

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

Experimental evaluation of the flexural stiffness of sandwich panels made of polyurethane rigid foam and steel sheets facings 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 flexión de probetas tomadas de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero, con el fin de determinar sus propiedades mecánicas. En un primer artículo se presentaron los resultados de ensayos a carga axial de probetas similares. Dichas propiedades son necesarias para efectuar un análisis estructural por elementos finitos de un modelo de viviendas para atender emergencias, como parte del proceso de homologación del sistema ante la Comisión Asesora Permanente del Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente, NSR-10.

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

Abstract

This paper presents the results of testing sandwich panel specimens of high density polyurethane foam with metallic facings subjected to flexural loads. The results of axial testing of such panels were presented in a first article. The purpose was to determine their mechanical properties in order to analyze by finite elements a design for emergency shelter. This is part of the process to get approval for the design by 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 cerramientos exteriores, como tejas o como 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 de ese tipo 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.

La vivienda propuesta es de un piso y tiene 36,48 m² de área construida. Su configuración en planta se muestra en la figura 1.

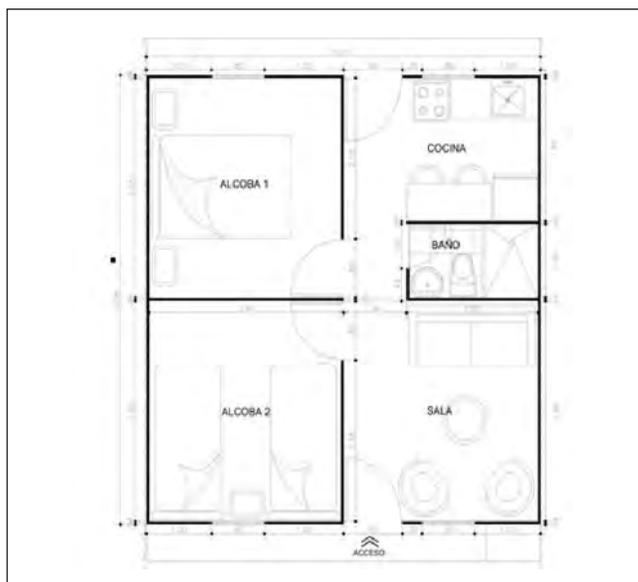


Figura 1 Configuración en planta de la vivienda propuesta.

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 se pudieran utilizar 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.

PROGRAMA EXPERIMENTAL

Estudio de las viviendas propuestas.

Como se indicó en la primera parte de este estudio, ref. 6, por tratarse de un país tropical y para la clase de uso que se les va a dar se considera que no se justifica considerar efectos térmicos ni de flujo plástico.

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 solicitaciones de fuerza axial, de flexión y de corte.

Metodologías de análisis

Por las características del sistema propuesto y por tratarse de un material compuesto, heterogéneo y anisotrópico, se decidió utilizar dos metodologías aproximadas para el análisis, a saber: 1) por elementos finitos y 2) planteamiento interactivo con la suma de las diversas

solicitaciones. En este artículo se presenta parte de los estudios previos para poder aplicar el primero de ellos.

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

Análisis por elementos finitos

Se utilizará el programa SAP 2000, versión 14.2.0, ref. 7, suponiendo que el material tiene propiedades ortotrópicas y que los paneles están unidos con conectores simples cada determinado intervalo.

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

- 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 1.
- σ_y = es la desviación estándar de y .

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

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 un artículo anterior, ref. 6, se presentaron 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. En este artículo se muestran los resultados de ensayos a flexión de probetas pequeñas con nervaduras tanto en el sentido de la luz como perpendicular a él.

Ensayos a flexión de probetas pequeñas

Para los ensayos a flexión se siguieron los procedimientos estipulados en la norma ASTM D7250/D7250M-06: “Standard Practice for Determining Sandwich Beam Flexural and Shear Stiffness”, ref. 8, y en la norma europea EN 14509-06 A.3: “Ensayo de resistencia al esfuerzo cortante sobre material del núcleo”, ref. 9.

Se probaron dos series de probetas: la primera en los laboratorios de la Escuela Colombiana de Ingeniería y la segunda en las instalaciones de Metecno en su planta de Santander de Quilichao.

Tabla 1
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

Ensayos a flexión realizados en la Escuela Colombiana de Ingeniería

Especímenes de 225 mm de ancho por 450 mm de longitud se sometieron a flexión en sentido paralelo y perpendicular a la nervadura. Siendo un material compuesto, se consideró importante averiguar experimentalmente las rigideces a flexión y a corte, por lo cual se emplearon dos configuraciones de carga para poder plantear dos ecuaciones simultáneas. La primera de ellas fue aplicando cargas concentradas iguales en los cuartos de la luz y la segunda haciendo lo mismo pero con cargas en los tercios de la luz.

