

Evaluación de la rigidez axial de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero para su utilización estructural

Axial stiffness analysis of high-density polyurethane foam sandwich panel specimens with external sheet in steel for structural use

JAIRO URIBE ESCAMILLA

Ingeniero civil, M.Sc., Ph.D. Profesor titular y director del Grupo de Investigación de Estructuras y Materiales (Gimeci) de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
jairo.uribe@escuelaing.edu.co.

Recibido: 10/01/2012 Aceptado: 12/02/2012
Disponible en <http://www.escuelaing.edu.co/revista.htm>

Resumen

Se presentan los resultados de ensayos a carga axial de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero con el fin de determinar sus propiedades mecánicas. En un segundo artículo se mostrarán los resultados de ensayos a flexión de esos paneles. Dichas propiedades son necesarias para efectuar un análisis por elementos finitos de un modelo de viviendas para atender emergencias, como parte del proceso de homologación del diseño ante la Comisión Permanente del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10.

Palabras claves: paneles sándwich, propiedades mecánicas, vivienda de emergencia.

Abstract

This article details the test results for rigid polyurethane foam sandwich panel specimens with external sheet in steel which were subjected to axial loads. In a second article, the results of flexural testing on such panels will be presented. The purpose was to determine their mechanical properties in order to carry out a finite element analysis on an emergency shelter design. This is part of the process of obtaining approval for the design from the Standing Commission on the Colombian Standards for Earthquake Resistant Constructions, NSR-10.

Keywords: sandwich panels, mechanical properties, emergency shelter.

ANTECEDENTES

Los paneles conformados por láminas metálicas externas, adheridas a un núcleo de poliuretano de alta densidad, se utilizan ampliamente en muchos países como revestimiento de las paredes exteriores, como tejas o muros aislantes en divisiones internas. En general, dichos paneles se fijan mediante tornillos a un sistema estructural de miembros de concreto, acero o madera.

En años recientes se han efectuado diversas investigaciones en varias universidades del país para determinar las propiedades de los paneles producidos por Metecno de Colombia (refs. 1 a 3).

En abril de 2009, Metecno de Colombia solicitó al Grupo de Investigación de Estructuras y Materiales (Gimeci), de la Escuela Colombiana de Ingeniería, realizar un estudio sobre la factibilidad de construir viviendas para la atención de emergencias con sus paneles Monowall y Techmet, y elementos de unión en lámina delgada diferentes de los sistemas estructurales tradicionales. Como este sistema constituye un régimen de excepción al no estar incluido en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10 (ref. 4), es necesario hacer los estudios pertinentes para solicitar su homologación ante la Comisión Permanente creada por la Ley 400 de 1997.

JUSTIFICACIÓN

De la información suministrada por Metecno de Colombia y de la búsqueda bibliográfica efectuada por los investigadores del proyecto, se concluyó que los paneles objetos de este estudio no se han utilizado en otros países como sistema estructural autónomo, por lo cual no se encontraron normas que gobernarán su diseño para este uso y que pudieran emplearse como base para la homologación.

Existen sí normas relacionadas fundamentalmente con su utilización como elementos de cerramiento y aislamiento, tales como la norma española (ref. 5), donde se prescriben ensayos que tienen que ver principalmente con su durabilidad y eficiencia en el uso respectivo.

PROGRAMACIÓN

Estudio de las viviendas propuestas

Después de un análisis cuidadoso y de considerar el tipo de uniones propuestas entre cubierta y muros, se optó

por estudiar las viviendas mostradas en las figuras 1 a 3, que reciben los nombres de Opción A con Monowall y Opción A con Metwall. Sus áreas son 36,48 y 38,00 m², respectivamente.



