



Caracterización experimental y teórica de paneles sometidos a fuerza lateral y ensamblados con unidades de mampostería hechas a base de papel reciclado y engrudo de almidón de Yuca.

Experimental and theoretical characterization of panels under lateral load and assembled with masonry units made of recycled paper and Yucca starch.

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Jose Chanchi Golondrino¹, Juan Gomez Diaz¹, Cristhian González Lozano¹

Historial del artículo:

¹Departamento de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia
jchanchigo@unal.edu.co, teléfono: +57 6 8879300

Recibido
25-10-2019
Aceptado
17-04-2020
Publicado
25-04-2020

Resumen

Este artículo describe el comportamiento a fuerza lateral y propone un modelo teórico para estimar la rigidez lateral de paneles en escala 1:1 ensamblados con unidades de mampostería hechas a base de papel reciclado, cubetas de cartón para el almacenamiento de huevos y almidón de Yuca. Tres paneles de 1.56m de alto, 0.47m de ancho y 0.090m de espesor fueron ensamblados utilizando las unidades de mampostería, refuerzo longitudinal y elementos de confinamiento metálicos. Los resultados muestran que el comportamiento de los paneles a fuerza lateral es dúctil dado que son capaces de asumir derivas hasta del 15% con daños bajos en las unidades de mampostería y en los elementos de confinamiento. Un modelo que predice la rigidez lateral del panel fue propuesto considerando la rigidez a corte del conjunto de unidades de mampostería. Los resultados también muestran que el modelo de rigidez sobreestima los desplazamientos laterales de los paneles hasta el 13%. Los paneles son propuestos como paneles divisorios – no estructurales para edificios debido a que son livianos, fáciles y rápidos de ensamblar, desmontables, podrían ser protegidos contra humedad o fuego y más importante, después de un evento sísmico significativo su daño es bajo, requiriendo el re-tensionamiento del refuerzo o el cambio de refuerzo, proceso que es rápido y limpio.

Palabras Clave:
Eco-material
Papel reciclado
Panel en papel reciclado
Paneles de bajo daño sísmico

Article history:

Received
25-10-2019
Accepted
17-04-2020
Available
25-04-2020

Abstract

This paper describes the behaviour under lateral load and propose a model to assess the lateral stiffness of panels in scale 1:1 assembled with masonry units made of recycled paper, cardboard buckets for eggs storage, and Yucca starch. Three panels of 1.56m in height, 0.47 in width, and 0,090m in thickness were assembled using the recycled paper masonry units, longitudinal reinforcement and metallic confinement elements. Results show that the panel behaviour under lateral load is ductile given that the panel can undergo drifts up to 15% with low damage on the masonry units or on the confinement elements. A model for predicting the lateral stiffness of the panel was proposed based on the shear stiffness of the set of the masonry units. Results also show that the stiffness model over estimates the panel lateral displacements up to 13%. The panels are proposed as non-structural partitions for buildings because they are light, easy and fast assembly, dismountable, they can be protected against humidity and fire; and more importantly, after a significant seismic event they undergo low damage, thus requiring reinforcement re-tensioning or reinforcement replacement, which is fast and clean.

Keywords:
Eco-material
Recycled paper
Recycled paper panel
Low seismic damage panels.

1. INTRODUCCION

La tendencia actual en desarrollo sostenible está basada en el uso eficiente de los recursos naturales y en la reutilización de los residuos valorizados entendidos como aquellos residuos que pueden ser reciclados (Cervantes et al., 2010). Una de las aplicaciones de esta tendencia se encuentra en la industria constructora, en donde el desarrollo de materiales alternativos hechos a base de materias primas recicladas ha venido tomando auge (Aperador et al., 2011). El desarrollo de materiales alternativos a base de residuos valorizados es importante debido a que disminuye el impacto ambiental reduciendo la cantidad de residuos con destino a los rellenos sanitarios y a la vez incentiva el desarrollo de sistemas constructivos más económicos que los sistemas tradicionales (Reyes & Cornejo, 2014; Caballero et al., 2013). Entre las aplicaciones más atractivas de materiales alternativos en la industria constructora está el desarrollo de paneles divisorios livianos y dúctiles, condiciones que favorecen el desempeño sísmico de los sistemas estructurales con este tipo de paneles en zonas activas sísmicamente (Aperador et al., 2011; Reyes & Cornejo, 2014; Chanchi et al., 2008a, 2008b).

Entre los residuos valorizados usados en el desarrollo de materiales alternativos para paneles divisorios por diferentes investigadores se encuentra el papel y el cartón (Cervantes et al., 2010; Aperador et al., 2011; Caballero et al., 2013; Cañola et al., 2012; Chanchi et al., 2008a, 2008b). Dos tipos de técnicas constructivas de paneles hechos a base de papel y cartón han sido explorados experimentalmente por diferentes autores. El primer tipo de técnica constructiva está basada en vaciar el cuerpo del panel con una mezcla de papel, cartón, agua y con la adición o la omisión de un ligante. El cuerpo del panel puede ser reforzado interior o exteriormente y es secado a temperatura ambiente. El segundo tipo de técnica constructiva está basada en prefabricar las unidades de mampostería con una mezcla de papel, cartón, agua y un ligante. Las unidades son secadas en un horno hasta obtener peso constante y el cuerpo del panel es conformado superponiendo las unidades de mampostería, a las cuales se les suministra un sistema de confinamiento que permite que las unidades de mampostería se comporten como un conjunto.

Entre las investigaciones experimentales desarrolladas en la primera técnica constructiva de paneles hechos a base de papel o cartón se pueden mencionar: i) fracciones de papel y cartón mezcladas con agua y posteriormente compactadas con la adición de elemento de concreto reforzados localizados en la parte exterior del cuerpo panel (Cervantes et al., 2010), ii) láminas de papel periódico adheridas en las caras exteriores de un núcleo de poliuretano (Aperador et al., 2011) y iii) papel licuado en agua y mezclado con cemento Portland blanco con la

adición de fibras de polipropileno como refuerzo (Cañola et al., 2012). Estas investigaciones demostraron que los paneles hechos a base de papel se caracterizan por bajas densidades, grandes resistencias a la flexión y adecuadas condiciones estéticas, cuando comparados con paneles hechos a base de materiales convencionales.

En la segunda técnica constructiva de paneles ensamblados con unidades prefabricadas de mampostería hechas a base de papel se puede mencionar una investigación experimental: i) paneles divisorios no estructurales con un sistema de confinamiento exterior, refuerzo longitudinal interior y conformados por unidades de mampostería hechas a base de papel periódico, cubetas de cartón para almacenar huevos y engrudo de almidón de yuca como ligante (Chanchi et al., 2008a, 2008b). Esta investigación demostró que el uso de unidades de mampostería prefabricadas a base de papel, cubetas de cartón para almacenar huevos y ligante, generaron paneles de baja densidad, de alta versatilidad constructiva, de alta ductilidad a carga vertical y alta adherencia entre unidades, cuando son comparados con paneles convencionales.

Considerando las ventajas que ofrecen las unidades prefabricadas de papel en el ensamblaje de paneles de la segunda técnica constructiva descrita anteriormente y teniendo en cuenta que a la fecha no se tiene referencia de investigación alguna que describa el comportamiento a carga lateral de este tipo de paneles; este artículo describe el comportamiento experimental de la fuerza lateral sobre paneles a escala real y propone un modelo que predice la rigidez lateral de este tipo paneles. Las siguientes preguntas son resueltas en este artículo:

- ¿Cuál es el comportamiento del panel cuando está sometido a fuerza lateral cuasi-estática unidireccional?
- ¿Cuál es el mecanismo de falla del panel cuando está sometido a fuerza lateral?
- ¿Cuáles son las posibles aplicaciones, ventajas y limitaciones de este panel?
- ¿Cuál es un modelo simple para predecir la rigidez lateral del panel?
- ¿Cuál es la efectividad del modelo teórico propuesto de la rigidez lateral del panel en la predicción de los desplazamientos laterales del panel?

2. Materiales.

2.1 Unidad de mampostería

La unidad de mampostería fue elaborada usando un material llenante y un material ligante. El material llenante fue constituido por papel periódico reciclado molido y cubetas de

cartón para almacenar huevos. El material ligante fue elaborado mezclando engrudo de almidón de yuca, vinagre y agua en proporciones en peso de 1:1:6.7, respectivamente. Esta mezcla fue calentada a una temperatura de 60°C durante 20 minutos. El aglomerado que constituyó la unidad de mampostería fue obtenido mezclando el papel periódico molido y el engrudo de almidón de yuca a temperatura ambiente durante 10 minutos y en proporciones en peso de 1:4.3, respectivamente. Este aglomerado se mezcló uniformemente durante 10 minutos hasta lograr una masa de consistencia media.

La unidad de mampostería se conformó usando una formaleta de paredes laterales de madera y con bases superior e inferior en moldes de aluminio. Estos moldes de aluminio presentaban

en una de sus caras la forma de las protuberancias y oquedades semiovoides de una cubeta para almacenar huevos (**Figura 1a**). La masa de papel periódico molido y engrudo de almidón de yuca fue vaciada sobre el molde inferior de la formaleta cubierto por una fracción de cubeta de cartón para almacenar huevos (**Figura 1b**). Sobre la masa vaciada se instaló el molde superior cubierto con una fracción de cubeta de cartón para almacenar huevos. La formaleta fue confinada horizontal y verticalmente con barras roscadas tensionadas con tuercas localizadas en ambos extremos de la barra e instaladas en la condición apriete ajustado (**Figura 1c**). La condición apriete ajustado es definida como la rotación máxima desarrollada en una tuerca, cuando esta es instalada por un hombre usando una llave estándar (Research Council on Structural Connections, 2004).

