



UNIVERSIDAD DE CUENCA



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Influencia de las aberturas en el comportamiento sísmico de las paredes de ladrillo confinadas en marcos de hormigón armado

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autor:

Christian Andrés Castillo Barreto

CI: 0105163646

Correo electrónico: criz1500@hotmail.com

Director:

Ing. Juan Carlos Jiménez Pacheco, PhD.

CI: 0102260965

**Cuenca - Ecuador**

11-febrero-2022



## **Resumen:**

En el presente trabajo, se realizó un análisis de la influencia de las aberturas en el comportamiento sísmico de las paredes de ladrillo confinadas, empleando la metodología idónea para realizar estudios comparativos no experimentales y así obtener curvas pushover idealizadas y un conjunto de formulaciones seleccionadas de un corpus importante de trabajos de simulación experimental y numérica de paredes confinadas y marcos rellenos de mampostería sometidas a la acción de cargas laterales crecientes.

Este proyecto se centró en la influencia de las aberturas tipo puerta y ventana en la reducción de la rigidez lateral elástica y de la capacidad de resistencia a carga lateral, mediante un análisis comparativo entre los valores reales y valores numéricos calculados, se estableció el conjunto de formulaciones óptimas aplicables a las tipologías características de mampostería confinada de la ciudad de Cuenca.

Los datos obtenidos y tabulados se procesaron con el fin de presentar las formulaciones seleccionadas. Como resultado se muestran tablas organizadas; con una breve descripción, información de los autores, año de publicación y la referencia, así como información de los modelos de mampostería en los cuales se aplicaron dichas formulaciones; el tipo de unidades de ladrillo (sólidas o huecas), variaciones de abertura (tamaño, tipo y posición), el tipo de carga lateral y la tipología (marco relleno o mampostería confinada).

**Palabras claves:** Mampostería confinada. Pushover. Carga lateral. Resistencia lateral. Aberturas



**Abstract:**

In the present work, an analysis of the influence of openings on the seismic behavior of confined brick walls was carried out, using the ideal methodology to carry out non-experimental comparative studies and thus obtain idealized pushover curves and a set of formulations selected from an important corpus of experimental and numerical simulation works of confined walls and masonry infilled frames subjected to the action of increasing lateral loads.

This project focused on the influence of door and window type openings in the reduction of elastic lateral stiffness and lateral load resistance capacity, through a comparative analysis between the real values and calculated numerical values, the set of optimal formulations applicable to the typical confined masonry typologies of the city of Cuenca.

The data obtained and tabulated were processed, in order to present the selected formulations. As a result, organized tables are displayed; with a brief description, information on the authors, year of publication and reference, as well as information on the masonry models in which said formulations were applied; the type of brick units (solid or hollow), opening variations (size, type and position), the type of lateral loading and the typology (infilled frame or confined masonry).

**Keywords:** Confined masonry. Pushover. Lateral load. Lateral resistance. Openings



## Índice del Trabajo

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>18</b>
1.1	Generalidades .....	18
1.2	Definición del problema .....	19
1.3	Justificación.....	19
1.4	Objetivos.....	19
1.4.1	Objetivo general.....	19
1.4.2	Objetivos específicos. ....	19
1.5	Importancia del tema .....	20
1.6	Alcance.....	21
<b>2</b>	<b>ASPECTOS TIPOLÓGICOS Y DE COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE LAS EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA .....</b>	<b>21</b>
2.1	Antecedentes del uso de la mampostería como material constructivo .....	21
2.2	Clasificación tipológica general de las edificaciones de mampostería .....	22
2.2.1	Mampostería de piedras naturales.....	22
2.2.2	Mampostería no reforzada. ....	23
2.2.3	Mampostería confinada.....	24
2.2.4	Mampostería reforzada. ....	25
2.3	Distinción tipológica entre mampostería de ladrillo confinado y marco relleno de mampostería .	26
2.3.1	Resistencia a cargas laterales y gravitatorias.....	27
2.3.2	Cimientos. ....	27
2.3.3	Proceso constructivo.....	27
2.4	Modos de falla de las paredes llenas de mampostería de ladrillo confinado .....	29



2.4.1	Agrietamiento por corte .....	29
2.4.2	Falla a compresión .....	32
2.4.3	Agrietamiento por flexión .....	33
<b>2.5</b>	<b>Efectos de las aberturas en las paredes llenas de mampostería de ladrillo confinado. ....</b>	<b>34</b>
2.5.1	Influencia del tamaño de la abertura .....	34
2.5.2	Influencia de la posición de la abertura .....	35
2.5.3	Influencia de la relación de aspecto. ....	36
2.5.4	Modos de falla en aberturas tipo ventanas .....	37
2.5.5	Modos de falla en aberturas tipo puerta .....	39
<b>3</b>	<b>ASPECTOS TIPOLOGICOS DE LAS EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA EN CUENCA .....</b>	<b>40</b>
<b>3.1</b>	<b>Reseña histórica de su evolución tipológica .....</b>	<b>40</b>
3.1.1	Arquitectura Cañari .....	40
3.1.2	Arquitectura Inca. ....	41
3.1.3	Época colonial. ....	42
3.1.4	Época republicana .....	42
<b>3.2</b>	<b>Características de la mampostería confinada antigua .....</b>	<b>44</b>
3.2.1	Proceso constructivo .....	44
3.2.2	Ventajas. ....	45
3.2.3	Desventajas .....	45
<b>3.3</b>	<b>Características de la mampostería confinada moderna .....</b>	<b>45</b>
3.3.1	Proceso constructivo .....	47
3.3.2	Ventajas. ....	48
3.3.3	Desventajas .....	49
<b>4</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL CORPUS DE ESTUDIO .....</b>	<b>49</b>
<b>4.1</b>	<b>Metodología .....</b>	<b>49</b>
<b>4.2</b>	<b>Criterios de selección de trabajos y estrategias de búsqueda .....</b>	<b>50</b>
	Element Modeling of Masonry Wall With Opening Under Lateral Force. ....	53
<b>4.3</b>	<b>Descripción y resumen de los trabajos que plantean fórmulas .....</b>	<b>55</b>



<b>4.4 Descripción y resumen de los trabajos de simulación experimental .....</b>	<b>70</b>
(Kakaletsis & Karayannis, 2008) Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading.....	70
(Sigmund & Penava, 2014) Influence of Openings, With and Without Confinement, on Cyclic Response of Infilled R-C Frames - An Experimental Study.....	72
<b>4.5 Descripción y resumen de los trabajos de simulación numérica .....</b>	<b>75</b>
(Alvarez & Alcocer, 2001) Monografía CIMNE IS-46 .....	75
(Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) Experimental and analytical investigation of lateral load response of confined masonry walls.....	77
(Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) Numerically based proposals for the stiffness and strength of masonry infills with openings in reinforced concrete frames.....	79
(Darmayadi & Rusli, 2018) Element Modeling of Masonry Wall With Opening Under Lateral Force. ....	81
<b>5 ANÁLISIS DE LA CALIDAD PREDICTIVA DE LAS FÓRMULAS .....</b>	<b>82</b>
<b>5.1 Criterios de idealización trilineal y bilineal para las curvas fuerza-desplazamiento de paredes de mampostería confinada sujetas a carga lateral. ....</b>	<b>83</b>
<b>5.2 Aplicación de los criterios de idealización trilineal y bilineal para las curvas fuerza-desplazamiento experimentales y obtención de valores de caracterización. ....</b>	<b>88</b>
(Kakaletsis & Karayannis, 2008) Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading.....	88
(Sigmund & Penava, 2014) Influence of Openings, With and Without Confinement, on Cyclic Response of Infilled RC Frames - An Experimental Study.....	90
<b>5.3 Aplicación de los criterios de idealización trilineal y bilineal para las curvas fuerza-desplazamiento de simulación numérica y obtención de valores de caracterización. ....</b>	<b>93</b>
(Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) Experimental and analytical investigation of lateral load response of confined masonry walls.....	93
(Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) Numerically based proposals for the stiffness and strength of masonry infills with openings in reinforced concrete frames.....	99
(Darmayadi & Rusli, 2018) Element Modeling of Masonry Wall With Opening Under Lateral Force. ....	103
<b>5.4 Análisis de la calidad predictiva de las fórmulas .....</b>	<b>105</b>
5.4.1 Análisis preliminar de calidad predictiva .....	105
5.4.2 Análisis de la variabilidad del error de predicción .....	105



**CONCLUSIONES.....128**

**RECOMENDACIONES.....129**

**BIBLIOGRAFÍA .....131**

**ANEXOS .....140**

### Índice de Figuras

Fig. 2.1 Apilamiento de piedras naturales ..... 22

Fig. 2.2 Muro de contención de piedra braza con drenes y dentellón, para sitios con riesgo de deslizamiento..... 23

Fig. 2.3 Elementos estructurales de una mampostería confinada ..... 25

Fig. 2.4 Refuerzo típico de una sección de pared de mampostería reforzada ..... 26

Fig. 2.5 Construcción de un muro de mampostería confinada ..... 28

Fig. 2.6 Construcción de un pórtico relleno de mampostería..... 29

Fig. 2.7 Esfuerzo de compresión y tensión en el panel de mampostería..... 30

Fig. 2.8 Falla a deslizamiento en el panel de mampostería..... 31

Fig. 2.9 Agrietamiento escalonado y horizontal de la pared de mampostería..... 31

Fig. 2.10 Aplastamiento en las esquinas y compresión diagonal en el panel de mampostería..... 32

Fig. 2.11 Falla del panel de mampostería por compresión diagonal..... 33

Fig. 2.12 Falla del panel de mampostería por flexión ..... 34

Fig. 2.13 Grietas diagonales en los muros con aberturas ..... 35

Fig. 2.14 Modelo esbelto de mampostería confinada con  $H/L=2$  y abertura central ..... 36

Fig. 2.15 Modelo ancho de mampostería confinada con  $H/L=0.67$  y abertura lateral ..... 37

Fig. 2.16 Segmentación del comportamiento de un panel de mampostería confinada con abertura tipo ventana. .... 38

Fig. 2.17 Diagrama de fuerzas producido en un panel con abertura de ventana..... 38

Fig. 2.18 Diagrama de fuerzas producido en un panel con abertura de puerta ..... 39

Fig. 3.1 El castillo de Chosbi..... 41

Fig. 3.2 Ruinas arqueológicas de Pumapungo..... 41

Fig. 3.3 Patio Central. Casa de las Posadas ..... 42

Fig. 3.4 Catedral de la Inmaculada Concepción.....	43
Fig. 3.5 Proceso constructivo tradicional de mampostería confinada.....	44
Fig. 3.6 Tipos de uniones.....	46
Fig. 3.7 Conexión marco-muro.....	47
Fig. 3.8 Colocación del conector de corte en la columna .....	47
Fig. 3.9 Proceso constructivo propuesto para mampostería confinada .....	48
Fig. 4.1. Descentramiento horizontal abertura tipo puerta.....	54
Fig. 4.2 Descentramiento vertical y horizontal abertura tipo ventana .....	54
Fig. 4.3 Métodos de Modelización de las paredes de mampostería confinada.....	56
Fig. 4.4 Esquema de referencia del Método de Muto. a) Columna del marco 1 <sup>er</sup> nivel, b) Columna del marco cualquier nivel. ....	67
Fig. 4.5 Características del marco de mampostería y ladrillos huecos empleados.....	71
Fig. 4.6 Marcos de hormigón rellenos de mampostería.....	71
Fig. 4.7 Propiedades mecánicas de los materiales empleados (MPa) .....	72
Fig. 4.8 Descripción de los modelos seleccionados .....	73
Fig. 4.9 Muestras ensayadas y características del marco de hormigón armado.....	74
Fig. 4.10 Propiedades de los materiales empleados.....	74
Fig. 4.11 Propiedades de los materiales pétreos .....	75
Fig. 4.12 Geometría y dimensiones del modelo Mo y configuración en el programa SBETA modelo de elementos finitos. ....	76
Fig. 4.13 Geometría de los modelos analizados .....	76
Fig. 4.14 Características geométricas de la pared rellena (CLY-S-STRL) y con aberturas en forma ventanas (CLY-PW) Y de puertas (CLY-PD) analizadas.....	78
Fig. 4.15 Modelo de elementos finitos desarrollado. ....	78
Fig. 4.16 Configuración para abertura en forma de ventanas analizados.....	78
Fig. 4.17 Configuración para abertura en forma de ventanas analizados.....	79
Fig. 4.18 Propiedades de los materiales empleados.....	80
Fig. 4.19 Propiedades mecánicas de los de los materiales empleados.....	80
Fig. 4.20 Caracterización geométrica de las aberturas .....	81
Fig. 4.21 a) Malla del modelo de elementos finitos para pared de mampostería sólida. b) Aplicación de la fuerza a la pared de mampostería sólida. ....	81
Fig. 4.22 a) Configuración de muestras analizadas y b) Resultados de análisis en el programa ABAQUS del pórtico con abertura central para un 10%.....	82



Fig. 5.1 Envolvente del comportamiento histerético de muros de mampostería confinada	83
Fig. 5.2 Relación idealizada de carga-deformación para mampostería confinada	84
Fig. 5.3 Aplicación de la idealización trilineal al marco piloto desnudo (B)	85
Fig. 5.4 Relación entre $V_{cr}/v_{m\acute{a}x}$ y el rango para la obtención de $V_{cr}$	87
Fig. 5.5 Aplicación de la idealización bilineal al marco piloto desnudo (B)	87
Fig. 5.6 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal, a) Marco piloto desnudo(B), b) Marco relleno sólido fuerte (IS), c) Relleno sólido fuerte con abertura del 10% tipo ventana (10%W), d) Relleno sólido fuerte con abertura del 20% tipo puerta (20%D)	89
Fig. 5.7 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal, a) Grupo III Tipo 1: Marco vacío, b) Grupo III Tipo 2: Marco relleno, c) Grupo I TIPO 1: Puerta centrada (14%D), d) Grupo II Tipo 2: Ventana centrada (13%W), e) Grupo I Tipo 3: Puerta descentrada (14% DD), f) G	92
Fig. 5.8 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal, a) Marco relleno CLY-S-CTRL, b) Curva pushover CLY-P-20W (7%W), c) Curva pushover CLY-P-29W (10%W), d) Curva pushover CLY-P-55W (19%W), e) Curva pushover CLY-P-75W (26%W), f) Curva pushover CLY-P-20D (17%D), g) Curva pushover CLY-P-29D (24%D), h) Curva pushover CLY-P-55D (46%D), i) Curva pushover CLY-P-75D (63%D)	96
Fig. 5.9 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal de marcos rellenos de mampostería, a) Marco vacío, b) Marco relleno, c) Abertura tipo ventana centrada (9 %W), d) Abertura tipo ventana centrada (12 %W), e) Abertura tipo ventana centrada (15 %W), f) Abertura tipo ventana centrada (20 %W), g) Abertura tipo ventana centrada (25 %W), h) Abertura tipo ventana centrada (36 %W), i) Abertura tipo ventana centrada (42 %W), j) Abertura tipo ventana centrada (49 %W)	101
Fig. 5.10 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal, a) Solid Wall (Marco relleno), b) Abertura del 30% tipo ventana centrada (30%W), c) Abertura del 50% tipo ventana centrada (50%W)	103
Fig. 5.11 Resultados comparativos de la idealización trilineal en cuanto a: a) Resistencia a carga lateral del marco desnudo y b) Rigidez elástica del marco desnudo, de las diferentes investigaciones con la aplicación del Método de muto	106
Fig. 5.12 Resultados comparativos de la idealización bilineal en cuanto a: a) Resistencia a carga lateral del marco desnudo y b) Rigidez elástica del marco desnudo, de las diferentes investigaciones con la aplicación del Método de muto	107



Fig. 5.13 Resultados obtenidos de la idealización trilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ). en las muestras de los marcos rellenos de mampostería con unidades de ladrillos huecos y con aberturas centrales tipo ventana de la investigación de Akhoundi et al. 2016. .... 109

Fig. 5.14 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ). en las muestras de los marcos rellenos de mampostería con unidades de ladrillos huecos y con aberturas centrales tipo ventana de la investigación de Akhoundi et al. 2016. .... 110

Fig. 5.15 Resultados obtenidos de la idealización trilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ) en las muestras de pared confinada con unidades de ladrillos sólidas y con abertura tipo ventana, de la investigación de Okail et al. 2016 ..... 111

Fig. 5.16 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ) en las muestras de pared confinada con unidades de ladrillos sólidas y con abertura tipo ventana, de la investigación de Okail et al. 2016 ..... 112

Fig. 5.17 Resultados obtenidos de la idealización trilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ). en las muestras de pared confinada con unidades de ladrillos sólidas y con abertura tipo puerta, de la investigación de Okail et al. 2016 ..... 112

Fig. 5.18 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ). en las muestras de pared confinada con unidades de ladrillos sólidas y con abertura tipo puerta, de la investigación de Okail et al. 2016 ..... 113

Fig. 5.19 Resultados obtenidos de la idealización trilineal por cada formulación de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ). en las muestras de las diferentes investigaciones: a) Fórmula de Inpres-Cirsoc 103, 1983, b) Fórmula de Flores et al. 1995, c) Fórmula de INN, 1997, d) Fórmula de Al Chaar et al. 2003, e) Fórmula de Akhoundi et al. 2016..... 115

Fig. 5.20 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por cada formulación de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ). en las muestras de las diferentes investigaciones: a) Fórmula de Inpres-Cirsoc 103, 1983, b) Fórmula de Flores et al. 1995,



c) Fórmula de INN, 1997, d) Fórmula de Al Chaar et al. 2003, e) Fórmula de Akhouni et al. 2016..... 116

Fig. 5.21 Resultados obtenidos de la idealización trilineal para la formulación de rigidez elástica ( $K_e$ ) dado por Flores et al. 1995 comparados con los resultados de la rigidez elástica de las idealizaciones de simulaciones numéricas o experimentales ( $K_s$ ) de las diferentes investigaciones: a) Inv. de Kakaletsi et al. 2008 e Inv. de Sigmund et al. 2014, b) Inv. de Okail et al. 2014 (ventanas- W), c) Inv. de Okail et al. 2014 (puertas-D), d) Inv. De Akhouni et al. 2016..... 118

Fig. 5.22 Resultados obtenidos de la idealización bilineal para la formulación de rigidez elástica ( $K_e$ ) dado por Flores et al. 1995 comparados con los resultados de la rigidez elástica de las idealizaciones de simulaciones numéricas o experimentales ( $K_s$ ) de las diferentes investigaciones: a) Inv. de Kakaletsi et al. 2008 e Inv. de Sigmund et al. 2014, b) Inv. de Okail et al. 2014 (ventanas- W), c) Inv. de Okail et al. 2014 (puertas-D), d) Inv. De Akhouni et al. 2016..... 119

Fig. 5.23 Resultados obtenidos de la idealización trilineal para la formulación de rigidez elástica ( $K_{co}$ ) dado por Akhouni et al. 2016 comparados con los resultados de la rigidez elástica de las idealizaciones de simulaciones numéricas o experimentales ( $K_s$ ) de las diferentes investigaciones: a) Inv. de Kakaletsi et al. 2008 e Inv. de Sigmund et al. 2014, b) Inv. de Okail et al. 2014 (ventanas- W), c) Inv. de Okail et al. 2014 (puertas-D), d) Inv. De Akhouni et al. 2016, e) Inv. de Darmayadi et al. 2018. .... 121

Fig. 5.24 Resultados obtenidos de la idealización bilineal para la formulación de rigidez elástica ( $K_{co}$ ) dado por Akhouni et al. 2016 comparados con los resultados de la rigidez elástica de las idealizaciones de simulaciones numéricas o experimentales ( $K_s$ ) de las diferentes investigaciones: a) Inv. de Kakaletsi et al. 2008 e Inv. de Sigmund et al. 2014, b) Inv. de Okail et al. 2014 (ventanas- W), c) Inv. de Okail et al. 2014 (puertas-D), d) Inv. De Akhouni et al. 2016, e) Inv. de Darmayadi et al. 2018. .... 122

Fig. 5.25 Resultados obtenidos de la idealización trilineal por cada formulación de rigidez elástica ( $K$ ) en las muestras de las diferentes investigaciones: a) Fórmula de Flores et al. 1995, b) Fórmula de Al Chaar et al. 2003, c) Fórmula de Akhouni et al. 2016..... 124

Fig. 5.26 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por cada formulación de rigidez elástica ( $K$ ) en las muestras de las diferentes investigaciones: a) Fórmula de Flores et al. 1995, b) Fórmula de Al Chaar et al. 2003, c) Fórmula de Akhouni et al. 2016..... 125



## Índice de Tablas

Tabla 4.1. Estudios publicados por diferentes autores.....	51
Tabla 4.2 Investigaciones seleccionadas para el desarrollo de la investigación.....	55
Tabla 4.3 Valores numéricos de a, b, c y d (4.3.12) y (4.3.13) .....	64
Tabla 5.1 Resumen de valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Kakaletsis & Karayannis, 2008).....	89
Tabla 5.2 Resumen de valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Kakaletsis & Karayannis, 2008).....	90
Tabla 5.3 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Sigmund & Penava, 2014) .....	92
Tabla 5.4 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Sigmund & Penava, 2014).....	93
Tabla 5.5 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) .....	97
Tabla 5.6 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.).....	98
Tabla 5.7 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016).....	101
Tabla 5.8 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) .....	102
Tabla 5.9 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Darmayadi & Rusli, 2018) .....	104
Tabla 5.10 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Darmayadi & Rusli, 2018).....	104
Tabla 5.11 Resultados de las formulaciones para determinar la rigidez elástica y la resistencia a carga lateral del marco desnudo comparado con los valores de la idealización trilineal.....	106
Tabla 5.12 Resultados de las formulaciones para determinar la rigidez elástica y la resistencia a carga lateral del marco desnudo comparado con los valores de la idealización bilineal.....	107
Tabla 5.13 Resumen del análisis predictivo de las formulaciones estudiadas en cuanto a la rigidez elástica y resistencia a carga lateral del corpus de estudio seleccionado mediante la idealización trilineal. ....	127



## Índice de Anexos

Anexo 1. Diagrama de desplazamientos de los modelos numéricos para puertas (D) y para ventanas (W) .....	140
Anexo 2 Curvas del comportamiento histerético de los muros de mampostería con abertura. ....	141
Anexo 3 Diagrama de desplazamientos de los modelos numéricos con relación de abertura creciente.....	142
Anexo 4 Diagrama de desplazamientos de los modelos numéricos con relación de abertura creciente tipo ventana centrada. ....	142
Anexo 5 Diagrama de desplazamientos de los modelos numéricos con relación de abertura creciente tipo ventana centrada. ....	143



### Cláusula de Propiedad Intelectual

---

Christian Andrés Castillo Barreto, autor del trabajo de titulación "**Influencia de las aberturas en el comportamiento sísmico de las paredes de ladrillo confinadas en marcos de hormigón armado**", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 11 de febrero del 2022

---

Christian Andrés Castillo Barreto

C.I: 0105163646



### Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

---

Christian Andrés Castillo Barreto en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "**Influencia de las aberturas en el comportamiento sísmico de las paredes de ladrillo confinadas en marcos de hormigón armado**", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 11 de febrero del 2022

---

Christian Andrés Castillo Barreto

C.I: 0105163646



## AGRADECIMIENTO

Les agradezco a Dios y a mi mamá Melva por haberme apoyado en todo momento, por ser el pilar de mis logros. Por brindarme el impulso para seguir adelante y poder dar lo mejor.

De igual manera a mi abuelita Inés, por estar siempre presente en cada paso de mi vida y brindarme todo su cariño incondicional.

A mi tutor Ing. Juan Jiménez, por haberme brindado su apoyo y orientado en la realización de la tesis.

A todos mis amigos y compañeros que me brindaron su ayuda a lo largo de toda la carrera.

*Christian Castillo B.*





## DEDICATORIA

A mi mamá y a mi abuelita por ser los pilares fundamentales de mi vida, los seres más queridos. Por darme el impulso necesario para poder culminar con la carrera y llegar a esta etapa de mi vida. Por supuesto a Dios, que ha sido la luz que ha guiado mi vida en todo momento.

*Christian Castillo B.*



# 1 Introducción

## 1.1 Generalidades

La característica básica de las estructuras de mampostería confinada (MC) son las columnas y vigas de hormigón armado (HA) que rodean al panel de mampostería. El efecto de confinamiento del marco de hormigón junto con la ductilidad que aporta el refuerzo mejora ostensiblemente el desempeño sismorresistente de las paredes no reforzadas (Tomažević & Klemenc, 1997; Ural & Doğangün, 2006).

Una edificación compuesta de mampuestos confinados sujeta a un movimiento sísmico puede ser modelada como un sistema de diagonales equivalentes. Las paredes de mampostería actúan como diagonales sujetas a compresión (Crisafulli & Carr, 2007; Orduña & Ayala, 2001), mientras los elementos de confinamiento de concreto reforzado trabajan a tracción y compresión (Brzev, 2007). La diagonal de compresión, al estar en contacto con el marco, genera fallas de corte y flexión en vigas y columnas (Mohyeddin & Gad, 2015; Paulo *et al.*, 2011). Los modelos representados por una y dos diagonales no consideran la interacción con el marco; y, por lo tanto, no capturan adecuadamente el comportamiento de las columnas.

Las aberturas tienen una gran influencia en el comportamiento sísmico de las estructuras de MC. De acuerdo con Yáñez *et al.* (2004) las aberturas reducen la capacidad máxima de las estructuras y a medida que el tamaño de estas aumenta la rigidez elástica se degrada más rápidamente. Eshghi y Pourazin (2009) indican que la formación de grietas no solo se presenta en los miembros confinantes sino también en todos los rincones de la abertura. Para realizar modelaciones de paredes de relleno que tengan aberturas en su geometría, a las cuales se les desea aplicar el macro modelo de diagonales equivalentes, Asteris *et al.* (2011) proponen un factor de reducción  $\lambda$ , utilizado como factor de multiplicación en las ecuaciones para calcular el ancho equivalente reducido de las diagonales de compresión. El factor  $\lambda$  es aplicable en modelos de diagonales múltiples para poder idealizar el comportamiento no lineal de paredes de relleno con aberturas.

## 1.2 Definición del problema

Uno de los aspectos menos conocidos sobre el comportamiento sísmico de las paredes de MC es el efecto de las aberturas (tamaño, tipo y posición). En la ciudad de Cuenca y en el Ecuador en general, no se ha profundizado aún en el estudio del comportamiento de muros de ladrillo sometidos a la acción de sollicitaciones sísmicas cuando se tiene la presencia de aberturas, a pesar de que el país tiene una elevada amenaza sísmica por ubicarse en el cinturón de fuego y de que en la ciudad de Cuenca el sistema constructivo predominante es la mampostería confinada.

## 1.3 Justificación

El presente trabajo se orientará al estudio del comportamiento sísmico de las paredes de ladrillo confinadas en marcos de HA. Concretamente, en el efecto de las aberturas en las curvas fuerza-desplazamiento ante carga lateral monotónica o cíclica idealizadas (curvas *pushover*). El efecto estudiado se enfocará en la reducción de la rigidez lateral elástica y de la capacidad de resistencia a carga lateral, con miras a estudios futuros de macro-modelización.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general.

Seleccionar de la literatura las mejores formulaciones para evaluar el efecto de las aberturas sobre la curva *pushover* de las paredes de ladrillo confinadas, asumiendo como parámetros: 1) el tipo de abertura, 2) tamaño de la abertura, 3) localización de la abertura.

### 1.4.2 Objetivos específicos.

- Describir las características del corpus de trabajos experimentales y de simulación numérica de aplicación de carga lateral sobre paredes confinadas y marcos rellenos de mampostería que estudian el efecto de las aberturas sobre las curvas *pushover* en términos de rigidez elástica y de capacidad de resistencia ante carga lateral, considerando tanto paredes con unidades de ladrillo sólidas como huecas.



- Estudiar, con base en el corpus de trabajos seleccionados, la calidad predictiva de un conjunto de formulaciones (identificadas en la literatura) para evaluar el efecto de las aberturas sobre las curvas *pushover* en términos de rigidez elástica y de capacidad de resistencia ante carga lateral, distinguiendo entre paredes con unidades de ladrillo sólidas y paredes con unidades de ladrillo huecas.
- Establecer las mejores formulaciones para evaluar el efecto de las aberturas sobre la curva *pushover* de las paredes de ladrillo confinadas, distinguiendo entre paredes con unidades de ladrillo sólidas y paredes con unidades de ladrillo huecas.

## 1.5 Importancia del tema

Estudios experimentales y analíticos sobre el comportamiento sísmico de paredes de MC se han realizado centrándose en la resistencia a carga lateral, rigidez elástica, ductilidad, disipación de energía y modos de falla del sistema estructural (Aguilar, 2013; Tomažević & Klemenc, 1997; Yáñez *et al.*, 2004).

Sin embargo, uno de los aspectos menos conocidos sobre el comportamiento sísmico de las paredes de MC es el efecto de las aberturas (tamaño, tipo y posición). Las aberturas tienen un gran impacto en el comportamiento sísmico de las estructuras de MC; así lo indican Yáñez *et al.* (2004), demostrando que las aberturas reducen la capacidad máxima, y que a medida que el tamaño de éstas aumenta la rigidez elástica se degrada a mayor velocidad. Eshgi y Pourazin (2009) afirman que la formación de grietas no solo se presenta en los miembros confinantes sino también en todos los rincones de la abertura. En margen al macro modelo de diagonales equivalentes Asteris *et al.* (2011) proponen un factor de reducción,  $\lambda$ , utilizado como factor de multiplicación en ecuaciones bien conocidas para calcular el ancho equivalente reducido de los puntales de compresión, para poder modelar paredes de relleno con aberturas. El mismo factor de reducción es aplicable en modelos de puntales múltiples para poder captar la respuesta no lineal de paredes de relleno con aberturas.

El desarrollo de este trabajo de investigación está enfocado en el estudio de la calidad predictiva de formulaciones seleccionadas de la literatura técnica disponible. Para este análisis, se obtienen curvas *pushover* idealizadas de un corpus importante de trabajos de simulación experimental y numérica de paredes confinadas sometidas a la acción de



cargas laterales crecientes. El conjunto de curvas pushover idealizadas constituye la base para la comparación de la calidad predictiva de las formulaciones seleccionadas. Las características tipológicas, constructivas y mecánicas típicas de las paredes confinadas de las edificaciones de paredes de ladrillo confinadas en Cuenca, definieron los criterios de selección de las investigaciones consultadas y de sus resultados obtenidos. Por ello la importancia de este trabajo.

## 1.6 Alcance

El presente trabajo tiene como resultado evaluar el efecto de las aberturas sobre la curva *pushover* de las paredes de ladrillo confinadas mediante formulaciones seleccionadas de la literatura. Este estudio pretende aportar para el trabajo de investigación DIUC XVIII titulado “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO SISMICO DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERIA CONFINADA TIPICAS DEL SECTOR TOTORACOCCHA – CUENCA”, que se lleva a cabo por la Red Sísmica del Austro (RSA), centro de investigación de la Universidad de Cuenca.

## 2 Aspectos tipológicos y de comportamiento sísmico de las edificaciones de mampostería confinada

### 2.1 Antecedentes del uso de la mampostería como material constructivo

Históricamente, la mampostería es un material de construcción utilizado desde la antigüedad. Se tiene evidencia en torno a los años 8000 y 4000 a. C. de construcciones rústicas de piedras apiladas, las cuales eran usadas por las primeras civilizaciones sedentarias para refugiarse de la fuerza del clima y de otros grupos rivales. En la Figura 2.1 se puede observar uno de estos primeros levantamientos rústicos de mampostería elaborados por el hombre (Zúñiga O. , 2005). Aún hoy en día se puede apreciar ejemplos de los diversos usos que las civilizaciones antiguas le dieron a la mampostería: Las ruinas de Jericó en Medio Oriente, las pirámides de Egipto, la Gran Muralla China, las pirámides de Yucatán en México, las ruinas de Machu Pichu en Perú, la fortaleza de Inga Pirca en Ecuador, el Taj Majal en India, solo por mencionar algunos, que demuestran la importancia y durabilidad de este material.



*Fig. 2.1 Apilamiento de piedras naturales  
Fuente: (Zúñiga O. , 2005)*

Los ladrillos cerámicos de adobe aparecieron a principios del tercer milenio a. C., los cuales se unían con mortero de alquitrán, aquello permitió el desarrollo de estructuras más grandes y duraderas.

Fue aproximadamente alrededor del año 1913 en México, que se dio inicio a proyectos de investigación patrocinados por fabricantes de ladrillos, con la finalidad de incentivar la construcción de nuevas estructuras con estos como el material estructural predominante, a partir de lo cual se identificaron tanto ventajas como desventajas de la utilización de estos mampuestos en la industria de la construcción. Entre las ventajas están que la mampostería es un material más económico comparado con otros materiales como el hormigón, su elevada capacidad de aislamiento térmico y acústico. Por otro lado, una de sus desventajas es que el diseño debe contemplar muchos detalles para que ante la presencia de cargas laterales este conserve su integridad estructural (Zúñiga O. , 2005).

## 2.2 Clasificación tipológica general de las edificaciones de mampostería

Para el análisis de las edificaciones de mampostería se utilizará la clasificación establecida por el gobierno de la Ciudad de México: mampostería de piedras naturales, no reforzada, confinada y reforzada (Gobierno del Distrito Federal de México, 2004).

### 2.2.1 Mampostería de piedras naturales.

En el proceso de construcción tanto de muros de contención como de otros similares de mampostería que no pertenecen a ninguna de las categorías anteriores, generalmente se

utilizan piedras naturales sin pulir unidas por mortero simple (Gobierno del Distrito Federal de México, 2004).

De acuerdo a la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), de México (2015), son varios los beneficios que se obtiene de utilizar este tipo de estructuras: al estar elaboradas con piedras es fácil conseguir los materiales para construirlos y éstas no requieren un mantenimiento sofisticado; son más duraderas y resistentes al deterioro ambiental que otros materiales; protegen casas y vías construidas en áreas urbanas, así como controlan márgenes de ríos. Su principal desventaja es que se necesita contar con un suelo de alta consistencia y resistencia para construirlos debido al gran peso que representan; por ello, previo a su construcción se debe limpiar adecuadamente la zona; de suelos inestables (derivados de cenizas volcánicas), vegetación, fragmentos de roca, etc.

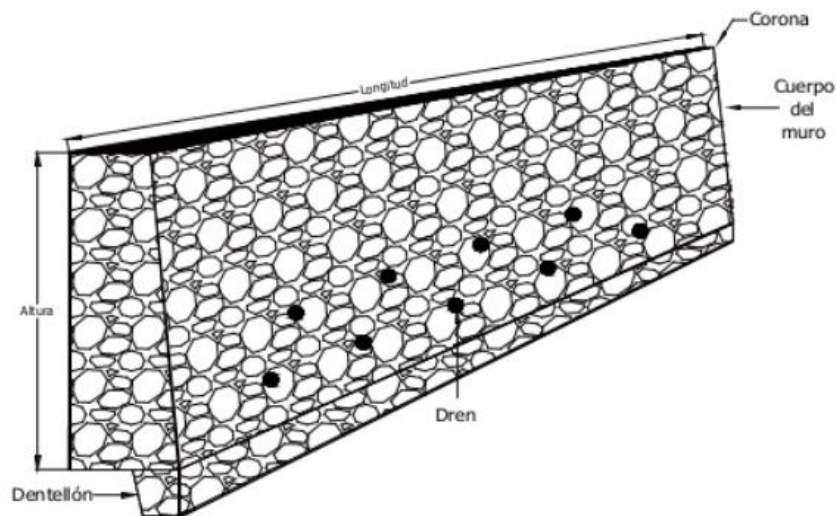


Fig. 2.2 Muro de contención de piedra braza con drenes y dentellón, para sitios con riesgo de deslizamiento  
Fuente: SAGARPA (2015)

### 2.2.2 Mampostería no reforzada.

Este tipo de mampostería es utilizada para la elaboración de paredes o muros conocidos como muros no estructurales de mampostería simple, son aquellos que no llevan ningún tipo de acero de refuerzo que los ayude a soportar las cargas verticales u horizontales a los que son sometidos. La normativa mexicana no los recomienda, ya que pueden fallar fuera del plano una vez que aparecen grietas durante la ocurrencia de un sismo; por lo



tanto, exhorta a la utilización de algún tipo de refuerzo interior que ayude a reducir la vulnerabilidad y mejore el desempeño del muro (Gobierno del Distrito Federal de México, 2004).

Las paredes de las edificaciones de mampostería no reforzada pueden estar elaboradas con unidades de adobe o ladrillo. Bravo y Flores (2015) afirman que este tipo de paredes son deficientes ante un evento sísmico, debido a que, el adobe es un material que presenta escasa adherencia (entre muros transversales) y resistencia a la tensión, además la elaboración de techos con este material resulta en cargas muy grandes que los muros no pueden soportar adecuadamente.

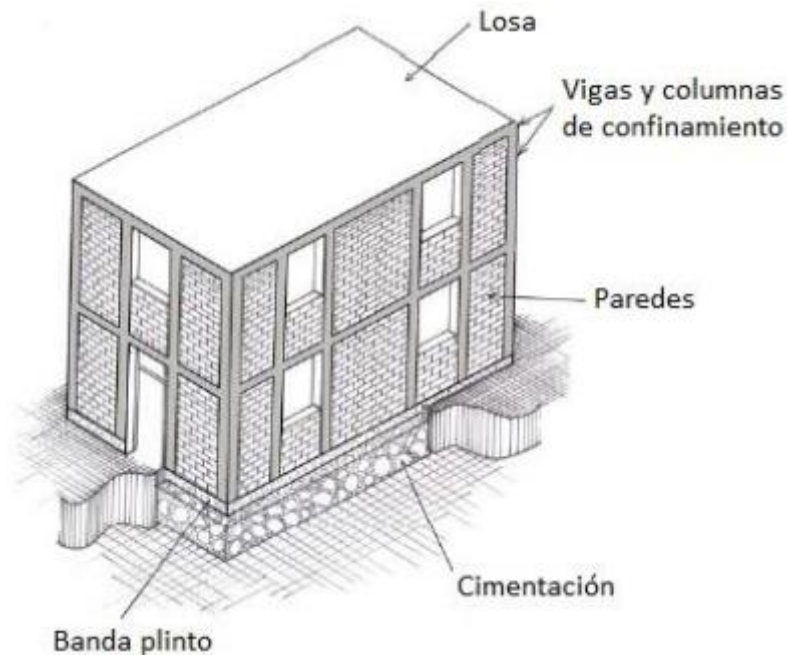
Este tipo de paredes es preferible que sean utilizadas únicamente de manera arquitectónica, es decir como paredes divisorias de habitaciones.

### 2.2.3 Mampostería confinada.

Los muros de mampostería confinada son aquellos que están reforzados o confinados con vigas y columnas de hormigón, las cuales a su vez se encuentran reforzadas con barras de acero longitudinales y acero transversal (estribos), este tipo de muros deben cumplir con lo especificado en las normativas de diseño para garantizar su serviciabilidad y un adecuado comportamiento de los elementos que lo componen.

En el Ecuador, para el levantamiento de construcciones pequeñas, generalmente de uno o dos pisos (aunque también funciona en estructuras más altas), el sistema constructivo más utilizado es precisamente la mampostería confinada. En la región Sierra predomina el uso de ladrillos macizos de arcilla prensados a mano (artesanales), mientras que en la región Costa y el resto del país se utilizan bloques de hormigón y ladrillos de arcilla vibro-prensados (NEC, 2015).





*Fig. 2.3 Elementos estructurales de una mampostería confinada  
Fuente: Brzev (2007)*

#### 2.2.4 Mampostería reforzada.

La mampostería reforzada consiste en la utilización de barras de acero vertical y horizontal en el interior de las aberturas de los mampuestos de hormigón o arcilla, con el fin de mejorar el comportamiento de los muros o paneles que las contienen. Los huecos de las unidades de mampostería pueden estar rellenos de mortero permitiendo que el muro trabaje como un sistema capaz de disipar la energía en el rango inelástico, por otro lado, cuando aquellas unidades reforzadas son rellenas dicha capacidad de disipación se reduce. Estos elementos deben ser cubiertos con una lechada de cemento para cuidar las barras de refuerzo de los efectos de la corrosión (Brzev, 2007).

Bravo y Flores (2015) afirman que cuando, es ubicado en esquinas, aberturas con intervalos que no superan los 2.5 metros, el refuerzo vertical, entonces será necesario que el refuerzo de tipo horizontal se localice como viga por encima de las paredes, y en el caso de aberturas sería en la parte superior e inferior de las mismas (p. 34), como se puede observar en la Figura 2.3. Adicionalmente, el refuerzo ayuda a prevenir la formación de grietas, las cuales pueden formarse cerca de las aberturas por la acción de fuerzas cortantes en el muro o en las esquinas. Las grietas tienden a aparecer en la parte

superior del muro y van creciendo diagonalmente, resultando a veces en el colapso del muro.

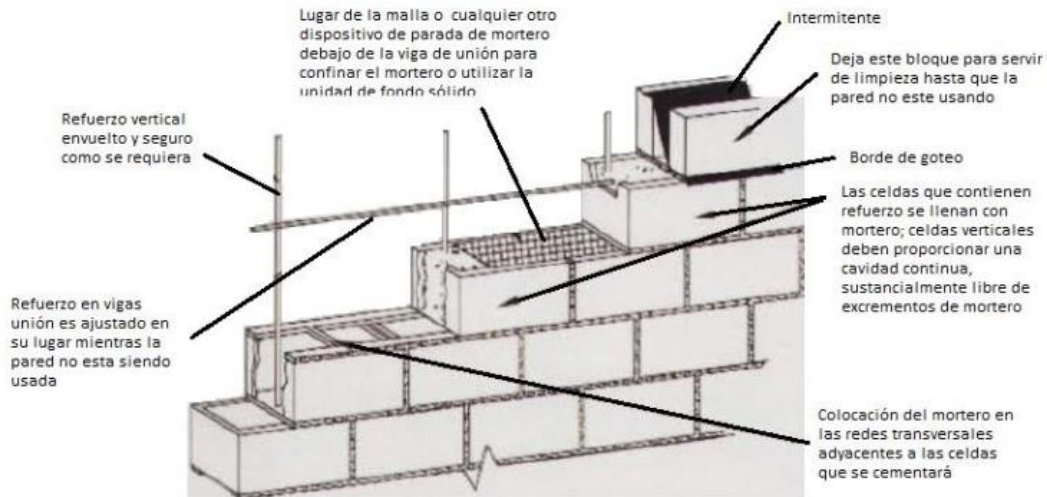


Fig. 2.4 Refuerzo típico de una sección de pared de mampostería reforzada  
Fuente: Bravo & Flores (2015)

### 2.3 Distinción tipológica entre mampostería de ladrillo confinado y marco relleno de mampostería

Entre los sistemas constructivos que utilizan mampostería como base, el sistema de mampostería confinada y los marcos rellenos de mampostería son de los más utilizados, pero muchas veces son confundidos, ya que a simple vista parecen similares, por lo que en este apartado se mencionarán conceptos y características que permiten diferenciar a estos sistemas constructivos.

