apuntando a la validez local de las propiedades exigidas de los materiales, sobre todo en lo referente a la mampostería y sus componentes. Igualmente, es común que cada país tenga su propia normativa para el ensayo de los materiales que conforman la MC.

2.1 Unidades de mampostería

Las unidades de mampostería se clasifican en dos tipos principales: sólidas/macizas y huecas/perforadas, y se subclasifican según su material (v.g. arcilla, hormigón) o su tipo de fabricación (artesanal o industrial). La sección de materiales de las normas estudiadas aquí regula tanto su geometría como su resistencia a compresión (Tabla 1). Las exigencias son más estrictas en el caso de unidades huecas de perforación vertical (Figura 2a), concentrándose en regular el área neta, esto es, el área maciza sin perforaciones, los espesores de los bordes macizos de la unidad y valores mínimos de resistencia a compresión (f'_b). Las unidades sólidas (Figura 2c), que son las que tienen un área neta mayor al 75% del área bruta, deben cumplir con valores de f'_b menores a los exigidos a las unidades perforadas (Tabla 1). Esto se debe a que las investigaciones experimentales han mostrado que los muros con este tipo de unidades tienen un mejor comportamiento sísmico que aquellas con unidades huecas (Alcocer et al., 2003; Marques & Lourenço, 2019; San Bartolomé, 2005). Por último, en lo que respecta a las unidades de perforación horizontal (Figura 2b), su uso se prohíbe en la mayoría de normas puesto que se ha probado que no resisten carga vertical de manera adecuada (Meli et al., 2011). Con todo, la norma NEC y la NSR-10 permiten el uso de estas unidades en edificaciones de hasta 2 pisos, en muros con baja carga axial.

En el caso de Ecuador, la NEC especifica el tipo de unidades permitidas y sus resistencias mínimas a compresión (Tabla 1), pero no establece los requerimientos geométricos para las unidades huecas, de acuerdo al mercado nacional (Figuras 2a-2c). La mayoría de normas exigen que las unidades huecas

portantes tengan un área neta mínima del 40% al 50% del área bruta de la unidad, permitiéndose únicamente las unidades con perforaciones verticales. Sin embargo, los fabricantes locales no suelen especificar en sus catálogos las características geométricas requeridas para clasificar las unidades huecas. Por otra parte, la norma NTE INEN 293 (INEN, 2014), que contiene las disposiciones para ladrillos cerámicos, tampoco prescribe requerimientos geométricos para las unidades huecas. Todas estas omisiones en la regulación de las piezas de mampostería se traducen en prácticas constructivas inadecuadas, por ejemplo, el uso de unidades de perforación horizontal, especialmente el tipo conocido en la práctica constructiva como *tochana* (Figura 2d).

2.2 Mortero

Es conocido que la resistencia a compresión de la mampostería (f'_m) depende de la resistencia a compresión del mortero (f'_j) y del espesor de la junta horizontal. No obstante, este segundo parámetro no se considera en algunas normas (Tabla 1). Para espesores de junta entre 10 y 15mm, a mayores valores de f'_j , mayores valores de f'_m (NCh 2123, 2003; NTC-M, 2017). En cambio, espesores excesivos de la junta de mortero conllevan a una reducción en la resistencia a compresión de la mampostería (Meli et al., 2011). A este respecto, las normas estudiadas recomiendan dosificaciones (que pueden incluir cal hidratada) para alcanzar las resistencias a compresión mínimas, de acuerdo al tipo de mortero (Tabla 1). La NEC-SEMP estipula los tipos de morteros de pega en términos de dosificaciones, especificando sus resistencias a compresión; sin embargo, no regula el espesor de la junta horizontal de mortero para alcanzar las resistencias de diseño. Además, la resistencia mínima permitida, de 2.5 MPa, es muy inferior a las estipuladas en las demás normas, las cuales están entre 5 y 7.5 MPa, para morteros de pega usados en mampostería estructural.

2.3 Panel de mampostería

El panel de mampostería, compuesto por las unidades de mampostería y la ligazón de mortero, es la parte del muro de MC que contribuye mayoritariamente a resistir la acción sísmica (Tomažević & Klemenc, 1997), de ahí que las normas regulen fuertemente sus propiedades y controlen su calidad. Una de estas propiedades es la resistencia a compresión de la mampostería, f'_m . Según Tripathy & Singhal (2019), la resistencia a cortante en el plano de los muros está influenciada significativamente por f'_m , por el espesor del muro, t , y , en menor medida, por la resistencia a compresión del hormigón de las columnas de confinamiento, f'_c . Las normas de diseño proponen dos métodos principales para determinar f'_m : el experimental, consistente en un ensayo de murete (Figura 3a), y el teórico, obtenido mediante fórmula, a partir de las resistencias a compresión de la unidad de mampostería y del mortero. Como alternativa, la Norma Mexicana (NTC-M, 2017), la Norma Peruana (NTP E.70, 2006) y el Reglamento Argentino (INPRES-CIRSOC 103, 2018), recomiendan valores de f'_m , limitándose a viviendas de uno y dos pisos, bajo ciertas condiciones de los materiales.

La segunda propiedad fundamental de la mampostería es la resistencia básica a corte o resistencia a compresión diagonal (v_m), obtenida del ensayo de compresión diagonal de muretes (Figura 3b). Esta propiedad es un parámetro básico para establecer la resistencia (nominal) a carga lateral de los muros de MC, V_n . Por simplicidad, en la NEC y la NSR-10 usan, en

lugar de v_m , $\sqrt{f'_m}$, disminuyendo la calidad de la correlación (sección 4.3). En las normas NTC-M, NTP E.70 e INPRES CIRSOC 103, se presentan tablas con valores recomendados, los cuales se pueden usar bajo determinadas condiciones.

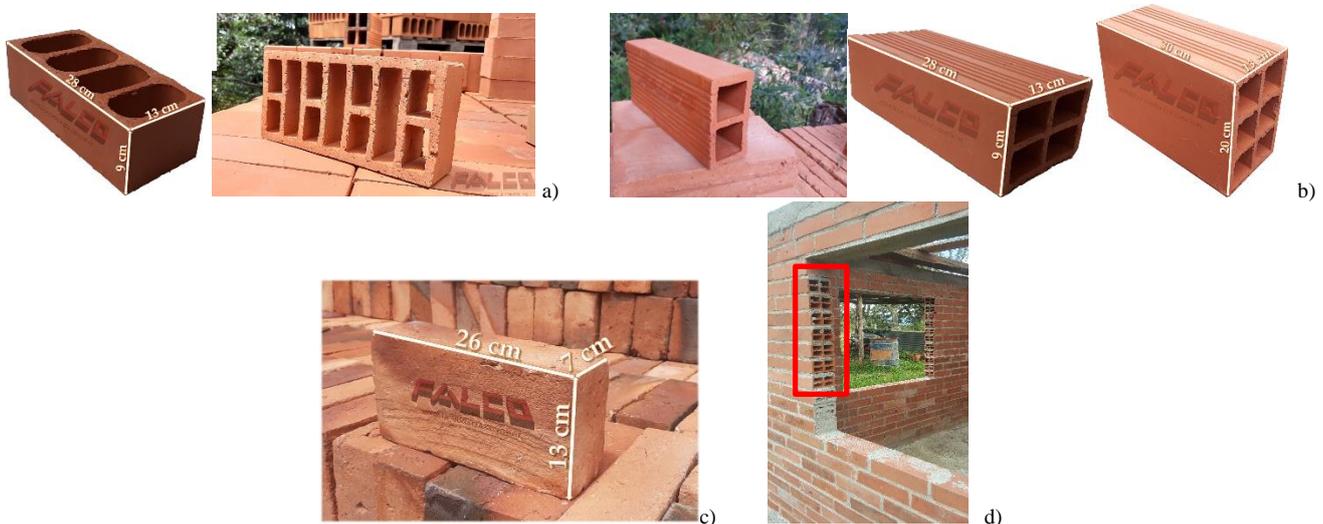


Figura 2. Ladrillos de arcilla disponibles en el cantón Cuenca: a) ladrillos de perforación vertical para uso estructural 4H y 11H, b) ladrillos de perforación horizontal 2H, 4H y 6H (tochana) para uso no estructural, c) Ladrillo macizo artesanal (panelón) para uso estructural especialmente en MC. Fuente: Fabrica FALCO, Cuenca-Ecuador, <https://www.f-falco.com> y d) Uso de ladrillo de perforación horizontal en vivienda de MC en Cuenca-Ecuador.

