



---

---

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE YUCATÁN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**UNIDAD DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

**“ECUACIONES DE DISEÑO PARA MUROS DE  
MAMPOSTERÍA CONFINADA SUJETOS A  
CARGAS UNIFORMES FUERA DEL PLANO CON  
RELACIÓN DE ASPECTO MENOR A 1.00”**

**TESIS**

**PRESENTADA POR**

**ING. MANUEL HIRÁN RODRÍGUEZ CERVERA**

**EN OPCIÓN AL GRADO DE**

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**OPCIÓN ESTRUCTURAS**

**MÉRIDA, YUCATÁN, MÉXICO**

**2018**

Aunque este trabajo hubiere servido para el Examen de Grado y hubiera sido aprobado por el sínodo, sólo el autor es responsable de las doctrinas emitidas en él.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al personal académico, administrativo y manual de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán por brindarme la oportunidad de obtener una mejor formación académica y por el apoyo otorgado para llevar a cabo este trabajo de investigación.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada para realizar mis estudios de posgrado.

## RESUMEN

En México uno de los sistemas estructurales más utilizados es el de muros de mampostería confinada. Se utilizan para diversas edificaciones, desde construcciones residenciales hasta hospitales y escuelas. Los muros de mampostería confinada son los que están contruidos a base de un panel de mampostería y elementos de concreto reforzado en su perímetro, los cuales son, en general, de un espesor igual al del panel de mampostería. El proceso constructivo es el siguiente: (1) se construye el panel de mampostería a base de piezas unidas por mortero sobre una cadena de concreto reforzado. (2) Se construyen los elementos confinantes verticales y la cadena superior de concreto reforzado.

Los tipos de piezas utilizados en México para la construcción de muros de mampostería varían dependiendo de la región. Algunos ejemplos de piezas que se utilizan son: los bloques de huecos de concreto, los tabiques de arcilla multiperforados y los tabiques de arcilla sólidos. En el sureste mexicano se utiliza ampliamente los bloques huecos de concreto de tres celdas de 15 cm x 20 cm x 40 cm (espesor x altura x longitud).

Actualmente, existe una metodología para el diseño de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. En esta metodología se utilizan tablas de diseño, lo cual hace laborioso el procedimiento. Por lo anterior, es importante simplificar el uso de la metodología desarrollando ecuaciones diseño.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar ecuaciones de diseño para muros de mampostería confinada sujetas a cargas fuera del plano. Para este propósito, se realizó un análisis de sensibilidad de las principales variables que influyen en el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Se determinó la resistencia fuera del plano y las fuerzas en el plano de 3440 muros utilizando el método del puntal bidireccional. Las variables consideradas fueron la resistencia a compresión axial de la mampostería, la relación de aspecto y la relación de esbeltez del muro, la rigidez de los elementos confinantes y el esfuerzo axial del muro. Se consideraron muros con relaciones de aspecto menores

o iguales que uno. Adicionalmente, se compararon los resultados obtenidos con las ecuaciones de diseño contra los resultados experimentales de 20 muros obtenidos de la literatura. Con base en los resultados obtenidos se concluyó que las variables más significativas en la resistencia fuera del plano son la rigidez de los elementos confinantes ( $K_v$  y  $K_h$ ), la relación de aspecto del muro ( $h/L$ ) y la resistencia a compresión axial de la mampostería. Adicionalmente, se encontró que el promedio de la relación entre la resistencia fuera del plano calculada con las ecuaciones de diseño y la resistencia fuera del plano experimental fue 1.05, con un coeficiente de variación de 16.29%. Por otra parte, la relación entre la resistencia calculada con el método del puntal bidireccional y la resistencia experimental de los muros encontrados en la literatura fue de 1.00, con un coeficiente de variación de 13.88%. Con base en estos resultados, se concluye que la ecuación de diseño desarrollada en este trabajo presenta un ajuste satisfactorio a los resultados experimentales y representa una significativa simplificación al procedimiento de diseño.

## ABSTRACT

In Mexico, one of the most used structural systems is based on confined masonry walls. It is used in different types of buildings, such as residential buildings, hospitals and schools. Confined masonry walls consist of a masonry panel and reinforced concrete elements in its perimeter, which are, in general, the same thickness to the masonry panel. The construction process is as follows: (1) the masonry panel is constructed first using masonry units joined with mortar on a longitudinal concrete beam; (2) then the vertical and top horizontal confined elements are constructed with reinforced concrete.

The most used units in Mexico for the construction of masonry walls vary depending on the region. Some examples of the type of units that are used are: hollow concrete blocks, multiperforated clay bricks, and solid clay bricks. In the Mexican southeast, hollow concrete blocks of 15 x 20 x 40 cm (thickness x height x length) with three cells are widely used.

Nowadays, there is a methodology for the design of confined masonry walls subject to out-of-plane loads. In this methodology design tables are used, which makes the procedure burdensome. Therefore, it is important to simplify the use of the methodology by developing design equations.

The objective of this work is to develop design equations for confined masonry walls subjected to out-of-plane loads. For this purpose, a sensitivity analysis of the main variables that influence the behavior of confined masonry walls subject to out-of-plane loads was carried out. The out-of-plane strength and in-plane forces of 3440 walls were determined using the bidirectional strut method. The variables considered were the axial compressive strength of the masonry, the wall aspect ratio, the wall slenderness ratio, stiffness of the confining elements and the axial stress of the wall. Walls with aspect ratios less or equal to one were considered. Additionally, analytical results obtained with the design equations were compared with experimental results of 20 walls obtained from literature review. Based on the results obtained, it was concluded that the most significant variables in the out-of-plane strength are the stiffness of the confining elements ( $K_v$  y  $K_h$ ), the wall aspect

ratio ( $h/L$ ) and slenderness ratio, and the axial compressive strength of the masonry. Additionally, the average of the ratio between the out-of-plane strength obtained with the design equations and the experimental results was 1.05, with a coefficient of variation of 16.29%. Also, the ratio between the out-of-plane strength obtained with the bidirectional strut method and the experimental results was 1.00, with a coefficient of variation of 13.88%. Based on these results, it is concluded that the design equation developed in this work satisfactorily fits the experimental results and it is a significant simplification in the design procedure.

## Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS .....	III
RESUMEN .....	IV
ABSTRACT .....	VI
Capítulo 1: Introducción. ....	1
1.1    Generalidades.....	1
1.2    Objetivo general.....	3
1.3    Objetivo particular .....	3
Capítulo 2: Revisión de la literatura.....	4
2.1    Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada. ....	4
2.2    Métodos Analíticos para determinar la resistencia fuera del plano en Muros de Mampostería Confinada.....	9
2.3    Comportamiento de la fuerza en el plano .....	11
2.4    Resumen de la revisión previa de la literatura. ....	11
Capítulo 3: Metodología .....	13
3.1    Recopilación de los datos experimentales obtenidos de la literatura .....	13
3.2    Determinación de los valores de los parámetros para el análisis de sensibilidad de la resistencia fuera del plano de MMC .....	15
3.3    Obtención de la resistencia fuera del plano analítica de MMC .....	18
3.4    Desarrollo de programas computacionales para manejo de datos de MMC	23
3.5    Deducción de forma general de ecuación para determinar la resistencia fuera del plano de MMC.....	23
3.6    Deducción de los parámetros que consideran la rigidez de los elementos confinantes .....	34



3.7	Análisis de sensibilidad de la resistencia fuera del plano y fuerzas en el plano.	39
3.8	Obtención de ecuaciones para el diseño fuera del plano y fuerzas en el plano para MMC .....	41
3.9	Validación de las ecuaciones de diseño fuera del plano.....	41
Capítulo 4: Resultados y discusión de los resultados. ....		42
4.1	Análisis de sensibilidad de la resistencia fuera del plano.....	42
4.1.1	Efecto de la resistencia a compresión axial de la mampostería .....	42
4.1.2	Efecto del espesor del muro.....	43
4.1.2.1	Efecto de la rigidez vertical y horizontal .....	44
4.1.3	Efecto del esfuerzo axial del muro.....	46
4.2	Ecuaciones para determinar la resistencia fuera del plano.....	48
4.2.1	Ecuación para determinar la resistencia fuera del plano de muros con esfuerzo axial nulo.....	49
4.2.2	Contribución del esfuerzo axial.....	65
4.3	Ecuaciones para determinar las fuerzas en el plano.....	71
4.4	Comparación con resultados experimentales. ....	78
4.5	Resumen Ecuaciones de diseño para determinar la resistencia fuera del plano y las fuerzas en el plano .....	80
Capítulo 5: Conclusiones .....		83
Capítulo 6: Referencias .....		86

## Índice de figuras

Figura 3.1.- Archivo de entrada para el programa MPB .....	19
Figura 3.2- Interfaz del programa MPB .....	20
Figura 3.3 - Interfaz del programa MPB-mod .....	21
Figura 3.4 - Archivo de salida del programa MPB-mod.....	22
Figura 3.5 - Archivo con resumen de resultados para un conjunto de muros modelados.....	22
Figura 3.6 - Diagrama del método del puntal y resorte .....	24
Figura 3.7 .- Componentes del mecanismo de arco del método de PyR .....	25
Figura 3.8- Diagrama de equilibrio en el plano entre la componente vertical del puntal de compresión y la fuerza en el resorte.....	26
Figura 3.9 - Detalle de la rotación que se observa en un muro sujeto a cargas fuera del plano.....	28
Figura 3.10.- Desplazamientos en el plano debido a la rotación de los segmentos .....	29
Figura 3.11 Desplazamientos $\Delta cr$ y $\Delta a$ .....	29
Figura 3.12 - Desplazamiento en el plano debido a la rotación como cuerpo rígido .....	30
Figura 3.13.- Ángulos generado por la rotación del segmento de mampostería ...	31
Figura 3.14.- Desplazamiento por flexión y por torsión debido a una fuerza excéntrica .....	35
Figura 3.15 – Sistema equivalente de fuerzas aplicadas en la dala.....	36
Figura 3.16 – Dala empotrada en sus extremos.....	36
Figura 3.17 – Rotación debida a MT .....	37
Figura 3.18 - Ejemplo de familias de muros con la variación de $f_m$ .....	40

Figura 4.1.- Curvas de resistencia fuera del plano – resistencia a compresión axial de la mampostería.....	43
Figura 4.2.- Curvas de resistencia fuera del plano – espesor del muro .....	44
Figura 4.3.- Resistencia fuera del plano - rigidez vertical ( $Kv$ ) .....	45
Figura 4.4.- Resistencia fuera del plano - rigidez horizontal ( $KH$ ) .....	46
Figura 4.5.- Resistencia fuera del plano – esfuerzo axial del muro para muros con rigideces $Kv$ (a) mayores a 3,000 y (b) menores a 3,000 .....	47
Figura 4.6 - Resistencia fuera del plano promedio por rango de $Kv$ – resistencia a compresión axial de la mampostería.....	50
Figura 4.7.- Valores de $a_1 - Kv$ .....	52
Figura 4.8.- Efecto del espesor del muro para cada familia de curva en la resistencia fuera del plano depende de la rigidez $Kv$ .....	53
Figura 4.9.- Valores de $\alpha_2$ al variar $Kv$ .....	54
Figura 4.10.-Resistencia fuera del plano normalizada en función de la rigidez ( $Kv$ ) .....	56
Figura 4.11.- Errores promedio – $Kv_{max}$ .....	57
Figura 4.12.- Relación de resistencias fuera del plano calculadas con la ecuación y con el método del puntal bidireccional en función de $Kv$ .....	58
Figura 4.13.-Resistencia fuera del plano normalizada vs $Kh$ .....	59
Figura 4.14.- Resistencia fuera del plano normalizada vs $Kv$ .....	60
Figura 4.15.- $W\sigma = 0/Wpb - Kv$ .....	61
Figura 4.16.- Influencia de las variables en la relación de resistencias fuera del plano. ....	63
Figura 4.17.- Relación de las resistencias fuera del plano calculados con la ecuación de diseño y con el método del puntal bidireccional .....	64

Figura 4.18.- Variación por familias de $\Delta W_{pb}$ normalizado en función del esfuerzo axial.....	66
Figura 4.19.- Curvas $\Delta W_{pb}$ promedio normalizada en función del esfuerzo axial. 67	
Figura 4.20.- Comparación de influencia de diferentes variables en el comportamiento de $\Delta W_{pb}$ .....	68
Figura 4.21.- Comportamiento de $\lambda_4$ en función de $K_v$ .....	69
Figura 4.22.- Relación $W_{ec}/W_{pb}$ .....	71
Figura 4.23.- Variación de la fuerza en el plano en función de la resistencia fuera del plano. ....	72
Figura 4.24.-Comportamiento de la fuerza en el plano normalizada contra las diferentes variables. ....	73
Figura 4.25.- $F_{pb} - W_{pb}/t$ .....	74
Figura 4.26.- Variación de $\Delta F_{pb}$ en función de las variables más significativas. ..	75
Figura 4.27.- Variación de $\Delta F_{pb}/\sigma$ al variar el espesor.....	76
Figura 4.28.- Relación $F_{ec}/F_{pb}$ .....	77
Figura 4.29.- Comportamiento de la relación de fuerzas en el plano al variar $K_v$ .	78

## Indice de tablas

Tabla 3.1 - Propiedades geométricas y mecánicas de los 20 muros .....	14
Tabla 3.2 - Resistencias experimentales y analíticas de los 20 muros .....	15
Tabla 3.3 - Valores de variables para el análisis de sensibilidad. ....	16
Tabla 4.1.- Rangos de $Kv$ usados en el análisis de sensibilidad.....	50
Tabla 4.2.- Valores de $\alpha_1$ para los rangos de $Kv$ .....	51
Tabla 4.3.- Valores de $\alpha_2$ para los rangos de $Kv$ .....	54
Tabla 4.4.- Resultados estadísticos de las relaciones de resistencia fuera del plano .....	62
Tabla 4.5.- Resultados estadísticos de las relaciones de resistencia fuera del plano tomando en cuenta $\lambda_3$ .....	64
Tabla 4.6.- Valores de $\alpha_3$ por rangos.....	67
Tabla 4.7.- Resultados estadísticos de la relación de resistencias fuera del plano. .....	70
Tabla 4.8.- Resultados estadísticos de la relación de la fuerza en el plano calculado con la Ecuación 4.26 y el método del puntal bidireccional. ....	74
Tabla 4.9.- Resultados estadísticos de la fuerza en el plano. ....	78
Tabla 4.10.- Comparación de resistencias fuera del plano con el método del puntal bidireccional y la ecuación de diseño. ....	79
Tabla 4.11 – Resumen de ecuaciones de diseño para resistencia fuera del plano. .....	81
Tabla 4.12 - Resumen de ecuaciones de diseño para fuerzas en el plano. ....	82

.

# Capítulo 1: Introducción.

## 1.1 Generalidades

En México uno de los sistemas estructurales más utilizados es el de muros de mampostería confinada. Se utilizan para diversas edificaciones, desde construcciones residenciales hasta hospitales y escuelas. Por otro lado, existen diferentes tipos de mampostería, los cuales son: no reforzados, reforzados, diafragma y confinados. Los muros no reforzados, son los que no tienen ningún tipo de acero de refuerzo, o no cumplen con los requerimientos mínimos especificados en los códigos de diseño. Los muros reforzados son aquellos que tienen refuerzo de acero interior, tanto horizontalmente como verticalmente, y cumplen con los requerimientos mínimos de los códigos de diseño. Los muros diafragma son aquellos, en los que el panel de mampostería se encuentra rodeado por vigas y columnas, las cuales se construyen antes que el panel de mampostería y, generalmente, son de un espesor mayor al del panel de mampostería. Una característica de estos muros es que existen espacios vacíos entre el panel de mampostería y los elementos confinantes. Los muros de mampostería confinada son los que están contruidos a base de un panel de mampostería y unos elementos confinantes de concreto reforzado, los cuales son, en general, de un espesor igual al del panel de mampostería. El proceso constructivo es el siguiente: (1) se construye el panel de mampostería a base de piezas unidas por mortero sobre una cadena de concreto reforzado. (2) Se construyen los elementos confinantes verticales y la cadena superior de concreto reforzado. La diferencia de este método constructivo y los muros diafragma es que al construir posteriormente los elementos confinados no existen espacios vacíos entre el panel de mampostería y dichos elementos confinantes.

Los tipos de piezas utilizados para la construcción de muros de mampostería varían de un lugar de México a otro. Por ejemplo: los bloques de huecos de concreto, los bloques de arcilla con múltiples aberturas o bloques de arcilla sólidos. En el sureste

mexicano el más utilizado es el bloque hueco de concreto de tres celdas de 15 cm x 20 cm x 40 cm (espesor x altura x longitud).

El sureste mexicano es un área de alto impacto de huracanes. A lo largo de la historia, se han presentado ciclones devastadores, como el caso de Gilberto en 1988, Isidoro en 2002 y Wilma en 2005. Para el análisis de las cargas eólicas que inciden en las estructuras se utiliza el Manual de diseño de obras civiles: Diseño por viento de la Comisión Federal de Electricidad (CFE, 2008). En este manual, se supone que las cargas que actúan perpendiculares a los muros son transmitidas a los muros paralelos a la dirección del viento, por lo que se diseñan los muros paralelos. Actualmente existe una metodología para el diseño de muros de mampostería confinada sujeta a cargas fuera del plano, sin embargo, es por medio de tablas de diseño, por lo que es importante simplificar el uso de la metodología desarrollando ecuaciones diseño.

Se han realizado trabajos de investigación sobre el comportamiento de muros de mampostería confinada sujeta a cargas uniformes fuera del plano. Las variables que han sido estudiados son: las condiciones de apoyo (Varela et al. 2011), la relación de aspecto (Moreno, 2010), la relación de esbeltez y la rigidez de elementos confinantes (Varela et al. 2012a), la carga axial (Varela et al. 2012b), aberturas en los muros y diferentes tipos de pieza de mampostería (Moreno et al. 2015). Dichos estudios han permitido conocer el comportamiento de los muros de mampostería confinada. En general, este comportamiento está regido principalmente por: (1) la rigidez del elemento confinante superior, el cual, al tener mayor rigidez en el plano, el muro tiene mayor resistencia a las cargas fuera del plano. (2) Por la relación de aspecto, a mayor relación de aspecto del panel de mampostería, el muro tiene mayor resistencia a las cargas fuera del plano. (3) Por la relación de esbeltez, a menor relación de esbeltez, el muro tiene mayor resistencia a las cargas fuera del plano y la (4) carga axial aplicada al muro, a mayor carga axial, el muro tiene mayor resistencia a las cargas fuera del plano.

Por otro lado, se han utilizado modelos analíticos para predecir la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada. Dentro de los modelos utilizados se

encuentra el del método de líneas de fluencia, puntal de compresión (Navarrete, 2009; López, 2010), el método del puntal y resorte (Moreno, 2010), y el método del puntal bidireccional (Moreno, 2015). El método que predice la resistencia fuera del plano de los muros con mayor precisión es el método del puntal bidireccional (Moreno et al., 2015). Adicionalmente, dicho método considera más efectos en el muro, como la acción de arco (puntales de compresión) en dos direcciones ortogonales, el efecto de la torsión sobre los elementos confinantes y la variación de la rigidez a lo largo de los elementos confinantes. Sin embargo, este método es complejo. Es importante simplificar el procedimiento de diseño estructural para que ingeniero pueda realizar un adecuado diseño de los muros de mampostería confinada en un número reducido de cálculos.

## 1.2 Objetivo general

Desarrollar ecuaciones de diseño para muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano.

## 1.3 Objetivo particular

- Realizar un estudio paramétrico de las variables que influyen en el comportamiento de los muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano.
- Desarrollar ecuaciones de diseño con base en el estudio paramétrico para predecir la resistencia fuera del plano para muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano.
- Validar las ecuaciones de diseño para muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano con resultados experimentales obtenidos de la literatura.



## Capítulo 2: Revisión de la literatura

Se presenta una revisión de la literatura dividida en dos partes. En la primera se consideraron los trabajos experimentales sobre el comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada y en la segunda se consideraron los modelos analíticos desarrollados para determinar la resistencia fuera del plano de dichos muros.

### 2.1 Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada.

Varela et al. (2011) ensayaron 6 muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Las variables de estudio fueron las condiciones de apoyo, se consideraron apoyos en tres y cuatro bordes. Se aplicaron cargas uniformes fuera del plano. Las dimensiones de los muros fueron de 360 cm de longitud, 176 cm de altura y 15 cm de espesor. Los muros se construyeron utilizando bloques huecos de concreto con dimensiones de 15 x 20 x 40 cm (espesor x largo x alto). Se utilizó mortero en proporción por volumen 1:2:7 (Cemento Portland: Cal: Arena). Las dimensiones de la sección transversal de los elementos confinantes fueron de 15 x 15 cm (base x altura). El acero de refuerzo longitudinal consistió en cuatro barras de acero corrugado de 0.95 cm diámetro. El acero de refuerzo transversal consistió en estribos de acero liso de 0.63 cm de diámetro distribuido uniformemente a cada 20 cm. La resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal y transversal fue de 4200 y 2325 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 150 kg/cm<sup>2</sup>. Se observó que para ambas condiciones de apoyo el patrón de agrietamiento consistió en una grieta horizontal al centro del muro y grietas diagonales desde el centro hacia las cuatro esquinas del muro. La falla de los muros estuvo asociada a la rotación excesiva de los segmentos de la mampostería. La resistencia fuera del plano para todos los muros, sin importar la condición de apoyo, fue similar. Dicha similitud se debió a que el elemento confinante superior, en los muros con apoyos en 3 bordes, tuvo la suficiente resistencia y rigidez para actuar como un cuarto apoyo.

Varela et al. (2012a) ensayaron 6 muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Las variables de estudio fueron la relación de aspecto, la relación de esbeltez y la rigidez en el plano de los elementos confinantes. Se aplicaron cargas uniformes fuera del plano. Se ensayaron cuatro longitudes de muros: 367 cm, 377 cm, 295 cm y 285 cm. Se ensayaron dos alturas diferentes: 272 cm y 288 cm. Los muros se construyeron utilizando bloques de concreto hueco de tres celdas con dos espesores 12 cm y 15 cm, con una longitud de 40 cm y una altura de 20 cm. Se utilizó mortero en proporción por volumen 1:2:7 (Cemento Portland: Cal: Arena). Las dimensiones de la sección transversal de los elementos confinantes tuvieron una base igual al espesor de los bloques y tres diferentes peraltes, de 20, 25 y 40 cm. Se observaron diferentes patrones de agrietamiento, dependiendo la relación de aspecto de los muros. Para los muros con relación de aspecto de 1.0 se observaron grietas diagonales desde el centro hacia las cuatro esquinas del muro. Para los muros con relación de aspecto de 0.75 se observó una grieta horizontal al centro del muro y grietas diagonales desde la grieta del centro hacia las cuatro esquinas del muro. Se presentaron dos tipos de fallas, la primera fue una falla por inestabilidad de los segmentos del muro, ésta se presentó en el muro donde el elemento confinante superior tenía la menor rigidez en el plano. El segundo tipo de falla fue por aplastamiento del panel de mampostería, donde la rigidez en el plano de los elementos confinantes fue suficiente para que el puntal de compresión alcance la resistencia a compresión axial de los bloques huecos de concreto. Para muros con relación de aspecto y relación de esbeltez similares, los muros que tuvieron elementos confinantes con mayor rigidez en el plano son los que tuvieron mayor resistencia a cargas fuera del plano. Para muros con relación de aspecto y rigidez en el plano de los elementos confinantes similares, los que tuvieron menor relación de esbeltez son los que tuvieron una mayor resistencia a cargas fuera del plano. Para muros con similar relación de esbeltez y rigidez en el plano de los elementos confinantes superiores, los que tuvieron la mayor relación de aspecto tuvieron una mayor resistencia a cargas fuera del plano.

Varela et al. (2012b) ensayaron 3 muros de mampostería confinada sujeta a carga axial fuera del plano y carga axial en el plano. La variable de estudio fue la carga axial. El primer muro se ensayó sin carga axial, el segundo muro con carga axial correspondiente a una estructura de un nivel y el último muro se ensayó con una carga axial correspondiente a una estructura de tres niveles. Se aplicaron cargas uniformes fuera del plano. Las dimensiones de los muros fueron de 370 cm x 270 cm (longitud x altura). Los muros se construyeron utilizando bloques de concreto hueco de tres celdas de 15 x 20 x 40 cm (espesor x altura x largo). Se utilizó mortero en proporción por volumen 1:2:7 (Cemento Portland: Cal: Arena). Las dimensiones de la sección transversal de los elementos confinantes fueron de 15 x 20 cm (base x peralte). El acero de refuerzo longitudinal en el elemento confinante superior consistió, para el muro sin carga axial, en cuatro barras de acero corrugado de 0.95 cm de diámetro, y un refuerzo longitudinal de acero liso de 0.64 cm de diámetro distribuido uniformemente a cada 20 cm. El acero de refuerzo longitudinal en el elemento confinante superior consistió, para el muro con carga axial equivalente a un nivel, en seis barras de acero corrugado de 1.27 cm de diámetro, y un refuerzo longitudinal de acero liso de 0.64 cm de diámetro distribuido uniformemente a cada 8 cm. El acero de refuerzo longitudinal en el elemento confinante superior consistió, para el muro con carga axial equivalente a tres niveles, en seis barras de acero corrugado de 0.95 cm de diámetro, y un refuerzo longitudinal de acero liso de 0.64 cm de diámetro distribuido uniformemente a cada 10 cm. La resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal y transversal fue de 4200 y 2325 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. La resistencia a compresión axial del concreto fue para el primer muro 150 kg/cm<sup>2</sup> y para los otros dos muros 200 kg/cm<sup>2</sup>. Se observó que para las tres condiciones de carga axial el patrón de agrietamiento consistió en una grieta horizontal al centro del muro y grietas diagonales desde la grieta del centro hacia las cuatro esquinas del muro. La falla del muro sin carga axial estuvo asociada a la inestabilidad de los segmentos de mampostería. La falla asociada a los muros con carga axial de uno y tres niveles fue aplastamiento del panel de mampostería. Esto debido a que la carga axial indujo una restricción del desplazamiento en el plano del muro. La carga última fue mayor en el muro con mayor carga axial y menor en el muro donde no se sometió a carga axial.