Tanto los muros de mampostería confinada como los marcos rellenos de mampostería se asemejan porque las partes que los componen son los siguientes:

- Paredes de mampostería: las paredes por sí solas, son elementos construidos con unidades de mampostería (huecos o macizos), los cuales se unen con mortero en hiladas. Las paredes tienen como función soportar cargas, ya sea muertas y vivas provenientes de las losas o cargas sísmicas ante la presencia de eventos sísmicos (Ortega, 2020).



- Elementos de confinamiento (vigas y columnas): Su principal función es proporcionar restricción al panel o muro de mampostería, mejorando su desempeño y evitando su colapso ante eventos sísmicos severos (Ortega, 2020).
- Losas de entrepiso: este elemento estructural de hormigón armado puede o no, tener alivianamientos de bloque, poliestireno u otros materiales, para reducir la cantidad de hormigón utilizado y con ello el peso del elemento. Las losas dependiendo de su diseño pueden actuar además como diafragmas horizontales (Ortega, 2020).

### 2.3.1 Resistencia a cargas laterales y gravitatorias.

Las columnas y vigas de confinamiento de los marcos rellenos generalmente son más grandes, precisamente porque las cargas laterales y gravitatorias son soportadas por estos elementos, mientras que en los sistemas de mampostería confinada son las paredes quienes soportan en mayor medida dichas sollicitaciones.

### 2.3.2 Cimientos.

Las paredes confinadas utilizan vigas corridas de cimentación para las paredes, este componente consiste en vigas de hormigón armado, cuya principal finalidad según Ortega (2020) es la de permitir la transmisión de las cargas gravitacionales hacia la estructura de la cimentación disminuyendo el asentamiento de las paredes del primer nivel (p. 37).

Por su parte, los marcos rellenos utilizan zapatas aisladas cuadradas que transmiten de manera efectiva las cargas de las columnas al suelo, la dimensión de estas zapatas generalmente se encuentra en un rango entre 80 y 120 cm y deben ser fundidas a una profundidad mínima de 1 m (Ortega, 2020).

### 2.3.3 Proceso constructivo.

#### 2.3.3.1 Mampostería confinada.

Se caracteriza principalmente porque a diferencia de los marcos rellenos de mampostería, el hormigón de las columnas se vacía total o parcialmente una vez que el muro de

mampostería ha sido construido totalmente o la parte de él que corresponda y finalmente se construyen las vigas y la losa de entre piso, o techo. Las paredes se conectan a las columnas por medio del uso de arriostramientos (chicotes), por lo que pasan a funcionar como muros estructurales o diafragmas soportando cargas (Gobierno del Distrito Federal de México, 2004).



*Fig. 2.5 Construcción de un muro de mampostería confinada  
Fuente: Brzev (2007)*

#### 2.3.3.2 Marcos rellenos de mampostería.

En este sistema estructural primero se construyen las columnas y vigas, una vez finalizado ese proceso se levantan las paredes, por lo que estas no se conectan de ninguna manera al pórtico y no sirven para trabajar estructuralmente a diferencia de las vigas y columnas (Bravo & Flores, Análisis estático no lineal de paredes de ladrillo de las casas de Cuenca, 2015).



*Fig. 2.6 Construcción de un pórtico relleno de mampostería  
Fuente: Brzev (2007)*

## 2.4 Modos de falla de las paredes llenas de mampostería de ladrillo confinado

Durante décadas se han realizado investigaciones para estudiar de qué maneras pueden fallar los muros de mampostería confinada ante diferentes escenarios, en los cuales sus autores han llegado al consenso de que la principal manera de clasificar estas fallas es; si estas se producen en el plano, fuera del plano o en los miembros confinantes, con ese antecedente es posible indicar que los principales modos de falla son los siguientes:

### 2.4.1 Agrietamiento por corte.

Este agrietamiento se caracteriza por ser el modo de falla más común en estructuras de mampostería que han estado bajo el efecto de cargas sísmicas, la falla ocurre ya sea porque se destruye la interfaz mortero-ladrillo y estos se deslizan a lo largo de las juntas de mortero o porque al combinarse esfuerzos de corte con esfuerzos axiales las unidades de mampostería se agrietan a lo largo del panel. Es un tipo de falla que relaciona tres factores: la resistencia a corte en las uniones de mortero, la resistencia a tensión de los ladrillos o bloques y el esfuerzo normal y a corte (Crisafulli F. , 1997). Sin embargo, la presencia de los elementos confinantes restringe al panel agrietado, por lo que, más que un estado de falla, el agrietamiento es considerado un estado límite de servicio.

### 2.4.1.1 Tensión diagonal.

El agrietamiento o tensión diagonal se produce cuando la resistencia a compresión o tracción del mampuesto no soporta los esfuerzos que se presentan, probablemente, debido a que las piezas de mampostería no son tan fuertes como sus juntas. A pesar de que, la causa principal de este tipo de falla es la presencia de cargas sísmicas, existen otras causas como: hundimientos diferenciales en la estructura o cuando las cargas verticales ejercidas sobre el muro no se distribuyen de manera uniforme. La resistencia del muro ante este tipo de falla es una de las variables de mayor influencia en el comportamiento de una edificación de mampostería (Hernández, 2013). En la Figura 2.7 se muestra un esquema de cómo se presenta este tipo de falla.

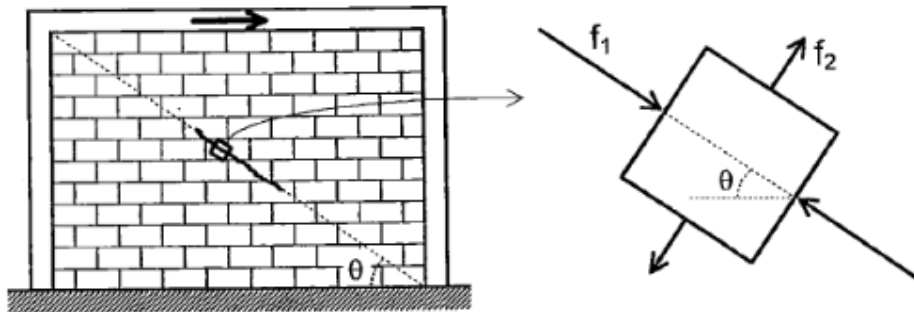


Fig. 2.7 Esfuerzo de compresión y tensión en el panel de mampostería  
Fuente: Bravo & Flores (2015)

### 2.4.1.2 Agrietamiento en las juntas de mortero.

El agrietamiento en las juntas de mortero generalmente se produce cuando la tensión de corte supera a la tensión normal, este tipo de agrietamiento se clasifica en dos tipos:

#### a. *Falla por deslizamiento.*

Cuando la adherencia entre los mampuestos y el mortero de pega no se da como debería, la consecuencia es que se formen este tipo de grietas, ocasionando que los esfuerzos de corte superen a los esfuerzos de compresión verticales, en la Figura 2.8 se muestra un esquema de cómo se presenta este tipo de falla.

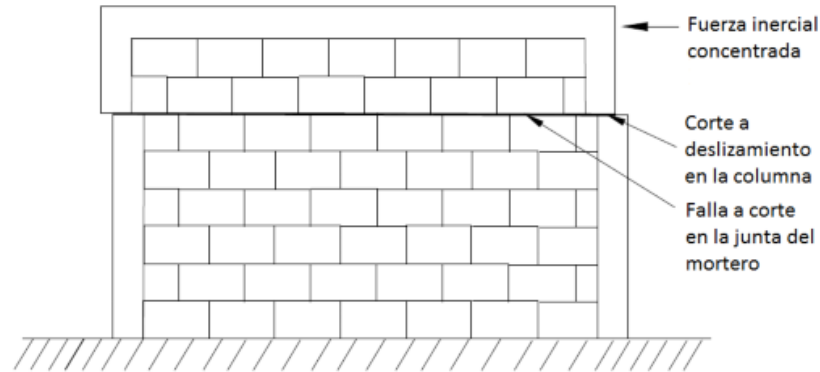


Fig. 2.8 Falla a deslizamiento en el panel de mampostería  
Fuente: Bravo & Flores (2015)

En este tipo de falla, la grieta principal en la mayoría de los casos comienza por debajo de la esquina superior en donde se concentra la carga lateral y continua de manera diagonal, hacia abajo, llegando hasta el centro del panel de mampostería. Finalmente, las grietas se propagan horizontalmente en toda la superficie y si se invierte la dirección de aplicación de la fuerza la grieta incrementa su longitud atravesando el panel (Crisafulli F. , 1997).

b. *Agrietamiento escalonado.*

La falla por agrietamiento escalonado se produce frecuentemente en los paneles de mampostería confinada debido a la presencia de fuerzas cortantes que actúan de manera lateral al plano del muro o como consecuencia de hundimientos en el terreno. Este tipo de falla es fácil de reconocer visualmente, ya que las grietas se presentan en forma de zigzag, ver Figura 2.9 (Bravo & Flores, Análisis estático no lineal de paredes de ladrillo de las casas de Cuenca, 2015).

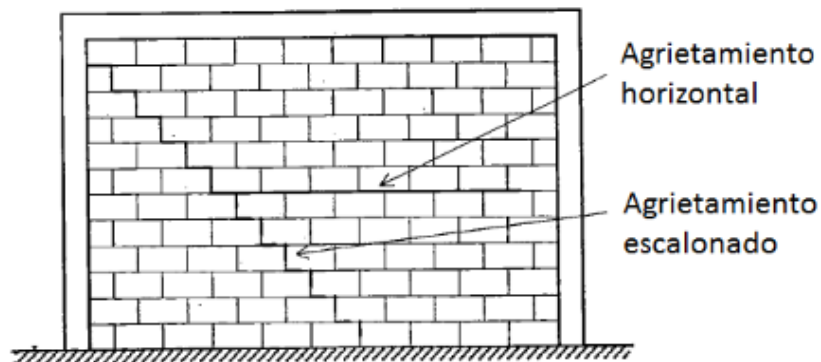


Fig. 2.9 Agrietamiento escalonado y horizontal de la pared de mampostería  
Fuente: Bravo & Flores (2015)



## 2.4.2 Falla a compresión.

Ante los esfuerzos de compresión, el panel de mampostería puede fallar de dos maneras:

### 2.4.2.1 Aplastamiento en las esquinas.

Este tipo de falla se observa con frecuencia en pórticos muy flexibles. Cuando los esfuerzos de compresión son muy elevados, la mampostería se separa de los elementos de confinamiento, originando una reducción en el área de contacto entre estos, lo que da como consecuencia que se produzca un aplastamiento en las esquinas como se puede observar en la Figura 2.10 (Crisafulli F. , Mampostería encadenada: problemas y recomendaciones para el diseño sismorresistente, 2000).

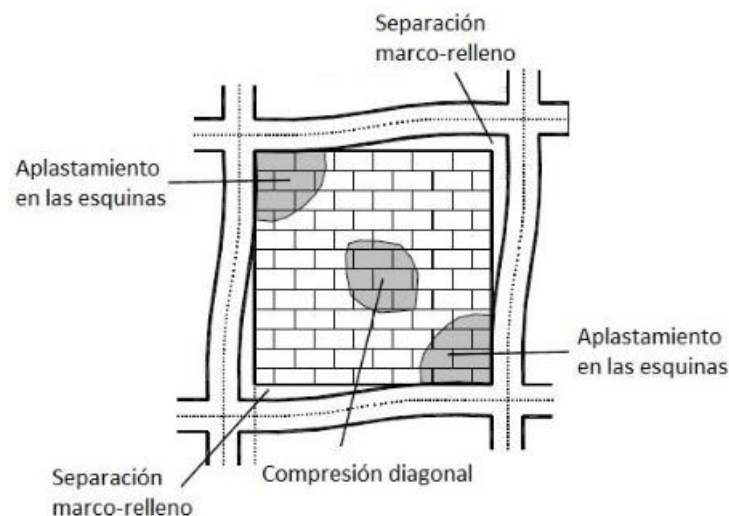


Fig. 2.10 Aplastamiento en las esquinas y compresión diagonal en el panel de mampostería  
Fuente: Bravo & Flores (2015)

### 2.4.2.2 Compresión diagonal.

Según (Ortega, 2020) la compresión diagonal se origina luego de producirse la fisuración por tensión diagonal, donde la mampostería entre dichas fisuras se comporta como prismas cargados axialmente, y la separación de las mismas se incrementa tanto hasta la falla del panel.



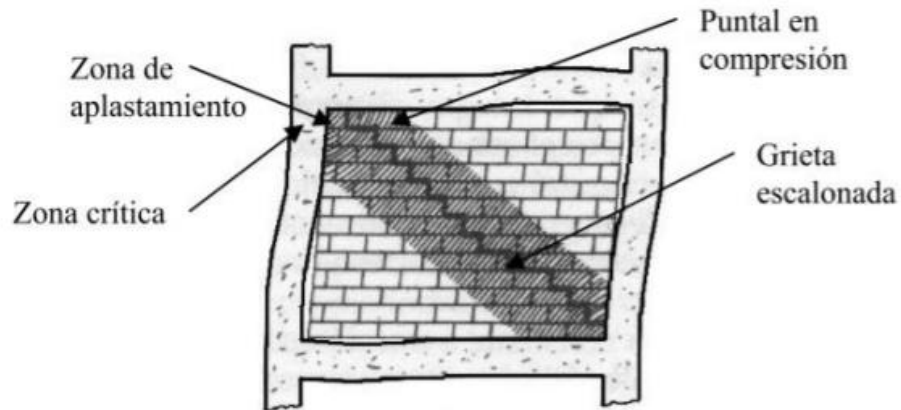


Fig. 2.11 Falla del panel de mampostería por compresión diagonal  
Fuente: Ortega (2020)

#### 2.4.3 Agrietamiento por flexión

Este tipo de agrietamiento se da cuando los esfuerzos de flexión superan a cualquier otro y las columnas de confinamiento son muy débiles para soportar los efectos, dichas grietas se presentan en las esquinas y en el centro del panel, ver Figura 2.12, pero cuando aparecen de forma vertical en la zona de compresión, se denomina “falla por flexo compresión” (Bravo & Flores, Análisis estático no lineal de paredes de ladrillo de las casas de Cuenca, 2015).

De acuerdo con, Varela *et al.* (2019) mediante evidencia experimental se ha probado que la resistencia a flexión de muros de mampostería confinada es inversamente proporcional a la relación de aspecto del panel, es decir, aumenta si dicha relación disminuye o cuando se incrementan los esfuerzos de compresión axial.

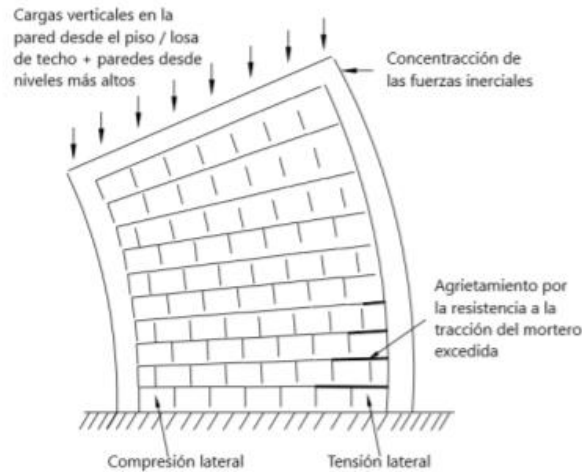


Fig. 2.12 Falla del panel de mampostería por flexión  
Fuente: Ortega (2020)

## 2.5 Efectos de las aberturas en las paredes llenas de mampostería de ladrillo confinado.

### 2.5.1 Influencia del tamaño de la abertura.

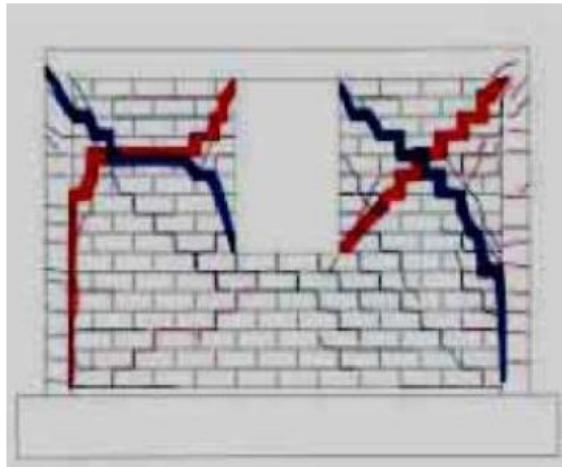
La resistencia a carga lateral de la mampostería confinada es afectada por múltiples factores, como son la presencia de aberturas en los paneles, pudiendo ser éstas tipo ventanas o puertas.

Alvarez y Alcocer (2001) en su investigación titulada “Estudio Analítico Sísmico de Muros de Mampostería Confinada con Aberturas” demostraron que, en modelos de mampostería confinada la presencia de aberturas del 25% del área total tuvo un efecto bastante nocivo tanto en la resistencia a carga lateral como la rigidez elástica, ya que también se ensayó modelos sin aberturas; y al comparar los resultados obtenidos en ambos casos se observó que la resistencia alcanzada fue de apenas del 44% y la rigidez elástica el 20% de la obtenida del modelo sin aberturas.

Flores *et al.* (2004) comprobaron que cuando hay presencia de aberturas en los muros, estos entran a un comportamiento inelástico más pronto que un muro sin aberturas, aquello se debe a que los antepechos o pretilos de las ventanas y los dinteles de las

puertas dan lugar a la formación de columnas cortas en los muros, reduciendo su longitud efectiva y aumentando la rigidez elástica de las secciones alrededor de la abertura.

Las aberturas tienen una mayor o menor influencia en el comportamiento de las paredes de acuerdo con su tamaño; si la abertura representa el 10% o menos del área neta de la pared, la resistencia ante cargas laterales no se reduce de manera significativa, caso contrario, si las aberturas tienen mayores porcentajes, en las paredes se forman grietas diagonales en las esquinas de las aberturas, tal como se aprecia en la Figura 2.13 (Bravo & Flores, 2015).



*Fig. 2.13 Grietas diagonales en los muros con aberturas  
Fuente: Bravo & Flores (2015)*

### 2.5.2 Influencia de la posición de la abertura.

La presencia de aberturas en muros de mampostería confinada afecta a la resistencia a carga lateral y a la rigidez elástica, no solo por su tamaño sino también por la posición que esta abertura ocupa en el panel, ya que eso influye en que cambie la distribución de esfuerzos en la estructura.

Los estudios experimentales han demostrado que la influencia de la posición de la abertura está ligada al tamaño de esta, mientras más grande la abertura mayor será la afectación a la resistencia a carga lateral y la rigidez elástica; especialmente si la abertura está localizada al centro del muro que en las esquinas. Esto se puede explicar porque “a

ambos lados de la abertura centrada se forman dos mochetas más esbeltas que el elemento que resulta al restar la abertura lateral, lo cual modifica la distribución de esfuerzos, participando mayormente en el primer caso las deformaciones por flexión” (Alvarez & Alcocer, 2001, p. 82).

### 2.5.3 Influencia de la relación de aspecto.

La mayoría de los estudios disponibles acerca del comportamiento de muros de albañilería confinada cuando son sometidos a cargas laterales, han considerado para sus ensayos muros cuadrados con relación  $H/L=1$ . Sin embargo, cuando esta relación de aspecto cambia, lo hace también la distribución de esfuerzos y con ello el modo de falla y la resistencia a carga lateral en el muro. En muros esbeltos es decir con  $H$  mayor que  $L$ , mientras más esbelto, influye más las deformaciones por flexión, las mismas que pueden incluso reducir el esfuerzo cortante resistente, en otras palabras “una estructura que se deforma principalmente por flexión se degrada menos que otra que se deforma por corte” (Alvarez & Alcocer, 2001, p. 107).

Se cree que en los modelos esbeltos las columnas de confinamiento tienen mayor influencia en la resistencia a corte y no tiene mucha importancia si el puntal o diagonal a compresión que se forma en el panel de relleno de mampostería se ve afectado por la existencia de la abertura; por supuesto, la resistencia del muro quedará regida por la menor entre la rigidez de las columnas y la de la mampostería (Alvarez & Alcocer, 2001).

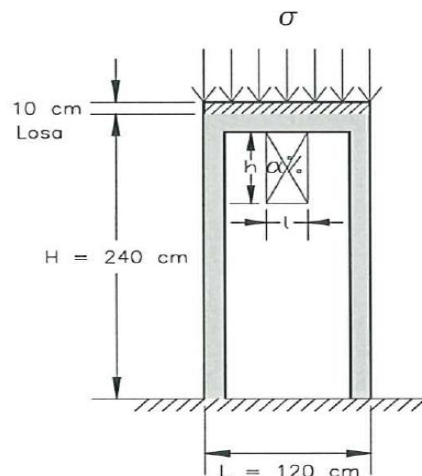


Fig. 2.14 Modelo esbelto de mampostería confinada con  $H/L=2$  y abertura central  
Fuente: Alvarez & Alcocer (2001)

En modelos de muros anchos ( $L > H$ ), si por ejemplo se tiene una configuración como la de la Figura 2.15 para ser sometido a cargas laterales, si se considera dos casos de aplicación de carga, es decir de izquierda a derecha ( $V+$ ) y de derecha a izquierda ( $V-$ ), en el segundo caso la resistencia a corte resulta más afectada, esto se puede explicar porque cuando se aplica carga  $V+$  el puntal o diagonal de compresión que se forma en el panel de mampostería se afecta menos por la abertura que cuando se le aplica una  $V-$ , ya que el puntal es interrumpido por la abertura aunque se forman otros puntales más pequeños (Alvarez & Alcocer, 2001).

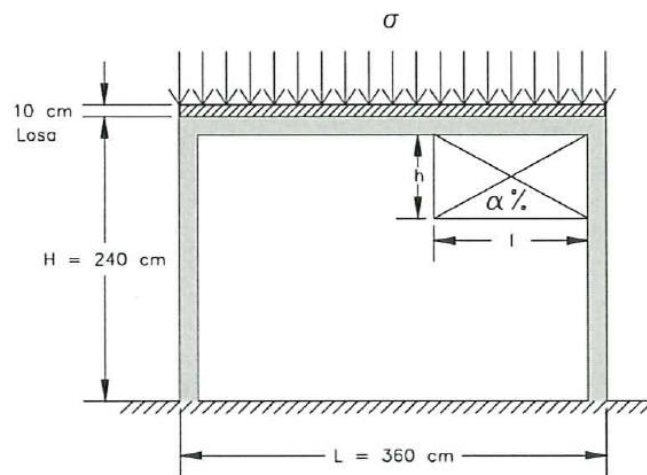


Fig. 2.15 Modelo ancho de mampostería confinada con  $H/L=0.67$  y abertura lateral  
Fuente: Alvarez & Alcocer (2001)

#### 2.5.4 Modos de falla en aberturas tipo ventanas

Asteris *et al.* (2011) en su trabajo experimental titulado “Failure modes of In-filled frames” demostraron que cuando la abertura tipo ventana se ubica sobre la diagonal del muro se inhibe los modos de falla por compresión diagonal y por agrietamiento diagonal; sin embargo, se evidenció la formación de diagonales a cada lado de la abertura y mientras más pequeña la abertura las diagonales eran más pronunciadas.

Las columnas también presentaron grietas de flexión en sus caras exteriores, debido a que la columna a tensión se fijó a la parte inferior de la pared, este tipo de grietas se evidenció tanto en las caras externas de las columnas, como en la parte superior de la abertura y en la cara inferior de la viga (Bravo & Flores, 2015).

Por su parte los autores (Kakaletsis & Karayannis, 2008) en su investigación "Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading", idealizan el comportamiento de una pared de mampostería con abertura tipo ventana definiendo las zonas donde se crean las nuevas diagonales, ver figura 2.16.

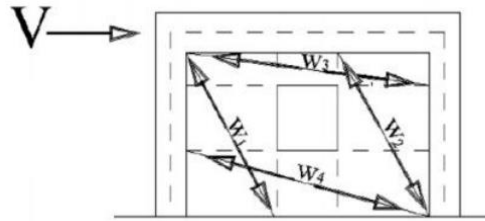


Fig. 2.16 Segmentación del comportamiento de un panel de mampostería confinada con abertura tipo ventana.

Fuente: Bravo & Flores (2015)

Las zonas descritas por las diagonales  $W_1$  y  $W_2$  a ambos lados de la abertura alcanzan la compresión diagonal o falla por tensión diagonal en el medio del segmento, mientras que las  $W_3$  y  $W_4$  encima y debajo de la abertura fallan por tensión diagonal. Dando como resultado el siguiente equilibrio de fuerzas para el caso de las aberturas tipo ventana

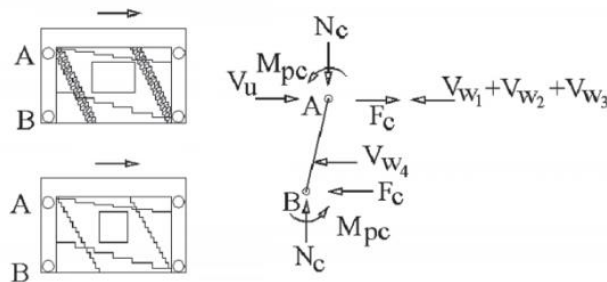


Fig. 2.17 Diagrama de fuerzas producido en un panel con abertura de ventana

Fuente: Bravo & Flores (2015)

$$V_u = V_{w1} + V_{w2} + V_{w3} + V_{w4} + 2F_c \quad (2.1)$$

Donde:

$V_{w1}$ ,  $V_{w2}$ ,  $V_{w3}$  y  $V_{w4}$ : resistencia a carga lateral de los segmentos originados según el modo de falla.

$F_c$ : resistencia a corte de las columnas.

### 2.5.5 Modos de falla en aberturas tipo puerta.

Para paredes con aberturas tipo puerta, la falla está gobernada por la formación de articulaciones plásticas en los extremos de las columnas de confinamiento, pero se presenta además aplastamiento en las esquinas a causa del balanceo del segmento de mampostería entre las columnas y la abertura tipo puerta en cualquiera que sea su posición. Al mismo tiempo se produce la falla por corte producida por el deslizamiento del segmento localizado sobre la puerta. Aparecen además grietas a flexión en las caras externas de las columnas. (Asteris *et al.*, 2011). De igual forma los autores (Kakaletsis & Karayannis, 2008) idealizan el comportamiento de la pared de mampostería con este tipo de abertura formándose únicamente tres segmentos, dos laterales y una superior. En el segmento lateral izquierdo se produce la falla de compresión diagonal o tensión diagonal, en el derecho; la falla por aplastamiento de las esquinas, mientras que en el segmento superior se origina la tensión diagonal tal como lo ilustra el siguiente diagrama de fuerzas.

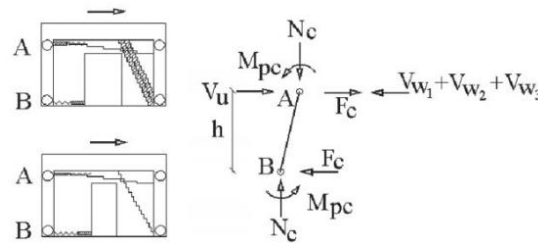


Fig. 2.18 Diagrama de fuerzas producido en un panel con abertura de puerta  
Fuente: Bravo & Flores (2015)

$$V_u = V_{w1} + V_{w2} + V_{w3} + 2F_c \quad (2.2)$$

Donde:

$V_{w1}$ ,  $V_{w2}$ , y  $V_{w3}$ : resistencia a carga lateral de los segmentos originados según el modo de falla.

$F_c$ : resistencia a corte de las columnas.



## 3 Aspectos tipológicos de las edificaciones de mampostería confinada en Cuenca

La ciudad de Cuenca se caracteriza porque en su arquitectura es muy común la incorporación de la teja y el ladrillo, los cuales fueron incorporados por los españoles, pero su uso se popularizó tiempo después por la influencia de la arquitectura francesa, transformando para siempre la estética de la ciudad de Cuenca (Tenesaca & Rasco, 2017).

### 3.1 Reseña histórica de su evolución tipológica

El desarrollo tipológico de las viviendas de la ciudad de Cuenca está marcado principalmente por la cultura Cañari, la cultura Inca, la época Colonial y la época Republicana.

#### 3.1.1 Arquitectura Cañari.

La cultura Cañari abarcó aproximadamente doce mil años de desarrollo, en el rango de los años 10000 a.C. a 1460 d.C., esta cultura se caracterizó por cuatro importantes fases culturales: Chosbi, Narrío, Tacalshapa y Cashaloma. Durante la fase cultural Chosbi, los hombres nómadas utilizaban como vivienda refugios simples elaborados a partir de pajas y ramas, tiempo después dichos hombres se vuelven nómadas surgiendo la cultura Narrío y ven la necesidad de mejores viviendas para protegerse del clima y los animales salvajes, es así que construyeron pequeñas edificaciones de piedra y barro con un piso de barro duro y posteriormente de madera con grandes tejados de paja. La fase Tacalshapa ya presentó en sus construcciones una mayor manipulación de la tierra, ya que aparecen el bahareque y el adobe en sus templos de adoración, finalmente la cultura Cashaloma se caracterizó porque sus viviendas eran principalmente de madera y piedras además de la tierra (Bermeo & León, 2016).





*Fig. 3.1 El castillo de Chosbi*

*Fuente: Blog sobre la Confederación Cañari del Ecuador (2011)*

### 3.1.2 Arquitectura Inca.

La llegada de la cultura Inca representó un proceso de transformación de la infraestructura existente, ya que se enviaron mitimaes (indígenas) desde el Cuzco, para que en Tumipamba (como se conocía Cuenca en ese entonces) se difundiera la técnica del labrado de la piedra y se asemejara lo más posible al Cuzco, ya en ésta época fue común el uso de enormes bloques de piedra barnizados con plomo, plata u oro según la jerarquía de quien usaba el espacio (Bermeo & León, 2016).



*Fig. 3.2 Ruinas arqueológicas de Pumapungo*

*Fuente: Bermeo & León (2016)*

### 3.1.3 Época colonial.

La época colonial, siglos XVI y XVII, con la llegada de los españoles a Tomebamba, quienes para empezar cambiaron el nombre del territorio a Santa Ana de los Ríos de Cuenca, evento que se llevó a cabo un 12 de abril de 1557 en el lugar que hoy se conoce como Pumapungo (Paniagua & Truhan, 2003). Alrededor del año 1573 las construcciones empezaron a adquirir la influencia de los árabes y españoles y fue a través de una ordenanza que se promulgó que todas las casas tuvieran características similares, mediante la utilización de aleros y arcos, mientras que como materiales constructivos se utilizó: cimientos de piedra, pisos de tierra o baldosas de barro cocido en la planta baja y de madera en la planta alta, muros de adobe o bahareque, una estructura de madera, esteras de carrizo con lodo y paja enlucidos con barro molido en las cubiertas y tejas de barro cocido para los tejados (Borrero, 2006).



*Fig. 3.3 Patio Central. Casa de las Posadas  
Fuente: Bermeo & León (2016)*

### 3.1.4 Época republicana.

La época republicana que se da a partir del año 1830, representó un gran auge económico debido a la exportación de sombreros de paja toquilla y la cascarilla que se realizaban en la ciudad, derivando en una importante influencia europea, concretamente francesa en la arquitectura, conociendo a este periodo como el “afrancesamiento” de la ciudad, el cual se caracterizó porque las casas coloniales de adobe y bahareque fueron

reemplazadas por casonas, iglesias, conventos, y hospitales de corte historicista y ecléctico (Bermeo & León, 2016, p. 33).

Entre los cambios que se destacaron están: el uso de canto rodado para pavimentar los patios; los corredores y habitaciones se cubrieron de ladrillo; el uso de la técnica del hierro forjado; la fundición de yesos y el uso de nuevos materiales como el mármol, la piedra y el latón. Sin embargo, fueron los terremotos que se dieron en esta época, que destruyeron edificaciones, uno de los factores que influyeron en que los habitantes cambiaran los muros de adobe por ladrillo y que en las fachadas se utilizaran la cal y el yeso (Bermeo & León, 2016).



*Fig. 3.4 Catedral de la Inmaculada Concepción  
Fuente: Tenesaca & Rasco (2017)*

Es finalmente a mediados del siglo XX que la arquitectura de la ciudad se moderniza y las construcciones pasan a manos de los ingenieros civiles, introduciendo la utilización del hormigón armado, sin dejar de lado los materiales tradicionales como los ladrillos y tejas. Son todos estos factores los que sin duda han vuelto a Cuenca una ciudad rica en cultura y con una belleza arquitectónica única que se puede apreciar aún hoy en día.

De acuerdo al Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), el 61.52% de construcciones residenciales en Azuay tienen dos pisos, seguidas de las de un piso con el 21.22% y en menor medida 3 y 4 pisos, de aquellas viviendas el 84.82% están construidas de ladrillo o bloque, pudiendo ser este: ladrillo panelón (macizo, 82.40%), tochano (hueco, 14.80%), pastelero y piso en menores proporciones (Ortega, 2020).

## 3.2 Características de la mampostería confinada antigua

### 3.2.1 Proceso constructivo.

La mampostería confinada tradicional es aquella que como se mencionó anteriormente se caracteriza por su proceso constructivo:

- Paso 1: El primer paso del proceso constructivo consiste en el armado del acero de refuerzo para las columnas, las cuales generalmente tienen una dimensión igual al espesor de las paredes, incluyendo estribos y chicotes para que las columnas se anclen al muro,
- Paso 2: Se construyen las paredes o muros en el espacio libre entre columnas.
- Paso 3: Se encofran y se vacía el hormigón de las columnas,
- Paso 4: Se arma el acero de refuerzo, encofrado y se vacía el hormigón de las vigas también conocidas como vigas de corona,
- Paso 5: Finalmente, se construye la losa de entrepiso o cubierta de ser el caso.

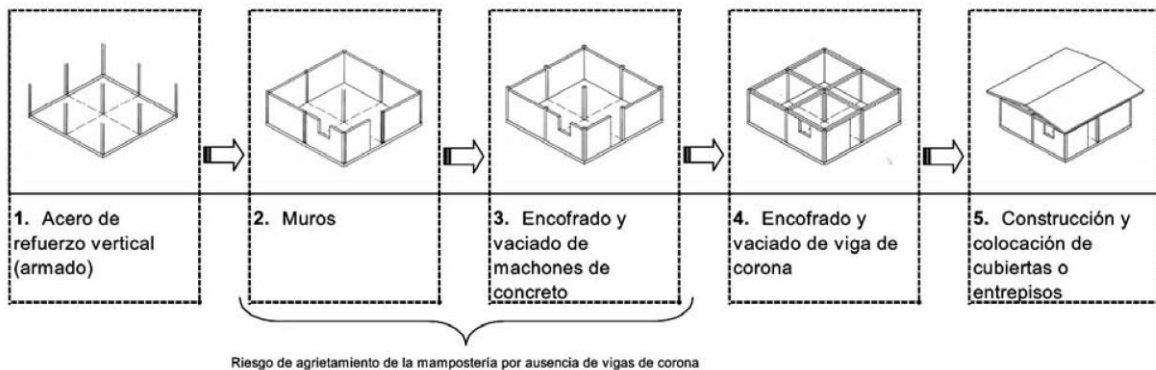


Fig. 3.5 Proceso constructivo tradicional de mampostería confinada  
Fuente: Acosta et al. (2005)

Acosta *et al.* (2005) afirman que dicho sistema constructivo presenta varias ventajas y desventajas en comparación a otros sistemas utilizados, entre las cuales se puede mencionar las siguientes:



### 3.2.2 Ventajas.

- Es una técnica que en los últimos años se ha vuelto muy conocida en el sector constructivo tanto formal como informal.
- La construcción de las columnas después de levantar las paredes garantiza el acoplamiento del marco de confinamiento con el panel de mampostería, asegurando un adecuado comportamiento sismorresistente de la edificación.

### 3.2.3 Desventajas.

- Las fuertes lluvias pueden ocasionar que las cavidades de los bloques se llenen de agua, por lo que hay que protegerlos durante el proceso constructivo de las paredes.
- Las secciones de las columnas de confinamiento son más pequeñas que en un sistema de marco relleno, por lo que en ocasiones se dificulta el vibrado del hormigón, ante lo cual muchas personas optan por utilizar concretos más fluidos o líquidos, sin una dosificación de sustento.
- Con el objetivo de reducir costos y sin un criterio profesional, en la construcción informal se ha visto la tendencia de usar diámetros más pequeños para el acero de refuerzo, especialmente el de los acoplamientos (chicotes) y estribos.

## 3.3 Características de la mampostería confinada moderna

Acosta *et al.* (2005) en su investigación titulada “Sistema de muros de mampostería estructural confinada con perfiles de acero para la vivienda de bajo costo” buscan proponer una alternativa al sistema de mampostería confinada tradicional. Proponen construir estructuras más ligeras y en menor tiempo, en las cuales el marco de confinamiento de hormigón sea sustituido con perfiles de acero de montaje rápido (de fabricantes nacionales) y colocar inmediatamente la cubierta para poder construir los muros bajo techo, los cuales trabajarán en conjunto con la estructura metálica. El levantamiento de las paredes bajo techo permitiría brindar mejores condiciones laborales para los trabajadores, lo que se traduce en un aumento del rendimiento de la mano de obra.

Las uniones viga-columna pueden realizarse por soldadura o pernos, ya que mediante ensayos se ha comprobado que ante cargas laterales los dos tipos de uniones tuvieron comportamientos similares. Para garantizar la conexión del marco de confinamiento con el muro, se conectan a las columnas y vigas conectores de corte, los que consisten en barras de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro. En las columnas los conectores se colocan cada dos hiladas, de manera que coincidan con el mortero entre bloques; en la viga en cambio estos se ubican de manera que coincidan con la unión vertical entre bloques, como se puede ver en las Figuras 3.6, 3.7 y 3.8 (Acosta *et al.*, 2005).

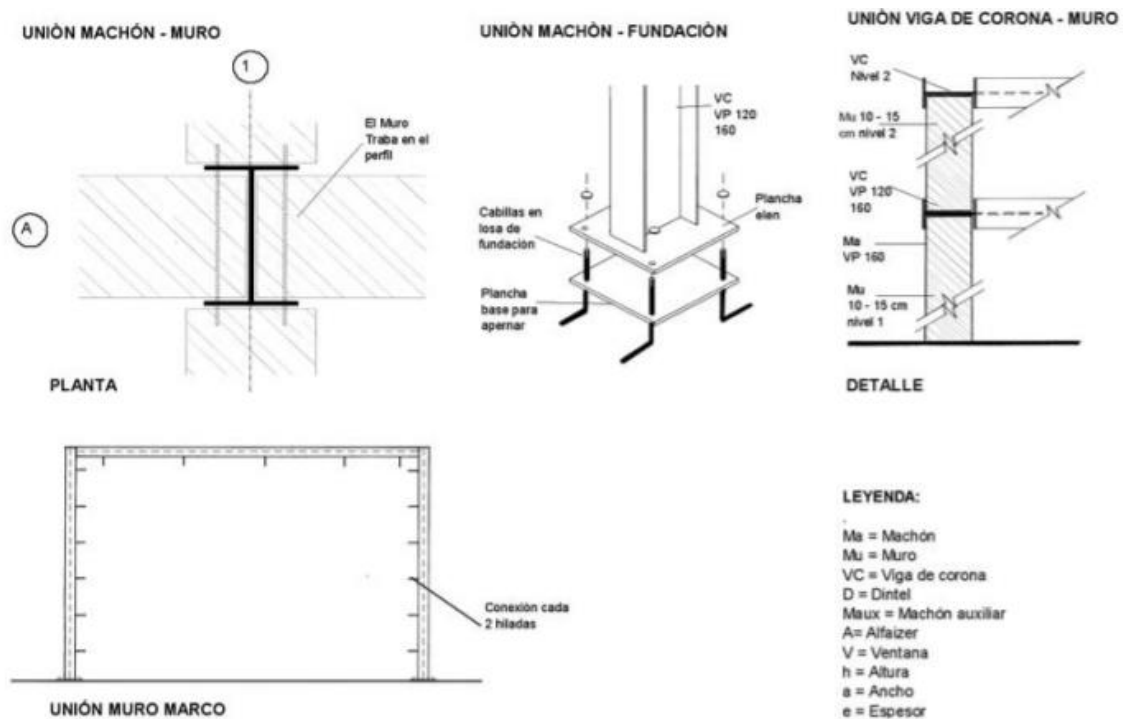


Fig. 3.6 Tipos de uniones  
Fuente: Acosta *et al.* (2005)



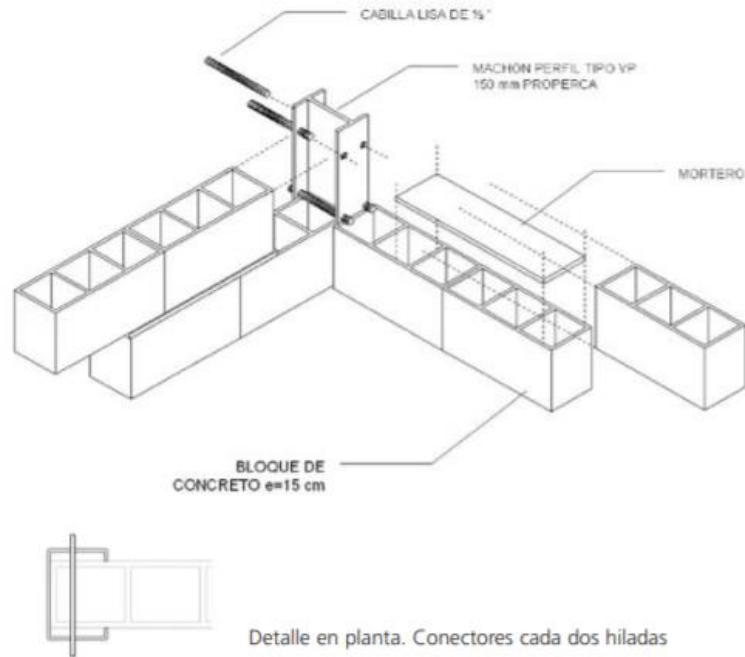
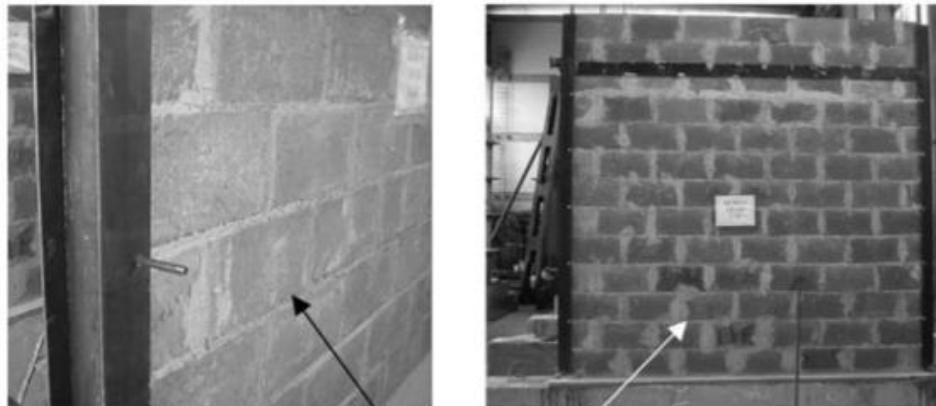


Fig. 3.7 Conexión marco-muro  
Fuente: Acosta et al. (2005)



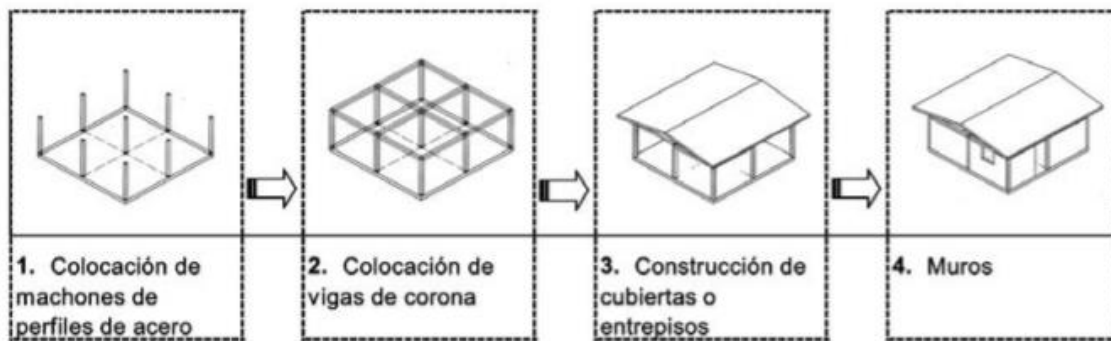
Conectores de corte cada dos hiladas

Fig. 3.8 Colocación del conector de corte en la columna  
Fuente: Acosta et al. (2005)

### 3.3.1 Proceso constructivo.

- Paso 1: El primer paso del proceso constructivo consiste en levantar las columnas de perfiles de acero.