Figura 1

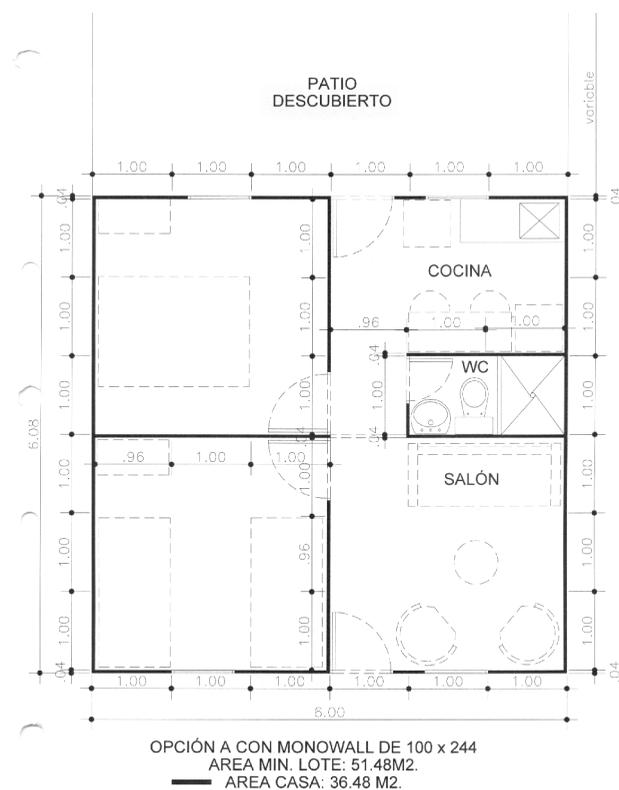


Figura 2

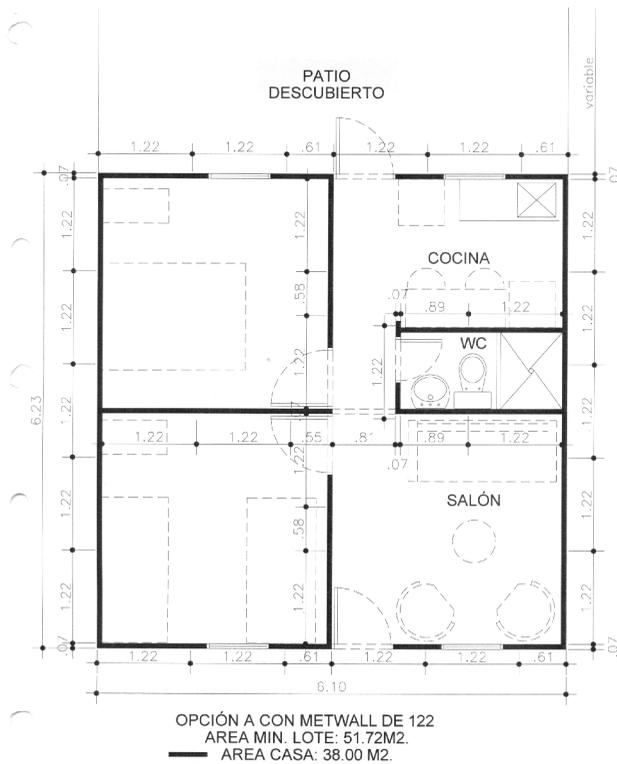


Figura 3

Cargas y fuerzas que actúan sobre las viviendas

Las cargas y fuerzas que actuarán sobre las viviendas propuestas son de seis clases, pero para efectos de este estudio interesan fundamentalmente las cuatro primeras:

- Cargas gravitacionales: muerta y viva
- Fuerzas sísmicas
- Fuerzas eólicas
- Carga de granizo
- Efectos de temperatura
- Efectos de flujo plástico

Por tratarse de un país tropical y para la clase de uso que se les va a dar, se considera que la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior no será importante; por otra parte, el tipo de uniones propuestas permite que las edificaciones se acomoden fácilmente a las dilataciones o contracciones térmicas, por lo cual no se tomará en cuenta este efecto en el análisis de esfuerzos. Tampoco se considerará el efecto del flujo plástico del material de relleno.

En cuanto a las otras cargas, se utilizarán los valores prescritos en el título B del reglamento NSR-10 (ref. 4).

Solicitaciones producidas por las cargas y fuerzas aplicadas

Las cargas y fuerzas aplicadas producen diferentes solicitaciones sobre: 1) los paneles; 2) los tornillos de sujeción, y 3) los elementos de unión. En el estudio se considerará primero el efecto sobre los paneles.