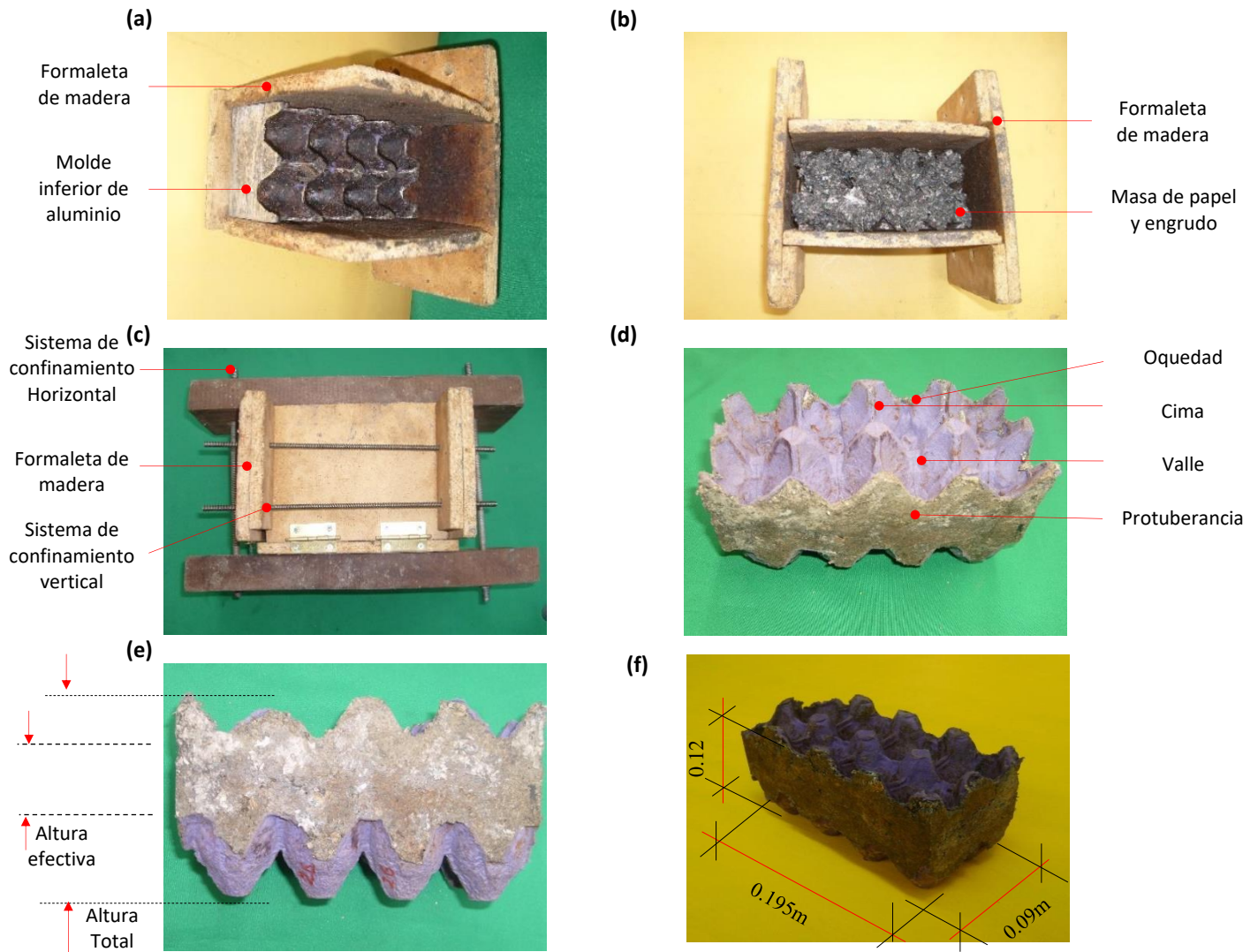


Figura 1. Unidad de mampostería y proceso de ensamblaje. (a) Formaleta de madera con molde inferior en aluminio. (b) Vaciado de la masa de papel periódico molido y engrudo de almidón de yuca. (c) Sistema de confinamiento de la formaleta. (d) Vista en planta de la unidad de mampostería. (e) Vista lateral de la unidad de mampostería y (f) Vista tridimensional de la unidad de mampostería

Este sistema formaleta-aglomerado fue secado en un horno eléctrico a una temperatura constante de 110°C durante 48 horas hasta lograr peso constante. En estado seco la unidad de mampostería cuenta con las siguientes dimensiones: 0.195m de longitud, 0.09m de ancho, 0.12m de altura total y 0.085m de altura efectiva (**Figuras 1d - f**).

2.2 Panel

Tres paneles fueron ensamblados. Cada panel presentó una forma prismática de base rectangular con dimensiones de 1.56m de altura, 0.47m de ancho y 0.095m de espesor. El cuerpo de cada panel fue constituido por 52.5 unidades de mampostería como las descritas en la **Sección 2.1** y dispuestas en 21 hiladas de 2.5 unidades. Las unidades de mampostería se instalaron sin ningún tipo de adhesivo encajando las protuberancias con las oquedades entre unidades consecutivas y con la ayuda de

refuerzo longitudinal. En esta disposición las unidades formaron juntas verticales discontinuas y juntas horizontales continuas (**Figura 2a**).

El cuerpo de cada panel fue delimitado en su parte superior e inferior por elementos prismáticos de confinamiento en aluminio. El elemento inferior de confinamiento contaba en una de sus caras con oquedades semiovoides y el elemento superior con protuberancias semiovoides para permitir el acople de las unidades de mampostería (**Figura 2c**). El refuerzo longitudinal fue constituido por 6 barras roscadas de diámetro 1/4 de pulgada de resistencia a la fluencia de 500 MPa y dispuestas verticalmente (**Figura 2b**). La densidad total del panel incluyendo unidades de mampostería, refuerzo longitudinal y elementos de confinamiento correspondió a 806Kg/m³.

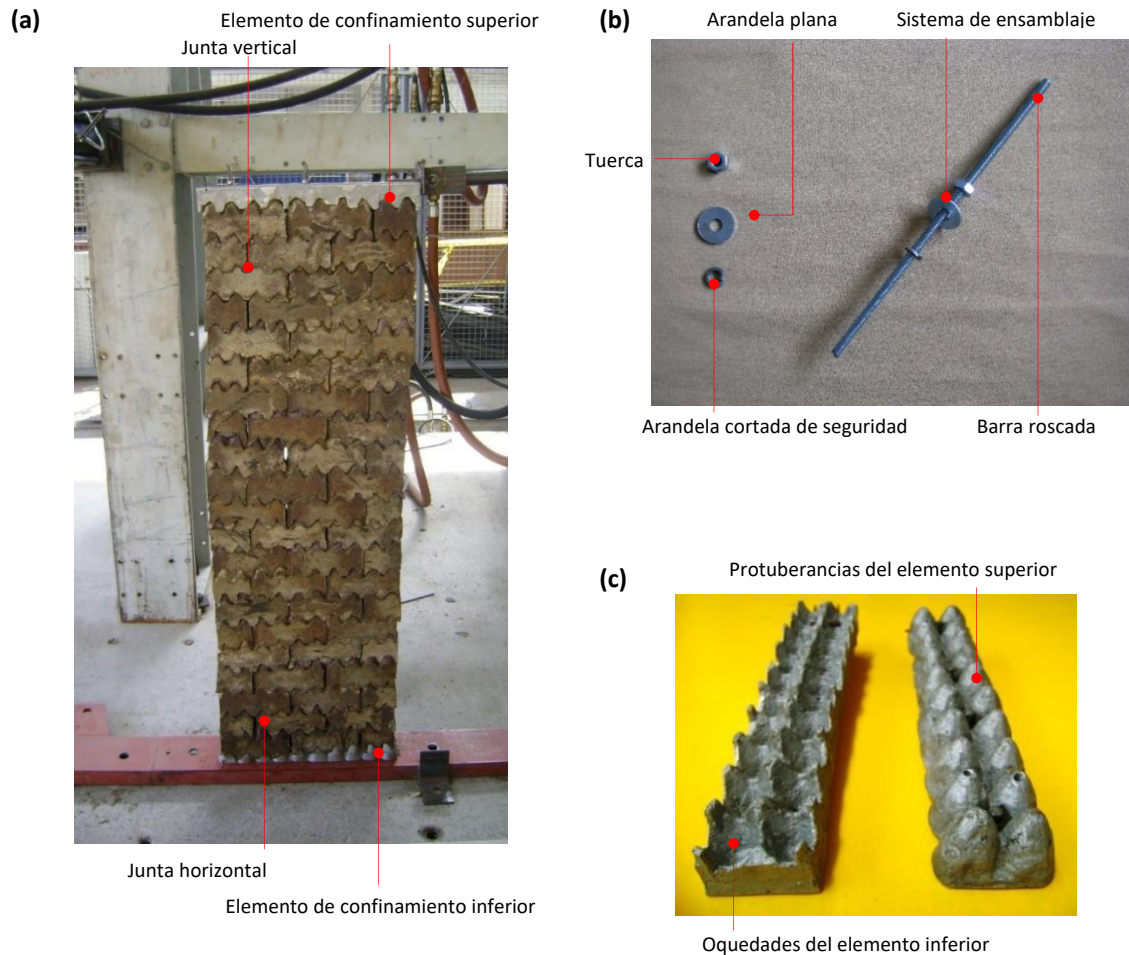


Figura 2. Detalle y componentes del panel. (a) Vista frontal del panel, (b) Refuerzo longitudinal y (c) Elementos de confinamiento.