- Paso 2: Se completa el marco de confinamiento con la colocación de las vigas de acero.
- Paso 3: Acto seguido, se colocan las cubiertas si la edificación no tendrá más pisos o caso contrario se construyen las losas de entrepiso.
- Paso 4: Por último, se levantan los paneles de mampostería.



*Fig. 3.9 Proceso constructivo propuesto para mampostería confinada*  
*Fuente: Acosta et al. (2005)*

Acosta *et al.* (2005) hacen especial énfasis en que utilizar este proceso constructivo propuesto presenta más ventajas que desventajas, las cuales son:

### 3.3.2 Ventajas.

- Los paneles de mampostería se levantan bajo techo, reduciendo las interrupciones por los cambios bruscos de clima, brindando mejores condiciones laborales y asegurando con eso un aumento de la productividad y el rendimiento de la mano de obra, como se mencionó anteriormente.
- La mayor parte de las cargas son soportadas por el marco de confinamiento, los perfiles de acero son producidos de manera industrial en fábricas, lo que permite contar con la seguridad de que han sido elaborados con un adecuado control de calidad.
- El marco se utiliza además como una guía, para que las paredes que se levantan estén correctamente niveladas.
- Al no utilizarse hormigón en las columnas y vigas, se logra que de ser necesario el marco pueda ser desmontado.





- Experimentalmente se demostró, que la utilización de perfiles metálicos en muros de albañilería confinada resultó tan confiable como la utilización de elementos de confinamiento de hormigón armado.

### 3.3.3 Desventajas.

- Para construir con perfiles de acero es necesario contar con personal altamente capacitado en ese campo, para asegurar una correcta realización de las soldaduras en las conexiones viga-columna.
- Se debe tener en cuenta que en función de los perfiles que se utilicen el costo de puesta en obra puede subir o bajar, por lo que se debe realizar un estudio detallado de costos previo a la construcción para que este no supere al de los elementos de concreto.
- Adicionalmente, se debe llevar a cabo un riguroso control de calidad durante la construcción de los paneles de mampostería, para asegurar el correcto acoplamiento de estos con el marco de confinamiento.

La propuesta de utilización de este sistema constructivo surge con la intención de construir con calidad desde el inicio y garantizar un producto con una larga vida útil y de mantenimiento sencillo.

## 4 Descripción del corpus de estudio

### 4.1 Metodología

Para estudiar el efecto de las aberturas sobre la curva *pushover* de las paredes de ladrillo; se analizan corpus de trabajos experimentales y de simulación numérica con elementos finitos sobre paredes confinadas y marcos rellenos de mampostería, que incluyan los datos y formulaciones necesarios para el análisis del comportamiento sísmico estático no lineal. Haciendo una diferenciación entre los tipos de ladrillos que conforman estas paredes ya sean ladrillos sólidos (panelón) o ladrillos huecos (tochano), que asemejen a las características constructivas de Cuenca descritas anteriormente.



## 4.2 Criterios de selección de trabajos y estrategias de búsqueda

La selección de las fuentes bibliográficas se basa en la influencia de las aberturas en el desempeño de muros de mampostería, en términos de rigidez elástica y de capacidad de resistencia ante carga lateral, distinguiendo entre paredes con unidades de ladrillo sólidos (panelón) y paredes con unidades de ladrillo huecos (tochano).

De acuerdo con la revisión detallada de los estudios publicados por diferentes autores, se han agrupado las investigaciones sobre muros de mampostería con aberturas, de la siguiente manera:



Tabla 4.1. Estudios publicados por diferentes autores.

Investigaciones	Autor y año	Inv. Experimentales (Lab.)	Inv. Numéricas (Software)	Mamp. confinada	Marcos de hg. Armados	Ladrillos Sólidos	Ladrillos Huecos	Propiedades de los materiales	Confinamiento en aberturas
Estudio analítico sobre el comportamiento sísmico de muros de mampostería confinada con aberturas	Alcocer, 2001	-	Sbeta	x	-	x	-	x	Sin
Lateral Stiffness of Brick Masonry Infilled Planed Frames	P. G. Asteris, 2003	-	Lenguaje de programación FORTRAN	-	x	x	-	x	Sin
BEHAVIOR OF CONFINED MASONRY SHEAR WALLS WITH LARGE OPENINGS	Yáñez, Astroza, Holmberg, Oscar Ogaz, 2004	x	-	x	-	-	x	x	Con
Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading	Kakaletsis, Karayannis, 2008	x	-	-	x	-	x	x	Sin
Effect of openings on lateral stiffness and strength of confined masonry walls	S. Eshghi and B. Sarrafi, 2014		Diana	x		x			Con



Influence of Openings, With and Without Confinement, on Cyclic Response of Infilled R-C Frames — An Experimental Study	Sigmund, Penava, 2014	x	-	-	x	-	x	x	Sin y con
Experimental and analytical investigation of lateral load response of confined masonry walls	Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, Metwaly, 2014	x	ABAQUS	x	-	x	-	x	Sin
Numerically based proposals for the stiffness and strength of masonry infills with openings in reinforced concrete frames	Akhoundi, Lourenco, Vasconses, 2016	x	Diana	-	x	-	x	x	x
Contribution of RC columns and masonry wall to the shear resistance of masonry infilled RC frames containing different in size window and door openings	Penava, Sarhosis, Kožar, Guljas, 2018	-	Atena 2D Eng	x	-	-	x	x	Sin y con
An Experimental Study on the In-Plane Behavior of Unreinforced Masonry Walls with an Opening Strengthened Using Steel Fiber Reinforced Concrete Overlays	Kamrava, Najafgholipour, Dehghan, 2020	x	-	x	-	x	-	-	Con



Multi-strut macro-model for masonry infilled frames with openings	Mohammad Yekrangnia, Panagiotis G. Asteris, 2020		ABAQUS	-	x	x	-	-	Sin
Empirical Model for lateral Stiffness and Strength of Masonry y-Infilled RC Frames Considering the Influence e of Openings	Basha, Surendran, Kaushik, 2020	x	-	-	x	x	-	x	Sin
Experimental and numerical analyses of unreinforced masonry components and building wall	Choudhury, Milani, Kaushik, 2020	x	ABAQUS	-	-	x	-	x	Sin
Element Modeling of Masonry Wall With Opening Under Lateral Force.	Darmayadi & Rusli, 2018	x	ABAQUS	x	-	x	-	x	Sin

Leyenda:

X: Posee la característica del enunciado.

Con o Sin: Significa que la abertura posee o no confinamiento.

Para determinar la influencia de las aberturas, respecto a la resistencia a carga lateral de los muros de mampostería, ante la aplicación de cargas laterales, es importante considerar la ubicación de estas.

La ubicación de las aberturas y su influencia en el comportamiento de los muros se manejará a través del término “descentramiento”, el cual hace referencia a su posición relativa con respecto a: el eje del centro longitudinal del muro para las puertas y ventanas, y con respecto al eje del centro vertical para las ventanas.

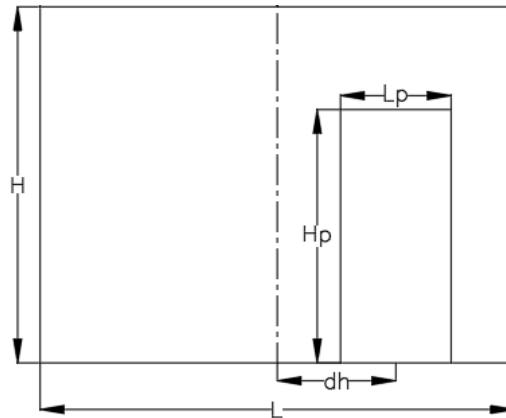


Fig. 4.1. Descentramiento horizontal abertura tipo puerta

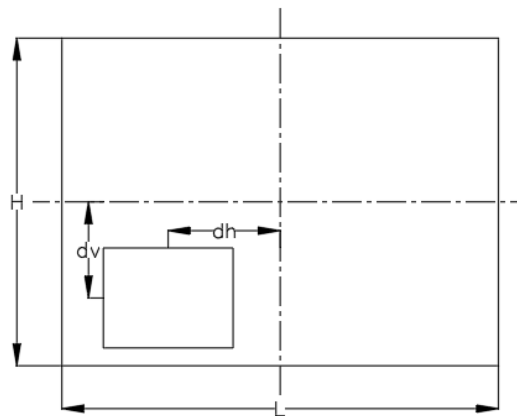


Fig. 4.2 Descentramiento vertical y horizontal abertura tipo ventana

Donde:

- L: longitud del muro
- H: altura del muro



- Lp: ancho de la puerta
- Hp: altura de la puerta
- dh: descentramiento horizontal
- dv: descentramiento vertical

Luego de analizar estos términos y en base al objetivo fundamental de la tesis de analizar la influencia de las aberturas en el comportamiento sísmico de las paredes de ladrillos confinadas o marcos rellenos y teniendo en cuenta las características de las construcciones de mampostería de Cuenca descritas en el capítulo 3, los trabajos seleccionados para desarrollar la investigación son los siguientes.

*Tabla 4.2 Investigaciones seleccionadas para el desarrollo de la investigación*

<b>Tipo de abertura</b>	<b>Tamaño de la abertura</b>	<b>Localización de la abertura</b>
Kakaletsi et al., 2008		
Penava et al., 2014		Penava et al., 2014
	Akhoundi et al., 2016	
Okail et al., 2014		
	Alcocer et al., 2001	Alcocer et al., 2001
	Darmayadi et al., 2018	

Las investigaciones tienen como puntos en común el estudio de la influencia de las aberturas en muros de mampostería, ya sea analizando el tipo, tamaño o localización de las mismas y todas cuentan con las propiedades de los materiales que rigen el estudio, lo que nos permite la aplicación de las formulaciones para un análisis más detallado. La presencia en los artículos de las curvas de capacidad de los paneles es fundamental para cumplir los objetivos de la tesis.

### 4.3 Descripción y resumen de los trabajos que plantean fórmulas

El corpus de investigaciones analizadas describe gran variedad de formulaciones para los distintos límites del comportamiento del panel. (Tomazevic & Klemenc, Seismic Behaviour

of Confined Masonry Walls, 1997) plantea la existencia de tres puntos característicos que describen el comportamiento idealizado de la mampostería.

- ✓ Límite elástico: Punto determinado por las coordenadas de  $V_{cr}$  y  $d_{cr}$ , esto se determina con la primera aparición de grietas ya que esto produce un cambio de rigidez.
- ✓ Resistencia a carga lateral máxima: Punto determinado por las coordenadas de  $V_{máx}$  y  $d_{Vmáx}$ , esto determina la máxima carga que se puede aplicar sobre la pared.
- ✓ Estado final: Definido por la carga lateral  $V_{dmáx}$  para el máximo desplazamiento alcanzado justo antes del colapso de la pared  $d_{máx}$ .

Cada coordenada de estos puntos está descrita por una formulación que en dependencia de las propiedades mecánicas de los materiales que forman el panel describen el comportamiento del mismo.

Con el desarrollo de la búsqueda bibliográfica se constataron diversas técnicas de modelización para el análisis de paredes de mampostería confinada con diferentes grados de precisión como lo plantea (Lang., Crisafulli, & Torrisci., 2014), pudiendose agrupar de la siguiente forma:

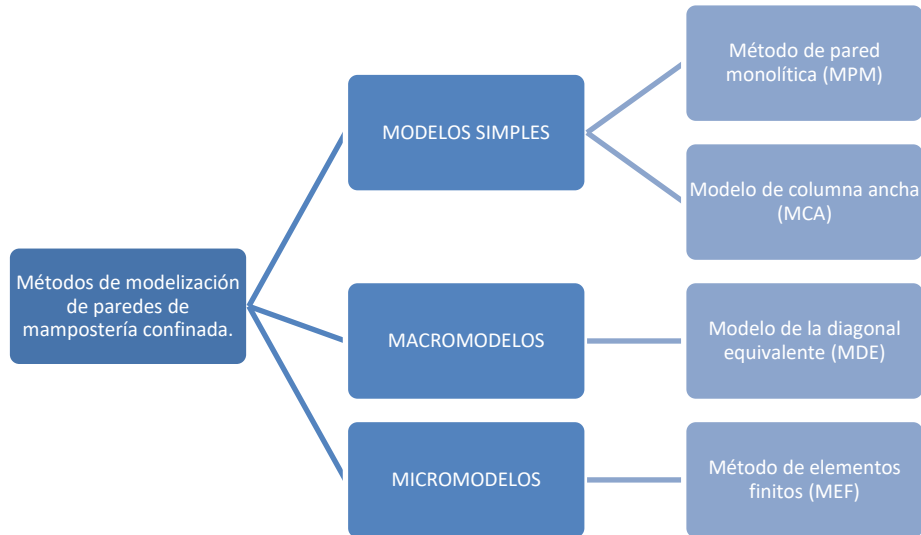


Fig. 4.3 Métodos de Modelización de las paredes de mampostería confinada.

Los Modelos Simples se emplean para evaluar el diseño de una pared de mampostería confinada al determinar su resistencia a carga lateral y rigidez elástica. Además de





comprobar los resultados de modelizaciones más complejas. El Modelo de Pared Monolítica agrupado dentro de este método, tiene en cuenta que no se origina agrietamiento de la interfaz y, por lo que, se considera que dicha pared puede ser modelada por una sección rectangular de mampostería (con espesor  $t$  y longitud  $L$ ). En el modelo el valor de la rigidez elástica  $K$  es obtenido a través de un análisis estructural sencillo, el valor  $K$  de rigidez elástica no considera que el módulo de elasticidad del hormigón armado y la mampostería son distintos. Por lo que el método asume que la columna incrementa su sección para representar la conversión del módulo de elasticidad.

Modelo de Columna ancha (MCA) es un método de modelado alternativo y simple que representa la pared con dos nodos, pues considera que posee una sección monolítica. Las vigas rígidas también se emplean como elementos auxiliares para modelar las estructuras con muros y aberturas para puertas y ventanas. Dicho método analiza muros de cortante, al simplificar a un modelo con elementos tipo barras interconectadas por zonas rígidas, se tienen en cuenta además las propiedades transformadas de la sección transversal del muro dígame inercia, área, factor de cortante, entre otros y se asignan a una barra que se coloca en el centroide del mismo. La zona de la viga ubicada dentro del ancho del muro se consideran zonas rígidas. La hipótesis del comportamiento monolítico, asumida por el Modelo de Columna Ancha, es válida para simular la respuesta elástica en la etapa inicial (Taveras, 2008).

Los Macromodelos constituyen el método más simplificado y el que cuenta con la mayor exactitud para simular estructuras grandes como edificios con muros de mampostería confinada. Los mismos emplean, en dependencia del grado de dificultad de la formulación, una combinación de elementos tipo resortes axiales, cortantes y de flexión. El macromodelo más sencillo es el que representa el panel de mampostería como una diagonal equivalente, llamado Modelo diagonal equivalente presentado por Polyakov y Holmes en la década de 1960 (Lang., Crisafulli, & Torrisi., 2014). En el mismo el panel está representado por una diagonal equivalente de compresión y el marco que lo confina modelado con elementos viga. Dicho modelo puede calcular aproximadamente las fuerzas axiales en el marco de hormigón armado y la rigidez elástica de las paredes de mampostería confinada, pero, no puede predecir los efectos locales, dígame momentos y fuerzas cortantes tanto del marco, como los esfuerzos en la mampostería (Lang., Crisafulli, & Torrisi., 2014).



Los Micromodelos permiten modelar los componentes de la estructura en su nivel o escala, lo que se traduce en un ensamblaje de elementos que simulan tanto las unidades como las juntas. La distribución de los elementos finitos (EF), tiene que estar relacionada con la disposición real de los componentes y el comportamiento de cada elemento debe someterse a leyes que describan las características mecánicas tanto de las unidades y juntas como la interacción entre ambas (Mira Díaz, 2012). Una valiosa herramienta para la evaluación de estructuras de mampostería confinada puede ser el micromodelado, pues ofrece el medio más exacto y complejo de capturar el comportamiento de los sistemas de mampostería, pero requiere un alto costo computacional para procesarlos.

Con el fin de desarrollar la presente investigación se escogerán las formulaciones que describan el comportamiento de la rigidez elástica y la capacidad de resistencia del panel ante cargas laterales, ya sean de un método u otro. Se tomarán en cuenta aquellas formulaciones que mejor describan la influencia de las aberturas, ya sea en función del tipo, tamaño o localización de las mismas, y que se puedan aplicar a partir de los datos obtenidos de las investigaciones analizadas.

Entre las normas que abordan el tema se destaca la Norma Argentina para el diseño sismoresistente (Inpres-Cirsoc 103, 1983):

$$V_{m\acute{a}x} = (0.6v_m + 0.3\sigma_v)A_w \quad (4.3.1)$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$  : resistencia a carga lateral máxima del panel de mampostería

$v_m$  : resistencia a compresión diagonal de la mampostería

$\sigma_v$  : esfuerzo a compresión o carga vertical a la que se encuentre sometido el panel

$A_w$  : Área transversal del muro, incluido las columnas.

Como lo recoge el Código de construcciones mexicana y lo planteado por (Flores & Alcocer, 1995), la resistencia a carga lateral en el punto de agrietamiento será el menor valor de la ecuación 4.3.2,



$$V_{agr} = \min(0.5v_m + 0.3\sigma_v ; 1.5v_m) A_w \quad (4.3.2)$$

Donde:

$V_{agr}$  : resistencia a carga lateral en el punto de agrietamiento

$v_m$  : resistencia a compresión diagonal de la mampostería

$\sigma_v$  : esfuerzo a compresión o carga vertical a la que se encuentre sometido el panel

$A_w$  : Área transversal del muro, incluido las columnas.

Luego el valor de resistencia a carga lateral máximo será el dado por la expresión:

$$V_{m\acute{a}x} = (1 + x)V_{agr} \quad (4.3.3)$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$  : resistencia a carga lateral máxima del panel de mampostería

$x$ : será el factor 0,25 planteado por (FLores L & ALcocer S., 2001)

La rigidez elástica teórica del muro de mampostería se determinará como la de una columna ancha en voladizo e incluye la rigidez por flexión y cortante, dicha expresión forma parte de la teoría de la mecánica de los materiales (FLores L & ALcocer S., 2001). En la presente investigación se consideraron muros con relación de lados  $a/b = 1$  (cuadrados) para simular las características constructivas de Cuenca, por lo que el muro se asume que trabaja solo a cortante despreciando el aporte del acero y trabajando con la sección transformada convirtiendo el concreto en mampostería y omitiendo el acero de refuerzo.

$$K_e = \left( \frac{H^3}{\beta E_m I_w} + \frac{KH}{G_m A_w} \right)^{-1} \quad (4.3.4)$$

Donde:



$H$ : altura efectiva del muro (cm)

$K$ : factor correctivo,  $K= 1.2$  para muros de sección rectangular y  $K= 1$  para muros que tienen en sus extremos castillos que actúan como patines. Se consideró  $K= 1$

$\beta$ : factor que depende de las condiciones de apoyo en los extremos del muro  $\beta = 3$  para muros en voladizo y  $\beta = 12$  para muros doblemente empotrados. Se consideró  $\beta = 3$

$E_m$  : módulo de elasticidad de la mampostería

$G_m$  : módulo de rigidez al corte

$A_w$  : área efectiva la corte

$I_w$  : momento de inercia de la sección transformada  $I_w = I_m + I_a + I_c$

$I_m$  : momento de inercia de la mampostería  $I_m = \frac{tL^3}{12}$  (4.3.3), siendo  $t$  el espesor del muro

y  $L$  su longitud

$I_a$  : contribución del acero al momento de inercia

$I_c$  : contribución del concreto al momento de inercia

$$I_a = n_s \left[ A_{s1} d_{s1}^2 + A_{s2} d_{s2}^2 \right] \quad (4.3.5)$$

$$I_c = n_c t_c \left[ \frac{b_1^3}{12} + \frac{b_2^3}{12} + b_1 d_{c1}^2 + b_2 d_{c2}^2 \right] \quad (4.3.6)$$

Donde,  $A_{s1}$  y  $A_{s2}$  son el área de acero castillo, las distancias entre el centroide del muro y el centroide del acero son  $d_{s1}$  y  $d_{s2}$ ,  $b_1$  y  $b_2$  y  $t_c$  son el ancho y el espesor de las paredes de las columnas.

$n_s$  y  $n_c$  son las relaciones entre los módulos de elasticidad de la mampostería con el acero de refuerzo  $E_s$ , y con el concreto que forma las columnas  $E_c$

$$n_s = \frac{E_s}{E_m} \text{ y } n_c = \frac{E_c}{E_m} \quad (4.3.7)$$

Otra ecuación que describe la resistencia a carga lateral máxima es la recogida por la norma chilena, Instituto Nacional de Normalización (1997), con los datos anteriormente descritos:



$$V_{m\acute{a}x} = \min(0.45v_m + 0.3\sigma_v ; 1.5v_m)A_w \quad (4.3.8)$$

Donde:

$V_{m\acute{a}x}$  : resistencia a carga lateral máxima del panel de mampostería

$v_m$  : resistencia a compresión diagonal de la mampostería

$\sigma_v$  : esfuerzo a compresión o carga vertical a la que se encuentre sometido el panel

$A_w$  : rea transversal del muro, incluido las columnas.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS) (1998):

$$V_{m\acute{a}x} = (0.5\lambda v_m + 0.23\sigma_v)A_w \quad (4.3.9)$$

$V_{m\acute{a}x}$  : resistencia a carga lateral máxima del panel de mampostería

$v_m$  : resistencia a compresión diagonal de la mampostería

$\sigma_v$  : esfuerzo a compresión o carga vertical a la que se encuentre sometido el panel

$A_w$  : rea transversal del muro, incluido las columnas.

Donde la relación de aspecto,  $\lambda$  debera satisfacer la condición siguiente, fuera de este rango no se recomienda aplicar:

$$\frac{1}{3} \leq \lambda \leq 1 \quad (4.3.10)$$

Otra forma de determinar la resistencia a carga lateral y rigidez elástica es a través de factores de reducción, a partir de la rigidez elástica del marco relleno o de la pared confinada, mediante la siguiente relación:

$$K_{rf} = K_m R_f \quad (4.3.11)$$



Donde:

$K_{rf}$  : Rigidez elástica del marco relleno con abertura

$K_m$  : Rigidez elástica del marco relleno sin abertura

$R_f$  : Factor reductor

$$V_{rf} = V_m R_f \quad (4.3.12)$$

$V_{rf}$  : Resistencia a carga lateral del marco relleno con abertura

$V_m$  : Resistencia a carga lateral del marco relleno sin abertura

$R_f$  : Factor reductor

Así lo plantean (Mohammadi & Nikfar, 2013) en su investigación en la que analizan la influencia de varios factores de reducción de la rigidez elástica propuestos por: (Tasnimi & Mohebkah, 2011), (Al-Chaar G. & Issa M A, 2003), (New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE), 2006), (Durrani & Luo, 1994), (Mondal & Jain, 2008) y (Asteris P. G., 2003) . En la investigación arriban a la conclusión que el factor con mayor precisión es el adoptado por (Al-Chaar G. & Issa M A, 2003) con un error menor al 7%. Por esta razón es el autor que se considera en la presente investigación. En dicha investigación definen un factor reductor que asume la presencia de abertura en los marcos rellenos, el mismo lo describe la siguiente ecuación:

$$R_f = 0.6 \left( \frac{A_o}{A_p} \right)^2 - 1.6 \left( \frac{A_o}{A_p} \right) + 1 \quad (4.3.13)$$

Donde:

$A_o$  : Área de la abertura

$A_p$  : Área del panel

Los autores señalan que para aberturas superiores al 60% del área del panel relleno, el efecto del relleno debe desestimarse.

(Riahi Z. , 2007) En su estudio, titulado “Backbone model for confined masonry walls for performance-based seismic design” sugirió una expresión que evidencia el comportamiento de las paredes de mampostería confinada ante el aumento de las aberturas, a partir de una relación lineal con pendiente negativa,

$$\frac{V_{cr}(\beta \neq 0)}{V_{cr}} = -2.2\beta + 1 \quad (4.3.14)$$

Donde:

$\beta$ : relación entre el área de la abertura y el área de la pared.

$V_{cr}(\beta \neq 0)$ : resistencia de agrietamiento a carga lateral de la pared confinada con abertura

$V_{cr}$ : resistencia de agrietamiento a carga lateral de la pared confinada sin abertura

(Ranjbaran F. & M., 2012) en su investigación propone dos formulaciones para determinar tanto la rigidez elástica inicial del marco de mampostería como para determinar la resistencia a la carga lateral del mismo ambas considerando la presencia de aberturas centrales.

$$K = \frac{1}{ab^z \left( \frac{H_w^3}{3cEI_w} + \frac{dH_w}{GA_w} \right)} \quad (4.3.15)$$

$$Q_u = 1.4a \left( f_t A_w \frac{L_w}{H_w} \right)^b \left( 1 + \frac{f_a}{f_t} \right)^c d^z \quad (4.3.16)$$

Donde:

$K$ : Rigidez lateral del marco relleno con aberturas

$Q_u$ : Resistencia a carga lateral del marco relleno con aberturas



$$z = \left( \frac{L_o}{L_w} \right) \left( \frac{H_o}{H_w} \right)$$

$E$  : módulo de elasticidad de la mampostería

$G$  : módulo de rigidez al corte

$A_w$  : área efectiva la corte

$I_w$  : momento de inercia

$H_w$  y  $L_w$ , largo y ancho de la pared de mampostería y,  $H_o$  y  $L_o$  dimensiones de la abertura.

$f_t$  y  $f_a$ : son la resistencia a la tensión del material de la pared y la tensión de compresión creada por la en la pared por la sobrecarga.

$a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$ : son valores que dependen de especificaciones de la pared definida en la siguiente tabla.

Tabla 4.3 Valores numéricos de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  y  $d$  (4.3.12) y (4.3.13)  
Fuente: (Ranjbaran F. & M., 2012)

Parameter	Equation number and the wall thickness (in cm)															
	(1) 22, 35	(2) 22, 35	(3) 22	(3) 35	(4) 22	(4) 35	(5) 22	(5) 35	(5*) 22	(5*) 35	(6) 22	(6) 35	(7) 22	(7) 35	(8) 22	(8) 35
a	1.98	0.95	636	143	505	410	0.76	0.74	0.97	0.95	52339	60567	11.11	11.3	29.46	32.6
b	1.77	237	0.43	0.55	0.45	0.49	—	—	—	—	0.98	0.95	0.064	0.067	-5.55	-5.64
c	—	2.79	0.55	0.83	0.79	0.88	—	—	—	—	18.64	53.58	1.23	1.28	-4.31	-7.83
d	—	1.65	—	—	0.33	0.28	—	—	—	—	—	—	0.91	0.91	4.88	8.45
R <sup>2</sup>	0.97	0.91	0.94	0.98	0.86	0.92	0.85	0.93	0.85	0.88	0.98	0.98	0.95	0.89	0.91	0.90

\*Related to wall with opening.

Como se puede apreciar estas fórmulas tienen la restricción que solo se pueden aplicar para paredes con espesores de 22 y 35 cm.

Por su parte, (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) en su investigación propone dos ecuaciones para determinar la rigidez elástica inicial ( $K_{co}$ ) y la resistencia a carga lateral del marco relleno ( $F_{co}$ ). Considerando aberturas centrales para la rigidez elástica y





aberturas centrales o descentradas para la resistencia a carga lateral. El subíndice “ $co$ ” hace referencia a “central opening”.

$$K_{co} = \left[ (K_{fill} - K_{bare})(1 - A)^3 \right] + K_{bare} \quad (4.3.17)$$

$$F_{co} = \left[ (F_{fill} - F_{bare})(1.1395(1 - A))^{4.3} \right] + F_{bare} \quad (4.3.18)$$

Donde:

$K_{co}$  : Rigidez lateral del marco relleno con aberturas

$F_{co}$  : Resistencia a la carga lateral del marco relleno con aberturas

$K_{fill}$  : Rigidez lateral del marco relleno sólido

$K_{bare}$  : Rigidez lateral del marco desnudo

$F_{fill}$  : Resistencia a la carga lateral del marco relleno sólido

$F_{bare}$  : Resistencia lateral del inicial del marco de concreto reforzado

$A$ : Relación entre el área de la abertura y el área del relleno

Estas fórmulas propuestas de rigidez elástica y resistencia a carga lateral para marcos rellenos con aberturas, funcionan correctamente para aberturas menores al 100% del área total de las paredes, si es que se quieren utilizar para hallar la rigidez elástica y resistencia a carga lateral para marcos desnudos, es decir considerando un 100% del área total de las paredes tienden a dar valores absurdos. Siendo así necesario aplicar las siguientes formulaciones. Además se tiene la necesidad de obtener estos valores como se explica más adelante en el capítulo 5, en el apartado 5.2.

$$F_{bare} = \frac{4M_p}{h'} \quad (4.3.19)$$

$$M_p = \delta \left( \frac{f'_c}{\gamma} \right) Z_p \quad (4.3.20)$$



$$Z_p = \frac{bh^2}{4} \quad (4.3.21)$$

Donde:

$K_{fill}$  : Rigidez inicial del marco relleno sólido

$K_{bare}$  : Rigidez inicial del marco desnudo

$F_{fill}$  : Resistencia a la carga lateral del marco relleno sólido

$F_{bare}$  : Resistencia lateral del inicial del marco de concreto reforzado

$A$ : Relación entre el área de la abertura y el área del relleno

$M_p$ : Momento plástico máximo desarrollado por el marco de hormigón armado en el momento del colapso considerando que se producen articulaciones plásticas en la base de las columnas y en la unión viga-columna al ser las vigas más fuertes que las columnas, llegando a tener un mecanismo de falla de las columnas (“sway mechanism”) (Dubey & Kute, 2013)

$\delta$ : factor que afecta el valor del esfuerzo a compresión del concreto ( $f'_c$ ),  $\delta=0.67$  cuando el concreto ha sido ensayado en probetas cúbicas y  $\delta=0.85$  cuando ha sido ensayado en probetas cilíndricas. (Billai & Menon, 2005)

$\gamma$ : Factor de seguridad parcial del concreto (Dubey & Kute, 2013)

$h'$ : altura libre de las columnas del marco.

$Z_p$  : módulo de sección plástico de las columnas

$b$  : base de la sección transversal de las columnas

$h$  : altura de la sección transversal de las columnas

El valor de  $K_{bare}$  puede ser obtenido alternativamente a través del Método de Muto (Análisis sísmico aproximado de edificios. Cap. 6). Este método es empleado para resolver de manera aproximada los marcos de edificios compuestos por vigas y columnas ortogonales, los que presentan carga lateral originadas tanto por sismo como por viento. El mismo considera la deformación por flexión de las barras, por lo que los resultados que se obtienen son mucho más exactos que los calculados mediante otros métodos como el Método de Portal y el de Voladizo. A partir de este método se determina la rigidez elástica del marco de hormigón armado, que conforma el panel. El método es válido sólo cuando  $K' \geq 0.2$ .

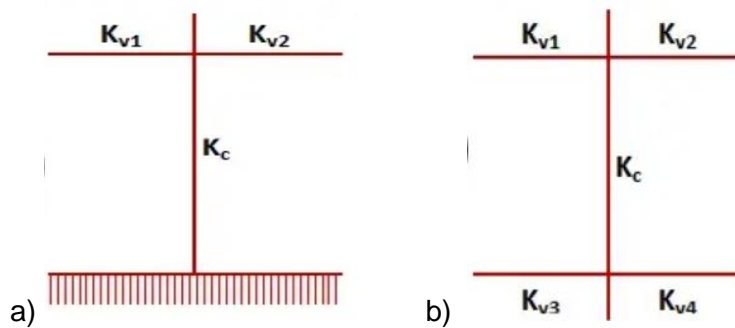


Fig. 4.4 Esquema de referencia del Método de Muto. a) Columna del marco 1<sup>er</sup> nivel, b) Columna del marco cualquier nivel.

Fuente: (Análisis sísmico aproximado de edificios. Cap. 6)

$$I_v = I_c = \frac{bh^3}{12} \quad (4.3.22)$$

$$K_{bare} = K_{p\acute{o}rtico} \quad (4.3.23)$$

$$K' = \frac{\sum K_v}{K_c} \quad (4.3.24)$$

$$a) \ a = \frac{0.5 + K'}{2 + K'} \quad \text{y} \quad b) \ a = \frac{K'}{2 + K'} \quad (4.3.25)$$

$$K_{col} = \frac{12EI}{H^3} a \quad (4.3.26)$$

$$K_{p\acute{o}rtico} = K_{bare} = \sum K_{col} \quad (4.3.27)$$



Donde:

$K_{bare} = K_{p\acute{o}rtico}$  : Rigidez elástica inicial del marco desnudo de hormigón armado

$E$ : Módulo de elasticidad de la columna

$I$  : Inercia de las secciones de hormigón

$l$  : luz entre vigas o columnas

$b$  y  $h$ : largo y ancho de las secciones de viga y columna del marco

$K_v$  y  $K_c$ : relaciones para vigas y columnas

$K'$ : relación para el marco

$a$ : Coeficiente que contempla el grado de empotramiento que tiene las columnas en sus extremos. El valor "a" está comprendido entre 0 y 1. El caso a) de la ecuación (4.3.25) es para determinar el valor "a" cuando la columna es del primer nivel y se encuentra empotrada a la base y el caso b) cuando la columna se encuentra en cualquier otro nivel.

$K_{col}$ : rigideces de cada columna afectados por el factor "a"

(Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) propone además formulaciones para determinar la resistencia ante carga lateral y rigidez elástica del marco relleno de mampostería:

$$F_{fill} = f'_m t \frac{\pi}{2} \sqrt[4]{\frac{4E_c I_c h_i}{E_i t}} \quad (4.3.28)$$

$$K_{fill} = \frac{E_{inf} f_w w_{fill} t}{\sqrt{l^2 + h^2}} \cos^2(\theta). \quad (4.3.29)$$

Donde:

$f'_m$  : resistencia a la compresión de la mampostería

$E_c$  e  $I_c$  : módulo de elasticidad y momento de inercia de la columna



$t$ : espesor de la mampostería

$h'$ : altura del marco entre las dos líneas centrales de las vigas

$l'$ : longitud del marco entre las dos líneas centrales de las columnas

$h_i$ : altura del pórtico relleno de mampostería

$E_i = E_{inf}$ : módulo de elasticidad de la mampostería

$\theta$ : ángulo entre la diagonal de la mampostería y la horizontal, en grados

$w_{fill}$ : ancho del puntal equivalente

Para la aplicación de estas fórmulas se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- En el caso de existir abertura en el panel al  $A_w$  área transversal del muro se le sustrajo la dimensión de la abertura.
- En el caso del módulo de elasticidad de la mampostería se consideraron las siguientes situaciones dependiendo de la resistencia a la compresión de la mampostería  $f_m$ , tal como lo recoge la (Norma Técnica E.070 Albañilería, 2006):
  - Para ladrillos de arcilla:  $E_m = 500f'_m$
  - Para ladrillos de concreto:  $E_m = 700f'_m$
- En el caso de módulo de rigidez al corte  $G_m$ , se asumió equivalente a 0,4 veces el valor de  $E_m$ , (Norma Técnica E.070 Albañilería, 2006).
- Para el caso del módulo de elasticidad del concreto  $E_c$  se contó con las siguientes relaciones definidas en (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (ACIS), 1998):
  - $E_c = 12500\sqrt{f'_c}$ , (kg/cm<sup>2</sup>), valor medio sin considerar el origen del agregado
  - $E_c = 14000\sqrt{f'_c}$ , (kg/cm<sup>2</sup>), Concreto Clase-1 con agregados grueso calizo
  - $E_c = 11000\sqrt{f'_c}$ , (kg/cm<sup>2</sup>), Concreto Clase-1 con agregados grueso basáltico
  - $E_c = 8000\sqrt{f'_c}$ , (kg/cm<sup>2</sup>), Concreto Clase-2



- El ACI 318 también plantea la siguiente fórmula para determinar el módulo de elasticidad del concreto  $E_c$ :

- $E_c = 4700\sqrt{f'_c}$ , (MPa) (ACI 318, 2019)

Escogiendo la formulación planteada por el ACI 318.

- En el caso de que la investigación no aporte la tensión a fluencia del acero se asume un  $f_y = 2530 \text{ kg/cm}^2$  para un acero al carbono de tipo normal.
- Para el caso en que las investigaciones no aporten el valor de  $v_m$  o resistencia a compresión diagonal de la mampostería, se asume el valor de  $v_m = \sqrt{f'_m}$ , donde  $f'_m$  es el esfuerzo a compresión de la mampostería dado en  $\text{kg/cm}^2$ . (Alcocer, Hernández, & Sandoval, 2013).

#### 4.4 Descripción y resumen de los trabajos de simulación experimental

En este subcapítulo se realizará una breve descripción de los ensayos experimentales de los trabajos seleccionados para el análisis numérico.

(Kakaletsis & Karayannis, 2008) Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading.