Varela et al. (2015) ensayaron 4 muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Las variables de estudio fueron el tipo de abertura y el tipo de castillo intermedio (castillo armado o castillo ahogado). Las dimensiones de los muros fueron 357 cm x 271 cm (longitud x altura). Se ensayó un muro sin aberturas, dos muros con abertura equivalente a una puerta y un muro con abertura equivalente a una ventana. La dimensión de la abertura equivalente a una ventana fue de 108 x 90 cm (longitud x altura). Las dimensiones para las aberturas equivalentes a una puerta fueron de 108 x 230 cm y 123 x 230 cm (longitud x altura). Se ensayaron dos tipos de castillos intermedios, un castillo armado de 15 x 15 cm (base x altura) y un castillo ahogado de 10 x 10 cm (base x altura). El refuerzo longitudinal del castillo intermedio armado fue de seis barras de acero corrugado de 1.27 cm de diámetro y el refuerzo transversal fue de acero liso de 0.63 cm repartido uniformemente a cada 12 cm. Los muros se construyeron utilizando bloques de concreto hueco de 15 x 20 x 40 cm (espesor x altura x longitud). Se utilizó mortero en proporción por volumen 1:2:7 (Cemento Portland: Cal: Arena). Las dimensiones de la sección transversal de los elementos confinantes superiores fueron de 15 x 17 cm (base x peralte). El acero de refuerzo longitudinal de la dala consistió en cuatro barras de acero corrugado de 1.27 cm diámetro. El acero de refuerzo transversal consistió en estribos de acero liso a cada 12 cm. La resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal y transversal fue de 4200 y 2325 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 250 kg/cm<sup>2</sup>. El patrón de agrietamiento en del muro sin abertura, fue consistente al de los muros con relación de aspecto de 1.0 en el estudio de Varela 2012a. El patrón de agrietamiento en los muros con aberturas fue consistente al de los muros con relación de aspecto de 0.75 en el estudio de Varela 2012a. Se concluyó que la resistencia, en el caso de que la rigidez del elemento confinante superior sea suficiente para restringir el desplazamiento, depende de la relación de aspecto del panel de mampostería.

Moreno et al. (2015) ensayaron 8 muros de mampostería confinada sujeta a cargas fuera del plano y a cargas axiales. La variable de estudio fueron el tipo de pieza de mampostería y la relación de aspecto del muro. Los tipos de piezas empleados en el

panel de mampostería fueron: bloques de concreto de dos celdas, con dimensiones de 12 x 20 x 40 cm (espesor x altura x largo). Dos tipos de bloques de arcilla huecos, uno con dimensiones de 12 x 20 x 32 cm y otro con unas dimensiones de 12 x 12 x 25 cm. Un bloque de arcilla sólido, con unas dimensiones de 12 x 5 x 23 cm. Se aplicaron cargas uniformes fuera del plano. Las dimensiones de los muros fueron de altura constante de 276 cm y dos tipos de longitudes, de 377 cm y 295 cm, para poder trabajar con dos tipos de relaciones de aspecto, 0.75 y 1.0. Se utilizó mortero en proporción por volumen 1:2:7 (Cemento Portland: Cal: Arena). La carga axial aplicada a los muros fue constante y equivalente a una estructura de un nivel. Las dimensiones de la sección transversal de los elementos confinantes superiores, inferiores y verticales fueron 12 x 25 cm, 12 x 20 cm y 12 m x 25 cm (base x peralte) respectivamente. El acero de refuerzo longitudinal del elemento confinante superior consistió en cuatro barras de acero corrugado de 1.27 cm y cuatro de 0.95 cm diámetro. El acero de refuerzo transversal consistió de estribos de acero liso a cada 0.65 cm. La resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal y transversal fue de 4200 y 2325 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 250 kg/cm<sup>2</sup>. El patrón de agrietamiento en el caso de los muros con relación de aspecto de 1.0 fue congruente con el estudio de Varela 2012a. El patrón de agrietamiento en el caso de los muros con relación de aspecto de 0.75 fue congruente con el estudio de Varela 2012a. El muro con el panel de mampostería formado por bloques de arcilla sólido y una relación de aspecto de 0.75 tuvo una falla por inestabilidad de los segmentos. Esto asociado al valor de la deformación unitaria máxima, el cual es mayor a los otros paneles de mampostería, ya que la carga máxima que podía soportar la pieza fue mayor que la alcanzada con la rigidez del elemento confinante superior. En los otros muros, la rigidez del elemento confinante superior fue suficientemente grande para alcanzar la resistencia máxima a compresión de las piezas, por lo que la falla fue aplastamiento de mampostería. La resistencia última dependió de la compresión axial de la mampostería.

G. Cantón (2016) ensayó 2 muros de mampostería confinada sujetas a cargas fuera del plano. La variable de estudio fue la relación de aspecto con elementos confinantes

de sección transversal mínima. Las dimensiones de los muros fueron de altura constante de 271 cm y dos tipos de longitudes, de 357 y 275 cm. Las relaciones de aspecto fueron de 0.76 y 0.99, respectivamente. Se utilizaron bloques huecos de concreto de tres celdas de dimensiones nominales de 15 x 20 x 40 cm (ancho x alto x largo). Se empleó mortero en proporción 1:2:7 (Cemento Portland: Cal: Arena). Las dimensiones de los elementos confinantes superior y vertical fueron de 15 x 15 cm. La resistencia a compresión axial del concreto fue de 250 kg/cm<sup>2</sup>. El acero de refuerzo longitudinal de los elementos confinantes consistió en cuatro barras de acero corrugado de 0.95 cm de diámetro. El acero de refuerzo transversal consistió de estribos de acero liso de 0.63 cm de diámetro con separación variable. La resistencia a la fluencia del acero de refuerzo longitudinal y transversal fue de 4200 y 2325 kg/cm<sup>2</sup>, respectivamente. El patrón de agrietamiento en el caso de los muros con relación de aspecto de 1.00 fue congruente con el estudio de Varela 2012a. El patrón de agrietamiento en el caso de los muros con relación de aspecto de 0.75 fue congruente con el estudio de Varela 2012a. Para el muro rectangular se observó una falla por inestabilidad de los segmentos. Para el muro cuadrado, el tipo de falla fue aplastamiento de la mampostería.

## 2.2 Métodos Analíticos para determinar la resistencia fuera del plano en Muros de Mampostería Confinada.

Se han utilizado diferentes métodos para determinar la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada. Los métodos más utilizados son: método de líneas de fluencia, método del puntal de compresión, método del puntal y resorte y el método del puntal bidireccional.

El método de Líneas de Fluencia es un método energético, el cual se basa en el equilibrio de los trabajos internos y externos. Dado un patrón de agrietamiento, el cual divide al panel de mampostería en segmentos, el trabajo interno es generado por la rotación de dichos segmentos y el trabajo externo es generado por la aplicación de las cargas fuera del plano. En general, se ha observado que el método de líneas de fluencias subestima la resistencia de los muros. Esto debido a que en el método se

asume que los momentos de agrietamiento en el muro se mantienen en todo el patrón de agrietamiento; sin embargo, los agrietamientos no se presentan al mismo tiempo.

El método de puntal de compresión es un modelo que se basa en el equilibrio de las fuerzas externas y las componentes fuera del plano de los puntales de compresión (Abrams, 1996; Angel, 1994). Dicho método se desarrolló para muros de mampostería de piezas sólidas. En el método del puntal de compresión se asume que la falla del muro está asociada con el aplastamiento de la mampostería. De igual forma se asume que los elementos confinantes son infinitamente rígidos y por tanto no se deforman. En general, el método sobreestima la resistencia fuera del plano de los muros. Esto debido a que el modelo no considera la rigidez real del marco de elementos confinantes (Moreno, 2010).

El método del puntal y resorte es un método similar al método del puntal de compresión. Dicho método se basa en la formación de un mecanismo de arco en una dirección. Se asume la formación de puntales de compresión en los segmentos del muro. Los segmentos del muro se definen con base en un patrón de agrietamiento. La resistencia fuera del plano se obtiene del equilibrio de las cargas aplicadas y las componentes horizontales de los puntales de compresión. En este método, a diferencia del puntal de compresión, se consideran dos tipos de falla, el aplastamiento de la mampostería y la inestabilidad de los segmentos del muro. La rigidez de los elementos confinantes, se toma en cuenta mediante un resorte en la parte superior del muro. En general se ha observado que el Método de Puntal y Resorte predice de forma satisfactoria la resistencia fuera del plano; sin embargo, todavía existen aspectos que no han sido considerados como son: (1) la acción de arco en dos direcciones ortogonales, (2) el efecto de la torsión sobre los elementos confinantes y (3) la variación de la rigidez a lo largo de los elementos confinantes.

El método del puntal bidireccional se basa en la formación de un mecanismo de arco en dos direcciones ortogonales. El muro se divide en segmentos, los cuales están

definidos por el patrón de agrietamiento. Posteriormente, el muro se subdivide en franjas horizontales y verticales. Debido a la rotación de los segmentos se generan puntales de compresión en cada una de las franjas. Dichos puntales se transfieren excéntricamente a los elementos confinantes. Los elementos confinantes se consideran como un marco de concreto reforzado, donde la rigidez varía según la longitud del elemento confinante. Este método considera tanto la variación de la rigidez de los elementos confinantes como el efecto de la torsión en los mismos. Se ha observado que el método del puntal bidireccional es el método que mejor predice la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada.

### 2.3 Comportamiento de la fuerza en el plano

Las fuerzas en el plano son las fuerzas que se transmiten a los elementos confinantes. En el método del puntal bidireccional se asumen que estas fuerzas son uniformemente distribuidas. Moreno (2015) concluyó que existe una relación entre las fuerzas en el plano y la resistencia fuera del plano. En general, dicha relación es lineal.

### 2.4 Resumen de la revisión previa de la literatura.

Las principales variables que influyen en la resistencia fuera del plano de muros confinados son: (1) la rigidez en el plano de los elementos confinantes, mientras aumenta la rigidez de los elementos confinantes aumenta la resistencia fuera del plano de los muros. (2) La relación de aspecto, conforme aumenta la relación de aspecto, aumenta la resistencia fuera del plano de los muros. (3) La relación de esbeltez, mientras disminuye la relación de esbeltez aumenta la resistencia fuera del plano de los muros. (4) La carga axial, mientras aumenta la carga axial aumenta la resistencia fuera del plano; esto debido la carga axial restringe los desplazamientos en el plano de la cadena superior. Sin embargo, este aumento en la resistencia fuera del plano está limitado por la resistencia a compresión axial de la mampostería. (5) La resistencia a compresión axial de la mampostería, la resistencia fuera del plano de los



muros aumenta conforme aumente la resistencia a compresión axial de la mampostería.

Para determinar la resistencia fuera del plano de los muros de mampostería confinada se han utilizado los métodos de líneas de fluencia, del puntal de compresión, del puntal y resorte y del puntal bidireccional. Con el método de líneas de fluencia, en general, se subestima la resistencia fuera del plano, ya que considera que los momentos resistentes se mantienen a lo largo de las líneas de fluencia al mismo tiempo. Con el método del puntal de compresión, en general, se sobreestima la resistencia fuera del plano, ya que considera que la rigidez de los elementos confinantes es infinita. Con el método del puntal y resorte, en general, se predice la resistencia fuera del plano; sin embargo, aunque considera la rigidez equivalente del elemento confinante superior, no consideran otros factores, por ejemplo, la formación de puntales de compresión en dos direcciones ortogonales y la variación de la longitud de los segmentos del muro. Con el método del Puntal Bidireccional, se predice de forma adecuada la resistencia de los muros; esto se debe a que considera otros factores, como la variación de la rigidez a lo largo de los elementos confinantes, la excentricidad del puntal de compresión y la formación de puntales de compresión en dos direcciones ortogonales.

De la revisión de la literatura se puede concluir que la falla del muro depende de la rigidez de los elementos confinantes en el plano y de la resistencia a compresión axial de la mampostería. Se pueden observar dos tipos de falla: el aplastamiento de la mampostería y la inestabilidad de los segmentos del muro.

En general, se conoce el comportamiento de los muros de mampostería confinada sujeta a cargas fuera del plano. Además, se han desarrollado modelos analíticos que predicen satisfactoriamente la resistencia fuera del plano de los muros. Sin embargo, el uso de dichos métodos puede no resultar práctico para los ingenieros en la práctica profesional. Por lo tanto, es necesario desarrollar ecuaciones de diseño que predigan de forma correcta la resistencia fuera del plano de los muros y las fuerzas que se transfieren a los elementos confinantes.

## Capítulo 3: Metodología

En este capítulo se presenta las actividades realizadas en este trabajo de investigación, las cuales son: (1) recopilación de datos experimentales obtenidos de la literatura, (2) determinación de los intervalos de valores de las variables para el análisis de sensibilidad de la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada (MMC), (3) obtención de la resistencia fuera del plano analítica de MMC, (4) desarrollo de programas computacionales para manejo de datos de MMC, (5) deducción de forma general de ecuación para determinar la resistencia fuera del plano de MMC, (6) deducción de parámetros que consideran la rigidez de los elementos confinantes (7) análisis de sensibilidad de la resistencia fuera del plano y fuerzas en el plano, (8) obtención de ecuaciones para el diseño fuera del plano y fuerzas en el plano para MMC y (9) validación de las ecuaciones de diseño fuera del plano.

### 3.1 Recopilación de los datos experimentales obtenidos de la literatura

De la revisión de la literatura se encontró que se han ensayado en el laboratorio 20 MMC sujetos a cargas uniformes fuera del plano. En la Tabla 3.1 se presentan las propiedades geométricas y mecánicas de los 20 muros, así como la referencia del trabajo donde se obtuvieron. En esta tabla  $L$  es la longitud del muro,  $H$  es la altura del muro,  $t$  es el espesor del muro,  $h_d$  es el peralte de la dala superior,  $h_c$  es el peralte de los castillos,  $\sigma$  es el esfuerzo axial del muro,  $f_c$  es la resistencia a compresión axial del concreto y  $f_m$  es la resistencia a compresión axial de la mampostería. En la Tabla 3.2 se presenta la resistencia experimental ( $W_{exp}$ ) y la resistencia analítica obtenida con el método del puntal bidireccional ( $W_{pb}$ ) para los 20 muros reportados en la literatura.

Tabla 3.1 - Propiedades geométricas y mecánicas de los 20 muros

Muro	$L$ (cm)	$H$ (cm)	$t$ (cm)	$h_d$ (cm)	$h_c$ (cm)	$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$fm$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Referencia
1	377	276	12	25	25	0.80	232.50	63.22	Moreno (2015)
2	377	276	12	25	25	0.83	264.31	66.08	Moreno (2015)
3	377	276	12	25	25	0.81	248.81	62.92	Moreno (2015)
4	377	276	12	25	25	0.82	264.41	42.32	Moreno (2015)
5	295	276	12	25	25	0.89	243.82	63.22	Moreno (2015)
6	295	276	12	25	25	0.94	261.66	66.08	Moreno (2015)
7	295	276	12	25	25	0.80	256.56	62.92	Moreno (2015)
8	295	276	12	25	25	0.87	255.34	42.32	Moreno (2015)
9	295	272	15	25	25	0.00	177.33	57.92	Varela et. al (2012a)
10	295	272	12	25	25	0.00	220.97	41.63	Varela et. al (2012a)
11	377	288	15	40	25	0.00	195.38	57.92	Varela et. al (2012a)
12	377	288	12	40	25	0.00	201.90	41.63	Varela et. al (2012a)
13	370	270	15	20	20	0.67	221.69	53.84	Varela et. Al (2012b)
14	370	270	15	20	20	2.00	238.00	53.84	Varela et. Al (2012b)
15	357	271	15	17	15	0.00	241.98	63.42	Chan (2012)
16	249	271	15	17	15	1.54	241.98	63.42	Chan (2012)
17	249	271	15	17	15	0.00	241.98	63.42	Chan (2012)
18	249	271	15	17	15	0.00	241.98	63.42	Chan (2012)
19	357	271	15	15	15	0.00	281.05	82.18	G. Cantón (2016)
20	275	271	15	15	15	0.00	269.50	82.18	G. Cantón (2016)

Tabla 3.2 - Resistencias experimentales y analíticas de los 20 muros

Muro	$W_{exp}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$W_{pb}$ (kg/m <sup>2</sup> )
1	898.37	1052.50
2	1069.68	1140.40
3	1127.81	1056.10
4	747.45	894.00
5	1370.50	1291.70
6	1795.72	1769.90
7	1841.61	1846.90
8	1452.08	1281.20
9	1683.55	1641.20
10	1454.12	943.00
11	1656.02	1531.80
12	1125.77	928.70
13	1487.77	1339.40
14	1627.47	1444.70
15	1020.74	1165.00
16	1879.34	1773.40
17	1507.14	1748.70
18	1610.13	1828.40
19	767.40	813.50
20	1146.70	1291.60

### 3.2 Determinación de los valores de los parámetros para el análisis de sensibilidad de la resistencia fuera del plano de MMC

De la revisión de la literatura se concluyó que las variables que tienen mayor influencia en la resistencia fuera del plano de los MMC son: (1) la relación de aspecto, (2) la relación de esbeltez, (3) la rigidez en el plano de los elementos confinantes, (4) la carga axial y (5) la resistencia a compresión axial de la mampostería. La relación de aspecto, la relación de esbeltez y la rigidez en el plano de los elementos confinantes están acopladas (Moreno, 2014). Mientras que, la carga axial (Varela et al. 2012a) y la resistencia a compresión axial de la mampostería son variables independientes (Moreno et al. 2016).

Para poder establecer los valores máximos y mínimos de las variables de estudio, se consideraron las especificaciones de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (NTC-Mampostería, 2004). Además, se consideró que dichos valores sean representativos de MMC que se construyen en la práctica. Los requisitos mínimos establecidos en las NTC-Mampostería para MMC indican que:

- 1) Existirán castillos por lo menos en los extremos de los muros e intersecciones con otros muros, y en puntos intermedios del muro a una separación no mayor que  $1.5 H$  ni 4 m. Los pretilos o parapetos deberán tener castillos con una separación no mayor que 4 m.
- 2) Existirá una dala en todo extremo horizontal de muro. Existirán dalas en el interior del muro a una separación no mayor de 3 m.
- 3) Los castillos y dalas tendrán como dimensión mínima el espesor de la mampostería del muro.
- 4) El concreto de castillos y dalas tendrá una resistencia a compresión axial del concreto  $f'_c$  no menor de 15 MPa (150 kg/cm<sup>2</sup>).

En la Tabla 3.3 se presentan los valores utilizados para el análisis de sensibilidad con base en las consideraciones anteriores. Para dicho análisis se asumen que, en general, el peralte de los elementos confinantes ( $h_{ec}$ ) es igual tanto para dalas como para castillos.

Tabla 3.3 - Valores de variables para el análisis de sensibilidad.

Variable	Valores					
$H$ (cm)	200	250	300	--	--	--
$L$ (cm)	200	250	300	350	400	
$T$ (cm)	12	15	20	--	--	--
$h_{ec}$ (cm)	15	20	25	30	--	--
$\sigma$ (kg/cm <sup>2</sup> )	0	0.8	1.6	2.4	3.2	4.0
$fm$ (kg/cm <sup>2</sup> )	10.20	20.40	61.20	101.97	--	--
$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	200					

Los valores máximos y mínimos para la altura y la longitud de los muros se seleccionaron con base en lo que se construye habitualmente. El valor mínimo de la altura representa la altura usual de una barda perimetral. El valor máximo de la altura es la máxima separación de dalas especificada en las NTC-Mampostería. Los valores de las longitudes son valores representativos de muros de bardas, viviendas y edificaciones. Los valores de los espesores de los muros se seleccionaron con base en los espesores comerciales de piezas de mampostería para uso estructural, las cuales son 12, 15 y 20 cm.

La rigidez en el plano de los elementos confinantes es función de la longitud, altura, espesor del muro, resistencia a compresión axial del concreto y peralte de los elementos confinantes. La longitud, altura y espesor del muro son variables de estudio descritas anteriormente. Por lo que la rigidez la podemos variar en función de la resistencia a compresión axial del concreto y del peralte de los elementos confinantes. Para este análisis se consideró una resistencia a compresión axial del concreto ( $f_c'$ ) constante e igual a 200 kg/cm<sup>2</sup>. El módulo de elasticidad se calculó con la ecuación Ecuación 3.1 (Rosado, 2014). Las NTC-Mampostería recomiendan que el ancho y el espesor mínimo de los elementos confinantes debe de ser, cuando menos, del mismo espesor que el panel de mampostería, por lo que, se seleccionaron peraltes de 15, 20, 25 y 30 cm.

$$E_c = 11,000 \sqrt{200}$$

Ecuación 3.1

Los valores de esfuerzos axiales de muros considerados en el análisis de sensibilidad se seleccionaron con base en un análisis de cargas gravitacionales para viviendas. Se consideró un muro cargador exterior en el cual se apoya una losa en una dirección. El claro de la losa fue de 4 m, con una carga uniformemente repartida de 500 kg/m<sup>2</sup>. El esfuerzo axial mínimo considerado (nulo) representa el correspondiente a una barda perimetral. El esfuerzo axial de 0.8 kg/cm<sup>2</sup> corresponde al de una estructura de 1 nivel. Por cada nivel adicional en la estructura que se quiera modelar hay que

agregar un esfuerzo axial de  $0.8 \text{ kg/cm}^2$ . En este trabajo se consideraron estructuras hasta de 5 niveles ( $4.0 \text{ kg/cm}^2$ ).

Se consideraron resistencias a compresión de la mampostería de 10.20, 20.40, 61.20 y  $101.97 \text{ kg/cm}^2$ , calculados sobre área neta. Dichos valores de resistencia, en general, representan las mamposterías utilizadas en México.

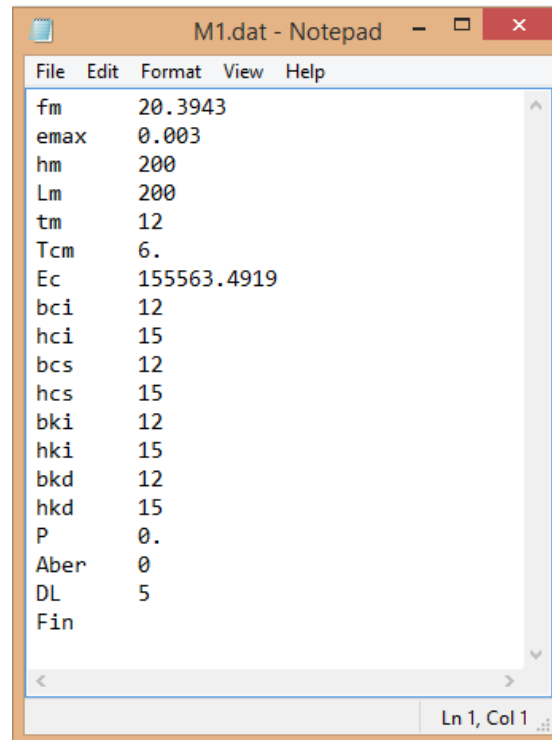
### 3.3 Obtención de la resistencia fuera del plano analítica de MMC

Se determinó analíticamente la resistencia fuera del plano de 3440 muros utilizando el método del puntal bidireccional. Con dichos muros se consideraron todas las combinaciones de los valores de las variables presentadas en la Tabla 3.3. Para poder utilizar el método del puntal bidireccional repetidamente, se desarrolló el programa computacional MPB en lenguaje FORTRAN (Moreno et al., 2015). Debido a la cantidad de muros estudiados se desarrollaron dos programas computacionales: el primero para generar archivos con las propiedades de cada muro, dicho archivo proporciona los datos de entrada para el programa MPB. El segundo para organizar los resultados obtenidos con el programa MPB de forma conveniente. Mayores detalles de dichos programas se presentan más adelante.

A continuación, se describen los pasos para utilizar el programa MPB:

- a) Se genera un archivo de entrada en formato “.dat” (por ejemplo “M1.dat”). En la Figura 3.1 se presenta un ejemplo del archivo de entrada, donde:
  - a.  $f_m$  es la resistencia a compresión axial de la mampostería sobre área neta en  $\text{kg/cm}^2$
  - b.  $e_{max}$  es la deformación unitaria al aplastamiento de la mampostería en  $\text{cm/cm}$
  - c.  $h_m$  es la altura a ejes del muro en  $\text{cm}$
  - d.  $L_m$  es la longitud a ejes del muro en  $\text{cm}$
  - e.  $t_m$  es el espesor del muro en  $\text{cm}$
  - f.  $T_{cm}$  es el espesor de las paredes de las celdas para piezas huecas en  $\text{cm}$
  - g.  $E_c$  es el módulo de elasticidad del concreto en  $\text{kg/cm}^2$  ( $E_c = 11,000 \sqrt{200}$ )

- h. bci es el ancho de la sección transversal de la dala inferior en cm
- i. hci es el peralte de la sección transversal de la dala inferior en cm
- j. bcs es el ancho de la sección transversal de la dala superior en cm
- k. hcs es el peralte de la sección transversal de la dala superior en cm
- l. bki es el ancho de la sección transversal del castillo izquierdo en cm
- m. hki es el peralte de la sección transversal del castillo izquierdo en cm
- n. bkd es el ancho de la sección transversal del castillo derecho en cm
- o. hkd es el peralte de la sección transversal del castillo derecho en cm
- p. P es la carga axial en kg/cm
- q. DL es la longitud de los elementos-tipo marco

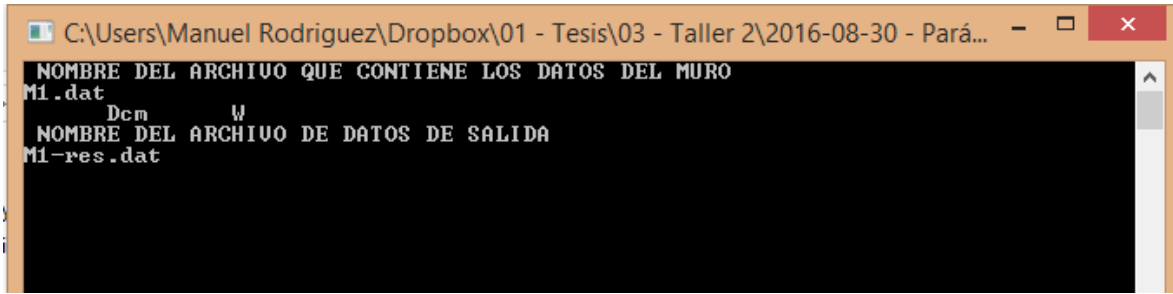


```
M1.dat - Notepad
File Edit Format View Help
fm      20.3943
emax   0.003
hm      200
Lm      200
tm      12
Tcm     6.
Ec      155563.4919
bci     12
hci     15
bcs     12
hcs     15
bki     12
hki     15
bkd     12
hkd     15
P       0.
Aber    0
DL      5
Fin
```

Figura 3.1.- Archivo de entrada para el programa MPB

Se ejecuta el programa MPB, se proporciona el nombre del archivo de entrada y el nombre del archivo de salida (por ejemplo "M1-res.dat") (Figura 3.2).





```

C:\Users\Manuel Rodriguez\Dropbox\01 - Tesis\03 - Taller 2\2016-08-30 - Pará...
NOMBRE DEL ARCHIVO QUE CONTIENE LOS DATOS DEL MURO
M1.dat
Dcm      W
NOMBRE DEL ARCHIVO DE DATOS DE SALIDA
M1-res.dat

```

Figura 3.2- Interfaz del programa MPB

- b) Se genera un archivo de salida con la resistencia fuera del plano, las fuerzas en el plano, los desplazamientos fuera del plano y el tipo falla del muro.