Solicitaciones sobre los paneles

Según sea la localización del panel sobre el cual actúan, se producirán las solicitaciones indicadas a continuación:

- Cargas gravitacionales muerta y viva:* producen flexiones en los paneles de cubierta y compresión axial sobre los paneles de muro, tanto exteriores como interiores.
- Fuerzas sísmicas:* producen solicitaciones axiales horizontales en cada partícula de los paneles, tanto de cubierta como de cerramiento o división interna. A diferencia de los sistemas tradicionales, no puede suponerse que en un alto porcentaje actúa sobre la cubierta. Se considera que la cubierta debe actuar como un diafragma rígido para transmitir las fuerzas acumuladas a los muros, los que a su vez actúan como colectores que transmiten las fuerzas de corte generadas a la cimentación.
- Fuerzas eólicas:* producen presión o succión sobre los paneles de cubierta y de los muros exteriores. Si las ventanas y puertas están cerradas, que sería lo común con los vientos de diseño, no habría ni presión ni succión sobre los paneles interiores. Las presiones y succiones sobre la cubierta producen fuerzas axiales de compresión o tensión, así como empujes laterales sobre los muros de soporte. Las resultantes de estas fuerzas producen corte en los muros, que debe transmitirse a la cimentación y tensiones o compresiones sobre los tornillos que unen los paneles a las soleras de piso.
- Carga de granizo:* es una carga gravitacional que produce los mismos efectos señalados en el punto a).

Metodologías de análisis

Por las características del sistema propuesto y por tratarse de un material compuesto, heterogéneo y anisotrópico, se decidió emplear dos metodologías aproximadas para el análisis, a saber: 1) por elementos finitos y 2) planteamiento interactivo. En este trabajo se presentan los estudios previos para poder aplicar el primero de ellos.

Análisis por elementos finitos

Se utilizará el programa SAP 2000, versión 14.2.0 (ref. 6), suponiendo que el material tiene propiedades ortotrópicas y que los paneles están unidos con conectores simples cada cierto intervalo.

La determinación de las propiedades ortogonales de los paneles Monowall se hizo ensayando probetas pequeñas, sometidas a las siguientes sollicitaciones:

- a) Compresión simple
- b) Flexión

Tanto en el sentido de las nervaduras como en el sentido perpendicular a ellas.

A partir de dichos ensayos se evaluaron tanto la rigidez axial como las rigideces a flexión y a corte, según se describe más adelante.

Se utilizaron los valores característicos establecidos en la norma española UNE-EN 14509 (ref. 5), así:

“Para cada población de resultados de los ensayos, se debe determinar el valor medio y el 5% del valor de rotura, asumiendo un límite de confianza del 75%, según la norma internacional ISO 12491”.

El 5% del valor fractil debe usarse como el valor característico y determinado según la ecuación (A.33):

$$x_p = e^{(\bar{y} - k\sigma_y)} \tag{A.33}$$

en donde:

- x_p es el 5% del valor fractil de la población x ;
- $y = L_n(x)$.
- \bar{y} es el valor medio de y (A.34).
- k es el factor de rotura dado en la tabla A.4.
- σ_y es la desviación estándar de y .

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_n(x_i) \tag{A.34}$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (L_n(x_i) - \bar{y})^2} \tag{A.35}$$

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Para poder analizar por el método de los elementos finitos el sistema de construcción prefabricada con paneles sándwich de láminas de acero y poliuretano, fue necesario determinar experimentalmente las propiedades del material compuesto mediante ensayos de compresión y de flexión en sentido paralelo y perpendicular a las nervaduras, con probetas estándar Monowall de 40 mm de espesor y Techmet de 25 mm. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos con probetas de paneles Monowall sometidas a compresión axial, con la carga aplicada tanto en el sentido de las nervaduras como perpendicularmente a ellas.

Ensayos a compresión de probetas pequeñas

Para los ensayos a compresión se siguieron los procedimientos contenidos en la norma ASTM C 364-07: “Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions” (ref. 7). Se emplearon especímenes de 250 mm de ancho por 300 mm de altura y se denominaron con los nombres genéricos CA y CB para compresión paralela y perpendicular a la nervadura, respectivamente.

