

ANÁLISIS NUMÉRICO DE PANELES ESTRUCTURALES CON AISLACIÓN SOMETIDOS A FLEXIÓN Y CARGAS VERTICALES EXCÉNTRICAS

NUMERICAL ANALYSIS OF STRUCTURAL PANELS WITH INSULATION SUBJECTED TO BENDING AND ECCENTRIC VERTICAL LOADS

Eduardo M. Sosa^a, Suyai Fernandez^b y Rossana C. Jaca^c

^a*Department of Mechanical, Materials, and Aerospace Engineering, West Virginia University, Morgantown, 26505, West Virginia, United States. eduardo.sosa@mail.wvu.edu*

^b*Ingenia Nqn, Lisandro de la Torre 518, 8300 Neuquén, Argentina. ingsuyaifernandez@gmail.com*

^c*Universidad Nacional del Comahue, 8300 Neuquén, Argentina. rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar*

Palabras clave: Paneles estructurales aislados, Elementos finitos, Flexión, Cargas verticales excéntricas.

Resumen. Los paneles estructurales con aislación resultan un material alternativo para la construcción de viviendas residenciales y construcciones industriales livianas. Estos paneles están compuestos por un núcleo de poliestireno expandido de alta densidad contenido dentro de un marco perimetral de madera y dos tableros exteriores formados por virutas de madera mezcladas con un adhesivo fenólico y poliuretano prensadas a alta temperatura y presión. Los dos tableros se adosan al núcleo con adhesivos de alta resistencia. En este trabajo se representan resultados de simulaciones en elementos finitos del comportamiento de un panel sometido a ensayos estáticos de cargas verticales excéntricas y de flexión. El panel se modela con elementos sólidos hexaédricos de aproximación lineal con un código de propósitos generales. Se realiza un análisis de bifurcación lineal y análisis no lineal geométrico, y los resultados numéricos se comparan evaluaciones experimentales para las dos configuraciones de carga.

Keywords: Structural Insulated Panel, Finite element analysis, Bending, Eccentric vertical load.

Abstract. Structural insulated panels are an alternative material for residential housing and lightweight industrial construction. These panels consist of a core made of high-density expanded polystyrene, surrounded by a wooden frame, and sandwiched between two outer layers of wooden oriented strand board (OSB). The OSB layers are bonded to the core using high-strength adhesives. This work presents the results of finite element simulations carried out to evaluate the behavior of a panel subjected to static tests involving eccentric vertical loads and four-point bending. The panel is modeled using linear hexahedral solid elements with a general-purpose code. Linear buckling analysis and geometrically nonlinear analysis are conducted, comparing the numerical results with experimental data for both loading configurations.

1 INTRODUCCIÓN

El sistema constructivo con paneles estructurales con aislación (SIP, por sus siglas en inglés) constituye una alternativa a sistemas de construcción tradicionales. Tienen como ventaja una mayor rapidez de montaje y alta capacidad de aislación térmica. Estos aspectos han ayudado a incrementar su uso para viviendas residenciales y construcciones comerciales livianas en los últimos años y en diferentes regiones de Argentina y Chile.

Debido a la naturaleza altamente competitiva del mercado, muchos fabricantes de este tipo de paneles realizan sus propios ensayos y optan por manejarse con los análisis desarrollados *ad hoc* con sus productos que generalmente no están disponibles públicamente para una comparación detallada entre posibles alternativas. Esta falta de investigaciones publicadas da como resultado una cierta resistencia por parte de contratistas, ingenieros y propietarios a utilizar el producto de manera aún más extensiva.

Los paneles están típicamente compuestos por dos tableros exteriores y un núcleo central de poliestireno expandido de alta densidad (EPS). Los tableros están fabricados con virutas de madera mezcladas con un adhesivo fenólico y poliuretano sometidas a alta temperatura y presión, se conocen como tablero de virutas orientadas (OSB, por sus siglas en inglés) (Amran et al., 2020). A su vez, el núcleo está contenido por un marco perimetral de madera en el cual se adosan los tableros OSB mediante clavado perimetral. El espesor del núcleo de EPS generalmente depende de los requerimientos de aislación o la ubicación en la construcción donde se utilicen los paneles (paredes, entrepisos, techos) (Rojas, 2018). El núcleo de EPS está unido a los tableros de OSB mediante un adhesivo de alta resistencia y en algunas variantes se sustituye el núcleo de EPS por un núcleo de poliuretano inyectado. La forma de resistir las cargas de este material compuesto se parece a una viga I en la que las capas exteriores soportan la mayor parte de la flexión y cargas en el plano, mientras que la capa central soporta la carga de corte (Kermani, 2006; Birman & Kardomateas, 2018).