Debido a la cantidad de muros modelados, se modificó el programa MPB (MPB-mod) para obtener los resultados de  $n$  muros conjuntamente. La modificación consistió en lo siguiente:

- a) Se automatizó la lectura de los archivos de entrada. Adicionalmente, se pueden leer un conjunto de archivos de entrada correspondientes a diferentes muros. En la Figura 3.3 se presenta un ejemplo de una modelación que va del muro M1.dat hasta el muro M3.dat, todos los resultados se agrupan en un archivo denominado “01Agr1.dat”

```

C:\Users\Manuel Rodriguez\Dropbox\01 - Tesis\04 - Taller 3\2017-06-25 - Seg...
*****
Metodo del Puntal-Bidireccional para el calculo de resistencias de muros
Version del programa del 16 de Diciembre de 2016
*****

Este programa corre archivos grupalmente

*****

El programa va a leer el archivo de entrada con el siguiente formato:
M<Numero a ingresar>.dat
Ejemplos: M1.dat, M55.dat, M250.dat

*****

Criterio de falla:      Si descienden dos resistencias consecutivas se detiene
*****

Numero de archivo para iniciar <solo numero>
1
Numero de archivo para terminar <solo numero, pasos de unidad>
3
Numero de archivo para agrupar todo <solo numero>
1
*****

```

Figura 3.3 - Interfaz del programa MPB-mod

- b) El criterio de falla en el método del puntal bidireccional para que se presente una falla por aplastamiento de la mampostería es que se aplasten el 45% de las fibras. Sin embargo, el método del puntal bidireccional aumenta los desplazamientos fuera del plano de manera uniforme. Para que se obtenga la resistencia fuera del plano con un porcentaje de fibras aplastadas de 45% se agregaron líneas de programación para determinar con mayor precisión la resistencia fuera del plano y fuerzas en plano de muros con falla por aplastamiento. Para lo anterior se incluyó el método de interpolación lineal. En la Figura 3.4 se presenta un ejemplo donde el programa interpola entre desplazamientos fuera del plano (Dfp) de 0.8 y 0.9.

```

*****
Variables que se presentan a continuación:
Desplazamiento Fuera del plano (cm)-> Dfp
Resistencia fuera del plano (kg/m2) -> W
Fuerza en el plano (kg/cm) -> Fep !Ya dividida entre dos
Porcentaje de fibras(%)

*****

Se trabaja con el muro:      M1

¡Hay aplastamiento!
Dos líneas que se van a interpolar:
Dfp, W,      Fep,      %FP
    0.800000      733.210      11.2539      43.6553
    0.900000      815.178      12.6423      47.6170

Datos ya interpolados:

No. muro,W,Fip,Falla,Porc Falla, fm,L,h,t,hec,P
      1      761.032      11.7252      CM      45.0000
*****
Ln 1, Col 1

```

Figura 3.4 - Archivo de salida del programa MPB-mod

- c) Se automatizó la denominación del nombre del archivo de salida, agregando el sufijo “-res” al nombre del archivo de entrada.
- d) Se modificó el programa para generar un archivo, adicional, de salida con el resumen de un conjunto de muros modelados (Figura 3.5)

	1	2	3							
	761.032	1262.47	1656.45	11.7252	18.2140	22.9593	CM	45.0000	45.0000	45.0000
								20.3940	40.7880	61.1830
								200.000	200.000	200.000
								200.000	200.000	200.000
								12.0000	12.0000	12.0000
								15.0000	15.0000	15.0000
								0.00000	0.00000	0.00000

Ln 3, Col 108

Figura 3.5 - Archivo con resumen de resultados para un conjunto de muros modelados

### 3.4 Desarrollo de programas computacionales para manejo de datos de MMC

Se desarrollaron dos programas para agilizar el proceso de la información de los muros considerados en el análisis de sensibilidad. Ambos programas se desarrollaron en la plataforma “Mathematica”. El primero fue para la generación de archivos de entrada. Dados unos valores de características de muros que se desean estudiar, el programa genera archivos de entrada con las diferentes combinaciones. El segundo programa se desarrolló para el manejo de los resultados de salida. Dicho programa separa y agrupa los muros por familias, donde, cada una de las familias contiene muros con las mismas propiedades a excepción de una variable. Dicha separación permitió un mejor análisis del efecto de las variables en la resistencia fuera del plano y la fuerza en el plano de los muros.

### 3.5 Deducción de forma general de ecuación para determinar la resistencia fuera del plano de MMC

Para determinar una ecuación de diseño se requieren de dos partes: (1) conocer el efecto de las variables que influyen en el comportamiento de los muros y (2) definir una forma general de la ecuación que considere adecuadamente los efectos de dichas variables. Para el primer caso se desarrolló un análisis de sensibilidad. Para el segundo caso, se dedujo una ecuación a partir del método del puntal y resorte (PyR) (Varela et al., 2012). El método del PyR fue desarrollado para determinar la resistencia fuera del plano de MMC sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Adicionalmente, se revisaron las ecuaciones propuestas por Dawe et al. (1989) y Abrams et al. (1994), las cuales fueron desarrolladas para muros diafragma.

El método del PyR se basa en la formación de un mecanismo de arco en una dirección (Figura 3.6). Se asume la formación de puntales de compresión en los segmentos del muro. Debido a la carga fuera del plano, se produce un patrón de agrietamiento. Dicho patrón de agrietamiento define los segmentos del muro. La resistencia fuera del plano se obtiene mediante el equilibrio de las cargas aplicadas y las componentes

horizontales de los puntales de compresión. La rigidez de los elementos confinantes ( $KR$ ) se incluye mediante un resorte en la parte superior del muro.

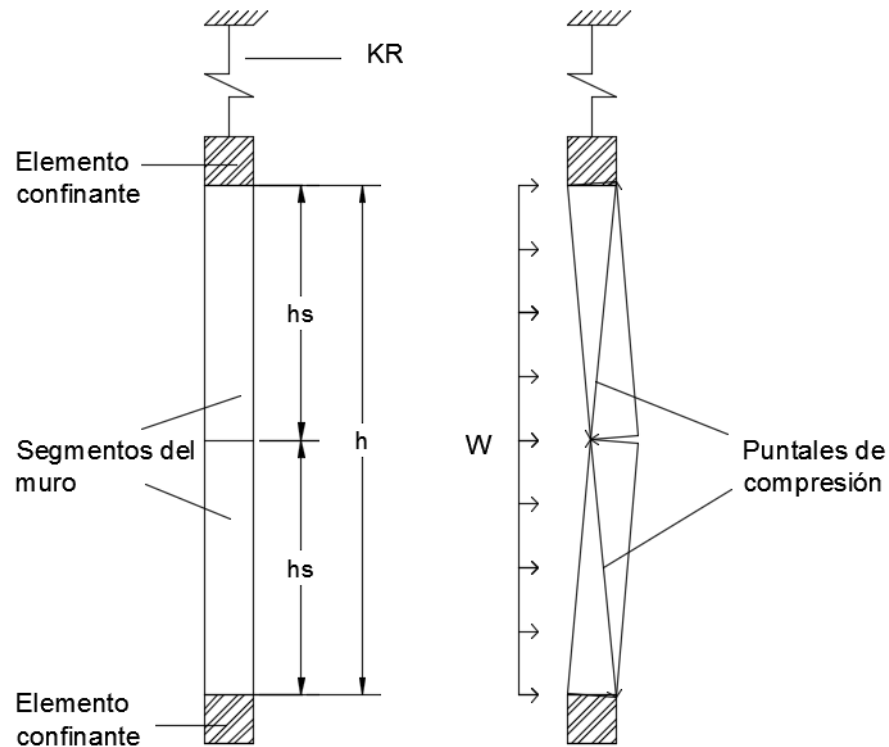


Figura 3.6 - Diagrama del método del puntal y resorte

Para el desarrollo de la ecuación se consideró una falla asociada al aplastamiento de la mampostería y que los puntales de compresión actúan en una sola dirección. A continuación, se presenta la deducción de una ecuación preliminar:

1. En la Figura 3.7 se presenta el diagrama del mecanismo de arco que se genera en el método del PyR. Con base en este mecanismo de arco se realiza el equilibrio horizontal de las fuerzas (Ecuación 3.2). En dicha ecuación, se asume que la mitad de la fuerza  $W$  se transfiere a los apoyos de los elementos confinantes y la otra mitad se equilibra con las componentes horizontales fuera del plano de los puntales de compresión.

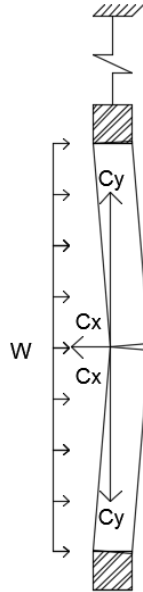


Figura 3.7 .- Componentes del mecanismo de arco del método de PyR

$$\frac{1}{2} W h = 2 C x \quad \text{Ecuación 3.2}$$

2. En la Ecuación 3.2  $Cx$  (Ecuación 3.3) y  $Cy$  (Ecuación 3.4) son las componentes horizontales y verticales, respectivamente, del puntal de compresión. Se pueden definir como:

$$C x = C \text{ Sen } (\gamma) \quad \text{Ecuación 3.3}$$

$$C y = C \text{ Cos } (\gamma) \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde  $\gamma$  es ángulo entre el eje horizontal del elemento confinante y la vertical del segmento de la mampostería (Figura 3.13)

3. Se sustituye el término del puntal de compresión ( $C$ ) (Ecuación 3.4) y la Ecuación 3.3 en la Ecuación 3.2:

$$\frac{1}{2} W h = 2 C \text{ Sen } (\gamma)$$

$$\frac{1}{2} W h = 2 \left( \frac{C y}{\text{Cos}(\gamma)} \right) \text{Sen } (\gamma)$$

$$\frac{1}{2} W h = 2 C y \tan(\gamma) \quad \text{Ecuación 3.5}$$

4. Despejando  $W$  y asumiendo ángulos pequeños ( $\tan(\gamma) = \gamma$ )

$$W = 4 \frac{C y \gamma}{h} \quad \text{Ecuación 3.6}$$

5. En la Figura 3.8 y en la Ecuación 3.7 se presenta el equilibrio en el plano entre la componente vertical del puntal de compresión ( $Cy$ ) y la fuerza en el resorte ( $FR$ ). El esfuerzo máximo que se puede presentar en el plano es el esfuerzo a compresión axial de la mampostería ( $fm$ ). En dicha figura, se define el ancho de contacto ( $b$ ) entre el panel de mampostería y el elemento confinante.  $\alpha$  es el ángulo que se presenta entre el elemento confinante y el segmento de mampostería. En la Ecuación 3.8 se presenta la magnitud de la fuerza en el resorte.

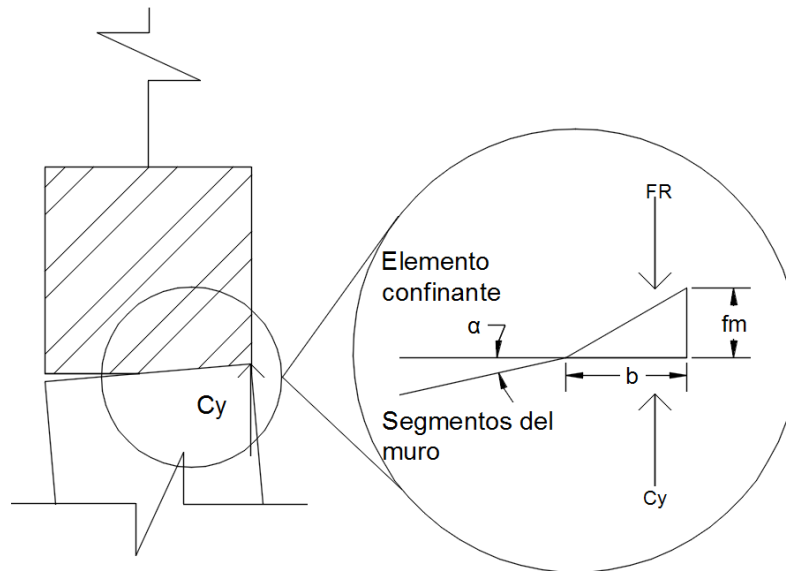


Figura 3.8- Diagrama de equilibrio en el plano entre la componente vertical del puntal de compresión y la fuerza en el resorte

$$C y = F R$$

Ecuación 3.7

$$FR = \left(\frac{1}{2}\right)(fm)(b) \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Sustituyendo la Ecuación 3.7 y Ecuación 3.8 en la Ecuación 3.6:

$$W = 2 \frac{fm b}{h} \gamma \quad \text{Ecuación 3.9}$$

6. En la Figura 3.9 (a) se presenta a detalle la rotación que se observa en un muro sujeto a cargas fuera del plano. En la Figura 3.9 (b) se presenta la interfaz entre el segmento de mampostería y el elemento confinante, en dicha figura  $\Delta Total$  es el desplazamiento total del elemento confinante, el cual, es el desplazamiento generado por la rotación como cuerpo rígido y un acortamiento de la mampostería debido al puntal de compresión. En la Figura 3.9 (c) se presenta el desplazamiento fuera del plano ( $\Delta h$ ) debido a la rotación de los segmentos de mampostería. Ya que ambos desplazamientos tienen un mismo ángulo de rotación ( $\alpha$ ), se puede obtener la relación expresada en la Ecuación 3.10.



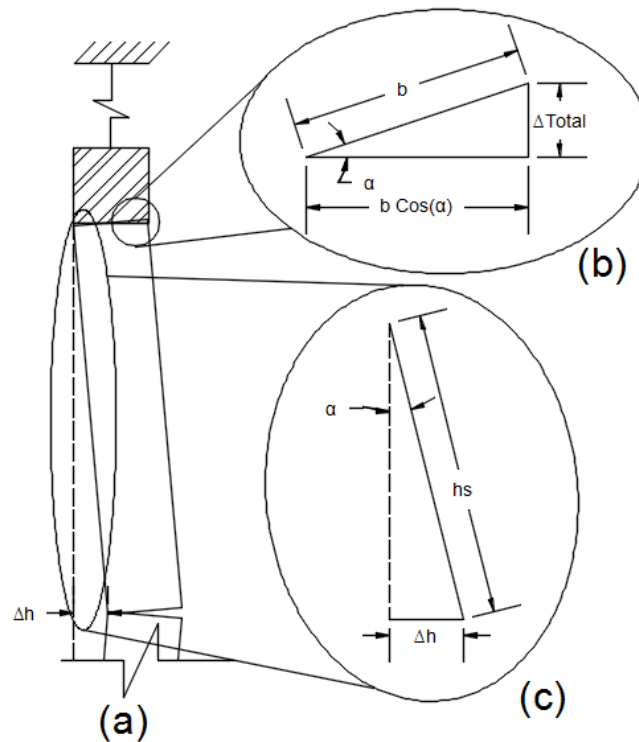


Figura 3.9 - Detalle de la rotación que se observa en un muro sujeto a cargas fuera del plano

$$\frac{b}{\Delta Total} = \frac{hs}{\Delta h} \quad \text{Ecuación 3.10}$$

Despejando el espesor de contacto y sabiendo que  $hs = h/2$  (Figura 3.6) se obtiene:

$$b = \frac{\Delta Total}{\Delta h} \left( \frac{h}{2} \right) \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Sustituyendo  $b$  en la Ecuación 3.9:

$$W = fm \frac{\Delta Total}{\Delta h} \quad \text{Ecuación 3.12}$$

7. Para calcular el desplazamiento  $\Delta Total$  se considera: (1) la rotación como cuerpo rígido de la mampostería ( $\Delta cr$ ) y (2) el acortamiento del segmento de mampostería ( $\Delta a$ ) que se genera debido al puntal de compresión. En la Figura

3.10 y en la Figura 3.11 se presentan ambos tipos de desplazamientos en el plano. El desplazamiento total en el plano se define en la Ecuación 3.13.

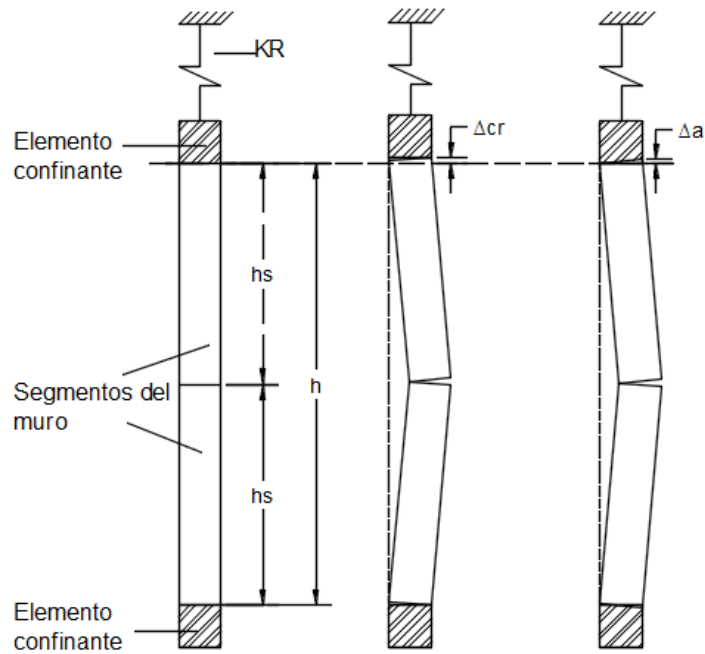


Figura 3.10.- Desplazamientos en el plano debido a la rotación de los segmentos

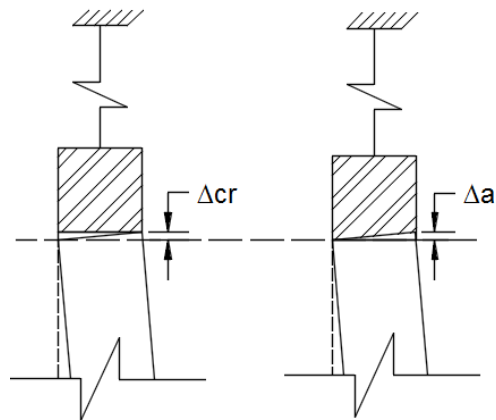


Figura 3.11 Desplazamientos  $\Delta_{cr}$  y  $\Delta_a$

$$\Delta_{Total} = \Delta_{cr} - \Delta_a$$

Ecuación 3.13

La ecuación preliminar está asociada al aplastamiento de la mampostería, por lo que se puede conocer el valor del acortamiento de los segmentos de la mampostería.  $\Delta a$  puede asociar a la deformación unitaria a la falla de la mampostería (Ecuación 3.14).

$$\Delta a = \varepsilon_{max} \frac{h}{2} \quad \text{Ecuación 3.14}$$

En la Figura 3.12 se presenta el desplazamiento en el plano debido a la rotación como cuerpo rígido. En dicha figura se observa que se puede obtener una relación lineal entre  $\Delta cr$  y  $\Delta h$  (Ecuación 3.15). Por tanto,  $\Delta cr$  se puede obtener sustituyendo  $h_s = h/2$  (Ecuación 3.16).

$$\frac{\Delta h}{h_s} = \frac{\Delta cr}{t} \quad \text{Ecuación 3.15}$$

$$\Delta cr = 2 \frac{\Delta h}{h} t \quad \text{Ecuación 3.16}$$

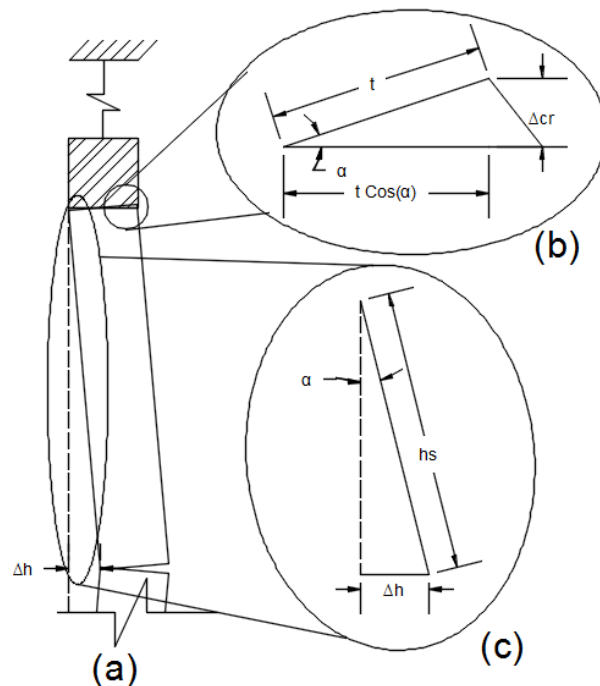


Figura 3.12 - Desplazamiento en el plano debido a la rotación como cuerpo rígido

8. Sustituyendo  $\Delta Total$ ,  $\Delta cr$  y  $\Delta a$  en la Ecuación 3.12 y factorizando términos:

$$W = \frac{fm}{2} \left( 4 \frac{t}{h} - \varepsilon \max \frac{h}{\Delta h} \right) \gamma \quad \text{Ecuación 3.17}$$

9. En la Figura 3.13,  $\alpha$  es el ángulo que se genera entre la horizontal del elemento confinante y la rotación del segmento de mampostería,  $\gamma$  es ángulo entre el eje horizontal del elemento confinante y la vertical del segmento de la mampostería,  $\beta$  es el ángulo que existe entre el puntal de compresión y el segmento de mampostería.

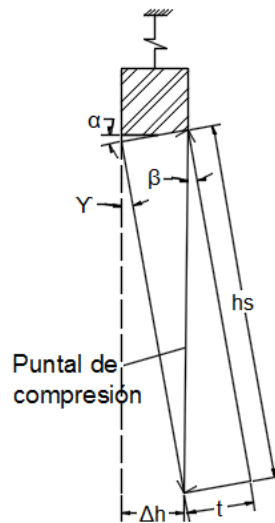


Figura 3.13.- Ángulos generado por la rotación del segmento de mampostería

De la Figura 3.13, se pueden obtener las siguientes relaciones:

$$\gamma = \beta - \alpha \quad \text{Ecuación 3.18}$$

$$\beta = \frac{2t}{h} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

$$\alpha = \frac{2 \Delta h}{h} \quad \text{Ecuación 3.20}$$

Sustituyendo  $\alpha$  y  $\beta$  en la Ecuación 3.18.

$$\gamma = \frac{2t}{h} - \frac{2 \Delta h}{h} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

El término de  $\Delta h$  de la Ecuación 3.21 y de la Ecuación 3.17 es el desplazamiento fuera del plano que se presenta debido a la rotación de los segmentos de mampostería. Este término está correlacionado con el espesor del muro, por lo que  $\Delta h$  se considera función del espesor, donde  $\alpha_1$  es un factor de calibración definido como un porcentaje del espesor  $t$ .

$$\Delta h = \alpha_1 t \quad \text{Ecuación 3.22}$$

Sustituyendo  $\gamma$  y  $\Delta h$  en la Ecuación 3.17:

$$W = \frac{fm t}{h} \left( 4 \frac{t}{h} - \varepsilon \max \frac{h}{\alpha_1 t} \right) (1 - \alpha_1) \quad \text{Ecuación 3.23}$$

La ecuación preliminar asociada a la falla por aplastamiento de la mampostería y desarrollada con base en el método del puntal y resorte (Ecuación 3.23) está en función de la resistencia a compresión axial de la mampostería, el espesor, la deformación unitaria máxima de la mampostería y la altura del muro.

Por otro lado, se encontraron algunas ecuaciones para determinar la resistencia fuera del plano de muros diafragma. Dawe et al. (1989) desarrollaron una ecuación calibrada con los resultados experimentales de muros diafragma construidos con bloques huecos de concreto y marcos de acero estructural.

$$W_{Dawe} = 4.5 fm^{0.75} t^2 \left( \frac{\alpha}{l^{2.5}} + \frac{\beta}{h^{2.5}} \right) \quad \text{Ecuación 3.24}$$

Donde  $fm$  es la resistencia a compresión axial de la mampostería en kPa,  $t$  es el espesor del muro de mampostería en mm,  $h$  es la altura del muro en mm y  $l$  es la longitud del muro en mm. El parámetro  $\alpha$  y  $\beta$  relacionan la rigidez de los elementos confinantes y están dados por la Ecuación 3.25 y la Ecuación 3.26, respectivamente:

$$\alpha = \frac{1}{h} (E I_c h^2 + G_s J_c t h)^{0.25} \leq 50 \quad \text{Ecuación 3.25}$$

$$\beta = \frac{1}{l} (E I_b l^2 + G_s J_b t l)^{0.25} \leq 50 \quad \text{Ecuación 3.26}$$

Donde  $E$  es el módulo de elasticidad de los elementos confinantes en MPa,  $I_c$  es la inercia de las columnas en  $\text{mm}^4$ ,  $I_b$  es la inercia de la dala en  $\text{mm}^4$ ,  $G_s$  es el módulo de cortante en MPa,  $J_c$  es la constante de torsión de la columna en  $\text{mm}^4$  y  $J_b$  es la constante de torsión de la dala en  $\text{mm}^4$ .

Por su parte, Abrams et al. (1994) desarrollaron una ecuación para determinar la resistencia fuera del plano (Ecuación 3.27) de muros diafragma. Dicha ecuación se calibró con resultados experimentales de muros diafragma construidos con bloques huecos de concreto y marcos de concreto reforzado. Dichos muchos fueron primero ensayados con cargas laterales en el plano y posteriormente con cargas uniformes fuera del plano.

$$W_{Angel} = \frac{2 fm}{(h/t)} R_1 R_2 \lambda \quad \text{Ecuación 3.27}$$

Dónde  $R_1$  es un factor de reducción debido a la carga lateral en el plano.  $R_2$  (Ecuación 3.28) es un factor de reducción debido al marco no rígido y  $\lambda$  (Ecuación 3.29) es un parámetro que es función de la esbeltez del muro ( $h/t$ ). Dónde  $EI$  es un parámetro de la rigidez a flexión del elemento confinante más pequeño, en  $\text{N mm}^2$ .

$$R_2 = 0.357 + 2.49 \times 10^{-14} EI \leq 1 \quad \text{Ecuación 3.28}$$

$$\lambda = 0.154 e^{-0.985 h/t} \quad \text{Ecuación 3.29}$$

En general, se encontró que en las ecuaciones propuestas para muros diafragma y la obtenida a partir del método del puntal y resorte, la resistencia fuera del plano depende de la resistencia a compresión axial de la mampostería, del espesor y de la rigidez en el plano de los elementos confinantes.

### 3.6 Deducción de los parámetros que consideran la rigidez de los elementos confinantes

La rigidez del marco de elementos confinantes depende de: el espesor, la longitud y altura del muro, las dimensiones de la sección transversal y módulo de elasticidad de los elementos confinantes. Debido a que se trata de un sistema formado por varios elementos (dala y castillos) y con restricciones adicionales proporcionadas por el panel de mampostería, se propone el uso de dos rigideces equivalentes: una horizontal y una vertical. Dichas rigideces equivalentes son parámetros simplificados que consideran las variables mecánicas y geométricas mencionadas anteriormente.

Por facilidad, se consideraron rigideces equivalentes individuales para la dala superior y para los castillos. La rigidez de la dala inferior no se considera debido a que está empotrada en toda su longitud; por tanto, se puede considerar que no forma parte del marco de elementos confinantes. La rigidez de la dala superior y de los castillos están acopladas; es decir, la rigidez de los castillos afecta la rigidez equivalente de la dala y viceversa.