3. Métodos

3.1 Ensamblaje del panel

Cada panel se ensambló sobre una viga metálica de sección canal. El elemento de confinamiento inferior se apernó al alma de la viga metálica usando cuatro pernos A325 de diámetro 3/8" y longitud 30mm (**Figura 3a, b**).

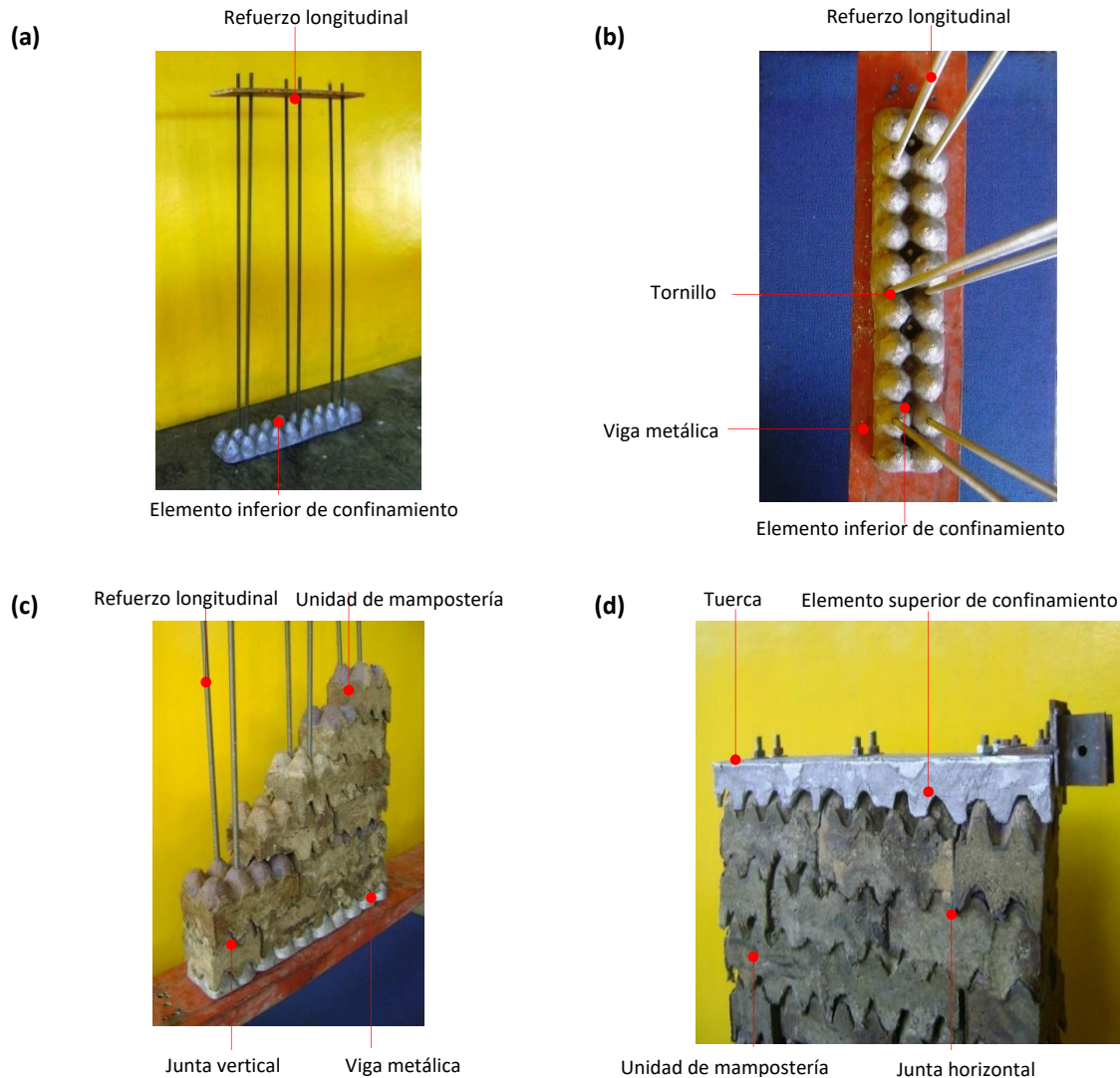


Figura 3 Etapas del proceso de ensamblaje del panel. **(a)** Elemento inferior de confinamiento. **(b)** Instalación de refuerzo longitudinal. **(c)** Instalación de unidades de mampostería y **(d)** Instalación elemento superior de confinamiento.

Las 6 barras roscadas que constituyeron el refuerzo longitudinal se instalaron perforando el elemento de confinamiento inferior y el alma de la viga metálica. Tuercas y arandelas fueron suministradas en el extremo de las barras roscadas que atravesó

el alma de la viga metálica (**Figura 3b**). Las unidades de mampostería se instalaron por filas insertando el refuerzo longitudinal en perforaciones que atravesaron la totalidad del espesor de las unidades. En cada fila las unidades de

mampostería fueron dispuestas consecutivamente y garantizando que las juntas verticales fueran discontinuas (**Figura 3c**). La instalación de filas consecutivas verticalmente se realizó haciendo coincidir las protuberancias semiovoides de las unidades de mampostería de la fila inferior con las oquedades semiovoides de las unidades de mampostería de la fila inmediatamente superior. Este sistema de ensamblaje generó una traba mecánica horizontal entre unidades de mampostería. Ningún tipo de ligante fue utilizado en las juntas verticales u horizontales (**Figura 3c**). Sobre la fila superior del panel se localizó el elemento de confinamiento previamente perforado, de tal manera que las 6 barras roscadas atravesaran el espesor del elemento de confinamiento. Las 6 barras roscadas fueron tensionadas usando tuercas (**Figura 3d**). Estas tuercas fueron instaladas en la condición de apriete ajustado (Research Council on Structural Connections, 2004) definida en la **Sección 2.1**.

3.2 Ensayo a carga lateral cuasi-estática del panel

El panel fue dispuesto para el ensayo apernando la viga metálica canal en la base del panel a una losa de reacción usando pernos de 1" de diámetro y 150mm de longitud (**Figura 4a**). La parte superior del panel fue alojada en una viga canal de madera que restringió los desplazamientos en el sentido perpendicular al plano del panel (**Figura 4 a-c**). El elemento de confinamiento en la parte superior del panel se conectó a un actuador mediante una barra de transmisión equipada con una rótula en cada extremo. Una de las rótulas se acopló al elemento de confinamiento y la otra rótula al extremo libre del pistón del actuador. Estas dos rótulas permitieron las rotaciones del panel en su propio plano (**Figuras 4a, c**).

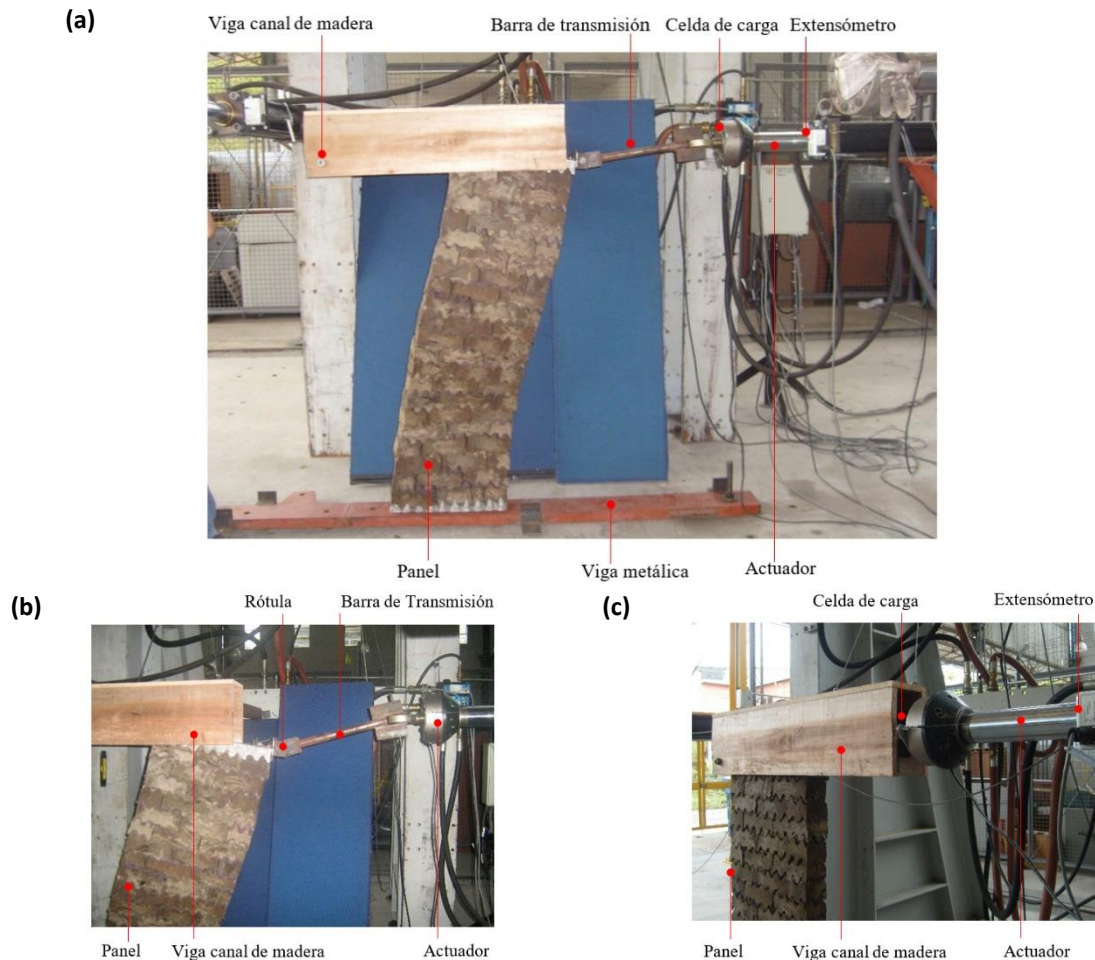


Figura 4. Montaje del ensayo del panel. (a) Vista frontal del montaje del ensayo del panel. (b) Unión rótula panel-actuador y (c) Actuador, celda de carga y extensómetro.