El autor investiga la influencia de los rellenos de mampostería con aberturas en el desempeño sísmico de los marcos de concreto reforzados, a partir de la forma de la abertura y la resistencia a la compresión del relleno. Para ello se prueban siete especímenes de marco de un solo piso a escala 1/3, bajo carga horizontal cíclica. Se consideraron dos tipos de rellenos de mampostería que tenían una resistencia a la compresión diferente pero una resistencia al corte, casi idéntica. Los resultados de la investigación se traducen en que los ladrillos huecos fuertes mostraron un mejor rendimiento que los débiles, por tanto, se consideran para el análisis solo las muestras con rellenos fuertes, que serían IS, para marco relleno de mampostería sin abertura, B para el marco desnudo, IWO2 para el marco relleno con abertura tipo ventana del 10% de

la pared y el IDO2 para el caso del marco relleno con abertura tipo puerta del 20% de la pared. Las propiedades del marco de confinamiento se ilustran a continuación,

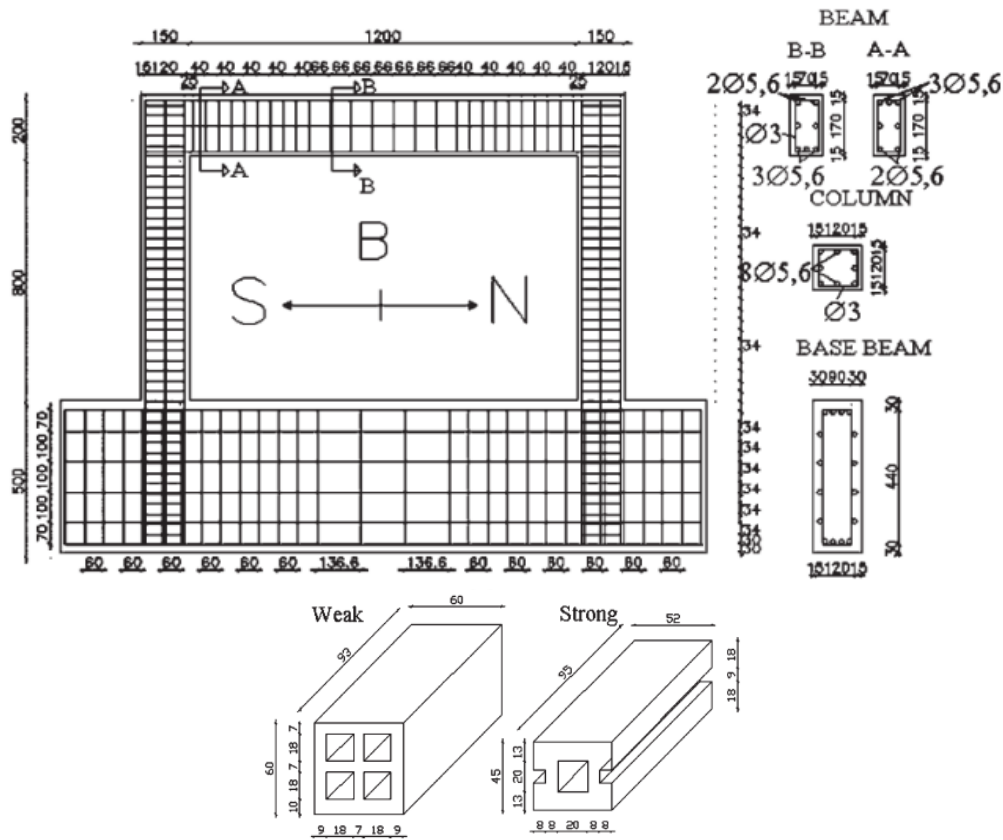


Fig. 4.5 Características del marco de mampostería y ladrillos huecos empleados  
Fuente: (Kakaletsis & Karayannis, 2008)

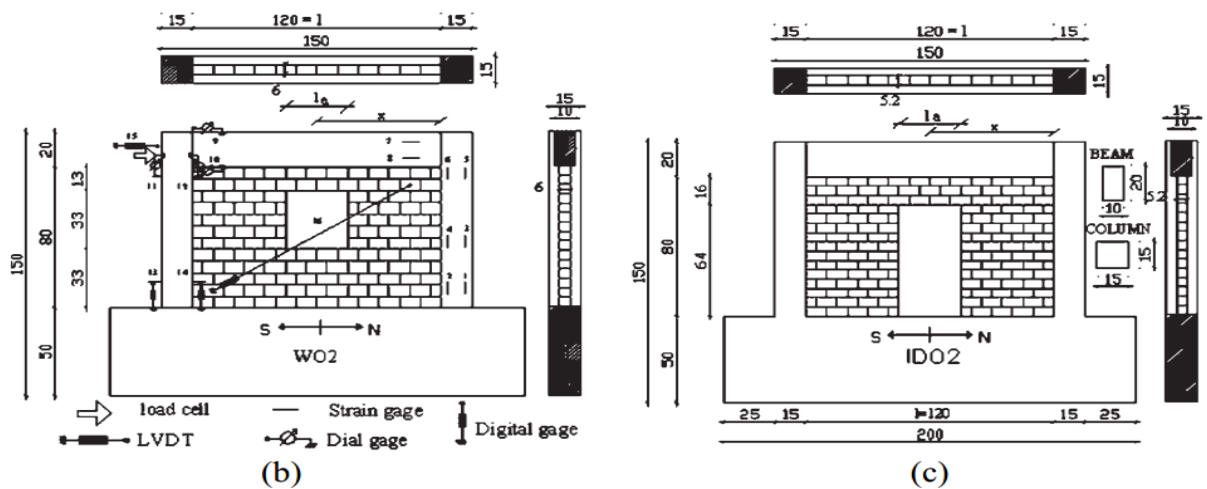


Fig. 4.6 Marcos de hormigón rellenos de mampostería.  
Fuente: (Kakaletsis & Karayannis, 2008)

Material Properties		Masonry type	
		Weak t = 6 cm	Strong t = 5.2 cm
Mortar			
Compressive Strength	$f_m$	1.53	1.75
Brick Units			
Compressive Strength	$f_{bc}$	3.10	26.4
Masonry			
Compressive Strength $\perp$ to holes	$f_c$	2.63	15.18
Elastic Modulus $\perp$ to holes	E	660.66	2837.14
Compressive strength // to holes	$f_{c90}$	5.11	17.68
Elastic Modulus // to holes	$E_{90}$	670.30	540.19
Friction Coefficient	$\mu$ (rads)	0.770	0.957
Shear Modulus	G	259.90	351.37

*Fig. 4.7 Propiedades mecánicas de los materiales empleados (MPa)*  
*Fuente: (Kakaletsis & Karayannis, 2008)*

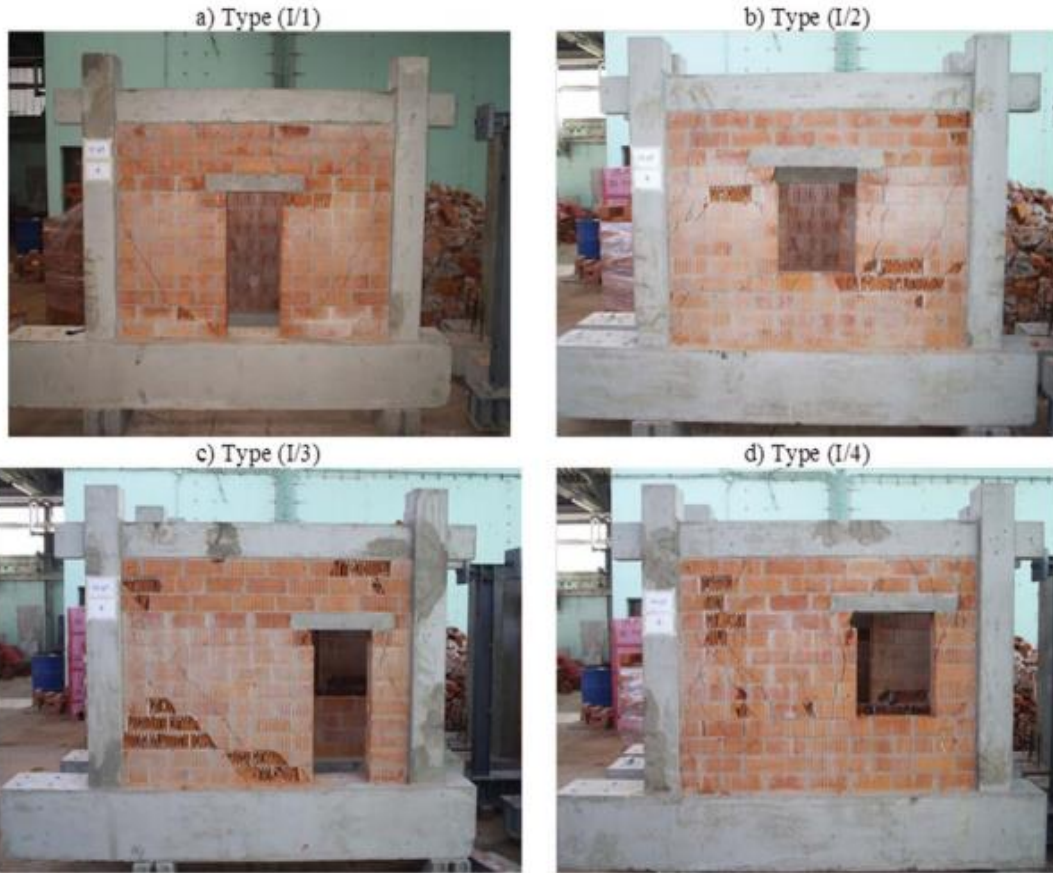
(Sigmund & Penava, 2014) Influence of Openings, With and Without Confinement, on Cyclic Response of Infilled R-C Frames - An Experimental Study.

La investigación presenta los informes experimentales de un estudio sobre marcos de hormigón armado rellenos de mampostería con aberturas, la misma se realizó con unidades de arcilla hueca. Los modelos fueron construidos a escala 1:2,5 y se rellenaron con muros de mampostería. Las aberturas de puertas y ventanas de tamaño medio, aproximadamente el 14 y el 13% respectivamente, se ubicaron de manera céntrica y excéntrica y se ejecutaron con y sin columnas de confinamiento a su alrededor. Los especímenes se probaron bajo carga lateral cíclica horizontal constante y cuasiestática hasta la falla del relleno. Para el análisis de esta investigación se escogieron solo los modelos sin confinar las aberturas, el Grupo I las muestras de la 1 a la 4.



Group	Specimen		Specimen type Specimen	Opening type, area and dimensions	Opening position	Opening Confinement
	No.	Mark				
I	1	Type (I/1)		Door $l_o/b_o = 0.35/0.90$ m $A_o = 0.32$ m <sup>2</sup>	Centric $e_o = 0.90$ m $e_o = l_i/2$	Without confining elements
	2	Type (I/2)		Window $l_o/b_o = 50.0/60.0$ cm $A_o = 0.30$ m <sup>2</sup>	Centric $e_o = 0.90$ m $P = 0.40$ m	
	3	Type (I/3)		Door $l_o/b_o = 0.35/0.90$ m $A_o = 0.32$ m <sup>2</sup>	Eccentric $e_o = 0.44$ m $e_o = h_i/5 + l_o/2$	
	4	Type (I/4)		Window $l_o/b_o = 50.0/60.0$ cm $A_o = 0.30$ m <sup>2</sup>	Eccentric $e_o = 0.51$ m $P = 0.40$ m	

Fig. 4.8 Descripción de los modelos seleccionados  
Fuente: (Sigmund & Penava, 2014)



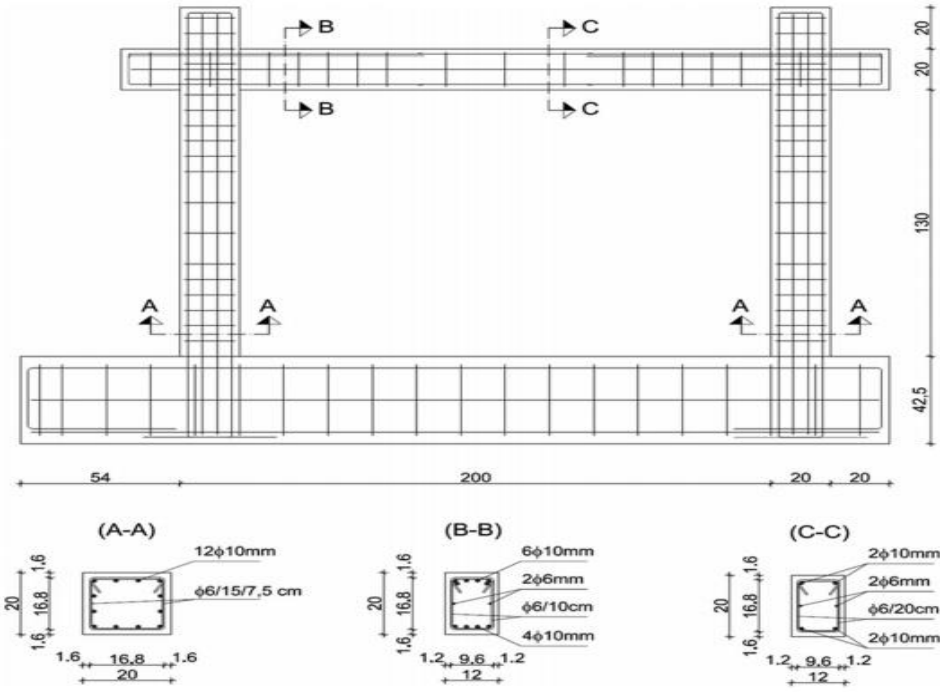


Fig. 4.9 Muestras ensayadas y características del marco de hormigón armado  
Fuente: (Sigmund & Penava, 2014)

Material	Property description	Symbol	Value	Units
Hollow-clay-tile	Normalized compressive strength in vertical direction	$f_b$	15.9	N/mm <sup>2</sup>
	Normalized compressive strength in horizontal direction	$f_{bh}$	2.6	N/mm <sup>2</sup>
General purpose mortar	Compressive strength	$f_m$	5.15	N/mm <sup>2</sup>
	Bending-tensile strength	$f_{mt}$	1.27	N/mm <sup>2</sup>
Masonry	Characteristic compressive strength	$f_k$	2.7	N/mm <sup>2</sup>
	Elastic modulus	E	3900	N/mm <sup>2</sup>
	Ultimate strain	$\epsilon_u$	0.57	%
	Characteristic initial shear strength	$f_{vk0}$	0.35	N/mm <sup>2</sup>
	Characteristic friction coefficient	$tg\alpha_k$	0.24	-
	Frame concrete of the individual specimens	Characteristic compressive strength of the concrete cubes	$f_{ck}$	51.5 35.0 44.0 48.5 41.5 41.0 43.5 48.5 35.0 31.5
Longitudinal and transversal reinforcement	Characteristic yield strength	$f_{yk}$	594	N/mm <sup>2</sup>
	Characteristic ultimate strength	$f_{uk}$	699	N/mm <sup>2</sup>
	Elastic modulus	$E_s$	206957	N/mm <sup>2</sup>
Tie-column concrete	Characteristic compressive strength	$f_{ck.cube}$	30	N/mm <sup>2</sup>

Fig. 4.10 Propiedades de los materiales empleados  
Fuente: (Sigmund & Penava, 2014)

Como se puede apreciar la resistencia característica a la compresión del concreto se encuentra dada para cada muestra y a partir de probetas en forma de cubos, para el trabajo con esta investigación se procedió a promediar los resultados y a emplear el factor  $\delta = 0,67$  en la fórmula de  $M_p$ , planteada en (Dubey & Kute, 2013).

#### 4.5 Descripción y resumen de los trabajos de simulación numérica

(Alvarez & Alcocer, 2001) Monografía CIMNE IS-46

El estudio desarrollado se basa en la formulación de un modelo analítico a través del código SBETA que permita reproducir el comportamiento de la mampostería confinada sujeta a cargas laterales monótonas aplicadas en su plano. La investigación se basa en el modelo M0 de (Aguilar & Meli, 1996) analizándose el panel sin aberturas y luego la variación de los resultados al introducirle una abertura y su cambio de posición, para diferentes configuraciones de muros. Las piezas de ladrillos empleadas en el estudio fueron tabiques rojos recocidos de arcilla sólidos y las propiedades de los elementos se ilustran a continuación:

Parámetro	Mampostería	Concreto
Resistencia a compresión	$f_m^c = 36 \text{ kg/cm}^2$	$f_c^c = 260 \text{ kg/cm}^2$
Resistencia a tensión	$f_m^t = 3.6^{*1} \text{ kg/cm}^2$	$f_c^t = 26^{*1} \text{ kg/cm}^2$
Módulo de elasticidad inicial	$E_m = 21,600^{*2} \text{ kg/cm}^2$	$E_c = 225,743^{*3} \text{ kg/cm}^2$
Relación de Poisson	$\nu_m = 0.25$	$\nu_c = 0.20$
Módulo de ablandamiento en compresión	$E_{dm} = -2,700^{*4} \text{ kg/cm}^2$	$E_{dc} = -28,218^{*5} \text{ kg/cm}^2$
Módulo de ablandamiento en tensión	Ec. 2.15	Ec. 2.15
Factor de resistencia mínima a compresión	$c_m = 0.2$	$c_c = 0.8$
Factor de retención de cortante	$r_{gm} = 0.2$	$r_{gc} = 0.2$
Factor de reducción de resistencia a tensión	Ec. 2.21.a	Ec. 2.21.a
Energía de fractura	Ec. 2.16	Ec. 2.16

<sup>\*1</sup> La resistencia a tensión se supuso igual a un décimo de la resistencia a compresión

<sup>\*2</sup> Se consideró  $E_m = 600f_m^c$  (DDF, 1995)

<sup>\*3</sup> Se consideró  $E_c = 14,000\sqrt{f_c^c}$  para concreto clase I (DDF, 1996)

<sup>\*4</sup> Se supuso  $E_{dm} = -0.125E_m$  (Cervenka y Pakl, 1995)

<sup>\*5</sup> Se supuso  $E_{dc} = -0.125E_c$  (Cervenka y Pakl, 1995)

Fig. 4.11 Propiedades de los materiales pétreos  
Fuente: (Alvarez & Alcocer, 2001)

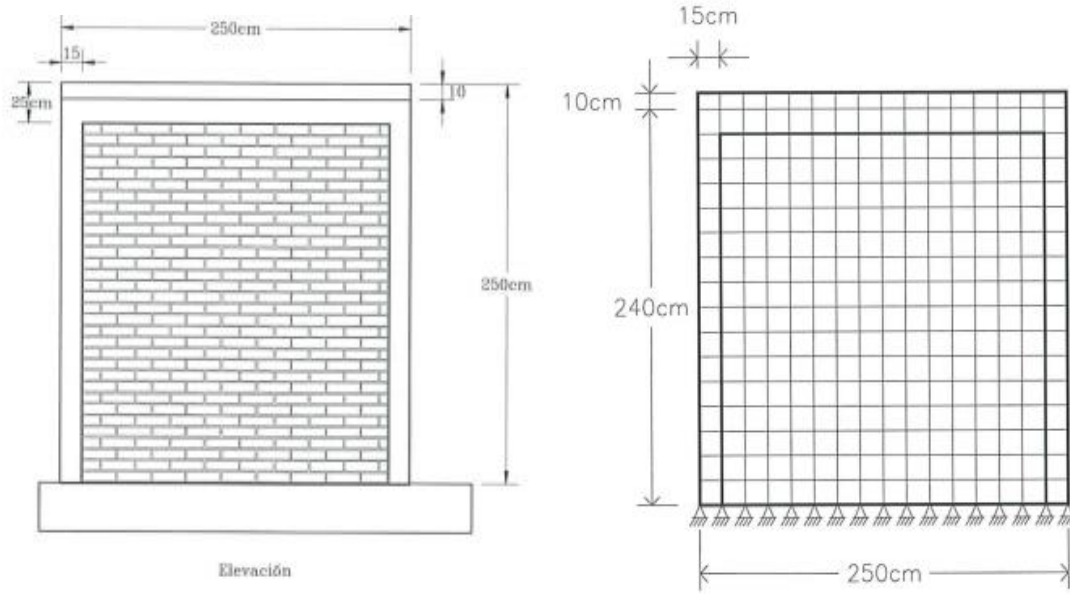


Fig. 4.12 Geometría y dimensiones del modelo Mo y configuración en el programa SBETA modelo de elementos finitos.  
Fuente: (Alvarez & Alcocer, 2001)

MODELO	CASO		$\sigma$ , kg/cm <sup>2</sup>	l x h, cm	$\alpha$ , % <sup>1</sup>	b <sup>2</sup>
	→ 3	← 4				
	maSa3	-----	5	-	0	1
	maSb	-----	5	90 x 60	6.25	0.75
	maSc	-----	5	135 x 90	14.06	0.625
	maSd	maSc	5	90 x 60	6.25	0.75
	maSf	maSg	5	135 x 90	14.06	0.625
	mc0a5	-----	0	-	0	1
	mc5a	-----	5	-	0	1
	mc0b	-----	0	30 x 30	1.56	0.875
	mc0c	-----	0	60 x 60	6.25	0.75
	mc0d	-----	0	90 x 90	14.06	0.625
	mc5b	-----	5	30 x 30	1.56	0.875
	mc5c	-----	5	60 x 60	6.25	0.75
	mc5d	-----	5	90 x 90	14.06	0.625
	mc5e	-----	5	120 x 120	25.0	0.50
	mc0e	mc0f	0	30 x 30	1.56	0.875
	mc0g	mc0h	0	60 x 60	6.25	0.75
	mc0i	mc0j	0	90 x 90	14.06	0.625
	mc5f	mc5g	5	30 x 30	1.56	0.875
	mc5h	mc5i	5	60 x 60	6.25	0.75
	mc5j	mc5k	5	90 x 90	14.06	0.625
	mc5l	mc5m	5	120 x 120	25.0	0.50

Fig. 4.13 Geometría de los modelos analizados  
Fuente: (Alvarez & Alcocer, 2001)



Este estudio no mostraba las gráficas de esfuerzo deformación que describen el comportamiento de las paredes por lo que su análisis se realiza en función de los datos y la aplicación de las formulaciones aportadas por los autores.

(Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) Experimental and analytical investigation of lateral load response of confined masonry walls

En la Investigación los autores realizan una comparación entre las simulaciones experimentales y numéricas esta última empleando el método de elementos finitos con el programa ABAQUS. Mediante esta herramienta analizan la influencia del refuerzo longitudinal y transversal de las columnas de confinamiento en la capacidad de carga lateral máxima y el desplazamiento de los paneles estudiados. Estudian además la influencia de las aberturas, así como la posición de las mismas y el efecto de las cargas axiales sobre el comportamiento de los paneles. La relación de aspectos de las muestras analizadas es de (h/l) es 1 y las muestras que se tendrán en cuenta para esta investigación llevan por nombre CLY-CTRL, para el muro de mampostería confinada sin aberturas, CLY-P-20W, CLY-P-29W, CLY-P-55W y CLY-P-75W, para las muestras con aberturas tipo ventana de diferentes porcentajes: 7, 10, 19 y 26% respectivamente, de igual forma para las aberturas tipo puertas CLY-P-20D, CLY-P-29D, CLY-P-55D y CLY-P-75D con diferentes porcentajes: 17, 24, 46 y 63% respectivamente.

Las paredes de mampostería confinada fueron construidas sobre zapatas de concreto reforzados empleando ladrillos de arcilla sólidos con dimensiones nominales de 250 x 120 x 60mm, las columnas y vigas de concreto reforzado tienen secciones transversales de 120 x 250mm. Las resistencias de los materiales consideradas fueron para el caso del hormigón la resistencia a la compresión característica ( $f'_c$ ) de 25 MPa, para el caso del acero la resistencia máxima a la tracción ( $f_u$ ) de 520 MPa y un límite elástico nominal ( $f_y$ ) de 360 MPa y la mampostería en compresión con una resistencia ( $f'_m$ ) de 4.5 MPa. Se aplicó una presión vertical uniforme de 0,5 MPa y un incremento de presión horizontal de 20 MPa.

Los modelos adoptados se ilustran a continuación:



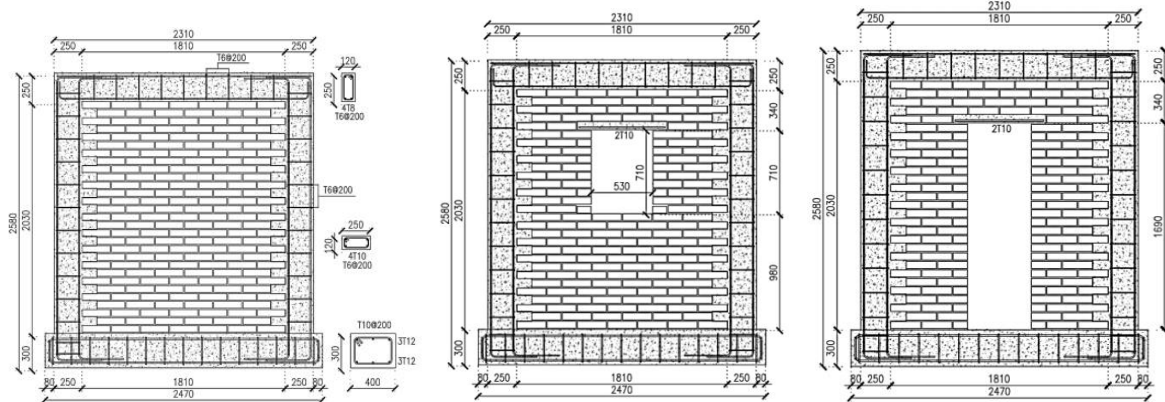


Fig. 4.14 Características geométricas de la pared rellena (CLY-S-STRL) y con aberturas en forma ventanas (CLY-PW) Y de puertas (CLY-PD) analizadas  
Fuente: (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.)

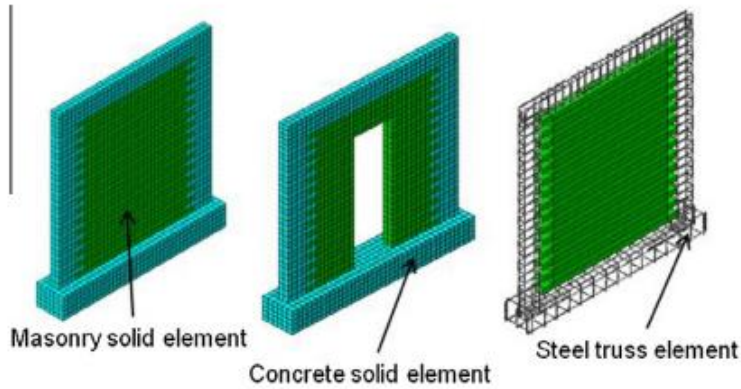


Fig. 4.15 Modelo de elementos finitos desarrollado.  
Fuente: (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.)

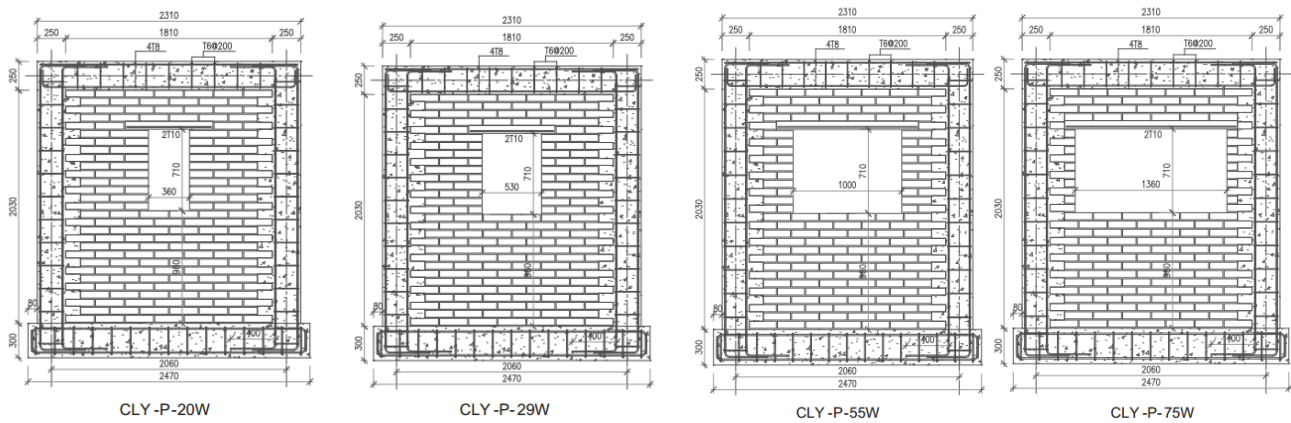


Fig. 4.16 Configuración para apertura en forma de ventanas analizadas  
Fuente: (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.)

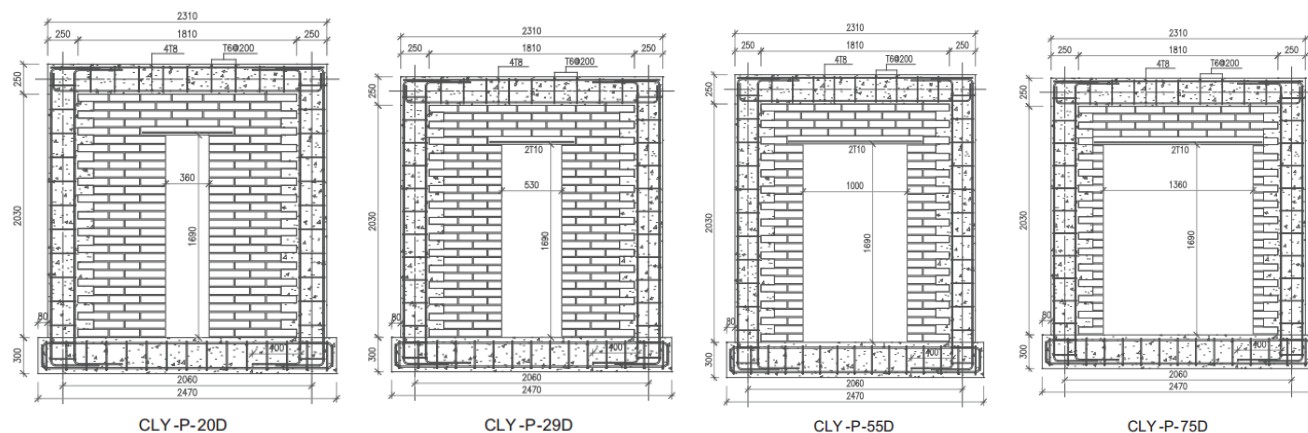


Fig. 4.17 Configuración para abertura en forma de ventanas analizados  
Fuente: (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.)

(Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) Numerically based proposals for the stiffness and strength of masonry infills with openings in reinforced concrete frames.

Los autores investigan el efecto de las aberturas en el comportamiento en el plano de la mampostería confinada en marcos de hormigón armado, se presenta un estudio paramétrico basado en la calibración del modelo a través de pruebas experimentales. Se investigan dos tipos de aberturas: aberturas de ventanas centrales y diferentes combinaciones de aberturas de puertas y ventanas según las tipologías de los países del sur de Europa. El estudio de basa en las investigaciones experimentales de (Pereira, 2013) y se complementa con la puesta en práctica de un modelo de elementos finitos utilizando el programa informático comercial DIANA, con el fin de determinar el comportamiento en el plano de marcos de hormigón armado rellenos con mampostería de ladrillo hueco de arcilla. Para ello, se adopta un modelo bidimensional del marco de hormigón armado con relleno de mampostería de ladrillo, ensayado durante la campaña experimental, el marco del modelo fue representado por elementos de tensión plana formada por cuatro nudos. La conexión entre la mampostería y los marcos de hormigón armado se simuló mediante elementos de interfaz de cuatro nudos. La viga inferior del marco se fijó evitando cualquier traslación en las direcciones x; y en el análisis numérico. Los marcos de hormigón armado se diseñaron de acuerdo a las disposiciones de los países europeos, considerando una luz promedio que se encuentra a menudo en edificios de hormigón armado portugueses representativos. La mampostería está conformada por ladrillos con perforación horizontal y resistencia a la carga lateral relativamente baja. Se

aplicó una carga cíclica en el plano de los paneles en orientaciones positivas y negativas con un valor de 50 kg, aumentando los niveles del desplazamiento horizontal impuesto hasta un valor predefinido. Para el análisis de esta investigación se definieron las propiedades del panel Pared-Ref-01 para los diferentes porcentajes de abertura como se indica en la figura.

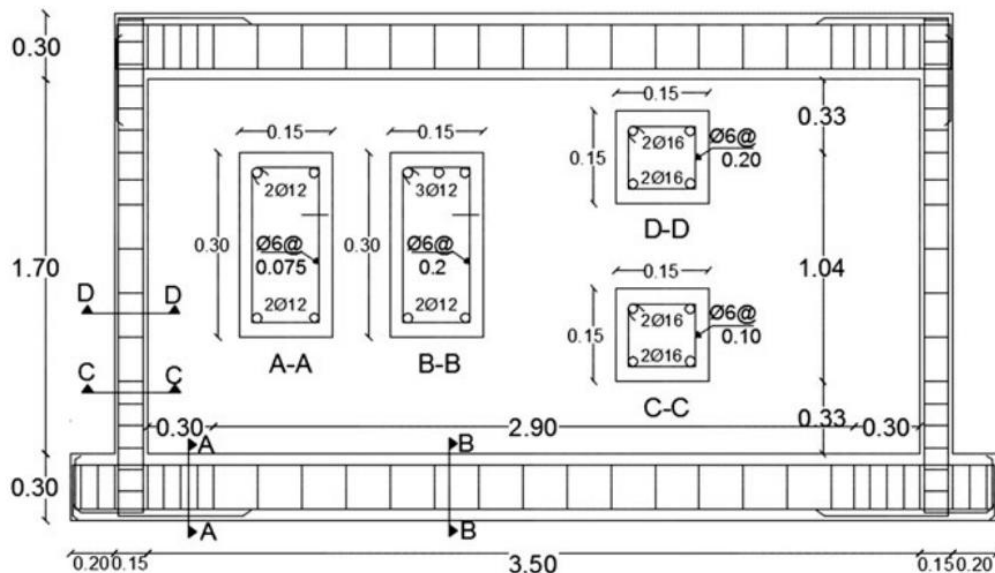


Fig. 4.18 Propiedades de los materiales empleados  
Fuente: (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016)

Propiedades mecánicas	Hormigón	Pared-Ref-01	Pared-Ref-02	Tarro de pared
Joven'módulo s (GPa) Poisson'	31,5	1,67	3,83	4,43
Relación s Resistencia a la tracción (MPa)	0,15	0,13	0,237	0,175
Energía de fractura Modo I (N / mm)	2,35	0,25	0,4	0,5
Resistencia a la compresión (MPa) Energía de fractura por compresión (N / mm)	0,10	0,02	0,03	0,03
Límite de elasticidad de las armaduras de hormigón (MPa)	31,5	1,00	1,26	1,97
	8,0	1,0	1,0	1,0
	-	500	500	500

Fig. 4.19 Propiedades mecánicas de los de los materiales empleados  
Fuente: (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016)

Para este estudio se consideraron las paredes con aberturas centrales tipo ventana con diferentes porcentajes de abertura como lo indica la figura 4.20.



Nombre del modelo	A (constante)	Longitud de apertura	Altura de apertura	Largo de enfill	Altura de enfill	Relación porcentual de apertura área a enfill área (%)
Sin abrir	0	0	0	3500	1700	0
O (9%)	0,3	1050	510	3500	1700	9
O (12%)	0,35	1225	595	3500	1700	12
O (15%)	0,39	1365	663	3500	1700	15
O (20%)	0,45	1575	765	3500	1700	20
O (25%)	0,5	1750	850	3500	1700	25
O (30%)	0,55	1925	935	3500	1700	30
O (36%)	0,6	2100	1020	3500	1700	36
O (39%)	0,625	2190	1060	3500	1700	39
O (42%)	0,65	2275	1105	3500	1700	42
O (45%)	0,675	2360	1145	3500	1700	46
O (49%)	0,7	2450	1190	3500	1700	49
Marco desnudo	1	3500	1700	0	0	100

Fig. 4.20 Caracterización geométrica de las aberturas  
Fuente: (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016)

(Darmayadi & Rusli, 2018) Element Modeling of Masonry Wall With Opening Under Lateral Force.

Los autores tienen como objetivo investigar el comportamiento de los muros de mampostería con aberturas bajo fuerza lateral. Para lograr su objetivo emplean el software ABAQUS a partir del método de elementos finitos y lo verifican a partir de una simulación experimental a escala 1:1 en laboratorio de un muro de mampostería sin aberturas y basados en los experimentos de HAKAS 2017. El modelo cuenta con dimensiones de 3mx3mx0.15m.

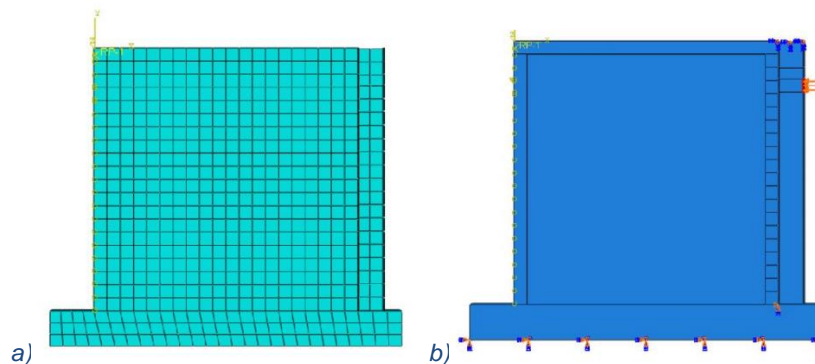
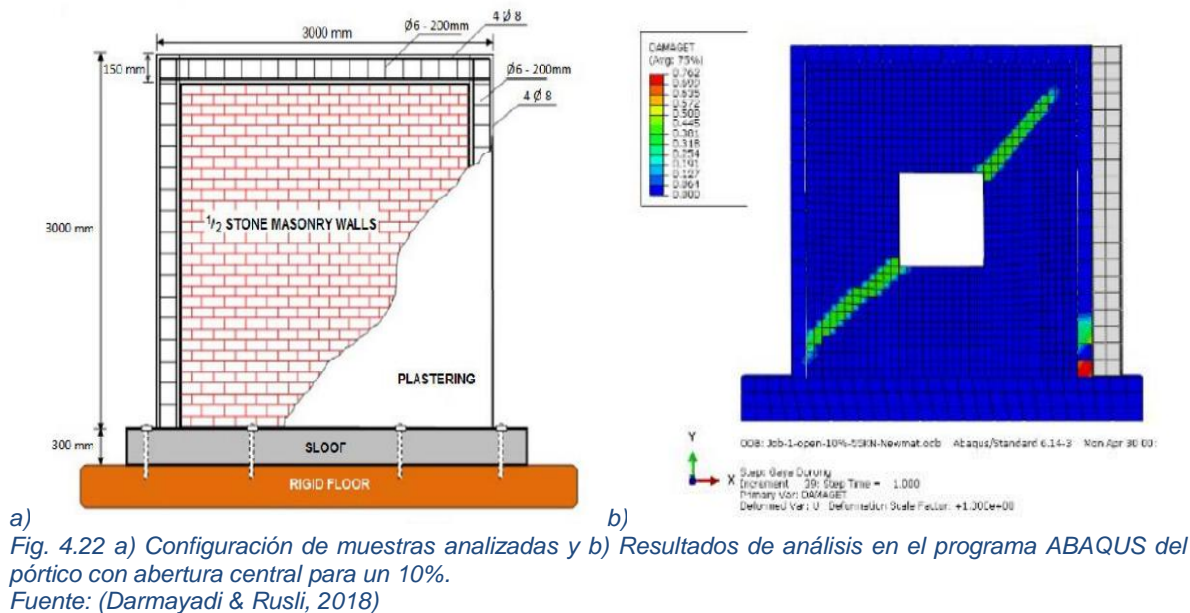


Fig. 4.21 a) Malla del modelo de elementos finitos para pared de mampostería sólida. b) Aplicación de la fuerza a la pared de mampostería sólida.  
Fuente: (Darmayadi & Rusli, 2018)

Se analizaron paredes sin aberturas y paredes con una abertura central tipo ventana en la que variaba el porcentaje de la abertura. Las muestras se identifican como la muestra de la pared sólida de mampostería (Solid Wall), la de 30% (1-OW30%) y la del 50% (1-OW50%) todas con la siguiente configuración:



Este estudio se consideró únicamente para las formulaciones de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) y (Al-Chaar G. & Issa M A, 2003) debido que no tenía los parámetros necesarios para poder aplicarlas en las demás formulaciones.

## 5 Análisis de la calidad predictiva de las fórmulas

En el desarrollo de este capítulo se aplica el criterio de idealización trilineal y bilineal para caracterizar el comportamiento de la pared de mampostería confinada ensayada bajo la acción de carga lateral cíclica o monótonica creciente. Para el análisis de los datos aportados en el corpus de trabajo seleccionado se emplea la herramienta WebPlotDigitizer-4, para poder conformar las gráficas idealizadas. De manera general, el programa trabaja a partir de la inserción de las imágenes de las gráficas de demanda obtenidas en la revisión bibliográfica, de la definición de sus coordenadas x; y, y de la aproximación de las curvas resultado de las investigaciones. De esta forma, se obtienen los datos para confeccionar las idealizaciones. En los casos en que la investigación se desarrolló con cargas cíclicas presentando curvas de histéresis, se consideró las curvas de menor capacidad para su posterior idealización. Una vez que se cuenta con la

idealización de las curvas pushover se comparan los resultados con el obtenido a partir de las fórmulas para de esta manera escoger las que mejor describan el comportamiento de los paneles.

### 5.1 Criterios de idealización trilineal y bilineal para las curvas fuerza-desplazamiento de paredes de mampostería confinada sujetas a carga lateral.

Las curvas fuerza-desplazamiento describen el comportamiento histerético de las paredes de mampostería sometidos a cargas laterales cíclicas y relaciona dichas cargas con sus respectivos desplazamientos laterales. Es evidente que la mampostería confinada presenta un mejor comportamiento en las curvas envolventes de la resistencia a carga lateral comparado con la mampostería no reforzada al no poseer elementos confinantes. Dichas curvas aportan información importante referente al comportamiento de los paneles pues se destacan puntos máximos asociados a cada ciclo de carga aplicado experimentalmente.

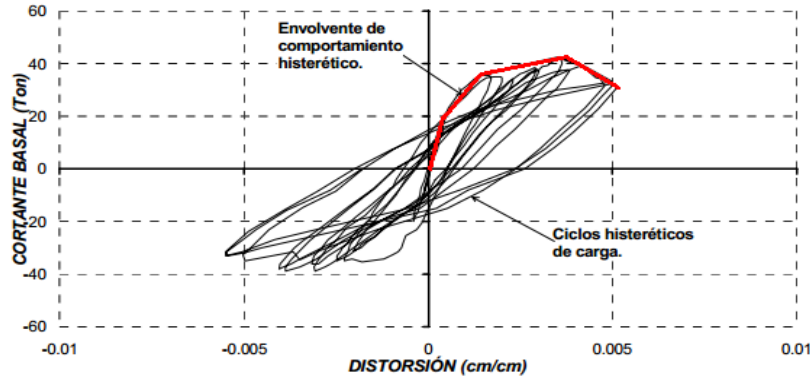


Fig. 5.1 Envolvente del comportamiento histerético de muros de mampostería confinada

Fuente: (Zúñiga & Terán G, 2008)

Con base en la evidencia experimental obtenida en el Centro Nacional de Prevención de Desastres CENAPRED, (Flores & Alcocer, 1995) caracteriza la envolvente del comportamiento histerético de las estructuras de mampostería confinada de tabiques macizos de barro recocido hechos a mano como un modelo trilineal. El modelo se basa en el propuesto por (Meli, 1979), y se diferencian en que el tercer tramo si considera la

degradación de resistencia a la carga lateral de la estructura. El modelo de (Flores & Alcocer, 1995) se define a partir de seis parámetros, los mismos se aproximan a partir de las formulaciones recogidas en las NTCM-2004 o Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería, la mecánica de materiales y la geometría de los muros.

Los autores plantean que en la curva idealizada se identifican tres zonas principales:

- ✓ Comportamiento elástico: Los muros muestran un comportamiento prácticamente elástico a niveles pequeños de desplazamiento y esfuerzo, que se caracterizan por presentar agrietamiento horizontal en las columnas que confinan al muro y en menor medida en el panel de mampostería.
- ✓ Degradación de rigidez: Luego de presentar agrietamiento diagonal, los muros de mampostería muestran una pendiente post-elástica positiva que es mucho menor a la rigidez elástica inicial, lo que les permite obtener una resistencia máxima mayor que la que corresponde al primer agrietamiento.
- ✓ Degradación de rigidez y resistencia a la carga lateral: Una vez alcanzada la resistencia máxima a la carga lateral, la mampostería muestra una pendiente negativa relacionada a pérdidas de resistencia y rigidez que se incrementan hasta el colapso del muro.