En este trabajo se propone calcular las rigideces individuales de los elementos confinantes considerándolos como una viga empotrada en ambos extremos. Dicha rigidez individual se corrige con un factor que considere el acoplamiento mencionado anteriormente.

Para determinar la rigidez equivalente de la dala superior se asume que las fuerzas en el plano de los puntales de compresión ( $F_p$ ) se transfieren excéntricamente a los elementos confinantes (Figura 3.14). Por lo tanto, se consideraron los desplazamientos en el plano asociados con flexión ( $\Delta f$ ) y los asociados con torsión ( $\Delta t$ ). Los pasos para determinar la rigidez equivalente se describen a continuación:

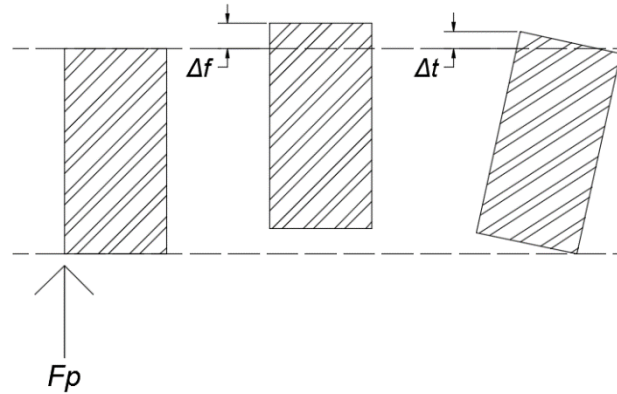


Figura 3.14.- Desplazamiento por flexión y por torsión debido a una fuerza excéntrica

- 1) La rigidez de la dala se puede obtener como la relación entre una fuerza dada y su correspondiente desplazamiento global ( $\Delta G$ ) (Ecuación 3.30). Los desplazamientos  $\Delta G$  se obtienen como la suma de los desplazamientos asociados con flexión ( $\Delta f$ ) y los asociados con torsión ( $\Delta t$ ) (Ecuación 3.31).

$$K_D = \frac{Fp}{\Delta G} \quad \text{Ecuación 3.30}$$

$$\Delta G = \Delta f + \Delta t \quad \text{Ecuación 3.31}$$

- 2) El desplazamiento  $\Delta f$  se calcula considerando que la fuerza  $C_y$  se transfiere concéntricamente a la dala superior (Figura 3.15 (b)). El desplazamiento al centro del claro de una viga sujeta a una carga puntual (Figura 3.16) se puede calcular como la fuerza aplicada entre su rigidez a flexión ( $K_f$ ) (Ecuación 3.32)

$$\Delta f = \frac{Fp}{K_f} \quad \text{Ecuación 3.32}$$

Dicha rigidez está dada por (Ecuación 3.33)



$$K_f = \frac{192 E I_D}{L^3}$$

Ecuación 3.33

Por tanto,  $\Delta f$  se puede calcular como

$$\Delta f = \frac{L^3 F_p}{192 E I_D}$$

Ecuación 3.34

Donde  $E$  es el módulo de elasticidad de la dala,  $I_D$  es la inercia de la sección transversal de la dala y  $L$  es la longitud de la dala.

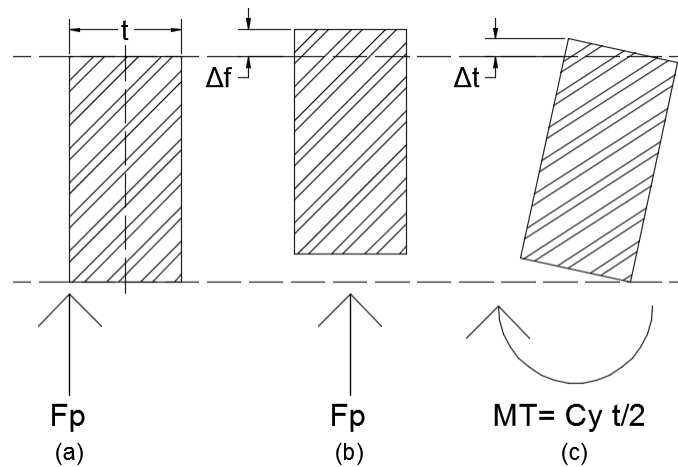


Figura 3.15 – Sistema equivalente de fuerzas aplicadas en la dala

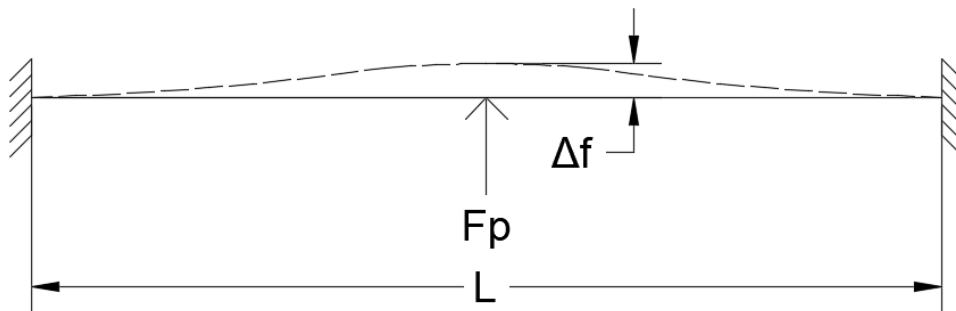


Figura 3.16 – Dala empotrada en sus extremos

- 3) El desplazamiento  $\Delta t$  se calcula considerando que la fuerza  $F_p$  se transfiere excéntricamente a la dala superior (Figura 3.15 (c)). El desplazamiento  $\Delta t$  se puede calcular en función de la rotación ( $\theta_T$ ) generada por la fuerza excéntrica  $F_p$  (Figura 3.17).  $\theta_T$  se puede calcular como la relación entre el momento generado por la excentricidad de  $F_p$  ( $MT$ ) y la rigidez torsional ( $K_t$ ) (Ecuación 3.35.).

$$\theta_T = \frac{MT}{K_t} \quad \text{Ecuación 3.35}$$

El momento torsionante ( $MT$ ) se obtiene asumiendo que la fuerza  $F_p$  tiene una excentricidad igual a un medio del espesor de la dala (Figura 3.15 (c)).

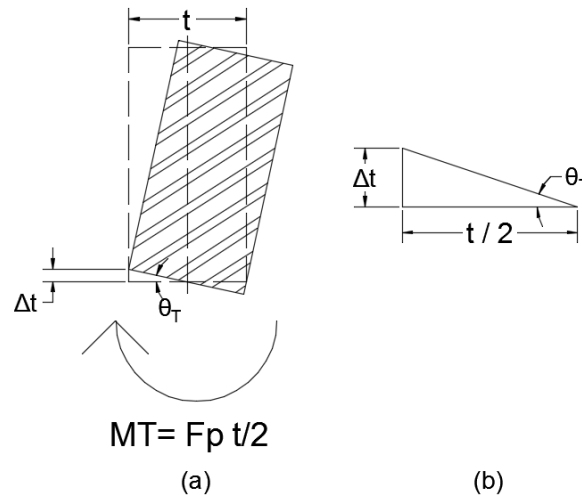


Figura 3.17 – Rotación debida a MT

La rigidez torsional de una viga empotrada en ambos extremos está dada por la Ecuación 3.36

$$K_t = \frac{G J_D}{L} \quad \text{Ecuación 3.36}$$

Donde  $G$  es el módulo de cortante de la dala,  $J_D$  es la constante de torsión de la dala y  $L$  es la longitud de la dala. Por tanto:

$$\theta_T = \frac{F_p t L}{2 G J_D} \quad \text{Ecuación 3.37}$$

El desplazamiento  $\Delta t$  se puede calcular como

$$\Delta t = \frac{Fp t^2 L}{4 G J_D} \quad \text{Ecuación 3.38}$$

4) El desplazamiento global ( $\Delta G$ ) se obtiene sustituyendo  $\Delta f$  y  $\Delta t$  en la Ecuación 3.31.

$$\Delta G = \frac{L^3 Fp}{192 E I_D} + \frac{Fp t^2 L}{4 G J_D} \quad \text{Ecuación 3.39}$$

Por tanto, la rigidez equivalente de la dala se puede calcular sustituyendo  $\Delta G$  en Ecuación 3.30:

$$KD = \frac{Fp}{\frac{L^3 Fp}{192 E I_D} + \frac{Fp t^2 L}{4 G J_D}} \quad \text{Ecuación 3.40}$$

Factorizando  $Fp$  y reacomodando los términos de  $KD$  se obtiene:

$$KD = \frac{192 E I_D G J_D}{G J_D L^3 + 48 E I_D t^2 L} \quad \text{Ecuación 3.41}$$

5) La rigidez individual de la dala superior y de los castillos es función del módulo de elasticidad ( $E$ ), la inercia de la sección transversal ( $I_D$  e  $I_C$ ) y de sus correspondientes longitudes ( $L$  y  $H$ , respectivamente). Por otro lado, la rigidez del marco se puede obtener como la suma de las rigideces de la dala y de los castillos. Por tanto, se propone considerar que el factor que toma en cuenta la influencia de la rigidez de los castillos en la rigidez de la dala ( $KDR$ ) se puede obtener en función de las rigideces relativas de los elementos confinantes (Ecuación 3.42).

$$KRD = \frac{\frac{E I_C}{H}}{\frac{E I_D}{L} + \frac{E I_C}{H}} \quad \text{Ecuación 3.42}$$

Asumiendo que el módulo de elasticidad de la dala y los castillos son iguales:

$$KRD = \frac{I_C L}{I_D H + I_C L} \quad \text{Ecuación 3.43}$$

6) Por tanto, la rigidez equivalente de la dala superior (rigidez vertical  $K_v$ ) estará dada por:

$$K_v = \left( \frac{192 E I_D G J_D}{G J_D L^3 + 48 E I_D t^2 L} \right) \left( \frac{I_C L}{I_D H + I_C L} \right) \quad \text{Ecuación 3.44}$$

Por su parte, la rigidez equivalente de los castillos (rigidez horizontal  $K_H$ ) se obtuvo de forma similar a  $K_v$ . Por tanto,  $K_H$  está dada por:

$$K_H = \left( \frac{192 E I_C G J_C}{G J_C H^3 + 48 E I_C t^2 H} \right) \left( \frac{I_D H}{I_D H + I_C L} \right) \quad \text{Ecuación 3.45}$$

Donde  $J_C$  es la constante de torsión de los castillos,  $I_C$  es la inercia de la sección transversal de los castillos.

### 3.7 Análisis de sensibilidad de la resistencia fuera del plano y fuerzas en el plano.

Se desarrolló un análisis de sensibilidad para determinar el efecto de las diferentes variables que influyen en la resistencia fuera del plano de los MMC. Para dicho análisis se consideraron los valores presentados en la Tabla 3.3. En el análisis de sensibilidad se utilizaron los resultados obtenidos para 3440 muros. Para estudiar el

efecto individual de cada variable, se generaron familias de curvas. Dichas curvas se generaron a partir de los resultados obtenidos para muros en los cuales se mantuvieron constantes todas variables y se modificó la variable de interés. Posteriormente, se obtuvo una curva promedio de dicha familia de curvas. Se propusieron y evaluaron diferentes ecuaciones de la resistencia fuera del plano en función de la variable estudiada.

Por ejemplo, en la Figura 3.18 se presentan curvas resistencia fuera del plano – resistencia a compresión axial de la mampostería. En dicha figura, todos los puntos de la curva C1 representan muros con una longitud de 300 cm, una altura de 250 cm, un espesor de 20 cm, secciones transversales de los elementos confinantes de 20x30 cm y un esfuerzo axial de 0 kg/cm<sup>2</sup>. En la curva C2, todos los puntos representan muros con una longitud de 300 cm, una altura de 250 cm, un espesor de 15 cm, secciones transversales de los elementos confinantes de 15x20 cm y un esfuerzo axial de 0 kg/cm<sup>2</sup>. En ambas curvas el parámetro que se modificó fue la resistencia a compresión axial de la mampostería. Para una misma curva, a todos los muros les corresponde un mismo valor de  $K_v$  y  $K_H$ ; sin embargo, para curvas diferentes los valores de  $K_v$  y  $K_H$  son diferentes. Se realizó un análisis de sensibilidad, similar, para las fuerzas en el plano.

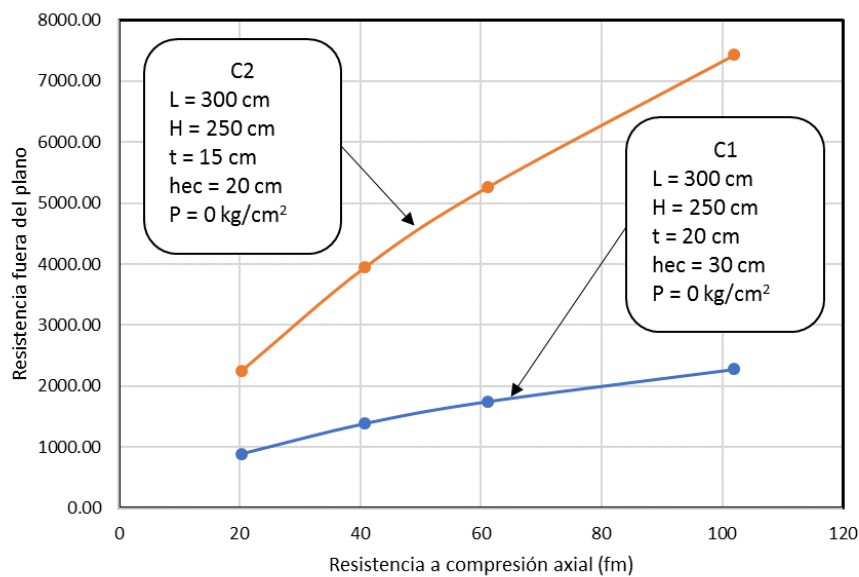


Figura 3.18 - Ejemplo de familias de muros con la variación de  $f_m$

### 3.8 Obtención de ecuaciones para el diseño fuera del plano y fuerzas en el plano para MMC

Para determinar que ecuación representaba un mejor ajuste a los resultados se utilizó el valor de  $R^2$ , el cual es el cuadrado del coeficiente de correlación.  $R^2$  toma valores entre 0 y 1 (0 cuando las variables son independientes y 1 cuando entre ellas existe una relación perfecta). Por tanto, se seleccionó la ecuación que presentó el valor de  $R^2$  más cercano a uno. Dicho análisis se realizó primero para la resistencia a compresión axial de la mampostería (Figura 3.18) considerando los valores presentados en la Tabla 3.3. Inicialmente se consideraron únicamente muros con carga axial nula. Se realizó un análisis similar del efecto del espesor de los muros en la resistencia fuera del plano. Posteriormente, se evaluó el efecto de las rigideces  $K_v$  y  $K_H$  individualmente. Finalmente, se evaluó el efecto del esfuerzo axial en la resistencia fuera del plano. Adicionalmente, se obtuvieron ecuaciones para determinar las fuerzas en el plano siguiendo un procedimiento similar al descrito anteriormente.

### 3.9 Validación de las ecuaciones de diseño fuera del plano

Se validaron las ecuaciones para determinar la resistencia fuera del plano obtenidas en este trabajo. Dicha validación consistió en comparar las resistencias experimentales de 20 muros con las correspondientes analíticas obtenidas con las ecuaciones propuestas en este trabajo, así mismo se comparan con las resistencias analíticas obtenidas con ecuaciones propuestas por Dawe et al. (1989) y Abrams et al. (1994).

## Capítulo 4: Resultados y discusión de los resultados.

En este capítulo se presentan y discuten: (1) los resultados del análisis de sensibilidad de las variables que influyen en la resistencia fuera del plano; (2) las ecuaciones para determinar la resistencia fuera del plano, (3) las ecuaciones para determinar las fuerzas en el plano, (4) la validación de las ecuaciones de diseño propuestas y (5) el procedimiento de diseño utilizando las ecuaciones desarrolladas en este trabajo.

### 4.1 Análisis de sensibilidad de la resistencia fuera del plano

En la revisión de la literatura se identificaron que las principales variables que influyen, significativamente, en la resistencia fuera del plano son: (1) la resistencia a compresión axial de la mampostería, (2) el espesor del muro, (3) la longitud del muro, (4) la altura del muro, (5) el peralte de los elementos confinantes y (6) el esfuerzo axial del muro. En esta sección, se presentan los resultados del análisis de sensibilidad de la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada. Se consideraron las variables mencionadas anteriormente (Tabla 3.1). Dicho análisis de sensibilidad se realizó con los resultados analíticos, de 3440 muros, obtenidos con el MPB.

#### 4.1.1 Efecto de la resistencia a compresión axial de la mampostería

En la Figura 4.1 se presentan curvas de resistencia fuera del plano – resistencia a compresión axial de la mampostería para diferentes familias de muros. En este trabajo, una familia de muros se refiere a un conjunto de muros con propiedades geométricas y mecánicas iguales, donde únicamente se modifican los valores de la variable de estudio. Por ejemplo, en la Figura 4.1 para cada curva, se mantuvo constante la geometría del muro, la sección transversal de los elementos confinantes, las propiedades mecánicas del concreto y se varió la resistencia a compresión axial de la mampostería. En dicha figura todos los muros tuvieron esfuerzo axial nulo.

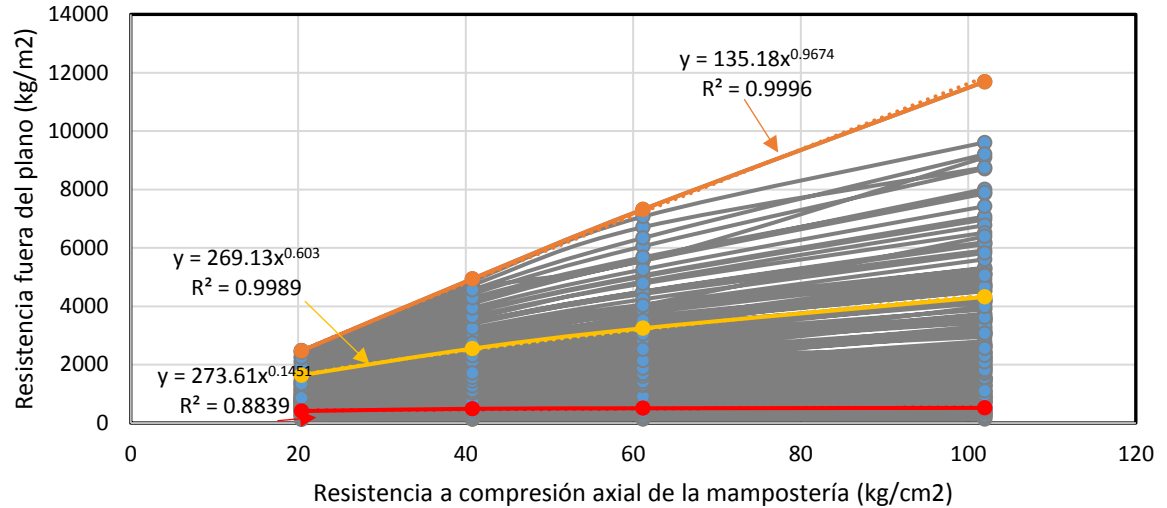


Figura 4.1.- Curvas de resistencia fuera del plano – resistencia a compresión axial de la mampostería

En la Figura 4.1 se observa que conforme la resistencia a compresión axial de la mampostería aumenta, la resistencia fuera del plano del muro aumenta. Dicho comportamiento, es consistente con lo reportado en la literatura (Moreno et al., 2015). También se observa que el comportamiento de las familias de muros no es igual; por ejemplo, para una familia de muros se tiene una relación lineal, mientras que para otras se puede ajustar mediante una función potencial. Dicha diferencia está asociada con la variación de la rigidez del marco de elementos confinantes. Las familias de muros con las menores resistencias fuera del plano están asociadas con las menores rigideces en el plano del marco de elementos confinantes. Por su parte, las familias de muros con las mayores resistencias fuera del plano están asociadas con las mayores rigideces. Mayores detalles se discuten en la sección de ecuaciones de diseño.

#### 4.1.2 Efecto del espesor del muro

En la Figura 4.2 se presentan curvas de resistencia fuera del plano – espesor del muro. En dicha figura, cada curva corresponde a un conjunto de muros con



propiedades geométricas y mecánicas iguales, variando el espesor del muro. Todos los muros tuvieron esfuerzo axial nulo.

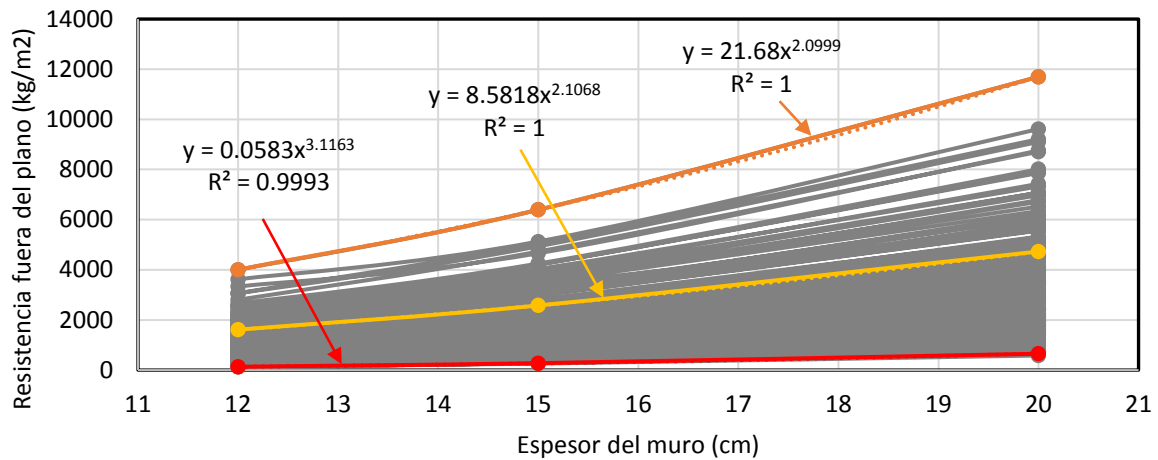


Figura 4.2.- Curvas de resistencia fuera del plano – espesor del muro

En la Figura 4.2, se observó que conforme el espesor del muro aumenta, la resistencia fuera del plano del muro aumenta. Dicho comportamiento es consistente con el reportado en la literatura (Varela et al., 2012a). Similar que para el caso de la resistencia compresión axial de la mampostería, el efecto del espesor del muro se puede ajustar mediante una función potencial que depende de la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes. Sin embargo, es importante señalar que la rigidez en el plano es función del espesor del muro. Para fines prácticos, se consideró que dicho espesor no influye significativamente en la rigidez en el plano. Por tanto, la influencia del espesor del muro se puede ajustar mediante una función potencial.

#### 4.1.2.1 Efecto de la rigidez vertical y horizontal

En la Figura 4.3 se presenta la gráfica de resistencia fuera del plano - rigidez vertical ( $K_v$ ). Donde  $K_v$  se calculó con la Ecuación 3.44. En dicha figura se observa que conforme  $K_v$  aumenta, la resistencia fuera del plano del muro aumenta. Este comportamiento es consistente con el comportamiento reportado en la literatura (Varela et al. 2012a; Moreno et al. 2015; G. Cantón 2016). En la Figura 4.3 se observa,

que en general, el efecto de la rigidez vertical se puede ajustar como una función potencial.

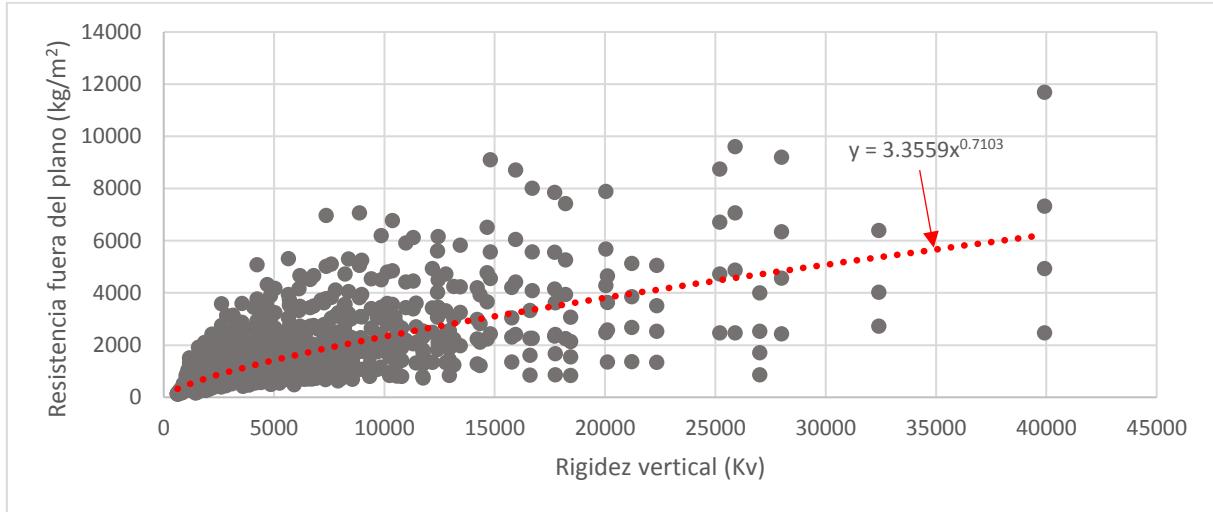


Figura 4.3.- Resistencia fuera del plano - rigidez vertical ( $K_v$ )

En la Figura 4.4 se presenta la gráfica de resistencia fuera del plano - rigidez horizontal ( $K_h$ ). Se observa que conforme  $K_h$  aumenta, la resistencia fuera del plano del muro aumenta. El comportamiento de la resistencia fuera del plano es consistente con el comportamiento reportado en la literatura (Varela et al. 2012a; Moreno et al. 2015; G. Cantón 2016). En dicha figura se observa, que en general, el efecto de la rigidez horizontal no tiene una forma definida tan clara como para el caso de  $K_v$ ; sin embargo, para fines prácticos se consideró similar para ambos casos. Mayores detalles se discuten en la sección de ecuaciones de diseño.