Tabla A.4
Valor de rotura k , suponiendo un nivel de confianza del 75%

Número de probetas (n)	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	30	60	100
	3,15	2,68	2,46	2,34	2,25	2,19	2,14	2,10	1,99	1,93	1,87	1,80	1,76

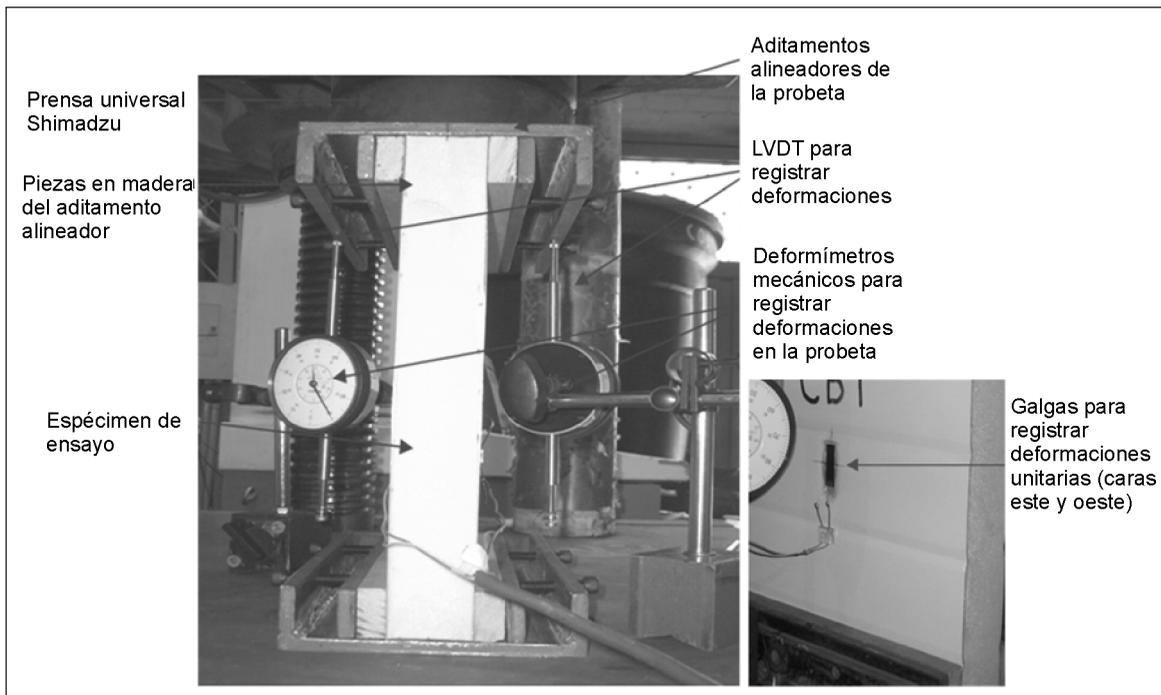


Figura 4 Instrumentación de probetas ensayadas a compresión.

Para la instrumentación de las muestras se utilizaron dispositivos electrónicos y mecánicos (figura 4). La carga se aplicó a una velocidad constante con una máquina universal Shimadzu, con capacidad de 1000 kN. Se trabajó en la escala de 50 kN. Para aplicar en forma adecuada la carga se emplearon dispositivos alineadores en los extremos de la probeta. Los alineadores permitían modificar por medio de tornillos la verticalidad de la probeta y mediante un procedimiento de tanteos se reducía la diferencia de deformaciones unitarias en las caras este y oeste a un valor aceptable.

Con la información obtenida se graficaron curvas *Carga vs. deformación* y a partir de ellas las de *Esfuerzo vs. deformación unitaria*. Se emplearon los valores promedio de las deformaciones en las caras este y oeste; por lo tanto, en todas las gráficas se tiene el valor promedio en las abscisas.

Ensayos a compresión con la carga paralela a las nervaduras

A continuación se presentan las primeras de dichas curvas obtenidas para las probetas CA, ajustadas a ceros (figura 5).