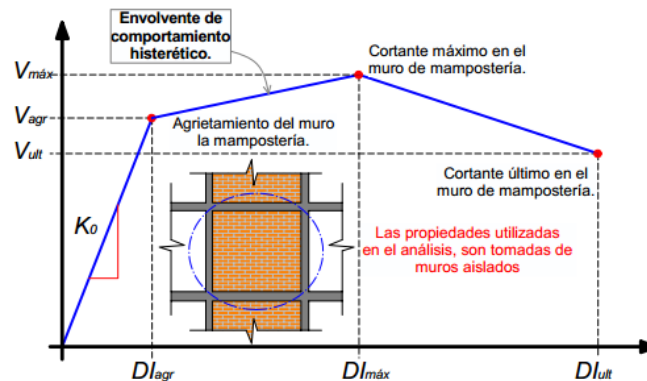


Fig. 5.2 Relación idealizada de carga-deformación para mampostería confinada.  
Fuente: (Flores & Alcocer, 1995)

El modelo de idealización trilineal propuesto por (Tomazevic & Klemenc, 1997) además de considerar la influencia de las cargas laterales en el comportamiento histerético del panel de mampostería lo combina con la carga vertical, por lo que este autor describe de





*Fuente: Elaboración propia basada en los datos de (Kakaletsis & Karayannis, 2008)*

En la figura se aprecia gráficamente la equivalencia de las áreas, este procedimiento se realiza por el método de los trapecios auxiliándonos de la herramienta Excel, para comparar los valores restringiendo ambas gráficas al punto de resistencia a la carga lateral última asumido para la idealización.

Debido a que el procedimiento de la idealización trilineal se ha realizado de forma manual y sin la ayuda de algún programa que automatice este método, se ha propuesto un modelo de idealización bilineal que es más simple y menos costoso en tiempo. Se ha tomado los criterios de idealización bilineal propuestos por (Tomazevic, Earthquake-resistant design of masonry buildings, 1999), además se ha refinado la idealización considerando que el rango para obtener la resistencia de agrietamiento ( $V_{cr}$ ) está entre 50 a 60% de la resistencia última ( $V_u$ ), siendo  $V_u$  igual a 90% de  $V_{máx}$ . Al igual que la idealización trilineal se ha considerado este rango de porcentajes debido a que el punto de agrietamiento gráfico de las curvas de paredes con aberturas empieza más pronto que el de las paredes llenas.

Para no tomar arbitrariamente un porcentaje de  $V_u$  en la obtención de  $V_{cr}$ , se ha obtenido una ecuación lineal, para lo cual se ha considerado un rango de valores  $V_{cr}/V_{máx}$  entre 0.3 y 0.8. Todas estas consideraciones se han tomado dado que la no linealidad en las curvas del corpus de estudio para paredes con aberturas se produce en un amplio rango que no es el típico de paredes sin aberturas. El límite inferior de 0.3 y el límite superior de 0.8 corresponderían a 50% y 60% respectivamente. Para valores de  $V_{cr}/V_{máx}$  que sean menores a 0.3 se tomará igual al 60% y para valores mayores a 0.8 se tomará igual a 50%, la siguiente figura resume el procedimiento para obtener el porcentaje de  $V_u$ :

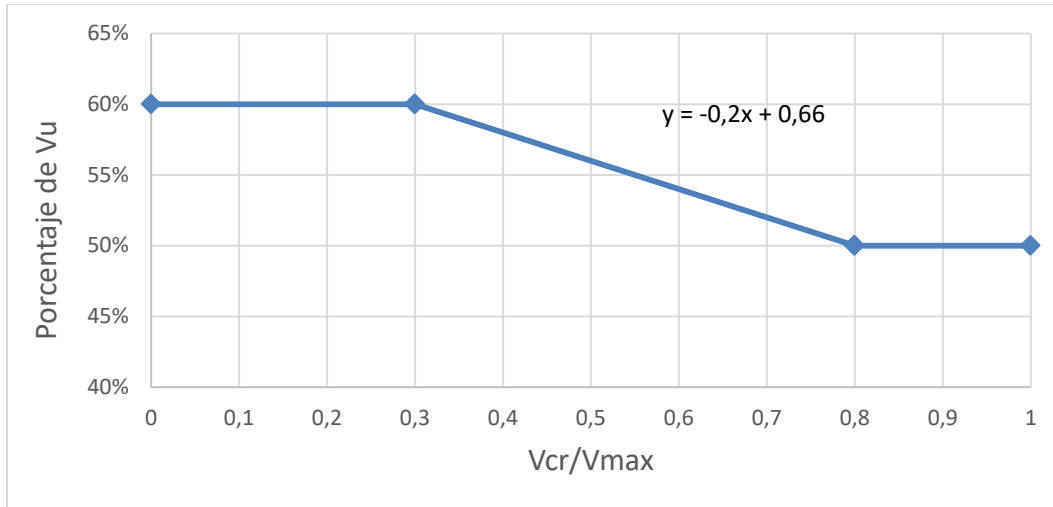


Fig. 5.4 Relación entre  $V_{cr}/v_{m\acute{a}x}$  y el rango para la obtención de  $V_{cr}$

De la figura se obtiene una ecuación lineal para obtener el porcentaje de  $V_u$  que se va a utilizar para calcular  $V_{cr}$ , siendo  $x$  igual al porcentaje para 100. Teniendo así la siguiente idealización:

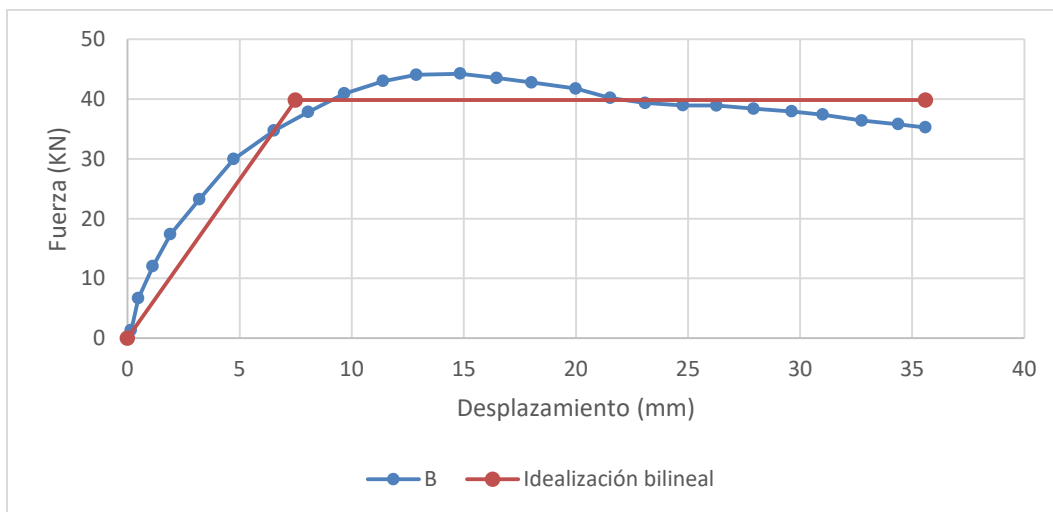


Fig. 5.5 Aplicación de la idealización bilineal al marco piloto desnudo (B)  
Fuente: Elaboración propia basada en los datos de (Kakaletsis & Karayannis, 2008)

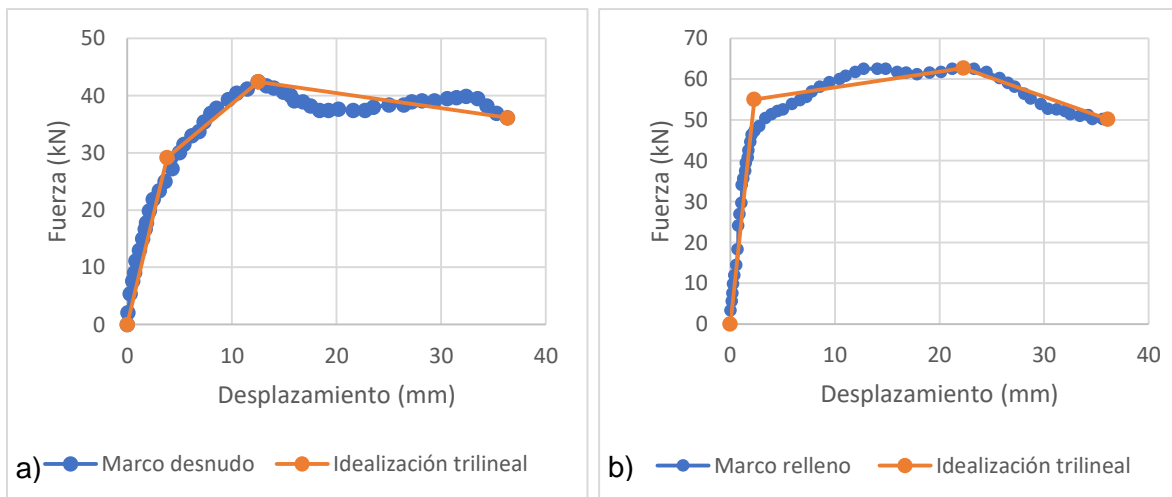
Para el caso en que los estudios presentaban la curva *pushover* del marco desnudo, se ha considerado como si la abertura tuviera un 100% del área total de la pared, asumiendo así que se puede usar el criterio de idealización bilineal y trilineal presentado en este apartado.

## 5.2 Aplicación de los criterios de idealización trilineal y bilineal para las curvas fuerza-desplazamiento experimentales y obtención de valores de caracterización.

Los procedimientos descritos anteriormente se aplicarán a cada autor seleccionado. De esta forma se listan los autores cuyos trabajos fueron realizados a partir de simulaciones experimentales. En el caso de la idealización bilineal solo se han presentado los valores directamente en tablas al ser un proceso mecánico a diferencia de la idealización trilineal que es un método gráfico.

(Kakaletsis & Karayannis, 2008) Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading.

La idealización para esta investigación se ilustra a continuación. El modelo del marco piloto desnudo (B) corresponde a un marco de hormigón armado sin relleno, el modelo considerando un relleno sólido será el correspondiente al IS donde se aprecia un considerable aumento de la resistencia a la carga lateral del panel, radicado en el aporte de la mampostería a la resistencia del marco. Mientras que el modelo que considera un 10% de abertura tipo ventana será el IWO2 y refleja una variación de las rigideces en los dos primeros tramos del comportamiento del panel. De igual forma se procede con los paneles de abertura con un 20% tipo puerta IDO2. Por simplicidad y mejor comprensión se denominará a la abertura tipo ventana y puerta como W y D respectivamente con su porcentaje.





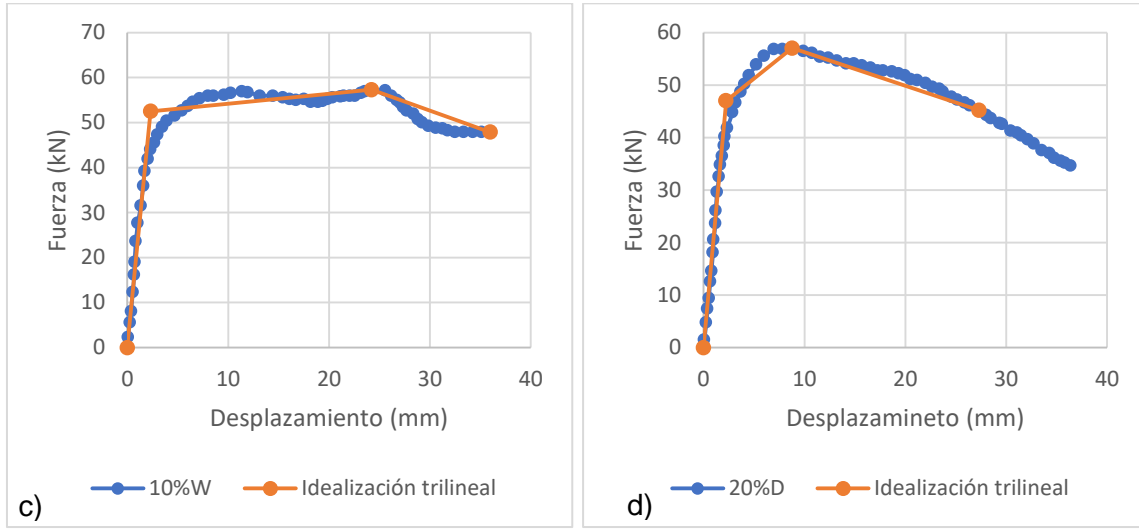


Fig. 5.6 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal, a) Marco piloto desnudo(B), b) Marco relleno sólido fuerte (IS), c) Relleno sólido fuerte con abertura del 10% tipo ventana (10%W), d) Relleno sólido fuerte con abertura del 20% tipo puerta (20%D)

Fuente: Elaboración propia basada en los datos de (Kakaletsis & Karayannis, 2008)

Tabla 5.1 Resumen de valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Kakaletsis & Karayannis, 2008)

Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco	Punto de agrietamiento	3,81	29,17	7,66
	Punto de Vmáx.	12,52	42,41	
	Punto de V último	36,34	36,11	
Marco relleno	Punto de agrietamiento	2,30	55,04	23,94
	Punto de Vmáx.	22,29	62,69	
	Punto de V último	36,10	50,15	
10%W	Punto de agrietamiento	2,32	52,50	22,65
	Punto de Vmáx.	24,21	57,31	
	Punto de V último	35,97	47,88	
20%D	Punto de agrietamiento	2,24	47,00	21,02
	Punto de Vmáx.	8,78	57,04	
	Punto de V último	27,32	45,19	

Tabla 5.2 Resumen de valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Kakaletsis & Karayannis, 2008)

Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco	Punto de agrietamiento	2,483	21,852	8,800
	Punto de V último	4,337	38,167	
	Desplazamiento último	36,335	38,167	
Marco relleno	Punto de agrietamiento	1,084	29,615	27,324
	Punto de V último	2,065	56,423	
	Desplazamiento último	36,099	56,423	
10%W	Punto de agrietamiento	1,025	27,692	27,028
	Punto de V último	1,908	51,577	
	Desplazamiento último	35,975	51,577	
20%D	Punto de agrietamiento	1,331	29,630	22,266
	Punto de V último	2,305	51,333	
	Desplazamiento último	36,393	51,333	

(Sigmund & Penava, 2014) Influence of Openings, With and Without Confinement, on Cyclic Response of Infilled RC Frames - An Experimental Study.

En la investigación el grupo III analizado corresponden el tipo 1 al marco vacío y el tipo 2 al marco relleno con mampostería, mientras que el grupo I corresponden a los modelos con aberturas. Se tienen el 14 y 13% de abertura para el tipo puerta y ventana respectivamente. Por simplicidad y mejor comprensión se denominará a las aberturas tipo puerta como D y a las de tipo ventana como W con su porcentaje de abertura. Si la abertura está descentrada se denominará DD o WD. Los resultados de la idealización se ilustran a continuación,

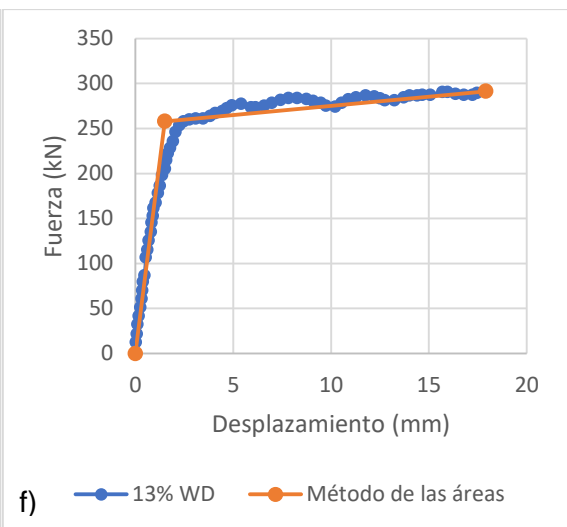
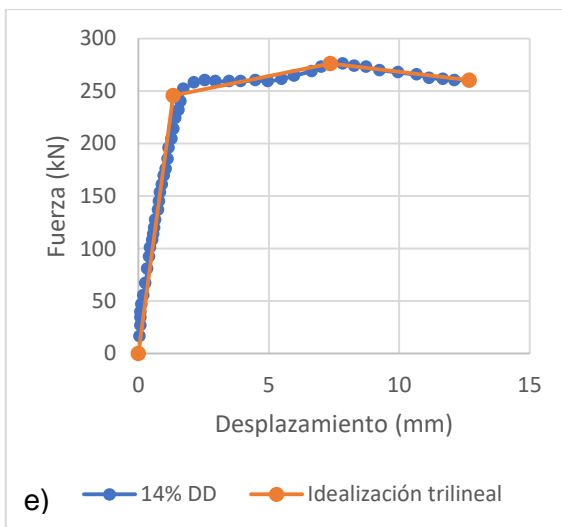
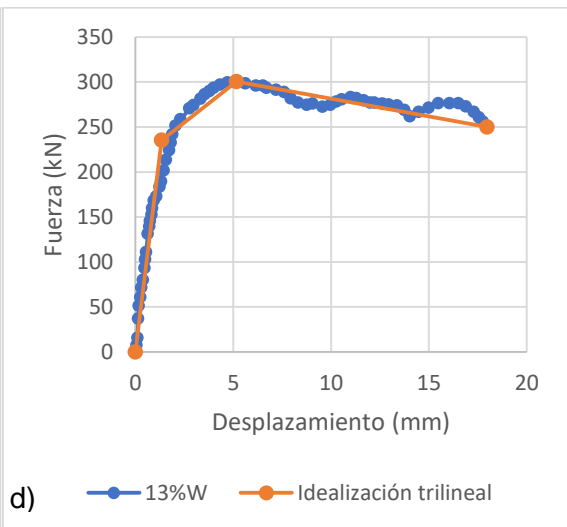
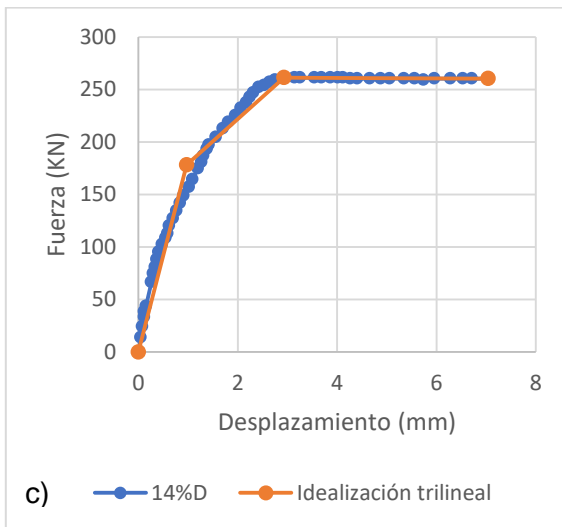
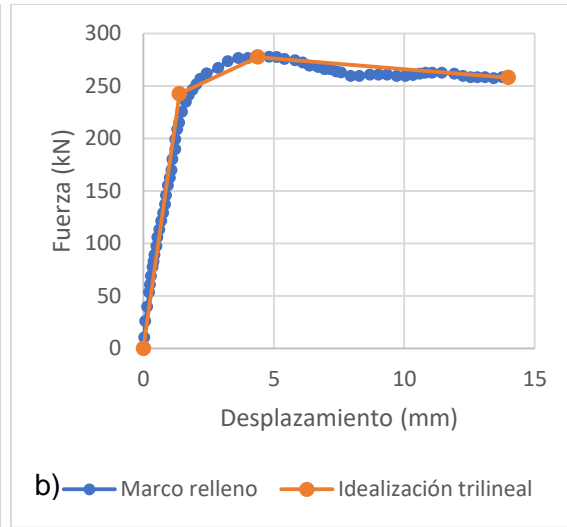
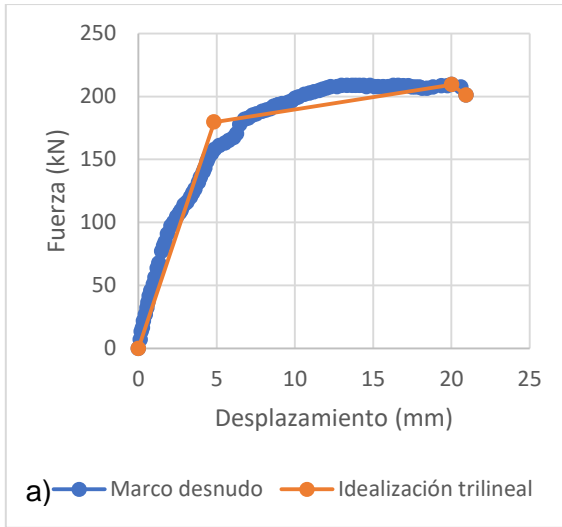




Fig. 5.7 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal, a) Grupo III Tipo 1: Marco vacío, b) Grupo III Tipo 2: Marco relleno, c) Grupo I TIPO 1: Puerta centrada (14%D), d) Grupo II Tipo 2: Ventana centrada (13%W), e) Grupo I Tipo 3: Puerta descentrada (14% DD), f) G  
Fuente: Elaboración propia basada en los datos de (Sigmund & Penava, 2014)

Tabla 5.3 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Sigmund & Penava, 2014)

Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco vacío	Punto de agrietamiento	4,83	179,66	37,21
	Punto de V <sub>máx.</sub>	20,02	209,38	
	Punto de V último	20,94	200,94	
Marco relleno	Punto de agrietamiento	1,38	242,58	176,35
	Punto de V <sub>máx.</sub>	4,38	277,38	
	Punto de V último	13,98	257,97	
14%D	Punto de agrietamiento	0,97	178,25	183,64
	Punto de V <sub>máx.</sub>	2,93	261,34	
	Punto de V último	7,04	260,31	
13%W	Punto de agrietamiento	1,34	235,09	175,33
	Punto de V <sub>máx.</sub>	5,17	300,33	
	Punto de V último	17,98	249,94	
14% DD	Punto de agrietamiento	1,33	245,63	184,40
	Punto de V <sub>máx.</sub>	7,36	276,06	
	Punto de V último	12,69	260,21	

Tabla 5.4 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Sigmund & Penava, 2014)

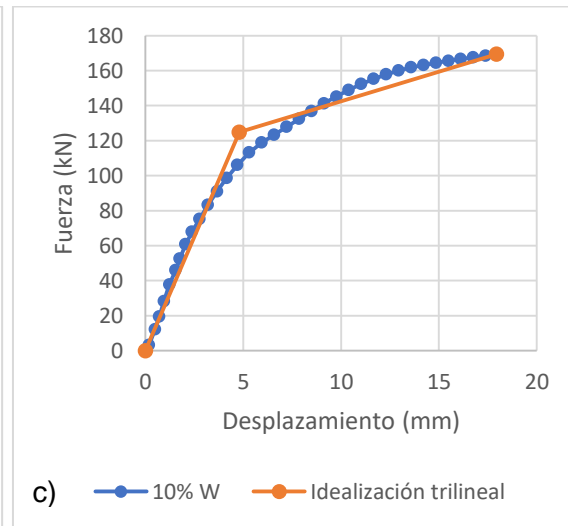
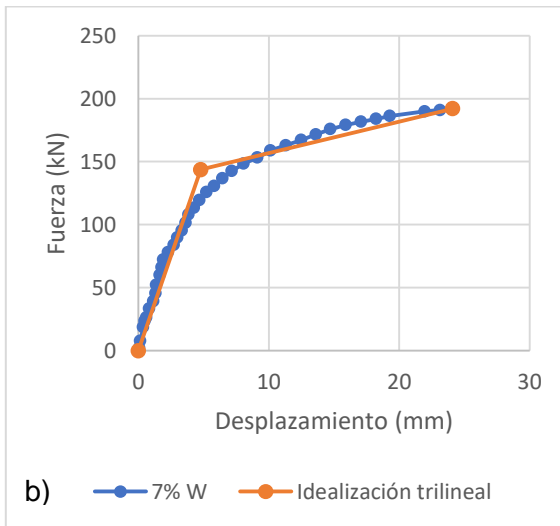
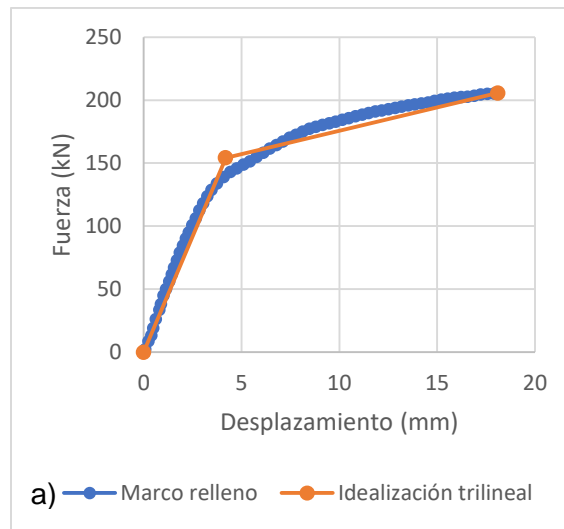
Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento. (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco vacío	Punto de agrietamiento	2,638	107,546	40,763
	Punto de V último	4,623	188,441	
	Desplazamiento último	20,939	188,441	
Marco relleno	Punto de agrietamiento	0,688	121,290	176,345
	Punto de V último	1,491	249,641	
	Desplazamiento último	13,982	249,641	
14%D	Punto de agrietamiento	0,765	134,536	175,759
	Punto de V último	1,338	235,206	
	Desplazamiento último	7,041	235,206	
13%W	Punto de agrietamiento	0,836	152,435	182,439
	Punto de V último	1,482	270,294	
	Desplazamiento último	17,981	270,294	
14% DD	Punto de agrietamiento	0,795	145,070	182,417
	Punto de V último	1,362	248,451	
	Desplazamiento último	12,687	248,451	
13% WD	Punto de agrietamiento	0,832	145,408	174,785
	Punto de V último	1,500	262,182	
	Desplazamiento último	17,912	262,182	

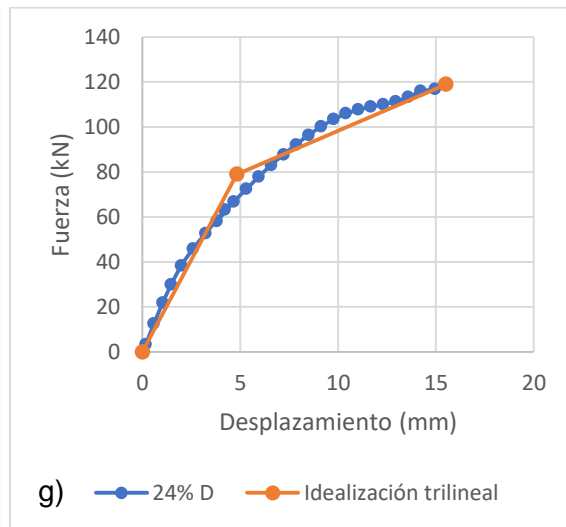
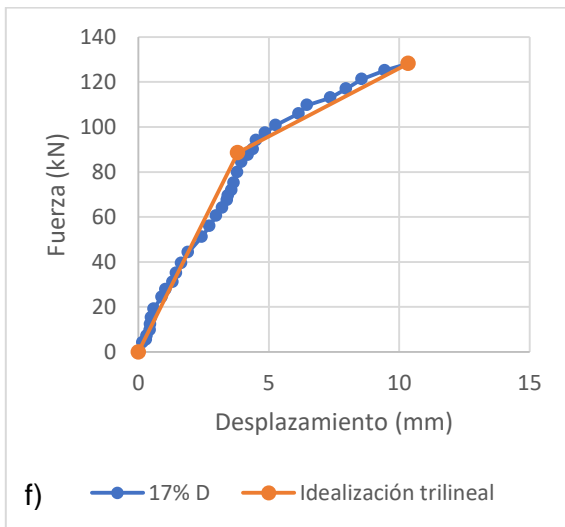
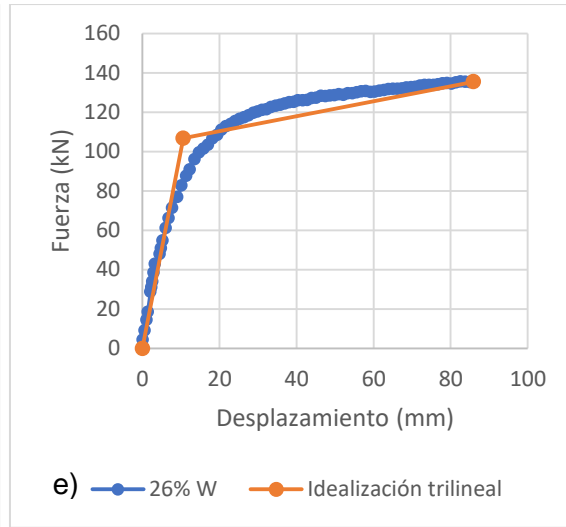
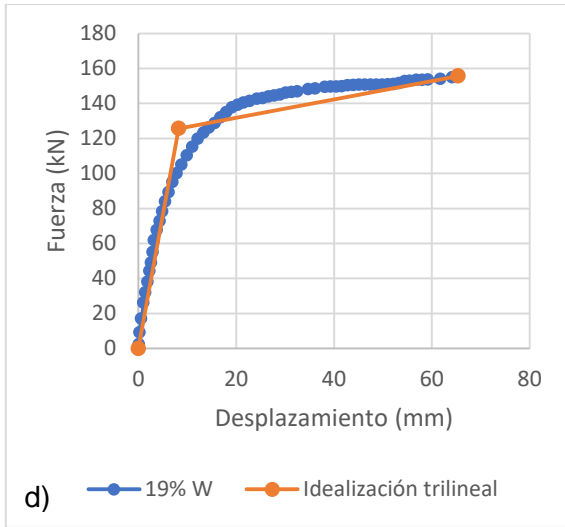
### 5.3 Aplicación de los criterios de idealización trilineal y bilineal para las curvas fuerza-desplazamiento de simulación numérica y obtención de valores de caracterización.

(Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) Experimental and analytical investigation of lateral load response of confined masonry walls

En la investigación, los autores emplearon el modelo de elementos finitos con el programa ABAQUS, para determinar la influencia de las aberturas en el comportamiento de las paredes de mampostería confinada. Los modelos analizados son el CLY-S-CTRL para el marco relleno de mampostería sin aberturas, el CLY-P-20W para abertura tipo ventana con diferentes porcentajes y el CLY-P-20D para aberturas tipo puerta también con

diferentes porcentajes, se llamará W y D a las aberturas tipo ventana y puerta respectivamente con sus porcentajes, como se indica a continuación:





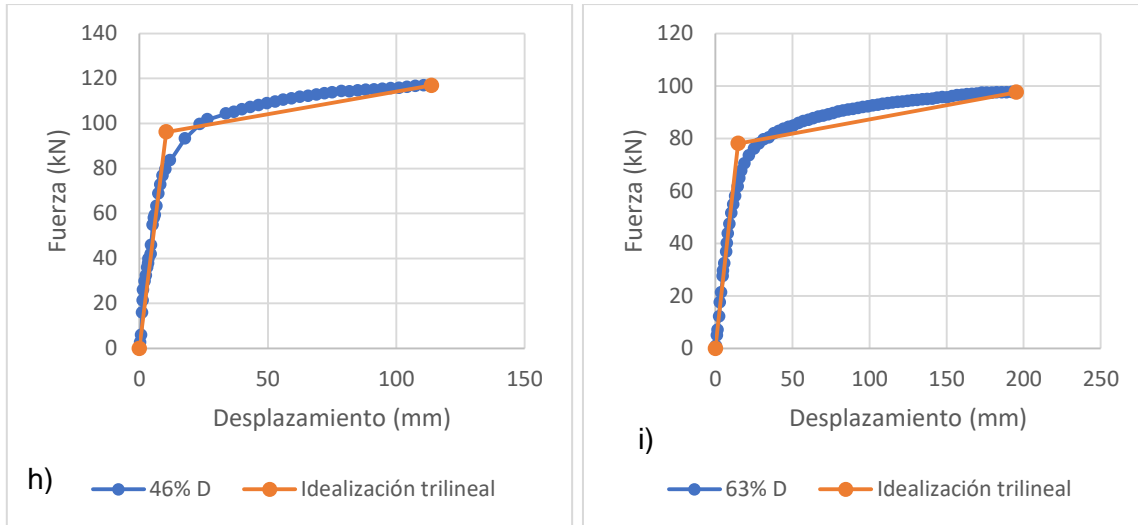


Fig. 5.8 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal, a) Marco relleno CLY-S-CTRL, b) Curva pushover CLY-P-20W (7%W), c) Curva pushover CLY-P-29W (10%W), d) Curva pushover CLY-P-55W (19%W), e) Curva pushover CLY-P-75W (26%W), f) Curva pushover CLY-P-20D (17%D), g) Curva pushover CLY-P-29D (24%D), h) Curva pushover CLY-P-55D (46%D), i) Curva pushover CLY-P-75D (63%D).  
Fuente: Elaboración propia basada en los datos de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.)





Tabla 5.5 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.)

Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento. (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco relleno	Punto de agrietamiento	4,19	154,24	36,80
	Punto de Vmáx.	18,11	205,60	
	Punto de V último	-	-	
7%W	Punto de agrietamiento	4,77	143,63	30,08
	Punto de Vmáx.	24,10	192,08	
	Punto de V último	-	-	
10%W	Punto de agrietamiento	4,80	124,85	26,03
	Punto de Vmáx.	17,94	169,34	
	Punto de V último	-	-	
19%W	Punto de agrietamiento	8,23	125,67	15,28
	Punto de Vmáx.	65,39	155,62	
	Punto de V último	-	-	
26%W	Punto de agrietamiento	10,56	106,75	10,11
	Punto de Vmáx.	85,93	135,47	
	Punto de V último	-	-	
17%D	Punto de agrietamiento	3,81	88,59	23,27
	Punto de Vmáx.	10,34	128,15	
	Punto de V último	-	-	
24%D	Punto de agrietamiento	4,83	78,99	16,37
	Punto de Vmáx.	15,52	118,95	
	Punto de V último	-	-	
46%D	Punto de agrietamiento	10,42	96,19	9,23
	Punto de Vmáx.	113,73	116,89	
	Punto de V último	-	-	
63%D	Punto de agrietamiento	14,66	78,05	5,32
	Punto de Vmáx.	195,18	97,56	
	Punto de V último	-	-	

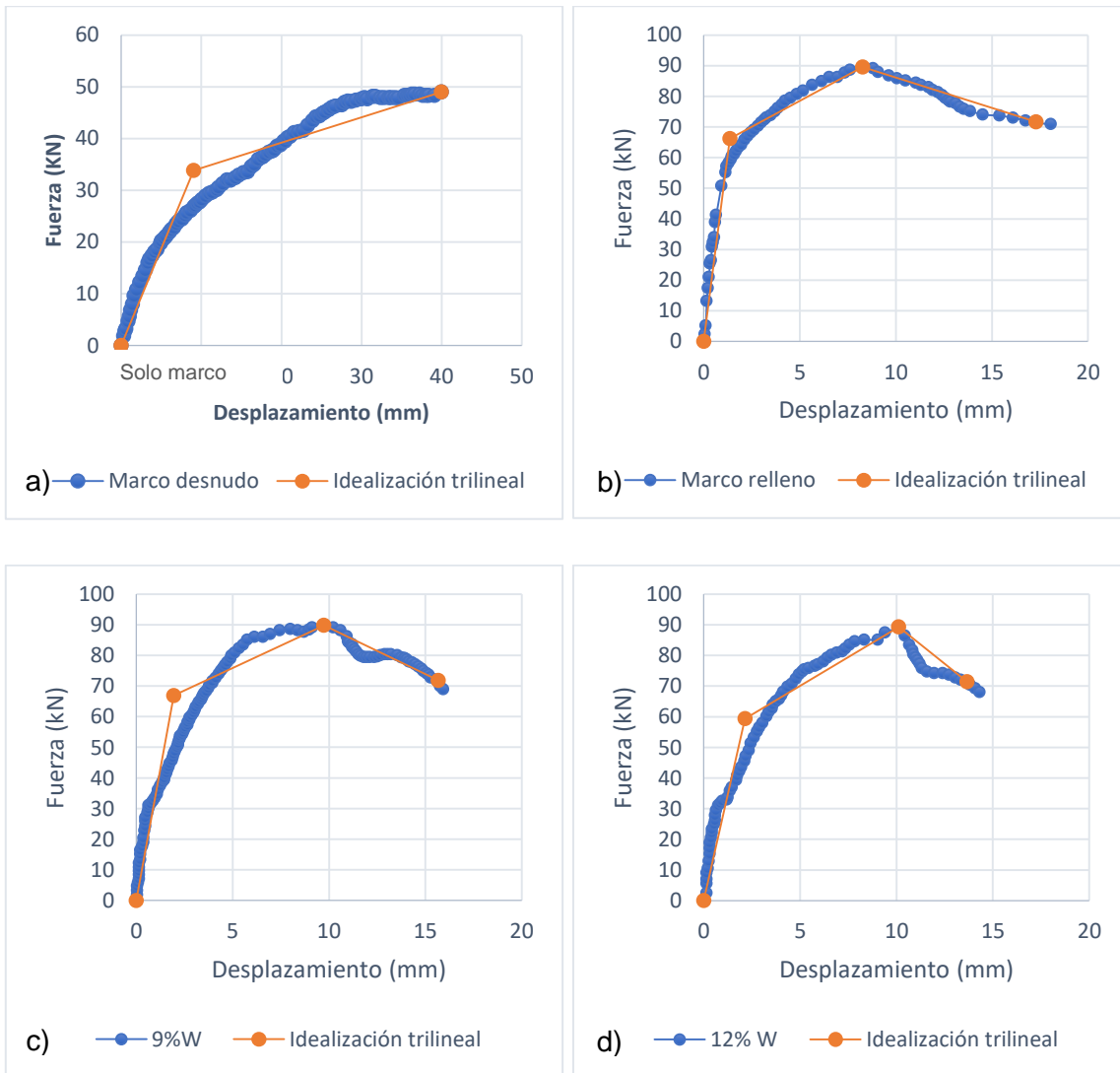


Tabla 5.6 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.)

Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento. (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco relleno	Punto de agrietamiento	2,50	100,68	40,31
	Punto de V último	4,72	185,04	
	Desplazamiento último	18,11	185,04	
7%W	Punto de agrietamiento	3,63	101,47	27,97
	Punto de V último	6,18	172,87	
	Desplazamiento último	24,10	172,87	
10%W	Punto de agrietamiento	3,20	83,23	26,03
	Punto de V último	6,13	152,41	
	Desplazamiento último	17,94	152,41	
19%W	Punto de agrietamiento	4,90	78,24	15,98
	Punto de V último	8,76	140,06	
	Desplazamiento último	65,39	140,06	
26%W	Punto de agrietamiento	7,69	71,32	9,27
	Punto de V último	13,15	121,92	
	Desplazamiento último	85,93	121,92	
17%D	Punto de agrietamiento	3,40	67,45	19,86
	Punto de V último	5,72	115,33	
	Desplazamiento último	10,34	115,33	
24%D	Punto de agrietamiento	4,21	63,19	15,02
	Punto de V último	7,13	107,05	
	Desplazamiento último	15,52	107,05	
46%D	Punto de agrietamiento	5,72	57,89	10,12
	Punto de V último	11,28	105,20	
	Desplazamiento último	113,73	105,20	
63%D	Punto de agrietamiento	9,15	47,41	5,18
	Punto de V último	18,71	87,81	
	Desplazamiento último	195,18	87,81	

(Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) Numerically based proposals for the stiffness and strength of masonry infills with openings in reinforced concrete frames.

En la investigación los autores emplearon el modelo de elementos finitos con el programa DIANA, para determinar la influencia de las aberturas centrales tipo ventana en el comportamiento de los marcos rellenos de mampostería. Se denominarán a las aberturas tipo ventana como W con su respectivo porcentaje. Las idealizaciones de las curvas se muestran a continuación:



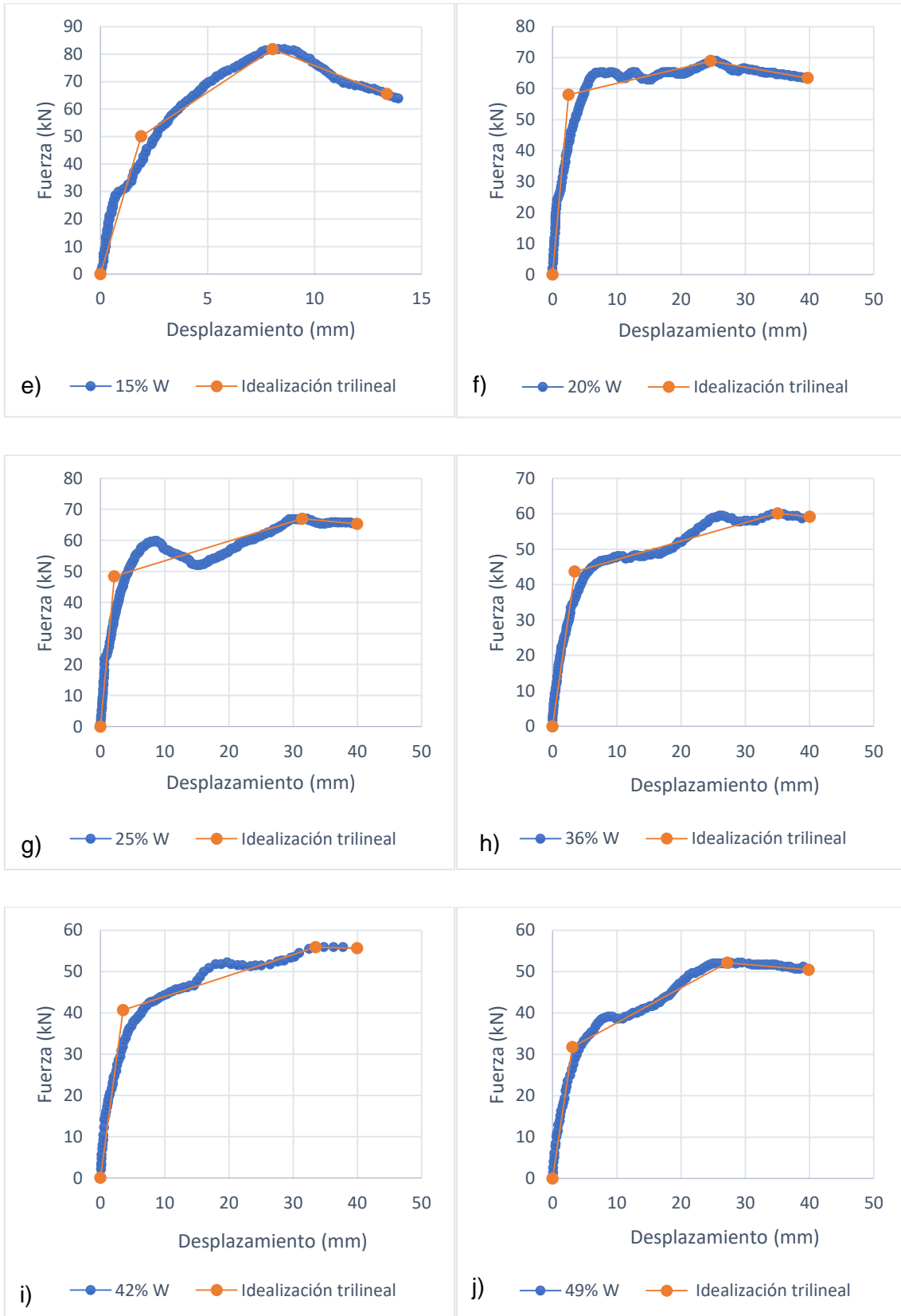


Fig. 5.9 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal de marcos rellenos de mampostería, a) Marco vacío, b) Marco relleno, c) Abertura tipo ventana centrada (9 %W), d) Abertura tipo ventana centrada (12 %W), e) Abertura tipo ventana centrada (15 %W), f) Abertura tipo ventana centrada (20 %W), g) Abertura tipo ventana centrada (25 %W), h) Abertura tipo ventana centrada (36 %W), i) Abertura tipo ventana centrada (42 %W), j) Abertura tipo ventana centrada (49 %W).

