

ENGLISH VERSION.....

Mechanical Response of Steel Sheets with Perforations for Composite Floor Systems with Reinforced Concrete and the Application of Emitted Magnetic Signals as an Approximate Tool for Structural Monitoring.

Respuesta mecánica de láminas de acero en presencia de perforados para sistemas de entrepiso compuestos con concreto reforzado y la aplicación de la señal magnética emanada como herramienta aproximada de monitoreo estructural.

*Ramírez-Benavides, Viviana **
*Montenegro-Bermúdez, Jorge **
*Núñez-Moreno, Federico A *¹*

* Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá - COLOMBIA

Fecha de Recepción: 14/07/2024
Fecha de Aceptación: 22/07/2024
Fecha de Publicación: 01/08/2024
PAG: 200-218

Abstract

Recently composite flooring systems have been widely accepted as a construction solution, due to their various constructive advantages, Among them mainly the savings during construction which results in lower costs. This calls for a continuous study to improve said flooring system. In the present research, the flexural capacity of a series of composite flooring prototypes (made of concrete plus a steel deck with a surface modification into a vented deck), helped in comparing the mechanical response (maximum load and deflection) with classical composite steel deck systems. At the same time as monitoring deflection (as the load changed), one sensor reported the surface magnetic flux at a nearby area. It was possible to see a strong correlation between larger changes in deflection and the emanated magnetic flux at the surface of the steel deck. Three stages are available to see as the test continued: i) complete elastic behavior, ii) rise in tensile demand on the steel deck, iii) loosening of the composite behavior and ultimately collapse. Mechanical results show almost no difference between those composite flooring systems made with continuous steel decks when compared to those with vented decks.

Keywords: *Composite section; magnetic field; vented decks; steel deck*

Resumen

Los sistemas de entrepiso compuestos con el paso del tiempo han tenido una mayor aceptación por parte de la industria de la construcción, gracias a las bondades que presentan frente a otros tipos de entrepiso. Entre sus principales bondades se encuentran el ahorro en tiempo de construcción lo que finalmente se reduce en menores costos. Por lo antes mencionado, el desarrollo de nuevas tecnologías u optimizaciones a las mismas son necesarias. En la presente investigación experimental se analizó el comportamiento mecánico a flexión de una serie de probetas de sistemas de entrepisos compuestos, hechos con concreto y láminas de acero colaborante con perforados en el valle de la lámina (paralelos a los ejes de las costillas del entrepiso). Los resultados fueron comparados con otra serie de probetas de sistemas de entrepiso similares, hechos con láminas convencionales (sin ningún tipo de perforación). Los resultados fueron analizados desde el punto de vista de la deflexión máxima en el centro de la luz, de la máxima carga reportada durante el ensayo a flexión y del monitoreo del flujo magnético superficial de las fibras mayormente solicitadas a tensión en la lámina de acero. Se reportaron comportamientos de falla mediante mecanismos de fractura por bloque de compresión, fallas por zonas de tensión en el concreto y pandeos localizados en la lámina una vez el sistema dejó de trabajar como sistema compuesto. Se identificaron correlaciones en el tiempo entre los picos de carga y los comportamientos diferenciales de la señal de flujo magnético, identificando tres instantes claramente identificables mediante el uso del magnetismo como variable de monitoreo estructural: i) elasticidad compuesta, ii) aumento de la tensión en la lámina de acero, iii) pérdida de la sección compuesta y colapso del sistema de entrepiso. Finalmente, los resultados de capacidad del sistema de entrepiso con el sistema de perforados longitudinales, no representó un incremento sustancial en la capacidad del entrepiso comparado con el sistema de construcción con lámina convencional.

Palabras clave: Sección compuesta; campo magnético; entrepiso perforados; lámina de acero perforada; lámina colaborante.

¹ Corresponding author:

Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá - COLOMBIA Corresponding author: fnunez@javeriana.edu.co



Esta obra está bajo una licencia internacional internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

ENGLISH VERSION.....

1. Introducción

Las losas de entrepiso con lámina colaborante cuentan como principio general para su desempeño la teoría del comportamiento compuesto de dos materiales: el acero y el concreto. El acero cumpliendo varias funciones entre ellas: i) sirve de encofrado para fundir el concreto que conforma la losa y ii) resistir las sollicitaciones de tracción tanto en el proceso constructivo como en su vida útil. El concreto por su parte asume las sollicitaciones a compresión de la losa. El éxito del desempeño de este tipo de secciones se encuentra en garantizar que el concreto resista únicamente las sollicitaciones a compresión y la lámina de acero las de tensión, buscando el equilibrio perfecto del diagrama de esfuerzos (Sabelli et al., 2011).