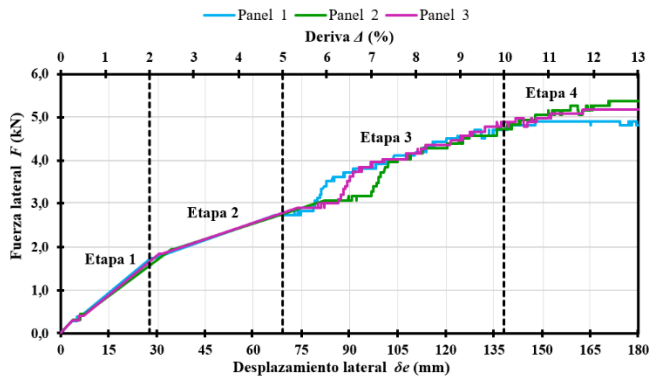
El actuador fue conectado a un marco de reacción y fue equipado en el extremo libre del pistón con una celda de carga y en la botella que contiene al pistón con un extensómetro (**Figura 4a, c**). Cada panel fue sometido a una fuerza lateral unidireccional cuasi-estática aplicada a una velocidad de 5mm/s y que varió desde una carga nula hasta la carga que falló el panel. El desplazamiento lateral del panel fue medido en el elemento de confinamiento superior con la ayuda del extensómetro.

4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y ANÁLISIS

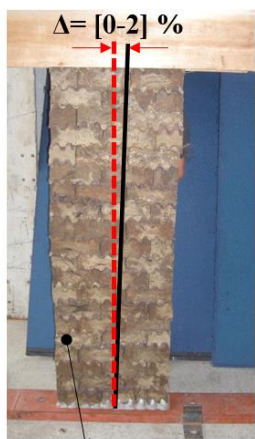
4.1 Comportamiento a fuerza lateral del panel

El comportamiento a fuerza lateral de los paneles se caracteriza por cuatro etapas con tendencia casi lineal (**Figura 5a**).

(a)

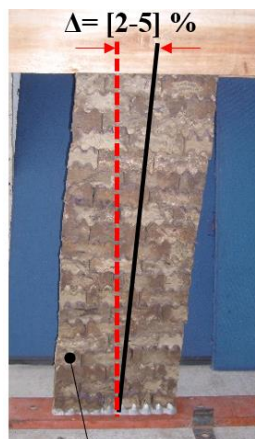


(b)



Ausencia de desplazamiento lateral relativo entre unidades de mampostería

(c)



Desplazamiento relativo entre las unidades de mampostería

(d)



Endurecimiento por deformación debido a fuerzas de contacto

(e)



Fluencia del refuerzo longitudinal en la base del panel

Figura 5. Comportamiento a fuerza lateral del panel. (a) Curva experimental fuerza lateral contra desplazamiento lateral de los paneles

En la etapa inicial, los paneles exhibieron derivas hasta del 2%. Incrementos en la fuerza lateral generaron bajos desplazamientos laterales y bajas rotaciones en el plano de los paneles. Estos desplazamientos y rotaciones son bajos cuando son comparados con los valores máximos registrados en el estado de falla del panel. Ni cambios en la forma de los paneles, ni desplazamientos laterales relativos entre las unidades de mampostería fueron observados (**Figura 5b**). Este comportamiento es debido a que los paneles desarrollaron su rigidez lateral máxima (**Figura 5a**). Después de que los paneles alcanzaron una deriva del 2%, los muros fueron descargados y se observó que los desplazamientos laterales y las rotaciones en el plano de los paneles retornaron a un valor nulo. Este comportamiento indica que en esta etapa inicial y hasta derivas del 2% el panel se comporta elásticamente. En la segunda etapa, los paneles exhibieron derivas entre el 2% y el 5%. Pequeños incrementos de fuerza lateral incrementaron moderadamente los desplazamientos laterales y las rotaciones en el propio plano de los paneles debido a que los paneles desarrollaron su rigidez lateral mínima (**Figura 5a**). La reducción en la rigidez lateral de los paneles se debió a desplazamientos laterales relativos que ocurrieron en las juntas verticales cuando las unidades de mampostería se desplazaron cerrando aquellos espacios que quedaron abiertos desde el ensamblaje de los paneles o se generaron durante las rotaciones de los paneles (**Figura 5c**).

En la tercera etapa, los paneles exhibieron derivas entre el 5% y el 10% con una rigidez lateral superior a la rigidez exhibida de la segunda etapa y ligeramente inferior a la rigidez exhibida en la primera etapa (**Figura 5a**). Las rotaciones de los paneles en su

propio plano se incrementaron significativamente y la forma de los paneles cambió considerablemente (**Figura 5d**). Este incremento en la rigidez lateral de los paneles se debió a un endurecimiento por deformación que sufrió cada una de las filas cuando fuerzas de aplastamiento entre unidades de mampostería contiguas se desarrollaron evitando que las unidades de mampostería se desplacen relativamente y aumentando la capacidad de absorción de fuerza lateral de los paneles. En la cuarta etapa, para derivas superiores al 10% los paneles exhibieron grandes desplazamientos con incrementos muy pequeños de fuerza (**Figura 5a**). Este comportamiento es debido a la fluencia del refuerzo longitudinal en la base de los paneles debido a esfuerzos de tracción inducidos por el momento generado por la fuerza lateral. Como resultado de la fluencia del refuerzo longitudinal, en esta cuarta etapa y para derivas superiores al 12%, los paneles también exhibieron desplazamientos y rotaciones fuera del plano de los paneles (**Figura 5d, e**).

4.2 Descripción del mecanismo de falla

El mecanismo de falla de los paneles es el producto de las acciones internas de momento y corte resultantes de la aplicación de la fuerza lateral. La acción del momento generó esfuerzos de tracción y compresión a lo largo del cuerpo de los paneles (**Figura 6a**). Mientras los esfuerzos de tracción generaron separaciones verticales entre las unidades de mampostería los esfuerzos de compresión generaron aplastamientos verticales entre unidades de mampostería. Ambos esfuerzos de tracción y compresión generaron la fluencia del refuerzo longitudinal en la base de los paneles. La máximas separaciones y aplastamientos verticales se presentaron en la base del panel y estas fueron reduciendo desde la base al extremo libre de los paneles (**Figura 6a**). Como resultado de la fluencia del refuerzo longitudinal en la base de los paneles, del lado de tracción, la separación vertical entre las unidades de mampostería fue significativa (**Figura 6c**) y en el lado de compresión, las unidades de mampostería se desplazaron fuera del plano de los paneles (**Figura 6b, d**).