Fuente: Elaboración propia basada en los datos de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016)

Tabla 5.7 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016)

Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento. (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco vacío	Punto de agrietamiento	9,05	33,83	3,74
	Punto de V <sub>máx.</sub>	40,00	48,99	
	Punto de V último	-	-	
Marco relleno	Punto de agrietamiento	1,36	66,19	48,58
	Punto de V <sub>máx.</sub>	8,27	89,56	
	Punto de V último	17,30	71,65	
9%W	Punto de agrietamiento	1,94	66,89	34,41
	Punto de V <sub>máx.</sub>	9,74	89,79	
	Punto de V último	15,67	71,83	
12%W	Punto de agrietamiento	2,14	59,35	27,71
	Punto de V <sub>máx.</sub>	10,12	89,31	
	Punto de V último	13,65	71,45	
15%W	Punto de agrietamiento	1,90	50,11	26,32
	Punto de V <sub>máx.</sub>	8,05	81,77	
	Punto de V último	13,38	65,42	
20%W	Punto de agrietamiento	2,50	58,00	23,22
	Punto de V <sub>máx.</sub>	24,65	68,92	
	Punto de V último	39,73	63,39	
25%W	Punto de agrietamiento	2,16	48,43	22,47
	Punto de V <sub>máx.</sub>	31,40	66,99	
	Punto de V último	40,00	65,28	
36%W	Punto de agrietamiento	3,47	43,68	12,58
	Punto de V <sub>máx.</sub>	35,05	60,12	
	Punto de V último	40,05	59,14	
42%W	Punto de agrietamiento	3,51	40,65	11,57
	Punto de V <sub>máx.</sub>	33,52	55,88	
	Punto de V último	-	-	
49%W	Punto de agrietamiento	3,09	31,75	10,27
	Punto de V <sub>máx.</sub>	27,21	52,15	
	Punto de V último	39,89	50,41	



Tabla 5.8 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016)

Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento. (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco vacío	Punto de agrietamiento	8,65	26,08	3,02
	Punto de V último	14,62	44,09	
	Desplazamiento último	40,00	44,09	
Marco relleno	Punto de agrietamiento	1,14	55,15	48,58
	Punto de V último	1,66	80,60	
	Desplazamiento último	40,00	80,60	
9%W	Punto de agrietamiento	1,90	46,65	24,59
	Punto de V último	3,30	80,81	
	Desplazamiento último	40,00	80,81	
12%W	Punto de agrietamiento	2,17	47,12	21,72
	Punto de V último	3,70	80,38	
	Desplazamiento último	40,00	80,38	
15%W	Punto de agrietamiento	2,01	42,64	21,25
	Punto de V último	3,46	73,60	
	Desplazamiento último	40,00	73,60	
20%W	Punto de agrietamiento	2,06	36,27	17,60
	Punto de V último	3,52	62,03	
	Desplazamiento último	40,00	62,03	
25%W	Punto de agrietamiento	2,28	35,56	15,61
	Punto de V último	3,86	60,29	
	Desplazamiento último	40,00	60,29	
36%W	Punto de agrietamiento	2,82	32,02	11,34
	Punto de V último	4,77	54,11	
	Desplazamiento último	40,00	54,11	
42%W	Punto de agrietamiento	3,31	30,83	9,31
	Punto de V último	5,40	50,29	
	Desplazamiento último	40,00	50,29	
49%W	Punto de agrietamiento	3,53	28,94	8,20
	Punto de V último	5,72	46,93	
	Desplazamiento último	40,00	46,93	

(Darmayadi & Rusli, 2018) Element Modeling of Masonry Wall With Opening Under Lateral Force.

La idealización de la investigación se ilustra a continuación, se analizaron 3 muestras, la muestra del marco relleno de mampostería (Solid Wall), la abertura tipo ventana centrada de 30% (1-OW30%) y la del 50% (1-OW50%), se las llamarán 30%W y 50%W respectivamente.

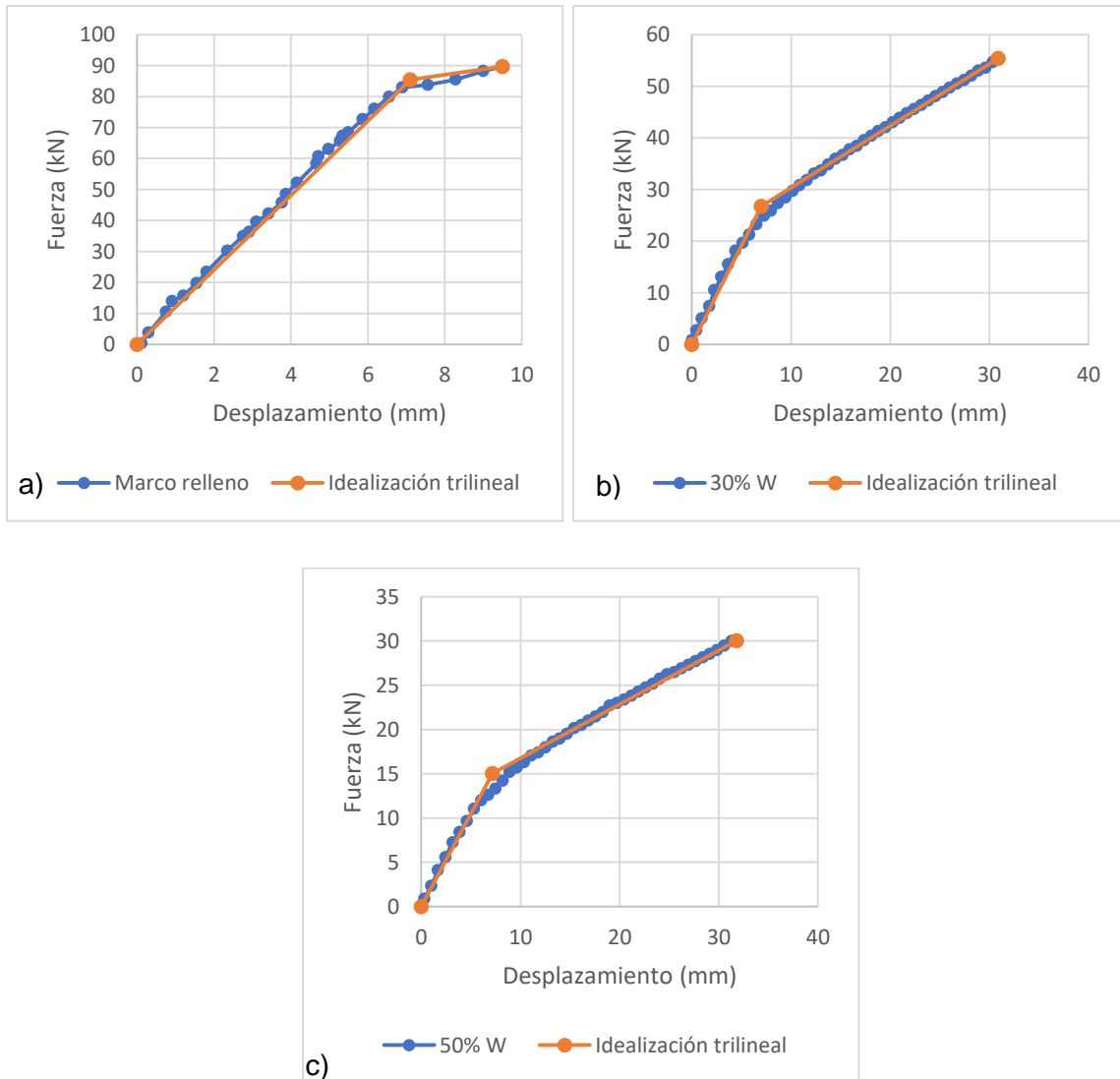


Fig. 5.10 Curvas fuerzas-desplazamiento idealización trilineal, a) Solid Wall (Marco relleno), b) Abertura del 30% tipo ventana centrada (30%W), c) Abertura del 50% tipo ventana centrada (50%W).

Fuente: Elaboración propia basada en los datos de (Darmayadi & Rusli, 2018)



Tabla 5.9 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización trilineal obtenida de (Darmayadi & Rusli, 2018)

Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento. (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco relleno	Punto de agrietamiento	7,10	85,41	12,02
	Punto de V <sub>máx.</sub>	9,49	89,67	
	Punto de V último	-	-	
30%W	Punto de agrietamiento	7,01	26,75	3,82
	Punto de V <sub>máx.</sub>	30,92	55,40	
	Punto de V último	-	-	
50%W	Punto de agrietamiento	7,19	15,04	2,09
	Punto de V <sub>máx.</sub>	31,80	30,03	
	Punto de V último	-	-	

Los resultados de los gráficos corresponden a idealizaciones trilineales, cuando la investigación no aporta la degradación de la resistencia ante carga lateral como mínimo en un 20%, no empleamos este valor y la gráfica se conforma con los valores brindados, dando resultados aparentes de idealizaciones bilineales aún cuando no lo son.

Tabla 5.10 Resumen de los valores para parámetros de caracterización: idealización bilineal obtenida de (Darmayadi & Rusli, 2018)

Nombre del Modelo	Punto sobre idealización	Desplazamiento. (mm)	Fuerza (kN)	Ke (kN/mm)
Marco relleno	Punto de agrietamiento	3,10	39,57	12,77
	Punto de V último	6,32	80,70	
	Desplazamiento último	9,49	80,70	
30%W	Punto de agrietamiento	10,18	29,72	2,92
	Punto de V último	17,07	49,86	
	Desplazamiento último	30,92	49,86	
50%W	Punto de agrietamiento	9,65	15,71	1,63
	Punto de V último	16,61	27,03	
	Desplazamiento último	31,80	27,03	





## 5.4 Análisis de la calidad predictiva de las fórmulas

El análisis de la calidad predictiva es una importante herramienta para determinar la correcta funcionalidad de determinado modelo, en este caso las ecuaciones que analizan la rigidez en la etapa elástica del comportamiento de los muros de mampostería confinada y las que analizan por su parte la resistencia a la carga lateral máxima de los muros sometidos a cargas sísmicas.

### 5.4.1 Análisis preliminar de calidad predictiva

En esta sección se presentan los resultados de la aplicación de las fórmulas planteadas en el apartado 4.3 a cada investigación seleccionada, para analizar la influencia de las aberturas en el comportamiento de la mampostería, para de esta forma seleccionar las que mejor describan el fenómeno.

Partiendo del punto de la existencia de ciertas incertidumbres para determinar la capacidad estructural de los muros de mampostería donde se aplican las formulaciones. Las incertidumbres están dadas debido a la heterogeneidad en las propiedades de los materiales que componen los modelos, las propiedades geométricas de los elementos ya sean secciones o longitud de los mismos, así como la calidad de la ejecución de las construcciones. De manera general se constata la desfavorable influencia de las aberturas en el comportamiento de los muros de mampostería confinada sometidos a acciones sísmicas.

### 5.4.2 Análisis de la variabilidad del error de predicción

Para realizar el análisis de la calidad predictiva de las formulaciones planteadas en el apartado 4.3, se tuvo en cuenta los valores de la idealización trilineal y bilineal realizada para cada investigación, y se compararon con sus respectivos valores de las formulaciones.

En cuanto a las formulaciones de rigidez elástica y de resistencia a carga lateral del marco relleno con aberturas planteadas por (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) se tiene que estas dependen de dos parámetros, la rigidez elástica y la resistencia a carga lateral del marco desnudo ( $K_{bare}$  y  $F_{bare}$ ), que se han estudiado más a profundidad debido a que el marco desnudo debería ser simulado para poder obtener los mismos,

siendo algo muy complejo de realizar. Además de que en los estudios de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) y (Darmayadi & Rusli, 2018) no se tenían estos parámetros. Por lo tanto se propuso en el apartado 4.3 fórmulas para hallar  $K_{bare}$  y  $F_{bare}$ , los resultados de los valores idealizados de la rigidez elástica y resistencia a carga lateral del marco desnudo se comparan con los resultados de las formulaciones. Se muestran a continuación una tabla de la comparación:

Tabla 5.11 Resultados de las formulaciones para determinar la rigidez elástica y la resistencia a carga lateral del marco desnudo comparado con los valores de la idealización trilineal.

Nombre de la investigación	Valores de simulación		Valores de formulaciones		Comparación (Kf-Ks)/Ks (%)	Comparación (Vf-Vs)/Vs (%)
	Kbare	Fbare	Kbare	Fbare		
Kakaletsi et al. 2008	7,66	42,41	9,45	47,41	23,34	11,80
Penava et al. 2014	37,21	209,38	5,47	77,54	-85,31	-62,97
Okail et al. 2015			3,17	33,19		
Akhoundi et al. 2016	3,74	48,99	3,05	30,12	-18,45	-38,52
Darmayadi et al. 2018			0,40	9,05		

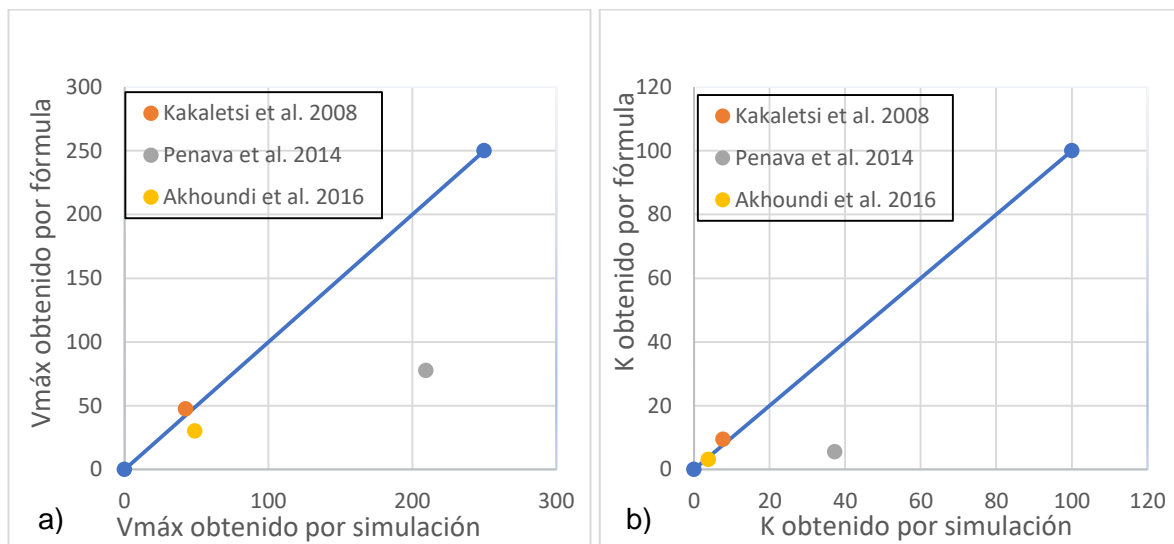


Fig. 5.11 Resultados comparativos de la idealización trilineal en cuanto a: a) Resistencia a carga lateral del marco desnudo y b) Rigidez elástica del marco desnudo, de las diferentes investigaciones con la aplicación del Método de mutuo.

Tabla 5.12 Resultados de las formulaciones para determinar la rigidez elástica y la resistencia a carga lateral del marco desnudo comparado con los valores de la idealización bilineal.

Nombre de la investigación	Valores idealizados		Valores de formulaciones		Comparación ( $K_f - K_s$ )/ $K_s$ (%)	Comparación ( $V_f - V_s$ )/ $V_s$ (%)
	$K_{bare}$	$F_{bare}$	$K_{bare}$	$F_{bare}$		
Kakaletsi et al. 2008	8,80	38,17	9,45	47,41	7,40	24,23
Penava et al. 2014	40,76	188,44	5,47	77,54	-86,59	-58,85
Okail et al. 2015			3,17	33,19		
Akhoundi et al. 2016	3,02	44,09	3,05	30,12	1,13	-31,69
Darmayadi et al. 2018			0,40	9,05		

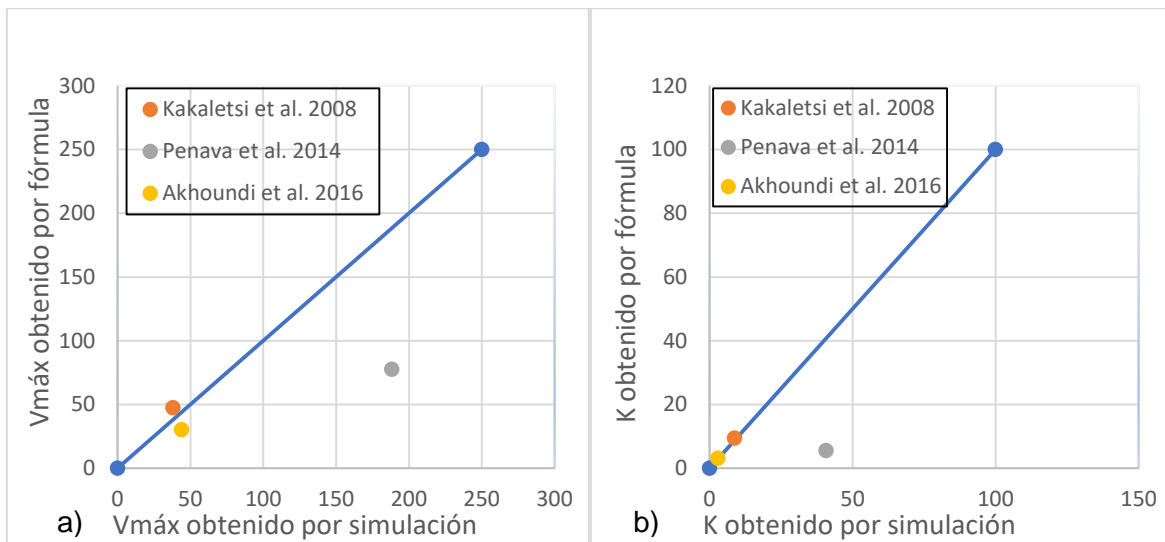


Fig. 5.12 Resultados comparativos de la idealización bilineal en cuanto a: a) Resistencia a carga lateral del marco desnudo y b) Rigidez elástica del marco desnudo, de las diferentes investigaciones con la aplicación del Método de mutuo.

Las aproximaciones de las formulaciones tanto para la idealización trilineal como la bilineal se asemejan, las fórmulas predicen con un error aceptable tanto la resistencia a carga lateral como su rigidez elástica, a excepción del estudio de (Sigmund & Penava, 2014) en el que se tiende a subestimar la resistencia del marco debido a que la fórmula planteada del momento plástico ( $M_p$ ) por (Dubey & Kute, 2013) considera que el marco tiene columnas débiles y vigas fuertes llevando a un mecanismo de falla en el que se producen articulaciones plásticas en la base de la columna y en la unión viga-columna ("sway mechanism"), pero en el estudio el marco tiene columnas fuertes y vigas débiles teniendo otro tipo de falla siendo este marco mucho más resistente a cargas laterales.



Concluyendo que las fórmulas se pueden aplicar para casos en los que el marco desnudo tenga columnas fuertes y vigas débiles. Por lo que se pudo aplicar a los estudios de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) y (Darmayadi & Rusli, 2018) en los cuáles no se contaban con  $K_{bare}$  y  $F_{bare}$ , parámetros necesarios para aplicar las formulaciones de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016)

De igual manera se deduce que los resultados para la investigación de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) y (Darmayadi & Rusli, 2018) estarán influenciados por la aplicación de estas ecuaciones que arrojan valores conservadores.

Los siguientes gráficos muestran por su parte los resultados de la aplicación de las formulaciones referidas a la resistencia a carga lateral máxima en la investigación de Akhoundi et al. 2016, por presentar diferentes porcentajes de aberturas centrales tipo ventana y estar constituidos los marcos rellenos de mampostería por ladrillos huecos.

Partiendo del punto de la obtención del error de las formulaciones como la relación entre; la diferencia entre la resistencia a carga lateral máxima determinada por la ecuación y la determinada mediante la idealización de la simulación numérica o experimental, y este mismo valor idealizado  $\frac{V_f - V_s}{V_s}$  expresado en porcentaje, se realizó el análisis. Entiéndase

que el valor de resistencia a carga lateral máxima se encuentra sobreestimado cuando dicha relación es mayor que 1 y subestimado cuando por el contrario su valor es menor a la unidad.

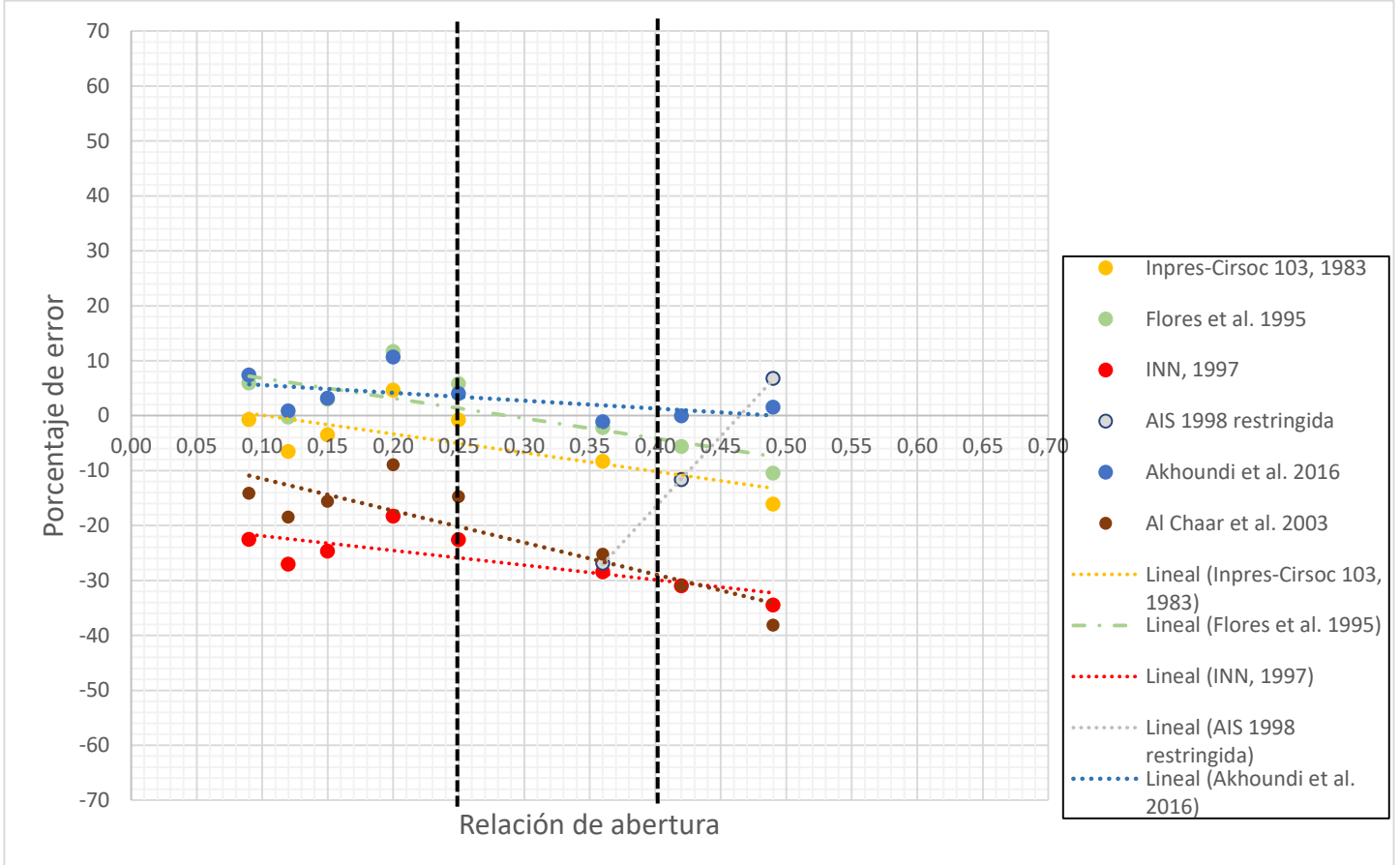


Fig. 5.13 Resultados obtenidos de la idealización trilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ) en las muestras de los marcos rellenos de mampostería con unidades de ladrillos huecos y con aberturas centrales tipo ventana de la investigación de Akhoundi et al. 2016.

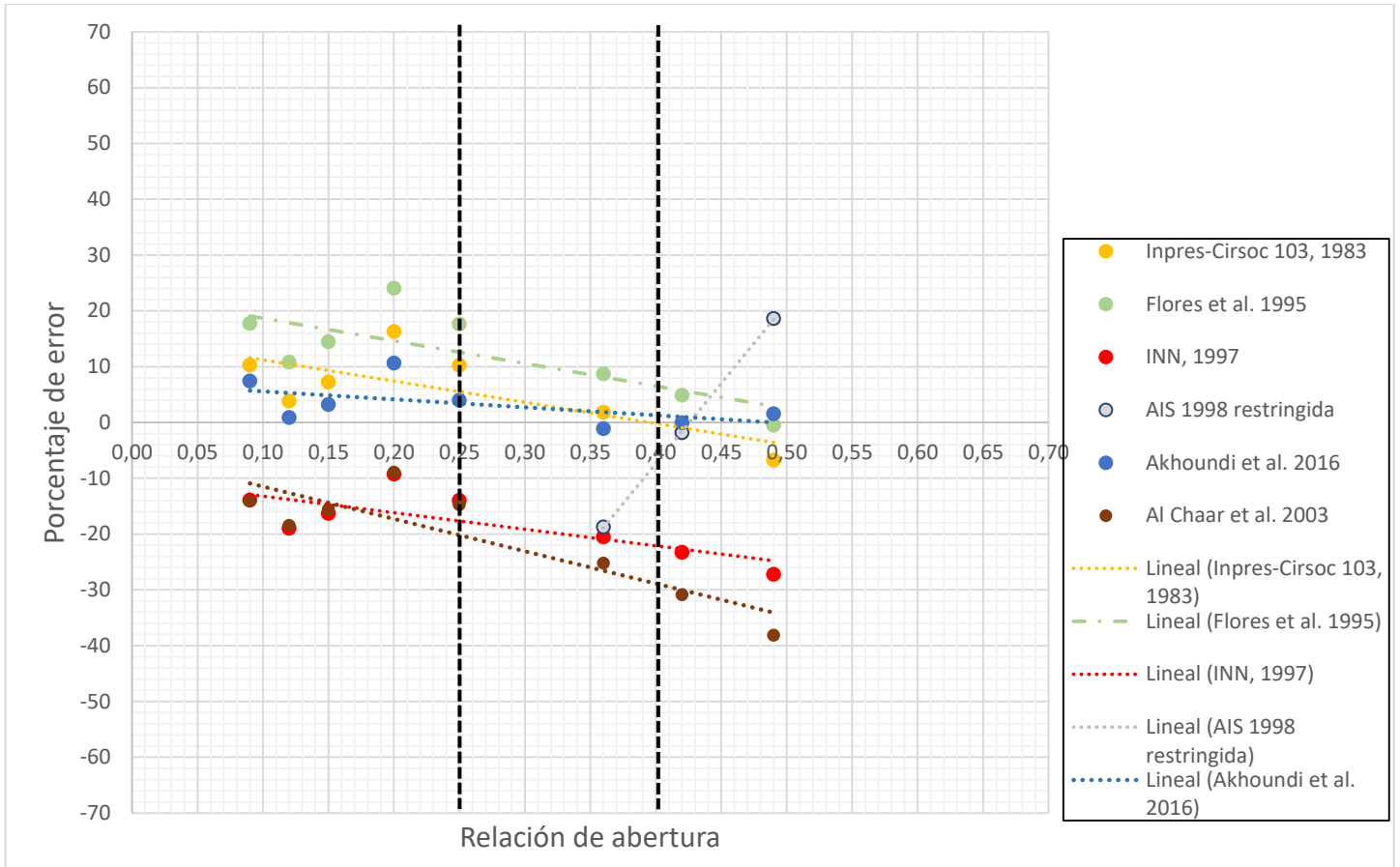


Fig. 5.14 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ) en las muestras de los marcos rellenos de mampostería con unidades de ladrillos huecos y con aberturas centrales tipo ventana de la investigación de Akhoundi et al. 2016.

De las gráficas obtenidas se aprecia variaciones pequeñas entre la idealización bilineal y la trilineal. La ecuación INN. 1997 al igual que la planteada por Al Chaar et al. 2003 subestiman el comportamiento de la mampostería aumentando el valor absoluto del error a medida que aumenta el porcentaje de la abertura. La ecuación recogida en la AIS de 1998, a pesar de su restricción de aplicación para valores de aberturas por encima del 33%, expone en sus resultados que para el rango de 40 al 50% es que los valores se aproximan más al verdadero comportamiento del muro.

La ecuación de Akhoundi para el modelo de su propia investigación es quien arroja los mejores resultados, tanto para la idealización bilineal como para la trilineal, incluyendo una sobreestimación de un 11% y una subestimación de un 2% aproximadamente valores aceptables teniendo en cuenta las incertidumbres del proceso constructivo y de las consideraciones a la hora definir los modelos de análisis. Además de esto se evidencia

que para aberturas entre un 25 y un 50% la misma tiende a mostrar resultados más acordes con el comportamiento del muro.

En el resto de las ecuaciones el rango de error varía entre un 16 y un -7%, para la ecuación de Inpres-Cirsoc 103, 1983 para la idealización bilineal y entre un 5 y un -16% para la idealización trilineal. Mientras que para Flores et al. 1995 el rango varía entre 12 y un -10%, errores obtenidos por la idealización trilineal, por otra parte se tiene errores más altos por la idealización bilineal entre -1 y un 24%.

La siguiente gráfica muestra los resultados de la aplicación de las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima, pero esta vez en la investigación de Okail et al. 2016 con ladrillos sólidos, dividida en los resultados obtenidos para las muestras con aberturas tipo puerta y tipo ventana.

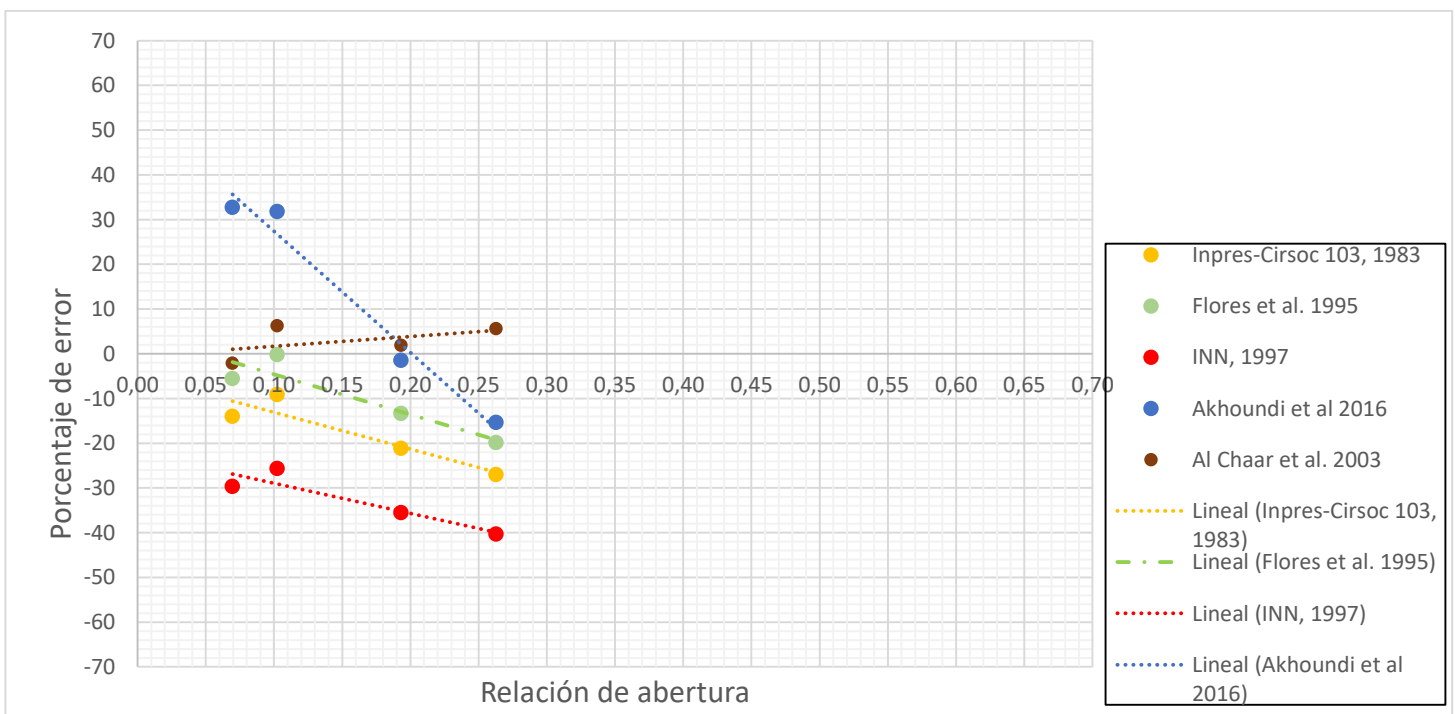


Fig. 5.15 Resultados obtenidos de la idealización trilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ) en las muestras de pared confinada con unidades de ladrillos sólidas y con abertura tipo ventana, de la investigación de Okail et al. 2016

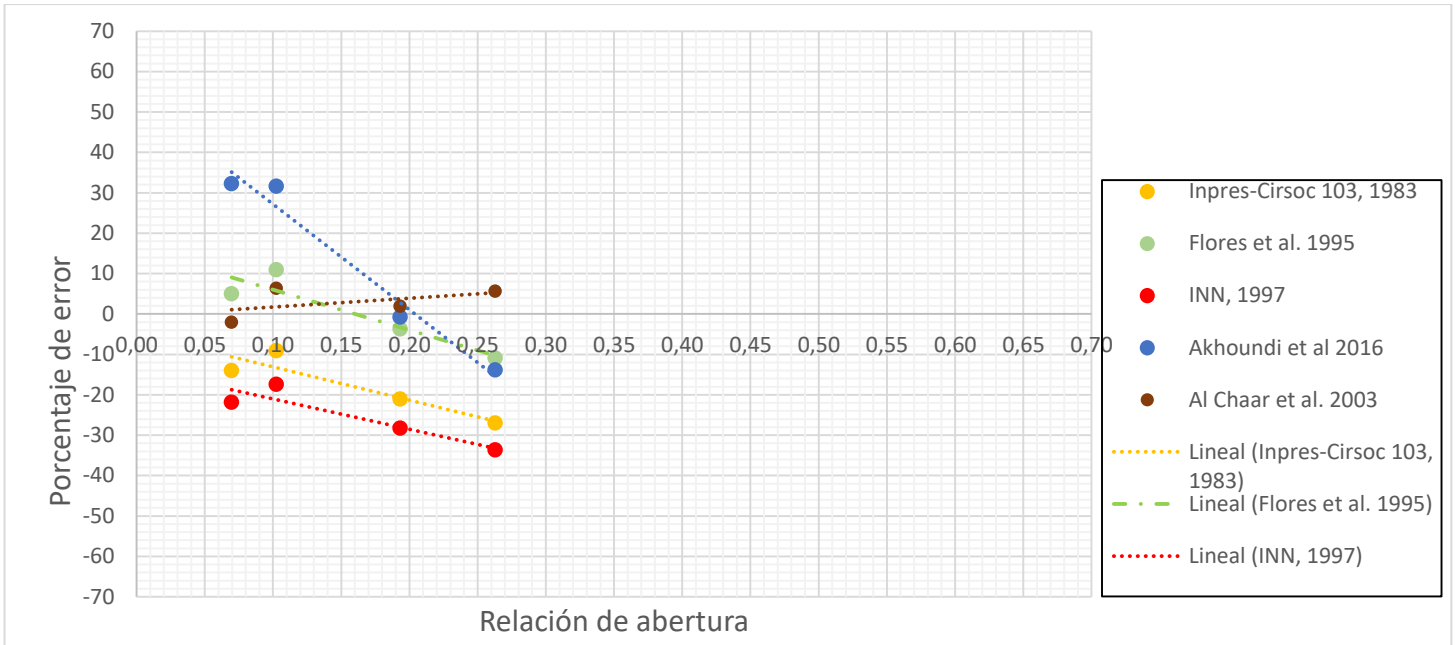


Fig. 5.16 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ) en las muestras de pared confinada con unidades de ladrillos s\u00f3lidas y con abertura tipo ventana, de la investigaci\u00f3n de Okail et al. 2016

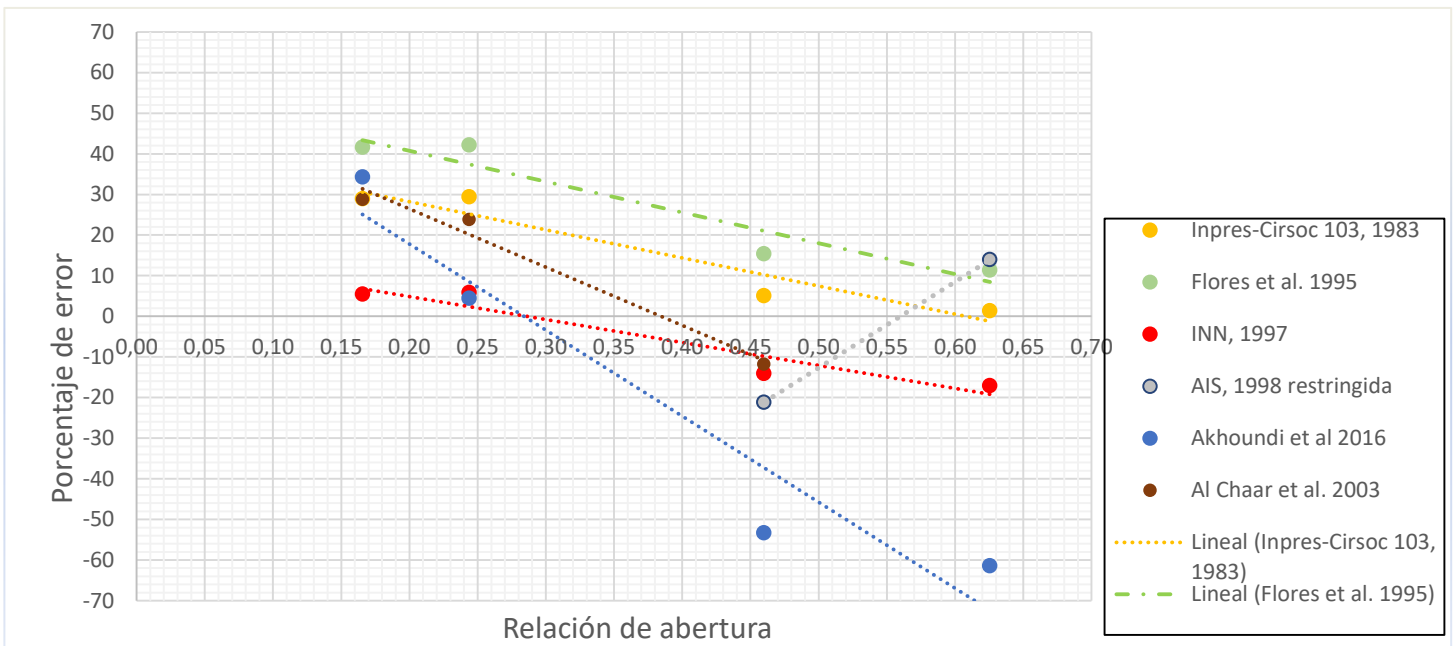


Fig. 5.17 Resultados obtenidos de la idealizaci\u00f3n trilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral m\u00e1xima ( $V_{m\acute{a}x}$ ). en las muestras de pared confinada con unidades de ladrillos s\u00f3lidas y con abertura tipo puerta, de la investigaci\u00f3n de Okail et al. 2016



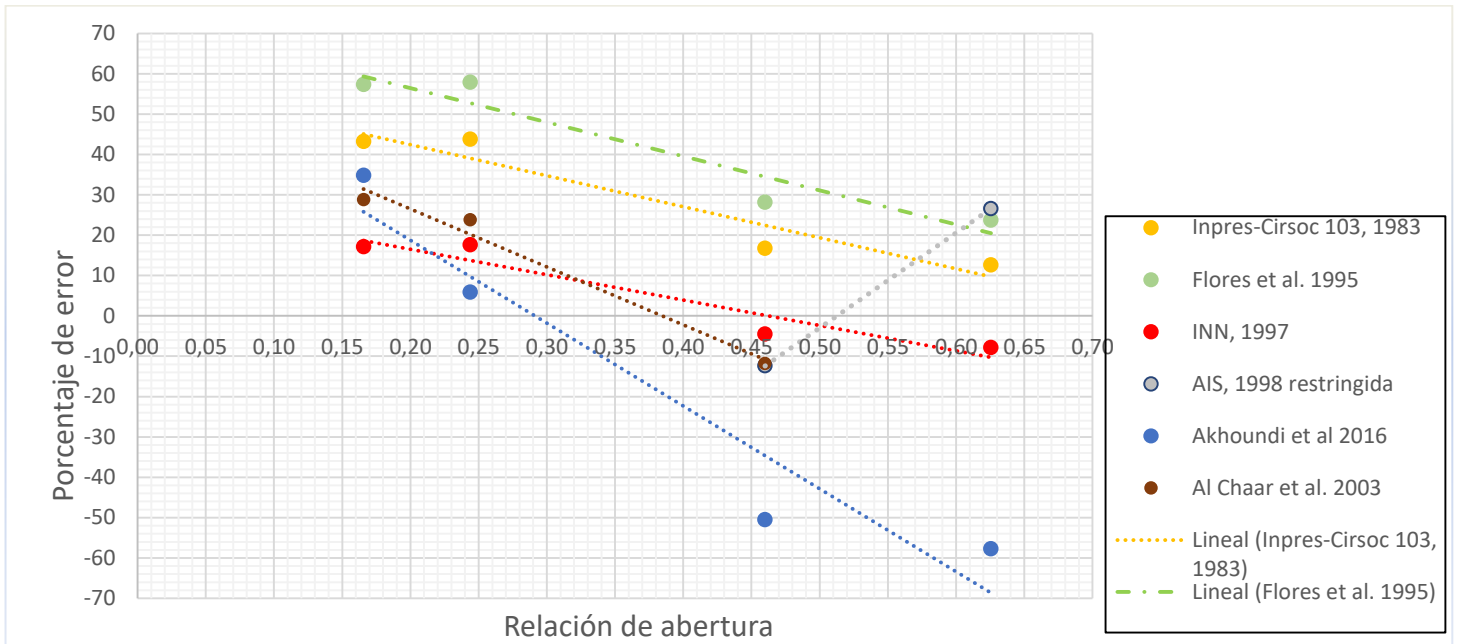
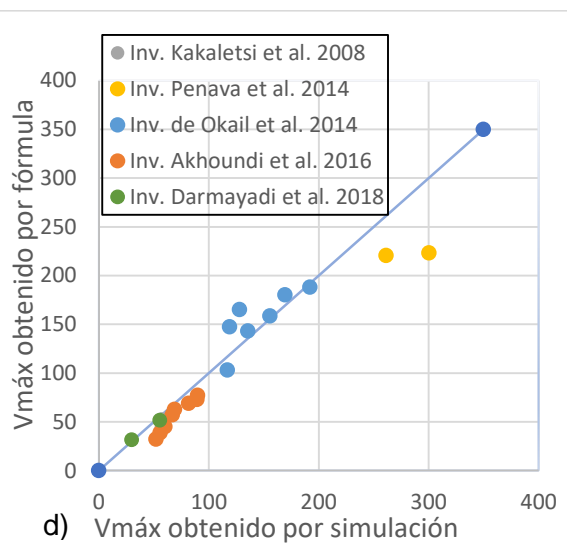
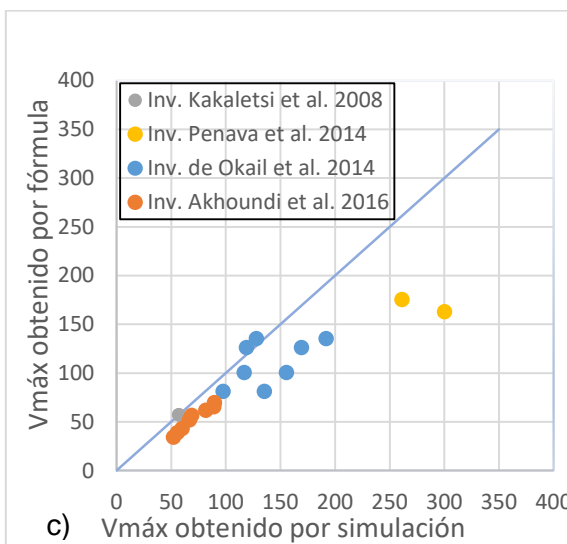
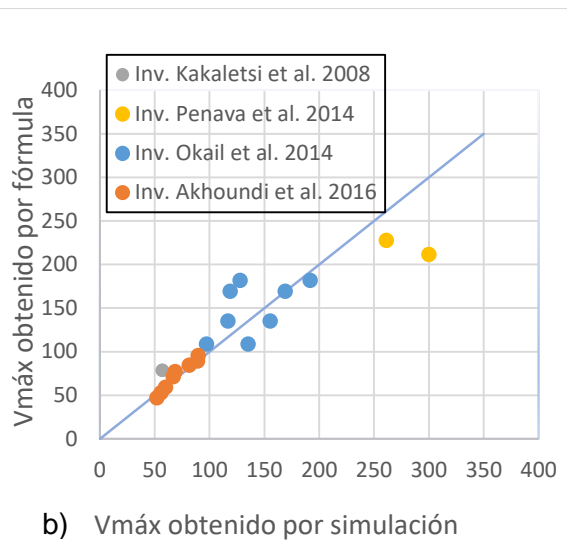
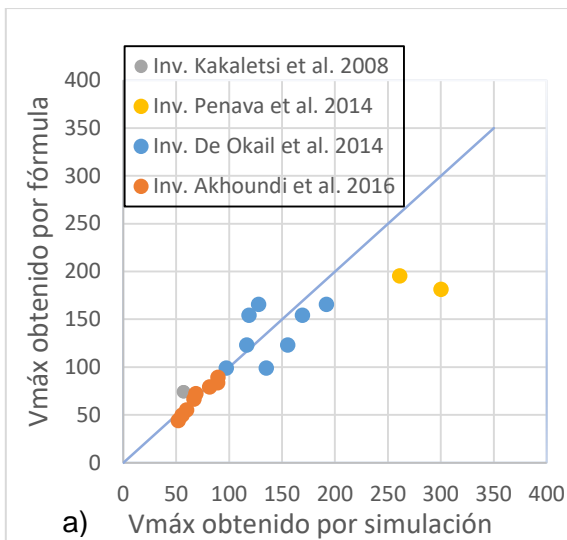


Fig. 5.18 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por las formulaciones de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{máx}$ ), en las muestras de pared confinada con unidades de ladrillos sólidas y con abertura tipo puerta, de la investigación de Okail et al. 2016

(Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) analiza en su investigación la influencia de los tipos de aberturas con diferentes porcentajes en el comportamiento de la pared.

