

Modelo no lineal en elementos finitos para muros livianos con entramados de acero sujetos a carga lateral

A nonlinear finite element model of lightweight walls with cold formed steel members under lateral load

Carlos Andrés Gaviria M, Aydée Patricia Guerrero Z., Peter Thomson R.*

Grupo de Investigación en Ingeniería Sísmica, Ingeniería Eólica y Estructuras Inteligentes, G-7, Escuela de Ingeniería Civil y Geomática. Universidad del Valle. Calle 13 N.º 100-00, Edificio 350, Ciudad Universitaria Meléndez. Cali, Colombia.

(Recibido el 10 de enero de 2012. Aceptado el 19 de septiembre de 2013)

Resumen

En este artículo se presentan los resultados de una investigación que tuvo como propósito modelar con elementos finitos el comportamiento a cargas laterales de los muros livianos compuestos de un entramado típico de acero para diferentes materiales de revestimiento. Se inició con la recopilación de información de ensayos de caracterización en los elementos del muro y las conexiones entre estos, a partir de esta información y la investigación realizada por [1] se construyó un modelo de elementos finitos que considera el comportamiento no lineal de las conexiones entre los elementos. Este modelo fue ajustado con la información de los ensayos ante carga lateral realizados en probetas a escala real para cinco configuraciones de revestimiento. En este proceso se encontraron grandes diferencias entre los parámetros del modelo ajustado y los iniciales que son atribuidas a la interacción entre los componentes del muro liviano. La validación del modelo se realizó prediciendo los resultados experimentales de una nueva configuración en la cual se combinan varios materiales, obteniendo un error del 6.9%. Este resultado indica una buena capacidad de predicción del modelo para otras posibles configuraciones de revestimiento.

Palabras clave: Muros de cortante, muros livianos, elementos finitos, ajuste de modelos, carga lateral

* Autor de correspondencia: teléfono: + 57 + 2 + 339 20 86, correo electrónico: carloaga@univalle.edu.co (C. Gaviria)

Abstract

This article presents the results of an investigation aimed at generating finite element models (FEM) for studying lateral load behavior of lightweight walls composed of a typical steel framing and different coating materials. Initially, the elements and connections were characterized with standard tests, based on this information and research by [1] finite element models were built that included the nonlinear behavior of the connections between elements. This model was updated for different coating materials using experimental results of lateral loads test conducted on full-scale prototypes for five different coating configurations. However large differences were found when compared the model updating parameters with initial parameters on the FEM model. These differences are attributed to the dissimilar materials working together as a composite rather than as individually. The model was validated with a configuration combining coating materials producing results with a 6.9% difference with respect to experimental data. This indicates an acceptable predictability of the model for other coating materials.

Keywords: Shear wall panels, cold formed steel framing, finite element, model updating, lateral load

Introducción

Actualmente la industria de la construcción desea implementar sistemas constructivos innovadores, rápidos, ecológicos y de producción en serie para edificar vivienda de interés social. El sistema de muros livianos con entramados de acero (Light Steel Framing) aparece como una de las opciones que ha sido ampliamente aceptada en Norte América y Europa durante décadas. Esta tipología de muros se compone de elementos verticales de sección en C llamados párales, unido en ambos extremos a un par de canales o elementos horizontales en C. Todos los elementos son fabricados en acero laminado en frío y a este conjunto de elementos se le adosa un revestimiento estructural en una o ambas caras.

En el diseño, los párales son evaluados ante cargas verticales y el revestimiento unido a la estructura de párales determinan el comportamiento del muro ante carga lateral. Esta última tarea es la más compleja debido a la interacción entre el

revestimiento, los párales, y las conexiones entre estos, afectando considerablemente el comportamiento y la resistencia lateral del muro [2]. La solución práctica a este problema es recurrir a ensayos experimentales o, en su defecto, obtener los parámetros de diseño del muro de los valores publicados por normas internacionales de diseño [3, 4]. La limitación está en que los parámetros sólo se definen para determinados materiales de revestimiento, secciones, separaciones entre párales, dimensiones del muro, distancias entre conectores, ubicación de los anclajes y, en consecuencia, no pueden ser extrapolados a otros materiales o detalles constructivos.

Para solucionar esta limitante del diseño se ha recurrido a modelos numéricos o simulaciones numéricas utilizando FEM, esta última técnica ha sido reconocida como una de las herramientas más apropiada para representar el comportamiento físico de las estructuras en el presente [5]. Con el FEM se construye un sistema discreto de

ecuaciones que se resuelve de forma matricial y permite representar los diferentes componentes del muro y la interacción entre los mismos. Además, el estudio a carga lateral de los muros livianos requiere un análisis no lineal [1, 5-7], que permita extender la investigación hasta los límites donde no se presenta una proporcionalidad entre los valores de carga y desplazamiento, y de esta manera determinar la carga máxima resistida por el muro.

Variedad de modelos numérico para muros livianos revestidos con placa de acero corrugada, yeso o madera OSB que incorpora el comportamiento no lineal de las conexiones han sido desarrollados [5, 8-9]. Estos modelos se ajustaron con datos experimentales de muros a escala natural sometidos a carga lateral y fueron usados para determinar la reducción de la carga sísmica debido a la ductilidad y la disipación de la energía [1,10], plantear nuevas consideraciones de diseño para el modelamiento de edificios de mediana altura [8] y estudiar los efectos de la longitud, carga vertical y el tipo de conexiones en el desempeño de los muros [9]. Debido a que la implementación de los modelos puede ser compleja en la práctica de la ingeniería, otros estudios se han centrado en utilizar modelos de materiales y de elementos incorporados en programas comerciales de elementos finitos que permiten representar el comportamiento no-lineal de los mismos [11]. [12] presentó un modelo de FE donde cada conexión entre las placas y el para fue modelada con un elemento no-lineal semirrígido (resorte) que permite acumulación de daño. Alternativamente [11] empleó un modelo de material visco elástico para representar las conexiones en muros livianos en madera.

En este artículo se presenta un modelo genérico usando FEM que abarca diferentes materiales de revestimiento y que considera el comportamiento no lineal de los conectores como una estrategia para representar de forma

óptima el comportamiento a carga lateral [11,13]. Este modelo fue ajustado a partir de datos experimentales para seis combinaciones de revestimiento con tres tipos de materiales: yeso, fibrocemento y ferrocemento. Los dos últimos materiales mencionados no son de uso común en Norte América y Europa para revestir los muros livianos y no se ha encontrado referencia sobre su incorporación a este tipo de modelo de elementos finitos. Este modelo permite ampliar en un futuro la investigación de esta tipología de muros, simulando el comportamiento de estos muros para otras combinaciones de revestimiento e incluyéndolos en modelos completos de viviendas.