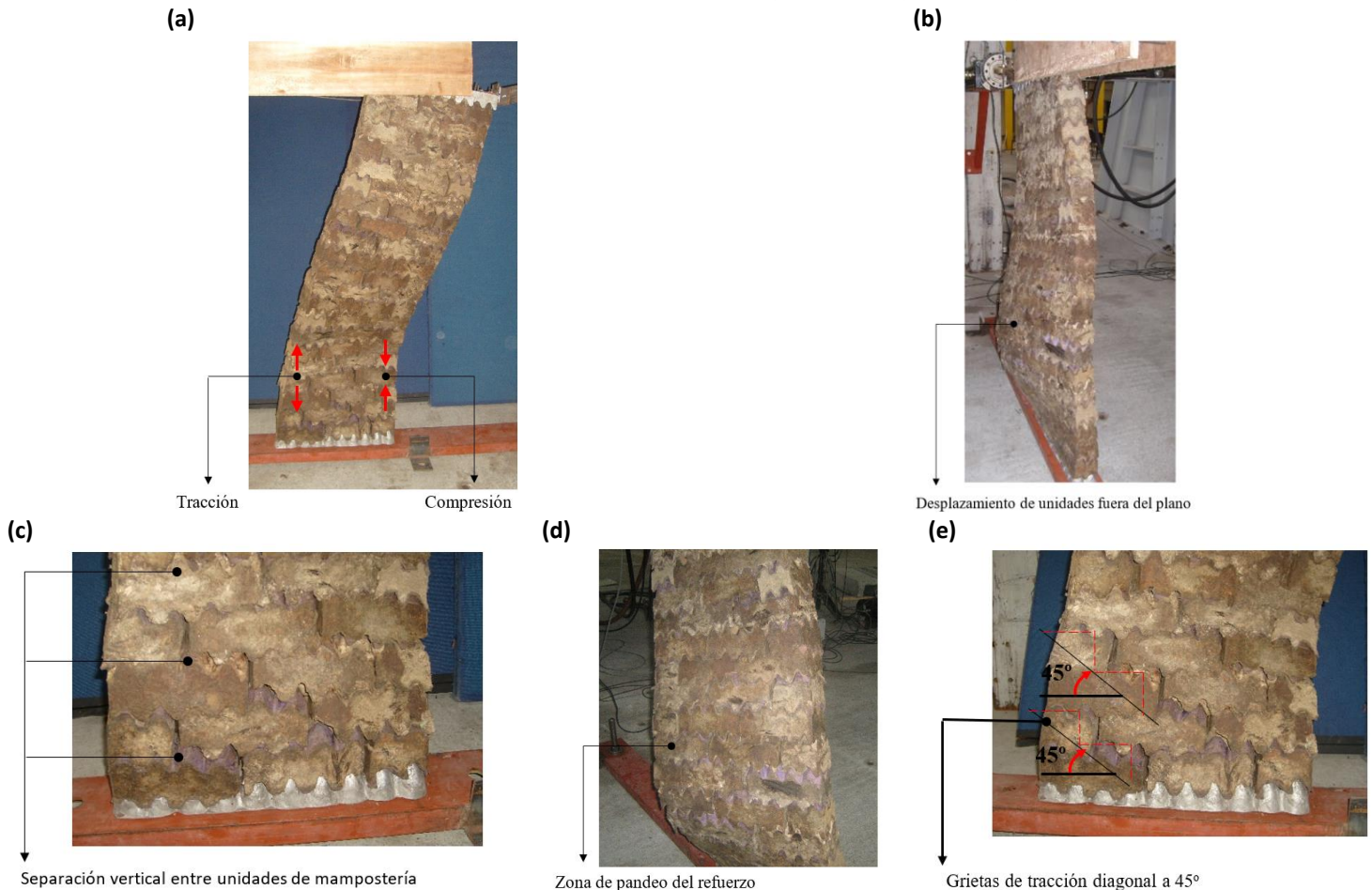


Figura 6. Descripción del mecanismo de falla del panel. (a) Vista frontal del panel en el estado de falla. (b) Vista lateral del panel en el estado de falla. (c) Separación de unidades de mampostería. (d) Desplazamientos fuera del plano de las unidades de mampostería y (e) Grietas debidas a tracciones diagonales



La acción del corte generó grietas escalonadas en el tercio inferior de la altura de los paneles. Estas grietas escalonadas unieron fracciones de juntas horizontales con juntas verticales y la longitud total de estas grietas disminuyó desde la base de los paneles al tercio de la altura de los paneles (**Figura 6a**). Las grietas escalonadas son debidas a las tracciones diagonales orientadas a 45° del eje axial de los paneles, las cuales son inducidas por la acción del corte en el cuerpo de los paneles. La **Figura 6e** muestra que las grietas escalonadas no atravesaron el ancho total de los paneles y que la separación vertical entre unidades de mampostería generada por estas grietas disminuye desde el lado de tracción al lado de compresión de los paneles. Esta variación en la separación vertical entre unidades de mampostería generada por las grietas escalonadas es debida a que mientras los esfuerzos de tracción abren las grietas, los esfuerzos de compresión las cierran. Después de la falla de los paneles se observó que las unidades de mampostería y los elementos de confinamiento no sufrieron daños que alteraran su geometría. En el caso del refuerzo longitudinal, deformaciones plásticas debidas a la fluencia a tracción y a compresión fueron observadas.

4.3 Aplicaciones, ventajas y limitaciones del panel.

El panel propuesto en esta investigación puede usarse como panel no estructural acoplable a marcos de concreto, marcos de acero, muros de mampostería convencional, los cuales constituyan sistemas estructurales en edificaciones ubicadas en zonas activas sísmicamente. En estas aplicaciones propuestas, el panel debe instalarse de tal manera que solo actúe como divisorio, en donde las cargas axiales transmitidas por el panel sean bajas o limitadas a su peso propio. Esta propuesta de aplicación está basada en las siguientes razones:

- Para derivas entre 1 - 2%, las cuales son usadas por códigos internacionales como límite en el diseño sísmico de edificaciones, el panel no sufrió daño alguno en ninguno de sus componentes y exhibió su rigidez lateral máxima, como se estableció en la Sección 4.2. Éste resultado indica que el desempeño sísmico del panel será más que satisfactorio cuando el sistema estructural al que esté acoplado alcance su condición de diseño sísmico.
- Ensayos a compresión axial de muretes conformados por unidades de mampostería similares a las usadas en esta investigación demostraron que en la condición de carga última, los muretes exhibieron gran deformabilidad axial con daño considerable en las unidades de mampostería (Chanchi et al., 2008-l). Este resultado indica que el desempeño a carga axial del panel no es satisfactorio, por tal razón la carga axial sobre el panel debe ser baja o limitada a su peso propio.

Entre las ventajas del panel propuesto se puede mencionar:

- La densidad del panel propuesto es 806 Kg/m³, la cual es aproximadamente el 40% de la densidad de muros convencionales con unidades de mampostería de arcilla o concreto. Esta baja densidad constituye al panel propuesto como un sistema constructivo liviano, ideal para reducir la carga muerta y la carga sísmica de edificaciones.
- El panel propuesto es desmontable, fácil de transportar y su proceso constructivo es rápido y limpio cuando comparado con el proceso constructivo de muros convencionales con unidades de mampostería de arcilla o concreto. Estas características constituyen al panel como un sistema constructivo versátil, ideal para reducir tiempos de construcción de edificaciones.
- Las superficies del panel pueden ser fácilmente pulidas, pintadas, taladradas o recubiertas. Estas características dan libertad en los acabados del panel contribuyendo a la estética de las edificaciones.
- Considerando que para derivas de hasta el 10% el comportamiento fuerza – desplazamiento lateral del panel es casi lineal sin daño alguno en sus componentes; se puede establecer que después de un evento sísmico alto, sólo el re-tensionamiento del refuerzo longitudinal del panel es requerido. Considerando también que para derivas entre el 10% y el 15% el panel solo registró fluencia en el refuerzo longitudinal; se puede establecer que para un evento sísmico severo, sólo el reemplazo del refuerzo longitud es requerido, proceso que es rápido y limpio. Estas características del panel lo constituyen como un sistema constructivo de bajo daño bajo, el cual podría disminuir el tiempo de disrupción de edificaciones después de un evento sísmico alto o severo.

Entre las limitaciones del panel propuesto se puede mencionar:

- El panel propuesto puede ser afectado por humedad o por fuego, condiciones que afectan la integridad de las unidades de mampostería. Debido a que la fecha estudios experimentales acerca del efecto de la humedad y el fuego sobre el panel no se han efectuado, se propone el uso del panel en ambientes interiores donde el efecto de estas condiciones sea reducido.

5. Modelo propuesto de la rigidez lateral del Panel.

5.1 Propiedades mecánicas del panel

El módulo de corte del panel, G , fue considerado como la propiedad mecánica básica en el modelo de la rigidez lateral del panel. Este módulo se obtuvo a partir de las curvas esfuerzo a corte - deformación angular reportadas por Chanchi et al. (2008a) (**Figura 7b**) y obtenidas a partir de ensayos de tensión diagonal sobre muretes conformados por unidades de mampostería iguales a las usadas en esta investigación (**Figura 7a**). Los muretes ensayados por Chanchi et al. (2008a) fueron prismáticos de dimensiones de 0.48m de altura, 0.48m de longitud y 0.09m de espesor y fueron ensamblados con la misma metodología usada en esta investigación (**Figura 7a**).

Debido a que las curvas esfuerzo a corte-deformación angular de los muretes ensayados por Chanchi et al. (2008a) fueron no lineales (**Figura 7b**); en la presente investigación un modelo tri-lineal fue propuesto sobre estas curvas con el fin de discretizar la variación del módulo a corte (**Figura 7b**). El modelo tri-lineal propuesto siguió una tendencia que envolvió el límite superior de las curvas esfuerzo-deformación de los muretes ensayados (**Figura 7b**). Los valores de los rangos de esfuerzo cortante, los módulos de corte y las ecuaciones de esfuerzo cortante contra deformación angular que describen el modelo tri-lineal propuesto se presentan en la **Tabla 1**.

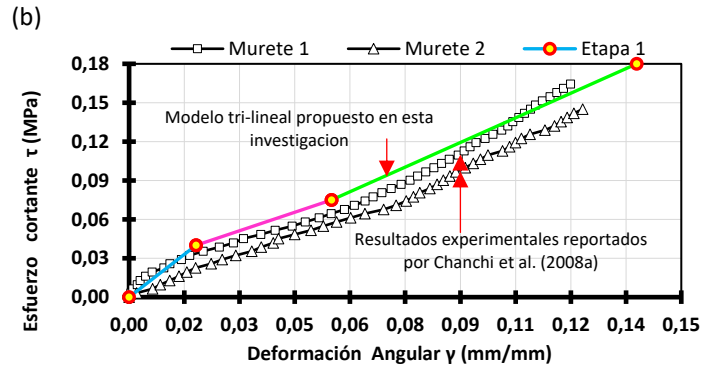
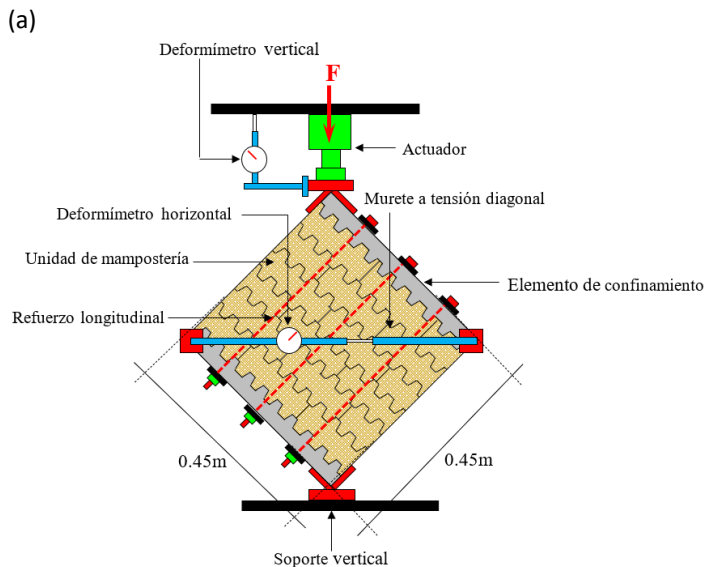