La NEC-SE-MP, en su Sección 3.4, permite la determinación de f'_m mediante el método experimental (NEC-SE-MP, Sección 10) o de manera teórica, según los lineamientos dados en el ACI 530 (2016) u otros procedimientos que se juzguen aplicables. Respecto a esta tercera posibilidad, según Meli et al. (2011), el valor de f'_m es muy variable ya que depende de los materiales de cada país, del control de calidad en la fabricación, de su tecnología y técnica constructiva; por lo tanto, es deseable generar procedimientos propios en este apartado. En cuanto a v_m , la NEC-SE-MP, no lo considera como parámetro en el proceso de diseño, aunque incluye en el anexo 10.2 el procedimiento para el ensayo de compresión diagonal. Cabe destacar que algunas normas indican el método para evaluar f'_m y v_m , en función de la altura de las edificaciones y el nivel de amenaza sísmica de su lugar de emplazamiento. Así, al tratarse del diseño de edificaciones de más de 2 pisos, la NTC-M estipula el método experimental como el indicado para determinar tales propiedades.

Los elementos de confinamiento de HA son parte importante de los mecanismos de resistencia de los muros de MC tanto a carga vertical como lateral, sobre todo en las etapas posteriores al agrietamiento. En tal sentido, la calidad del hormigón de los elementos de confinamiento se controla en términos de su resistencia a compresión simple a los 28 días, f'_c (Tabla 1); una resistencia adecuada evita que se produzca el

aplastamiento del hormigón en la base de las columnas de confinamiento (Yekrangnia et al., 2017). En Ecuador, la norma establece para las E-MC una resistencia mínima a la compresión simple de 21 MPa (NEC-SE-MP, 2015; NEC-SE-VI, 2015). Esto, lamentablemente, dista mucho de cumplirse en la práctica. En el trabajo de Rea et al. (1989), a partir de muestras de hormigón (destinado a elementos estructurales) tomadas *in situ* de 60 construcciones en la ciudad de Cuenca y ensayadas a los 28 días, se obtuvo una resistencia media a compresión simple de 7.8 MPa. El hormigón de baja resistencia puesto en obra aumenta la posibilidad de modos de fallas no deseados como la falla por compresión de muros en E-MC; ésta se produce tras haberse presentado un agrietamiento significativo en la mampostería y transferido a las columnas prácticamente toda la carga vertical (Marques & Lourenço, 2019).

En relación con el acero de refuerzo, las normas exigen para los elementos que soportan cargas laterales, tanto para el refuerzo longitudinal como transversal, varillas corrugadas con un esfuerzo de fluencia, f_y , de 420 MPa en la mayoría de los casos. Los procedimientos para su fabricación y control de calidad que se presentan en las normas de los países considerados están tomados de las especificaciones de la ASTM (ASTM A706).

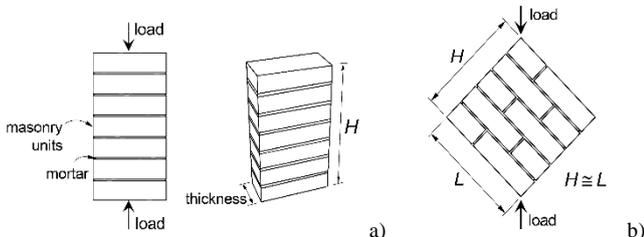


Figura 3. Ensayo de especímenes de mampostería: a) resistencia a compresión (f'_m), y b) resistencia básica a corte (v_m) (Tomado de Meli et al., 2011)

2.4 Materiales de los elementos confinantes

3. REQUERIMIENTOS CONSTRUCTIVOS

Los detalles constructivos de los elementos estructurales que conforman la MC son parte fundamental del proceso de diseño presentado en las normas. Estas reglas de detallado evitan mecanismos de falla evidenciados en reportes de evaluaciones post-sismo y aseguran un desempeño estructural adecuado de

las E-MC (Meli et al., 2011). A continuación, se hace una revisión de los requerimientos generales para estructuras de MC, correspondientes a la geometría de elementos (cadenas y panel), detallado del refuerzo en los elementos de HA, los mecanismos de conexión panel-marco de HA y otros aspectos constructivos exigidos por las normas aquí analizadas.

Tabla 1. Requerimientos para materiales usados en mampostería estructural

Norma	Unidades de mampostería permitidas	Perforaciones en unidades	f'_b (MPa)	f'_j (MPa)	f'_c (MPa)	Ancho junta mortero (mm)
NEC-SE-MP (2015)	a) Ladrillo macizo arcilla	PV: NE	a) 2	M20: 20	21	NE
	b) Bloque PH arcilla	PH: Permitido*	b) 3	M15;M10;M5;		
	c) Bloque PV de hormigón o arcilla		c) 3	M 2.5: 2.5		
NSR-10 (2010)	a) Ladrillo macizo arcilla	Maciza: An=Ag	a) 1.5	H: 22.5	17.5	NE
	b) Bloque PH arcilla	PV: An>0.65Ag	b) 3	M: 17.5		
	c) Bloque PV de hormigón o arcilla	PH: Permitido *	c) 5	S: 12.5 N: 7.5		
NTC-M (2017)	a) Tabique macizo (TM) de arcilla artesanal	Macizas: An≥0.75Ag	a) 6	Tipo I: 12.5 Tipo II: 7.5	15	10 -12 (pieza mecanizada)
	b) TM o multiperforado (MP) de arcilla o concreto	PV: An≥0.5Ag	b) 10			
	c) Tabique o bloque hueco de arcilla o concreto	PH: No permitido	c) 6			
	d) Bloque macizo o MP de arcilla o concreto		d) 10			
NCh 2123 (2003)	a) Ladrillo cerámico artesanal	Maciza: An=Ag	a) 4.0	a) 5.0	21	10 a 15
	b) Ladrillo cerámico industrial	PV: An≥0.5Ag	Grado 1: 15	b) & c) 10		
	c) Bloques de hormigón	PH: No permitido	Grado 2: 11 Grado 3: 5 c) 13			
NTP E 0.70 (2006)	a) Ladrillos de arcilla Sólidos, Huecas, Alveolares o tubulares (S,H,A) artesanales o industriales b) Bloque de concreto (S,H,A) artesanales o industriales	PV: NE PV: No permitido en Z2 (0.25g) y Z3 (0.35g) PH: No permitido	4.9	NE	17.2	10-15
INPRES-CIRSOC 103 (2018)	a) Ladrillos Cerámicos Macizos b) Bloques Huecos Portantes Cerámicos c) Bloques Huecos Portantes de Hormigón	Maciza: An≥0.8Ag PV: An ≥ 0.40Ag PH: No permitido	a) 5.0 b) 5.5 c) 5.5	Elevada: 15 Intermedia: 10 Normal:5	20	Sin armadura: ≤ 20 mm Armadas: φ+20mm

Nota. *para casas de hasta 2 pisos y muros con carga axial baja. Leyenda: NE: No especifica; PV: Perforación Vertical; PH: Perforación Horizontal; An=Área neta de la unidad; Ag=Área bruta de la unidad.; Z= Factor de zona sísmica (aceleración máxima en roca esperada para el sismo de diseño como fracción de la gravedad g). Fuente: elaboración propia.

3.1 Requerimientos geométricos

Las dimensiones de los elementos, la separación entre las columnas de confinamiento y otros parámetros de carácter geométrico se controlan con el fin de brindar mayor estabilidad a los muros de MC y de evitar, principalmente, su falla fuera del plano (Brzev et al., 2010). Así, según se muestra en la Tabla 2, entre los requisitos más importantes recogidos en las normas estudiadas se destacan los siguientes: espesor mínimo del panel de mampostería entre 100 y 120 mm, de modo que se cumpla la restricción H/t (altura libre/espesor del panel) menor a 25; separación de las columnas de confinamiento entre 3 y 4m, tal que $H/L < 1.5-2.0$ (Brzev, 2007). Todos los reglamentos aquí analizados tienen apartados para el diseño de E-MC ante fuerzas perpendiculares al plano del muro. Respecto a las dimensiones mínimas de los elementos de confinamiento, se establecen no únicamente con base en su resistencia, sino, como en el caso de la NTC-M (2017), considerando su factibilidad constructiva, específicamente al

momento del vertido del hormigón (Perez-Gavilán et al., 2017). Una sección adecuada de hormigón, con un valor de f'_c igual o mayor al mínimo exigido, ayuda a la estabilidad de los muros de las E-MC dañados por la carga lateral. Bajo este criterio, las normas consideradas prescriben un ancho (dimensión perpendicular al plano del muro) mínimo para vigas y columnas igual al espesor del muro de MC; la altura mínima, en cambio, ha de variar entre el espesor del muro y 200mm. La Norma Ecuatoriana no hace referencia explícita a una altura mínima, sino a un área mínima de sección transversal de 200 cm² tanto para las vigas como para las columnas (NEC-SE-VI, 2015).