En las últimas décadas, diversos investigadores han evaluado el comportamiento mecánico de los paneles. Kermani (2006) realizó un estudio exhaustivo de paneles sometidos a cargas de flexión y compresión axial combinadas. Sus resultados mostraron que los paneles funcionan como un material compuesto eficaz, con resistencia y rigidez necesaria para soportar las cargas de diseño requeridas. Birman & Kardomateas (2018) realizaron una revisión de paneles tipo sándwich mostrando ejemplos de problemas experimentados por diseñadores incluyendo daños típicos. El rendimiento estructural de paneles se ha evaluado mayormente mediante ensayos experimentales realizados sobre paneles de características diferentes sometidos a flexión, compresión en el plano, corte, impacto (Calquín, 2011; Rubilar, 2012; Yang et al., 2012; Chen & Hao, 2015; Santarelli & Manzione, 2018) y cargas sísmicas (Yang et al., 2011). Por otro lado, en construcciones residenciales, estos paneles se combinan con madera laminada para reforzar las uniones entre módulos, entrepisos, techos y dinteles, creando estructuras de alta resistencia que deben cumplir con la normativa vigente (CIRSOC 601, 2016).

El objetivo de este trabajo es evaluar el comportamiento mecánico de paneles individuales sometidos a cargas de flexión y a cargas de compresión en el plano del panel aplicadas verticalmente con una excentricidad. Los paneles se modelan con un paquete multipropósito de simulación de elementos finitos (Abaqus, 2023). Los resultados numéricos se comparan con resultados experimentales para validar la respuesta estructural de manera de poder extender el estudio a futuro para paneles unidos entre sí formando la estructura resistente de una construcción. La estrategia de simulación utilizada en este trabajo sigue la implementada en un trabajo previo de los autores centrado en realizar un estudio similar para paneles bajo cargas de compresión centradas en el plano (Wozniuk et al., 2023).

2 MATERIALES Y METODOLOGÍA

2.1 Características de paneles estudiados

Los paneles estudiados tienen 1220 mm de ancho y 2440 mm de altura. Los tableros OSB tienen 10 mm de espesor. El núcleo es poliestireno de alta densidad (EPS-HD, por sus siglas en inglés), con un espesor de 90 mm y densidad de 15 kg/m^3 . Los tableros OSB están adheridos al núcleo monolíticamente, mediante un adhesivo de alta resistencia, mono componente, y de tipo pre-polímero de poliisocianato y poliéster. Durante la fabricación, el panel se somete a un proceso de prensado en frío aplicando una fuerza de aproximadamente 350 kg/m^2 , mediante la acción de un sistema de cilindros neumáticos para garantizar la correcta adhesión de las partes. En los extremos superior e inferior del panel y en los bordes laterales se incorporan soleras y montantes de madera maciza de pino, formando un marco perimetral. Los tableros OSB se conectan al marco perimetral en ambas caras del panel mediante tornillos autoroscantes. Para este estudio se consideran dos configuraciones de panel: una sin clavaderas, y otra con clavaderas de madera maciza de pino. Estos paneles se usan como cerramiento exterior superior para techo, las chapas de techo se vinculan a los paneles a través de estas clavaderas. Los paneles usados como cerramiento lateral no disponen de estas clavaderas. La [Figura 1](#) muestra un esquema del panel analizado en este trabajo detallando las dimensiones y posición de cada elemento en el panel.

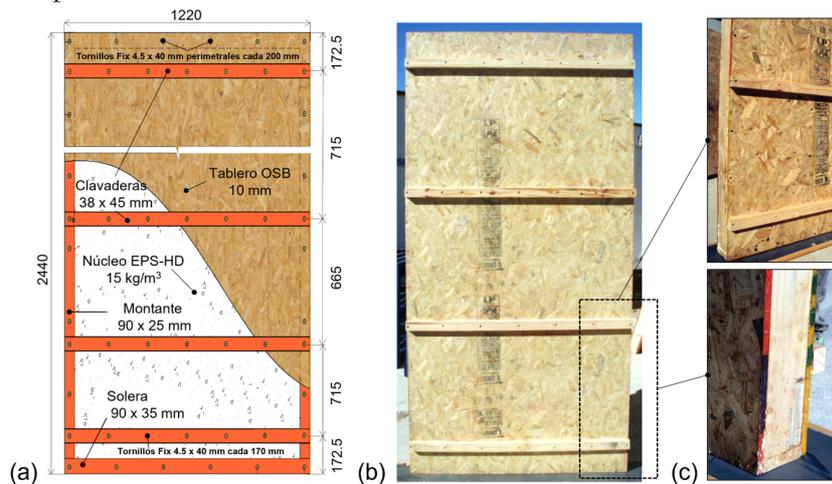


Figura 1: Características paneles estudiados: (a) Componentes y dimensiones generales; (b) Panel típico incluyendo clavaderas; (c) Detalle de clavaderas y unión entre montante y solera inferior.

2.2 Ensayos de flexión y compresión excéntrica

Dos tipos de ensayos experimentales se toman como referencia para comparación con los modelos numéricos desarrollados en este estudio. Uno de ellos es el de flexión fuera del plano, de acuerdo con la norma IRAM 11555 (INTI, 2016). Este ensayo consiste en someter a un módulo aislado del panel, colocado en posición horizontal y simplemente apoyado en sus extremos de menor longitud, a la acción de dos cargas simétricas aplicadas perpendicular a su plano, en los cuartos de la luz entre apoyos, en una configuración de flexión de 4 puntos. La carga se aplica escalonadamente midiéndose la deflexión en el centro de la luz L para cada incremento de carga. Al finalizar los escalones de carga se descarga el panel para medir la flecha residual, y posteriormente se incrementa la carga hasta la rotura del espécimen. Las cargas se aplican a través de dos perfiles IPN que se consideran rígidos. La [Figura 2\(a\)](#) muestra un esquema del ensayo a flexión.