La interacción de estos dos materiales se presenta debido a los factores tales como adherencia química, fricción (debido a la micro rugosidad de la lámina de acero) e interferencia mecánica entre volúmenes sólidos). La interferencia mecánica se podría mejorar al suministrar a la lámina clásica (que generalmente es lisa a simple vista), una serie de embozados con los que cuenta la lámina colaborante a lo largo de la sección. Estos detalles podrían ser un factor que impida el deslizamiento longitudinal producido por las sollicitaciones a las que está sometido el material (referencia). A lo largo de la historia del desarrollo de este sistema compuesto se han investigado diferentes formas, configuraciones y variables de los embozados como su forma, inclinación y profundidad que sirvan para mejorar la interacción entre los dos materiales. Adicionalmente para controlar las fisuras producidas durante el fraguado, y en el caso de losas continuas para soportar el momento negativo, se emplea refuerzo de acero adicional el cual consta de acero corrugado dispuesto en forma de malla electrosoldada (Marimuthu et al., 2007).

El estudio de materiales compuesto se remonta a finales de los años treinta. Para sistemas de entrepiso compuestos, una de las primeras investigaciones relevantes se presentó por H.D. Wrigth y H.R. Evans en 1986, en la cual se construyeron y fallaron especímenes de diferentes tipos de lámina colaborante existentes en la época, unas con secciones en la lámina colaborante trapezoidales y otras con secciones rectangulares. Se establecieron las primeras relaciones, entre la geometría y materiales de la losa, contra los esfuerzos resultantes, para poder determinar los factores m-k de adherencia que funcionan como uno de los parámetros para diseñar estos sistemas de entrepiso compuesto (Wright et al., 1987).

Con el progreso de la tecnología las investigaciones teóricas tuvieron mejoras en los resultados gracias a modelos numéricos computarizados. Es así como (Ferrer et al., 2006) modelaron mediante elementos finitos, diferentes tipos de lámina colaborante determinando qué geometría y tipo de embozado representaba un mejor comportamiento estructural de esta. Además, compararon los resultados numéricos mediante elementos finitos, con resultados experimentales realizados con el fin de buscar una calibración del modelo numérico. Finalmente se determinó que los factores de mayor afectación a la capacidad de la lámina colaborante son la pendiente del embozado y la sección transversal de la lámina, siendo la sección trapezoidal la que mejor resistencia aporta a la sección compuesta. La pendiente del embozado es el parámetro determinante que evita un desplazamiento longitudinal entre acero y el concreto.

La falla de los sistemas de entrepiso compuestos se puede monitorear experimentalmente por medio de deflexiones, deformación unitaria en la lámina de acero (o en el concreto), o bien mediante la identificación visual del daño acumulativo, o bien por variaciones notorias en la capacidad de carga aplicada. Sin embargo, para detección del daño en elementos de acero, es deseable contar con otras variables experimentales que tengan una mayor sensibilidad y que permitan identificar elementos de falla en una escala fuera de la capacidad visual (Nunez-Moreno, 2014).

De esta manera, en la presente investigación se estudió el comportamiento mecánico de un sistema compuesto, que en la lámina colaborante cuenta con una configuración adicional de embozados, los cuales se encuentran ubicados en los valles de la lámina. Para el desarrollo de la investigación se desarrollaron ensayos, bajo el estándar C-2017 Standard for Composite Steel Floor Deck-Slabs (American National Standards Institute and Steel Deck Institute, 2017) a catorce especímenes. Siete de estos contaron con una lámina colaborante convencional, con parámetros y características típicas del steel deck estándar, mientras que los otros siete especímenes restantes contaron con una lámina colaborante que incorpora una geometría nueva de embozados, que se presentan como unas perforaciones en los valles de la lámina. Se dio especial relevancia a los resultados de las deflexiones en el centro de la luz del espécimen y el campo magnético en los 2 ejes principales de la sección buscando tener un panorama adicional de obtención de propiedades mecánicas que permita estudiar de una manera no convencional el comportamiento de la capacidad del elemento bajo estudio.

ENGLISH VERSION.....