3.2 Detallado del refuerzo del marco confinante

Si bien las columnas de confinamiento no aportan mayormente a la resistencia lateral en la fase previa al agrietamiento del muro de MC, juegan un rol fundamental en la fase posterior, principalmente en términos de ductilidad. Una cuantía y un

detallado adecuados del refuerzo transversal en los elementos de confinamiento evitan o retardan la propagación de la falla por agrietamiento diagonal a las cadenas evitando su falla por cortante. Limitando la separación de los estribos, se evita el pandeo del refuerzo longitudinal en la zona de falla por aplastamiento del concreto en las columnas (Figura 4a) (Yekrangnia et al., 2017). En general, una separación reducida del refuerzo transversal en los extremos de las columnas de confinamiento produce una resistencia y un comportamiento de la rigidez más estables (Flores & Alcocer, 1996). Respecto al refuerzo longitudinal, éste evita la falla por flexión del muro, debido a que brinda una adecuada resistencia flexural a las columnas de confinamiento (Meli et al., 2011). Además, después del agrietamiento de los muros de MC, el refuerzo longitudinal de las columnas ayuda a soportar la carga lateral

cortante debido al mecanismo de pasador (*dowel-action*) (Alcocer, 1997). El refuerzo longitudinal de las columnas colabora con el hormigón en la resistencia a la carga compresiva sobre los muros de MC, rol especialmente importante en caso de daño sísmico, ya que ayuda a mantener su estabilidad.

En la Tabla 2, se resumen los requerimientos para el refuerzo transversal y longitudinal en vigas y columnas de confinamiento. Se puede observar valores similares en cuanto a la separación del refuerzo transversal tanto en las zonas de confinamiento como fuera de ellas (10cm y 20cm, respectivamente) y estribos con un diámetro mínimo de 6mm en la mayoría de normas.

Tabla 2. Requerimientos generales de diseño para muros de MC

Norma	Espesor muro (mm)	Dimensiones elementos de confinamiento	Separación máxima columnas *(m)	Refuerzo Longitudinal mínimo	Refuerzo Transversal mínimo
NEC-SE-VI (2015)	t ≥ 100	COLUMNA Y VIGA: b ≥ t A _{min} =200cm ²	Menor de: a) 25t b) 1.5H c) 4	COLUMNA Y VIGA: 4 barras Φ: NE A _s ≥ 0.0075A _g rcb: NE	COLUMNA: Estφ6mm@min(10cm; h/2); @20cm LC: NE Área mínima: $A_{sc} \geq \frac{10000s}{f_y h_c}$ VIGA: Estφ6mm@10cm; @20cm LC= 50cm
NSR -10 (2010) & NEC SE-MP (2015)	t ≥ 110 H/t ≤ 25	COLUMNA Y VIGA: b ≥ t A _{mín} =200cm ²	Menor de: a) 35t b) 1.5H c) 4	COLUMNA: 3 φ10mm A _s ≥ 0.0075A _g VIGA: 3φ10mm A _s ≥ 0.0075A _g	COLUMNA: Estφ6mm @10cm; @ min(20cm; 1.5lado_menor) LC ≥ máx.(45cm; 3lado_mayor; H/6) VIGA: Estφ6mm@10cm; @ min(20cm; 1.5lado_menor) LC=50cm rcb=20mm
NTC-M (2017)	Estructura TIPO I t ≥ 100 Estructura TIPO II t ≥ 120 H/t ≤ 25	COLUMNA: b ≥ t h ≥ máx.(t; 15 mm) VIGA: b ≥ t h ≥ t	Menor de : a) 4 b) 1.5H	COLUMNA Y VIGA: 4 barras y área mínima, A _s de: $A_s = 0.2 \frac{f'_c}{f_y} b_c h_c$ rcb ≥ 20mm	Área mínima: $A_{sc} = \frac{10000s}{f_y h_c}$ COLUMNA: Est con Asc @Min(1.5t ; 20cm) Estructura Tipo II: s ≤ h/2 LC ≥ máx.(H/6 ; 40cm) VIGA: Est con Asc @Min(1.5t & 20cm) rcb ≥ 10mm
NCh 2123 (2003)	t ≥ Ln/25 t ≥ 140(industrial) t ≥ 150 (artesanal)	COLUMNA Y VIGA: b ≥ t h ≥ máx.(t; 200mm)	6m Área máx. de panel=12.5m ²	COLUMNA Y VIGA 4φ10mm rcb ≥ 20 mm	COLUMNA Y VIGA: Estφ6mm@10cm ; @ 20cm rcb ≥ 15mm
NTP E 0.70 (2006)	Z II y Z III: t ≥ H/20 Z I: t ≥ H/25	COLUMNA: b ≥ t h ≥ máx.(t; 150mm) VIGA: b ≥ t h ≥ h_losa	Menor de: a) 2H b) 5	COLUMNA Y VIGA 4φ8mm	COLUMNA: Estφ6mm@min(d/4; 10cm); @25cm LC ≥ máx.(45 cm; 1.5d) VIGA: Estφ6mm@10cm; :@25cm LC ≥ 40cm rcb ≥ 20mm (enlucido) rcb ≥ 30mm (visto)
INPRES-CIRSOC 103 (2018)	t ≥ 180	COLUMNA: b ≥ t h ≥ máx.(2/3 t; 150mm) VIGA: b ≥ t h ≥ máx.(1/2 t; 150mm)	2H	COLUMNA: Z1 y Z2 : 4φ6mm Z3 y Z4 : 4φ8mm VIGA: Z1 y Z2 : 4φ6mm Z3 y Z4 : 4φ8mm	COLUMNA: Estφ6mm@ min(1/2 hc; 10cm); Min{min(b,h); 20cm} LC ≥ máx.(1/5H ; 2h; 60cm) VIGA: Estφ6mm@min{1/2min(b,h); 10cm}; @ min{min(b,h); 20cm} LC ≥ 60cm

Nota. *Separación de centro a centro; t=espesor del muro (según norma); s=separación de estribos; LC=Longitud de confinamiento para estribos; Est= estribo cerrado con gancho 135°; h=dimensión de la viga o columna en el plano del muro, b= dimensión perpendicular al plano del muro; H= distancia vertical entre elementos horizontales de confinamiento; Ln=Luz entre columnas de confinamiento; rcb=recubrimiento libre del refuerzo; Z= Factor de zona sísmica. Fuente: elaboración propia.

La mayor dispersión de requerimientos se presenta en lo referente al refuerzo longitudinal ya que la cuantía mínima varía entre 0.7% y 0.8% del área bruta de la sección, con diámetros mínimos de 6 a 10mm. En el caso de la NEC-SE-MP y la NSR-10, se permite el uso de 3 varillas de refuerzo longitudinal como mínimo; las demás normas exigen un mínimo de 4 varillas tanto para vigas y columnas. Cabe señalar que la NTC-M, en su última versión, cambió de tres a cuatro varillas el mínimo permitido, lo que resulta más acorde con la técnica constructiva y la literatura (Brzev, 2007; Meli et al., 2011). El recubrimiento libre mínimo del refuerzo es, en la mayoría de casos, de 2cm. Al ser los elementos confinantes de secciones pequeñas en comparación con los elementos de

edificios aporricados, valores menores a los permitidos provocarían fácilmente la exposición del refuerzo (Figura 4c). Otros aspectos del detallado como el anclaje del refuerzo, longitud de desarrollo y diámetros de doblado no se abordaron en el presente trabajo; la mayoría de las normativas consideradas trata estos aspectos asumiendo como referencia el código ACI 318. Meli et al. (2011) resaltan, además de las disposiciones ya mencionadas, la importancia de otros aspectos del detallado como la continuidad de refuerzo longitudinal de vigas en nudos, el anclaje y traslapes del refuerzo. Su inobservancia ha dado lugar, en casos de terremoto, a diferentes tipos de fallas locales en las E-MC (Figura 4b).



Figura 4. Fallas por mal detallado del refuerzo: a) Falla por cortante y pandeo del refuerzo longitudinal debido a separación de estribos excesiva en los extremos de la columna de confinamiento; b) falla por discontinuidad de refuerzo longitudinal (Tomado de Brzev et al., 2010), y c) exposición del refuerzo debido a recubrimiento inadecuado en una edificación en Cuenca.

3.3 Conexión marco-panel de mampostería

En los trabajos de Wijaya et al. (2011) y Matošević et al. (2015), se analizaron el efecto de diferentes tipos de conexión entre panel y marco de HA en los muros de MC. Los tres tipos de conexión analizados fueron: por secuencia constructiva (Tipo A), dentado de bordes verticales (Tipo B) y conectores metálicos (Tipo C). Los resultados obtenidos en ambos trabajos son similares y en resumen muestran que la implementación de un sistema de conexión no mejora significativamente el comportamiento sísmico de los muros de MC. La resistencia a carga lateral para los tres tipos de conexión varió de manera insignificante, inclusive disminuyendo en el caso del dentado. En términos de comportamiento histerético y de energía disipada, la mejora de los muros con el Tipo C es pequeña comparada con el espécimen sin detalles de conexión (Tipo A). Finalmente, en estos trabajos se evidencia que la conexión Tipo C y el refuerzo horizontal continuo son mejores opciones que la conexión Tipo B.