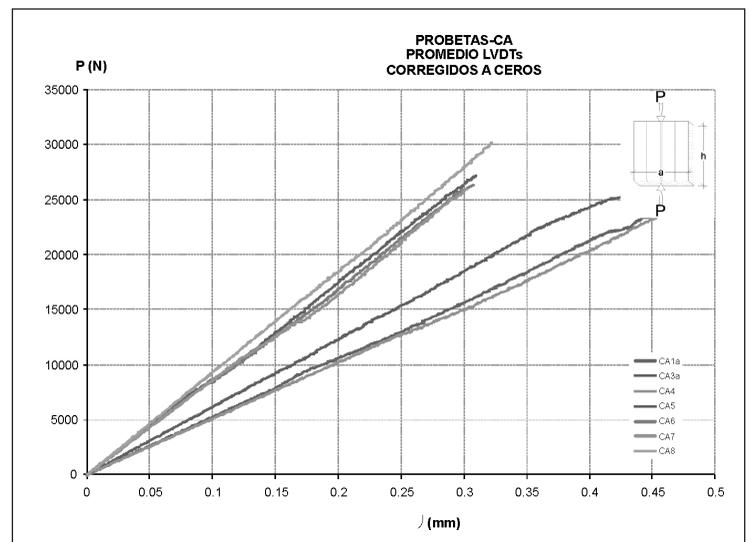


Figura 5 Curvas *Carga vs. deformación* corregidas de las probetas CA.

Cuando el espécimen falla, se presenta el desprendimiento de la lámina de acero en la zona central o en el tercio superior (figura 6).



Figura 6 Fallas típicas en las probetas CA.

Empleando las curvas *Carga vs. deformación* corregidas se calcularon la rigidez del elemento, K_A , y la carga máxima por unidad de ancho, $P_{Am\acute{a}x}/a$. Con las curvas de *Esfuerzo vs. deformación unitaria* se calcularon el esfuerzo máximo, $\sigma_{Am\acute{a}x}$, y el módulo de elasticidad, E_A .

Las probetas ensayadas en compresión paralela a la nervadura provenían de dos lotes de producción. Teniendo en cuenta lo anterior, se realizaron análisis estadísticos para estimar la variación de los resultados y determinar cómo influía este hecho en los valores obtenidos. Los resultados para las muestras de los lotes 1 y 2, considerados en conjunto, se presentan a continuación (tabla 1). El mismo análisis, pero tomando en cuenta únicamente las probetas del lote 1, se muestra a renglón seguido (tabla 2).

Comparando las dos tablas se nota que al considerar sólo las probetas del lote 1 se reduce significativamente

la dispersión en la mayoría de los casos. Además, estas probetas tienen un comportamiento más homogéneo en las gráficas de respuesta, por lo que se decidió utilizar sólo estos valores para calcular los valores característicos con los cuales se efectuarían los cálculos del sistema estructural.

Para determinar dichos valores característicos se procedió, como se señaló antes, de acuerdo con la norma EN 14509/06, ref. 5. Los resultados se muestran más adelante (tabla 3).

Ensayos a compresión con la carga perpendicular a las nervaduras

Para los ensayos en compresión perpendicular a la nervadura, probetas CB, se emplearon la misma instrumentación, el mismo sistema de aplicación de carga y los mismos procedimientos usados para las probetas CA.

Con los primeros resultados alcanzados se encontró que las deformaciones unitarias registradas con las galgas tenían un comportamiento errático y, en consecuencia, no serían útiles para el objeto del presente estudio. Probablemente esto se debe a la influencia de las nervaduras, que en esta orientación actúan como un pliegue y no como un rigidizador; por lo tanto, no se registró dicha información ni se dibujaron las correspondientes curvas *Esfuerzo vs. deformación unitaria*.