2. Metodología

Esta investigación realizó una serie de ensayos a escala natural a flexión de secciones compuestas de lámina colaborante, en dos grupos cada uno con siete probetas. El primer grupo es un entrepiso compuesto por concreto y lámina colaborante en acero con embozados (grupo C) y el segundo, es un entrepiso con lamina colaborante la cual tiene embozados y perforados simultáneos (grupo P). Así mismo, se caracterizaron las propiedades del concreto por medio de ensayos a compresión (ASTM, 2015).

Estos ensayos permitieron estudiar el efecto mecánico de incluir perforados en la lámina colaborante para un sistema compuesto. Este efecto se midió a través de las deflexiones en el centro de la luz y el cambio del flujo magnético superficial en la lámina colaborante (piezomagnetismo) en las proximidades de la lámina en el centro de la luz.

Lo anterior permitió determinar los factores “m” y “k” (fricción y adherencia en la sección compuesta) y adherencia al cortante. Una vez determinadas estas variables para cada tipo de probeta, se desarrolló un análisis de variabilidad estadístico de carácter independiente entre grupos y un análisis comparativo entre grupos. Dicho análisis, como función de la geometría de la probeta, disposición del ensayo y carga de ruptura de la probeta.

2.1. Comportamiento teórico

Se estimó un valor teórico de la resistencia de la sección, para establecer la instrumentación necesaria a implementar en el laboratorio, así como para verificar la capacidad del actuador de carga y los elementos de medición de las variables que se estudiaron. La determinación de esta resistencia se realizó de manera numérica, con los parámetros identificados en la (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros de diseño de la sección compuesta

Parámetro	Magnitud
Espesor de la losa (mm)	120
Calibre de lámina colaborante	22
Grado de acero lámina colaborante	50
F _y - Esfuerzo fluencia (MPa)	340
S _{ic} - Modulo elástico de la sección compuesto para la fibra inferior de acero (mm ³ *mm)	63.41
C - constante que tiene en cuenta la ausencia de conectores de cortante	0.60
L _{EA} - Luz entre apoyos (mm)	1800
L _T - Luz Total (mm)	2000
W _{pp} - Peso Propio (N/mm)	2.29

De esta manera:

$$M_{resistente} = C * F_y * S_{ic}$$

$$M_{resistente} = 0.6 * 340MPa * 63.41 mm^3 = 12,935.64 N . mm$$

$$= 12.94 kN . m$$

Finalmente se estableció que la carga máxima aplicada que resiste la sección compuesta es de 38.55 kN.

ENGLISH VERSION.....

$$q_{adm} = \frac{6 * M_{resistente}}{L_{EA}} - W_{PP} * L_T$$

$$q_{adm} = \frac{6 * 12.94 \text{ kN.m}}{1.8 \text{ m}} - 2.29 \text{ kN/m} * 2 \text{ m} = 38.55 \text{ kN}$$

2.2 Análisis por simulación numérica

2.2.1 Distribuidor de carga

Inicialmente se diseñó el distribuidor de carga que aplicó la carga del sistema de carga hidráulico a la probeta en los tercios de manera linealmente distribuida (ver (Figura 1)). Este elemento está diseñado con acero tipo A500 Grado C con $F_y = 345 \text{ MPa}$ (50 ksi); $F_u = 425 \text{ MPa}$ (60 ksi).

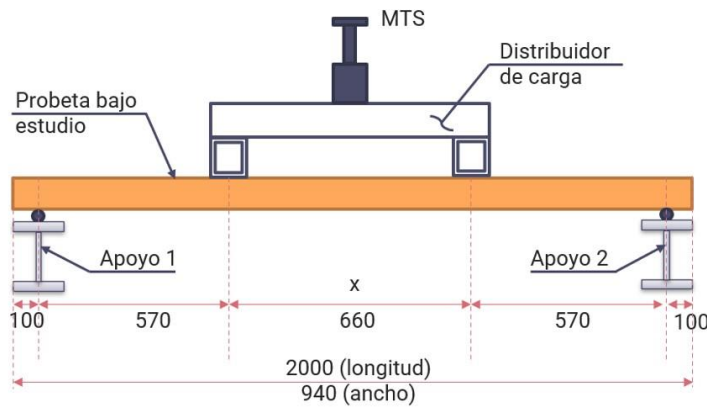
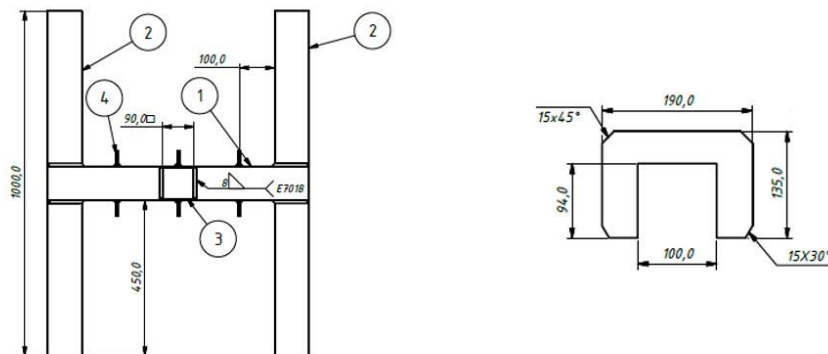