Las probetas con las nervaduras en el sentido de la luz se denominaron FAC y FAT para las cargas aplicadas en los cuartos y en los tercios de la luz, respectivamente. Análogamente, para la flexión con nervaduras perpendiculares al sentido de la luz, se clasificaron en FBC y FBT para cargas en los cuartos y en los tercios de la luz.

En las zonas de aplicación de carga y en los apoyos se empleó neopreno para evitar el aplastamiento en dichas zonas. Además, en cada ensayo se utilizaron los mismos elementos en el montaje y se numeraron de forma tal que se garantizara su adecuada disposición antes de iniciar los ensayos. Dicho montaje generó una precarga de 60 N para todas las probetas.

La carga se aplicó con una máquina ELE Multiplex E-50, de 10 kN de capacidad, a una velocidad constante de 4 mm/min para las probetas FA y de 2 mm/min para las FB. Se emplearon anillos de carga de 10 kN y de 4,5 kN en uno y otro caso.

La instrumentación de las muestras se realizó empleando dispositivos electrónicos y mecánicos como se muestra en la figura 2. En ambos extremos de las muestras, en el centro de la luz, se colocaron transductores lineales (LVDT) y comparadores de carátula para medir las deflexiones de la probeta. En los extremos se registró el movimiento de la mesa usando transductores lineales en los apoyos.

Ensayos de flexión con nervaduras en el sentido de la luz

Para los ensayos de flexión con nervaduras en el sentido de la luz se obtuvieron las curvas Carga vs. deflexión para cargas aplicadas en los tercios (figura 3 a)) y en los cuartos de la luz (figura 3 b)). Se emplearon los valores promedio de las deflexiones medidas con los LVDT en el centro de la luz. En todos los casos las curvas se ajustaron a cero.

Las fallas típicas obtenidas para las probetas FA se presentan en la figura 4. Las fallas se desarrollaron en las zonas de aplicación de la carga, donde se presentaron la falla del poliuretano por corte y el desprendimiento de la lámina inferior que se extendió hacia los apoyos.

En la figura 5 se muestran el montaje utilizado para ensayar la probeta FAT-2 y el estado final de dicha probeta al alcanzar la carga máxima. En este caso no hubo falla en el poliuretano ni desprendimiento de la lámina; se presentó pandeo local en la lámina a compresión, causado quizás por tener una mayor concentración de la carga.

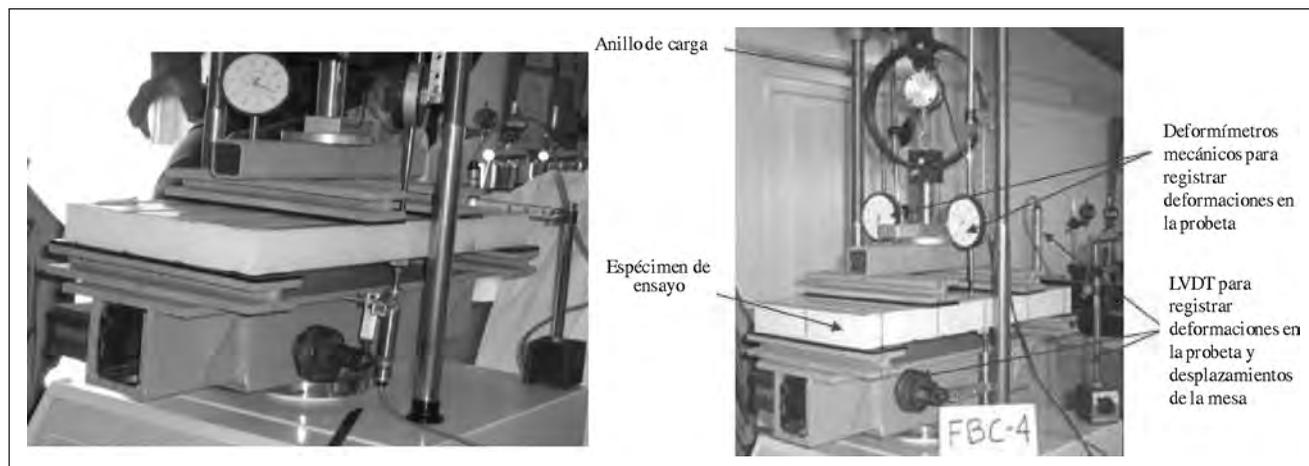


Figura 2 Montaje para ensayos de flexión con nervaduras paralelas y perpendiculares al sentido de la luz.