Figura 7. Ensayo de tensión diagonal, curvas esfuerzo a corte - deformación angular de muretes reportadas por Chanchi et al. (2008a) y modelo tri-lineal propuesto en la presente investigación para la curva esfuerzo a corte - deformación angular de muretes. **(a)** Ensayo de tensión diagonal sobre muretes reportados por Chanchi et al. (2008a). **(b)** Curvas esfuerzo a corte - deformación angular de muretes reportadas por Chanchi et al. (2008a) y modelo tri-lineal propuesto en la presente investigación para la curva esfuerzo a corte - deformación angular de muretes

La **Tabla 1** muestra que para el modelo de rigidez del panel, el módulo de corte G puede ser considerado entre 0.95MPa - 2.20MPa cuando el esfuerzo cortante varía entre 0.0MPa y 0.17MPa.

Tabla 1. Descripción del modelo tri-lineal de esfuerzo cortante versus deformación angular.

Etapa	Rango de esfuerzos cortantes (τ) [Mpa]	Módulo de corte (G) [Mpa]	Ecuación de esfuerzo cortante* [Mpa]
Inicial	0.00 - 0.04	2.20	$\tau_1 = (2.20 \times \gamma_1)$
Intermedia	0.04 - 0.08	0.95	$\tau_2 = (0.95 \times \gamma_2) + 0.0227$
Final	0.08 - 0.17	1.50	$\tau_3 = (1.50 \times \gamma_3) - 0.0075$

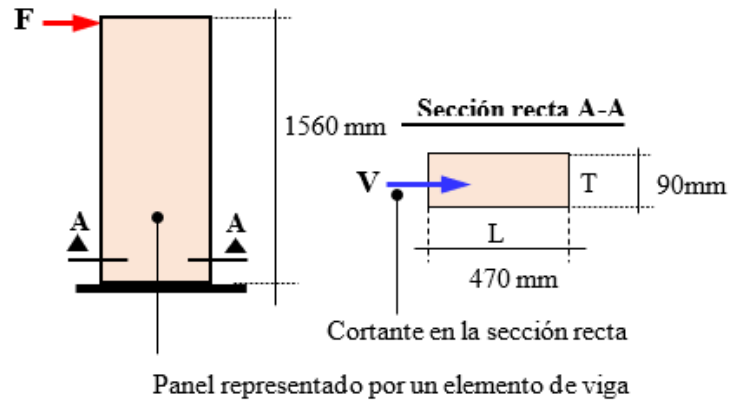
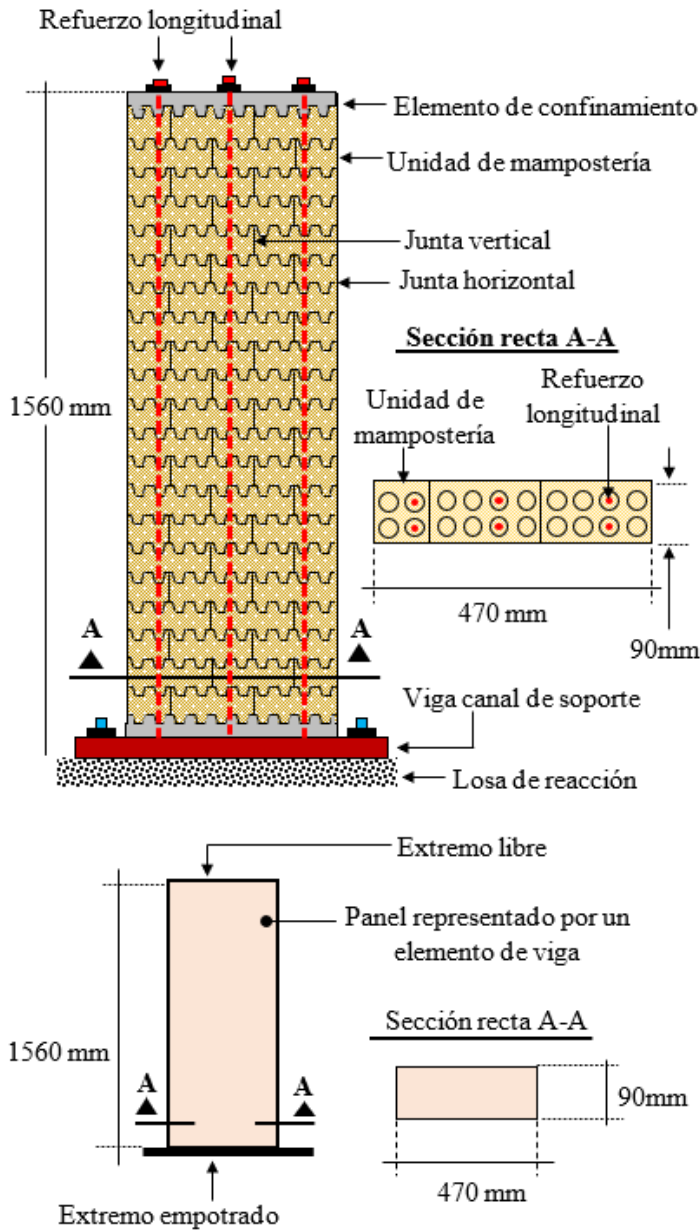
* τ_i : Esfuerzo cortante en MPa, γ_i : Deformación angular en mm/mm

5.2 Modelo propuesto de la rigidez lateral del panel

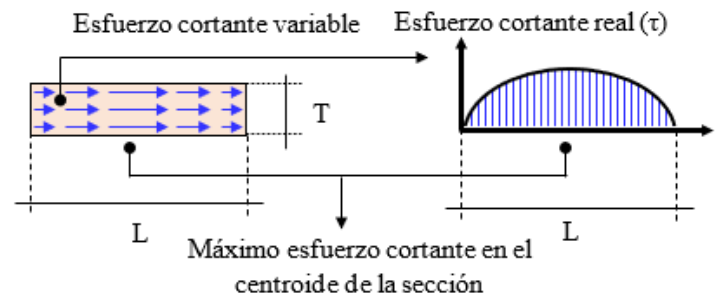
El modelo de rigidez lateral del panel se basó en considerar el cuerpo del panel como un solo elemento, en el cual se despreció el aporte de rigidez lateral de los elementos de confinamiento y el aporte de rigidez del refuerzo longitudinal debido a que estos componentes no se encuentran adheridos totalmente a las unidades de mampostería (**Figura 8a**). La compresión inicial inducida por el sistema de confinamiento durante el proceso de ensamblaje también se despreció en el modelo de rigidez lateral del panel, debido a que el refuerzo longitudinal no fue tensionado hasta su carga de prueba produciendo de esta manera esfuerzos compresivos muy bajos en la sección recta del panel.

El elemento que representó al panel se caracterizó por una altura de 1560mm y por una sección recta con dimensiones de 470mm de ancho por 90mm de espesor y un área de corte 42300mm^2 (Figura 8a). Las condiciones de soporte del panel fueron consideradas como empotrado en la base y libre en el

extremo superior (Figura 8a). El panel fue idealizado como un elemento planar de viga en voladizo con capacidad de tomar esfuerzos de corte, esfuerzos de momento y sin capacidad para tomar esfuerzos axiales (Figura 8b)



Distribución real de esfuerzo cortante en sección recta A-A



Distribución teórica de esfuerzo cortante en sección recta A-A

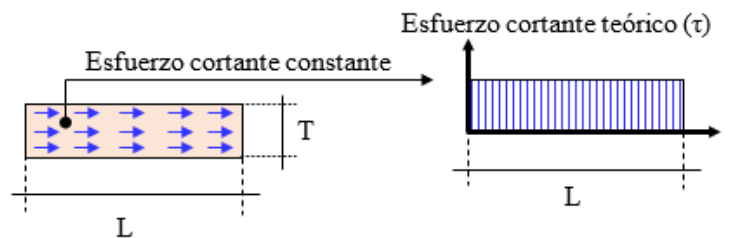


Figura 8. Concepción básica del modelo del panel

La rigidez del elemento planar de viga que representó el panel, K , fue evaluada considerando únicamente la rigidez a corte del panel, K_s . Esta aproximación se basa en que mientras el corte inducido por la fuerza lateral es asumido por toda la sección recta del panel, el momento inducido por la fuerza lateral es asumido por una fuerza de tensión actuante sobre el refuerzo longitudinal en el extremo a tensión del panel y por dos fuerzas de compresión, una actuante sobre una fracción pequeña de la sección recta y la otra sobre el refuerzo longitudinal, ambas fuerzas ubicados en el extremo a compresión del panel. Esta distribución de fuerzas de tensión y compresión es debida a que el refuerzo no está adherido a las unidades de mampostería y a las grietas de tracción diagonal generadas sobre el panel y descritas en la **Sección 4.2**. Estas dos condiciones impiden que la totalidad del área de la sección recta del panel pueda asumir el momento inducido por la fuerza lateral sobre el panel. Basados en estos mecanismos de distribución de fuerza cortante y momento y considerando que el refuerzo longitudinal fue ignorado en la evaluación de la rigidez de panel, se puede establecer que mientras la rigidez a corte se debe evaluar considerando la totalidad de la sección recta del panel, la rigidez a momento se debe evaluar considerando únicamente la pequeña fracción de la sección recta sometida a compresión, condición que reduce significativamente la rigidez a momento respecto a la rigidez a corte del panel.