Para cubrir esta investigación, en las dos primeras secciones se presentan las características de los muros livianos estudiados y sus componentes. En el apartado tres se muestra la síntesis de los resultados experimentales a carga lateral que permiten evidenciar la no-linealidad en el comportamiento a carga lateral de los mismos y definir los parámetros iniciales del modelo FEM. Una descripción detallada del modelo FEM y del proceso de ajuste es exhibida en las dos secciones siguientes. Por último se presentan los resultados y discusión del modelo FEM con las observaciones finales de este estudio.

Descripción de los prototipos

Los muros livianos estudiados se componen de un armazón de perfiles de acero de lámina delgada sobre el cual se fija un recubrimiento laminado (figura 1). En este trabajo se estudian muros revestidos con placas de yeso, fibrocemento y ferrocemento. En algunos casos se utilizó un tipo de placa diferente a cada lado del muro y en uno de los muros el revestimiento fue reemplazado por riostras metálicas en cruz generando seis tipos de pared que se presenta en la tabla 1. Todos los paneles tenían dimensiones estándar de altura 2.44 m y un ancho de 1.22 m.

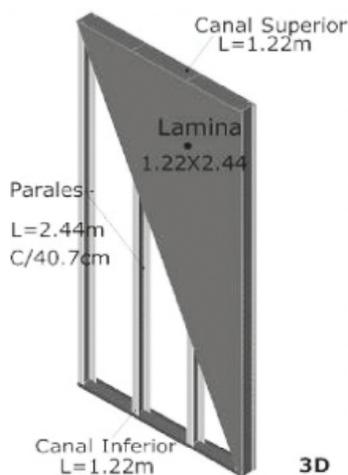


Figura 1 Isometría del muro prototipo

Tabla 1 Configuración de muros

<i>Tipo</i>	<i>Placa Frontal</i>	<i>Placa Posterior</i>	<i>Conexión Anclaje</i>
MY1Y1-C1	Yeso	Yeso	Tipo I
MFifi-C1	Fibrocemento	Fibrocemento	Tipo I
MY2Y2-C1	Yeso	Yeso	Tipo I
MFeY2-C1	Ferrocemento	Yeso	Tipo I
MRR-C2	Riostra	Riostra	Tipo II
MFeY1R-C2	Ferrocemento	Yeso + Riostra	Tipo II

Características de los componentes

El entramado metálico se compone de perfiles laminados en frío con sección en forma de C y un espesor de 0.85 mm. Los perfiles parales tienen una separación de 407 mm entre ellos y el revestimiento de los muros se realizó con placas de espesor 127

mm, 8 mm y 20 mm para yeso, fibrocemento y ferrocemento respectivamente. Para el caso de los recubrimientos con placa de yeso se usaron dos tipos de conectores de placa, conector tipo I con tornillo (C1) mostrado en la figura 2A y tipo II tornillo con arandela (C2) (figura 2B).

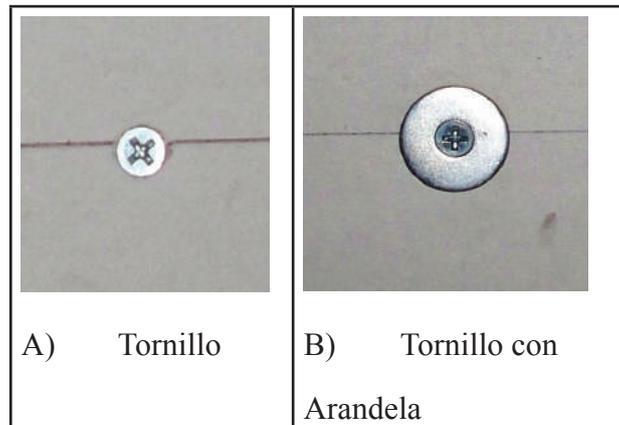


Figura 2 Conectores para placa de yeso

En algunos prototipos de muros se utilizaron riostra elaboradas con una cinta metálica de 76 mm de ancho y de 0.85 mm de espesor. Estas riostras se dispusieron en forma de X, abarcando desde la parte inferior del muro hasta la canal superior, como se indica en la figura 3.

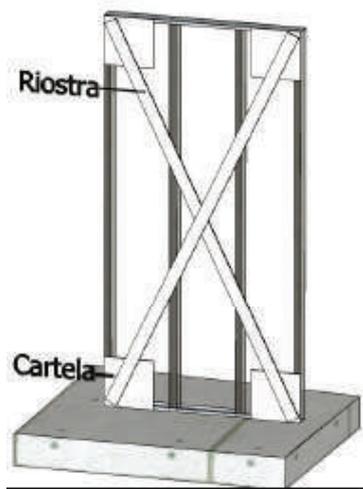


Figura 3 Disposición de riostras

La fijación entre perfiles se realizó mediante dos tornillos cabeza de lenteja #8 (diámetro 4.17 mm) que fijan las aletas del perfil canal al paral. La unión entre placa y párales se realizó mediante tornillos autorroscantes galvanizados que varían de acuerdo al revestimiento, para la placa de yeso se utilizaron tornillos de cabeza

Phillips, #6 (diámetro 3.51 mm.) con la separación reglamentada [14] que se indica en la tabla 2 y se acota en la figura 4.

Tabla 2 Separación de los conectores

<i>Placa</i>	<i>Separación [mm]</i>	
	<i>Perímetro (A)</i>	<i>Párales Intermedios (B)</i>
Yeso	127	254
Fibrocemento	127	254
Ferrocemento	150	300

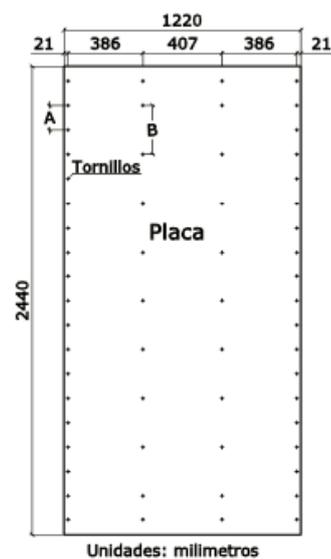


Figura 4 Ubicación de tornillos de fijación

Para conectar la placa de fibrocemento se utilizaron tornillos autodilatantes y autoavellanantes, cabeza de Trompeta Tipo Phillips #8 (diámetro 4.17 mm). La placa de ferrocemento se unió a los perfiles mediante conectores de cortante compuestos de un tornillo cabeza hexagonal # 10 (diámetro 6 mm), al cual se le adosa una arandela de 13 mm de diámetro en la parte superior.