De los gráficos podemos deducir que de las ecuaciones planteadas para el caso de las aberturas tipo ventana la que mejor describe el comportamiento de las paredes confinadas es la del método del factor reductor descrita por (Al-Chaar G. & Issa M A, 2003) con errores menores a un 6% para ambos métodos de idealización. Mientras que para las aberturas tipo puertas el comportamiento varía resultando ser la formulación que mejor describe el comportamiento la descrita por el Instituto Nacional de Normalización (1997) con errores entre un 6 y un -17% para la idealización trilineal y entre 8 y un -18% para la idealización bilineal.

De forma general se muestra la aplicación de cada fórmula en las investigaciones seleccionadas:



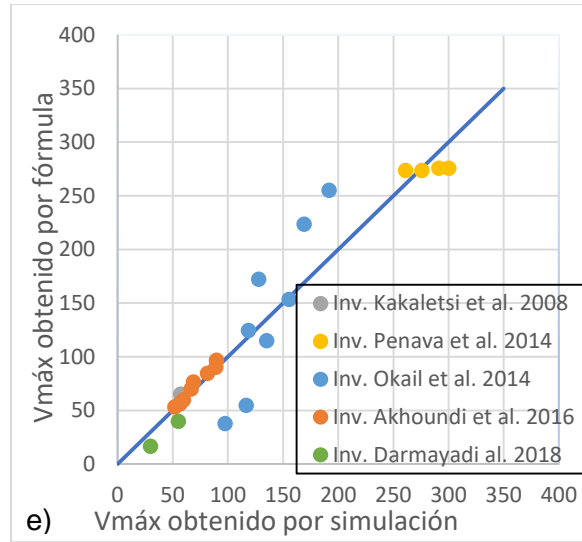
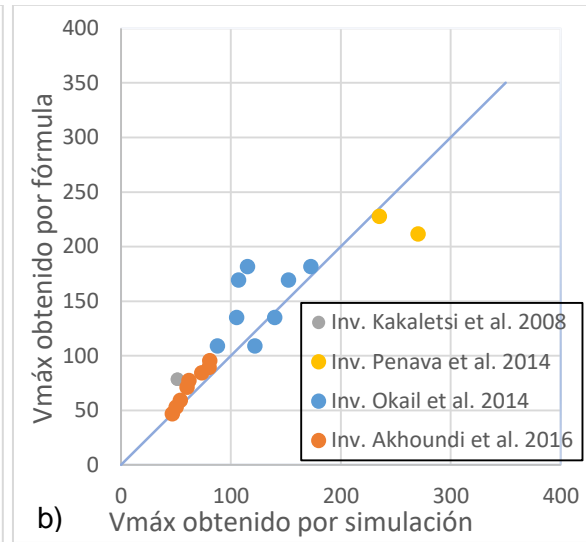
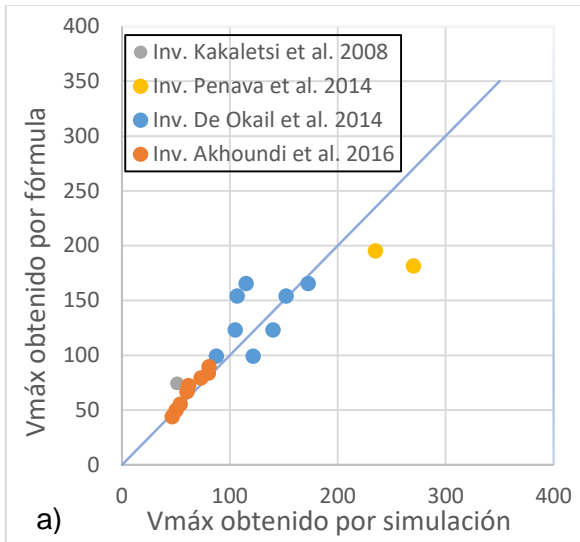


Fig. 5.19 Resultados obtenidos de la idealización trilineal por cada formulación de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{máx}$ ), en las muestras de las diferentes investigaciones: a) Fórmula de Inpres-Cirsoc 103, 1983, b) Fórmula de Flores et al. 1995, c) Fórmula de INN, 1997, d) Fórmula de Al Chaar et al. 2003, e) Fórmula de Akhoundi et al. 2016.



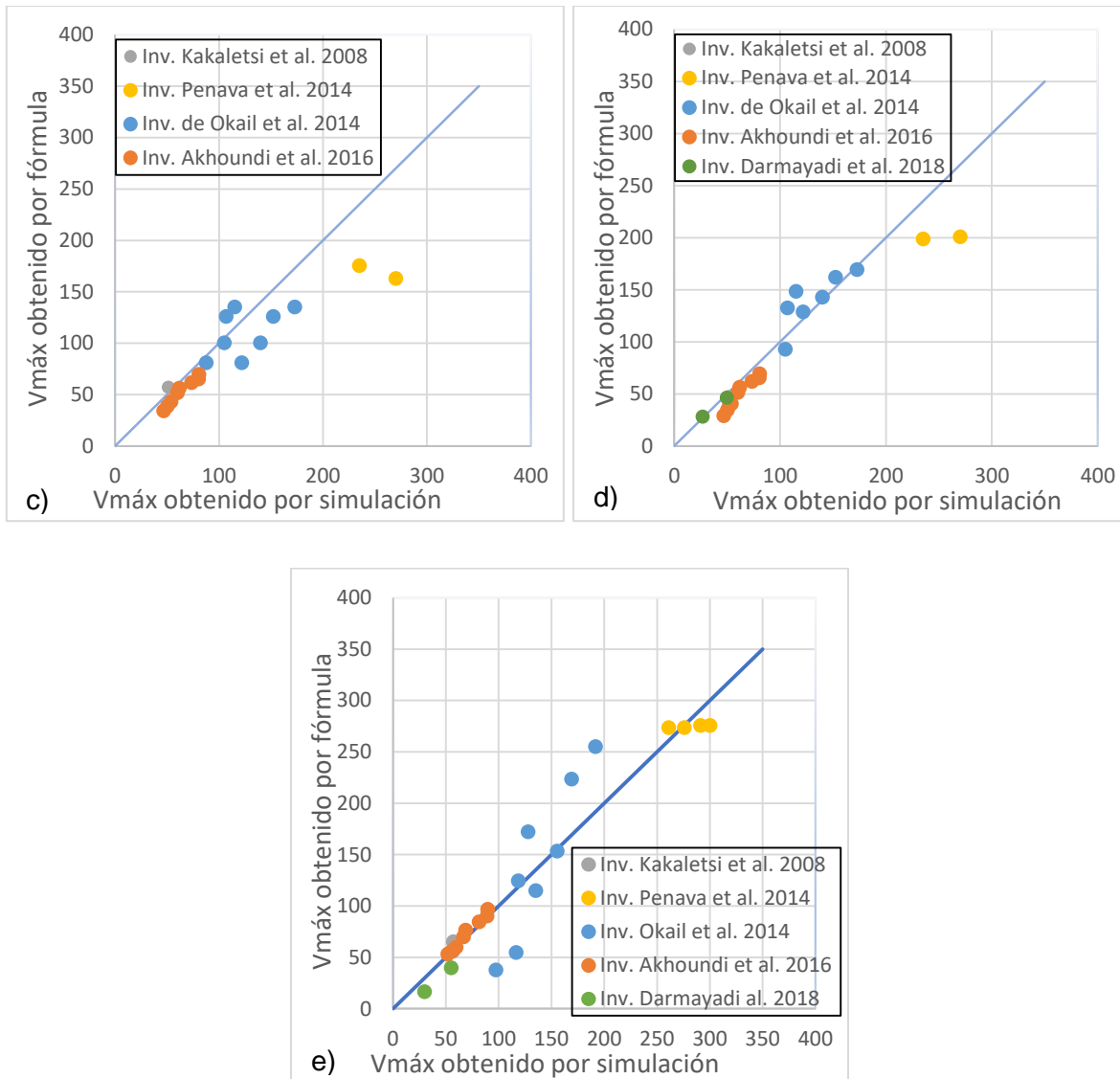


Fig. 5.20 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por cada formulación de resistencia a carga lateral máxima ( $V_{m\acute{a}x}$ ). en las muestras de las diferentes investigaciones: a) Fórmula de Inpres-Cirsoc 103, 1983, b) Fórmula de Flores et al. 1995, c) Fórmula de INN, 1997, d) Fórmula de Al Chaar et al. 2003, e) Fórmula de Akhoundi et al. 2016.

La ecuación de Inpres-Cirsoc 103, 1983 arroja valores aceptables en cuanto a la resistencia máxima ante carga lateral, destacando que en el caso de la investigación de Sigmund Penava para unidades de arcilla hueca la ecuación tiende a subestimar los resultados en mayor medida para ambos métodos de idealización. De igual forma sucede en la ecuación de Flores et al. 1995.

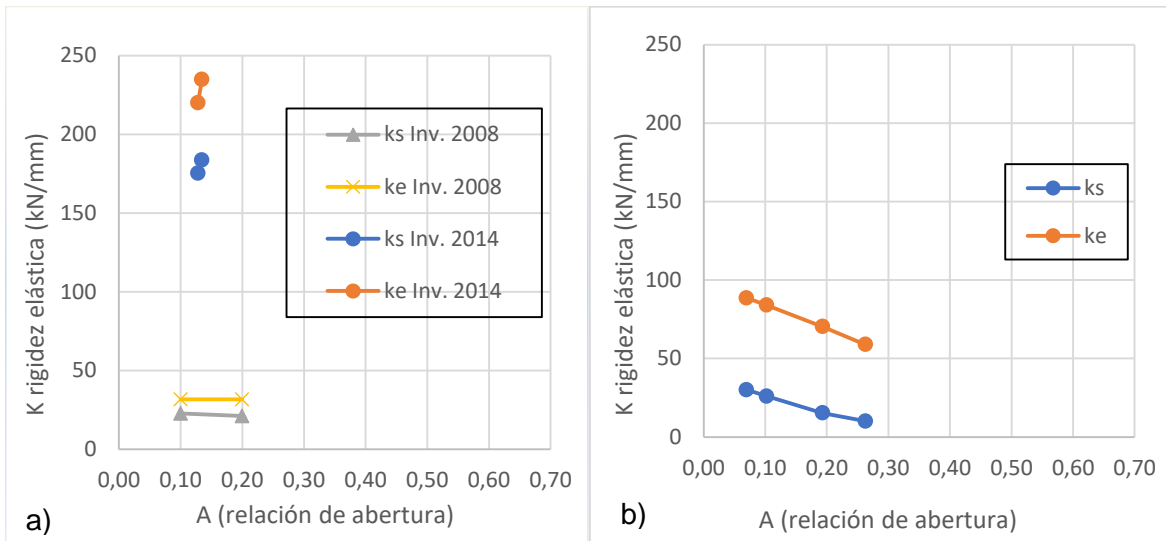
La ecuación de Akhoundi et al. 2016 arroja valores aceptables en cuanto a la resistencia máxima ante carga lateral de los modelos ante análisis pushover, señalando que para

aberturas descentradas en el caso de la investigación de Sigmund Penava la ecuación tiende a subestimar los valores de capacidad de resistencia del marco relleno ante carga lateral. Para la investigación de (Darmayadi & Rusli, 2018) arroja valores aceptables de igual forma.

La ecuación de Akhoundi referida a la resistencia ante carga lateral ofrece mejores resultados para mampostería conformada por ladrillos huecos, así lo ilustra la figura 5.19 e) y 5.20 e), debido a que para las investigaciones de Darmayadi y Okail, los resultados son más dispersos y poseen un porcentaje mayor de error, lo que trae aparejado que tanto se subestimen como sobreestimen los resultados.

La ecuación de AL Chaar 2003 es la que mejor resultados obtiene de las investigaciones de Darmayadi y Okail, los cuales son de ladrillos sólidos.

Un análisis similar fue el realizado para la rigidez elástica y se muestran a continuación los resultados para la ecuación descrita por la teoría de la mecánica de los materiales, (Flores & Alcocer, 1995).



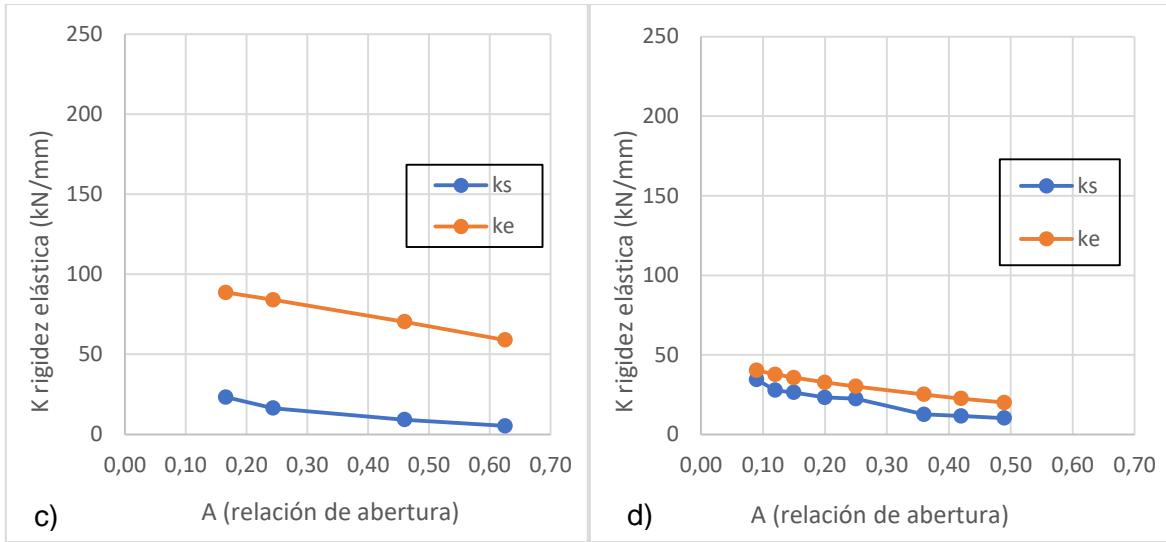
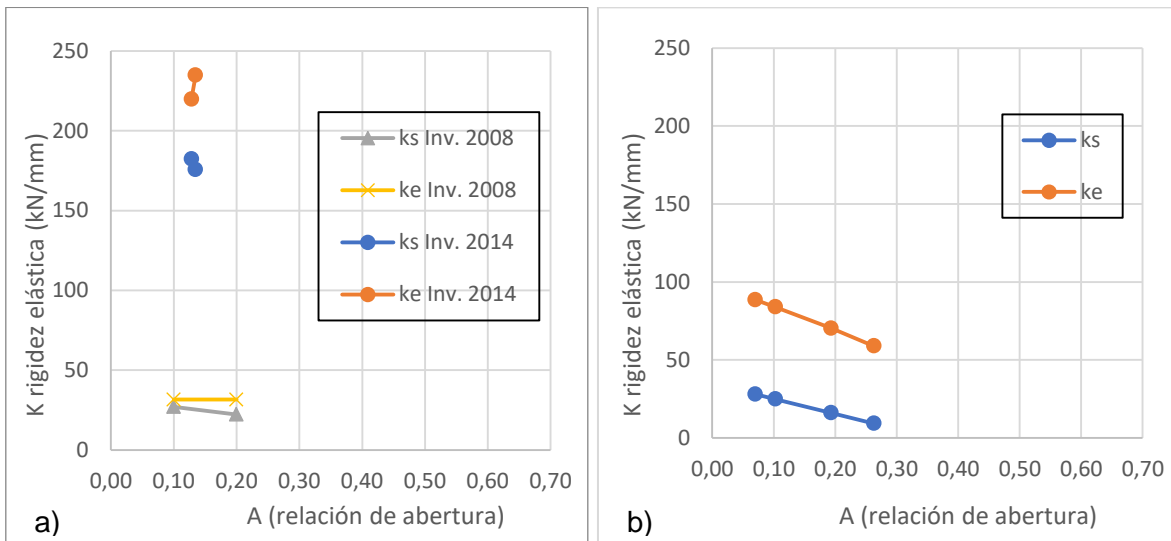


Fig. 5.21 Resultados obtenidos de la idealización trilineal para la formulación de rigidez elástica ( $K_e$ ) dado por Flores et al. 1995 comparados con los resultados de la rigidez elástica de las idealizaciones de simulaciones numéricas o experimentales ( $K_s$ ) de las diferentes investigaciones: a) Inv. de Kakaletsi et al. 2008 e Inv. de Sigmund et al. 2014, b) Inv. de Okail et al. 2014 (ventanas- W), c) Inv. de Okail et al. 2014 (puertas-D), d) Inv. De Akhouni et al. 2016.



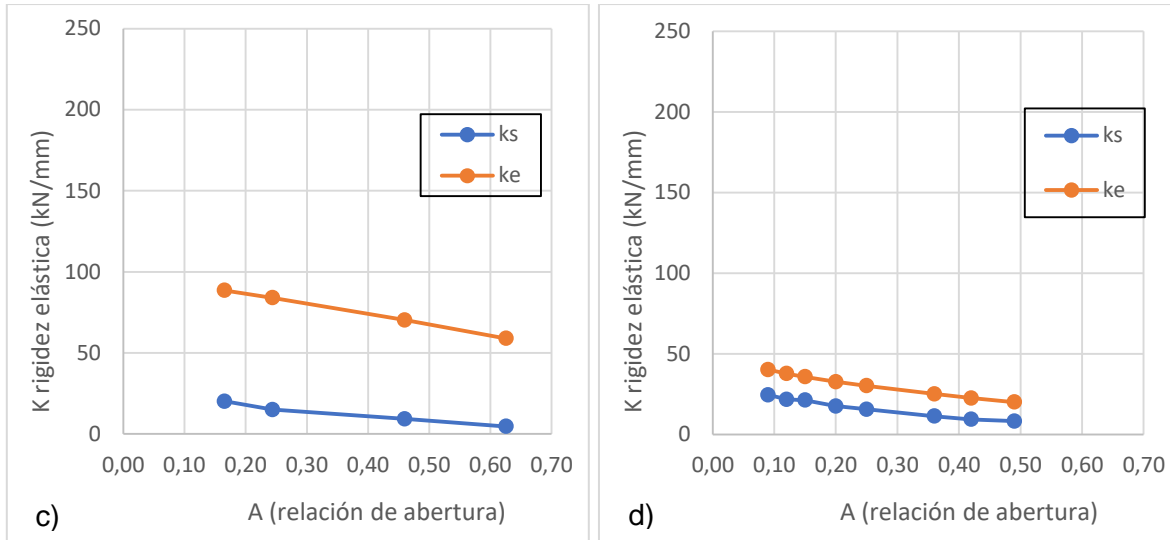


Fig. 5.22 Resultados obtenidos de la idealización bilineal para la formulación de rigidez elástica ( $K_e$ ) dado por Flores et al. 1995 comparados con los resultados de la rigidez elástica de las idealizaciones de simulaciones numéricas o experimentales ( $K_s$ ) de las diferentes investigaciones: a) Inv. de Kakaletsi et al. 2008 e Inv. de Sigmund et al. 2014, b) Inv. de Okail et al. 2014 (ventanas- W), c) Inv. de Okail et al. 2014 (puertas-D), d) Inv. De Akhoundi et al. 2016.

De los gráficos mostrados se aprecia la necesidad de analizar varios porcentajes de aberturas para ilustrar el verdadero rango de aplicación de las fórmulas. Para la investigación de Akhoundi con diferentes aberturas se aprecia la correcta aplicación de la misma para aberturas centradas para la idealización trilineal, por otra parte se observa que para la idealización bilineal se sobreestiman los valores. En general se observa que la ecuación propuesta por Flores et al. 1995 tiende a sobreestimar en gran medida los valores de la rigidez elástica para ambos métodos de idealización. Sin embargo se aprecia la relación de proporcionalidad inversa de la rigidez elástica con el aumento del tamaño de las aberturas.

Se aplica un procedimiento similar para para analizar la ecuación de  $K_{co}$  propuesta por (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016).

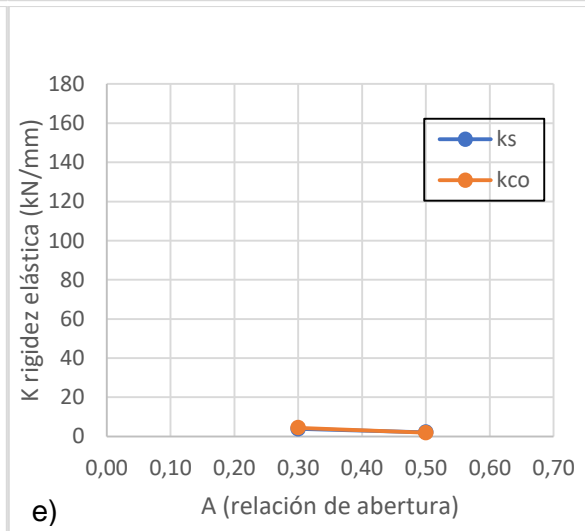
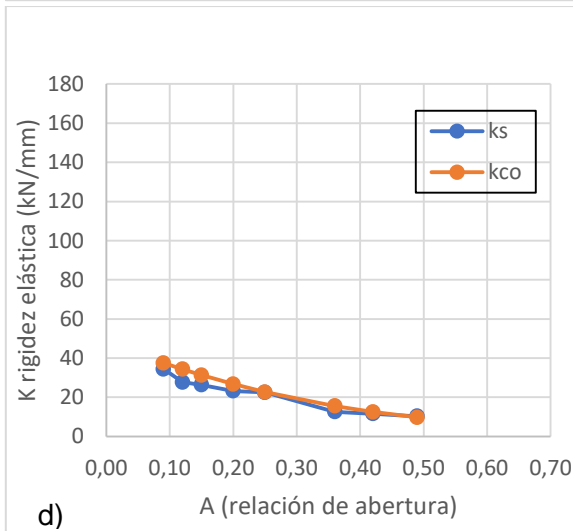
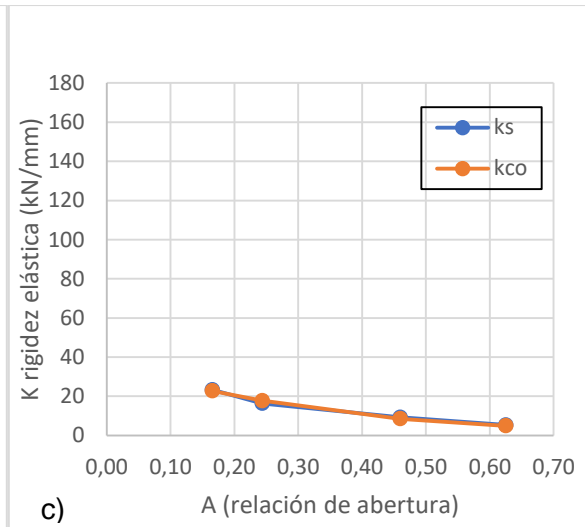
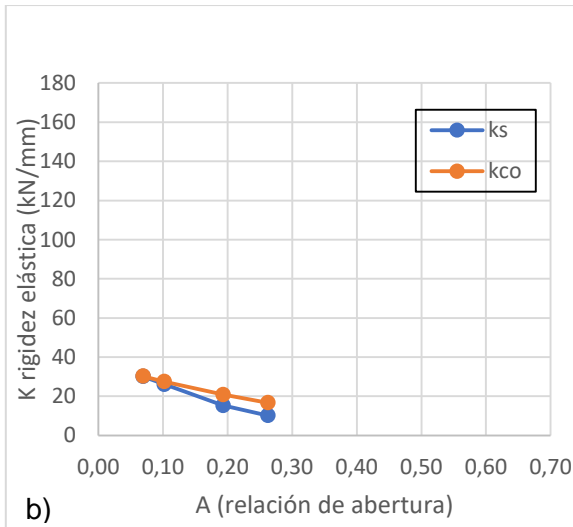
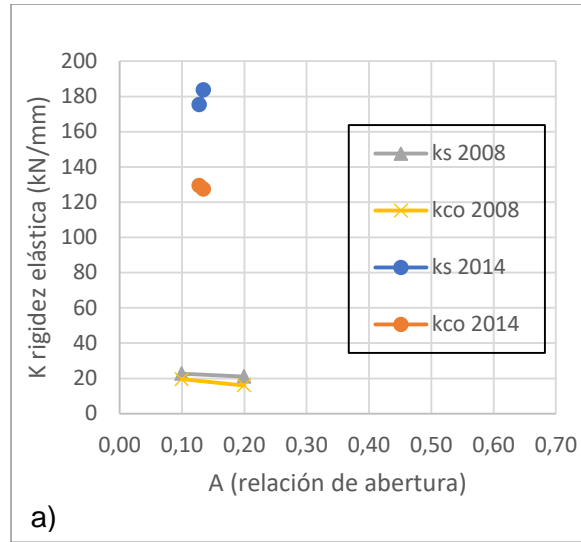
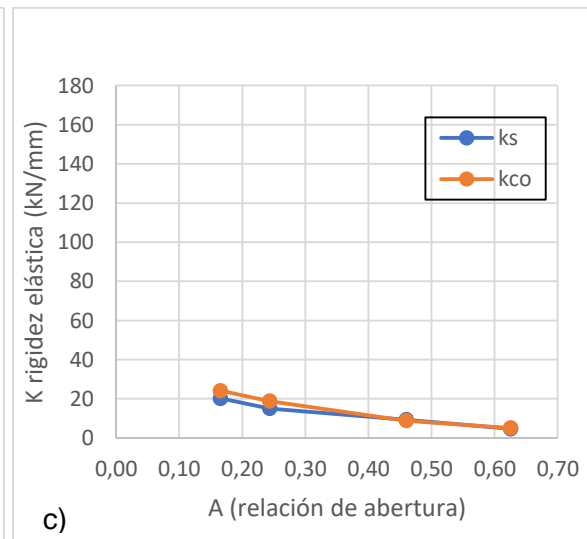
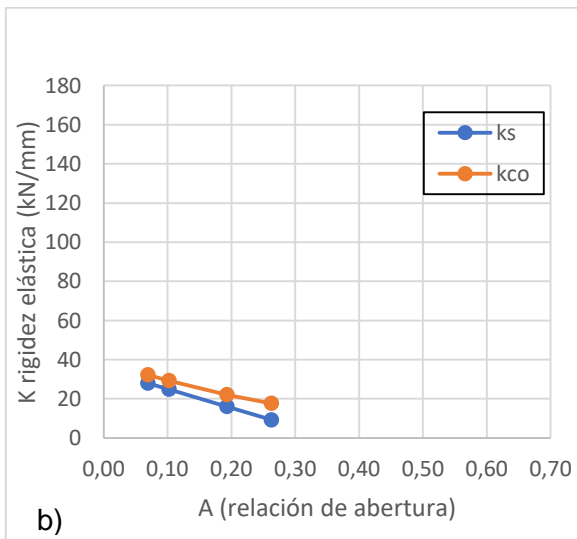
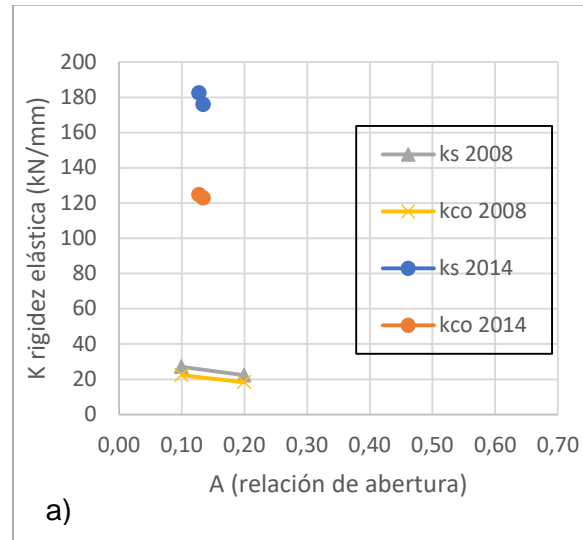




Fig. 5.23 Resultados obtenidos de la idealización trilineal para la formulación de rigidez elástica ( $K_{co}$ ) dado por Akhouni et al. 2016 comparados con los resultados de la rigidez elástica de las idealizaciones de simulaciones numéricas o experimentales ( $K_s$ ) de las diferentes investigaciones: a) Inv. de Kakaletsi et al. 2008 e Inv. de Sigmund et al. 2014, b) Inv. de Okail et al. 2014 (ventanas- W), c) Inv. de Okail et al. 2014 (puertas-D), d) Inv. De Akhouni et al. 2016, e) Inv. de Darmayadi et al. 2018.



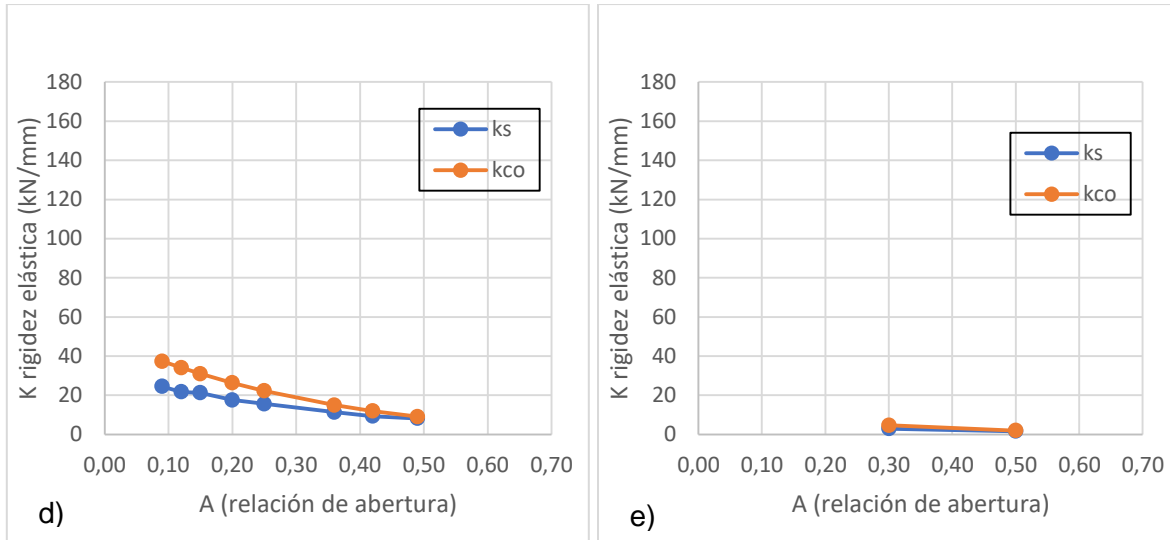
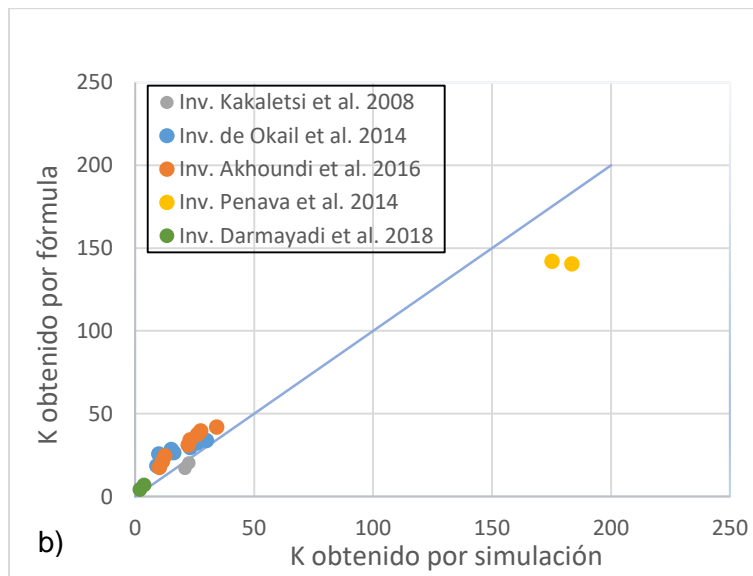
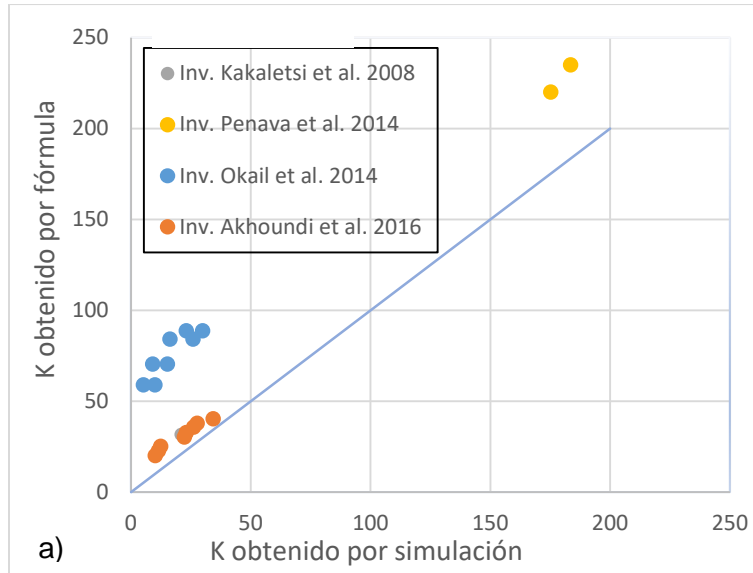


Fig. 5.24 Resultados obtenidos de la idealización bilineal para la formulación de rigidez elástica ( $K_{co}$ ) dado por Akhoundi et al. 2016 comparados con los resultados de la rigidez elástica de las idealizaciones de simulaciones numéricas o experimentales ( $K_s$ ) de las diferentes investigaciones: a) Inv. de Kakaletsis et al. 2008 e Inv. de Sigmund et al. 2014, b) Inv. de Okail et al. 2014 (ventanas- W), c) Inv. de Okail et al. 2014 (puertas-D), d) Inv. De Akhoundi et al. 2016, e) Inv. de Darmayadi et al. 2018.

En los gráficos descritos por la idealización trilineal para esta ecuación se aprecia un comportamiento similar a la anterior, pero destacándose un porcentaje de error muy inferior entre un -30 y un 24% en las investigaciones de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016), (Kakaletsis & Karayannis, 2008) y (Darmayadi & Rusli, 2018), con excepción de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) con el que se obtienen errores de hasta un 64% pero únicamente en la rigidez elástica de las paredes confinadas tipo ventana con el 19 y 26% de abertura, lo que se debe además de las incertidumbres en el análisis de las muestras a que las ecuaciones son para ladrillos huecos y estas muestras poseen ladrillos sólidos.

Por otra parte en los gráficos descritos por la idealización bilineal para esta ecuación se aprecia un comportamiento similar a la anterior, así mismo destacándose un porcentaje de error muy inferior a la de la ecuación de Flores et al. 1995 entre un -31 y un 56% en las investigaciones de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016), (Kakaletsis & Karayannis, 2008) y (Darmayadi & Rusli, 2018), con excepción de (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.) con el que se obtienen errores de hasta un 89%. En general en la idealización bilineal se tienen sobreestimaciones mayores que en la idealización trilineal.

Para una mejor comprensión de los resultados se ilustran de la siguiente forma:



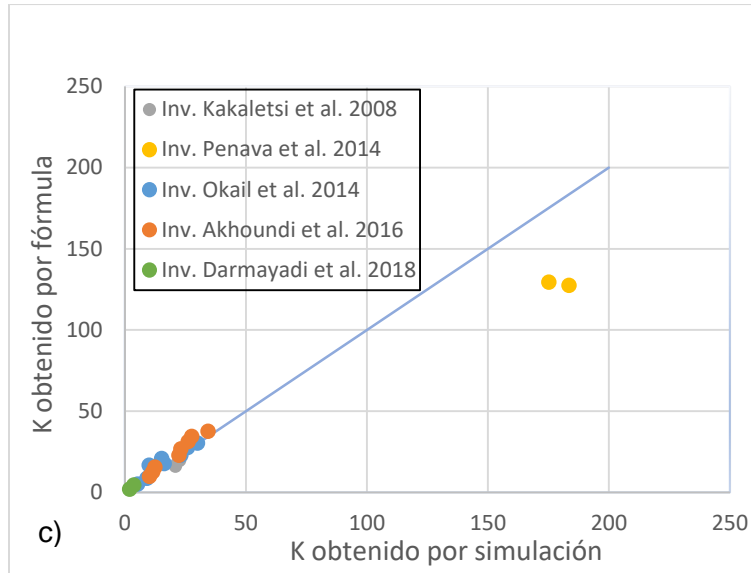
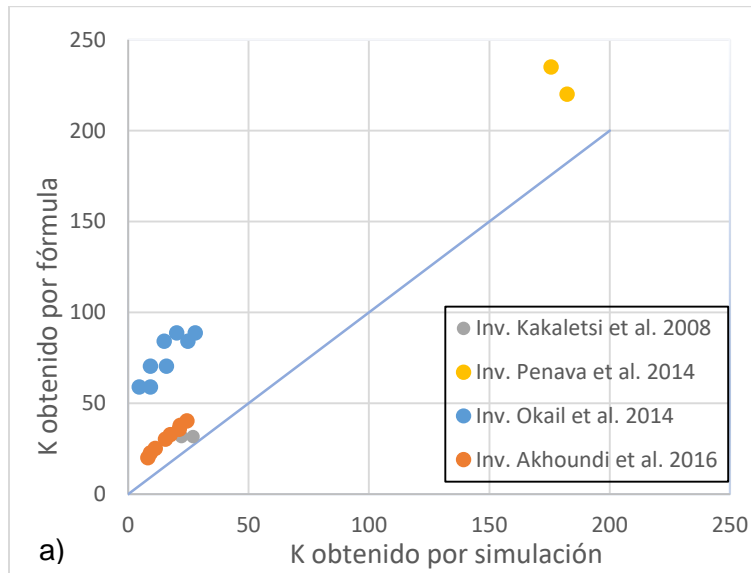


Fig. 5.25 Resultados obtenidos de la idealización trilineal por cada formulación de rigidez elástica ( $K$ ) en las muestras de las diferentes investigaciones: a) Fórmula de Flores et al. 1995, b) Fórmula de Al Chaar et al. 2003, c) Fórmula de Akhoundi et al. 2016.