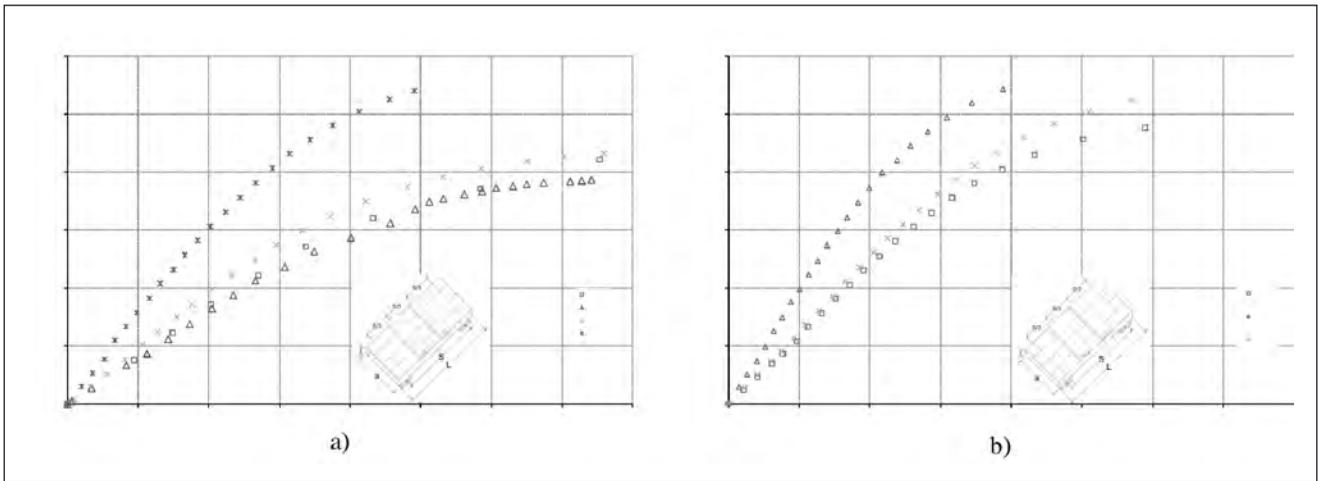


Figura 3 Curvas Carga vs. deflexión, corregidos los ceros, probetas FAT a) y FAC b).

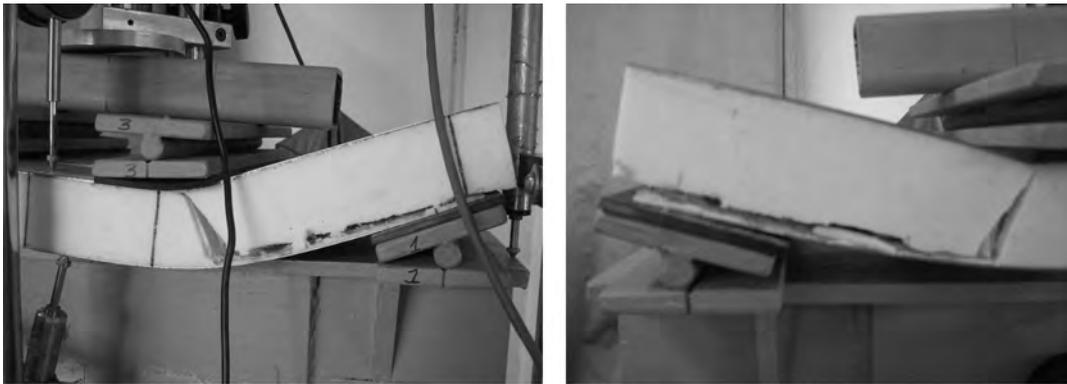


Figura 4 Fallas típicas de las probetas FA (1, 2A y 3).



Figura 5 Probeta FAT-2: a) Montaje; b) Estado final con la carga máxima.

Con los resultados obtenidos se calcularon la rigidez transversal a corte, el módulo de corte del núcleo y la rigidez a la flexión. A partir de las ecuaciones dadas en la norma D 7250/D 7250M-06, ref. 8, en su numeral 10.2.5, cuando se tienen dos configuraciones de carga

de cuatro puntos, una aplicada en los cuartos de la luz (configuración 1) y otra en los tercios de la luz (configuración 2), se dedujeron las siguientes ecuaciones para la rigidez a la flexión (D) y la rigidez transversal a corte (U), válidas cuando la luz es la misma para ambas con-

figuraciones y se miden las deflexiones en ambos casos para el mismo valor de carga. A este procedimiento se le denominará en adelante con la letra A.

$$D = \frac{99 (P) S^3 \left(1 - \frac{92}{99}\right)}{6912 \Delta_1 \left(1 - \frac{3}{4} \frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right)} \quad (1)$$

$$U = \frac{(P) S \left(\frac{99}{92} - 1\right)}{2 \Delta_1 \left[\left(\frac{297}{368} \frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right) - 1\right]} \quad (2)$$

en donde:

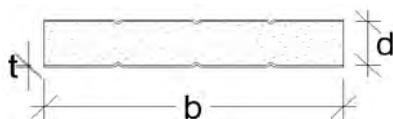
P = Carga total neta aplicada en cada configuración.

S = Luz libre entre apoyos para cada configuración.

Δ_1 = Deflexión neta en el centro de la luz para la carga P (configuración 1)

Δ_2 = Deflexión neta en el centro de la luz para la carga P (configuración 2).