Figura 1. Esquema geométrico ensayo a flexión estándar ANSI C-2017 (Unidades en mm).

Durante la aplicación de carga, se limitó la operación del distribuidor de carga asumiendo una deflexión última de $L/1000$ (calculada a partir de la carga obtenida del comportamiento teórico). La luz de ensayo se midió entre apoyos.

En cumplimiento a los requerimientos establecidos se construyó el distribuidor de carga en perfiles de acero tipo HSS 100x100x6 (ver (Figura 2)).



Pos	Dimensiones	Cantidad	Descripción
4	190X135X1/4"	3	RIDIGIZADOR
3	90X90X8	1	PLATINA SUFRIDERA
2	100x100x3x1000	2	PERFIL TUBULAR CUA. ACESCO 100X100X3
1	100x100x3x760	1	PERFIL TUBULAR CUA. ACESCO 100X100X3
			ESPECIFICACIONES

ENGLISH VERSION.....

Figura 2. Esquema distribuidor de carga (unidades en mm)

2.3 Preparación del ensayo

El ensayo se dividió en tres etapas: i) la elaboración de las probetas “in situ”, ii) preparación del ensayo en el laboratorio e instalación tanto de sistemas de monitoreo, como caracterización geométrica definitiva y iii) avance del ensayo hasta generar colapso en el entrepiso bajo estudio. Las etapas se desglosan de manera detallada a continuación:

2.3.1 Elaboración de especímenes por grupo

Como primer paso para la elaboración de las probetas se dispusieron las láminas del entrepiso de acero sobre secciones de madera para elevarlas del nivel del piso. Lo anterior con el fin de que estas no quedaran totalmente soportadas sobre el suelo y simular las condiciones de apoyo finales a las que se somete un sistema de estos. Lo anterior, dado que en la realidad durante el vaciado del concreto se promueve la unión directa (vínculo entre el concreto y la lámina) y para tener en cuenta la carga durante el proceso de curado (American Institute of Steel Construction, 2016).

2.3.2 Fundida y vibrado

El proceso de vertido del concreto premezclado dentro de la formaleta de madera se hizo hasta aproximadamente la mitad de la altura de esta. Luego se ubicó la malla electrosoldada que tuvo por función principal evitar grietas por retracción de fraguado. Finalmente se vibró el concreto usando un vibrador manual.

2.3.3 Curado

El proceso de curado de las probetas se realizó al siguiente día de la fundida y consistió en rociar agua sobre la superficie lisa de la probeta y cubrirla con una lámina de polietileno, lo anterior para minimizar la evaporación del agua. Se mantuvo la superficie húmeda de manera controlada por la semana siguiente al día de fundida del concreto.

2.4 Montaje experimental

Se realizó el montaje con la geometría y apoyos mostrados en la (Figura 3), generando una zona de franja finita para la aplicación de las cargas puntuales (ANSI - SDI, 2022). Así mismo, se instaló la instrumentación para monitorear los desplazamientos (deflexión) en el centro de la probeta de ensayo (mediante LVDT's en el centro de la luz) y un sensor de flujo magnético superficial ubicado en la cresta de la lámina de acero (la más cercana al LVDT) como se observa en la (Figura 3).