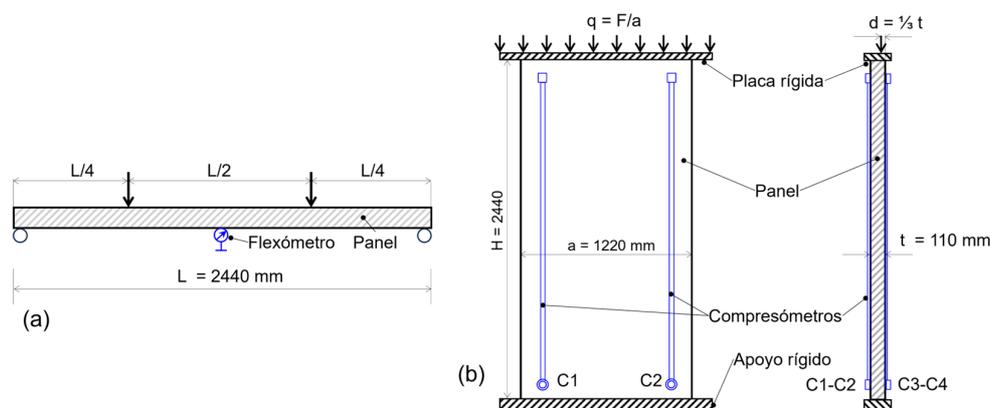


Figura 2: Esquemas de ensayos: (a) Flexión, (b) Cargas verticales excéntricas.

El segundo ensayo de referencia es el ensayo de compresión excéntrica realizado según la norma IRAM 11588 (INTI, 2016). En este ensayo, el panel se coloca en posición vertical apoyado sobre una base rígida con una placa de acero. En la parte superior del panel se dispone una placa rígida de acero de 13 mm de espesor sobre la que se aplica una carga vertical uniformemente distribuida a lo largo de una línea paralela a las caras principales del panel y ubicada a una distancia de un tercio del espesor total ($d = t/3$) medida desde una de las caras del panel. Para un panel con un espesor total de 110 mm, la excentricidad resultante con respecto al plano medio del panel es de $e = 18.3$ mm. La Figura 2(b) muestra un esquema de la configuración del ensayo de compresión. La carga se aplica por escalones y se mide el acortamiento mediante compresómetros ubicados en ambas caras principales de panel en cada escalón de carga hasta un máximo de no más de 8 kN y luego se descarga. Al finalizar la secuencia de carga escalonada, el panel se carga nuevamente de manera continua hasta producir el colapso de la pieza ensayada.

Para cada tipo de ensayo se ensayaron tres paneles sin clavaderas (Configuración A) y tres paneles con clavaderas (Configuración B). Los resultados promediados de cada tipo de ensayo se comparan con los resultados obtenidos de los modelos de elementos finitos.

2.3 Modelo de elementos finitos

La geometría y esquema de cargas presentados en las Figura 1 y 2 se utilizaron como base para la creación de dos modelos de elementos finitos para la evaluación del panel a flexión y a compresión excéntrica. Ambos se crearon en Abaqus/CAE (Abaqus, 2023) y tienen las siguientes características que también se esquematizan en la Figura 3:

(a) *Partes y ensamblado*. El modelo contiene cuatro partes principales, un núcleo central, dos tableros OSB, y un marco perimetral. El marco perimetral contiene el núcleo central y está cubierto por los tableros OSB (Figura 3(a)).

(b) *Interacciones*. Los paneles OSB están conectados a las caras del marco perimetral a través de conectores rígidos que representan la presencia de clavos posicionados de manera discreta en el perímetro del panel (Figura 3(b)). La misma metodología se empleó para conectar las clavaderas a la superficie del tablero OSB. La adhesión entre las superficies de tableros OSB y del núcleo se modela a través de un modelo de contacto cohesivo que representa la adhesión estructural entre las partes (Figura 3(c)). El mismo modelo cohesivo se emplea para representar la adhesión estructural entre el perímetro del núcleo y el perímetro interior del marco de madera. Las cargas de flexión se aplican mediante acoplamientos rígidos en la posición de los perfiles IPN que transmiten las cargas. Estas cargas se aplican en puntos de referencia (PR-1 y PR-

2) ligados a la posición de cada acoplamiento rígido. Los apoyos del panel en flexión se modelan de manera similar con acoplamientos rígidos ligados a puntos de referencia (PR-3 y PR-4) (Figura 3(d)).