Para conectar el muro a la cimentación se utilizaron dos tipos de conexión de anclaje; una conexión de anclaje inicial (tipo I) basada en los estudios realizados por [15]. Esta conexión está compuesta de un ángulo de 76 mm. (3") con una longitud de 79 mm. (3 1/8) elaborado en lámina de acero calibre 16 (espesor 1.52 mm), una lámina adicional de acero de 76 mm x 79 mm con espesor de 3 mm, y se conecta con cinco tornillos al paral y a la cimentación a través de un anclaje de cuña de 12.7 x 95 mm (1/2 x 3 3/4"). Esta se presenta en la figura 5 y se ubicaba en cada uno de los párales del muro.

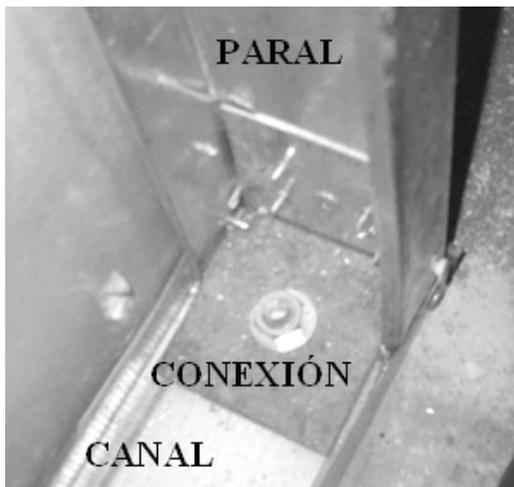


Figura 5 Conexión de anclaje tipo I

En las últimas dos configuraciones de muro (MRR-C2 y MFeY1R-C2) se instaló una conexión mejorada llamada tipo II (figura 6). Ésta se encuentra compuesta por una sola pieza de acero formada a partir de un conjunto de platinas de acero que fueron diseñadas para

soportar las cargas exigidas por [3] y siguiendo las recomendaciones de [16] para viviendas ubicadas en zonas de amenaza sísmica alta. A diferencia de la conexión tipo I, esta conexión solo se instaló en los párales extremos del muro.



Figura 6 Conexión de anclaje tipo II

Comportamiento experimental de muros

En un estudio previo se ejecutaron ensayos a carga lateral cuasi-estática en los muros livianos con el fin de determinar los parámetros de desempeño estructural [17-18]. Por brevedad y de acuerdo con el objetivo de esta publicación, en la presente sección solo se exponen algunas características, resultados y análisis obtenidos de estas pruebas que permiten comprender la necesidad de utilizar un modelo no lineal, los elementos donde se incluirá la no-linealidad y además, los resultados experimentales que serán usados como parte del ajuste y validación del modelo.

Los ensayos a carga lateral fueron realizados de acuerdo a [19]. La instrumentación y análisis de la información se realizó siguiendo los lineamientos [20]. El esquema del montaje experimental se presenta en la figura 7.

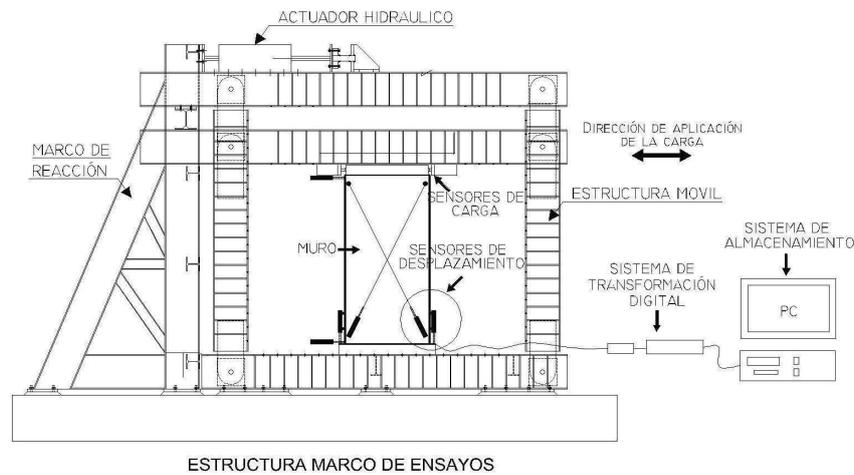


Figura 7 Esquema de montaje experimental

Para estos ensayos, tres probetas de cada una de las configuraciones de muros fueron usadas (para un total de 18), la primera probeta se sometió a carga monótonica. Esta prueba es utilizada para determinar los parámetros del protocolo de carga cíclica que es posteriormente aplicada a los otros dos especímenes. A partir de los ensayos de carga cíclica se construyeron envolventes de la curva carga vs. desplazamiento lateral para cada tipo de muro. Estas envolventes se aprecian de manera esquemática en la figura 8.

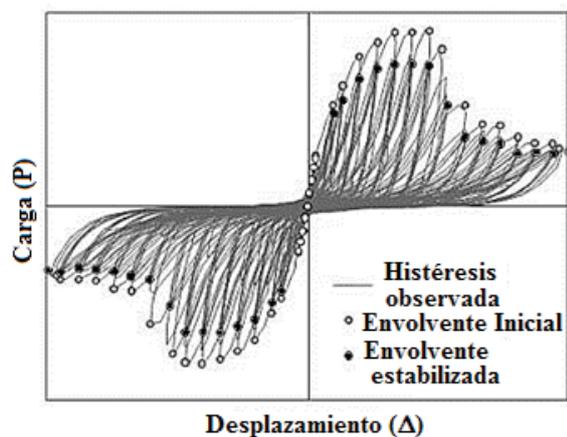


Figura 8 Ejemplo de curva de histéresis y envolventes (Adaptado de [21])

De acuerdo con la figura anterior, dos tipos de envolventes pueden ser trazadas, la primera llamada inicial que contiene los valores máximos para cada fase de desplazamientos y la segunda nombrada como envolvente estabilizada se construye a partir de valores de la carga máxima de dos ciclos sucesivos con la misma amplitud cuyo valor no varía en más de un 5% entre ellos [21]. En este trabajo se utilizó la curva envolvente estabilizada (como curva monótonica equivalente) para ajustar y validar el modelo de elementos finitos debido a que contiene el efecto de la cargas cíclica y representa los valores más conservadores de resistencia comparada con la curva envolvente máxima y la curva del ensayo monótonico.