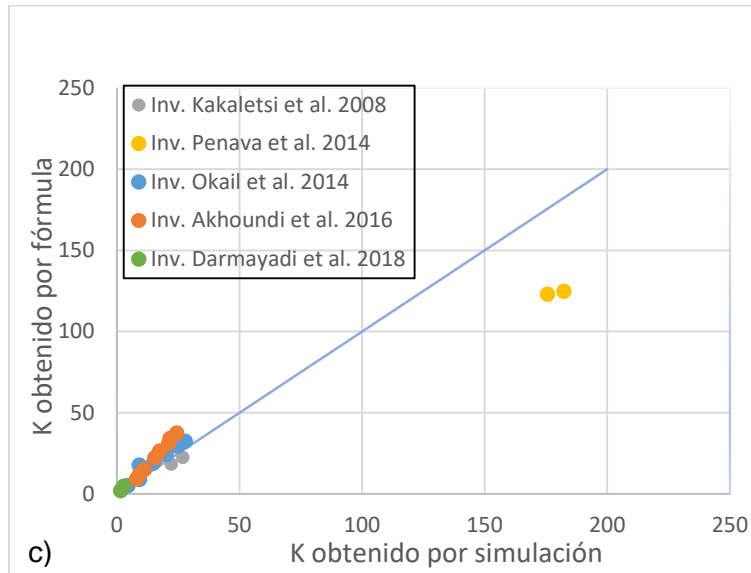
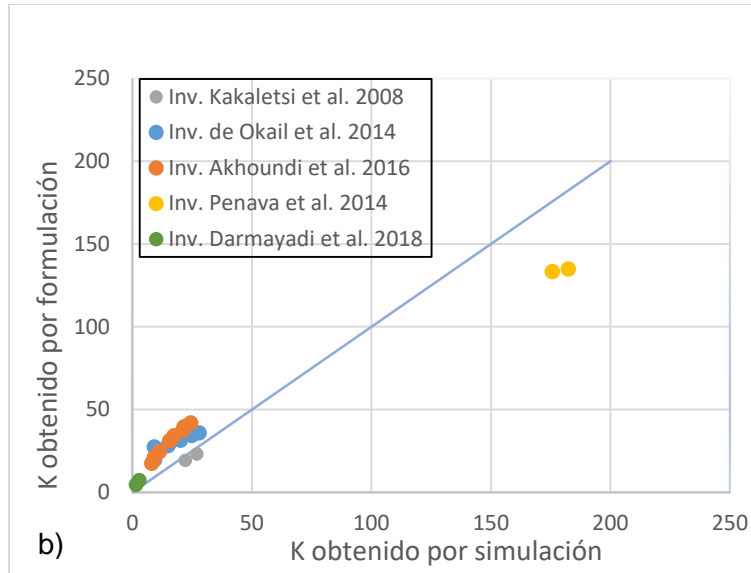


Fig. 5.26 Resultados obtenidos de la idealización bilineal por cada formulación de rigidez elástica ( $K$ ) en las muestras de las diferentes investigaciones: a) Fórmula de Flores et al. 1995, b) Fórmula de Al Chaar et al. 2003, c) Fórmula de Akhoundi et al. 2016.

La formulación propuesta por Flores et al. 1995 tiende a sobreestimar los valores de rigidez elástica, de igual forma la ecuación propuesta por el factor reductor de (Al-Chaar G. & Issa M A, 2003), tiende a sobreestimar los valores de rigidez, pero en menor medida, a diferencia de los valores obtenidos en la investigación de Penava. Mientras que la



formulación propuesta por Akhoundi et al. 2016 es la que tiene mejores resultados en general.

Dado que hay pocos estudios en los que se presenta formulaciones que estudien el comportamiento de las aberturas, cabe mencionar que la aplicabilidad de las formulaciones son para aberturas centrales de diferentes tipos ya sean ventanas o puertas, tanto para rigidez elástica como para resistencia a carga lateral. A excepción de la formulación propuesta por (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) con respecto a la resistencia a carga lateral en la que si considera en su estudio aberturas descentradas, por lo que esta fórmula es la única que se ha aplicado para las aberturas descentradas del estudio de (Sigmund & Penava, 2014). Así mismo hay pocos estudios en los que se presentan las curvas pushover, los parámetros necesarios para aplicar las formulaciones y las propiedades de los materiales, razón por la cual se tiene un corpus no tan extenso y limitado para el análisis.

La siguiente tabla presenta un resumen de las formulaciones que mejor predicen el comportamiento de las paredes con aberturas de los diferentes estudios desarrollados en cuanto a rigidez elástica y de resistencia a carga lateral:

Tabla 5.13 Resumen del análisis predictivo de las formulaciones estudiadas en cuanto a la rigidez elástica y resistencia a carga lateral del corpus de estudio seleccionado mediante la idealización trilineal.

Tipo de ladrillos	Estudio	Tipo de abertura	Mejor formulación de rigidez elástica	Mejor formulación de resistencia a carga lateral	Rango del porcentaje de error de rigidez elástica	Rango del porcentaje de error de resistencia a carga lateral
Huecos	Kakaletsis & Karayannis, 2008	Puerta y ventana centrada	Akhoundi	Akhoundi	-14 al 24%	Akhoundi: -2 al 13%
	Sigmund & Penava, 2014	Puerta y ventana centrada y descentrada	Akhoundi	Akhoundi	-26 al -30%	Akhoundi: -8 al 5%
	Akhoundi et al. 2016	Ventana centrada con diferentes porcentajes de abertura	Akhoundi	Akhoundi y Flores	-6 al 24%	Akhoundi: -1 al 11% Flores: -10 al 12%
Sólidos	Okail et al. 2014	Ventanas y puertas centradas con diferentes porcentajes de abertura	Akhoundi	Al Chaar e Inpres, Cirsoc	-7 al 64%	Al Chaar: -24 al 29 % Inpres, Cirsoc: -27 a 29%
	Darmayadi & Rusli, 2018	Ventanas centradas con diferentes porcentajes de abertura	Akhoundi	Al Chaar y Akhoundi	-11 al 15%	Al Chaar: -7 al 5% Akhoundi: -29 al -46%



## Conclusiones

La mayoría de las investigaciones analizadas no tratan a profundidad el tema de la influencia del tipo y localización de las aberturas en el comportamiento de los muros de mampostería ante eventos sísmicos. Experiencias internacionales basadas en distintos modelos de simulación, han demostrado que las aberturas en las paredes confinadas tienen una incidencia significativa en su comportamiento ante carga lateral, en particular en la rigidez elástica y en la capacidad de resistencia a carga lateral. Con el aumento del tamaño de las aberturas tanto la rigidez elástica y la capacidad de resistencia a carga lateral disminuyen. El presente trabajo se planteó la exploración en la literatura de investigaciones que aborden el problema y, más concretamente, la selección de una fórmula que dé cuenta de esta degradación de características con calidad predictiva aceptable.

Las fórmulas estudiadas arrojan resultados acertados cuando se analizan paredes con aberturas centrales (con diferentes porcentajes de tamaño de las aberturas); no ocurre así para el análisis de modelos con diferentes tipos y posiciones de las aberturas.

Referente a las fórmulas analizadas, se aprecia que las mismas tienden tanto a subestimar como sobreestimar, pero a la vez arrojan resultados más acertados cuando se aplican sobre paredes de mampostería compuesta por ladrillos huecos.

La mejor formulación para evaluar la resistencia a carga lateral de paredes confinadas con aberturas es la propuesta por (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) para ladrillos huecos. Dicha fórmula considera el descentramiento para la resistencia a carga lateral, pero no lo considera en lo relativo a la rigidez, obteniendo valores de hasta un 13% de error para el análisis de resistencia a carga lateral en los estudios de Akhoundi et al. 2016, Kakaletsis & Karayannis, 2008 y de Sigmund & Penava, 2014.

La mejor formulación para evaluar la rigidez elástica para todo tipo de ladrillos es la formulada por (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016), no considera el descentramiento puesto que solo se han considerado aberturas centrales. Se obtienen errores hasta de un 33% en todo tipo de aberturas centrales para los diferentes estudios seleccionados, a excepción de la pared con el 29% de abertura tipo ventana que exhibe un error del 64% del estudio de Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.





Respecto a la resistencia a carga lateral, la fórmula de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016) para las investigaciones de Okail y Darmayadi es más imprecisa pues se tienen errores hasta de un -61%. Esto se debe a que las investigaciones se desarrollan con ladrillos sólidos y las fórmulas de Akhoundi se desarrollaron para ladrillos huecos, además de que ninguna brinda los valores de resistencia aportados por el marco que confina la mampostería, por lo que se aplicó la formulación para la resistencia a carga lateral del marco desnudo ( $F_{bare}$ ) propuesta en el apartado 4.3, la cual subestima su comportamiento.

En cuanto a la mampostería con ladrillos sólidos de las investigaciones de Okail y Darmayadi, se destaca la ecuación del factor reductor descrita por (Al-Chaar G. & Issa M A, 2003) dando errores del -24 al 29%, aspectos estos relacionados con la resistencia a carga lateral.

En general, para la idealización trilineal se tienen menores errores tanto para la capacidad a resistencia lateral como para la rigidez elástica en comparación con la idealización bilineal, por lo que los resultados de esta idealización han sido considerados en las conclusiones.

## Recomendaciones

Profundizar en el análisis de la influencia de las aberturas en el comportamiento ante cargas laterales de las paredes de ladrillo confinadas destacando la influencia del descentramiento en los mismos. Los estudios existentes al respecto son aún escasos.

Se debe incursionar más fuertemente en el empleo de micromodelos, con el uso de elementos finitos, de los cuales se pueden esperar resultados más acertados en cuanto a rigidez elástica y capacidad de resistencia de los marcos desnudos sometidos a carga lateral, ya que se tendrían mejores resultados de la calidad predictiva de la formulación de (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016).

En el apartado 4.3 se mencionaron formulaciones para evaluar la rigidez elástica y la resistencia a carga lateral de paredes confinada con aberturas propuestas por (Ranjbaran F. & M., 2012), las cuales no se aplicaron pues consideraban únicamente paredes con espesores de 22 y 35 cm que no son característicos de las paredes de Cuenca y que no



fueron considerados en el corpus seleccionado de estudios. Por lo que se recomienda aplicarlas y analizar su calidad predictiva.

Realizar análisis para muros de viviendas de dos niveles o más, así como para relaciones de aspecto mayores, paredes más esbeltas, donde el cambio de distribución de esfuerzos en el interior del muro puede modificar el modo de falla y la resistencia del mismo, con el aumento de la esbeltez, las deformaciones por flexión comienzan a aumentar reduciendo la capacidad de resistencia de los muros.



## BIBLIOGRAFÍA

- ACI 318. (2019). *American Concrete Institute. Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-19) y Comentario (ACI 318SR-19)*. Detroit, Michigan.
- Acosta, D., Vivas, C., Castilla, E., & Fernández, N. (2005). Sistema de muros de mampostería estructural confinada con perfiles de acero para la vivienda de bajo costo. *Tecnología y Construcción*, 21(II), 55-81. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/267079014.pdf>
- Aguilar, G., & Meli, R. (1996). Influence of Horizontal Reinforcement on the Behaviour Confined Masonry Walls. *Eleventh World Conference on Earthquake(1380)*.
- Aguilar, V. (2013). *Estimacion de la resistencia al corte de muros de albañilería armada. Estudio comparativo y uso de redes neuronales artificiales*. [Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile], Valdivia, Chile. Obtenido de <https://bit.ly/3vHn5M7>
- Akhoundi, F., Lourenço, P., & Vasconcelos, G. (2016). Numerically based proposals for the stiffness and strength of masonry infills with openings in reinforced concrete frames. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 869-891. doi:10.1002/eqe.2688
- Al-Chaar G., L. G., & Issa M A. (2003). Effects of openings on structural performance of unreinforced masonry infilled frames. *Large scale structural testing, M. A. Issa and Y. L. Mo, eds., American Concrete Institute, Detroit*.
- Al-Chaar, G. (2002). Evaluating strength and stiffness of unreinforced masonry infill structures. *Rep. No. ERDC/CERL TR-02-1, U.S. Army Corps of Engineers, Champaign, IL*.
- Alcocer, S., Arias, J., & Vázquez, A. (2004). Response assessment of Mexican confined masonry structures through shaking table tests. *13th World Conference on Earthquake Engineering(2130)*. Obtenido de <https://bit.ly/3w0LZGs>
- Alcocer, S., Hernández, H., & Sandoval, H. (2013). ENVOLVENTE DE RESISTENCIA LATERAL DE PISO PARA ESTRUCTURAS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 89*, 24-54.



- Alcocer, S., Meli, R., Sánchez, T., & Flores, L. (1994). Comportamiento ante Cargas Laterales de Sistemas de Muros de Mampostería Confinada con Diferentes Grados de Acoplamiento a Flexión. *Cuaderno de Investigación*(17), 53-76.
- Alvarez, J. M., & Alcocer, S. M. (2001). *Estudio Analítico sobre el Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería Confinada con Aberturas*. A. H. Barbat.
- (s.f.). *Análisis sísmico aproximado de edificios*. Cap. 6.
- Architectural Institute of Japan (AIJ). (1999). Ultimate Strength and Deformation Capacity of Buildings in Seismic Design. *Committee for Concrete and Masonry Wall Buildings Structures*, 592-593.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (ACIS). (1998). *Normas colombiana de diseño y construcción sismo resistente : Ley 400 de 1997 - Decreto 33 de 1998*. Santafe de Bogotá, Colombia. Obtenido de <https://bit.ly/3u6IEUP>
- Asteris, P. G. (2003). Lateral stiffness of brick masonry infilled plane frames. *J. Struct. Eng.*, 129(8), , 1071–1079.
- Asteris, P., Chrysostomou, C., Giannopoulos, I., & Eleni, S. (2011). Masonry infilled reinforced concrete frames with openings. *Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*. Retrieved from <https://bit.ly/2OL6kil>
- Asteris, P., Kakaletsis, D., & Chrysostomou, C. (2011). Failure modes of In-filled frames. *Electronic Journal of Structural Engineering*, 11(1), 11-20. Retrieved from <https://ktisis.cut.ac.cy/handle/10488/7690>
- Bermeo, C., & León, A. (2016). *Identificación, catalogación y análisis de las obras arquitectónicas del maestro Juan Luis Lupercio Chumbi*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca], Cuenca, Ecuador. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/26225>
- Billai, S. U., & Menon, D. (2005). *Reinforced Concrete Design*. New Delhi: McGraw-Hill.
- Blog sobre la Confederación Cañari del Ecuador. (6 de octubre de 2011). *Cultura Cañari*. Obtenido de Ingapirca de Chosbi: <http://culturacanari.blogspot.com/2011/10/ingapirca-de-chobshi.html>



- Borrero, A. (2006). Cambios históricos en el paisaje de Cuenca, siglos XIX-XX. *Revista ecuatoriana de historia*, 24(II), 107-134. Obtenido de <https://repositorio.uasb.edu.ec/bitstream/10644/1785/1/RP-24-ES-Borrero.pdf>
- Bourzam, A., Goto, T., & Miyajima, M. (2008). Shear Capacity Prediction of Confined Masonry Walls Subjected to Cyclic Lateral Loading. *Doboku Gakkahi*, 64(4), 692-704.
- Bravo, D., & Flores, L. (2015). *Análisis estático no lineal de paredes de ladrillo de las casas de Cuenca*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca], Cuenca, Ecuador. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23119>
- Bravo, D., & Flores, L. (2015). *Análisis estático no lineal de paredes de ladrillo de las casas de Cuenca*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca], Cuenca, Ecuador. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23119>
- Brzev, S. (2007). Earthquake-resistant confined masonry construction. *National Information Center of Earthquake Engineering*. Obtenido de [https://www.preventionweb.net/files/2732\\_ConfinedMasonry14Dec07.pdf](https://www.preventionweb.net/files/2732_ConfinedMasonry14Dec07.pdf)
- Cemex. (2021). *Cubos vs Cilindros / cmex para industriales*. Obtenido de <http://cemexparaindustriales.com/cubos-vs-cilindros/>
- Cornejo, T., & Hernández, B. (2013). Resistencia lateral de estructuras de mampostería confinada. *Ingeniería*(17-3), 179-190.
- Cornejo, V. T., & Hernández B. H. (2013). Resistencia lateral de estructuras de mampostería confinada. *Ingeniería*, vol. 17, núm. 3, 179-190.
- Crisafulli, F. (1997). *Seismic Behaviour of Reinforced Concrete Structures with Masonry Infills*. Department of Civil Engineering. doi:10.26021/1979
- Crisafulli, F. (2000). Mampostería encadenada: problemas y recomendaciones para el diseño sismorresistente. *Desastres Sísmicos: Escenarios, Seguridad y Prevención en Ciudades de Países en Desarrollo*. doi:ISBN 980-00-1637-6
- Crisafulli, F., & Carr, A. (2007). Proposed Macro-Model for the Analysis of Infilled Frame Structures. *40*(2), 69-77. doi:10.5459/bnzsee.40.2.69-77



- D. J. Kakaletsis, C. G. (2008). Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading. *Journal of Earthquake Engineering*, 12:197–221. doi:10.1080/13632460701299138
- Dalmau, M., & Vilardell, J. (2003). *Estabilidad III-Capítulo III: Análisis plástico de las estructura 5- Consideraciones generales*. Barcelona: Universidad de Catalunya.
- Darmayadi, D., & Rusli, M. (2018). *Element Modeling of Masonry Wall With Opening Under Lateral Force*. Indonesia.
- Dubey, S. K., & Kute, S. (2013). Experimental investigation on the ultimate strength of partially infilled and steel-braced reinforced concrete frames. *International Journal of Advanced Structural Engineering*.
- Durrani, A. J., & Luo, Y. H. (1994). *Seismic retrofit of flat-slab buildings with masonry infills*. National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY: Proc., NCEER Workshop on Seismic Response of Masonry Infills.
- Elwood Kenneth J., M. A. (2007). Update to ASCE/SEI 41 Concrete Provisions. *Earthquake Spectra*, Volume 23, No. 3, 493–523.
- Erberik, M., Citiloglu, C., & Erkoseoglu, G. (2018). Seismic performance assessment of confined masonry construction at component and structure levels. *Bulletin of Earthquake Engineering*. doi:10.1007/s10518-018-0468-8
- ESECMASE. (2007). Enhanced Safety and Efficient Construction of Masonry Structures in Europe. *D 7.1a Test Results on the Behavior of Masonry under Static*. Obtenido de [www.esecmase.org/doc/deliverables\\_public/D\\_7.1\\_UNIK.pdf](http://www.esecmase.org/doc/deliverables_public/D_7.1_UNIK.pdf)
- Eshghi, S., & Pourazin, K. (2009). In-plane behavior of bonfined masonry walls-with and without opening. *International Journal of Civil Engineering* 7, 1(2), 113-120.
- Flores L, & Alcocer S. (2001). *Estudio Analítico de Estructuras de Mampostería confinada*. Centro Nacional de Prevención de Desastres, CENAPRED, Informe de tesis de maestría.



- Flores, L., & Alcocer, S. M. (1995). *Estudio Analítico de Estructuras de Mampostería Confinada*. Informe de tesis de maestría, Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).
- Flores, L., Mendoza, J. A., & Reyes, C. (2004). Ensayo de Muros de Mampostería con y sin Refuerzo Alrededor de la Abertura. *Memorias del Catorceavo Congreso Nacional de Ingeniería Estructural*, 6-10.
- Gobierno del Distrito Federal de México. (2004). *Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería*. Distrito Federal, México: Gaceta Oficial del Distrito Federal. Obtenido de [https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal\\_old/uploads/gacetas/Octubre04\\_06\\_103BISTI.pdf](https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/Octubre04_06_103BISTI.pdf)
- Gouveia, J., & Lourenço, P. (2007). "Masonry Shear Walls Subjected To Cyclic Loading: Influence of Confinement and Horizontal Reinforcement. *Tenth North American Masonry Conference, Missouri*, 838-848.
- Guamán, O. (2018). Propuesta de modelo para análisis pushover de paredes confinadas.
- Hernández, R. (2013). *Comportamiento de muros de mampostería de block hueco sujeto a cargas laterales, reforzado con varillas de fibra de vidrio en las juntas de mortero*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Querétaro], Querétaro, México. Obtenido de <http://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/631/1/RI000633.pdf>
- Inpres-Cirsoc 103. (1983). *Normas Argentinas para construcciones sismorresistentes. Parte III. Construcciones de Mampostería*. Buenos Aires, Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Industrial. Obtenido de <https://bit.ly/3syWVJz>
- Instituto Nacional de Normalización. (1997). *Norma Chilena NCh2123.Of 97 Albañilería confinada - Requisitos de diseño y cálculo*. Santiago de Chile, Chile. Obtenido de <https://bit.ly/3fd6FoJ>
- Kakaletsis, D. J., & Karayannis, C. G. (2008). Influence of Masonry Strength and Openings on Infilled R/C Frames Under Cycling Loading. *Journal of Earthquake Engineering*, 12:197–221. doi:10.1080/13632460701299138



- Lang., A. F., Crisafulli, F. j., & Torrasi., G. S. (2014). Over view and assessment of analysis techniques for confined masonry buildings. Earthquake Engineering. Alaska : s.n. *Tenth U.S. National Conference on Earthquake Engineering*.
- Marinilli, A., & Castilla, E. (2004). Recent Experiments with Confined Concrete Block Masonry Walls With Several Confining-Columns. *13th World Conference on Earthquake(2129)*.
- Matsumura, A. (1988). Shear Strenght of Reinforced Masonry Walls. *Proceedings of Ninth World Conference on Earthquake Engineering, VI*, 121-126. Obtenido de [http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/9\\_vol6\\_121.pdf](http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/9_vol6_121.pdf)
- Meli, R. (1979). Comportamiento Sísmico de Muros de Mampostería. *Serie del Instituto de Ingeniería No. 352, 2ª Ed., Instituto de Ingeniería, UNAM, México*, 14-49.
- Mira Díaz, M. (2012). *Aproximación a un método de análisis multinivel para la modelización de la mampostería*. Barcelona, pág. 98, Proyecto final de Máster.
- Mohammadi, M., & Nikfar, F. (2013). Strength and Stiffness of Masonry-Infi lled Frames with Central Openings Based on Experimental Results. *American Society of Civil Engineers*.
- Mohyeddin, A., Goldsworthy, H., & Gad, E. (2015). A Review of the Seismic Behaviour of RC Frames with Masonry Infill. Obtenido de <https://bit.ly/2Qk2b5r>
- Mondal, G., & Jain, S. K. (2008). Lateral stiffness of masonry infilled reinforced concrete (RC) frames with central opening. *Earthq. Spectra 24(3)*, , 701–723.
- Moroni, M., Astroza, M., & Tavonatti, S. (1994). Nonlinear models for shear failure in confined masonry walls. *The Masonry Society Journal, 12*, 72-78.
- NC 207-2. (2019). *REQUISITOS GENERALES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN – PARTE 2: BASES DE DISEÑO – CAPÍTULOS DEL 1 3 AL 20*. Cuba: Oficina Nacional de Normalización (NC).
- NEC. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción*. Quito, Ecuador.





- New Zealand Society for Earthquake Engineering (NZSEE). (2006). *Assessment and improvement of the structural performance of buildings in earthquakes*. Wellington, New Zealand.
- (2014). *Norma Mexicana NMX-C-155-ONNCE-2014*. México: Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S. C.
- (2006). *Norma Técnica E.070 Albañilería*. Perú: Resolución Ministerial No. 011-2006-Vivienda.
- Okail, H. (2014.). Experimental and analytical investigation of lateral load response of confined masonry walls. *Structural Engineering Department, Ain Shams University.Cairo*.
- Okail, H., Abdelrahman, A., Abdelkhalik, A., & Metwaly, M. (2014.). Experimental and analytical investigation of lateral load response of confined masonry walls. *Structural Engineering Department, Ain Shams University.Cairo*.
- Orduña, A., & Ayala, G. (2001). Análisis no lineal de muros de mampostería confinada sujetos a cargas laterales. 21-34. Obtenido de <https://bit.ly/3lFOhX3>
- Ortega, A. (2020). *Vulnerabilidad y Capacidad Sísmica de Edificaciones Tipo de Mampostería Confinada de la Ciudad de Cuenca*. [Tesis de pregrado, Universidad del Azuay], Cuenca, Ecuador. Retrieved from <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/10199>
- Paniagua, J., & Truhan, D. (2003). *Oficios y actividad paragremial en la Real Audiencia de Quito (1557-1730): el Corregimiento de Cuenca*. León, España: Secretariado de Publicaciones y Medios Audiovisuales. Obtenido de <https://bit.ly/39pdTSV>
- Paulo, M. F., Neto, M. F., Dias, J. E., & Lourenço, P. B. (2011). Behavior of masonry infill panels in RC frames subjected to in plane and out of plane loads. *7th International Conference amcm2011*. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/55615511.pdf>
- Pereira, M. (2013). Avaliação do desempenho das envolventes dos edifícios face à acção dos sismos.



- Pérez, J., & Manzano, A. (2012). Shear-Moment Interaction of Earthquake Resistance Confined Masonry Walls. *15th World Conference on Earthquake Engineering*.
- Ranjbaran F., H. M., & M., S. (2012). Simplified Formulation for Modeling the Nonlinear Behavior of Confined Masonry Walls in Seismic Analysis. *International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration*, 259-289.
- Riahi, Z. (2007). *Backbone model for confined masonry walls for performance-based seismic design*. [Thesis of master, University of British Columbia], British Columbia, Canadá.
- Riahi, Z., Alcocer, S., & Elwood, K. (2009). Backbone Model for Confined Masonry Walls for Performance-Based Seismic Design. *JOURNAL OF STRUCTURAL ENGINEERING*, 644-654.
- SAGARPA. (2015). *Muros de Contención*. México. Obtenido de <https://es.slideshare.net/LuisUribeDm/muros-de-contencin-manual-de-como-aserlos>
- Sigmund, V., & Penava, D. (2014). Influence of Openings, With and Without Confinement, on Cyclic Response of Infilled R-C Frames - An Experimental Study. *Journal of Earthquake Engineering*.
- Tasnimi, A. A., & Mohebkhah, A. (2011). Investigation on the behavior of brick-infilled steel frames with openings, experimental and analytical approaches. *Eng. Struct.*, 33(3), 968-980.
- Taveras, M. A. (2008). *Revisión de las recomendaciones para modelar y analizar estructuras de mampostería confinada ante carga lateral*. México: Universidad Autónoma de México, Tesis para optar por el grado de Maestro en Ingeniería.
- Tenesaca, M., & Rasco, J. (2017). *Diseño de un modelo de negocios para el sector ladrillero artesanal del cantón Cuenca, período 2017-2019*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca], Universidad de Cuenca, Cuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28536>
- Tomazevic, M. (1999). *Earthquake-resistant design of masonry buildings*. London: Imperial College Press.

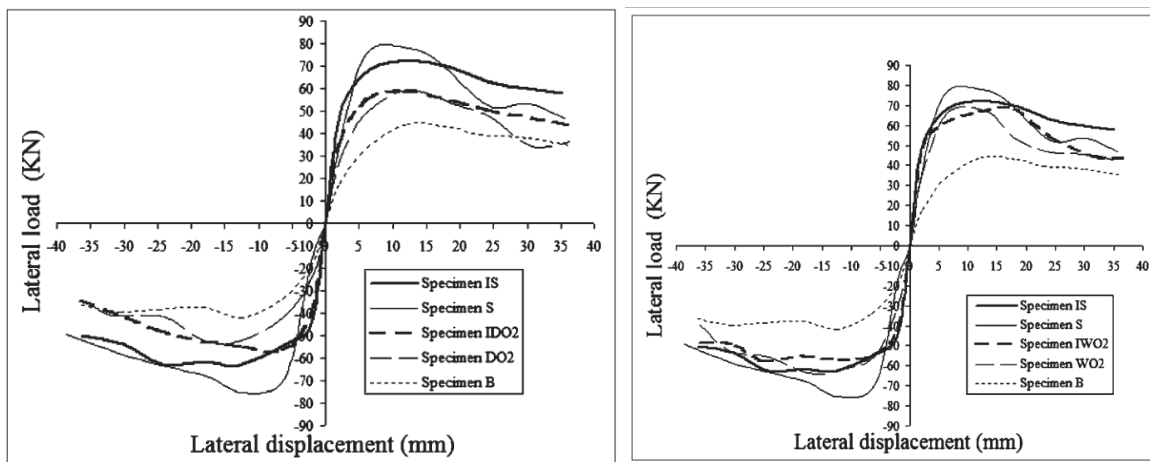


- Tomazevic, M., & Klemenc, I. (1997). Seismic Behaviour of Confined Masonry Walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 26, 1059-1071.
- Torrise, G. S. (2012). *Análisis y diseño de estructuras de hormigón armado y mampostería*. Cuyo: Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Cuyo, Tesis sometida a evaluación para la obtención del grado de Doctor en Ingeniería.
- Ural, A., & Doğangün, A. (2006). Out-of-Plane Performance of Confined Masonry Walls with Different Tie-Column Configurations. *Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering*. Obtenido de <https://bit.ly/3lsAmmM>
- V. Sigmund, D. P. (2014). Influence of Openings, With and Without Confinement, on Cyclic Response of Infilled R-C Frames - An Experimental Study. *Journal of Earthquake Engineering*.
- Varela, J., Fernandez, L., Gamboa, J., Prieto, A., & Moreno, J. (2019). Flexural Behavior of Confined Masonry Walls Subjected to In-Plane Lateral Loads. *Earthquake Spectra*, 35(1), 405-422. doi:10.1193/112017EQS239M
- Yáñez, F., Astroza, M., Holmberg, A., & Ogaz, O. (2004). Behavior of Confined Masonry Shear Walls With Large Openings. *13th World Conference on Earthquake(3438)*. Obtenido de <https://bit.ly/2QbBYWw>
- Yoshimura, K., & Kikuchi, K. (1996). Effect of Vertical and Horizontal Wall Reinforcement on Seismic Behaviour of Confined Masonry Walls. *11th World Conference on Earthquake Engineering(191)*.
- Yoshimura, K., Kikuchi, K., Kuroki, M., Nonaka, H., Kim, K., Wangdi, R., & Oshikata, A. (2004). Experimental Study For Developing Higher Seismic Performance Of Brick Masonry Walls. *13th World Conference on Earthquake Engineering(1870)*.
- Zavala, C., Cabrejos, R., & Tapia, J. (1998). Aseismic Masonry Building Model for Urban Areas. *Structural Engineering World Wide Paper T209-1*.
- Zúñiga, O. (2005). *Evaluación analítica de la respuesta sísmica de las edificaciones de mampostería*. [Tesis de maestría, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco], Distrito Federal, México. Obtenido de <https://core.ac.uk/download/pdf/154926059.pdf>

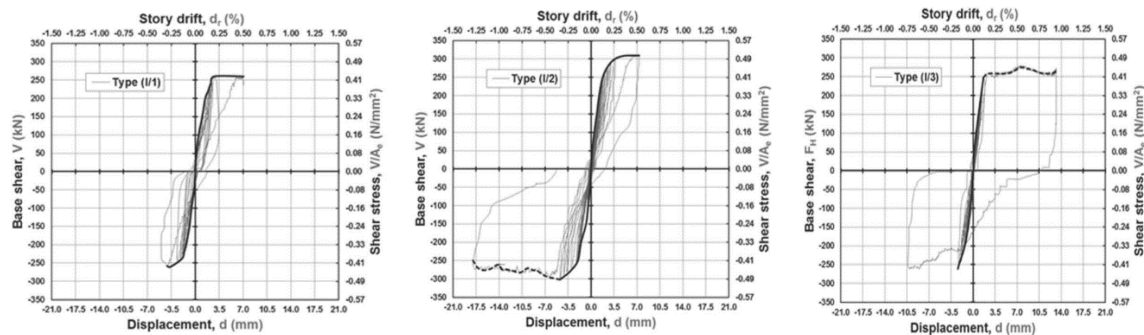
Zúñiga, O., & Terán G, A. (2008). EVALUACIÓN BASADA EN DESPLAZAMIENTOS DE EDIFICACIONES DE MAMPOSTERÍA CONFINADA. *Revista de Ingeniería Sísmica No. 79*, 25-48.

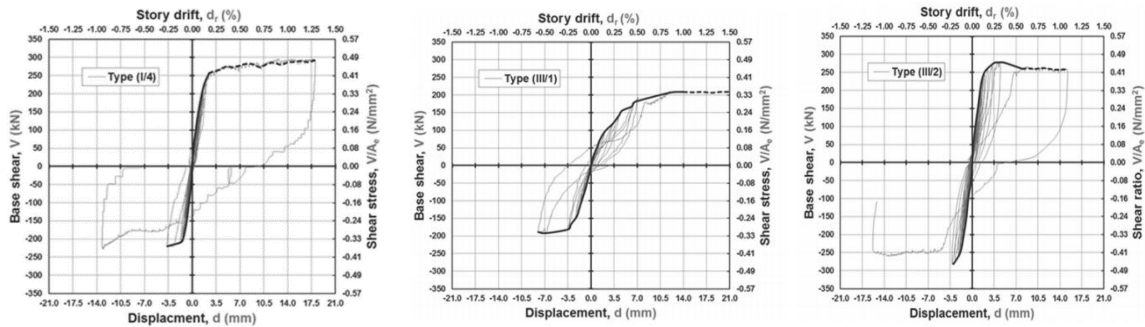
## ANEXOS

Gráficas empleadas para la extracción de valores con la herramienta WebPlotDigitizer-4.

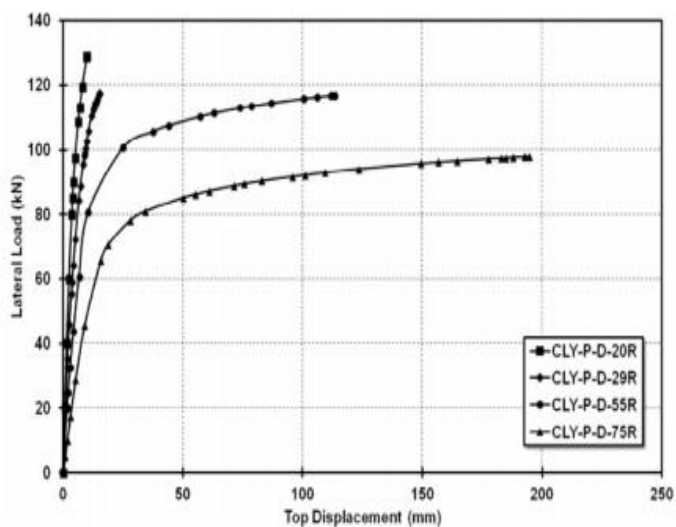
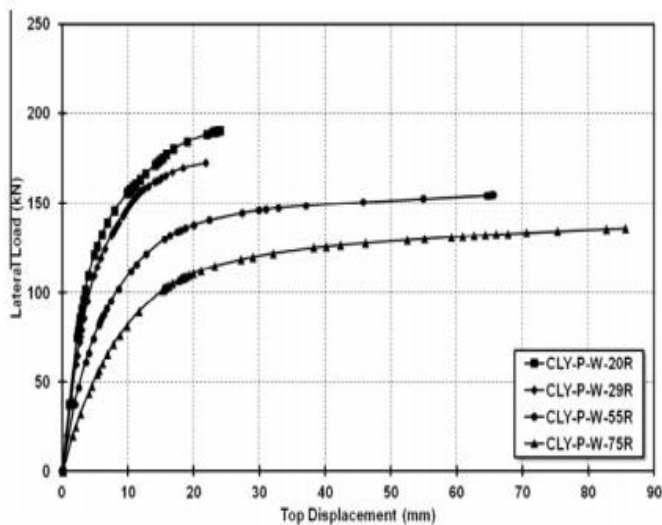


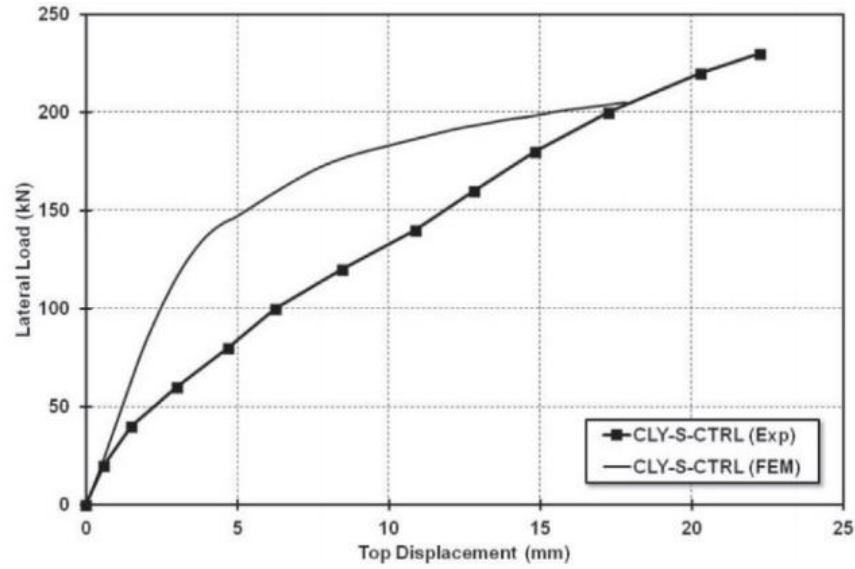
Anexo 1. Diagrama de desplazamientos de los modelos numéricos para puertas (D) y para ventanas (W)  
Fuente: (Kakaletsis & Karayannis, 2008)



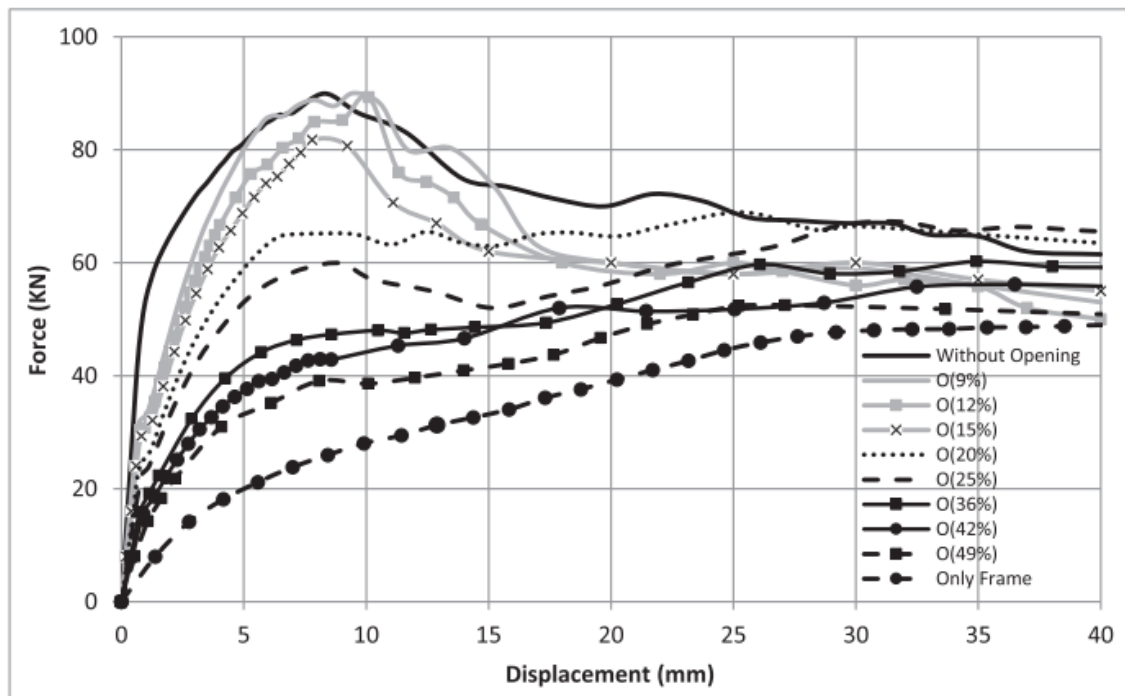


Anexo 2 Curvas del comportamiento histerético de los muros de mampostería con abertura.  
Fuente: (Sigmund & Penava, 2014)

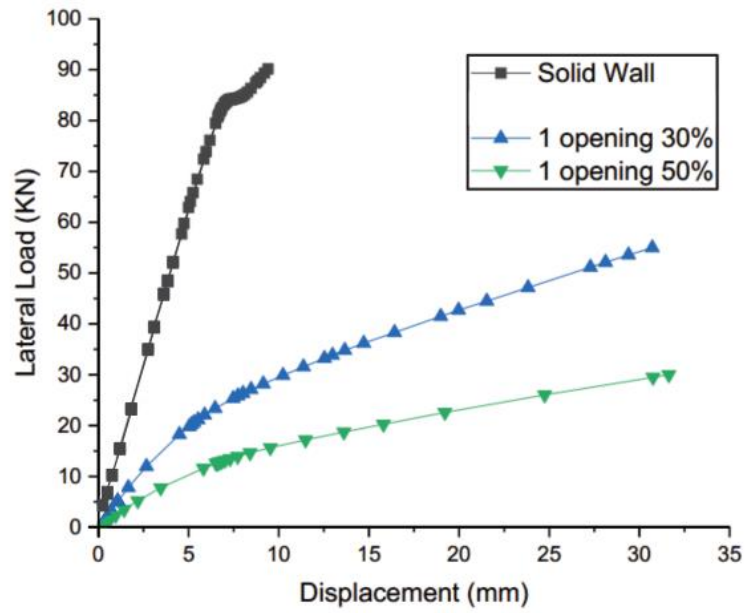




Anexo 3 Diagrama de desplazamientos de los modelos numéricos con relación de abertura creciente.  
Fuente: (Okail, Abdelrahman, Abdelkhalik, & Metwaly, 2014.)



Anexo 4 Diagrama de desplazamientos de los modelos numéricos con relación de abertura creciente tipo ventana centrada.  
Fuente: (Akhoundi, Lourenço, & Vasconcelos, 2016)



Anexo 5 Diagrama de desplazamientos de los modelos numéricos con relación de abertura creciente tipo ventana centrada.

Fuente: (Darmayadi & Rusli, 2018)