El módulo de corte del núcleo (G) se calcula como una función de U , según se muestra a continuación.



$$G = \frac{U (d - 2t)}{(d - t)^2 b} \quad (3)$$

en donde:

t = grosor del material en las caras exteriores; en este caso, 0,455 mm.

b = ancho de la muestra, 225 mm.

d = grosor nominal del panel, 40 mm.

Se observó que los valores obtenidos en ambos casos presentaron grandes fluctuaciones y valores negativos carentes de significado físico. Pequeños cambios en la relación de las deflexiones obtenidas con cargas iguales en los tercios y en los cuartos de la luz resultan en enormes variaciones en los valores calculados de U y D .

La única explicación que se pudo hallar es falta de uniformidad en las propiedades mecánicas de las diversas zonas de una misma colada.

Ensayos de flexión con nervaduras perpendiculares al sentido de la luz

En los ensayos de flexión de las probetas con nervaduras en sentido perpendicular al de la luz se obtuvieron las curvas Carga vs. deflexión que se muestran en la figura 6 a) para cargas aplicadas en los tercios y 6 b) para las aplicadas en los cuartos de la luz.

Las fallas típicas obtenidas para las probetas FB se presentan más adelante en la figura 7. Las fallas se desarrollaron en las zonas de aplicación de la carga y en los apoyos donde se registraron la falla del poliuretano y el desprendimiento de la lámina inferior, que se extendía hasta el extremo de la probeta.

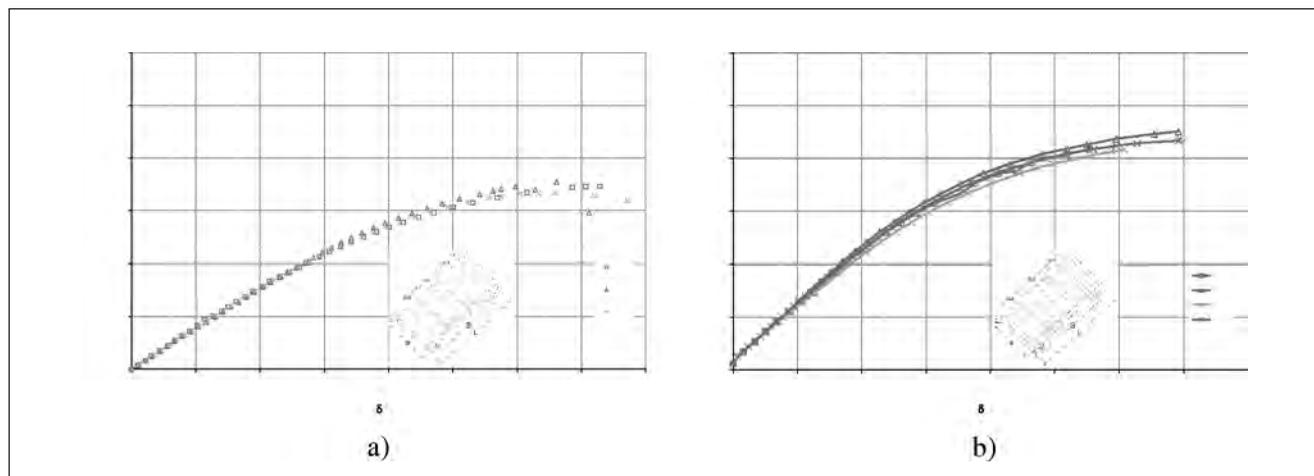


Figura 6 Curvas Carga vs. deflexión corregidas a ceros, probetas FBT a) y FBC b).



Figura 7 Fallas típicas de las probetas FB.

De forma análoga a como se hizo para los ensayos de flexión paralela, se calcularon los valores de U y D para flexión perpendicular con $P_1 = P_2 = 1000$ N. En este caso se presentaron valores negativos solamente en la rigidez a la flexión, y aunque no se registraron diferencias tan significativas ni valores negativos en el módulo de corte como en las probetas FA, hubo una alta dispersión que hace imposible determinar valores característicos aceptables como los calculados en los ensayos de compresión.

Procedimiento alternativo para evaluar las rigideces

Buscando otra explicación para la variabilidad de resultados y ante la imposibilidad de los investigadores de obtener las ecuaciones de la ref. 8 utilizadas atrás, se resolvió entonces usar el teorema de Castigliano o el Principio del Trabajo Virtual para evaluar las deflexiones en el centro de la luz correspondientes a las dos hipótesis de carga consideradas. Con cualquiera de estos dos métodos, que en adelante se denominará método B, se llega a las ecuaciones (4) y (5), con la misma nomenclatura anterior.

$$EI = \frac{PS^3}{2} \frac{1}{\left(\frac{3456}{7} \Delta_1 - \frac{2592}{7} \Delta_2\right)} \quad (4)$$

$$AG = \frac{PS}{2} \frac{1}{\left(\frac{297}{7} \Delta_2 - \frac{368}{7} \Delta_1\right)} \quad (5)$$

Al aplicar estas ecuaciones a los datos de carga y deflexiones de los ensayos se observó que los resultados obtenidos coinciden perfectamente para EI, pero que hay una relación de cuatro (4) entre los valores obtenidos para AG con las ecuaciones de la ref. 8 y los encontrados por Castigliano. Quizás esta diferencia se deba a que se usó un coeficiente K de uno en estas últimas ecuaciones, a sabiendas de que para una sección rectangular dicho valor es 1,2. La implicación sería que en la deducción de las ecuaciones de la referencia citada se trabajó con $K = 4$.