En la figura 9 se presenta la curva más representativa de cada configuración usada para realizar el ajuste del modelo. Es notorio un comportamiento no lineal aún para una deriva pequeña (0.5%) en las diferentes configuraciones de muro, exceptuando los tipo MRR-C2. Estos resultados evidencian la necesidad de un modelo no lineal de elementos finitos que nos permitan obtener información representativa sobre el comportamiento a carga lateral de los muros livianos con otras características, ej. una nueva configuración con placas de ferrocemento y yeso en las partes frontal y posterior respectivamente,

y conexión de anclaje tipo II (MFeY1-C2) o estudiar el efecto de las aperturas en las puertas y ventanas.

El comportamiento no lineal en los muros es característico de un material compuesto y durante las pruebas se observó que este fenómeno se concentra en pequeñas zonas, en las cuales ocurre una falla por desgarramiento de la placa en la conexión placa a perfil como ha sido reportado [22-23]. Por tanto, durante la construcción de un modelo de elementos finitos se hace necesario emplear un elemento no-lineal en la conexión placa a perfil que pueda representar este comportamiento. En los muros tipo MRR-C2 se reportó un comportamiento lineal elástico aproximado debido a que no utiliza placas de revestimiento y la falla se produce de manera súbita por pandeo de los párales de borde. Esta situación es generada por la falta del soporte lateral que aportan las placas.

En cuanto a las dos tipologías de conexión de anclaje utilizadas, la primera de estas (tipo I) registro grandes deformaciones observándose un desplazamiento vertical importante del muro en los extremos (hasta de 20 mm, figura 9-b.), esta situación es poco conveniente para un adecuado desempeño del muro dentro de una estructura (ej. controlar derivas). Al implementar la conexión de anclaje tipo II se redujo el desplazamiento lateral del muro considerablemente, reportando movimiento de tan solo 3 mm (figura 9-b) en las configuraciones de muro que fue instalada (MRR-C2 y MFeY1R-C2). Adicionalmente la figura 9-b permite evidenciar que las conexiones de anclaje son otra fuente de no-linealidad en el comportamiento a carga lateral de los muros. Por tanto, en este trabajo se adicionó al modelo de Davenne [13] un elemento no lineal para representar las conexiones. Mayores detalles sobre los ensayos y el análisis de los respectivos resultados son presentados en las referencias [17-18].

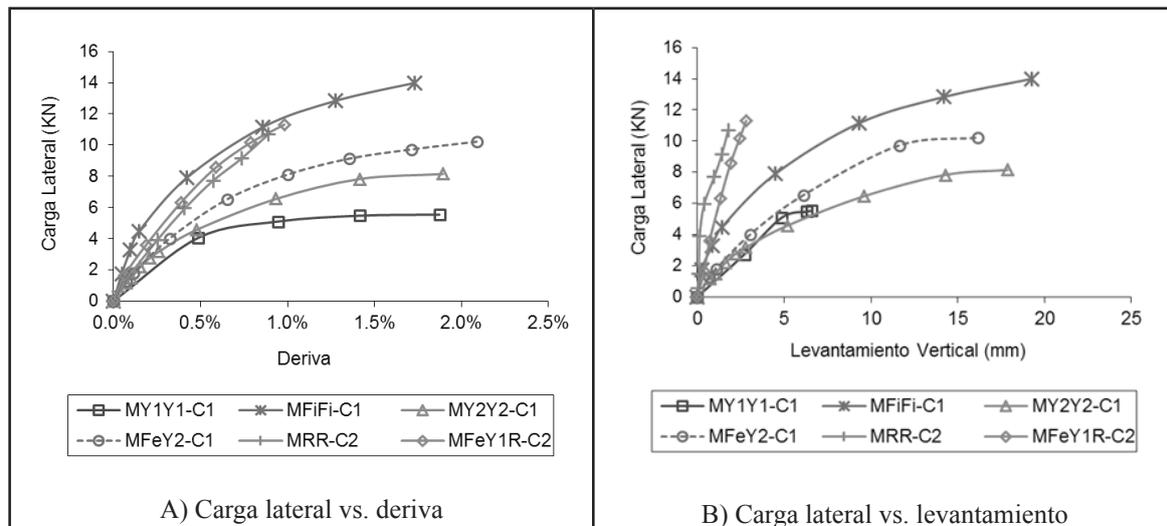


Figura 9 Curvas envolventes experimentales

Construcción del modelo

El modelo de elementos finitos se construyó a partir del modelo desarrollado por Davenne [13] empleado el software comercial de elementos finitos LUSAS FEA [24] que permite ejecutar

un análisis no lineal elástico (no linealidad del material para este estudio). La carga aplicada es considerada cuasi estática, por tanto, los efectos inerciales son despreciables. De acuerdo con lo anterior, la ecuación de movimiento del muro puede expresarse como:

$$\{F\}_i = [K]_i \{\Delta\}_i \quad (1)$$

Donde $[K]_i$ corresponde a la matriz de rigidez del muro que es ajustada durante cada instante de tiempo (i), si es necesario. $\{F\}_i$ y $\{\Delta\}_i$ son los correspondientes vectores de fuerza y desplazamiento para cada iteración (i).

En este modelo se utilizaron elementos viga de tres dimensiones (3D) para modelar los perfiles y riostras. Las placas de revestimiento fueron modeladas usando elementos cascará tipo cuadriláteros de 8 nodos, debido a que el elemento placa no es compatible con el elemento viga utilizado, lo cual es necesario para ejecutar el análisis FEM. Las conexiones entre la placa y el perfil [13] y la conexión de anclaje fueron representadas usando elementos tipo línea de dos nodos (sin rigidez rotacional) que emplea dos resortes traslacionales y perpendiculares al eje de la misma (para este caso, en la dirección horizontal y vertical respectivamente). En la conexión placa a perfil, este par de resortes permiten orientar la falla en la dirección más débil sobre el plano de la placa de revestimiento. En el caso de la conexión de anclaje, el resorte horizontal se fijó con una rigidez infinita, por tanto, solo la rigidez vertical es usada. Aunque la rigidez rotacional de la conexión de anclaje puede contribuir al comportamiento a carga lateral del espécimen, esta es difícil de estimar [1].