A pesar del bajo aporte de estos sistemas de conexión a la respuesta sísmica de la MC, según Brzev et al. (2010) y Meli et al. (2011), la evidencia post sismo muestra que estos tipos de conexión mejoran la interacción entre panel y los elementos de confinamiento, lo cual retrasa el agrietamiento no deseado y la separación en la interfaz mampostería-columnas de HA; y evita su falla fuera del plano. Además, un dentado más fino (altura de dentado igual a la altura de una unidad) es más recomendable según Singhal & Rai (2014). Lo anterior sugiere que la implementación de un sistema de conexión entre panel y marco tiene como principal objetivo mantener la interacción entre estos componentes, permitiendo la transmisión de fuerzas de corte (NTC-M, 2017), más que de

aumentar la resistencia o la capacidad de disipación de energía en las E-MC. En este contexto, en la Tabla 3 se presentan los sistemas de unión panel-columna que recomiendan las normas analizadas. Cabe señalar que la NEC no especifica los mecanismos de unión permitidos y queda implícito como único sistema de unión la trabazón propia de la MC.

Tabla 3. Sistemas de unión panel-marco de confinamiento recomendados

Norma	Sistema de unión	Detalle
NSR-10 & NEC	Tipo A	
NTC-M	Tipo A, Tipo B, Tipo C & Refuerzo horizontal	B: 1 saliente @2 hiladas (para unidades industriales)
NCh 2123	Tipo A, Tipo B, Tipo C & Refuerzo horizontal	C: 1 ϕ @3 hiladas (máx.= 400mm)
NTP E.70	Tipo A, Tipo B, Tipo C	B: 1 saliente \geq 5cm@2 hiladas C: 1 ϕ 6mm@ 400mm L=400mm*; cuantía=0.001
IN-CS 103	Tipo A	

Nota. *longitud dentro de la mampostería. Fuente: elaboración propia.

3.4 Otros aspectos constructivos

Según Moroni et al. (2004), Brzev et al. (2010) y Meli et al. (2011), después de los terremotos, entre las causas de daños en E-MC están la falta de refuerzo en los bordes de aberturas y la inadecuada densidad de muros portantes. Respecto al efecto de las aberturas en muros de MC, se ha demostrado que las aberturas sin refuerzo en sus bordes tienen un efecto perjudicial en la capacidad y rigidez del muro (Flores & Mendoza, 2004; Ortega-Guamán et al., 2020; Yoshimura et al., 2004). Las aberturas con áreas mayores al 10% respecto del área total del muro tienen un efecto negativo en el desempeño sísmico de las edificaciones de MC, especialmente si estas aberturas no están reforzadas en su perímetro (Eshghi & Sarraf, 2014; Singhal & Rai, 2016; Yáñez et al., 2004).

En los trabajos experimentales de Kuroki et al. (2012) y Singhal & Rai (2016), se observa que los especímenes de muros con aberturas reforzadas en sus bordes con elementos adicionales de HA desarrollan mayor capacidad de carga lateral que las muestras con aberturas de bordes no reforzados. En la mayoría de los casos, se recupera e inclusive se sobrepasa la resistencia del espécimen sin aberturas. Por lo expuesto anteriormente, la NTC-M y la NCh 2123 recomiendan el uso de elementos de HA en los bordes de las aberturas. Además, la Norma Chilena permite el uso de armadura horizontal y vertical alrededor de las aberturas para niveles de carga bajos. En el capítulo NEC-SE-MP no se establece de manera clara el refuerzo del perímetro de las aberturas. En el capítulo NEC-SE-VI para viviendas de dos pisos, se recomienda el uso de elementos de refuerzo para los bordes de aberturas, pero de manera no detallada.

Por otro lado, la densidad de muros es un indicador clave de seguridad en E-MC de baja altura emplazadas en zonas sísmicas (Brzev et al., 2019; Meli et al., 2011), lo que constituye una verificación inicial de diseño. Se cuantifica mediante el índice d , como la relación, en términos porcentuales, entre la suma de las áreas transversales de todos los muros de MC en la dirección considerada para la carga sísmica, A_w , y el área de la planta de la edificación, A_p (Brzev, 2007; Meli et al., 2011):

$$d = \left(\frac{A_w}{A_p} \right) \times 100 \quad (1)$$

Respecto a las disposiciones de densidad de muros contenidas en los códigos de diseño seleccionados, únicamente la Norma Peruana y la NEC-SE-VI establecen valores mínimos para el índice d (Ecuación 1). La densidad de muros depende del nivel de amenaza sísmica, la resistencia al corte de la mampostería, el tipo de suelo y el número de pisos (Brzev et al., 2010; NTP E.70, 2006). En Meli et al. (2011), se recomiendan valores no menores de 1% para viviendas de un piso, y mayores a 2% para viviendas de dos pisos. Estos valores son mayores para zonas con amenaza sísmica alta y condiciones de suelo y materiales específicas. Cabe señalar que la NEC-SE-VI no toma en cuenta todos estos condicionantes al momento de establecer los valores mínimos del índice d .

4. RESISTENCIA A CORTANTE

Los modos de falla de la MC dependen de diferentes aspectos como la geometría del muro, las condiciones de borde, la carga vertical, la relación de aspecto y la calidad de los materiales. Basándose en experiencias pasadas de terremotos y resultados experimentales, Alcocer (1997) define cuatro diferentes modos de falla en el plano para muros de MC: falla por compresión, falla por deslizamiento, falla por cortante (tensión diagonal/cortante diagonal) y falla por flexión. La falla por compresión se debe a una gran carga vertical y/o una baja resistencia a la compresión de la mampostería que causa su aplastamiento (Figura 5a). La falla por deslizamiento ocurre a lo largo de las juntas de mortero cuando el muro tiene una carga vertical baja y la fuerza lateral excede la resistencia a cortante por deslizamiento de la mampostería (Figura 5b). La

falla por tensión diagonal ocurre cuando la tensión en el muro excede la resistencia a la tracción de la mampostería y las grietas se propagan desde el centro del panel de mampostería hasta las esquinas del muro (Figura 5c). Por último, la falla por flexión está asociada con la deformación del refuerzo longitudinal en las columnas y el aplastamiento del borde comprimido del muro (Figura 5d). Estos modos de falla son una clasificación general y son los considerados en el diseño de E-MC de las normas aquí estudiadas, además de las acciones fuera del plano. En Yekrangnia et al. (2017), se hace una clasificación más detallada de los modos de falla en MC, tratando por separado los mecanismos de falla en el panel de mampostería y en las columnas de confinamiento.

Según observaciones post-terremoto y ensayos experimentales (bajo carga lateral), el modo de falla en el plano dominante en las E-MC es el de cortante diagonal (Cruz O., Pérez-Gavilán E., & Flores C., 2019; Marques & Lourenço, 2019; Meli et al., 2011). La falla por flexión es un modo probable pero no es crítico ya que no conduce a una falla frágil a diferencia de la falla por cortante; y en la mayoría de casos es evitada por los elementos de confinamiento y su adecuada resistencia (refuerzo longitudinal) (Meli et al., 2011). Por esta razón, la mayor parte de estudios sobre formulación de MC se concentran en determinar la resistencia a cortante de los muros (Flores & Alcocer, 1996; Riahi et al., 2009; Tomažević & Klemenc, 1997).