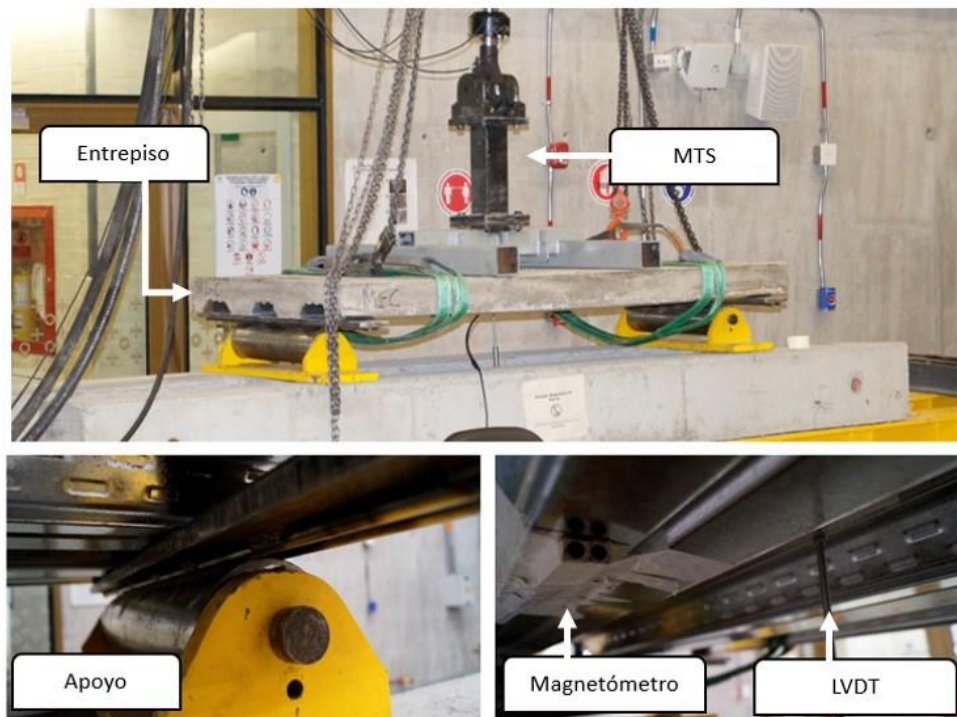


Figura 3. Apoyos e instrumentación de las probetas de ensayo a flexión

ENGLISH VERSION.....

La carga se aplicó de manera monótonica hasta la ruptura de la probeta, manteniendo un control de desplazamiento. El protocolo de carga se simplificó a contar con una tasa de desplazamiento de 3mm/min, hasta que el desplazamiento máximo no sobrepasara los 100mm, en cuyo caso el ensayo finalizaba de manera inmediata. La adquisición de datos de desplazamiento y de flujo magnético superficial se hizo a 2kHz.

3. Resultados

El ensayo de resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM, 2015) fue realizado para medir la resistencia media a la compresión del concreto usado en las secciones compuestas. Los resultados indican un f_c promedio de 21.95 MPa con una desviación estándar de 1.66 MPa para una muestra de cinco cilindros llevados a la rotura.

Un análisis estadístico general para cada grupo (C y P) de entresijos de sección compuesta (ver (Tabla 2)) se llevó a cabo para las variables de carga máxima, donde se reportó la deflexión en el centro de la luz (en el punto de mayor carga) y el deslizamiento entre losa de concreto-lámina colaborante (corrimiento horizontal entre materiales medido al finalizar cada ensayo). La carga máxima en promedio para el grupo P fue mayor a la del grupo C, presumiblemente debido a la inercia adicional de los perforados en la lámina colaborante del grupo P. Sin embargo, al comparar los coeficientes de variación de la carga máxima entre grupos y la diferencia en magnitud del valor medio, el grupo P presentó una mayor dispersión en los datos que el grupo C y la diferencia entre grupos es mínima, por lo que se infirió que la carga máxima promedio es similar.

Una diferencia considerable se observó en la deflexión entre grupos de probetas; no obstante, la alta dispersión de esta variable en el grupo P, claramente observado en una de las probetas del grupo, impidió hacer un análisis comparativo inicial. El deslizamiento longitudinal no indicó mayor diferencia entre los grupos. Posteriormente, las variables mencionadas son analizadas individualmente para entender el comportamiento mecánico del grupo para posterior comparación entre los grupos de probetas.

Tabla 2. Resumen de los resultados del experimento por grupo de probetas

Variable	Grupo C	Grupo P
Carga Máxima (kN)	47.13 (4.54-9.6%)	47.55 (5.61-11.8%)
Deflexión (mm)	3.76 (0.75-19.9%)	6.90 (5.28-76.4%)
Deslizamiento Longitudinal (mm)	25.43 (3.78-14.9%)	26.57 (1.90-7.2%)

*(Los números en el paréntesis indican la desviación estándar entre las probetas del grupo seguido del coeficiente de variación del valor medio con respecto a la muestra)

En función a lo anterior, los datos discriminados del grupo C para cada probeta por variable se observan en la (Figura 4), en donde la carga máxima (ver (Figura 4^a)) alcanzó la magnitud de ruptura desde 41.58kN hasta 52.28kN superando la carga teórica de 38.55kN para todas las probetas del grupo en cuestión. Los valores obtenidos de la deflexión en el punto de carga máxima con relación a la carga máxima no fueron proporcionales, presumiblemente por la localización de la falla al medir la deflexión únicamente en el centro de luz dado que para algunas probetas la deflexión máxima se alcanzó en puntos distintos al centro de la luz (Ver (Figura 4b)).