En los elementos viga y cascará se empleó un material lineal elástico e isotrópico, con un módulo de elasticidad de 188.67, 2.13, 13.30 y 20.08 GPa. para del acero, yeso, fibrocemento y ferrocemento respectivamente. Estos valores fueron tomados del estudio de caracterización [18], donde se emplearon ensayos de tracción [25], flexión pura [26-27], y flexión simple [28] en probetas de acero, placas de yeso y fibrocemento, y placas de ferrocemento correspondientemente. El modelo constitutivo corresponde a un material elástico lineal y la ecuación constitutiva se puede expresar mediante la ley de Hook como:

$$\sigma = E \delta \quad (2)$$

Donde σ , E y δ representan respectivamente el esfuerzo, módulo de elasticidad y la deformación en el material. En los resortes de la conexión placa a perfil se usó un material elásto-plástico representado a través de la misma curva bilineal para los estados de tensión y compresión, cuyas propiedades se calcularon a partir de los ensayos de caracterización a carga monotónica reportados [18] utilizando el análisis implementado en [6]. Estas propiedades se presentan la tabla 3 para los tres tipos de revestimientos, donde K es la rigidez de la conexión en la zona lineal, Fz_y es la carga máxima en la zona lineal y KEE es la pendiente en la zona no lineal.

Tabla 3 Parámetros usados en los conectores

Conector	K [N/mm]	Fz_y [N]	KEE [MPa]
Yeso sin Arandela	794	327	38
Yeso con Arandela	254	352	35
Fibrocemento	101	507	28
Ferrocemento	2595	2005	424

En el caso de las conexiones, el modelo constitutivo corresponde a un material no lineal elásto-plástico y cuya ecuación en términos de fuerza se pueden expresar mediante la expresión 3, donde F y Δ son la fuerza y el desplazamiento en el resorte no lineal:

$$F = \begin{cases} K \Delta & \text{si } F \leq Fz_y \\ Fz_y + K_{EE} (\Delta - Fz_y / K) & \text{si } F > Fz_y \end{cases} \quad (3)$$

Para el trazado de la geometría del modelo FEM se definió un plano central donde se dibujó el armazón de perfiles de acero con o sin riostras según el caso. Paralelo a éste se definieron dos planos más (uno en cada lado) donde se delinearón las dos placas de recubrimiento como se observa en la figura 10. Las conexiones entre la placa y los perfiles se generaron mediante la unión de cada par de nodos (uno sobre la placa y otro en el perfil). El mallado de los elementos

viga y cascara estuvo condicionado por la separación entre los conectores. Las canales, parales y placas se dividieron en 8,10 y 420 elementos respectivamente. En todos los casos, las dimensiones globales del modelo son iguales a las presentadas por los prototipos evaluados experimentalmente. Debido a la no-lineal del modelo FEM el análisis es iterativo, por tanto se empleó el algoritmo de Newton-Raphson combinado con un control de los desplazamientos y el criterio de convergencia del residuo máximo absoluto [29].

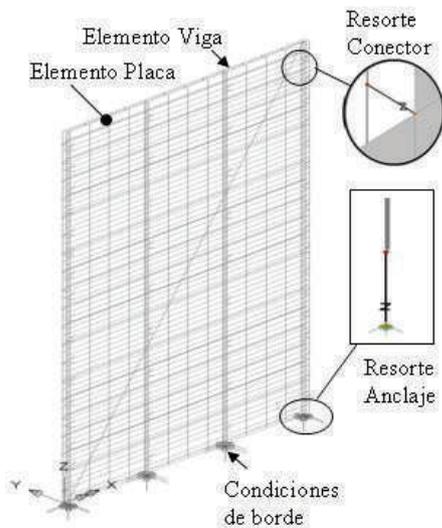


Figura 10 Isometría del modelo

Como un último paso, las siguientes condiciones de borde fueron asignadas al modelo: se restringió el desplazamiento lateral en el nodo inferior de los parales, se bloqueó el desplazamiento fuera del plano fuerte del muro y la carga monotónica se aplicó mediante desplazamiento prescritos en la canal superior.

Ajuste del modelo

Debido a que las conexiones de anclaje no fueron caracterizadas como elementos individuales se considera que éstas presentan la mayor incertidumbre en la modelación. Adicionalmente,

las conexiones entre la placa y el perfil fueron estudiaron ante carga monotónica en un estudio previo [18], despreciando el comportamiento histerético de la misma. La geometría de los elementos se encuentra definida, a excepción del ferrocemento, para el cual el espesor real puede variar. Las propiedades mecánicas de los materiales usadas en el modelo fueron evaluadas experimentalmente, por tanto, son parámetros con poca incertidumbre.

De acuerdo a lo anterior, para realizar el ajuste se modificaron las propiedades de los elementos resorte que simulan el conector placa a paral y las conexiones de anclaje. Dicho ajuste se realizó asemejando la respuesta del modelo a curvas experimentales de la relación entre la carga y el desplazamiento horizontal del muro (figura 9-A) y la relación entre la carga horizontal y el levantamiento vertical del paral de borde (figura 9-B). Al utilizar éstas dos curvas se logró definir una combinación única de los parámetros y garantizar la unicidad de los mismos. El ajuste se realizó hasta lograr una diferencia menor o igual al 10% entre el modelo y los datos experimentales. Este valor corresponde a la desviación promedio de los datos experimentales de las diferentes configuraciones de muro. La diferencia entre el modelo ajustado y el experimental se determinó mediante la técnica del error cuadrático medio, la cual promedia el cuadrado de las diferencias entre los valores simulados y los observados [30] y que se presenta en la ecuación (4). Ésta tiene en cuenta la diferencia en los valores de la carga lateral aplicada en el muro y el levantamiento vertical del paral extremo.

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{(Fm_i - Fe_i)^2}{Fe_i^2} + \frac{(\delta m_i - \delta e_i)^2}{\delta e_i^2}}}{n} \quad (4)$$