(c) *Cargas y condiciones de borde.* Para el modelo de flexión la carga se aplica por control de desplazamiento. Basado en las mediciones experimentales reportadas en INTI (2016), se aplicó un desplazamiento de 8 mm en los puntos de referencia PR-1 y PR-2 y se calculó la fuerza resultante como la suma de las fuerzas de reacción en los puntos de referencia PR-3 y PR-4 (Figura 3(d)). Los puntos de referencia PR-3 y PR-4 se consideraron como nodos restringidos en translación, pero no en rotación. Para el caso del panel en compresión, la aplicación de la carga excéntrica se modeló incluyendo la presencia de una placa rígida en el borde superior ligada a una línea de carga posicionada excéntricamente y ligada a un punto de referencia PR-5 (Figura 4(a)) en el que se aplicaron dos tipos de cargas concentradas de compresión en la dirección vertical U_2 , incluyendo una carga unitaria de 1 kN para el análisis de bifurcación o pandeo lineal y un desplazamiento impuesto de 1.3 mm para el análisis geométrico no lineal (Figura 4(b)). Para el panel en compresión, los nodos de base se consideraron restringidos de desplazamientos, pero no de rotación.

(d) *Elementos y mallado:* Para todas las partes del panel se utilizaron elementos tridimensionales de sólido de 8 nudos (C3D8) y con una malla suficientemente densa (21611 elementos) para evitar problemas de convergencia en el modelado de contacto cohesivo. Las mallas resultantes de los modelos de flexión y compresión se muestran en la Figura 3(e) y Figura 4(c), respectivamente.

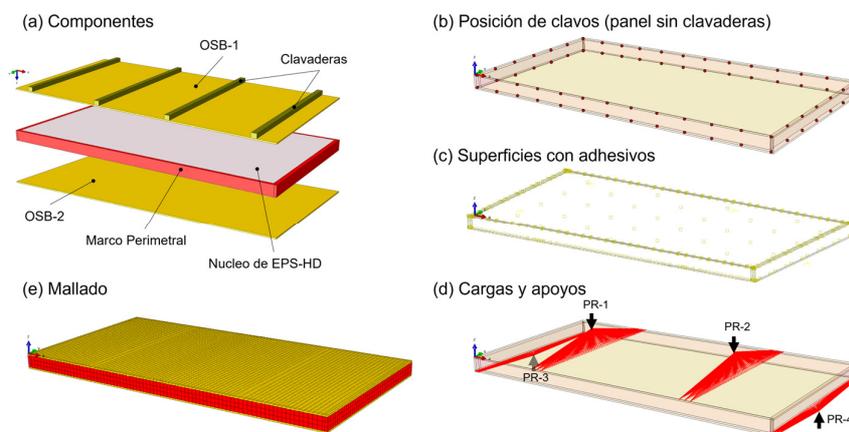


Figura 3: Configuración del modelo de elementos finitos para el ensayo de flexión.

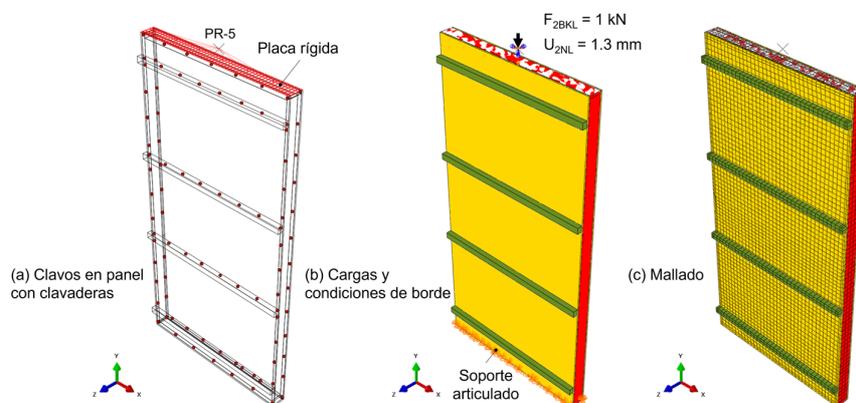


Figura 4: Configuración del modelo de elementos finitos para el ensayo de compresión con carga excéntrica.

(e) *Propiedades de material.* Para los tableros OSB se asume que tienen un comportamiento aproximadamente ortotrópico con propiedades definidas en las direcciones longitudinal y transversal del tablero. Estos valores corresponden al 90% de los valores reportados en Wozniuk et al (2023) y se adoptaron como una aproximación razonable de las propiedades de los paneles ensayados experimentalmente (INTI, 2016). Para la determinación de los correspondientes parámetros ortotrópicos generalizados (D_{ijkl}) requeridos en Abaqus se asumió coeficientes de Poisson (ν_{ij}) igual a cero (Abaqus, 2023). Los parámetros ortotrópicos adoptados en este estudio se resumen en la [Tabla 1](#). Por otro lado, para el núcleo de poliestireno de alta densidad se asumió un comportamiento isotrópico con un módulo de elasticidad $E_{EPS} = 2$ MPa y $\nu = 0.1$ (García et al., 2016). La madera del marco perimetral y clavaderas también se asumen isotrópicas con un módulo de elasticidad de $E_w = 6800$ MPa, $\nu = 0.36$ y un módulo de rotura en flexión estática de 34 MPa (Green et al., 1999). La resistencia a tracción de la adhesión entre los tableros OSB y el núcleo de EPS es de $S_{ADH} = 0.145$ Mpa. Este valor de resistencia y una separación de 0.1 mm se adoptaron para estimar un modelo de contacto cohesivo lineal definido por una tensión nominal máxima de 0.145 MPa, una rigidez elástica $K = 0.145 / 0.1 = 1.45$ MN/mm. Se adoptó una evolución del daño controlada por la energía por unidad de área definida por el área bajo el diagrama de tracción-separación para un desplazamiento a una separación de 0.2 mm e igual a $A_{energía} = 0.0145$ MN.mm/mm² (Wozniuk et al., 2023; Abaqus, 2023).