Para el deslizamiento longitudinal (Figura 4c) las deflexiones se reportaron entre 18 mm y 30 mm, en donde se evidenció que para las menores magnitudes (probeta 2 y 4) la localización de la falla fue en el centro de la luz lo cual incidió en este valor, ya que para estas probetas el deslizamiento se repartió en los dos extremos (izquierdo y derecho) como se puede observar en la (Figura 5a) y (Figura 5b). En concordancia en las probetas que fallaron en otros puntos diferentes al centro de la luz, el deslizamiento se distribuyó en solo un extremo como se puede observar en la (Figura 5c) y (Figura 5d), donde el deslizamiento se presentó únicamente en el extremo izquierdo.

ENGLISH VERSION.....

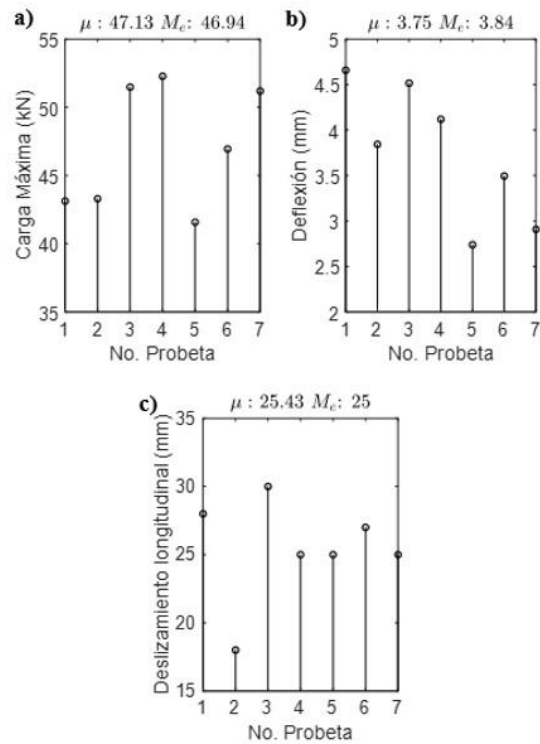


Figura 4. a) Carga máxima, b) deflexión en el punto de carga máxima y c) deslizamiento longitudinal grupo C.

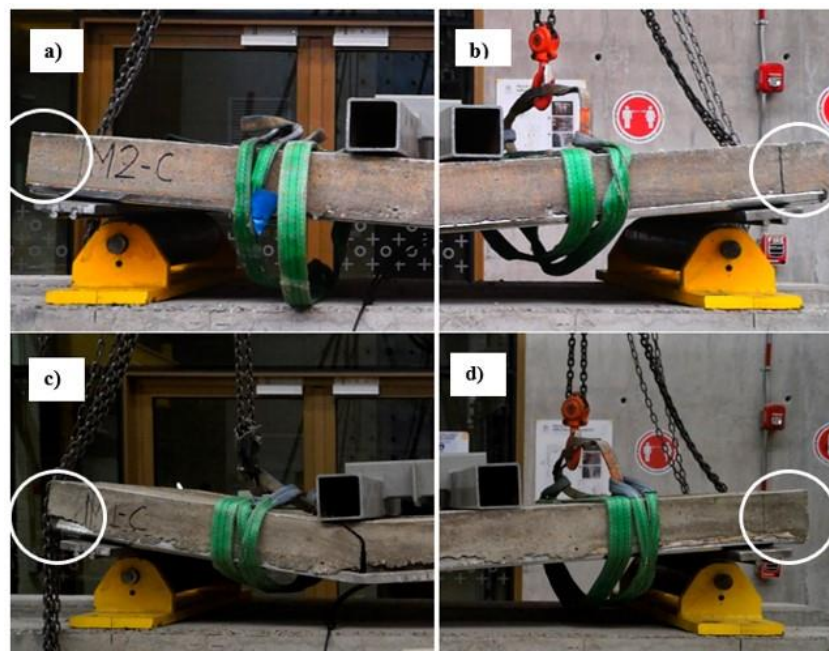


Figura 5. Deslizamiento longitudinal para probetas del grupo C. a) Extremo izquierdo probeta 2, b) Extremo derecho probeta 2, c) Extremo izquierdo probeta 1 y d) Extremo derecho probeta 1.