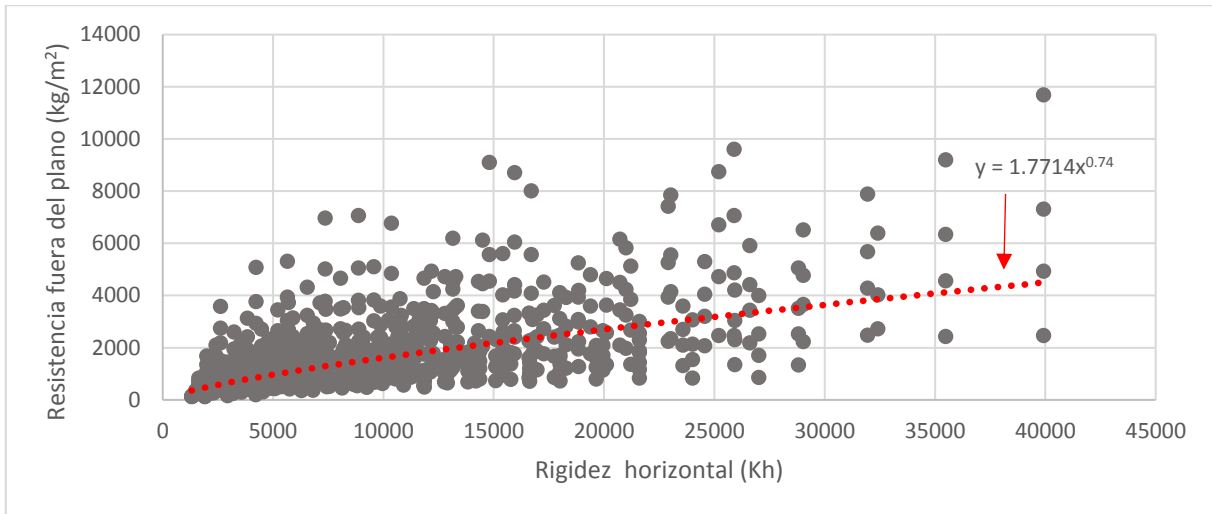


Figura 4.4.- Resistencia fuera del plano - rigidez horizontal ( $K_H$ )

#### 4.1.3 Efecto del esfuerzo axial del muro

En la Figura 4.5 (a) se presentan curvas de resistencia fuera del plano – esfuerzo axial del muro para muros con rigideces  $K_v$  mayores a 3,000 y en la Figura 4.5 (b) se presentan las curvas de resistencia fuera del plano – esfuerzo axial del muro para muros con rigideces  $K_v$  menores a 3,000. En dicha figura, cada curva corresponde a un conjunto de muros con propiedades geométricas y mecánicas iguales, variando el esfuerzo axial aplicado al muro.

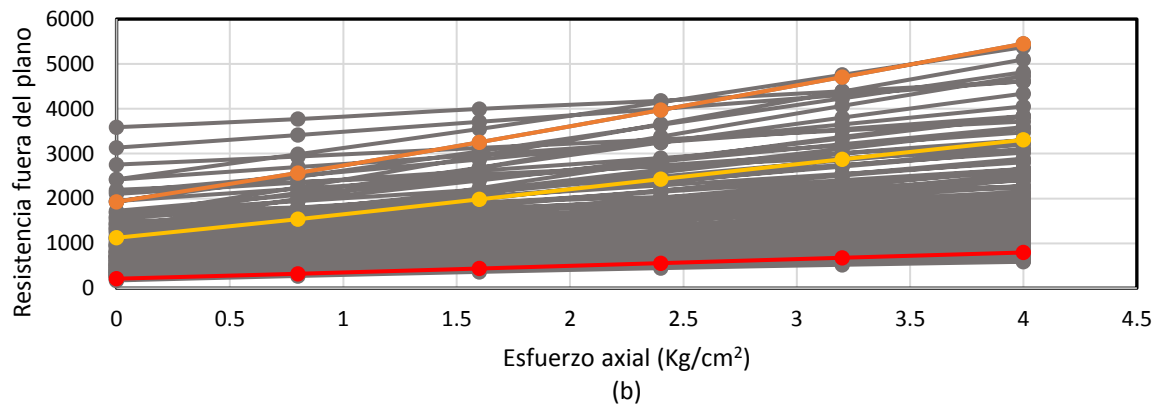
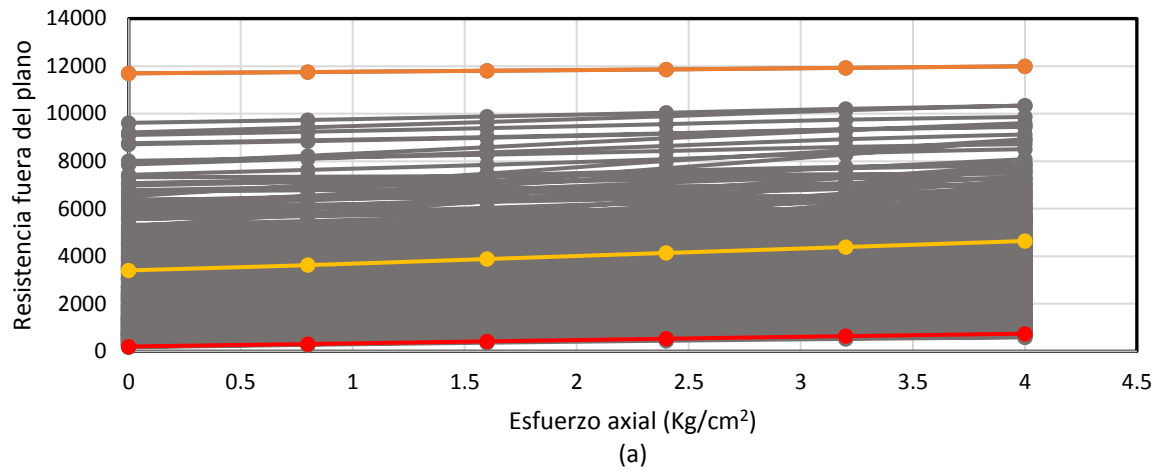


Figura 4.5.- Resistencia fuera del plano – esfuerzo axial del muro para muros con rigideces  $K_v$  (a) mayores a 3,000 y (b) menores a 3,000

En la Figura 4.5 (a) y Figura 4.5 (b), se observa que para los muros con menores rigideces conforme el esfuerzo axial del muro aumenta, la resistencia fuera del plano del muro aumenta significativamente. Por su parte, para los muros con las mayores rigideces, no hay un incremento significativo de la resistencia fuera del plano conforme el esfuerzo axial aumenta. Esto se debe a que el incremento de la resistencia fuera del plano está limitado por el aplastamiento de la mampostería. Dicho comportamiento es consistente con el reportado en la literatura (Varela et al. 2012b). Por tanto, el

efecto del esfuerzo axial se puede considerar en función de la rigidez en el plano del marco de elementos confinantes. Mayores detalles se discuten en la sección de ecuaciones de diseño.

#### 4.2 Ecuaciones para determinar la resistencia fuera del plano.

La resistencia fuera del plano de un muro de mampostería confinada se puede determinar como la suma de la contribución del muro confinado con esfuerzo axial nulo y la del esfuerzo axial (Ecuación 4.1).

$$W_{ec} = W_{ec|\sigma=0} + \Delta W_{ec} \quad \text{Ecuación 4.1}$$

Dónde:

$W_{ec}$  es la resistencia fuera del plano de un muro de mampostería confinada.

$W_{ec|\sigma=0}$  es la contribución a la resistencia fuera del plano para un muro con esfuerzo axial nulo.

$\Delta W_{ec}$  es la contribución del esfuerzo axial a la resistencia fuera del plano del muro.

Inicialmente, se desarrolló una ecuación para determinar la resistencia fuera del plano con esfuerzo axial nulo. En dicha ecuación se consideraron los efectos de la resistencia a compresión axial de la mampostería, el espesor del muro, la longitud y la altura del muro, así como el peralte de los elementos confinantes. Posteriormente, se desarrolló una ecuación para determinar la contribución del esfuerzo axial a la resistencia fuera del muro.

#### 4.2.1 Ecuación para determinar la resistencia fuera del plano de muros con esfuerzo axial nulo

En la Figura 4.1 se observa que el efecto que tiene la resistencia a compresión axial de la mampostería en la resistencia fuera del plano para cada familia de muros depende de la rigidez de los elementos confinantes, principalmente de  $K_v$ . Para muros con valores cercanos a la rigidez mínima estudiada de  $K_v$ , el efecto de la resistencia a compresión axial de la mampostería en la resistencia fuera del plano no es significativo. Esto se debe a que el tipo de falla para estos muros estará asociado con la inestabilidad de los segmentos de mampostería; es decir, no se alcanza el aplastamiento de la mampostería. Por su parte, para muros con valores cercanos a la rigidez máxima estudiada de  $K_v$ , el efecto de la resistencia a compresión axial de la mampostería a la resistencia fuera del plano es significativa. Esto se debe a que el tipo de falla de dichos muros está asociada con el aplastamiento de la mampostería, es decir, se alcanza el aplastamiento de la mampostería.

Para considerar dichos efectos, se realizaron ajustes de ecuaciones con forma potencial para diferentes rangos de  $K_v$  (Ecuación 4.2). Donde  $W(fm)$  es la aportación a la resistencia fuera del plano de la resistencia a compresión axial de la mampostería y  $a_1$  es función de  $K_v$ . Se consideraron seis rangos de  $K_v$  y los correspondientes valores máximos y mínimos para los muros estudiados en el análisis de sensibilidad (Tabla 4.1). Se trató de que cada rango de  $K_v$  tuviera el mismo número de muros.

$$W(fm) = fm^{a_1}$$

Ecuación 4.2

Tabla 4.1.- Rangos de  $K_v$  usados en el análisis de sensibilidad

Nomenclatura	Valor mínimo de $K_v$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Valor máximo de $K_v$ (kg/cm <sup>2</sup> )	Número de muros considerados
$K_{vmin}$	624.78	624.78	4
Rango 1	624.78	1800	120
Rango 2	1800	3200	124
Rango 3	3200	4900	120
Rango 4	4900	7500	120
Rango 5	7500	12000	120
Rango 6	12000	39934.46	115
$K_{vmax}$	39934.46	39934.46	4

En la Figura 4.6 se presentan curvas de resistencia fuera del plano promedio por rango de  $K_v$  – resistencia a compresión axial de la mampostería. En dicha figura se observa que para la rigidez máxima el valor de  $a_1$  tiende a ser 1; por su parte, para la rigidez mínima dicho valor tiende a cero. En la Tabla 4.2 se presentan los valores de  $a_1$  para los diferentes rangos considerados y su correspondiente coeficiente de correlación ( $R^2$ ). Dichos valores se obtuvieron mediante un ajuste de mínimos cuadrados. Los valores de  $R^2$  variaron entre 0.995 y 1, lo cual indica una buena correlación.

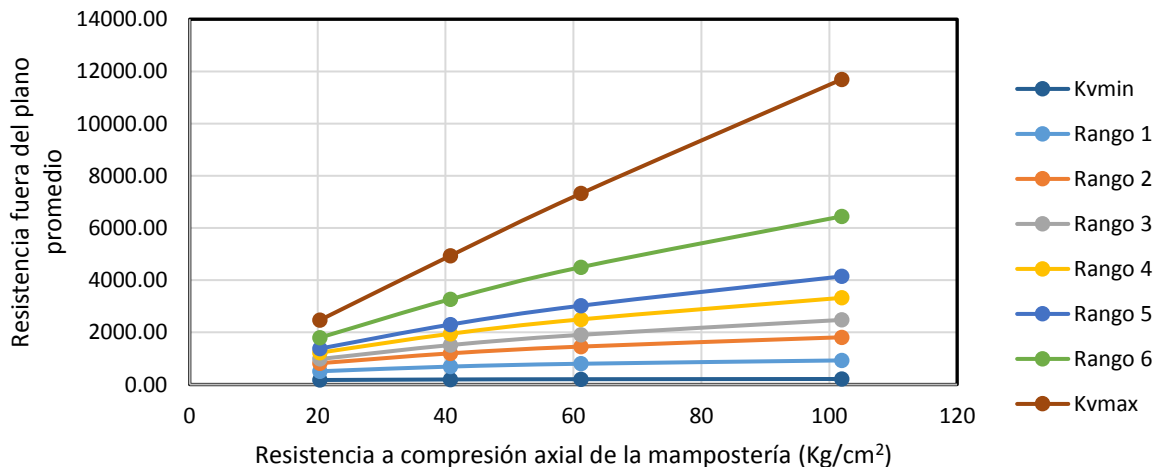


Figura 4.6 - Resistencia fuera del plano promedio por rango de  $K_v$  – resistencia a compresión axial de la mampostería

Tabla 4.2.- Valores de  $a_1$  para los rangos de  $K_v$ 

Rango	$a_1$	$R^2$
$K_{Vmin}$	0.1251	0.9725
Rango 1	0.374	0.9903
Rango 2	0.4953	0.9964
Rango 3	0.5782	0.9975
Rango 4	0.6229	0.998
Rango 5	0.685	0.9981
Rango 6	0.7951	0.9976
$K_{Vmax}$	0.9674	0.9996

En la Figura 4.7 se presentan los valores de  $a_1 - K_v$ . Adicionalmente, mediante mínimos cuadrados se obtuvo una ecuación para determinar  $a_1$  en función de  $K_v$  (Ecuación 4.3). El valor de  $R^2$  de dicha ecuación fue de 0.9714, lo cual indica una buena correlación.



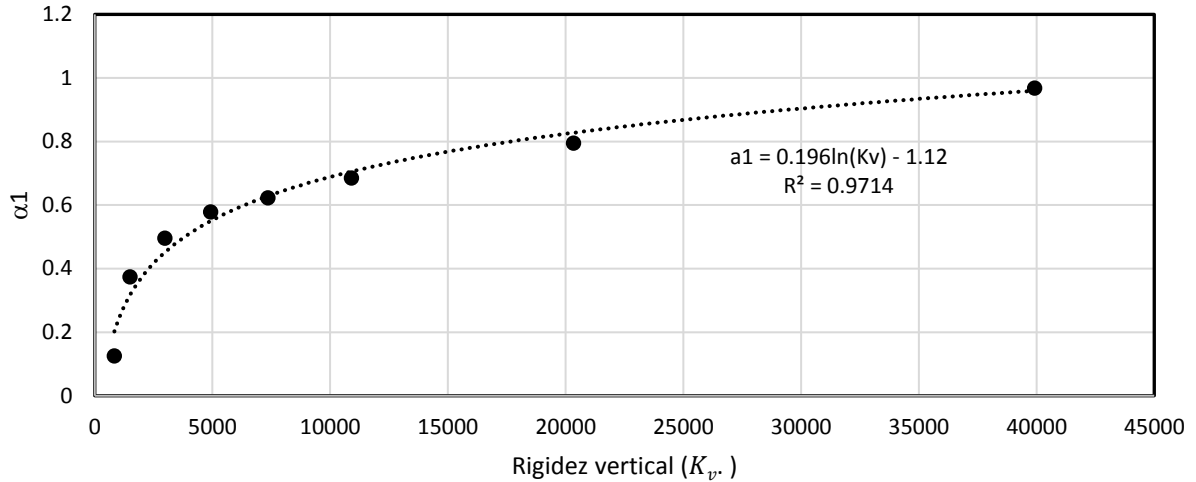


Figura 4.7.- Valores de  $\alpha_1 - K_v$

$$\alpha_1 = 0.196 \ln(K_v) - 1.12 \quad \text{Ecuación 4.3}$$

En la Figura 4.2 se observa que el efecto del espesor del muro para cada familia de curva en la resistencia fuera del plano depende, de igual forma, de la rigidez  $K_v$ . Para valores mínimos de rigidez  $K_v$  estudiados, el efecto del espesor del muro en la resistencia fuera del plano aumenta, ya que la falla de dichos muros está asociada con la inestabilidad de los segmentos. Por el contrario, para valores máximos de rigidez  $K_v$ , el efecto del espesor del muro es menor, ya que la falla de dichos muros está asociada con el aplastamiento de la mampostería.

En el análisis del efecto del espesor del muro se consideraron los mismos rangos utilizados que para el análisis de la resistencia a compresión axial de la mampostería (Tabla 4.1). Se normalizó la resistencia fuera del plano obtenido con el método del puntal bidireccional ( $W_{pb}$ ) con la Ecuación 4.2.

La ecuación que describe el comportamiento de la resistencia fuera del plano para diferentes valores de espesores de muros es función de la rigidez  $K_v$ . Para determinar dicha función, se realizó un ajuste de mínimos cuadrados a la curva promedio de cada rango (Tabla 4.3).

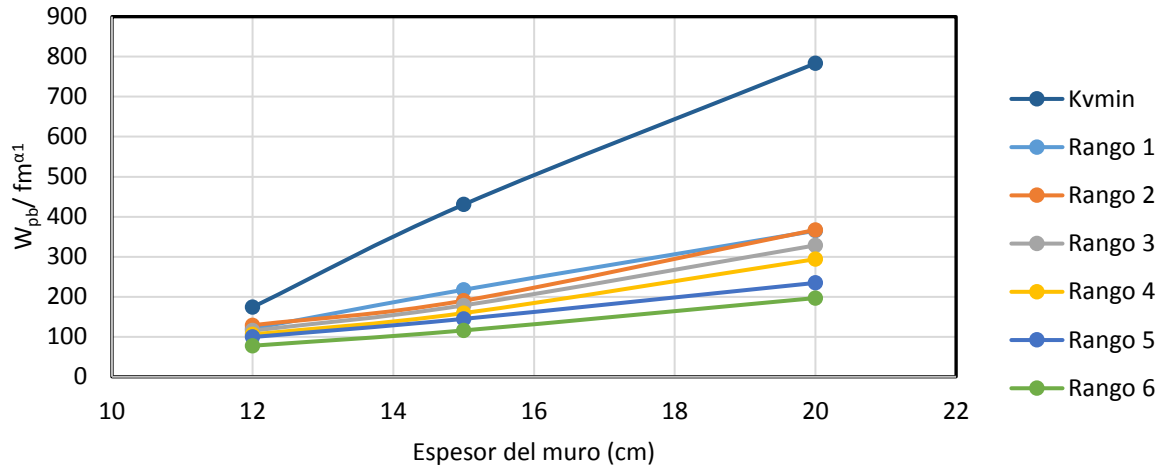
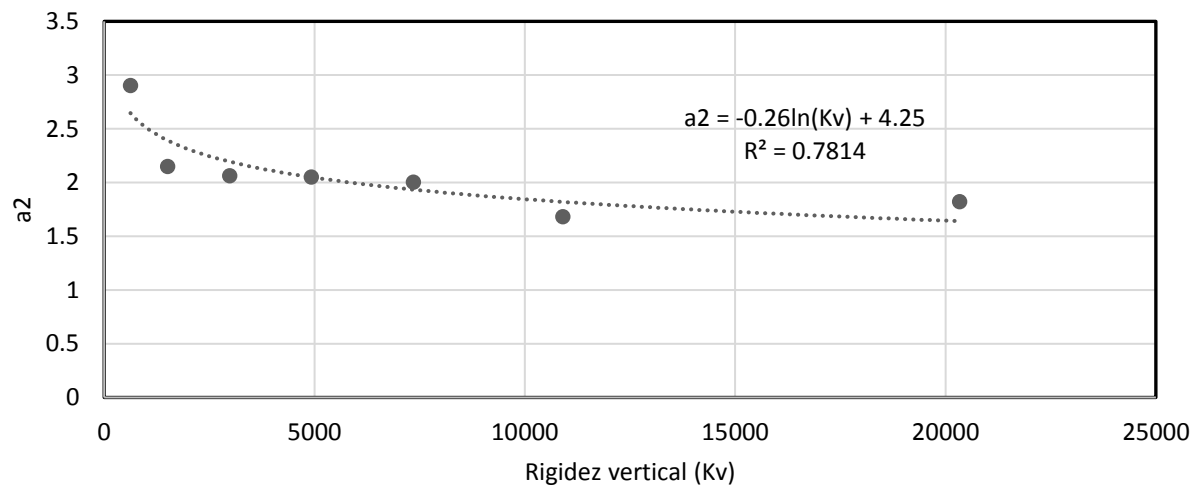


Figura 4.8.- Efecto del espesor del muro para cada familia de curva en la resistencia fuera del plano depende de la rigidez  $Kv$

La forma general de la ecuación que describe el comportamiento de la resistencia fuera del plano al variar el espesor del muro es  $t^{\alpha_2}$ . Donde el término de  $\alpha_2$  se obtiene del ajuste por mínimos cuadrados a cada uno de los rangos presentados en la Tabla 4.1 (Ecuación 4.4). En la Tabla 4.3 no se utilizó el valor de la potencia para  $Kvmax$ . Esto debido a que el valor obtenido con esta familia no sigue la tendencia de los demás rangos.

Tabla 4.3.- Valores de  $\alpha_2$  para los rangos de  $K_v$ 

Rango	Valor de $\alpha_2$
$K_{vmin}$	2.9031
Rango 1	2.1506
Rango 2	2.0617
Rango 3	2.0522
Rango 4	2.0047
Rango 5	1.6825
Rango 6	1.8229

Figura 4.9.- Valores de  $\alpha_2$  al variar  $K_v$

$$\alpha_2 = -0.26 \ln(K_v) + 4.25. \quad \text{Ecuación 4.4}$$

La resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada está dada por la acción de un mecanismo de arco en dos direcciones ortogonales. Por tanto, dicha resistencia se puede calcular como la suma de las componentes fuera del plano generado por los puntales de compresión vertical y horizontal (Ecuación 4.5).

$$W_{ec}|_{\sigma=0} = W_{K_v} + W_{K_H} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Dónde:

$W_{K_v}$  es la contribución del puntal vertical en la resistencia fuera del plano.

$W_{K_H}$  es la contribución del puntal horizontal en la resistencia fuera del plano.

En la Figura 4.10 se presenta la variación de la resistencia fuera del plano normalizada ( $W_{pb}/fm^{a_1}t^{a_2}$ ) en función de la rigidez de la vertical ( $K_v$ ). Los valores de  $a_1$   $a_2$  son los correspondientes para cada muro calculados con la Ecuación 4.3 y con la Ecuación 4.4, respectivamente. En general, se observa que conforme la rigidez del muro aumenta, la resistencia fuera del plano aumenta. Sin embargo, para valores de  $K_v$  mayores que 15,000 se observa que la resistencia fuera del plano no incrementa significativamente. Esto se debe a que el incremento de la resistencia fuera del plano está limitado por el aplastamiento de la mampostería. Adicionalmente, se realizó un ajuste por mínimos cuadrados para determinar el efecto de  $K_v$  en la resistencia fuera del plano (Ecuación 4.6). El valor del coeficiente de correlación fue de 0.86, lo cual indica una correlación aceptable.

$$\frac{W_{pb}}{fm^{a_1}t^{a_2}} = 0.0098 K_v^{0.50} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

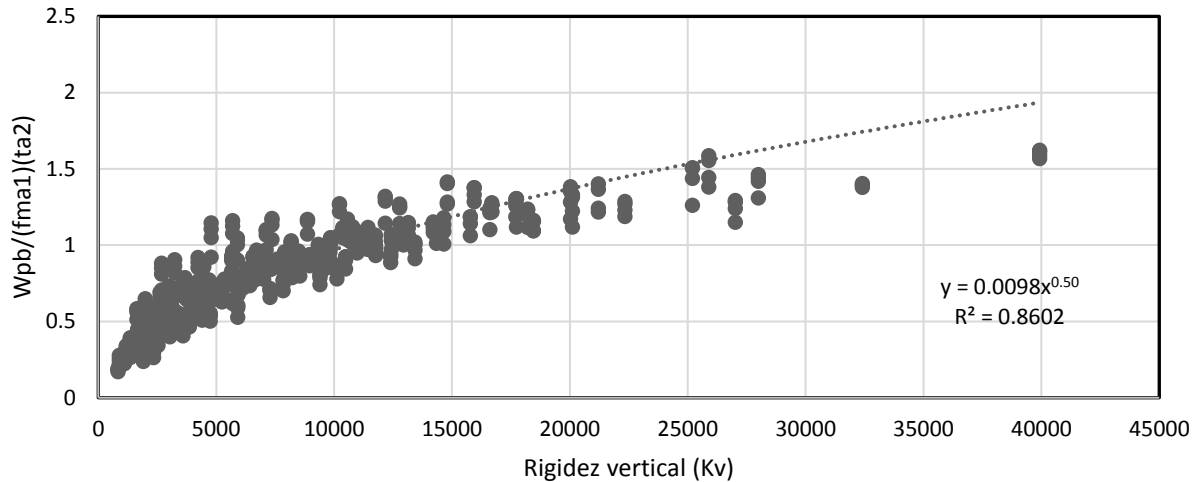


Figura 4.10.-Resistencia fuera del plano normalizada en función de la rigidez ( $K_v$ )

En la Figura 4.10 se observa que para muros con  $K_v$  mayores que 15,000, la ecuación 4.7 sobrestima la resistencia fuera del plano. Por tanto, se propone un valor máximo de rigidez  $K_v$  ( $K_{vmax} = 15,000$ ). Dicho valor se obtuvo minimizando el error de la predicción de la resistencia de los muros estudiados. El error se determinó con el siguiente procedimiento:

1. Se calcularon las resistencias normalizadas obtenidas con el puntal bidireccional  $\left(\frac{W_{pb}}{f m^{\alpha_1} t^{\alpha_2}}\right)$  para cada muro.
2. Se calcularon las resistencias normalizadas con la Ecuación 4.6 y asumiendo diferentes valores de  $K_{vmax}$
3. Se calculó el error para cada muro con las resistencias normalizadas obtenidas en los pasos 1 y 2 (Ecuación 4.7):

$$Error_i = \frac{\left(\frac{W_{pb}}{f m^{\alpha_1} t^{\alpha_2}}\right)}{0.0098 K_v^{0.50}} - 1 \quad \text{Ecuación 4.7}$$

4. Se obtuvo el promedio del  $Error_i$  asociado a cada valor de  $K_{vmax}$  considerado. En la Figura 4.11, se presenta los  $Error_{medio} - K_{vmax}$ . En dicha figura se observa que el error se minimiza para un valor de  $K_{vmax}$  de 17000. Para fines prácticos se propone utilizar  $K_{vmax}$  de 15,000.

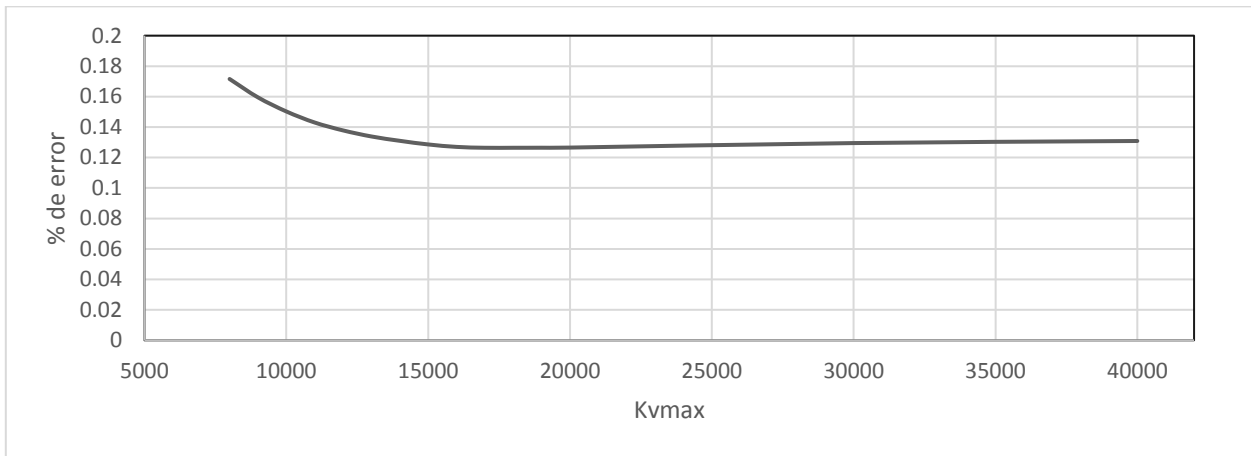


Figura 4.11.- Errores promedio –  $K_{vmax}$ .