La rigidez a corte se evaluó en función del área de la sección recta del panel, A , el módulo de corte del conjunto de unidades de mampostería G , y la altura del panel, H . (**Ecuación 1**). La fuerza lateral se consideró distribuida en cada sección del panel a través de un esfuerzo cortante uniformemente distribuido y constante, τ . Este esfuerzo cortante se evaluó como el cociente entre la fuerza cortante actuante en cada sección del panel, V , y el área de la sección recta del panel, A , (**Ecuación 2**). La distribución de esfuerzo cortante uniformemente distribuido y constante es una aproximación debido a que el esfuerzo

cortante varía en el ancho de la sección recta del panel y presenta el máximo valor en los puntos localizados al nivel del centroide de la sección recta (**Figura 8b**). El desplazamiento lateral del panel, δ , se evaluó como el cociente entre la fuerza cortante actuante en cada sección del panel, V , y la rigidez a corte del panel, K_s (**Ecuación 3**).

$$K_s = \frac{A \times G}{H} \quad (1)$$

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{V}{K_s} \quad (3)$$

5.3 Predicción de la rigidez lateral del panel con el modelo propuesto

La rigidez lateral del panel se obtuvo incrementando la fuerza lateral en los siguientes siete niveles de fuerza lateral (**Tabla 2**): 0.8kN, 1.6kN, 2.1kN, 2.6kN, 3.5kN, 4.0kN y 4.9kN. El último nivel de fuerza de 4.9kN correspondió a un valor muy cercano al máximo reportado experimentalmente para el panel (**Figura 9a**). En la **Tabla 2**, para cada nivel de la fuerza, el esfuerzo cortante, τ , la rigidez del panel, K_s , y el desplazamiento lateral del panel, δ , fueron calculadas usando las **Ecuaciones 1 -3**. El cortante V para cada nivel de fuerza correspondió al nivel de fuerza debido a que el muro se representó como un elemento planar de viga en voladizo. La rigidez del panel K_s para cada nivel de fuerza se calculó seleccionando el módulo de corte, G , apropiado de acuerdo al modelo tri-lineal de esfuerzo cortante contra deformación angular propuesto y presentado en la **Tabla 1**. Un resumen de los resultados del análisis incremental de fuerza lateral del panel descrito anteriormente se muestra en la **Tabla 2**.

Tabla 2. Resumen de resultados del análisis incremental de fuerza lateral del panel

Número de Nivel de fuerza lateral del panel	Fuerza lateral del panel	Cortante del panel	Esfuerzo cortante del panel	Etapa en el modelo tri-lineal propuesto *	Módulo de corte del panel	Rigidez a corte del panel	Desplazamiento lateral del panel
#	F kN	V kN	τ MPa		G MPa	K_s kN/mm	δ mm
1	0.8	0.8	0.0189	Inicial	2.20	0.0596	13.410
2	1.6	1.6	0.0378	Inicial	2.20	0.0596	26.821
3	2.1	2.1	0.0436	Intermedia	0.95	0.0257	46.231
4	2.6	2.6	0.0615	Intermedia	0.95	0.0257	65.642
5	3.5	3.5	0.0827	Final	1.50	0.0406	87.769
6	4.0	4.0	0.0946	Final	1.50	0.0406	100.062
7	4.9	4.9	0.1158	Final	1.50	0.0406	122.190

* Clasificación del esfuerzo cortante τ de acuerdo al modelo tri-lineal de esfuerzo cortante versus deformación angular definido en la **Tabla 1**.

5.4 Comparación de la predicción de rigidez lateral del panel con resultados experimentales

La **Figura 9a** compara los resultados del modelo de rigidez lateral presentados en la Tabla 2 con las curvas experimentales fuerza lateral contra desplazamiento lateral de los tres paneles ensayados. La **Figura 9a** muestra que el modelo de rigidez propuesto se ajusta bien a los resultados experimentales. Este

resultado indica que la curva fuerza lateral contra desplazamiento lateral de los paneles se puede describir teóricamente usando una rigidez lateral a corte variable y que las rigideces máxima, intermedia y mínima de los paneles se pueden evaluar con la expresión de la rigidez de corte definida en la **Ecuación 1** usando módulos de corte de 2.20MPa, 0.95MPa, 1.50MPa, respectivamente.

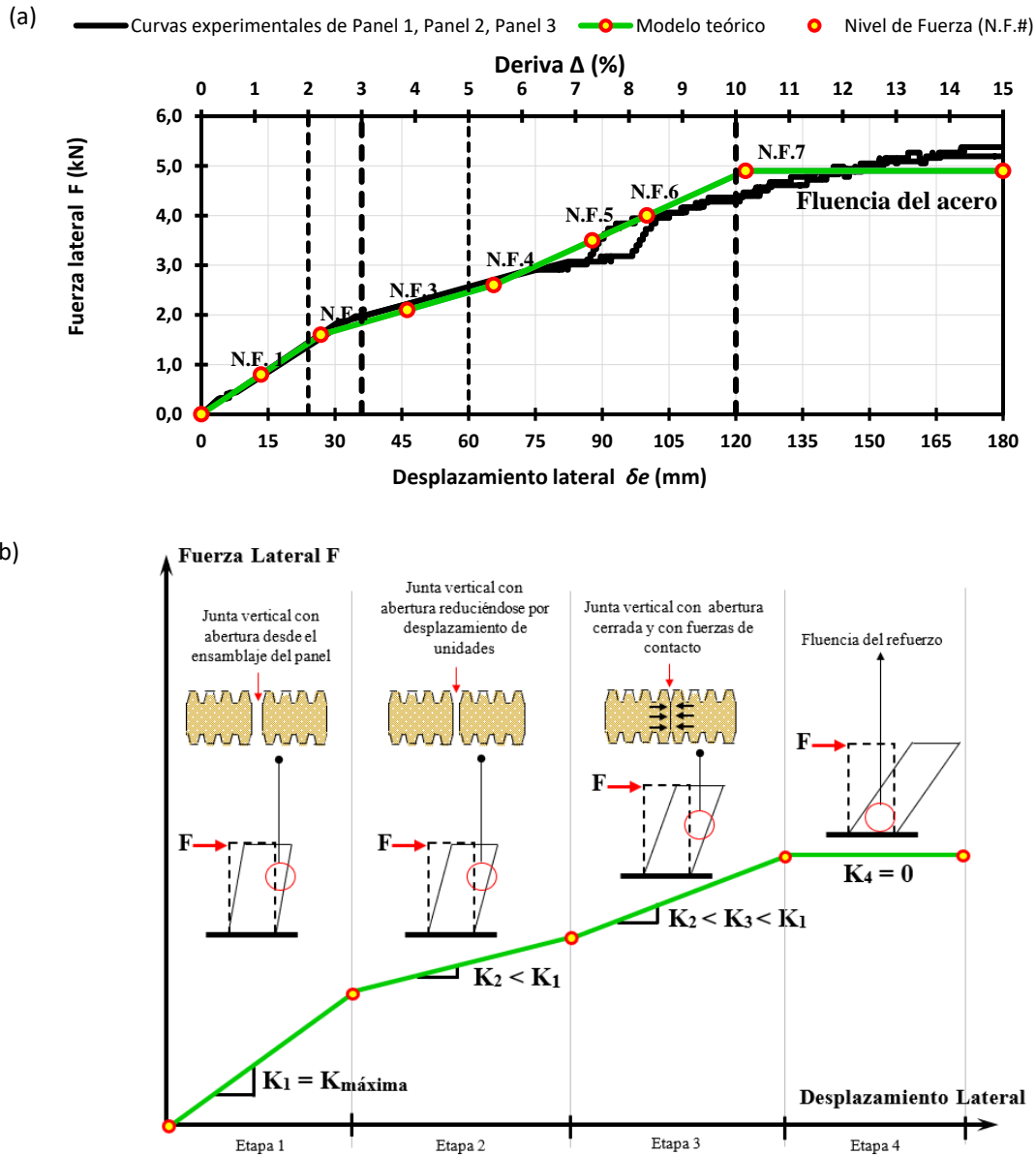


Figura 9 Curva experimental fuerza lateral contra desplazamiento lateral y modelo de la rigidez lateral del panel. (a) Curva experimental y modelo fuerza lateral contra desplazamiento lateral del panel (b) Modelo de rigidez lateral de panel

La **Figura 9a** muestra que la rigidez a corte de los paneles varía con la deriva del panel. La variación de la rigidez a corte de los paneles se puede describir en cuatro etapas (**Figura 9b**). La primera etapa ocurrió para derivas del panel de hasta 2%, donde la rigidez del panel fue la máxima debido a que el grupo de unidades de mampostería exhibieron su máximo módulo de corte como consecuencia de la ausencia de desplazamiento relativo entre unidades de mampostería (**Figura 9a, b**). La segunda etapa ocurrió para derivas del panel del 2% - 5%, donde el panel redujo la rigidez a corte debido a que el grupo de unidades de mampostería exhibieron su mínimo módulo de corte como resultado del desplazamiento de las unidades de mampostería para cerrar las juntas verticales que quedaron abiertas desde el ensamblaje del panel (**Figura 9a, b**). La tercera etapa ocurrió para derivas del panel del 5% - 10%, donde el panel incrementó la rigidez a corte por debajo de la observada en la primera etapa. Este incremento en la rigidez a corte del panel se debió al incremento del módulo de corte del conjunto de unidades de mampostería, el cual ocurrió como resultado de las fuerzas de contacto desarrolladas entre unidades de mampostería después de que las juntas verticales que quedaron abiertas en el proceso de ensamblaje se cerraron en la segunda etapa (**Figura 9a, b**). La cuarta etapa ocurrió para derivas del panel de 10 - 15%, donde la rigidez a corte del panel fue casi nula debido a la fluencia del refuerzo longitudinal en la base del panel.