(f) *Tipos de análisis.* Para el modelado del panel a flexión se implementó un análisis estático geométrico no lineal, en el que las variables de interés son la deflexión máxima en el centro del panel y la reacción vertical resultante en los apoyos como resultado de los desplazamientos impuestos en los puntos de referencia PR-1 y PR-2 ([Figura 3\(d\)](#)). Para el modelado del panel a compresión se implementaron dos tipos de análisis: 1) de pandeo lineal para estimar las cargas críticas de pandeo correspondientes al primer modo; 2) Análisis geométrico no lineal para obtener las trayectorias de cargas y compararlas con resultados experimentales reportados en INTI (2016).

Constantes de Ingeniería [MPa]			Parámetros ortotrópicos (D_{ijkl}) [MPa]		
$E_1 = 5759$	$G_{12} = 972$	$\nu_{12} = \nu_{21} = 0.0$	$D_{1111} = 5759$	$D_{1212} = 972$	$D_{1122} = 0$
$E_2 = 1184$	$G_{13} = 45$	$\nu_{23} = \nu_{32} = 0.0$	$D_{2222} = 1184$	$D_{1313} = 45$	$D_{1133} = 0$
$E_3 = 90$	$G_{23} = 45$	$\nu_{31} = \nu_{13} = 0.0$	$D_{3333} = 90$	$D_{2323} = 45$	$D_{2233} = 0$

Tabla 1: Propiedades de material adoptadas para tableros de OSB.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Ensayo de flexión

En los ensayos reportados en INTI (2016) se utilizaron tres paneles sin clavaderas (configuración A) y tres paneles con clavaderas (configuración B). Inicialmente, ambos conjuntos de paneles se sometieron a carga no mayor a 10 kN al mismo tiempo que se medía deflexiones instantáneas (U_3) en dos puntos del centro del panel. El propósito de no exceder la carga total de 10 kN es mantener el panel en el régimen elástico. Una vez alcanzado ese límite de carga, los paneles se descargaron completamente y se midieron las deflexiones residuales. Para ambas configuraciones, la flecha promedio residual fue de 0.9 mm, indicativo de que los paneles no mostraron grandes deformaciones permanentes las cuales serían indicativas de falla del panel. Las [Figura 5\(a\)](#) y [5\(b\)](#) muestran una compilación de las cargas y deflexiones instantáneas medidas para cada configuración hasta el límite de carga de 10 kN. Los resultados

experimentales muestran un comportamiento claramente lineal ($R^2 > 0.99$), con una rigidez, medida por la pendiente de la curva de regresión lineal, similar para las dos configuraciones de paneles (0.947 kN/mm vs. 0.925 kN/mm). Estos resultados indican que, para la configuración de carga a flexión utilizada en las evaluaciones experimentales, la presencia de las clavaderas no influye en el comportamiento a flexión de los paneles.

Las Figura 5(a) y 5(b) también incluyen curvas de reacción vertical total vs. deflexión en el centro del panel calculadas por el modelo de elementos finitos. La curva de regresión lineal, calculada en base a todo el conjunto de mediciones de cada configuración, se utiliza como referencia para comparación con los resultados de las simulaciones. De la comparación de ambas curvas surge que el modelo tiene una aparente mayor rigidez para cargas por debajo de 6 kN, que luego se reduce ligeramente a medida que la carga se acerca a los 10 kN y se aproxima mejor a las mediciones experimentales. Este ligero cambio de pendiente en la curva obtenida de las simulaciones se atribuye a una posible pérdida de rigidez debido a un reajuste de los nudos de algunos de los elementos con condiciones de contacto cohesivo, así como a una posible pérdida de adhesión en alguno de los elementos del tablero OSB en contacto con el marco perimetral o el núcleo central. A pesar de este ligero cambio de pendiente, las curvas de simulación se aproximan razonablemente bien a las curvas de regresión que agrupan los resultados experimentales.