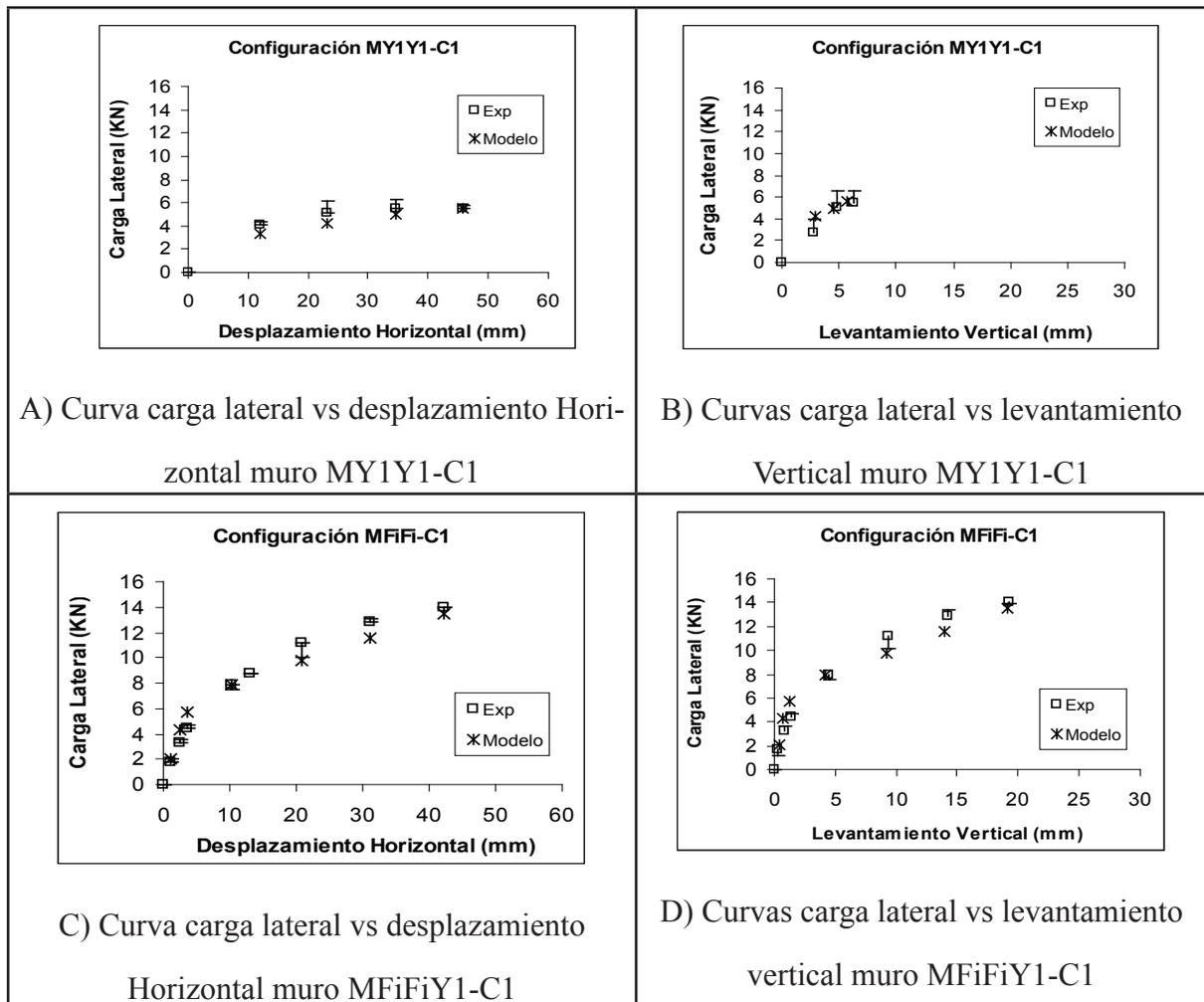
En la ecuación 4, i es el punto de calibración, n es el número total de puntos, F_{m_i} y F_{e_i} son las fuerzas laterales en el punto i arrojados por el modelo y los valores experimentales respectivamente, y δm_i y δe_i son los levantamientos del paral extremo.

Las configuraciones fueron ajustadas para cada tipo de conexión placa a paral y para ambos tipos de conexión de anclaje. Partiendo de estos parámetros se realizó una simulación para una configuración de muro nueva. En ésta se instaló una placa de ferrocemento en un costado y en el otro costado una riostra acompañada de una placa de yeso (MFeY1R-C2). Se comparó el resultado

de la simulación con la respuesta experimental a fin de validar el ajuste para cualquier combinación de revestimiento.

Resultados y discusión

En la figura 11 se presentan las curvas calibradas para las distintas configuración de muro liviano junto con los resultados experimentales, donde las barras representan la desviación experimental de los datos. En general el comportamiento del modelo FEM es similar al observado experimentalmente, el error entre el modelo FEM y los datos experimentales se presenta en la tabla 4.