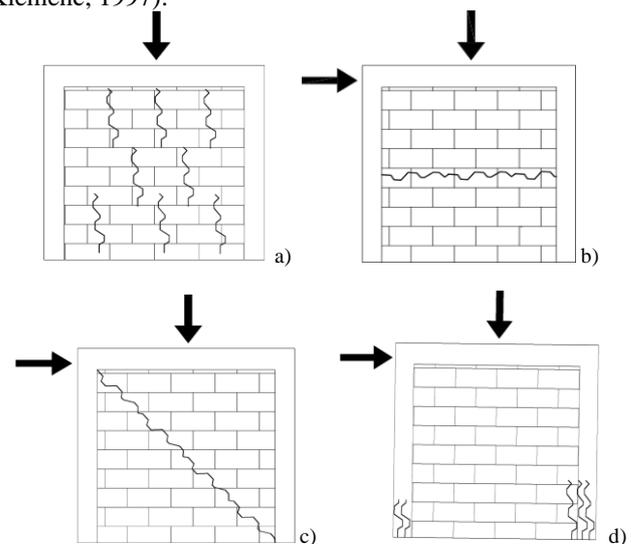


Figura 5. Modos de falla en el plano de muros de MC: a) Falla por compresión; b) falla por deslizamiento; c) falla por tensión diagonal; d) falla por flexión (Tomado de Ortega-Guamán et al., 2020)

4.1 Comportamiento ante carga lateral en el plano

El comportamiento de los muros de MC ante carga lateral en el plano se puede describir según las tres etapas definidas en Tomažević & Klemenc (1997). En la primera etapa, la mampostería y los elementos de confinamiento se comportan de manera monolítica dentro del rango elástico. A medida que crecen las deformaciones, se produce el agrietamiento debido a la tracción diagonal en el centro del panel de mampostería (Figura 6a). Este es el punto del primer agrietamiento, V_{cr} , algo alejado del punto de máxima resistencia V_{max} , en el que inicia la degradación de la rigidez lateral. En la segunda etapa, las grietas se extienden diagonalmente por todo el muro

alcanzando los extremos de las columnas de confinamiento (Figura 6b). En esta etapa, el refuerzo longitudinal de las columnas de confinamiento se encarga de resistir los esfuerzos de tracción y compresión generados por el empuje del muro dividido mediante el efecto pasador (*dowel action*), alcanzándose la resistencia máxima. En la última etapa, ilustrada en la Figura 6c, la prolongación del agrietamiento a las columnas de HA genera su falla por cortante; ésta, junto con la falla por agrietamiento diagonal de la mampostería, provocan una rápida degradación de resistencia y un aumento del desplazamiento lateral, llevando al colapso del muro de MC. La Figura 6d muestra la curva de fuerza lateral vs. desplazamiento en donde se indica las tres etapas descritas antes.

columnas de confinamiento; c) falla por corte de las columnas y del panel de mampostería; y d) curva fuerza lateral vs. desplazamiento (Adaptado de Meli et al., 2011).

4.2 Cálculo de la resistencia nominal cortante

Los muros de MC no demasiado esbeltos sometidos a carga lateral en su propio plano responden, fundamentalmente, en términos de cortante en la dirección paralela al plano del muro (solicitación a la que se denominará en lo sucesivo con cortante). La resistencia a cortante de los muros de mampostería se ha estudiado bajo la teoría de falla de Mohr o con la aproximación de Coulomb. En general, las fórmulas propuestas por los códigos (Tabla 4) se basan en el enfoque de Coulomb, que comprende dos componentes, tal como se indica en la Ecuación (2). La primera componente considera la resistencia a compresión diagonal de la mampostería, v_m ; la segunda, incluye la carga compresiva que soporta el muro, expresada como fuerza puntual o como esfuerzo σ_o . Normas como la Mexicana, NTC-M (2017), y la Peruana, NTP E.70 (2006), incluyen factores que consideran la relación de aspecto (H/L) del muro de MC ya que se considera importante su influencia en la resistencia a cortante. En trabajos relevantes como los de Perez-Gavilán et al. (2015) y de Marques & Lourenço (2019), se concluye que la resistencia es inversamente proporcional a la relación H/L , y se recomienda incluir su efecto en las formulaciones.

$$V_n = (av_m + b\sigma_o)At \tag{2}$$

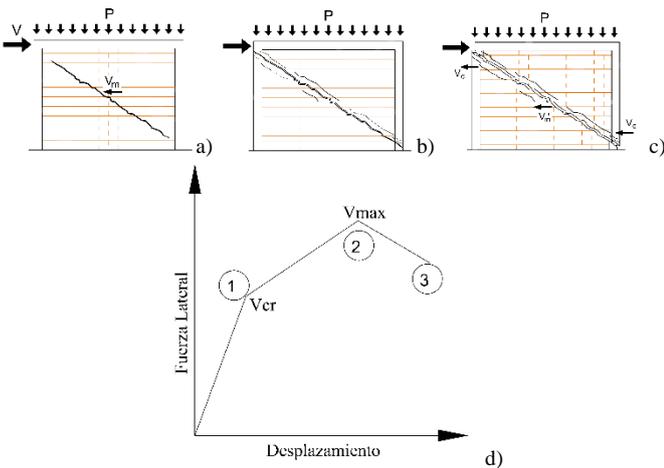


Figura 6. Mecanismo de resistencia a cortante para muros de MC: a) agrietamiento diagonal; b) el agrietamiento diagonal se propaga hasta las

Tabla 4. Fórmulas para calcular resistencia nominal a cortante según las normas revisadas

Norma	Fórmula	Descripción
NEC-SE-MP (2015) & NSR-10 (2010)	$V_n = \left(\frac{1}{12} \sqrt{f'_m + \frac{P_u}{3A_e}} \right) A_{mv} \leq \frac{1}{6} \sqrt{f'_m} A_{mv}$	A_e = Área efectiva de la sección de mampostería A_{mv} = Área efectiva* para determinar esfuerzos cortantes P_u = Carga axial de diseño solicitada sobre el muro *Generalmente $A_{mv} = b * l_w$, siendo b el ancho efectivo del alma y l_w = longitud horizontal total del muro
NTC-M (2017)	$V_{mR} = [(0.5v_m A_T + 0.3P)] f \leq 1.5F_R v_m A_T f$	A_T = área de la sección transversal del muro, con inclusión de las secciones no transformadas de las áreas transversales de las columnas de confinamiento. P = carga axial total sobre el muro f = factor que toma en cuenta la relación de aspecto del muro para calcular la resistencia al agrietamiento por tensión diagonal. $f = \begin{cases} 1.5 & \text{si } \frac{H}{L} \leq 0.2 \\ 1.0 & \text{si } \frac{H}{L} \geq 1.0 \end{cases}$ Para los casos intermedios de H/L , se interpolará linealmente.
NCh 2123 (2003)	$V_n = (0.46v_m + 0.24\sigma_o)A_m \leq 0.70v_m A_m$ $V_n = 2V_a$ (Meli et al., 2011)	A_m = área bruta de la sección transversal del muro, incluyendo los pilares (no se debe usar la sección transformada) σ_o = tensión media de compresión producida por el esfuerzo axial que actúa sobre la sección V_a = Fuerza admisible a cortante (Norma aplica método de esfuerzos admisibles)
NTP E.70 (2006)	$V_n = 0.5v_m \alpha t L + 0.23P_g$	P_g = carga gravitacional de servicio, con sobrecarga reducida (NTE E.030) t = espesor efectivo del muro (sin enlucido) L = longitud total del muro incluyendo a las columnas α = factor de reducción de Resistencia al corte por efectos de esbeltez: $\frac{1}{3} \leq \alpha = \frac{V_e L}{M_e} \leq 1$ donde: V_e = fuerza cortante del muro obtenida del análisis elástico M_e = es el momento flector del muro obtenido del análisis elástico
INPRES CIRSCO 103 (2018)	$V_n = (0.6v_m + 0.4f_o)A_g \leq 2.00f'_v A_g$	f_o = tensión media de compresión que actúa sobre el muro, A_g = área bruta de la sección horizontal del muro, determinada sin considerar revoques ni alas constituidas por muros transversales

en donde: σ_o es el esfuerzo a compresión al que está sometido el muro, a es un coeficiente de aporte de v_m a la resistencia, b es un parámetro similar a un coeficiente de fricción, igual a 0.3 para MC (Marques & Lourenço, 2019) y At es el área total de la sección que resiste fuerza cortante.

En el presente trabajo, no se considera la componente de aporte a la resistencia del refuerzo horizontal en la MC; formulaciones como las de la NTC-M y de la INPRES CIRSOC 103 admiten esta posibilidad. El área de la sección transversal que resiste la fuerza cortante incluye, en la mayoría de los casos, el área de la sección no transformada de las columnas de confinamiento, es decir, se consideran las columnas como si fueran de mampostería. Esto último se debe a que Vn se evalúa en función la resistencia al agrietamiento del muro, Vcr (Alcocer, 1997; Perez-Gavilán et al., 2015, 2017; Quiun & Leguía, 2018), y en este punto de resistencia, la contribución de las columnas de confinamiento es pequeña. Esta asunción de los códigos es ciertamente conservadora, ya que no considera el aporte real del HA al resistir la acción de la carga lateral, principalmente la contribución del hormigón (Brzev et al., 2019; Marques & Lourenço, 2019).