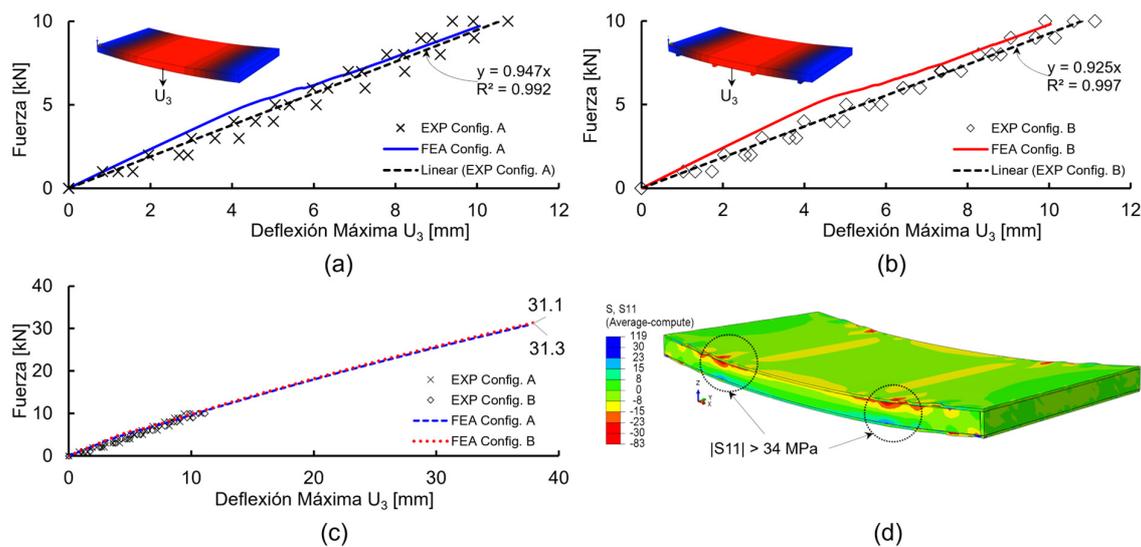


Figura 5: Resultados de ensayo de flexión: (a)-(b) Experimentos vs. simulaciones para configuraciones A y B; (c) Simulaciones hasta carga de rotura; (d) Tensiones longitudinales (S_{11}) para carga de rotura.

Posteriormente a la evaluación de los paneles en el rango elástico, los ensayos experimentales a flexión continuaron la carga de los paneles hasta rotura por flexión. La Tabla 2 resume los valores de carga máxima alcanzadas antes de la rotura de los paneles. Los resultados indican nuevamente que los valores promedios son similares para ambas configuraciones (27.7 kN vs. 24.8 kN) y con una dispersión relativamente baja (coeficiente de variación, C.V. entre 9% y 14%), indicativos de un comportamiento similar en todos los paneles ensayados. Si bien las deflexiones hasta carga de rotura no están reportadas en INTI (2016), se utilizó el modelo para estimar la curva carga-deflexión hasta rotura. La Figura 5(c) muestra una continuación de las curvas no lineales de carga-deflexión obtenidas para las dos configuraciones de paneles. Los resultados muestran que, para una carga de ~31 kN (entre ~12% y ~25% mayor a los valores promedios resumidos en la Tabla 2), los montantes alcanzan tensiones

longitudinales (S_{11}) de compresión y tracción longitudinal mayores a 34 MPa que corresponden al módulo de rotura (34 Mpa) de la madera del marco perimetral. Las zonas donde las tensiones exceden el módulo de rotura se muestran en la [Figura 5\(d\)](#) y se corresponden con las zonas de falla observadas en los experimentos reportados en INTI (2016).

Panel	Flexión [kN]		Compresión [kN]	
	Config. A	Config. B	Config. A	Config. B
#1	30.2	25.0	230.9	253.0
#2	27.6	21.1	219.3	228.9
#3	25.2	28.2	237.1	257.2
Promedio	27.7	24.8	229.1	246.4
Desviación. Std. (DS)	2.5	3.6	9.1	15.3
C.V. = (DS/Promedio)*100	9%	14%	4%	6%

Tabla 2: Resumen de cargas de rotura medidas experimentalmente (INTI, 2016).

3.2 Ensayo de compresión excéntrica

Para los ensayos de compresión se usaron las mismas configuraciones y cantidad de paneles que los usados para los ensayos a flexión. Los ensayos también se realizaron en dos etapas. En la primera, los paneles se cargaron de manera escalonada hasta una carga máxima de 78 kN y se midió el acortamiento vertical instantáneo (U_2) y acortamientos residuales para cada escalón de carga. Con esta secuencia de carga, los paneles se mantuvieron en el régimen elástico y en todos los paneles los acortamientos residuales no fueron mayores a 0.1 mm (INTI, 2016).

Las [Figura 6\(a\)](#) y [6\(b\)](#) compilan los valores de acortamiento instantáneo medidos experimentalmente para cada configuración de panel. Los resultados muestran que en ningún caso la magnitud del acortamiento excede los ~ 1.4 mm. Ambas configuraciones también muestran un comportamiento claramente lineal revelado por una curva de regresión lineal con $R^2 > 0.99$. Los paneles sin clavaderas muestran una rigidez menor (~ 62 kN/mm) que los paneles con clavaderas (~ 72 kN/mm).