Por tanto, la contribución vertical a la resistencia fuera del plano se puede calcular con la Ecuación 4.8:

$$W_{Kv} = fm^{a_1} t^{a_2} Kv^{0.5} \quad \text{Ecuación 4.8}$$

En la Figura 4.12 se presenta la relación de la resistencia fuera del plano calculada con la Ecuación 4.8 y la resistencia calculada con el método del puntal bidireccional contra la rigidez vertical ( $Kv$ ). Donde valores mayores a uno significa que la ecuación sobreestima la resistencia fuera del plano y valores menores a uno significa que la ecuación subestima la resistencia fuera del plano. Se observa que para valores de  $K_v$  pequeños la ecuación tiene mucha dispersión. Esto se debe a que no se considera el efecto de los puntales horizontales. Dicha contribución se toma asignando factores de peso para cada una de las rigidez verticales y horizontales, respectivamente (Ecuación 4.9). Los factores de peso  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  son función de la relación de aspecto.

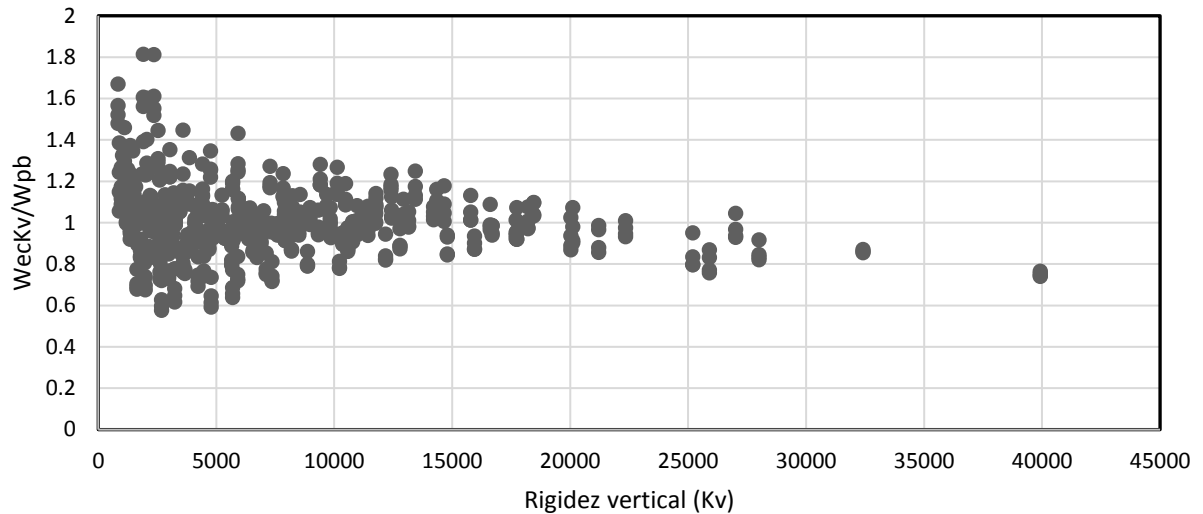


Figura 4.12.- Relación de resistencias fuera del plano calculadas con la ecuación y con el método del puntal bidireccional en función de Kv

$$W_{K_v} = \lambda_1 f m^{a_1} t^{a_2} K_v^{0.5} \quad \text{Ecuación 4.9}$$

En la Figura 4.13 se presenta la variación de la resistencia fuera del plano normalizada ( $W_{pb}/f m^{a_1} t^{a_2}$ ) en función de la rigidez horizontal ( $K_h$ ). Se observa que existe una mayor dispersión que para el caso de la rigidez vertical ( $K_v$ ). Se realizó un ajuste de mínimos para determinar una función de la resistencia fuera del plano respecto a la rigidez  $K_h$  (Ecuación 4.10).

$$\frac{W_{pb}}{f m^{a_1} t^{a_2}} = 0.0093 K_h^{0.50} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

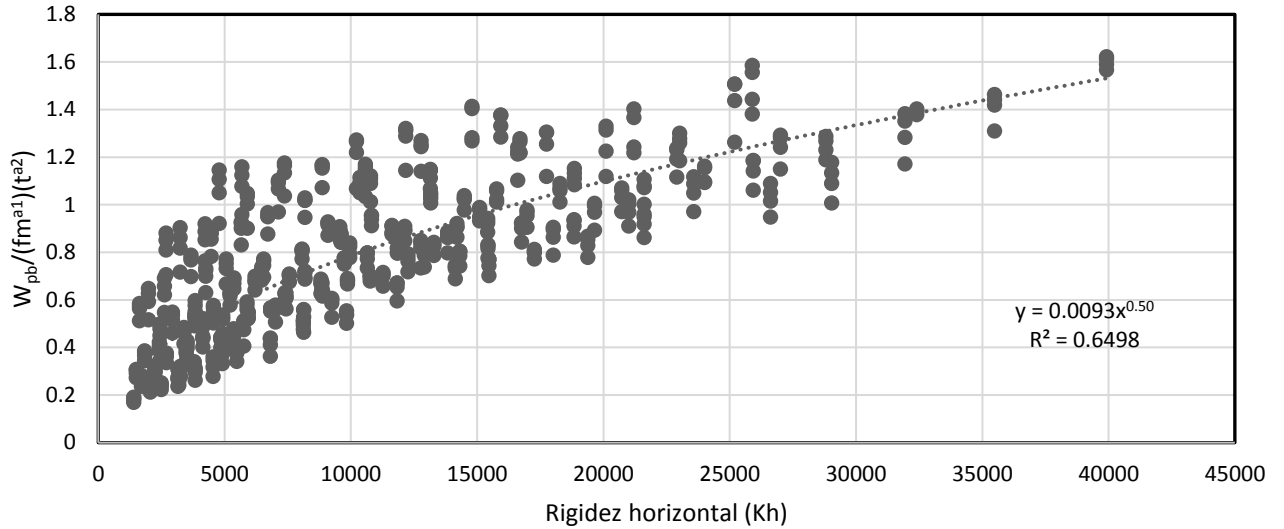


Figura 4.13.-Resistencia fuera del plano normalizada vs  $K_h$

Por tanto, la contribución de los puntales horizontales se puede obtener con la Ecuación 4.11.

$$W_{K_h} = \lambda_2 f m^{a1} t^{a2} K_h^{0.5} \quad \text{Ecuación 4.11}$$

En la Figura 4.14 se presenta la relación de la resistencia fuera del plano calculada con la Ecuación 4.11 y la resistencia calculada con el método del puntal bidireccional contra la rigidez vertical ( $K_v$ ). Donde valores mayores a uno significa que la ecuación sobreestima la resistencia fuera del plano y valores menores a uno significa que la ecuación subestima la resistencia fuera del plano. Se observa que, para valores pequeños de  $K_v$ , la ecuación tiene mucha dispersión y, en general, sobreestima la resistencia fuera del plano.



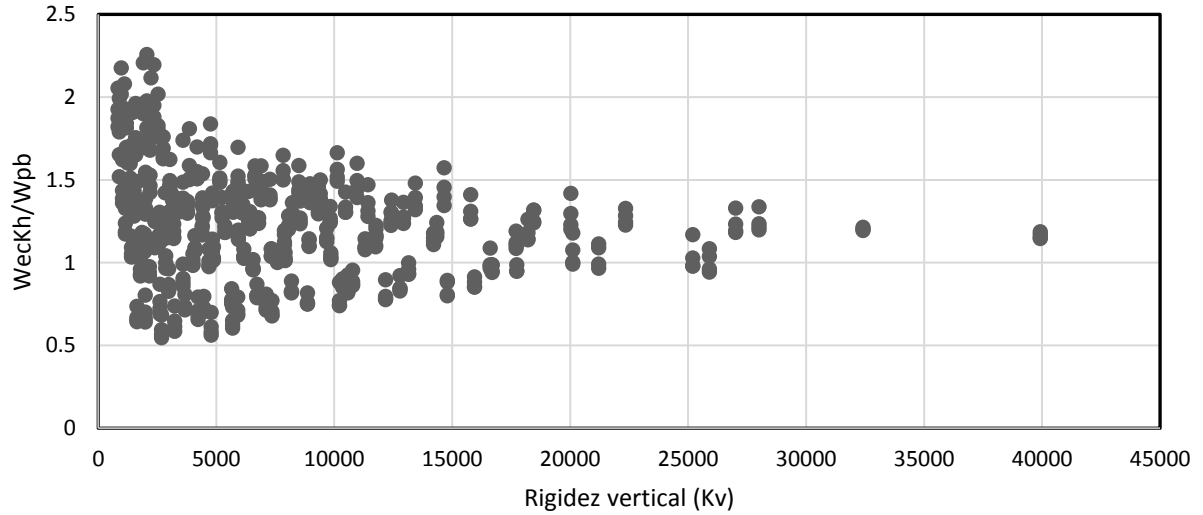


Figura 4.14.- Resistencia fuera del plano normalizada vs  $Kv$

Por tanto, la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada con esfuerzo axial nulo se puede obtener con la Ecuación 4.12.

$$W_{ec}|_{\sigma=0} = fm^{a_1}t^{a_2}(\lambda_1K_v^{0.5} + \lambda_2K_h^{0.5}) \quad \text{Ecuación 4.12}$$

Donde  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$  son coeficientes de peso que dependen, principalmente, de la relación de aspecto ( $h/L$ ). Se propusieron diferentes funciones polinómicas, para determinar  $\lambda_1$  y  $\lambda_2$ , como las que se presentan en la Ecuación 4.13 y Ecuación 4.14, respectivamente. Se realizaron ajustes de mínimos cuadrados con los resultados obtenidos con el puntal bidireccional, la Ecuación 4.12 y las correspondientes funciones propuestas.

$$\lambda_1 = \gamma_1 \left(\frac{h}{L}\right)^2 + \gamma_2 \left(\frac{h}{L}\right) + \gamma_3 \quad \text{Ecuación 4.13}$$

$$\lambda_2 = \gamma_4 \left(\frac{h}{L}\right)^2 + \gamma_5 \left(\frac{h}{L}\right) + \gamma_6 \quad \text{Ecuación 4.14}$$

Se observó que el mejor ajuste se obtuvo para polinomios cuadráticos. Por tanto, los coeficientes de peso se pueden calcular con la Ecuación 4.15 y la ecuación Ecuación 4.16.

$$\lambda_1 = 0.0440^2 \left(\frac{h}{L}\right) - 0.04621 \left(\frac{h}{L}\right) + 0.01217 \quad \text{Ecuación 4.15}$$

$$\lambda_2 = -0.02870^2 \left(\frac{h}{L}\right) + 0.033707 \left(\frac{h}{L}\right) - 0.003642 \quad \text{Ecuación 4.16}$$

En la Figura 4.15 se presenta las relaciones de la resistencia fuera del plano obtenida con la Ecuación 4.12 ( $W_{ec}|_{\sigma=0}$ ) entre la correspondiente obtenida con el puntal bidireccional ( $W_{pb}$ ) para cada muro estudiado. Se presentan las relaciones de las resistencias de los muros ( $W_{ec}|_{\sigma=0}/W_{pb}$ ) según su tipo de falla: aplastamiento de mampostería (AM) e inestabilidad de los segmentos (IS). En la Tabla 4.4 se presentan el resumen estadístico de las relaciones relaciones de las resistencias de los muros ( $W_{ec}|_{\sigma=0}/W_{pb}$ ) presentadas en la Figura 4.15, para cada tipo de falla y considerando ambos tipos de falla.

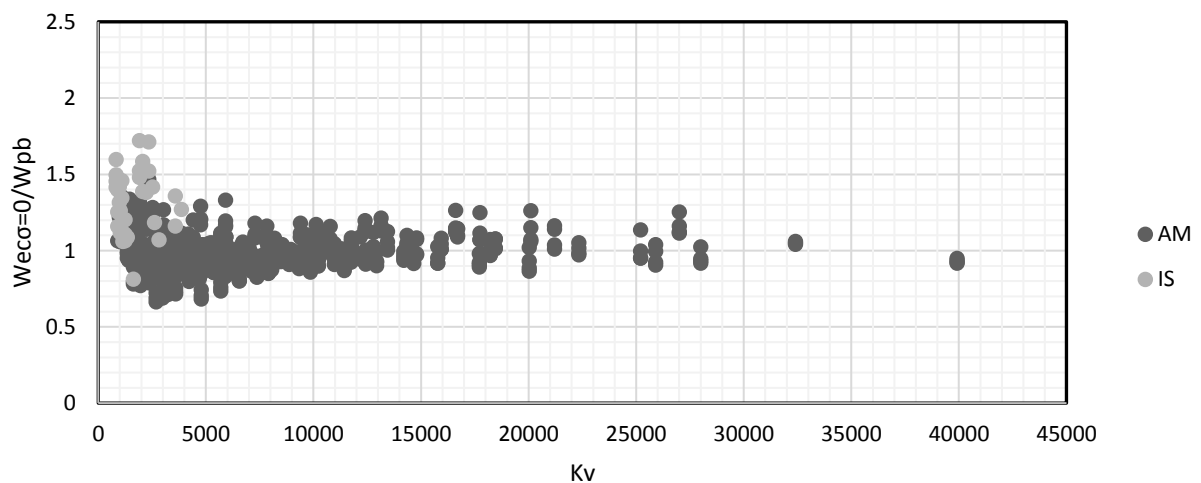


Figura 4.15.-  $W_{\sigma=0}/W_{pb} - Kv$ .

Tabla 4.4.- Resultados estadísticos de las relaciones de resistencia fuera del plano

	$W_{ec} _{\sigma=0}/W_{pb}$ (AM)	$W_{ec} _{\sigma=0}/W_{pb}$ (IS)	$W_{ec} _{\sigma=0}/W_{pb}$ (AM + IS)
Promedio	0.99	1.31	1.01
D.E.	0.12	0.20	0.15
C.V.	12.39%	15.24%	14.99%
Max	1.47	1.72	1.72
Min	0.66	0.81	0.66

En la Figura 4.15 y la Tabla 4.4 se observa que, en promedio, la ecuación predice adecuadamente la resistencia fuera del plano de los muros estudiados; sin embargo, dicha ecuación sobrestima hasta en 72% la resistencia de algunos muros. En general, esto se observó para muros con falla asociada a la inestabilidad de los segmentos y con rigidez  $K_v$  menor que 3,000 kg/m<sup>2</sup>. Por tanto, se propone un factor de corrección ( $\lambda_3$ ) para los muros con rigidez menor que 3,000 kg/m<sup>2</sup>. La forma general de la ecuación está dada por:

$$W_{ec}|_{\sigma=0} = \left(\frac{1}{\lambda_3}\right) fm^{a_1} t^{a_2} (\lambda_1 K_v^{0.5} + \lambda_2 K_h^{0.5}) \quad \text{Ecuación 4.17}$$

El factor  $\lambda_3$  se puede determinar como una función de las variables que influyen en la resistencia fuera del plano de los muros. En la Figura 4.16 se presentan las relaciones  $W_{ec}|_{\sigma=0}/W_{pb}$  contra las variables  $fm$ ,  $h$ ,  $t$ ,  $hec$  y  $L$ , respectivamente. En dicha figura únicamente se incluyen muros con  $K_v$  menor que 3,000 kg/m<sup>2</sup>. Se realizaron ajustes por mínimos cuadrados y se determinaron los coeficientes de correlación  $R^2$  para cada una de las variables. Se observó que la variable que tiene una mayor correlación fue la longitud ( $L$ ). Se realizaron diferentes ajustes para determinar  $\lambda_3$ ; con la Ecuación 4.18 se obtienen valores de  $\lambda_3$ , con los cuales se predice mejor la resistencia fuera del plano de los muros estudiados, considerando el menor número de variables. Para muros con valores de  $K_v$  mayores que 3,000 kg/m<sup>2</sup>,  $\lambda_3$  será igual que 1.

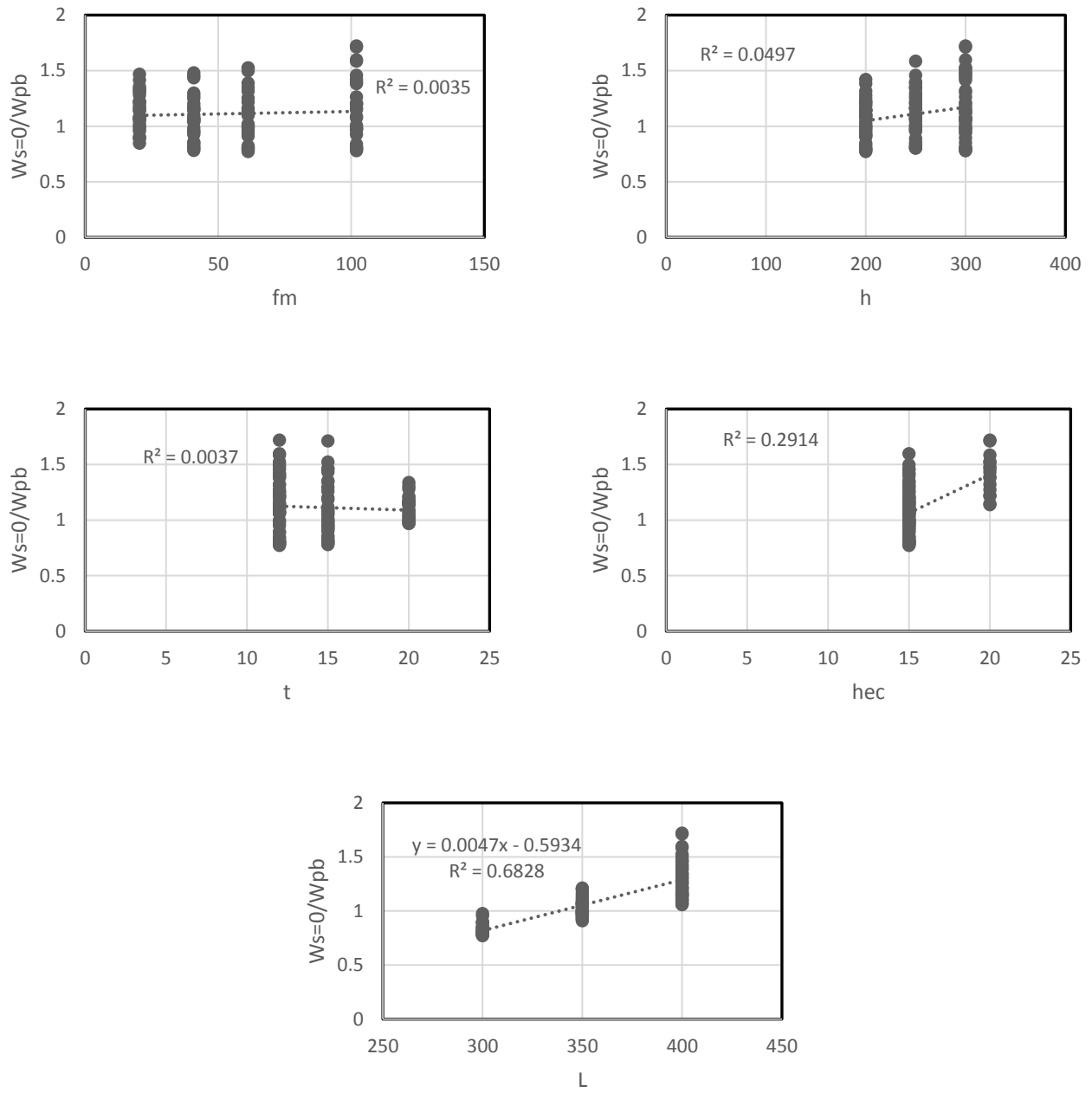


Figura 4.16.- Influencia de las variables en la relación de resistencias fuera del plano.

$$\lambda_3 = (0.0047 L - 0.60)(0.0009 h + 0.8)$$

Ecuación 4.18

En la Figura 4.17 se presentan las relaciones de  $W_{pb}$  y la Ecuación 4.17 contra la rigidez  $K_v$ , considerando el factor  $\lambda_3$ . En la Tabla 4.5 se presentan los resultados estadísticos de las relaciones de resistencia fuera del plano presentadas en la Figura 4.17. En ambos casos se observa que con la ecuación se predice adecuadamente la resistencia de los muros estudiados.

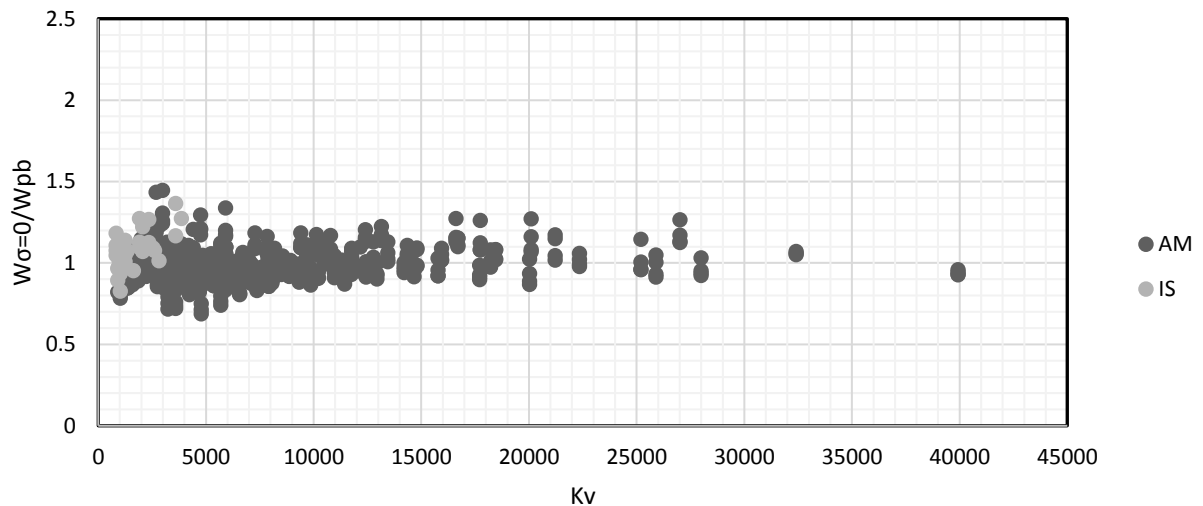


Figura 4.17.- Relación de las resistencias fuera del plano calculados con la ecuación de diseño y con el método del puntal bidireccional

Tabla 4.5.- Resultados estadísticos de las relaciones de resistencia fuera del plano tomando en cuenta  $\lambda_3$ .

	$W_{ec \sigma=0}/W_{pb}$ (AM)	$W_{ec \sigma=0}/W_{pb}$ (IS)	$W_{ec \sigma=0}/W_{pb}$ (AM + IS)
Promedio	0.99	1.08	0.99
D.E.	0.11	0.11	0.11
C.V.	10.85%	10.26%	11.05%
Max	1.45	1.37	1.45
Min	0.69	0.83	0.69

#### 4.2.2 Contribución del esfuerzo axial.

La aplicación de esfuerzos axiales en el muro en la dirección vertical debido a las cargas gravitacionales incrementa la resistencia fuera del plano de los muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Dicho incremento se puede considerar como la contribución del esfuerzo axial en la resistencia fuera del plano. Por tanto, la resistencia fuera del plano de muros confinados se puede obtener como la suma de la resistencia fuera del plano de un muro con esfuerzo axial nulo ( $W_{ec}|_{\sigma=0}$ ) más la contribución del esfuerzo axial ( $\Delta W_{ec}$ ) (Ecuación 4.1)

El esfuerzo axial genera una restricción adicional de los desplazamientos de la dala superior en la dirección del puntal vertical. Por tanto, la contribución a la resistencia fuera del plano del esfuerzo axial se consideró en función de la contribución de los puntales verticales (Ecuación 4.19). Donde  $\lambda_4$  es un factor de peso y  $f(\sigma)$  es una función que depende del esfuerzo axial aplicado.

$$\Delta W_{ec} = \lambda_4 f m^{a_1} t^{a_2} K v^{0.5} f(\sigma) \quad \text{Ecuación 4.19}$$

Para poder ajustar la Ecuación 4.19 se determinó la contribución del esfuerzo axial a la resistencia fuera del plano ( $\Delta W_{pb}$ ) considerando las resistencias fuera del plano obtenidas con el MPB ( $W_{pb}$ ) para muros con esfuerzo axial nulo ( $W_{pb}|_{\sigma=0}$ ) en función de la magnitud del esfuerzo axial (Ecuación 4.20). Lo anterior se realizó y las obtenidas para muros con diferentes valores de esfuerzo axial (Tabla 3.1).

$$\Delta W_{pb} = W_{pb} - W_{pb}|_{\sigma=0} \quad \text{Ecuación 4.20}$$

En la Figura 4.18 se presenta la variación de  $\Delta W_{pb}$  normalizada contra el esfuerzo axial. En dicha figura cada línea representa una familia de muros donde se mantuvieron constantes las propiedades geométricas y mecánicas de los muros y se varió la magnitud de esfuerzo axial. Se observa que, conforme aumenta el esfuerzo axial del muro aumenta la resistencia fuera del plano. El efecto del esfuerzo axial en la resistencia fuera del plano se puede ajustar mediante una función potencial.

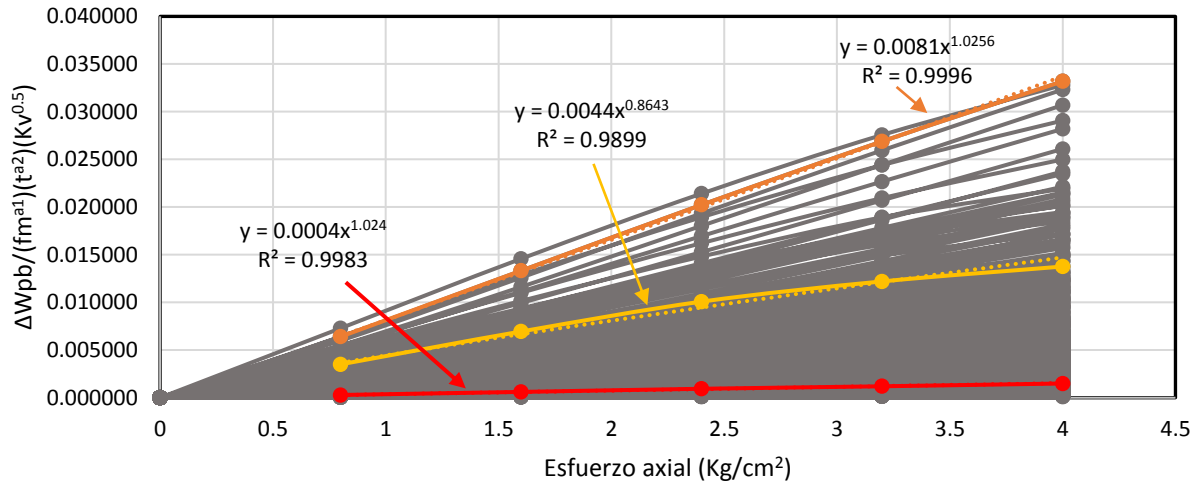


Figura 4.18.- Variación por familias de  $\Delta W_{pb}$  normalizado en función del esfuerzo axial.