Si se desprecia la deflexión debida a corte y se considera que la deflexión total es debida a flexión, que se llamará método C, la rigidez correspondiente se puede calcular para uno y otro caso con las siguientes ecuaciones:

$$EI = 11 PS^3 / (768 \Delta_{cl1}) \quad (6)$$

$$EI = 23 PS^3 / (1296 \Delta_{cl2}) \quad (7)$$

Que con $P = 1000 \text{ N}$ y $S = 450 \text{ mm}$ conducen a los valores característicos para ambas series de probetas de la cuarta columna de la tabla 2. La fila FA* corresponde a los valores resultantes cuando se ignoran los resultados de las probetas FAC2 y FAT2, por estar muy alejados de los otros.

Finalmente, si se sigue el procedimiento indicado en las refs. 8 y 9 para evaluar la rigidez teniendo en cuenta únicamente las láminas de acero, que se llamará método *D*:

$$D = E \frac{(d^3 - c^3)b}{12} \quad (8)$$

En donde d es el espesor total del panel, c el del núcleo de poliuretano y b el ancho de éste. Remplazando, para un ancho nominal de 225 mm, un espesor nominal total de 40 mm, $E = 200.000 \text{ MPa}$ y láminas de calibre 26: $t = 0,455 \text{ mm}$, $c = 39,09 \text{ mm}$, da el siguiente valor:

$$D = EI = 16\,010 \text{ N} \cdot \text{m}^2$$

Considerablemente mayor que el mostrado en la cuarta columna de la tabla 2.

La ref. 7 da la siguiente expresión para el cálculo de U en función de la deflexión Δ en el centro de la luz:

$$U = \frac{P(S_1 - L_1)}{4 \left(\Delta - \frac{P(2S_1^3 - 3S_1L_1^2 + L_1^3)}{96D} \right)} \quad (9)$$

En donde L representa la distancia entre las cargas. Aplicando esta ecuación con el valor de D calculado así y los valores de deflexión medidos en los ensayos de las probetas FA, se obtienen los valores característicos de las dos últimas columnas de la tabla 2.

Los valores de G obtenidos por este procedimiento tienen el mismo orden de magnitud que los dados por Koschade, ref. 9.

Tabla 2

Valores característicos de rigidez a flexión EI_p , de rigidez al corte AG_p y de Módulo cortante G_p para las probetas FA y FB

Probetas	n	k	EI_p	AG_p	G_p
			($\text{N} \cdot \text{mm}^2$)	(N)	(MPa)
Método			C	D	D
FA	7	2,25	230	10616	1,18
FA*	5	2,46	194	17043	1,89
FB	7	2,25	276	13385	1,49

Ensayos a flexión realizados en la planta de Metecno

Como los resultados encontrados en los ensayos de la Escuela Colombiana de Ingeniería presentaron una alta dispersión y adicionalmente se hallaron valores negativos que hacían imposible determinar los valores característicos de EI y de AG (necesarios para alimentar el programa de análisis por elementos finitos), además de las enormes diferencias obtenidas por los diversos métodos para evaluar dichas propiedades, se optó por ensayar probetas de mayores dimensiones en la planta de Metecno en Santander de Quilichao, con la supervisión del director de la investigación, para aprovechar las facilidades de control y toma de datos de su máquina de ensayos marca Lloyd Instruments-SKU, modelo LR10KPlus, con capacidad de 10 kN.

Se ensayaron, por una parte, probetas de paneles Monowall 40, utilizados como muros exteriores e interiores, y por otra, probetas de paneles Techmet 25 que se utilizarán como cubierta.

Probetas de paneles Monowall 40

Los paneles Monowall 40 se ensayaron de dos formas: con nervaduras paralelas a la luz y con nervaduras perpendiculares a ella.

Probetas de paneles Monowall con nervaduras paralelas a la luz

Inicialmente se probaron ocho especímenes de Monowall 40 con un ancho de 225 mm y una luz de ensayo de 1000 mm. La mitad de ellos se ensayaron con cargas iguales aplicadas en los tercios de la luz y la otra mitad



Figura 8 a) Ensayo típico de una probeta Monowall 40 con nervaduras en el sentido de la luz. b) Falla típica de una probeta cargada en los tercios de la luz, planta de Metecno.