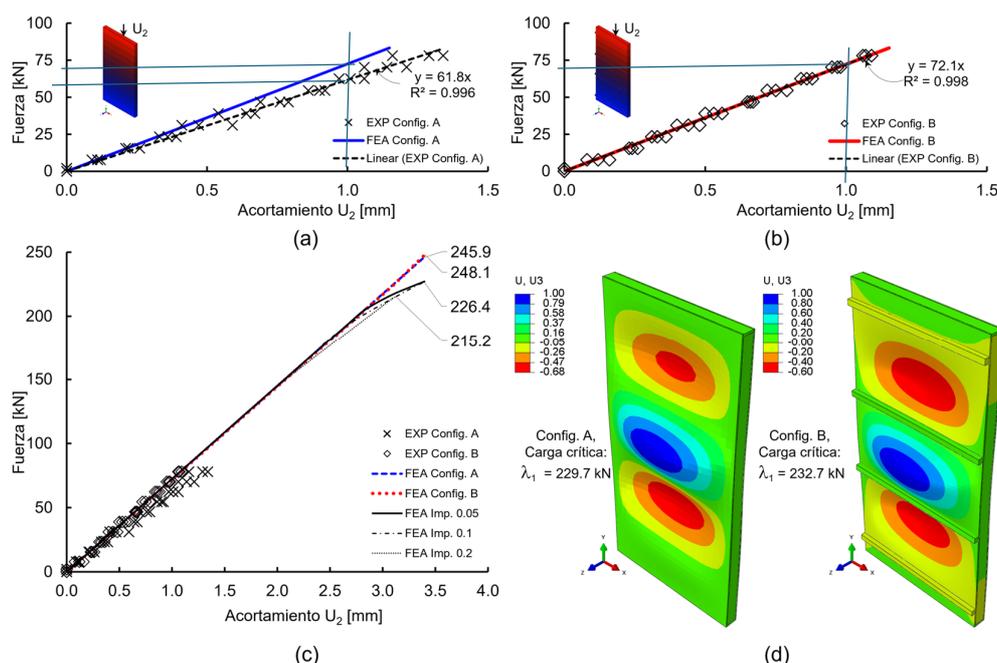


Figura 6: Resultados de ensayo de compresión excéntrica. Para configuraciones A y B: (a)-(b) Experimentos vs. simulaciones; (c) Simulaciones hasta carga de rotura; (d) Cargas crítica y primer modo de pandeo normalizado.

Las [Figura 6\(a\)](#) y [6\(b\)](#) también muestran los resultados obtenidos de las simulaciones. La correlación entre rigideces predecidas por las simulaciones y experimentos es mejor en el caso de los paneles con clavaderas que en los paneles sin ellas. La diferencia se atribuye a la posible presencia de imperfecciones en la geometría o materiales de los paneles usados en los experimentos, o en la configuración del sistema de aplicación de carga en los paneles sin clavaderas que resultaron en una rigidez menor que la rigidez de los paneles con clavaderas.

En la segunda parte de las mediciones experimentales los paneles se cargaron hasta producir la falla de estos. La [Tabla 2](#) resume las cargas de rotura de cada panel y valores promedios de cada configuración. Los paneles sin clavaderas soportaron una carga promedio de rotura a compresión de 229.1 kN, mientras que los paneles con clavaderas alcanzaron los 246.4 kN (+7.4%). De manera similar a los ensayos de flexión y dado que el acortamiento de los paneles hasta la carga de rotura no se reporta en INTI (2016), se utilizan las simulaciones para estimar las trayectorias de carga-acortamiento más allá del comportamiento elástico inicial. La [Figura 6\(c\)](#) muestra los resultados de las simulaciones para ambas configuraciones. Si los paneles no tienen imperfecciones geométricas, el comportamiento se mantiene prácticamente lineal hasta alcanzar cargas del orden de 248 kN para un acortamiento de 3.4 mm.

Por otro lado, también se realizó un análisis de bifurcación lineal para determinar las cargas críticas y modos de pandeo de los paneles. Los valores de carga crítica fueron 229.7 kN y 232.7 kN, para las configuraciones A y B respectivamente. El valor ligeramente más alto obtenido para el panel con clavaderas se atribuye al posible efecto rigidizante que produce la inclusión de las clavaderas. También es de notar la similitud entre los valores de las cargas críticas con los valores medidos experimentalmente ([Tabla 2](#)). La [Figura 6\(d\)](#) muestra la similitud del primer modo de pandeo de ambas configuraciones de paneles. La forma de este primer modo de pandeo se introdujo como una imperfección en análisis no lineales adicionales para determinar qué magnitud de imperfección produciría una reducción de la carga de rotura. En los análisis no lineales se introdujeron tres niveles de imperfección: 5%, 10% y 20% de la amplitud normalizada del primer modo de pandeo del panel sin clavaderas. Los resultados graficados en la [Figura 6\(c\)](#) muestran que una imperfección con la forma del primer modo de pandeo y con amplitud del 5% reduce la carga máxima a 226.4 kN y una amplitud del 20% reduce la carga máxima a 215.2 kN. Los resultados de las simulaciones con imperfecciones también muestran que éstas parecen influir en la rigidez global del panel recién hacia el final de la secuencia de carga. Esto se puede apreciar en la curva fuerza-acortamiento para una imperfección de 20% en la que no se ve un cambio significativo en rigidez global del panel hasta alcanzar una carga de compresión de alrededor de 150 kN ([Figura 6\(c\)](#)). En el caso de una imperfección del 10%, no hay un cambio de rigidez notable hasta alcanzar los ~200 kN. Estas predicciones deberán confirmarse con ensayos adicionales midiendo la trayectoria completa de la curva carga-acortamiento y además de las deflexiones transversales al plano del panel para confirmar que la asunción de una imperfección con la forma del primer modo es razonable.