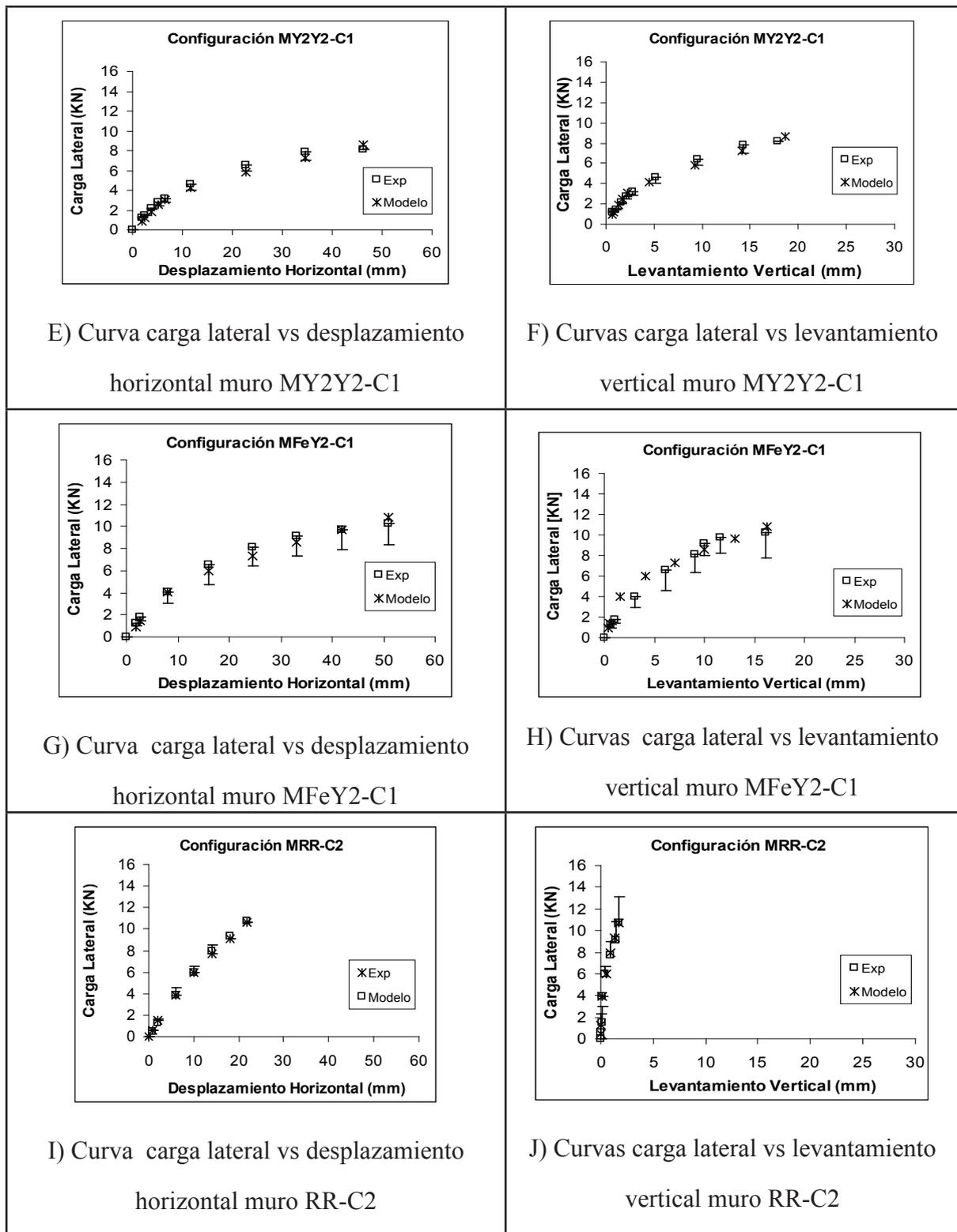


Figura 11 Curvas experimentales y modelos ajustados

Tabla 4 Error estimado en los modelos FEM

Configuración	Error		
	Carga Lateral	Levantamiento vertical	Total
Y1-Y1-C1	11.2%	8.3%	10.4%
Y2-Y2-C1	7.4%	10.4%	9.9%
Fe-Y2-C1	5.3%	8.9%	8.6%
Fi-Fi-C1	10.6%	4.8%	8.9%
R-R-C2	1.3%	7.7%	5.9%

Por otra parte, los parámetros ajustados para los conectores placa a paral y la diferencia porcentual

respecto a los valores registrados en la tabla 3 se presentan en la tabla 5.

Tabla 5 Parámetros calibrados de conectores

Conector	K [N/mm] / Dif	Fzy[N] -/ Dif	KEE[MPa] / Dif
Yeso sin Arandela	600 / 32 %	200 / 64 %	20 / 90 %
Yeso con Arandela	760 / 199 %	500 / 42 %	200 / 471 %
Fibrocemento	2000 / 1880 %	1000 / 97 %	500 / 1686 %
Ferrocemento	800 / 224 %	800 / 151 %	300 / 41 %

Los parámetros ajustados para las conexiones de anclaje se presentan en la tabla 6. Aunque la conexión tipo I se empleó en varios prototipos, los parámetros difieren principalmente en la rigidez inicial. Esta situación se asocia al acomodamiento inicial de la conexión durante

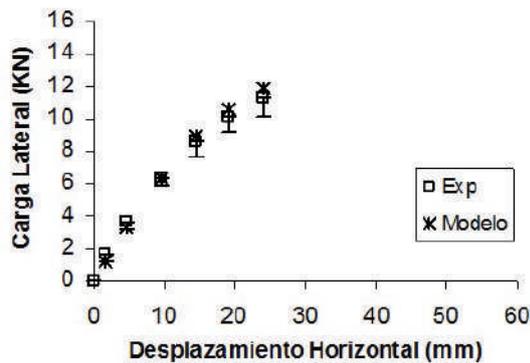
las pruebas, sin embargo, los valores de los parámetros se mantienen en el mismo orden y es un buen indicativo del ajuste. Para la conexión tipo II, la rigidez permanente (KEE) determinada en este trabajo es similar a la reportada en otro estudio [1] (13100 KN/m).

Tabla 6 Parámetros calibrados de la conexión de anclaje

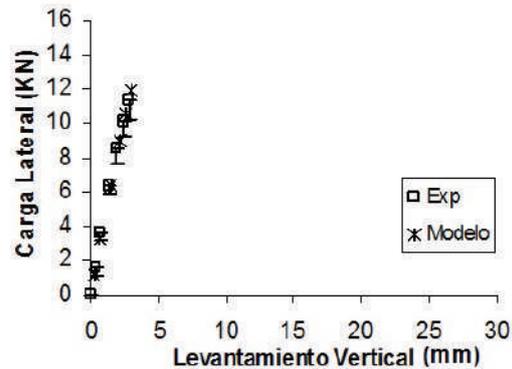
Conexión de Anclaje	Configuración	K [N/mm]	Fzy [N]	KEE [MPa]
Tipo I	Y1-Y1-C1	10000	6000	800
	Y2-Y2-C1	2000	4000	400
	Fe-Y2-C1	4000	6000	500
	Fi-Fi-C1	8000	7000	400
	Promedio	6000	5750	525
	Desv. Est. [%]	60,9%	21,9%	36,1%
Tipo II	R-R-C2	55000	10000	8000

El resultado de la simulación del muro MFeY1R-C2 se presenta en la figura 12 junto a la envolvente experimental. Se observa una gran similitud en la forma de ambas repuestas, con una diferencia global del 6.9 %. Este valor

es menor al error global manejado en el ajuste (10%) y valida la aplicación del modelo para la predicción del comportamiento de los muros con otras combinaciones de revestimiento.



A) Curvas carga lateral vs levantamiento horizontal



B) Curvas carga lateral vs levantamiento vertical

Figura 12 Curvas experimentales y simulación FEM del muro FeY1R-C2

Conclusiones

El desarrollo de un modelo representativo de muros livianos es una labor compleja debido al comportamiento no lineal asociado a las conexiones entre componentes. No obstante, en el presente estudio los elementos resorte permitieron ajustar el comportamiento de las conexiones, involucrando la no linealidad y constituyéndose como una herramienta practica para calibrar este tipo de modelo de elementos finitos.

El ajuste permitió observar que para todas las configuraciones de muro, los parámetros actualizados de los conectores placa-paral difieren de los reportados [19] para carga monotónica. Esto se asocia a que las curvas envolventes utilizadas son generadas con los ensayos a carga lateral cíclica, por tanto, están afectadas por el comportamiento histerético del muro y a la contribución del comportamiento compuesto de los elementos. Durante el ajuste también se

observó que la conexión de anclaje tipo I no presenta un comportamiento homogéneo en todas las configuraciones de muro implementada. Esto se relaciona con las condiciones particulares de instalación, fijación y ajuste de la conexión, que genera diferencias importantes en el comportamiento experimental de los muros y limita la precisión del modelo ajustado. Finalmente el modelo ajustado fue validado para las configuraciones de revestimiento estudiadas. En el caso particular de los muros con placas de ferrocemento, los parámetros determinados para realizar análisis no lineal en muros livianos con placas de ferrocemento representan una novedad que permitirá extender las investigaciones del uso del ferrocemento en muros livianos (ej. optimización estructural). En general, los modelos ajustados para las configuraciones de muro estudiadas constituyen una herramienta para simular la respuesta individual y aportan una base para representar el comportamiento de un conjunto de muros dentro de una vivienda.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a Perfilamos del Cauca S.A, a la Universidad del Valle y a COLCIENCIAS, entidades financiadoras del proyecto “Desarrollo de un sistema industrializado de muros livianos para la construcción de vivienda” mediante el contrato No. 267-2006.