Tabla 3
Valores estadísticos y característicos para las probetas 08-10 a 15-10

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico (n=8, k=2,19)
EI (N•m ²)	C	2100	238	11,3	1632
AG (N)	D	21919	2766	12,62	16.430
G (MPa)	D	2,44	0,307	12,62	1,83

con cargas en los cuartos de la luz. La carga puntual de la máquina se distribuía en dos líneas de carga por medio de viguetas de repartición como se puede ver en la figura 8 a); cada ensayo se llevó hasta la falla. En la figura 8 b) se muestra una falla típica de una probeta.

Llamó la atención la diferencia obtenida según se cargara por la cara interna o externa. La explicación es que cada cara procede de un rollo de lámina diferente, que incluso pudo haber sido suministrado por diferentes proveedores.

De las gráficas Esfuerzo vs. deflexión se tomaron los valores de deflexión para una carga de 400 N y con dichos valores se elaboró un cuadro similar al que se había hecho para las probetas FA ensayadas en la Escuela. Los resultados presentaron una dispersión semejante a la obtenida en esos ensayos, por lo cual se concluyó que ésta no correspondía ni al tamaño de las

probetas ni a la precisión de los equipos sino a una gran variabilidad de las propiedades mecánicas obtenidas en el proceso de fabricación.

Los valores estadísticos y característicos para estas probetas, calculados con los métodos *C* y *D*, ya descritos, se pueden ver en la tabla anterior (tabla 3).

En vista de los muchos valores irreales obtenidos se consideró indispensable que las dos configuraciones de carga: en los cuartos de la luz y en los tercios de ella, se hicieran sobre las mismas probetas, cuidando de no exceder el límite de proporcionalidad en ningún caso.

Con base en los diagramas Carga vs. deflexión se decidió llevar las probetas definitivas con nervaduras en el mismo sentido de la luz hasta una carga de 400 N, para garantizar que no se sobrepasara el límite de proporcionalidad. Los resultados obtenidos por los diversos métodos se muestran en la tabla 4 (página siguiente):

Tabla 4

Valores estadísticos y característicos para las probetas con nervaduras paralelas a la luz, 16-10 a 34-10, ensayadas en la planta de Metecno, eliminando resultados negativos o muy alejados del promedio

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico (D: n=46, k=1,83) (Dpr:n=312, k=1,55)
EI1 (N•m ²)	A	3093	608	19,67	2061
EI2a (N•m ²)	C	1952	193	9,89	1575
EI2b (N•m ²)	C	1900	188	9,90	1533
AG1 (N)	A	205504	62591	30,46	10.6587
AG2 (N)	B	51376	15648	30,46	26.647
AG (N)	D	20687	1768	8,55	17.505
AG (N)	Dpr	19255	1769	9,19	16.647
G1 (MPa)	A	23	7,0	30,46	12
G2 (MPa)	B	5,84	2,0	30,46	3,03
G (MPa)	D	2,30	0,196	8,55	1,94
G (MPa)	Dpr	2,14	0,197	9,19	1,85

Probetas de paneles Monowall 40 con nervaduras perpendiculares a la luz

El mismo proceso se repitió con probetas de paneles Monowall con las nervaduras perpendiculares a la luz. Por ofrecer menor resistencia, la carga se limitó a 200 N, y por estar limitados al ancho del panel fue necesario reducir la luz a 800 mm.

Más adelante, en la figura 9, se muestra la disposición de las probetas y en la figura 10 los tipos de fallas que se presentaron.

Los resultados de aplicar los diferentes métodos se registran en la tabla 5.



Figura 9 Ensayos típicos de probetas con nervaduras perpendiculares a la luz.

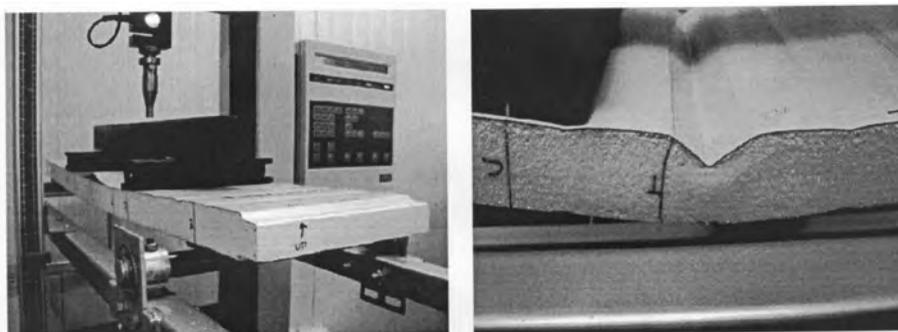


Figura 10 Fallas típicas de probetas Monowall 40 con nervaduras perpendiculares a la luz.