Los valores discriminados del grupo P se encuentran en la (Figura 6), en donde la carga máxima (Figura 6a) varía de 37.77 kN hasta 53.79 kN y la deflexión (Figura 6b) en un rango de 4.56 mm a 18.81mm. Lo anterior indica que la probeta siete (7) presenta comportamientos atípicos (comparados con los resultados del mismo grupo de probetas en carga máxima

ENGLISH VERSION.....

y deflexión). Estos valores atípicos son evidentes por las condiciones previas al ensayo de la probeta, ya que se identificaron fisuras (en particular para esta probeta) en el centro de la luz, con un ancho irregular a lo largo de la probeta y una mayor curvatura en el centro de la luz previo al ensayo (ver (Figura 7)).

Esto sugiere que la probeta 7 no trabajó como un sistema compuesto y como resultado la mayor carga no fue en el punto de falla de la sección compuesta sino en la falla de la lámina colaborante, haciendo que el desplazamiento en el punto de mayor carga fuera superior al del resto de las probetas.

Para el caso del deslizamiento longitudinal (Figura 6c) la magnitud se presentó entre 25mm a 30mm, implicando que el uso de perforados en la lámina colaborante limitó la dispersión de los datos (un comportamiento mecánico con mejor replicabilidad).

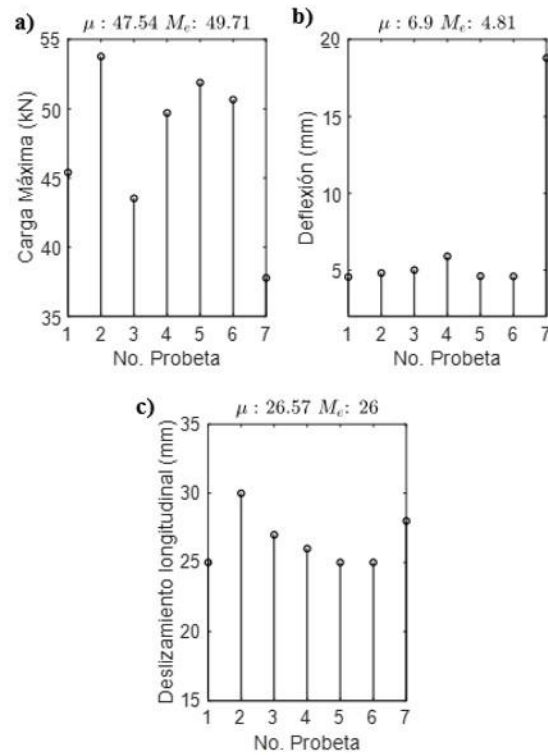


Figura 6. a) Carga máxima, b) deflexión en el punto de carga máxima y c) deslizamiento longitudinal grupo P.



Figura 7. Estado probeta 7 grupo P previo al ensayo. Se identificaron algunas fisuras iniciales.

ENGLISH VERSION.....

Comparativamente en referencia a la carga máxima se ajustaron los datos experimentales a una función de densidad normal, mediante simulación de Montecarlo empleando 3,000 simulaciones (ver (Figura 8)) observando que al tratar el valor atípico como un “outlier” (Figura 8b), la variabilidad del grupo P se reduce y la carga máxima aumenta. Sin embargo, los valores medios en proporción son similares en ambas graficas como se observa en la (Figura 8^a) y (Figura 8b).

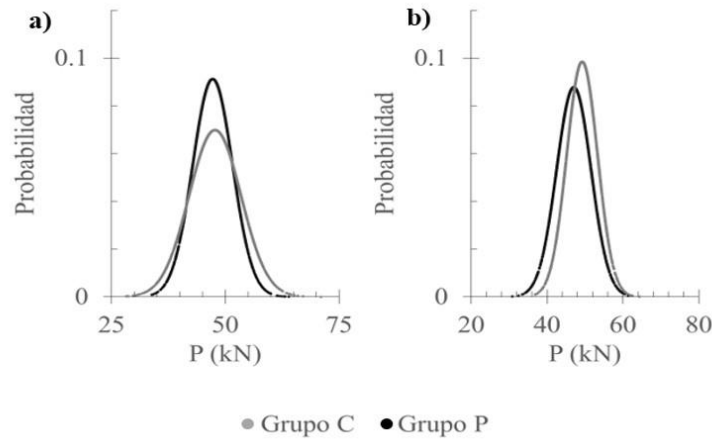


Figura 8. Simulación de Montecarlo variable carga máxima: a) Con probeta siete, y b) Sin probeta siete