Referencias

1. S. Andreasson, M. Yasumura, L. Daudeville. Sensitivity Study of the Finite Element Model for Wood-Framed Shear Walls”. *Journal of Wood Science*. Vol. 48. No 3. 2002. pp 171-178.
2. L. Xu, J. Martínez. "Strength and stiffness determination of shear wall panels in cold-formed steel framing". *Thin-Walled Structures*. Vol. 44. 2006. pp. 1084-1095.
3. IRC2009. *International Residential Code For one- and two-family Dwellings*. Ed. International Code Council. Inc. 1th ed. 2009. Washington, D.C. USA. pp. 868
4. AISI. *North American standard for cold-formed steel framing-lateral design*. S213. Ed. American Iron and Steel Institute. Washington, USA. 2007. pp.73.
5. J.K, Sinha, A. Rama, R.K, Sinha. *Advantage of the Updated Model of Structure: A Case Study*. Nuclear Engineering and Design. Vol. 232. 2004. pp 1-6.
6. L. Fiorino, G. Dellacorte, R. Landolfo. “Experimental tests on typical screw connections for cold-formed steel housing”. *Engineering Structures*. Vol. 29. 2007. pp. 1761-1773.
7. B. Xia, J. Dong. "Finite Element Analysis of the Lateral Force Resistance of Light Gauge Steel Framed Compound Bearing Walls". *Building Structure Supplement*. No. 8. 2004. pp. 334-337.
8. S. Pei, J. Van de Lindt. "Seismic numerical modeling of a six-story light-frame wood building: Comparison with experiments". *Journal of Earthquake Engineering*. Vol. 15. 2011. pp. 924-941.
9. I. Christovasilis, A. Filiatrault. *A two-dimensional numerical model for the seismic collapse assessment of light-frame wood structures*. ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Rhodes, Greece. 2009. pp. 24
10. L. Fülöp, D. Dubina. "Performance of wall-stud cold-formed shear panels under monotonic and cyclic loading Part II: Numerical modeling and performance analysis. *Thin-Walled Structures*". Vol. 42. 2004. pp. 339-349.
11. A. Blasetti, R. Hoffman, D. Dinehart. "Simplified hysteretic finite element model for wood and viscoelastic polymer connections for the dynamic analysis of shear walls". *Journal of Structural Engineering*. Vol. 134. No. 1, 2008, pp. 77-86.
12. J. Humbert, J. Baroth. *Predictive models for panel-sheathed shear walls under seismic loadings*. Wood Science and Technology Proceedings of Korea, Korea Society of Wood. Seoul, Korea. 2012. pp. 24-25.
13. L. Davenne, L. Daudeville, N. Kawai, M. Yasumura. *A numerical analysis of shear walls structural performance*. Proceedings of the CIB-W18 meeting 19. Vancouver, Canada. 1997. pp. 1-10.
14. ASTM. *Standard Practice for Application of Cellulosic Fiber Insulating Board for Wall Sheathing C846*. Ed. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, USA. 2009. pp. 1515.
15. C. Bermudez. *Análisis y Diseño de Uniones a Momento en Perfiles de Lámina Doblada en Frío*. VII Jornadas de Estructuras en Acero: Perfiles conformados en frío o en lámina delgada. Bogotá, Colombia. 2010. pp. 75-86.
16. FEMA. *Home Builders Guide to Seismic Resistant Construction. FEMA 232*. Ed. National Institute of Building Sciences. Washington D.C., USA. 2006. pp.212
17. P. Guerrero, C. Gaviria. *Comportamiento Experimental de Muros con Perfiles de Acero de Lámina Delgada y Placas de Ferrocemento*. Memories of 10th International Symposium on Ferrocement and Thin Reinforced Cement Composite -FERRO10. Ed. Obras UNAICC. La Habana, Cuba. 2012. pp. 223-242.

18. A. Guerrero. *Desarrollo de un sistema Industrializado de muros livianos para la construcción de vivienda*. Informe Técnico Final de Investigación. Universidad del Valle -Colciencias-Perfilamos. Cali, Colombia. 2010. pp. 147.
19. ASTM. *Standard Test Methods for Cyclic (Reversed) Load Test for Shear Resistance of Vertical Elements of the Lateral Force Resisting Systems for Buildings ASTM E2126*. Ed. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, USA. 2009. pp. 15
20. S. Catacolí, J. García, P. Thomson, A. Guerrero. "Comportamiento mecánico de un panel del sistema constructivo de muros tendinosos Parte I: Modelo Computacional No Lineal Y Experimentos De Vibración Libre". *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*. Vol. 9. 2004. pp. 45-56.
21. S. Vagh, D. Dolan, S. Easterling. *Effect of Anchorage and Sheathing Configuration on the Cyclic Response of Long Steel-Frame Shear Walls*. Virginia Polytechnic Institute and State University. Report No. TE-2000-002. Virginia, USA. 2007. pp. 97.
22. Z. Xuhong, S. Yu, Z. Tianhua, L. Yongjian, D. Jin. "Study on Shear Resistance of Cold-Formed Steel Stud Walls in Residential Structure. *Advances in Engineering Structures, Mechanics & Construction*". 2006. pp. 423-435.
23. R. Dannemann. *Manual de Ingeniería de Steel Framing*. 1ªed., Ed. Instituto Latinoamericano del Hierro y Acero. Santiago de Chile, Chile. 2005, pp.147.
24. Lusas FEA Software V14.1 , FEA Ltd. Surrey, United Kingdom. 2009.
25. ASTM. *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products - ASTM A370*. Ed. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, USA. 2008. pp. 48.
26. ASTM. *Standard Test Methods for Physical Testing of Gypsum Panel Products ASTM C473*, Ed. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, USA. 2007. pp. 16
27. ASTM. *Standard Test Methods for Sampling and Testing Non-Asbestos Fiber-Cement Flat Sheet, Roofing and Siding Shingles, and Clapboards – ASTM C1185*. Ed. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, USA. 2008. pp. 9
28. ASTM. *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading) – ASTM C293* . Ed. American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, USA. 2008. pp.4
29. J. De la Horra. *Estadística aplicada*. 3ª.ed. Ed. Ediciones Días de Santos. Madrid. España. 2003. pp 357.