5.5 Efectividad del modelo teórico de la rigidez lateral del panel

La efectividad del modelo teórico en la predicción de la rigidez lateral experimental de los paneles, E , se calculó usando la **Ecuación 4**. En esta ecuación, la efectividad E se expresó en porcentaje y se calculó como el cociente entre el desplazamiento lateral de los paneles calculado con el modelo teórico, δ , usando la **Ecuación 3** y el desplazamiento lateral experimental de los paneles leído desde la **Figura 9a**, δ_e .

$$E = \left[\frac{\delta}{\delta_e} \right] \times 100 \quad (4)$$

La **Figura 10** muestra la efectividad del modelo teórico E en la predicción de la rigidez lateral experimental de los tres paneles ensayados. Para cada uno de los paneles, la efectividad se calculó con la **Ecuación 4** en cada uno de los siete niveles de fuerza de 0.8kN, 1.6kN, 2.1kN, 2.6kN, 3.5kN, 4.0kN y 4.9kN, los cuales fueron definidos en la **Sección 5.2**.

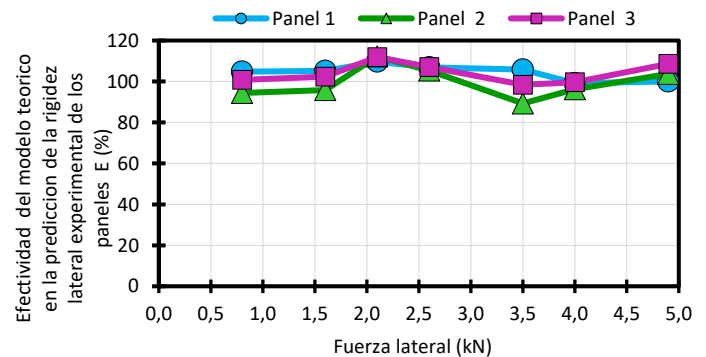


Figura 10. Efectividad E del modelo teórico en la predicción de la rigidez lateral experimental de los paneles.

La **Figura 10** muestra que la efectividad E del modelo teórico en la predicción de la rigidez lateral experimental de los tres paneles varió entre el 89% y el 113%. Estos resultados indican que el modelo teórico propuesto predice con buena aproximación la rigidez lateral de los paneles y que sobreestima los desplazamientos laterales de los paneles hasta 13%. Esta inconsistencia es debida a las aproximaciones realizadas en el modelo tri-lineal que predice el módulo de corte del conjunto de las unidades de mampostería y a la no inclusión del aporte de la rigidez a momento en la evaluación de la rigidez lateral del panel. Estas dos aproximaciones generaron rigideces laterales teóricas inferiores a las rigideces laterales experimentales de los paneles.

6. Conclusiones.

Este artículo describe el comportamiento a fuerza lateral de paneles ensamblados con unidades de mampostería hechas a base de papel reciclado, cubetas de cartón para el almacenamiento de huevos y almidón de Yuca, se demostró que:

- El comportamiento fuerza-desplazamiento lateral del panel es dúctil y se caracterizó por cuatro etapas cuasi-lineales. En la primera etapa para derivas de hasta 2%, el panel desarrolló su máxima rigidez lateral. En la segunda etapa para derivas 2% - 5%, la rigidez del panel redujo debido a desplazamientos horizontales relativos entre unidades de mampostería. En la tercera etapa para derivas entre el 5% - 10%, la rigidez del panel se incrementó por debajo de la rigidez inicial debido al desarrollo de fuerzas de aplastamiento en las juntas verticales del panel. En la cuarta etapa para derivas entre el 10% - 15%, la rigidez lateral del panel fue casi nula debido a la fluencia del refuerzo longitudinal en la base del panel.
- El mecanismo de falla de los paneles es producido por la



acción combinada del corte y momento inducidos por la fuerza lateral. El momento produjo la fluencia del refuerzo longitudinal en la base del panel, separaciones y aplastamientos entre unidades de mampostería que disminuyeron desde la base al extremo libre del panel. El corte produjo grietas escalonadas en el tercio inferior cerca a la base de los paneles. En el estado de falla los paneles lograron derivas de hasta el 15% acompañadas de desplazamientos fuera del plano en la base del panel con daños bajos en las unidades de mampostería y en los elementos de confinamiento.

- El panel puede usarse como panel no estructural o divisorio sometido cargas axiales bajas. El panel puede ser acoplable a marcos de concreto, marcos de acero, o muros de mampostería convencional, los cuales constituyan sistemas estructurales en edificaciones ubicadas en zonas activas sísmicamente. El panel se caracteriza por ser liviano, fácil y rápido de ensamblar, desmontable, y podría ser protegido contra humedad o fuego. El panel se considera un sistema estructural de bajo daño debido a que después de un evento sísmico alto en donde las derivas del panel llegaran hasta el 10%, sólo el re-tensionamiento del refuerzo longitudinal es requerido y para eventos sísmicos severos, en donde las derivas del panel varíen entre y el 10% y 15%, el cambio del refuerzo es requerido, proceso que es rápido y limpio.
- La rigidez lateral del panel puede predecirse considerando el panel como un elemento de viga en voladizo con rigidez equivalente a la rigidez a corte del panel e ignorando la rigidez a momento del panel. Esta aproximación es posible debido a que la rigidez a corte es generada por la totalidad de la sección recta del panel, mientras que la rigidez a momento es generada por una fracción pequeña de la sección recta ubicada en la zona del panel sometida a compresión y resultante de la distribución del momento sobre la sección recta del panel cuando la no adherencia del refuerzo longitudinal y las grietas de tensión diagonal generadas sobre el panel son consideradas. En este modelo, la variabilidad de la rigidez lateral del panel se representó a través de la variabilidad del módulo de corte descrita a través de un modelo tri-lineal en el rango de esfuerzos cortantes de 0.0MPa – 0.17MPa.
- El modelo teórico propuesto de la rigidez lateral del panel predijo los desplazamientos laterales de los paneles con una efectividad del 89 % - 113%. Discrepancias entre el modelo propuesto y los resultados experimentales se atribuyeron a aproximaciones en la estimación del módulo de corte del conjunto de las unidades de mampostería y a la no inclusión de la contribución de la rigidez a momento en la evaluación

de la rigidez lateral del panel.

7. Agradecimientos.

Los autores desean expresar su agradecimiento a los Ingenieros Civiles egresados de la Universidad Nacional de Colombia-Sede Manizales: José Nicolás Ruiz Noreña, María Angélica Muñoz Hidalgo, Adriana Cubides Cruz y Cristian Mutis Ortega, quienes contribuyeron activamente en el desarrollo experimental de esta investigación.

8. Referencias.

- [1] Cervantes, L., Valdés, E., González, E. (2010). Una Construcción Elaborada con Muros de Papel y Cartón Comprimidos más otros Residuos Valorizables. *Acta universitaria*, Vol. 2, No 2.
- [2] Aperador, W., Bautista, J., Peña, G. (2011). Paneles en láminas de papel periódico reciclado polimetilmetacrilato con núcleo de poliuretano: un modelo de la implementación de la ingeniería estructural. *El hombre y la máquina*, No 37.
- [3] Reyes, D. y Cornejo, Y. (2014). Alternativas constructivas y Fuentes energéticas con materiales reciclables. *Departamento de Ingeniería Civil - Universidad Católica*. Bogotá - Colombia.
- [4] Caballero, J., Álvarez, R., Juárez, L. (2013). Procedimiento constructivo de panel tipo sándwich para vivienda con materiales no convencionales. *XII Congreso Latinoamericano de Patología de la Construcción y XIV Congreso de Control de Calidad en la Construcción CONPAT-Colombia*.
- [5] Cañola, H., Echavarría, C., Sánchez, J. (2012). Recipanel: paneles de papel reciclado. *Dyna*, vol. 79, No. 171, pp. 132-137.
- [6] Chanchí, J., Bonilla, D., Gaviria, J., Giraldo, J. (2008a). Ensayos a Compresión y Tensión Diagonal Sobre Muretes Hechos a Base de Papel Periódico Reciclado y Engrudo de Almidón de Yuca. *Scientific Electronic Library Online (SCIELO)*. *Revista Ingeniería de Construcción*, Vol. 23, No 3, pp. 145-154.
- [7] Chanchí, J., Bonilla, D., Gaviria, J., Giraldo, J. (2008b). Caracterización Mecánica a Compresión y Tensión Diagonal de Muretes Conformados por Unidades de Mampostería Hechas con Papel Periódico Reciclado y Engrudo de Almidón de Yuca. *12th International Conference on Project Engineering*, Zaragoza -España, pp. 349-360.
- [8] Research Council on Structural Connections (2004). Specifications for Structural Joints Using ASTM A325 or A490 Bolts. American Institute of Steel Construction, Inc. Chicago – United States of America.