Como se muestra en la Tabla 4, la fórmula recomendada por la NEC-SE-MP (2015) para el cálculo de la resistencia a carga lateral de un muro de MC incluye el término $\sqrt{f'_m}$ como aproximación de v_m . Esta estimación, originalmente recogida en el código norteamericano ACI 530 (2016) para el diseño de estructuras de mampostería no reforzada, fue adoptada por la NSR-10 y, posteriormente, por la NEC. Es pertinente señalar que, debido al escaso uso de la MC en EE.UU, el ACI 530 prácticamente no aborda esta tipología (Alcocer, 1997; Riahi et al., 2009). Por otra parte, Marques & Lourenço (2019) han mostrado que existe una pobre correlación entre f'_m y v_m , por

lo que recomiendan usar v_m para el cálculo de Vn : esto valida y refuerza la vía adoptada en la mayoría de normas aquí revisadas.

4.3 Calidad predictiva de fórmulas

Con el objetivo de evaluar la calidad predictiva de las fórmulas propuestas en las cinco normas consideradas y, en particular, la de la fórmula adoptada por la NEC-SE-MP (2015), se realizó una comparación entre las resistencias a carga lateral calculadas mediante dichas fórmulas (Vn_{cal}), presentadas en la Tabla 4, y los valores de resistencia al agrietamiento de muros ensayados (Vcr_{exp}). En la Tabla 5, se presentan las referencias de los trabajos experimentales considerados, detallándose sus características geométricas y mecánicas. Los trabajos se seleccionaron en función de los especímenes de ensayo: muros de MC sin refuerzo horizontal, construidos con ladrillos macizos o huecos de perforación vertical, con relaciones H/L entre 0.55 y 1.15 y comportamiento dominante a corte. Estas características son típicas de los especímenes disponibles en la literatura (Riahi et al., 2009). Así, en la Figura 7 se presentan las relaciones Vn_{cal}/Vcr_{exp} correspondientes a los diez muros seleccionados, graficadas ordenadamente según su relación H/L . Cabe destacar la similar variabilidad derivada del uso de las fórmulas que dependen de v_m ; a este respecto, véase la forma de la curva multilínea en todo el dominio de H/L (Figura 7). El espécimen Nro. 6 es el que presentó un mayor error en la predicción de resistencia en la mayoría de las fórmulas; esto se podría deber a la alta calidad de la mampostería (Tabla 5), situación más bien atípica.

Tabla 5. Propiedades mecánicas y geométricas de muros de ensayos experimentales

Fuente	Especímen	Material	t (mm)	H/L	$b_c \times h_c$ (mm)	f'_m (MPa)	v_m (MPa)	σ_o (MPa)	Vcr_{exp} (kN)
Carrillo et al. (2020)	1) M1	ladrillo PV	120	0.55	120x150	11	0.69	0.5	251.60
Yáñez et al. (2004)	2) Arcilla perforada S1:	ladrillo PV	140	0.56	150x200	6.89	0.55	0	143
Perez-Gavilán et al. (2015)	3) ME5	ladrillo PV	120	0.62	120x150	8.15	0.457	0.5	251.60
Quiun & Leguía (2018)	4) D1	ladrillo artesanal macizo	115	0.83	115x300	3.65	0.55	0	151.00
Aguilar et al. (1996)	5) M0	ladrillo artesanal macizo	120	0.90	125x150	3.5	0.25	0.49	122.00
Cruz O. et al. (2019)	6) MB0	ladrillo PV	120	0.91	120x150	10.70	1.11	0.47	163.00
Perez-Gavilán et al. (2015)	7) ME4	ladrillo PV	120	0.92	120x150	5.83	0.324	0.5	100.50
Fernández et al. (2014)	8) M1	ladrillo hueco, 3H-PV	120	1.10	120x120	4.09	0.25	0.365	60.72
	9) M2		120	1.10	120x120	4.09	0.25	0.548	69.53
Perez-Gavilán et al. (2015)	10) ME3:	ladrillo PV	120	1.13	120x150	5.57	0.345	0.5	88.40

Nota. b_c y h_c : Dimensiones de columnas, t : espesor del muro; PV: Huevo Perforación Vertical. Fuente: elaboración propia.

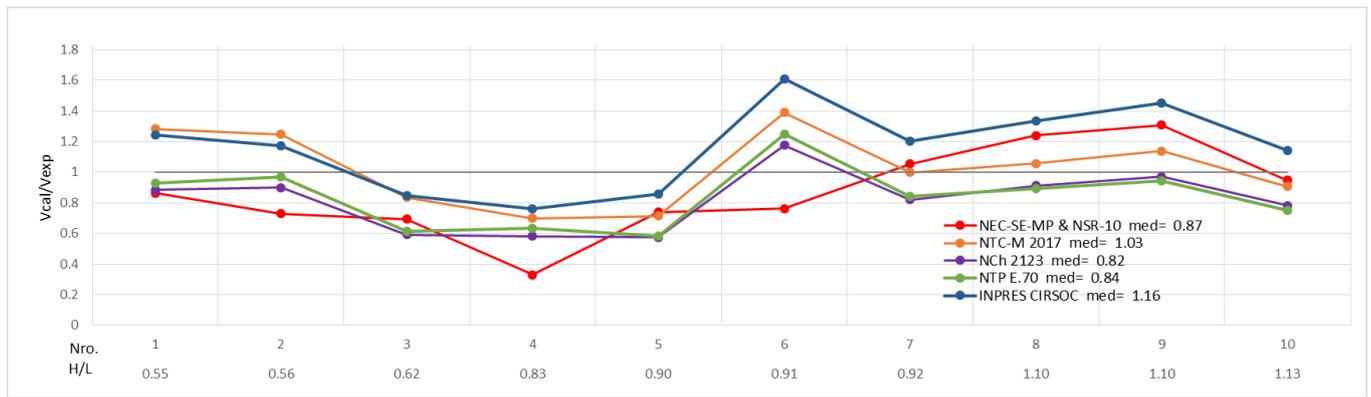


Figura 7. Relación Vn_{cal}/Vcr_{exp} para los especímenes de muros de MC de la Tabla 5

La evaluación mostró que la fórmula que mejor se ajusta a los resultados experimentales es la prescrita por la NTC-M, con un valor medio de Vn_{cal}/Vcr_{exp} igual a 1.03 y una desviación estándar de 24%. Estos valores muestran una sobrestimación de la resistencia experimental con un error medio pequeño, del 3%, y un grado de dispersión del error respecto a la media aceptable. Por otro lado, las fórmulas de la NCh 2123 y de la NTP E.70 muestran un comportamiento similar, e incluso más regular, con porcentajes de error del 18% y del 16% respectivamente, con la mayoría de valores Vn_{cal}/Vcr_{exp} menores a 1. Esto último indica, teniendo en cuenta que el estado límite Vcr es conservador como criterio de falla, que las resistencias Vn , calculadas mediante fórmula, conducen a diseños seguros.

La fórmula de la NEC-SE-MP (2015) tiene un error promedio del 13% (valor medio de $Vn_{cal}/Vcr_{exp} = 0.87$), que puede considerarse aceptable, pero arroja el error más alto en el espécimen Nro. 4: un valor igual a la tercera parte de la resistencia experimental; por otra parte, exhibe la desviación estándar más alta (29%). Además, a medida que la relación H/L aumenta, la fórmula empieza a sobrestimar la resistencia, lo que es poco recomendable para propósitos de diseño. Resultados similares se obtuvieron con la fórmula del INPRES CIRSOC, con un error medio (de sobrestimación) del 16% y una desviación estándar del 27%. Por lo tanto, el mejor ajuste con los resultados experimentales indica que una formulación con enfoque de Coulomb, usando v_m en lugar de $\sqrt{f'_m}$, tal como en la Ecuación 2, constituye una mejor opción para el cálculo de Vn . A esta conclusión llegaron también en los trabajos de Riahi et al. (2009) y Tripathy & Singhal (2019), a partir del análisis de una base de datos experimentales más amplia.

Con miras a una mejora sustancial de la NEC-SE-VI (2015) y NEC-SE-MP (2015) en el abordamiento de los problemas de diseño y de evaluación sísmica, principalmente de este último, los autores del presente trabajo consideramos pertinente la realización de una campaña de ensayos a carga lateral de muros confinados con materiales y unidades de mampostería típicas del país. Esto posibilitaría una validación más ajustada a nuestra realidad constructiva de las formulaciones para diseño y la consecución de modelos para análisis estático no lineal más confiables. De momento, se cuentan con muy pocos ensayos, todos ellos realizados en el Centro de Investigación

de la Vivienda, en el marco de proyectos de la Escuela Politécnica Nacional. Una descripción de estos ensayos se halla en el trabajo de Grijalva & Narváez (2018). En particular, se han llevado a cabo únicamente dos ensayos a carga lateral cíclica sobre muros de MC (Rivas, 2017; Zabala & Zabala, 2006).