En el análisis del efecto del esfuerzo axial del muro se consideraron los mismos rangos utilizados que para el análisis de la  $f_m$  y  $t$  (Tabla 4.1). La ecuación que describe el comportamiento de la resistencia fuera del plano para diferentes valores de esfuerzo axial es función  $K_v$  (Figura 4.19). Para determinar dicha función, se realizó un ajuste de mínimos cuadrados a la curva promedio de cada rango (Tabla 4.6). En dicha tabla se observa poca variación en los valores del exponente  $\alpha_3$ . El valor promedio fue de 0.92 y se propone utilizar un valor de 0.9. Por tanto, el efecto del esfuerzo axial estará dado por la función  $\sigma^{0.9}$ .

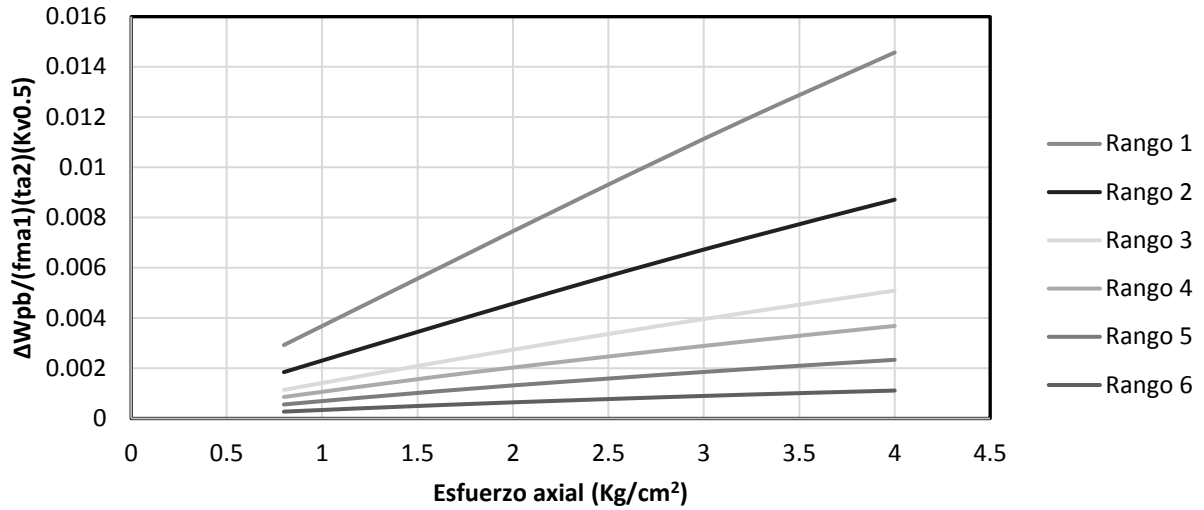


Figura 4.19.- Curvas  $\Delta W_{pb}$  promedio normalizada en función del esfuerzo axial.

Tabla 4.6.- Valores de  $\alpha_3$  por rangos.

Rangos	Valores $\alpha_3$
Rango 1	1.0006
Rango 2	0.9668
Rango 3	0.9311
Rango 4	0.9065
Rango 5	0.8892
Rango 6	0.8744
Promedio	0.9281

En la Ecuación 4.19 se observa que el único término que queda por definir es el término de  $\lambda_4$ . En la Figura 4.20 se presenta el comportamiento de  $\Delta W_{pb}$  normalizado con las ecuaciones que describen el comportamiento de  $f_{m,t}$ ,  $K_v$  y  $\sigma$ , en función de todas las variables. Las variables que tienen más influencia son las de longitud y peralte de elementos confinantes.



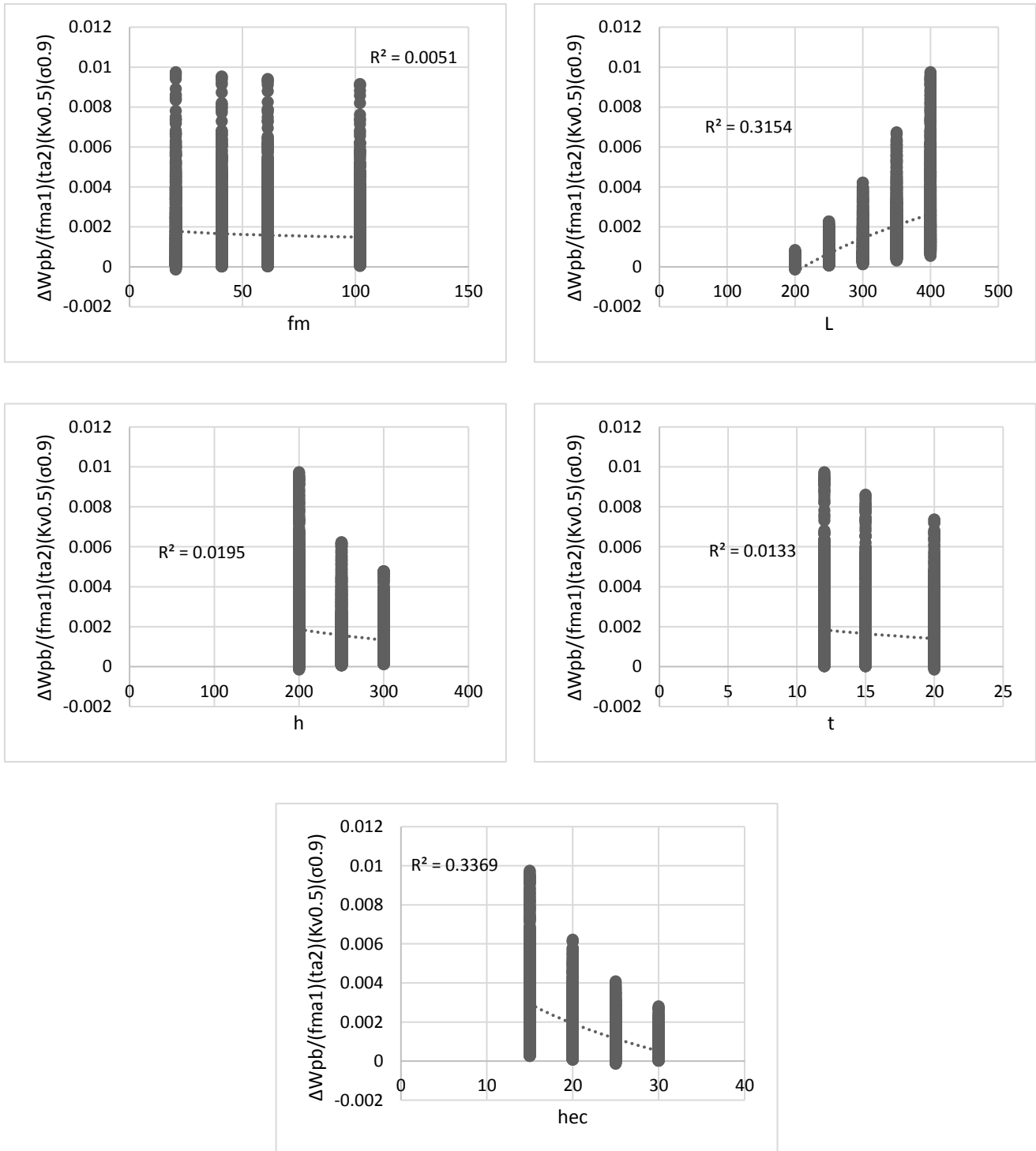


Figura 4.20.- Comparación de influencia de diferentes variables en el comportamiento de

$$\Delta W_{pb}$$

En la Ecuación 4.21 se presenta la forma general del factor de calibración de  $\lambda_4$ . Esta forma general se ajusta con el método de mínimos cuadrados descritos en el Capítulo 3. En la Ecuación 4.22 se presentan los valores de las constantes  $\gamma$  obtenidas con el ajuste de mínimos cuadrados.

$$\lambda_4 = \gamma_4 L + \gamma_5 hec + \gamma_6 \quad \text{Ecuación 4.21}$$

$$\lambda_4 = (1.43 \times 10^{-5}) L - (1.56 \times 10^{-4}) hec + (5.57 \times 10^{-4}) \quad \text{Ecuación 4.22}$$

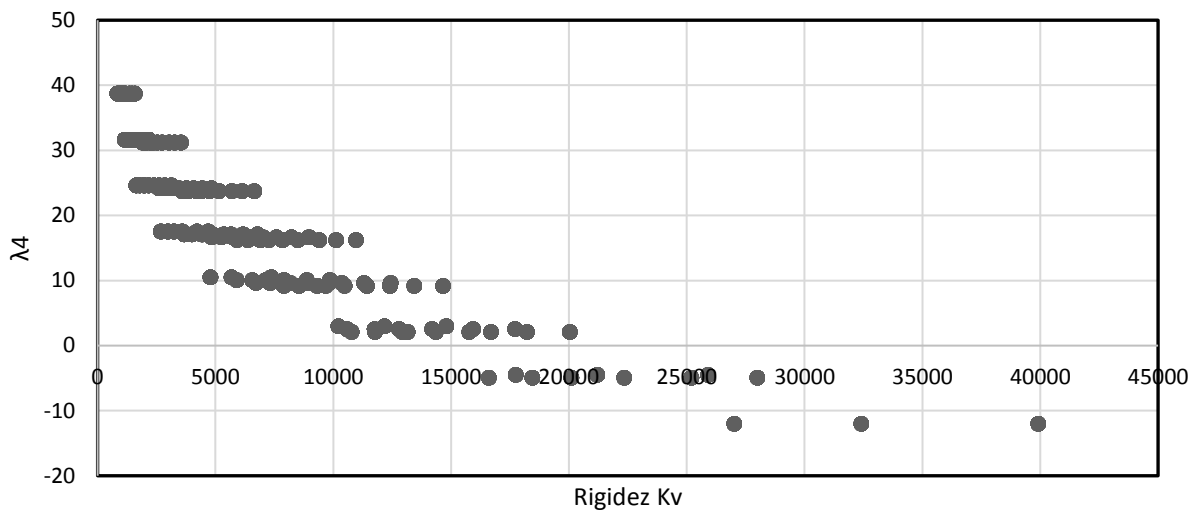


Figura 4.21.- Comportamiento de  $\lambda_4$  en función de  $K_v$

En la Figura 4.21 se observa el comportamiento de  $\lambda_4$  en función de  $K_v$ . Se observa que para valores de rigidez pequeños el término de  $\lambda_4$  incrementa el efecto del esfuerzo axial en la resistencia fuera del plano, mientras que para rigideces grandes no es significativo. Además, se observa que para rigideces grandes  $\lambda_4$  toma valores negativos. Sin embargo, se ha observado que la contribución del esfuerzo axial siempre incrementa la resistencia de los muros. Por tanto,  $\lambda_4$  no puede ser menor que cero (Ecuación 4.23).

$$\lambda_4 = 0.143 L - 1.56 hec + 5.57 \geq 0 \quad \text{Ecuación 4.23}$$

$$\Delta W_{ec} = \lambda_4 f m^{\alpha_1} t^{\alpha_2} K v^{0.5} \sigma^{0.9}$$

Ecuación 4.24

En la Tabla 4.7 se presentan los resultados estadísticos de la relación de resistencias fuera del plano obtenidas con la Ecuación 4.1 y con el método del puntal bidireccional. Se calcularon 3440 muros con diferentes propiedades geométricas, materiales y de condiciones de carga. Se puede observar que considerando los muros por ambos tipos de falla el promedio es de 0.99, el coeficiente de variación es de 11.92% y los valores máximos y mínimos son de 1.56 y 0.54.

Tabla 4.7.- Resultados estadísticos de la relación de resistencias fuera del plano.

	AM	IS	AM e IS
Esfuerzo axial ( $\sigma = 0$ )			
Promedio	0.98	1.11	0.99
D.E.	0.11	0.13	0.12
C.V.	11.54%	11.37%	11.92%
Max	1.35	1.43	1.43
Min	0.68	0.84	0.68
Esfuerzo axial ( $\sigma \geq 0$ )			
Promedio	1.01	1.03	1.01
D.E.	0.14	0.22	0.15
C.V.	14.21%	21.17%	14.82%
Max	1.53	1.56	1.56
Min	0.54	0.54	0.54

En la Tabla 4.7 se presentan las relaciones de la resistencia fuera del plano obtenidas con la Ecuación 4.1 y con el método del puntal bidireccional. Se presentan cuatro grupos de muros: (1) muros con falla asociada al aplastamiento de la mampostería con esfuerzo axial mayor que cero (AM,  $\sigma > 0$ ), (2) muros con falla asociada a la inestabilidad de los segmentos con esfuerzo axial mayor que cero (IS,  $\sigma > 0$ ), (3) muros con falla asociada al aplastamiento de la mampostería con esfuerzo axial igual a cero (AM,  $\sigma = 0$ ) Y (4) muros con falla asociada a la inestabilidad de los segmentos con

esfuerzo axial igual a cero (IS,  $\sigma=0$ ). La ecuación predice mejor la resistencia de los muros sin esfuerzo axial y con una rigidez grande.

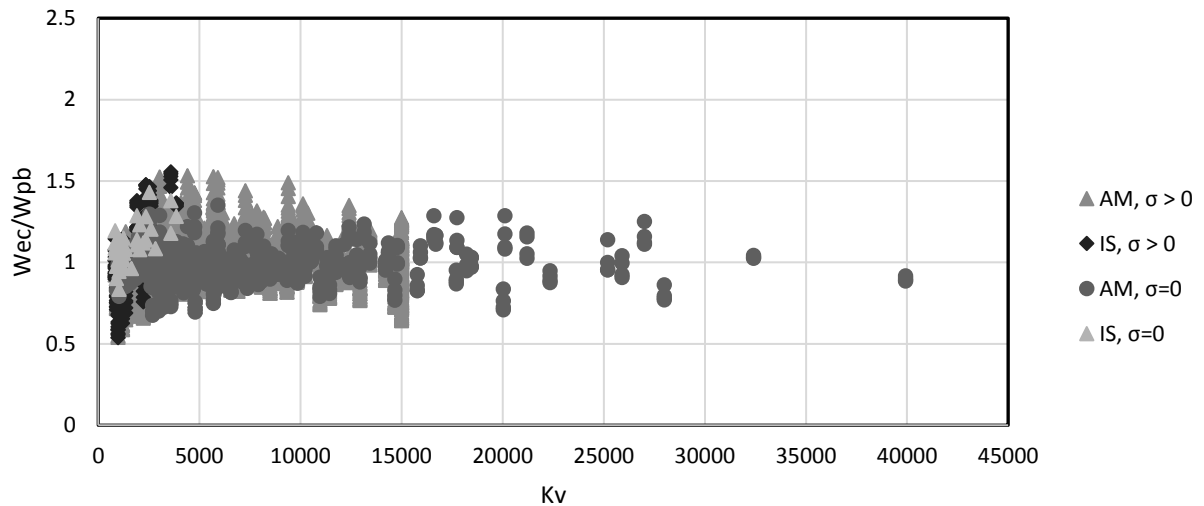


Figura 4.22.- Relación  $W_{ec}/W_{pb}$ .

### 4.3 Ecuaciones para determinar las fuerzas en el plano

En la revisión de la literatura se encontró que las fuerzas en el plano que transfieren al marco de elemento confinantes tienen una relación lineal con las fuerzas fuera del plano (Moreno et al. 2015). En la Figura 4.23 se presenta la fuerza en el plano – resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano calculados con el MPB. En dicha figura se observa que la resistencia fuera del plano y la fuerza en el plano tienen un factor de correlación de  $R^2$  de 0.8719.

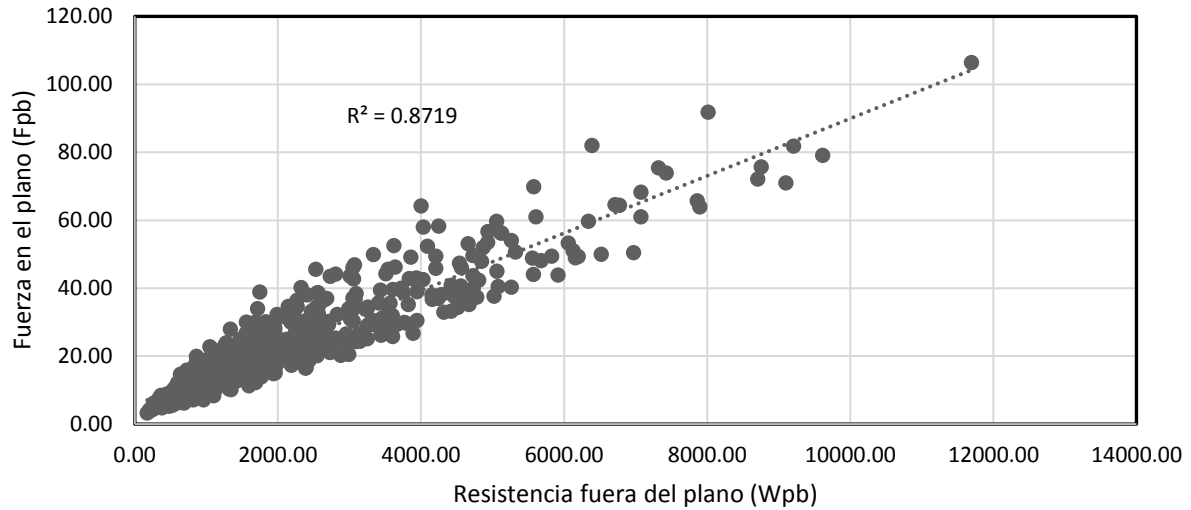


Figura 4.23.- Variación de la fuerza en el plano en función de la resistencia fuera del plano.

Para determinar la ecuación de las fuerzas en el plano ( $F_{ec}$ ), se asumió una forma similar a la de la ecuación para la resistencia fuera del plano. Donde el término  $F_{ec|\sigma=0}$  es el aporte que considera las variables de la resistencia a compresión axial de la mampostería, el espesor, longitud y altura de muro, así como, el peralte de elementos confinantes. Y el término de  $\Delta F_{ec}$  considera el efecto del esfuerzo axial aplicado a un muro.

$$F_{ec} = F_{ec|\sigma=0} - \Delta F_{ec}$$

Ecuación 4.25

En la Figura 4.24 se presenta el comportamiento de la relación de la fuerza en el plano calculada con el método del puntal bidireccional ( $F_{pb}$ ) normalizada con la resistencia fuera del plano calculada con el método del puntal bidireccional ( $W_{pb}$ ), en función de todas las variables. En dicha figura todos los muros tienen un esfuerzo axial nulo.

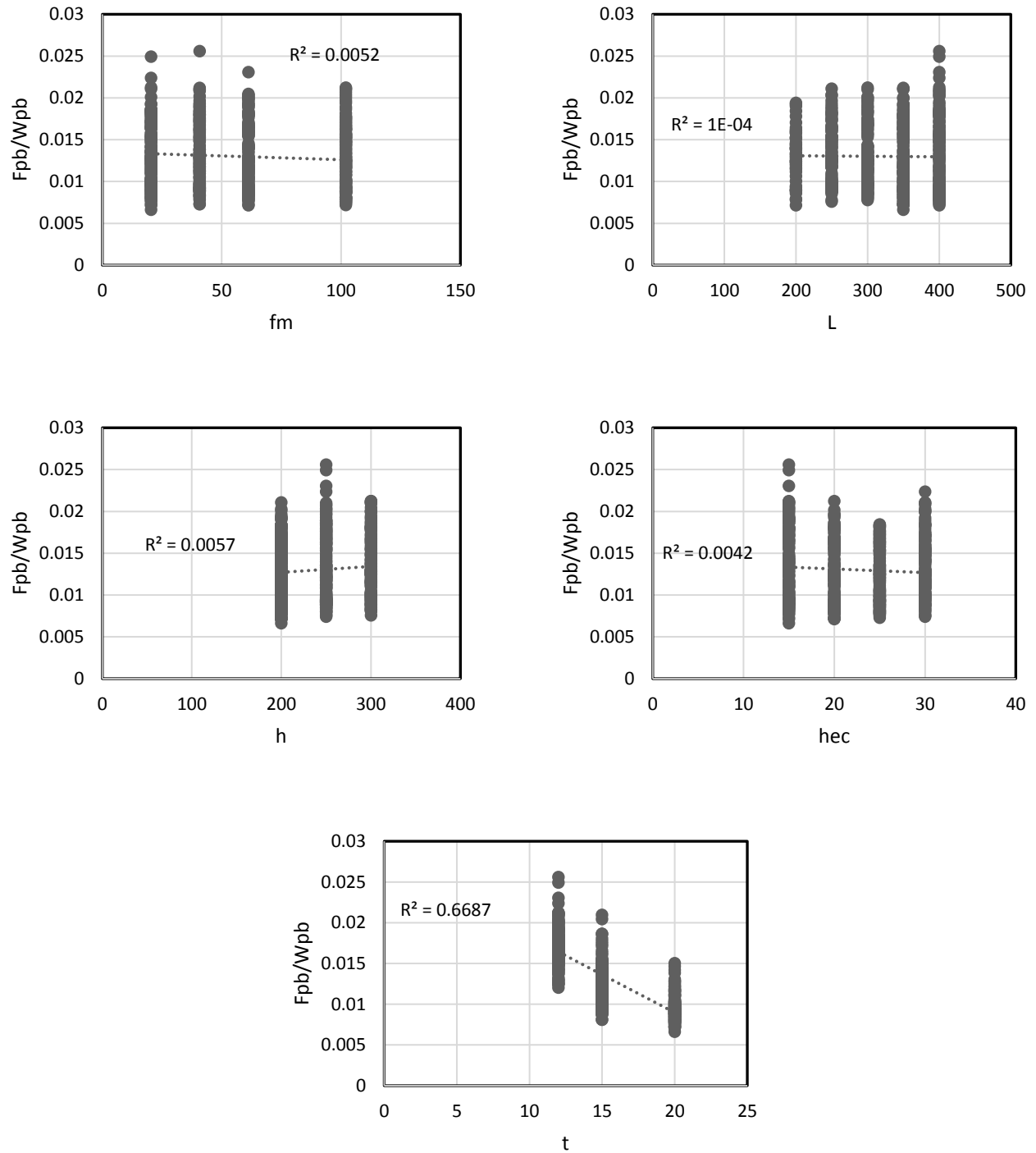


Figura 4.24.-Comportamiento de la fuerza en el plano normalizada contra las diferentes variables.

Se puede observar que la variable que tiene más correlación con la relación de  $F_{pb}/W_{pb}$  es el espesor del muro. En la Figura 4.25 se presenta el comportamiento de la fuerza en el plano y la ecuación ajustada de la resistencia fuera del plano y el espesor del muro.

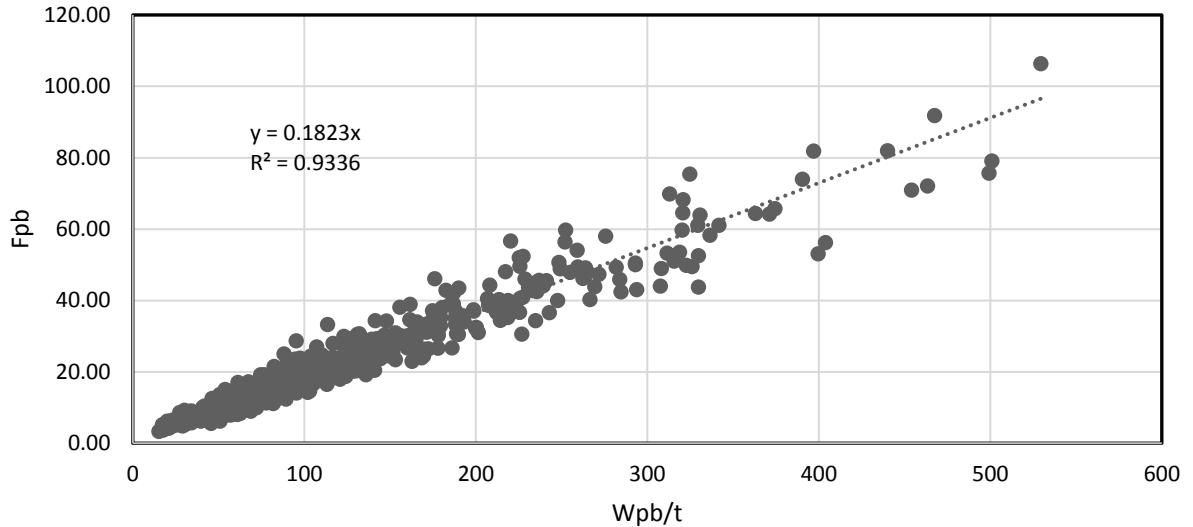


Figura 4.25.-  $F_{pb} - W_{pb}/t$

Por lo tanto, la fuerza en el plano sin esfuerzo axial se puede determinar con la Ecuación 4.26. En la Tabla 4.8 se presentan los resultados estadísticos de la relación  $F_{pb}/F_{ec|\sigma=0}$ .

$$F_{ec|\sigma=0} = 0.19 \left( \frac{W_{ec|\sigma=0}}{t} \right) \quad \text{Ecuación 4.26}$$

Tabla 4.8.- Resultados estadísticos de la relación de la fuerza en el plano calculado con la Ecuación 4.26 y el método del puntal bidireccional.