Tabla 5
Valores estadísticos y característicos para las probetas perpendiculares a la luz, descartando los valores negativos y los valores extremos

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico (D ₁ : n=5, k=2,46) (D ₂ : n=24, k=1,91) (D _{pr} : n=384, k=1,48)
EI1 (N•m ²)	A ₁	2186	863	39,49	792
EI2a (N•m ²)	C ₁	672	8	1,14	654
EI2b (N•m ²)	C ₁	641	5	0,78	628
AG1 (N)	A ₁	57585	10382	18,03	36.401
AG2 (N)	B ₁	14396	2596	18,03	9100
AG (N)	D ₂	9726	225	2,32	9302
AG (N)	D _{pr}	9967	313	3,14	9514
G1 (MPa)	A ₁	6,4	1,2	18,03	4,04
G2 (MPa)	B ₁	1,64	0,30	18,03	1,03
G (MPa)	D ₂	1,08	0,025	2,32	1,03
G (MPa)	D _{pr}	1,11	0,034	3,10	1,06

Probetas de paneles Techmet 25

En la siguiente etapa de la investigación se probaron probetas de los paneles de techo Techmet 25, tanto con las crestas paralelas a la luz como perpendiculares a ella. Teniendo en cuenta que la sección transversal no es simétrica y que las cargas de viento pueden producir

succión que supere el peso propio, y ante la carencia de una cámara de vacío para simular dicha succión se optó por aplicarles cargas gravitacionales tanto en posición normal como en posición invertida.

En la figura 11 se presenta la disposición de las probetas para los cuatro tipos de ensayos.



a) Probetas con nervaduras paralelas a la luz.



b) Probetas con nervaduras perpendiculares a la luz.

Figura 11 Disposición de las probetas hechas con paneles Techmet 25, para los cuatro tipos de ensayos.

Probetas de paneles Techmet 25 con nervaduras paralelas a la luz y sentido normal (crestas hacia arriba)

El compendio de todos los resultados obtenidos para este tipo de probetas se presenta en la tabla 6. Para el método *D*, en el cual se considera que la rigidez a flexión la proporcionan sólo los elementos de acero, los cálculos se hicieron con $EI=26.850 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ y $A=11.183 \text{ mm}^2$.

Se observa una gran disparidad entre los valores obtenidos por los diferentes métodos e incluso valores negativos de *AG* con los métodos *A* y *B*, que son absurdos pues no tienen ningún significado físico. Los más confiables son los obtenidos con el método D_{pr} , que dan un valor lógico de *G*.

Probetas de paneles Techmet 25 con nervaduras paralelas a la luz y sentido invertido (crestas hacia abajo)

El compendio de todos los resultados obtenidos para este tipo de probetas se puede ver en la tabla 7.

Se aplican los mismos comentarios hechos para la tabla 6.

Probetas de paneles Techmet 25 con nervaduras perpendiculares a la luz

Las deflexiones en el centro de la luz obtenidas con las dos configuraciones de carga y la relación existente entre ellas se presentan a continuación en las tablas 8 y 9. La primera de ellas corresponde al caso normal

Tabla 6

Valores estadísticos y característicos para las probetas Techmet 25 con nervaduras paralelas a la luz y sentido normal (crestas hacia arriba) T13 a T15 y T31 a T33, con $EI= 26850 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ para $P1 = P2 = 1200 \text{ N}$; $S1 = S2 = 1000 \text{ mm}$

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico ($D: n=6, k=2,34$) ($D_{pr}: n=336, k=1,52$)
EI1 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	A	1236	319	25,8	641
EI2a ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	C	3085	452	14,7	2120
EI2b ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	C	3494	441	12,6	2523
AG1 (N)	A	-73054	24411	-33,4	NA
AG2 (N)	B	-18264	6103	-8,35	NA
AG (N)	D_{pr}	30923	6967	22,53	20891
G (MPa)	D_{pr}	2,77	0,623	22,53	1,87

Tabla 7

Valores estadísticos y característicos para las probetas TECHMET 25 con nervaduras paralelas a la luz y sentido invertido (crestas hacia abajo) T16 a T18 y T34 a T36 con $EI=26850 \text{ N} \cdot \text{m}^2$ para $P1 = P2 = 1500 \text{ N}$; $S1 = S2 = 1000 \text{ mm}$

Propiedad	Método	Promedio	Desviación estándar	Coefficiente de variación (%)	Valor característico ($D: n=6, k=2,34$) ($D_{pr}: n=408, k=1,45$)
EI1 ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	A	1831	274	15,0	1288
EI2a ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	C	3413	118	3,5	3145
EI2b ($\text{N} \cdot \text{m}^2$)	C	3661	109	3,0	3413
AG1 (N)	A	-131261	67.521	-51,4	NA
AG2 (N)	B	-32815	16.880	-51,4	NA
AG (N)	D	33678	3368	10,0	28982
G (MPa)	D_2	3,01	0,301	10,0	2,59

Tabla 8

Deflexiones medidas para las dos configuraciones de carga para las probetas Techmet 25 con nervaduras perpendiculares a la luz y sentido normal (crestas hacia arriba) T22 a T24 y T28 a T30 para $P_1 = P_2 = 40 \text{ N}$; $S_1 = S_2 = 800 \text{ mm}$