5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En Ecuador, la MC es la tipología estructural más utilizada para viviendas de hasta dos pisos (para las cuales se admite que no tengan supervisión técnica de un ingeniero). Por esta razón, es crucial establecer requerimientos constructivos claros y consistentes, y de este modo, aprovechar su adecuado comportamiento sísmico, además de su conveniencia constructiva y económica. En el caso de edificaciones de mayor altura, es aún más importante el cumplimiento de las normas y su constante actualización.

Luego de la revisión de las diferentes normas para diseño y construcción de E-MC en Latinoamérica, incluidos los capítulos respectivos de la Norma Ecuatoriana NEC-2015 (NEC-SE-MP y NEC-SE-VI) se advirtió que una parte de las disposiciones normativas son prácticamente similares, por lo que no haría falta en ellas mayores cambios en la actualización de estos capítulos en la norma nacional. Por otra parte, se encontraron varias posibilidades de mejora en los aspectos analizados, y en tal sentido, planteamos las siguientes recomendaciones para la actualización de la Norma Ecuatoriana.

La organización y estructura de los reglamentos son indispensables para su correcta aplicación. En el caso del capítulo NEC-SE-VI (2015), aspectos con margen de mejora son, por ejemplo, su estructura de contenidos y la consistencia entre figuras y texto. A este respecto, véase la Sección 7, que trata sobre las disposiciones para los elementos confinantes.

Es evidente que la sección de Materiales de una norma debe estar adaptada a la realidad del mercado y a la técnica constructiva de cada país. Así, en el caso de las unidades de mampostería, es necesario que se establezcan: 1) el tipo de unidades que se permiten en muros de MC, 2) las especificaciones técnicas de referencia, y 3) los requisitos

geométricos/dimensionales (v.g. área neta mínima, espesores de los bordes macizos en las unidades huecas) y de resistencia, en función las unidades disponibles en el mercado nacional. Consideramos impostergable incluir una disposición que prohíba del uso de unidades de perforación horizontal en E-MC.

En cuanto a las propiedades mecánicas de la mampostería, resistencia a compresión (f'_m) y resistencia a compresión diagonal (v_m), de gran utilidad resultaría la inclusión de tablas con resistencias de diseño referenciales. Tales resistencias deberían obtenerse de ensayos sobre muretes realizados con materiales característicos del país. Un buen ejemplo de ello son las normas: Mexicana (NTC-M,2017), Peruana (NTP E.70, 2006) y Argentina (INPRES CIRSOC 10, 2018). Esta información ayudaría a los diseñadores cuando no se disponga o requiera de valores experimentales. Además, es necesario detallar el método analítico para determinar f'_m , propiedad altamente abordada en la literatura y fundamental en el diseño de MC. De este modo, planteados los tres métodos para la determinación de estas resistencias: 1) experimental, 2) teórico: uso de formulaciones y 3) uso de valores referenciales, deberían establecerse criterios de selección, en función del tamaño, la importancia de la edificación, el nivel de amenaza sísmica de la zona de emplazamiento.

Con referencia a los detalles del refuerzo en E-MC, se recomienda incluir las dos técnicas de anclaje entre el marco de confinamiento y el panel de mampostería recomendadas por las normas analizadas: el dentado y el anclaje horizontal corto (chicotes). Se debe definir claramente el detalle de cada una de estas alternativas. La Norma Peruana E.70 sería una buena referencia ya que es la que mejor aborda esta cuestión mostrando una base teórico-experimental y un mayor nivel de detalle. Además, el refuerzo longitudinal mínimo debería ser de 4 varillas, con un diámetro mínimo de 10mm para cumplir el requerimiento de área mínima de acero longitudinal de todas las normas (aproximadamente, 0.8%). El recubrimiento mínimo de 2cm para minimizar el riesgo de exposición del recubrimiento también debería quedar establecido.

Con respecto a la resistencia nominal a cortante (V_n), la falta de ensayos experimentales de muros de MC en el país dificulta la selección de una fórmula adecuada para su estimación. No obstante, el análisis de la calidad predictiva y la revisión de literatura llevados a cabo nos lleva a concluir que una formulación con enfoque de Coulomb, usando el valor de v_m en lugar de $\sqrt{f'_m}$, resulta más apropiado para fines de diseño en MC. Debido, en gran medida, a la consideración de la influencia de la relación de aspecto H/L , las formulaciones de la NTC-M y de la NTP E.70 exhibieron una mejor aproximación a la capacidad de resistencia experimental; por tanto, los autores recomendamos para la NEC la adopción de alguna de ellas. En caso de plantearse una fórmula propia, ésta debería adoptar la forma de la Ecuación (2), usada por la mayoría de las normas analizadas, y en tal caso, además, calibrar los factores en función de ensayos sobre especímenes de muro representativos de las E-MC del país. Como ya se ha señalado al final de la Sección 4.3, el contar con campañas de ensayos a carga lateral de muros confinados con materiales y unidades de mampostería típicas del país, sería un gran paso

en la dirección de un diseño y evaluación sísmica más confiables.

Finalmente, respecto a otros aspectos constructivos que se analizaron, se recomienda incluir el refuerzo en los bordes de aberturas de muros de MC. La mejor opción es el uso de elementos de confinamiento de HA similares a los elementos principales, de acuerdo a los lineamientos de la NTC-M y la NCh 2123. Adicionalmente, se recomienda limitar las dimensiones de aberturas, su ubicación y demás parámetros detallados en estas normas. En lo concerniente a la densidad de muros, es fundamental desde el punto de vista sismorresistente controlar el índice de densidad de muros en cada dirección ortogonal, control que obedecerá a condicionantes tales como la altura de la edificación, la zona sísmica y la calidad de los materiales, como se recomienda en NTP E.70, Brzev (2007) y Meli et al. (2011).

AGRADECIMIENTOS

Extendemos nuestro agradecimiento al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Cuenca (VIUC) por el financiamiento del proyecto del cual forma parte el presente trabajo y a la Red Sísmica del Austro por su apoyo en la elaboración del presente documento.

REFERENCIAS

- Agencia Suiza para la Cooperación y el desarrollo - COSUDE. (febrero de 2017). *Guía para la construcción de viviendas sismo-resistentes en mampostería confinada*. <https://www.shareweb.ch/site/DRR/Documents/Types%20of%20activity/Structural-Measures/Guia%20para%20la%20construccion%20de%20viviendas%20sismo%20resistentes%20en%20mamposteria%20confinada.pdf>
- Aguilar, G., Meli, R., Díaz, R., & Vázquez del Mercado, R. (1996). Influence of Horizontal Reinforcement on the Behavior of Confined Masonry Walls. *Eleventh World Conference on Earthquake Engineering*. Elsevier Science Ltda. https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/11_1380.PDF
- Alcocer, S. M. (1997). Comportamiento sísmico de estructuras de mampostería: una revisión. *Memoria del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Veracruz-México*, 1-28. https://reconstruir.org.mx/wp-content/uploads/2017/11/4_comportamiento_sismico_de_e_structuras_de_mamposteria_una_revision.pdf
- Alcocer, S. M., Cesin, J., Flores, L., Hernandez, O., Meli, R., Tena, A., & Vasconcelos, D. (2003, junio 1-4). *The new Mexico City Building Code requirements for design and construction of masonry structures* [Conference presentation]. 9th North American Masonry Conference, USA, 656–667. https://www.confinedmasonry.org/wp-content/uploads/2009/12/47_The-new-Mexico-City-building-code-requirements-for-design-and-construction-of-masonry-structures.pdf