Tabla 1
Análisis estadístico de resultados de todas las probetas CA

Valores estadísticos	$P_{Am\acute{a}x}$ (kN)	$\sigma_{Am\acute{a}x}$ (MPa)	$P_{Am\acute{a}x}/a$ (kN/m)	K_A (kN/mm)	E_A (MPa)
Promedios	22,1	2,21	88,3	74,5	3567
Desviación estándar	4,66	0,47	18,6	18,5	391
Coefficiente de variación	21,1%	21,1%	21,1%	24,8%	11,0%

Tabla 2
Análisis estadístico de resultados de las probetas CA del lote 1

Valores estadísticos	$P_{Am\acute{a}x}$ (kN)	$\sigma_{Am\acute{a}x}$ (MPa)	$P_{Am\acute{a}x}/a$ (kN/m)	K_A (kN/mm)	E_A (MPa)
Promedios	23,4	2,34	93,6	81,4	3421
Desviación estándar	3,70	0,37	14,8	17,1	97,4
Coefficiente de variación	15,8%	15,8%	15,8%	21,1%	2,8%

Tabla 3
Valores característicos probetas CA, compresión paralela a las nervaduras

Probetas	n	k	$P_{Am\acute{a}x_p}/a$ (kN/m)	K_{A_p} (kN/mm)	E_{A_p} (MPa)
CA4 a CA8	5	2,46	63,0	43,1	3189

Con los transductores lineales, *LVDTs*, y el registro de la máquina universal Shimadzu se obtuvieron las curvas *Carga vs. deformación* que se presentan a continuación (figura 7). Se observa que estas curvas tienen una tendencia bien definida y resultados homogéneos.

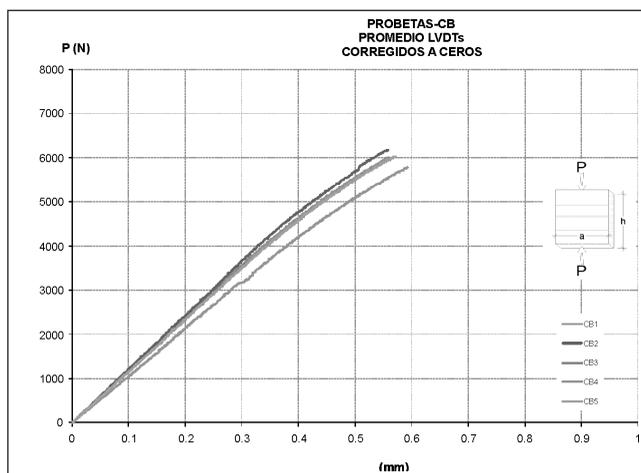


Figura 7 Curvas Carga vs. deformación corregidas, probetas CB.

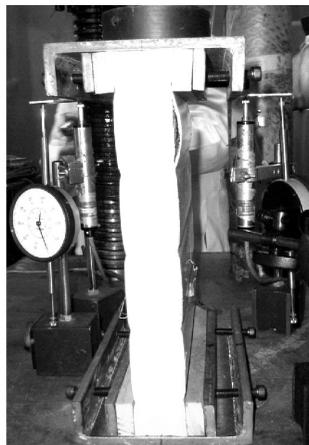
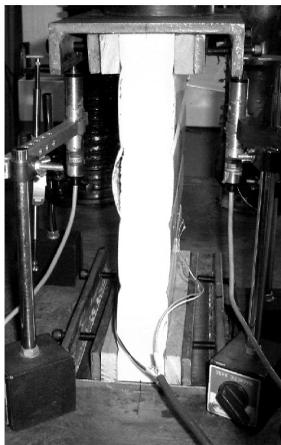


Figura 8 Fallas típicas de las probetas CB.

En la figura anterior se ilustran las fallas típicas de las probetas CB (figura 8).

Como se ve en dicha figura, para compresión perpendicular a las nervaduras se encontró que el poliuretano se desprendía de las láminas de acero entre dos nervaduras en los tercios superior y central de las probetas.

El análisis estadístico de los resultados obtenidos para las probetas CB se presenta posteriormente (tabla 4).

Para el cálculo de los valores característicos se emplearon todos los resultados obtenidos y se procedió de acuerdo con la norma ISO 12491. Los valores característicos para compresión perpendicular a las nervaduras se presentan más adelante (tabla 5).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El análisis de los resultados conduce a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

1. Los paneles sándwich de espuma de poliuretano y revestimiento metálico se idearon fundamentalmente para servir como divisiones o cerramientos, con el fin de aislar un recinto dado. Se ha demostrado con el uso durante muchos años que ese papel lo desempeñan satisfactoriamente.
2. Dichos paneles, por su naturaleza, tienen una resistencia intrínseca para soportar diversas clases de solicitaciones. Con el objeto de analizar su comportamiento ante las cargas previstas para una vivienda, es necesario conocer sus propiedades mecánicas con un nivel de confianza adecuado que las normas han especificado como el fractil del 5%, con un nivel de confianza del 75%.