4 CONCLUSIÓN

Este trabajo presenta los resultados de evaluaciones numéricas con elementos finitos llevadas a cabo para analizar el comportamiento estructural de dos configuraciones de paneles SIP sometidos a flexión y compresión excéntrica. Los resultados numéricos se comparan con evaluaciones experimentales. Los resultados muestran que modelos que incluyen una representación detallada de los componentes del panel considerando la presencia de clavos, contacto cohesivo para representar la adhesión entre componentes del panel, así como las interacciones de contacto entre componentes para aplicación de cargas permiten reproducir razonablemente bien los resultados experimentales disponibles.

Considerando que las evaluaciones experimentales de paneles SIP pueden llegar a ser muy

costosas, el desarrollo de una metodología de modelado detallada y validada experimentalmente constituye una herramienta valiosa para la predicción del comportamiento estructural de paneles con diferentes configuraciones de fabricación y propiedades de los materiales que componen el panel, así como también la posibilidad de combinar múltiples paneles para comprender la interacción entre ellos cuando se someten a diferentes configuraciones de carga.

Agradecimientos. Los autores agradecen SECYT-UNCo y Ariel Cubria por brindar y gestionar el acceso a información técnica necesaria para el desarrollo de este estudio. La contribución del Dr. Eduardo M. Sosa a este estudio se originó durante la estancia en UNComa como parte del *Fullbright Specialist Program* completada en marzo de 2024.

REFERENCIAS

- Amran, Y.H.M., El-Zeadani, M., Leed, Y.H., Lee, Y.Y., Murali, G., and Feduik, R., Design innovation, efficiency and applications of structural insulated panels: A review. *Structures*, 27:1358-1379, 2020.
- Birman, V. and Kardomateas, G.A., Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 142: 221-240, 2018.
- Calquín, P.V., Mechanical tests on a structural thermo-insulating panel (SIP) of 89 mm thick with EPS core and 9.5 mm OSB facings, PART 2: Bending test, Report N°666685-02, Faculty of Medical Sciences and Mathematics of Chile, 2011.
- Chen, W. and Hao, H., Performance of structural insulated panels with rigid skins subjected to windborne debris impacts. Experimental investigations. *Construction and Building Materials*, 77:241–252, 2015.
- CIRSOC 601, *Argentine Regulation for Wooden Structures*. Research Center of National Safety Regulations for Civil Works. Buenos Aires, 2016.
- García, N.P., Anguas, P.G., Salazar, A.P., Hidalgo, R.J. and Mondragón, F.C., Evaluación de las propiedades mecánicas del poliestireno expandido". *Instituto Mexicano del Transporte*, Publicación Técnica No. 476, 2016.
- Green, D.W., Winandy, J.E. and Kretschmann, D.E., *Chapter 4: Mechanical Properties of Wood, Forest Products Laboratory. Wood handbook—Wood as an engineering material*. Gen. Tech. Rep. FPL–GTR–113. Madison, WI, US, 1999.
- INTI, *Centro de Investigación y Desarrollo en Construcciones*. Informe de Ensayo OT 101-26308, Instituto Nacional de Tecnología Industrial, Buenos Aires, 2016.
- Kermani, A., Performance of structural insulated panels. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings*, 159(SB1):13–19, 2006.
- Rojas, C.A.R., *Technical analysis of the use of SIP panels in the construction of single-family houses*. Thesis, Technical University Federico Santa Maria, King Baduino of Belgium, 2018.
- Rubilar, G.S., Mechanical tests on a structural thermo-insulating panel (SIP) of 89 mm thick with EPS core and 9.5 mm OSB facings, Part 4: Horizontal load test, Report N°729465-04, Faculty of Medical Sciences and Mathematics of Chile, 2012.
- Santarelli, E. and Manzione, P., Mechanical Tests of Structural Panels. Report 02/18GEPsYN, Department of Applied Mechanics, Universidad Nacional del Comahue, 2018.
- Simulia/Abaqus. *Abaqus User's Manual*, Versión 2023. Dassault Systèmes, Providence, RI; 2023.
- Wozniuk, C.G., Sosa, E.M. and Jaca, R.C., Numerical investigation of buckling of Structural Insulated Panel under in-plane loading. *Mecánica Computacional*, 50: 329-338, 2023.
- Yang, H.F., Liu, W.Q., Lu, W.D., Yan, S.A., Experimental Study on Seismic Behaviors of Structural Insulated Panel Shear Walls under Cyclic Loading. *Advanced Materials Research*, 143: 529-534, 2011.
- Yang, J., Li, Z. and Du, Q., An Experimental Study on Material and Structural Properties of Structural Insulated Panels (SIPs). *Applied Mechanics and Materials*, 147:127-131, 2012.