- Brzev, S. (diciembre de 2007). *Earthquake-Resistant Confined Masonry Construction*. Preventionweb. https://www.preventionweb.net/files/2732_ConfinedMasonry14Dec07.pdf
- Brzev, S., Astroza, M., & Moroni, M. O. (2010). *Performance of Confined Masonry Buildings in the February 27, 2010 Chile Earthquake*.
- Brzev, S., Reiter, M., Perez-Gavilán, J. J., Quiun, D., Membreño, M., Robert Meli, Svetlana Brzev, Maximiliano Astroza, Teddy Boen, Francisco Crisafulli, Junwu Dai, Mohammed Farsi, Tim Hart, Ahmed Mebarki, A.S. Moghadam, Daniel Quiun, Miha Tomazevic, L. Y., & Sommer, D. (2019). Confined Masonry The Current Design Standards 13NAMC 20190224.
- Carrillo, J., Pincheira, J. A., & Flores, L. E. (2020). Quasi-static cyclic tests of confined masonry walls retrofitted with mortar overlays reinforced with either welded-wire mesh or steel fibers. *Journal of Building Engineering*, 27(February 2019), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100975>
- Cruz O., A. I., Pérez-Gavilán E., J. J., & Flores C., L. (2019). Experimental study of in-plane shear strength of confined concrete masonry walls with joint reinforcement. *Engineering Structures*, 182(December 2018), 213–226. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.040>
- Eshghi, S., & Sarrafi, B. (2014). Effect of openings on lateral stiffness and strength of confined masonry walls. *Scientia Iranica*, 21(3), 457–468.
- Fernández, L. E., Sosa, M. I., & Varela, J. L. (2014). Resistencia en el plano de muros de Mampostería Confinada: Efecto de la relación de aspecto. Mexico D.F.
- Flores, L. E., & Alcocer, S. M. (1996). Calculated response of confined masonry structures. Mexico.
- Flores, L. E., & Mendoza, J. A. (2004). *Ensayo sísmico y rehabilitación de un muro de mampostería sin refuerzo en las ventanas*.
- Grijalva Caisachana, L. P., & Narváez Mayanquer, H. J. (2018). *Elaboración de curvas de fragilidad para ensayos experimentales realizados sobre mamposterías de bloques de concreto y ladrillos en Quito*. Escuela Politécnica Nacional. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19992>
- Haro, A. G., Liu, M. K., Monzón, A., Héctor Monzón-Despang, A. S., & Tola, A. (2016). *EERI Earthquake Reconnaissance Team Report: M7.8 Muisne, Ecuador Earthquake on April 16, 2016*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27341.23527>
- INEN. (2014). *NTE INEN 293: Ladrillos Cerámicos. Definiciones. Clasificación y condiciones generales*. Quito, Ecuador. Retrieved from <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/293.pdf>
- INPRES-CIRSOC 103. Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes parte III: Construcciones de Mampostería (2018). Argentina.
- Kuroki, M., Kikuchi, K., Nonaka, H., & Shimosako, M. (2012). Experimental Study on Reinforcing Methods Using Extra RC Elements for Confined Masonry Walls with Openings. *15th World Conference on Earthquake Engineering (15WCEE)*, 10.
- López, K., & Ushiña, W. (2017). *Determinación Del Modulo De Elasticidad De Mampostería De Bloque No Estructural Utilizada En La Vivienda Ecuatoriana*. Escuela Politécnica Nacional. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/18756>
- Marques, R., & Lourenço, P. B. (2019). Structural behaviour and design rules of confined masonry walls: Review and proposals. *Construction and Building Materials*, 217, 137–155. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.266>
- Matošević, Đurđica, Sigmund, V., & Guljaš, I. (2015). Cyclic testing of single bay confined masonry walls with various connection details. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13(2), 565–586. <https://doi.org/10.1007/s10518-014-9627-8>
- Meli, R., Brzev, S., Astroza, M., Boen, T., Crisafulli, F., Dai, J., ... Yamin, L. (2011). *Seismic Design Guide for low-rise Confined Masonry Buildings*. World Housing.
- MIDUVI, & SGR. (2017). Construir mejor con Mampostería Confinada. *Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda - Secretaría de Gestión de Riesgos - Ecuador*, 1–36.
- Moroni, M. O., Astroza, M., & Acevedo, C. (2004). Performance and Seismic Vulnerability of Masonry Housing Types Used in Chile. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 18(3), 173–179. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0887-3828\(2004\)18:3\(173\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0887-3828(2004)18:3(173))
- MSJC-ACI 530. (2016). Building Code Requirements for Masonry Structures (TMS 402/ACI 530/ASCE 5). *Masonry Standards Joint Committee (MSJC)*, 58.
- NCh 2123. NCh2123.Of1997 Mod.2003: Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo (2003). Chile.
- NEC-SE-MP. Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-MP: Mampostería Estructural (2015). Ecuador.
- NEC-SE-VI. Norma Ecuatoriana de la Contruccion NEC-SE-

- VI: Viviendas de hasta 2 pisos con luces de hasta 5 m (2015). Ecuador. Retrieved from <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2015/02/NEC-SE-VIVIENDA-parte-2.pdf>
- NSR-10. Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (2010). Colombia.
- NTC-M. (2017). *Normas Técnicas Complementarias para diseño y construcción de estructuras de mampostería*. Mexico D.F.
- NTP E.70. Reglamento Nacional de Edificaciones, Norma Técnica E.070 Albañilería (2006). Peru.
- Ortega-G, E., Jiménez-Pacheco, J. C., Quinde, J. A., & García, H. A. (2020). Macroelement model for nonlinear static pushover analysis of confined masonry walls with openings. *Brick and Block Masonry - From Historical to Sustainable Masonry*, 924–932. <https://doi.org/10.1201/9781003098508-131>
- Perez-Gavilán, J. J., Flores, L. E., & Alcocer, S. M. (2015). An experimental study of confined masonry walls with varying aspect ratio. *Earthquake Spectra (PREPRINT)*.
- Perez-Gavilán, J. J., Perez, A., Flores, L. E., Jean, R., Cesin, J., & Hernández, O. (2017). Relevant Aspects of the New Mexico City's Code for the Design and Construction of Masonry Structures. Mexico D.F.
- Quiun, D., & Leguía, G. (2018). Comportamiento experimental de albañilería confinada de Ayacucho.
- Rea, G., Picón, H., & Villazhañay, J. (1989). *Uso del Hormigón en Construcción de Viviendas Pequeñas en la ciudad de Cuenca*. Universidad de Cuenca.
- Riahi, Z., Elwood, K. J., & Alcocer, S. M. (2009). Backbone Model for Confined Masonry Walls for Performance-Based Seismic Design. *Journal of Structural Engineering*, 135(6), 644–654. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000012](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000012)
- Rivas, L. (2017). *Análisis Experimental y Analítico de las propiedades estructurales ante cargas laterales de una Mampostería Confinada y una Mampostería Reforzada*. Escuela Politécnica Nacional.
- San Bartolomé, A. (2005). *Comentarios a la Norma Técnica de Edificación E . 070 Albañilería Informe Final*. <http://blog.pucp.edu.pe/blog/albanileria/>
- Singhal, V., & Rai, D. (2014). Role of Tothing on In-Plane and Out-of-Plane Behavior of Confined Masonry Walls. *Journal of Structural Engineering*, 140(9), 04014053. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0000947](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0000947)
- Singhal, V., & Rai, D. (2016). In-plane and out-of-plane behavior of confined masonry walls for various tothing and openings details and prediction of their strength and stiffness. *Earthquake Engineering Structural Dynamics*. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Tomaževič, M., & Klemenc, I. (1997). Seismic behaviour of confined masonry walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26(10), 1059–1071. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9845\(199710\)26:10<1059::AID-EQE694>3.0.CO;2-M](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9845(199710)26:10<1059::AID-EQE694>3.0.CO;2-M)
- Tripathy, D., & Singhal, V. (2019). Estimation of in-plane shear capacity of confined masonry walls with and without openings using strut-and-tie analysis. *Engineering Structures*, 188(August 2018), 290–304. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.002>
- Wijaya, W., Kusumastuti, D., Suarjana, M., Rildova, & Pribadi, K. (2011). Experimental study on wall-frame connection of confined masonry wall. *Procedia Engineering*, 14, 2094–2102. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.263>
- Yáñez, F., Astroza, M., Holmberg, A., & Ogaz, O. (2004). Behavior of confined masonry shear walls with large openings. *13 Th World Conference on Earthquake Engineering*, (3438). http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_3438.pdf
- Yekrangnia, M., Bakhshi, A., & Ali Ghannad, M. (2017). Force-displacement model for solid confined masonry walls with shear-dominated failure mode. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. <https://doi.org/10.1002/eqe>
- Yoshimura, K., Kikuchi, K., Kuroki, M., Nonaka, H., & Kim, K. T. (2004). Experimental study for developing higher seismic performance of Brick Masonry Walls, (1597).
- Zabala, O., & Zabala, J. (2006). *Rehabilitación de mamposterías agrietadas de ladrillo artesanal*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

BIOGRAFÍA



Quinde, John A. Ingeniero Civil de la Universidad de Cuenca. Actualmente es técnico de investigación en proyectos del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Cuenca (VIUC). Su línea de investigación se desarrolla en el campo del diseño y comportamiento sísmico de edificaciones de Mampostería Confinada y de Hormigón Armado.



Jiménez-Pacheco, Juan.
Ingeniero Civil de la Universidad de Cuenca; tiene una maestría en la Escuela Politécnica Nacional y un doctorado en la Escuela Politécnica de Cataluña. Actualmente es docente investigador de la Universidad de Cuenca y director de la Red

Sísmica del Austro. Su línea de investigación se desarrolla en el campo del comportamiento sísmico de las edificaciones de mampostería.



Ortega-Guamán, Erika.
Ingeniera Civil de la Universidad de Cuenca. Actualmente, es técnica de investigación en proyectos del Vicerrectorado de Investigación de la Universidad de Cuenca (VIUC). Su línea de investigación se desarrolla en el campo del comportamiento sísmico de las edificaciones de

mampostería, modelización estructural de Mampostería Confinada y evaluación sísmica.