Tabla 4
Análisis estadístico de resultados de las probetas CB

Valores estadísticos	$P_{B_{máx}}$ (kN)	$\sigma_{B_{máx}}$ (MPa)	$P_{B_{máx}}/a$ (kN/m)	K_B (kN/mm)	E_B (MPa)
Promedios	7,78	0,78	31,1	11,5	345
Desviación estándar	0,36	0,036	1,45	0,60	17,9
Coefficiente de variación	4,65%	4,65%	4,65%	5,18%	5,18%

Tabla 5
Valores característicos probetas CB, compresión perpendicular a las nervaduras

Probetas	n	k	$P_{B_{máx p}}/a$ (kN/m)	$K_{B p}$ (kN/mm)	$E_{B p}$ (MPa)
CB1 a CB5	5	2,46	27,7	10,1	302

3. La capacidad para resistir carga axial de los paneles en el sentido perpendicular a las nervaduras es algo menos de la mitad de la que tiene en el sentido de ellas, mientras que la rigidez es aproximadamente la cuarta parte.
4. El módulo de elasticidad en el sentido perpendicular a las nervaduras es más o menos la décima parte del módulo de elasticidad en el sentido de ellas.
5. La dispersión obtenida en los resultados de los ensayos hechos en el sentido de las nervaduras es relativamente alta y casi el triple de la obtenida en los ensayos con carga perpendicular a las nervaduras. Por lo tanto, es importante utilizar probetas del mismo lote para evaluar los valores característicos y esta variabilidad se debe tener en cuenta en el diseño.
6. Los resultados de los ensayos hechos en probetas pequeñas sometidos a cargas axiales muestran valores lógicos que permiten aplicarlos en un análisis por elementos finitos.

RECONOCIMIENTOS

El autor agradece a la empresa Metecno de Colombia por el patrocinio de esta investigación y a sus colaboradores: Nancy Torres Castellanos, Pedro Nel Quiroga Saavedra, Sebastián López Restrepo y Sandra Rocío Jerez Barbosa, coinvestigadores; Gloria González Espitia,

asistente, y los laboratoristas de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, en especial a José Ramón Torres Mejía.

REFERENCIAS

1. *Ensayos de caracterización física y mecánica realizados sobre paneles prefabricados para la construcción de cubiertas y muros en viviendas*. Yamín, L. E. (2000). Centro de Investigaciones en Materiales y Obras Civiles (Cimoc). Bogotá: Universidad de los Andes.
2. *Análisis de la resistencia sísmica de un sistema estructural prefabricado de bajo peso para la construcción de viviendas*. Ruiz, D., Ochoa, Á., Castillo, G. & Robles, A. (2007). *Ingeniería y Universidad*, vol. 11, N.º 2. Bogotá: Universidad Javeriana.
3. *Ensayos cíclicos y estáticos para evaluar la resistencia sísmica de los muros y las conexiones de paneles livianos prefabricados para la construcción de viviendas*, Ruiz, D., Martínez, S., Herrera, S. & Riveros, M. (2009). *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, N.º 75, julio - septiembre. Bogotá.
4. *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10* (2010). Decreto 926 del 19 de marzo de 2010, publicado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), Bogotá.
5. *Norma española UNE-EN 14509: Paneles sándwich aislantes autoportantes de doble cara metálica. Productos hechos en fábrica. Especificaciones* (2007). Asociación Española de Normalización y Certificación (Aenor). Madrid.
6. *SAP 2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Program* (2011). Computers & Structures, Inc. Berkeley, CA, EE.UU.
7. *Norma ASTM C 364-07: "Standard Test Method for Edgewise Compressive Strength of Sandwich Constructions"* (2007). American Society for Testing and Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, EE.UU.