Probeta	$\Delta_1(\text{mm})$	$\Delta_2(\text{mm})$	Δ_2/Δ_1
T22	3,6859	5,9809	1,6226
T23	3,5241	5,9963	1,7015
T24	3,4436	5,6059	1,6279
T28	2,4627	7,3665	2,9912
T29	2,9643	6,2062	2,0937
T30	3,4714	6,4706	1,8640
Promedio	3,2587	6,2711	1,9835
Desv. estándar	0,4588	0,6076	0,5250
Coef. de variación	14,08%	9,69%	26,47%

Tabla 9

Deflexiones medidas para las dos configuraciones de carga para las probetas Techmet 25 con nervaduras perpendiculares a la luz y sentido invertido (crestas hacia abajo) T19 a T27, para $P_1 = P_2 = 40 \text{ N}$; $S_1 = S_2 = 800 \text{ mm}$

Probeta	$\Delta_1(\text{mm})$	$\Delta_2(\text{mm})$	Δ_2/Δ_1
T19	2,4188	4,2803	1,770
T20	2,9303	3,7234	1,271
T21	2,8034	3,4185	1,219
T25	1,8560	3,6129	1,947
T26	2,4712	3,9657	1,605
T27	2,6362	3,8507	1,630
Promedio	2,5193	3,8086	1,5737
Desv. estándar	0,3783	0,2989	0,2827
Coef. de variación	15,02%	7,85%	17,96%

(crestas hacia arriba) y la segunda al sentido invertido (crestas hacia abajo).

No se intentó calcular valores de EI y AG por constituir ahora una viga de sección variable compleja a lo largo de la luz, que requeriría un análisis numérico complicado sin justificación práctica.

Tan solo se puede concluir que también en este caso la rigidez que ofrece la cubierta a una succión ocasionada por el viento sería bastante mayor que la que se tiene ante cargas gravitacionales, puesto que la relación entre las deflexiones promedios causadas para cargas aplicadas en los cuartos de la luz es 0,77 y para cargas aplicadas en los tercios 0,61.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

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

1. Aunque los paneles sándwich de espuma de poliuretano y revestimiento metálico se idearon fundamentalmente para servir como divisiones o cerramientos con el propósito de aislar un recinto dado y se ha demostrado, con el uso durante muchos años, que ese papel lo desempeñan satisfactoriamente, por su naturaleza tienen una resistencia intrínseca para soportar diversas clases de sollicitaciones. Con el fin 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%.
2. Si bien los resultados de los ensayos hechos en probetas pequeñas sometidos a cargas axiales muestran valores razonables que permiten aplicarlos en un análisis por elementos finitos, como se indicó en la ref. 6, los obtenidos en ensayos de

probetas sometidos a cargas de flexión, en cambio, presentan una alta dispersión y al aplicar los métodos de mecánica clásica conducen en muchos casos a valores absurdos, por no tener ningún significado físico. Los mejores resultados para los paneles utilizados como muros se obtuvieron suponiendo que la rigidez a flexión es proporcionada únicamente por las láminas del revestimiento.

3. Lo mismo puede decirse de los obtenidos para probetas con paneles de techo cuando las nervaduras están en el sentido de la luz.
4. Cuando las nervaduras están en sentido perpendicular a la luz por tener sección variable a lo largo de ella, no se justifica intentar calcular los valores de EI y AG. Los resultados experimentales sirven simplemente para verificar que, también en este sentido, la resistencia ante una succión causada por el viento sería mucho mayor que la presente ante cargas gravitacionales.
5. En consecuencia, dada la gran dispersión de las propiedades obtenidas en esta serie de ensayos, un análisis por elementos finitos sólo permitirá identificar los puntos críticos de la edificación y su sensibilidad ante los cambios de propiedades.
6. Por consiguiente, esta primera etapa de la investigación ratifica la necesidad, planteada desde el comienzo, de ensayar paneles completos simulando las condiciones reales como base para plantear un método de cálculo que permita homologar el sistema ante la autoridad competente.

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, Sandra Rocío Jerez Barbosa y Sebastián López Restrepo, 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. Evaluación de la rigidez axial de paneles sándwich de poliuretano de alta densidad y láminas de acero para su utilización estructural, Uribe, Jairo.- *Revista de la Escuela Colombiana de Ingeniería*, 2012.
7. *SAP 2000: Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Program* (2011). Computers & Structures, Inc. Berkeley, CA, EE.UU.
8. *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.
9. *Norma española EN 14509-06 A.3: Ensayo de resistencia al esfuerzo cortante sobre material del núcleo* (2007). Asociación Española de Normalización y Certificación (Aenor), Madrid.
10. *Sandwich Panel Construction*, Koschade, Rolf. – Ernst & Son, ISBN 3-433-01617-8, Berlín, 2002.