Promedio	1.01
D.E.	0.16
C.V.	15.75%
Max	1.57
Min	0.60

Con la Ecuación 4.27 se obtiene la aportación del esfuerzo axial a la fuerza en el plano ( $\Delta F_{pb}$ ). En la Figura 4.26 se presenta la variación de  $\Delta F_{pb}$  en función de las dos variables más significativas.

$$\Delta F_{pb} = F_{s0} - F_{pb}$$

Ecuación 4.27

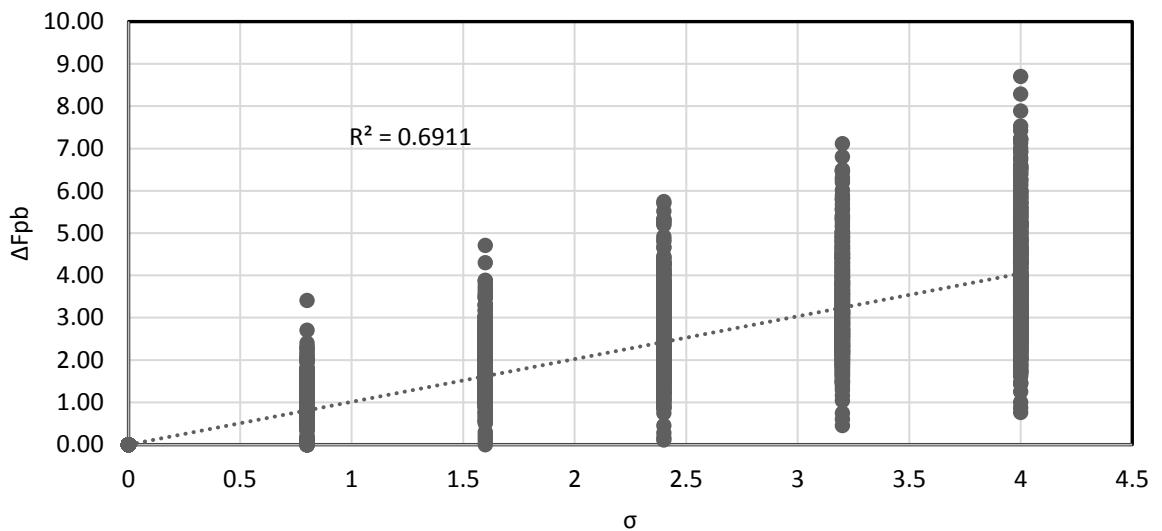
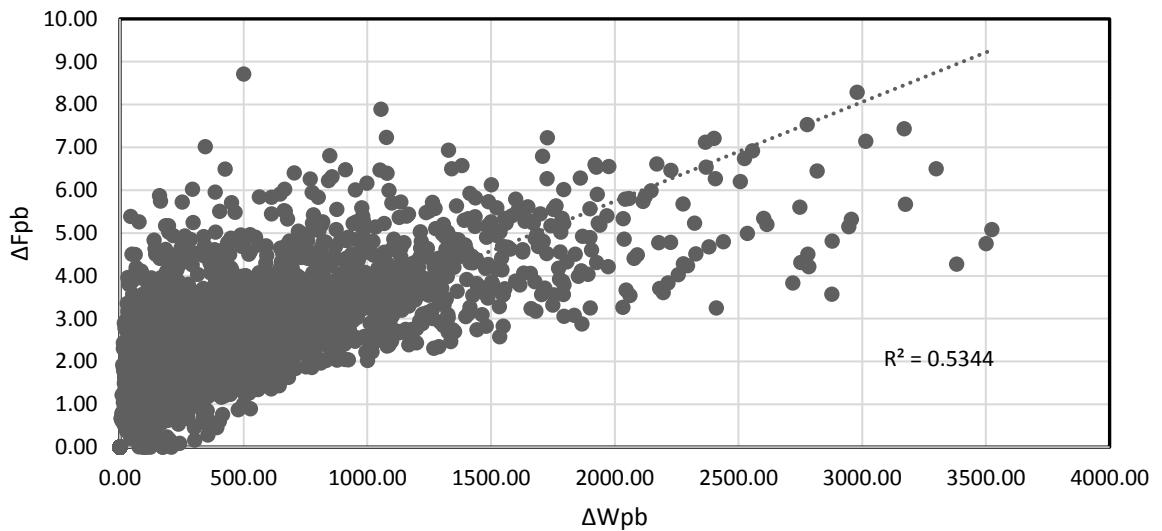


Figura 4.26.- Variación de  $\Delta F_{pb}$  en función de las variables más significativas.



De estas dos variables, se decidió trabajar con la del esfuerzo axial ya que tiene menos dispersión y es una aproximación más directa de la variación en los muros. En la Figura 4.27 se presenta la variación de  $\Delta F_{pb}/\sigma$  contra el espesor del muro. En dicha figura se observa que el espesor influye significativamente en la contribución del esfuerzo axial.

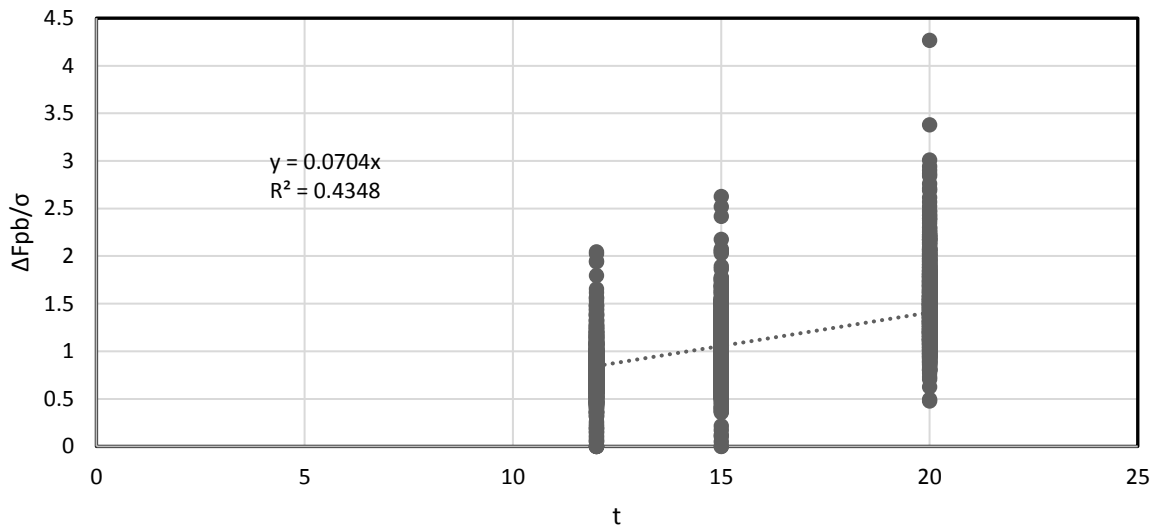


Figura 4.27.- Variación de  $\Delta F_{pb}/\sigma$  al variar el espesor.

Por tanto, la contribución del esfuerzo axial a las fuerzas en el plano se puede determinar con la Ecuación 4.28

$$\Delta F_{ec} = 0.7 t \sigma$$

Ecuación 4.28

En la Figura 4.28 se presenta una gráfica con la relación de la fuerza en el plano calculada con la ecuación ( $F_{ec}$ ) y la calculada con el MPB ( $F_{pb}$ ), para todos los muros modelados. Se puede observar que la dispersión es baja después de cierto valor de rigidez  $K_v$ . Se analizó el mismo rango que se propuso para la ecuación de la resistencia fuera del plano. El rango seleccionado fue el comprendido de una rigidez desde 624.78 kg/m<sup>2</sup> hasta 3,000 kg/m<sup>2</sup>. Dentro de este rango existen 864 muros, de los cuáles únicamente el 3.5% (30 muros) presentan una variación de +/- 30%. Debido a esto es imposible reajustar la ecuación para el rango dado. Como se comentó en la revisión de la literatura, el esfuerzo axial disminuye la fuerza en el plano. Debido a

esto se decidió disminuir el efecto que tiene  $\Delta F_{ec}$  en la ecuación de diseño si se encuentra en el rango antes mencionado. Dicha reducción del efecto depende del valor de la rigidez  $K_v$  y queda definido con:

$$\text{Si } K_v < 3,000 \text{ kg/m}^2$$

$$\lambda_5 = 0.5$$

$$\text{Si } K_v > 3,000 \text{ kg/m}^2$$

$$\lambda_5 = 1.00$$

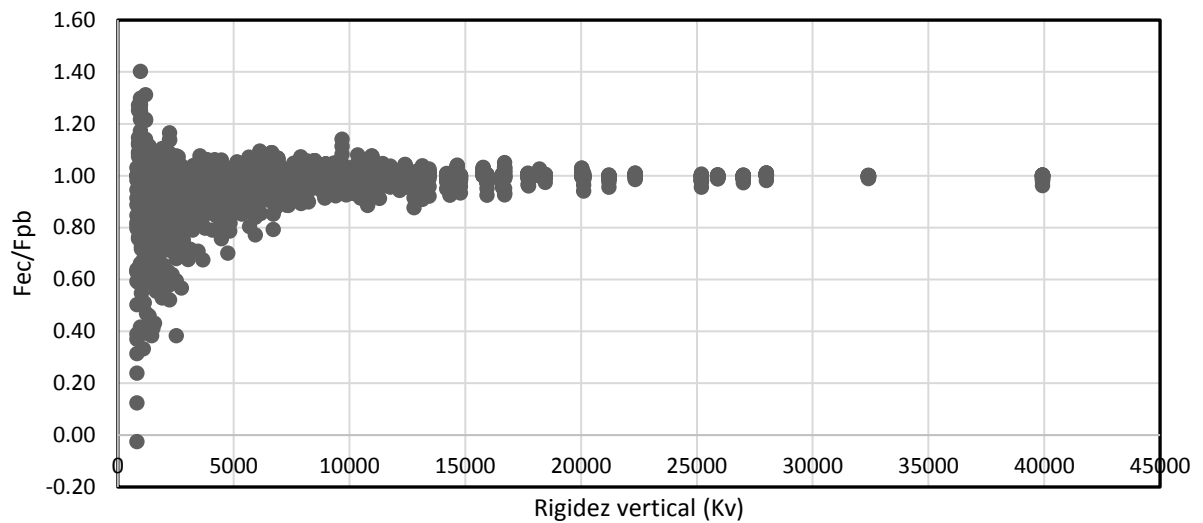


Figura 4.28.- Relación  $F_{ec}/F_{pb}$

En la Figura 4.29 se presenta la relación  $F_{ec}/F_{pb}$  calculada con la Ecuación 4.25 contra la rigidez  $K_v$ . En la Tabla 4.9 se presenta el resumen estadístico de la relación  $F_{ec}/F_{pb}$ . Se observa que en general se predicen adecuadamente las fuerzas en el plano.

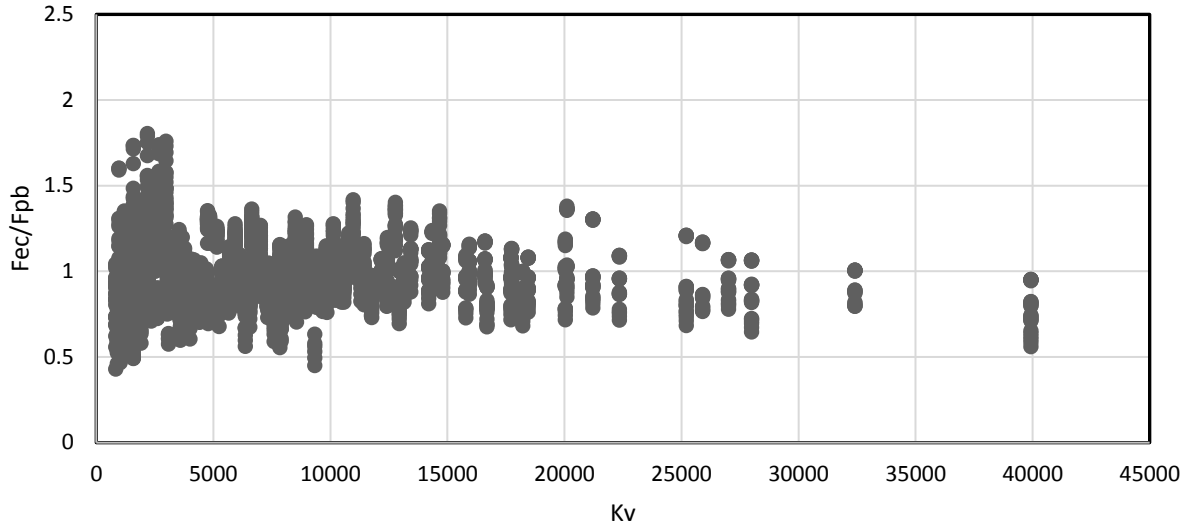


Figura 4.29.- Comportamiento de la relación de fuerzas en el plano al variar Kv

Tabla 4.9.- Resultados estadísticos de la fuerza en el plano.

Promedio	0.98
D.E.	0.19
C.V.	19%
Max	1.80
Min	0.43

#### 4.4 Comparación con resultados experimentales.

En la revisión de la literatura se identificaron 20 muros experimentales sujetos a cargas fuera del plano. En la Tabla 4.10 se presentan las resistencias fuera del plano experimentales ( $W_{exp}$ ) de los 20 muros ensayados en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán, las resistencias fuera del plano obtenidas con el método del puntal bidireccional ( $W_{pb}$ ) y las resistencias fuera del plano obtenidas con la ecuación de diseño ( $W_{ec}$ ). Además, se presentan las relaciones de las resistencias obtenidas con el método del puntal bidireccional y la experimental, así como, la relación de la resistencia fuera del plano obtenida con la ecuación de diseño.

Tabla 4.10.- Comparación de resistencias fuera del plano con el método del puntal bidireccional y la ecuación de diseño.

Muro	Referencia	$W_{exp}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$W_{pb}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$W_{ec}$ (kg/m <sup>2</sup> )	$W_{pb}$ / $W_{exp}$	$W_{ec}$ / $W_{exp}$	
1	Moreno (2015)	898.37	1052.50	1105.78	1.17	1.23	
2	Moreno (2015)	1069.68	1140.40	1189.86	1.07	1.11	
3	Moreno (2015)	1127.81	1056.10	1130.10	0.94	1.00	
4	Moreno (2015)	747.45	894.00	919.79	1.20	1.23	
5	Moreno (2015)	1370.50	1291.70	1710.79	0.94	1.25	
6	Moreno (2015)	1795.72	1769.90	1809.99	0.99	1.01	
7	Moreno (2015)	1841.61	1846.90	1728.29	1.00	0.94	
8	Moreno (2015)	1452.08	1281.20	1320.63	0.88	0.91	
9	Varela et. al (2012a)	1683.55	1641.20	2408.25	0.97	1.43	
10	Varela et. al (2012a)	1454.12	943.00	1182.83	0.65	0.81	
11	Varela et. al (2012a)	1656.02	1531.80	2123.37	0.92	1.28	
12	Varela et. al (2012a)	1125.77	928.70	985.21	0.82	0.88	
13	Varela et. Al (2012b)	1487.77	1339.40	1314.66	0.90	0.88	
14	Varela et. Al (2012b)	1627.47	1444.70	1689.64	0.89	1.04	
15	Chan 2012.	1020.74	1165.00	855.55	1.14	0.86	
16	Chan 2012.	1879.34	1773.40	2070.10	0.94	1.10	
17	Chan 2012.	1507.14	1748.70	1723.33	1.16	1.14	
18	Chan 2012.	1610.13	1828.40	1574.64	1.14	0.98	
19	G. Cantón	767.40	813.50	680.78	1.06	0.91	
20	G. Cantón	1146.70	1291.60	1114.79	1.13	0.97	
					Promedio	1.00	1.05
					D.E.	0.14	0.17
					C.V.	13.88%	16.05%
					Max	1.20	1.43
					Min	0.65	0.81

El coeficiente de variación del método del puntal bidireccional (13.88%) es menor que para la ecuación de diseño (16.05%). Mientras que los valores máximos obtenidos con el método del puntal bidireccional (1.20) es menor que los de la ecuación (1.43). Sin embargo, para el mínimo la ecuación de diseño (0.81) tiene una mejor aproximación que el método del puntal bidireccional (0.65). Por tanto, el uso de las ecuaciones de diseño para determinar la resistencia fuera del plano de muros de mampostería confinada es adecuado.

#### 4.5 Resumen Ecuaciones de diseño para determinar la resistencia fuera del plano y las fuerzas en el plano

En la Tabla 4.11 se presenta un resumen de las ecuaciones para calcular la resistencia fuera del plano de los muros de mampostería confinados sujetos a cargas fuera del plano. A continuación, se presenta el procedimiento para el cálculo de la resistencia fuera del plano de un muro cualquiera utilizando las ecuaciones de la Tabla 4.11:

1. Se tiene un muro para diseñar. Se conocen las propiedades geométricas y materiales del muro: resistencia a compresión del concreto, sección transversal y longitud de los elementos confinantes, espesor del muro y carga axial aplicada.
2. Con la resistencia a compresión axial del concreto se obtiene:  $E_c$  y  $G$
3. Con las secciones transversales de los elementos confinantes se obtiene:  $I_D, I_C, J_D, J_C$ .
4. Se calcula la rigidez equivalente  $K_v$  y  $K_H$ . con la Ecuación 3.44 y Ecuación 3.45.
5. Se obtienen los factores  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  con la Ecuación 4.3 y Ecuación 4.4.
6. Se calculan los factores  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  y  $\lambda_3$  con la Ecuación 4.15, Ecuación 4.16 y Ecuación 4.18.
7. Se obtiene la resistencia fuera del plano sin considerar el esfuerzo axial ( $W_{ec|\sigma=0}$ ) con la Ecuación 4.17.
8. Se calcula el factor  $\lambda_4$  con la Ecuación 4.22.
9. Se obtiene el aporte del esfuerzo axial ( $\Delta W_{ec}$ ) con la Ecuación 4.24.
10. Por último, se calcula la resistencia fuera del plano con la Ecuación 4.1.

Tabla 4.11 – Resumen de ecuaciones de diseño para resistencia fuera del plano.

Ecuación	Referencia	Unidades
$K_v = \left( \frac{192 E I_D G J_D}{G J_D L^3 + 48 E I_D t^2 L} \right) \left( \frac{I_c L}{I_D H + I_c L} \right)$	Ecuación 3.44	$E, G \rightarrow kg/cm^2$ $I_D, I_c, J_D, J_c = cm^4$
$K_H = \left( \frac{192 E I_c G J_c}{G J_c H^3 + 48 E I_c t^2 H} \right) \left( \frac{I_D H}{I_D H + I_c L} \right)$	Ecuación 3.45	$L, H, t \rightarrow cm$ $K_v, K_H \rightarrow kg/cm$
$\alpha_1 = 0.196 \ln(K_v) - 1.12$	Ecuación 4.3	$\alpha_1, \alpha_2 \rightarrow Sin unidades$
$\alpha_2 = -0.26 \ln(K_v) + 4.25$	Ecuación 4.4	
$\lambda_1 = \left( 2 \frac{h}{L} - 1 \right) \left( 11 \frac{h}{L} - 6 \right)$	Ecuación 4.15	$\frac{h}{L} \rightarrow \frac{cm}{cm}$
$\lambda_2 = 14.35 \left( \frac{h}{L} - 1.06 \right) \left( 0.12 - \frac{h}{L} \right)$	Ecuación 4.16	$\lambda_1, \lambda_2 \rightarrow Sin unidades$
Si $K_v < 3,000 kg/cm$ $\lambda_3 = 0.5(0.047 L - 6)(0.09 h + 79)$	Ecuación 4.18	$L, h \rightarrow cm$ $\lambda_3 \rightarrow cm^2$
Si $K_v > 3,000 kg/cm \rightarrow \lambda_3 = 500$		
$W_{ec \sigma=0} = \left( \frac{1}{\lambda_3} \right) f m^{\alpha_1} t^{\alpha_2} (\lambda_1 K_v^{0.5} + \lambda_2 K_h^{0.5})$	Ecuación 4.17	$f m \rightarrow \frac{kg}{cm^2}$ $W_{ec \sigma=0} \rightarrow kg/m^2$
$\lambda_4 = 0.143 L - 1.56 h_{ec} + 5.57 \geq 0$	Ecuación 4.22	$L, h_{ec} \rightarrow cm$
$\Delta W_{ec} = \frac{1}{10,000} \lambda_4 f m^{\alpha_1} t^{\alpha_2} K_v^{0.5} \sigma^{0.9}$	Ecuación 4.24	$\Delta W_{ec} \rightarrow kg/m^2$
$W_{ec} = W_{ec \sigma=0} + \Delta W_{ec}$	Ecuación 4.1	$W_{ec} \rightarrow kg/m^2$

En la Tabla 4.12 se presenta un resumen de las ecuaciones de diseño para las fuerzas en el plano. El procedimiento para el cálculo de las fuerzas en el plano es el siguiente:

1. Se obtiene el aporte sin esfuerzo axial ( $F_{ec|\sigma=0}$ ) con la Ecuación 4.26.
2. Se calcula el aporte del esfuerzo axial ( $\Delta F_{ec}$ ) con la Ecuación 4.28.
3. Dependiendo de la rigidez  $K_v$  se obtiene  $\lambda_5$ .
4. Se obtiene la fuerza en el plano con la Ecuación 4.25.

Tabla 4.12 - Resumen de ecuaciones de diseño para fuerzas en el plano.

$F_{ec \sigma=0} = 0.19 \left( \frac{W_{ec \sigma=0}}{t} \right)$	Ecuación 4.26	$F_{ec \sigma=0} \rightarrow kg/cm$
$\Delta F_{ec} = 0.7 t \sigma$	Ecuación 4.28	$t \rightarrow cm$ $\sigma \rightarrow kg/cm^2$ $\Delta F_{ec} \rightarrow kg/cm$
Si $K_v < 3,100 kg/cm^2$		
$\lambda_5 = 0.5$		
Si $K_v > 3,100 kg/cm^2$		
$\lambda_5 = 1.00$		
$F_{ec} = F_{ec \sigma=0} - \lambda_5 \Delta F_{ec}$	Ecuación 4.25	$F_{ec} \rightarrow kg/cm$

## Capítulo 5: Conclusiones

En el presente trabajo se desarrolló un análisis de sensibilidad de las principales variables que influyen en el comportamiento de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Se determinó la resistencia fuera del plano y las fuerzas en el plano de 3440 muros utilizando el método del puntal bidireccional y un programa de cómputo desarrollado en este trabajo. Las variables consideradas fueron la resistencia a compresión axial de la mampostería, la relación de aspecto, la relación de esbeltez, la rigidez de los elementos confinantes y el esfuerzo axial del muro. Se consideraron muros con relaciones de aspecto menores o iguales que uno. Adicionalmente, se desarrollaron ecuaciones de diseño para determinar la resistencia fuera del plano y las fuerzas en el plano de muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano. Con base en los resultados obtenidos se presentan las siguientes conclusiones.

1. Para muros de mampostería confinada sujetos a fuerzas fuera del plano, si la resistencia a compresión axial de la mampostería aumenta, la resistencia fuera del plano y la fuerza en el plano aumenta.
2. Para muros de mampostería confinada sujetos a fuerzas fuera del plano, si el espesor del muro aumenta, la resistencia fuera del plano aumenta y las fuerzas en el plano disminuyen.
3. Para muros de mampostería confinada sujetos a fuerzas fuera del plano, si el peralte de elementos confinantes aumenta, la resistencia fuera del plano y las fuerzas en el plano aumentan.
4. Para muros de mampostería confinada sujetos a fuerzas fuera del plano, si la longitud aumenta, la resistencia fuera del plano y las fuerzas en el plano disminuyen.
5. Para muros de mampostería confinada sujeto a fuerzas fuera del plano, si la altura aumenta, la resistencia fuera del plano y las fuerzas en el plano disminuyen.



6. Para muros de mampostería confinada sujetos a fuerzas fuera del plano, si el esfuerzo axial aumenta, la resistencia fuera del plano aumenta y las fuerzas en el plano disminuyen.
7. Las variables más significativas en la resistencia fuera del plano son la rigidez de los elementos confinantes ( $K_v$  y  $K_h$ ), la relación de aspecto del muro ( $h/L$ ) y la resistencia a compresión axial de la mampostería.
8. Las variables más significativas en la fuerza en el plano son el espesor y el esfuerzo axial del muro.
9. El promedio de la relación entre la resistencia fuera del plano calculada con las ecuaciones de diseño y la resistencia fuera del plano experimental es de 1.05, con un coeficiente de variación de 16.05% y valores máximo y mínimo de 1.20 y 0.65, respectivamente. Por su parte, la relación entre la resistencia calculada con el método del puntal bidireccional y la resistencia experimental es 1.00, con un coeficiente de variación de 13.88% y un valor máximo y mínimo de 1.43 y 0.81, respectivamente.
10. El alcance de las ecuaciones de diseño está limitado para muros con relación de aspecto ( $h/L$ ) menor que 1.00; resistencia a compresión axial de la mampostería entre 20 y 100 kg/cm<sup>2</sup>; espesor de la mampostería entre 12 y 20 cm; rigidez de elementos confinantes entre 625 y 40,000 kg/cm<sup>2</sup>; y esfuerzo axial entre 0 y 4 kg/cm<sup>2</sup>.
11. Las ecuaciones de diseño desarrolladas en este trabajo presentan un ajuste satisfactorio a los resultados experimentales de los muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano, lo cual representa una significativa simplificación al procedimiento de diseño.
12. Con las ecuaciones desarrolladas se pueden diseñar muros de mampostería confinada sujetos a cargas fuera del plano de manera práctica. Pueden ser utilizadas para muros sólidos o con aberturas, con diferente resistencia a compresión axial de la mampostería, relación de aspecto (menor o igual a 1), relación de esbeltez, rigidez del marco de elementos confinantes y esfuerzo axial del muro.

13. Se recomienda un mayor estudio de muros con relaciones de aspecto mayores que 1.00.

## Capítulo 6: Referencias

Abrams D.P., Angel R, Uzarski J. (1996) Out-of-plane strength of unreinforced masonry infill panels. "Earthquake Spectra", 12(4), 825-844.

Angel E. (1994) Behavior of reinforced concrete Frames with Masonry Infills. Tesis de Doctorado, Universidad de Illinois at Urbana-Champaign, U.S.A.

C.F.E., Instituto de Investigaciones Eléctricas (2008), Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por viento, Tomos I, II y III, México, 360pp

Dawe J.L., Seah C.K., (1989) Out-of-plane resistance of concrete masonry infilled panels. "Journal of Civil Engineering", 16(6), 854-864.

Gehrke, W. (1996) Fortran 95 Language Guide, 1ª edición, Springair, U.S.A.

G.Cantón J. A. (2016) Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada con elementos confinantes de sección mínima. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

López G.U. (2010) Comportamiento de muros de mampostería confinada con diferentes relaciones de esbeltez sujetos a cargas fuera del plano. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Moreno H. J., Varela R. J., Fernández B. L., (2015). Out-of-plane design procedure for confined masonry walls. "Journal of Structural Engineering", ASCE, 04015126-1

Moreno H.J. (2010), Comportamiento de muros de mampostería confinada con diferente relación de aspecto sujetos a cargas perpendiculares a su plano. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Moreno H.J. (2014) Propuesta de diseño para muros de mampostería confinada sujetos a cargas uniformes fuera del plano. Tesis de Doctorado, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Navarrete M.D. (2009). Comportamiento fuera del plano de muros de mampostería confinada con diferentes condiciones de apoyo. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Rosado G. A. (2014) Desempeño elástico y plástico del concreto fabricado con agregados reciclados de origen calizo de residuos de demolición. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Yucatán, México.

Varela R. J., Chan E. S., Fernández B. L., Moreno H. J. (2015) Comportamiento de muros de mampostería confinada con aberturas sujetos a cargas fuera del plano. "Concreto y cemento. Investigación y desarrollo". 7(1), 52-65.

Varela R. J., Navarrete M. D., Fernández B. L., Moreno E.I. (2011). Out-of-plane behavior of confined masonry walls. "Engineering Structures", 33(5), 1734-1741.

Varela R.J., Moreno H. J., López G.I., Fernández B.L., (2012a). Out-of-plane strength of confined masonry walls. "Journal of structural Engineering", ASCE, 138(11), 1331-1341.

Varela R.J., Polanco M.M., Fernández B.L., Moreno E.I. (2012b). Confined masonry walls subjected to combined axial loads and out-of-plane uniform pressures. "Canadian Journal of Civil Engineering", 39(4), 439-447.