Ahora bien, para la variable desplazamiento en el límite elástico se realizó el mismo análisis (ver (Figura 9)). En igual forma al tratar el valor atípico como un “outlier”, redujo significativamente la dispersión del grupo P. La diferencia del valor medio entre grupos no varió significativamente cuando se decidió incluir o no el valor atípico.

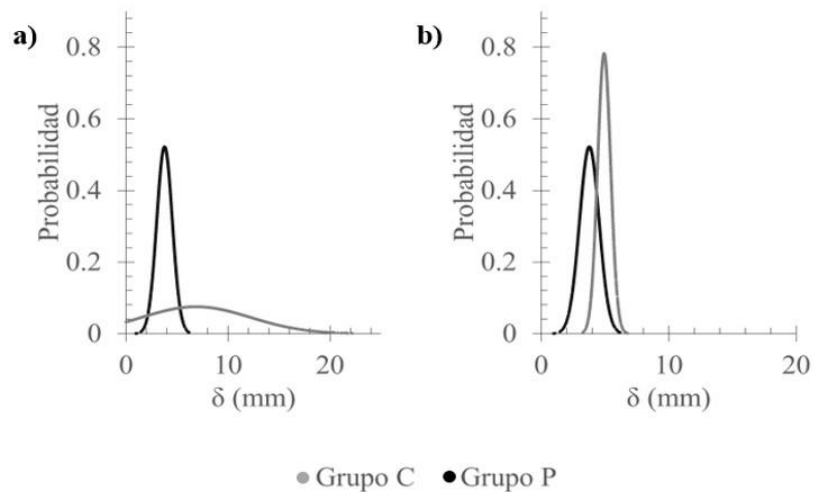


Figura 9. Simulación de Montecarlo variable deflexión limite elástico: a) Con probeta siete, y b) Sin probeta siete.

Para la variable de deslizamiento longitudinal (Figura 10) para ambos grupos es similar la media y no tiene incidencia la inclusión del dato atípico.

ENGLISH VERSION.....

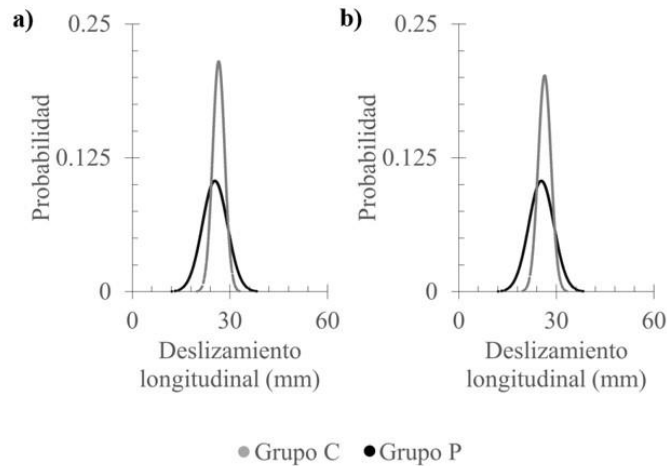


Figura 10. Simulación de Montecarlo variable deslizamiento longitudinal: a) Con probeta siete, y b) Sin probeta siete.

De los datos obtenidos de carga vs desplazamiento (deflexión) en el centro de la luz de cada probeta, se evaluó la relación de ductilidad por desplazamiento, siendo esta la relación entre la deflexión experimental total a la ruptura y la deflexión experimental en el límite elástico. La (Ecuación 1) fue utilizada para determinar el índice de ductilidad por deflexión Ω_{SD} .

$$\Omega_{SD} = \frac{u_{max}}{u_y} \quad (1)$$

De manera analógica (a los datos obtenidos del desplazamiento total), este valor se tomó para cada probeta cuando llegó al punto de capacidad igual a la mitad de la carga máxima, como se puede apreciar en la (Figura 11), justo donde se presenta el punto de corte entre las gráficas dentro de la zona inelástica (encerrado con un círculo).

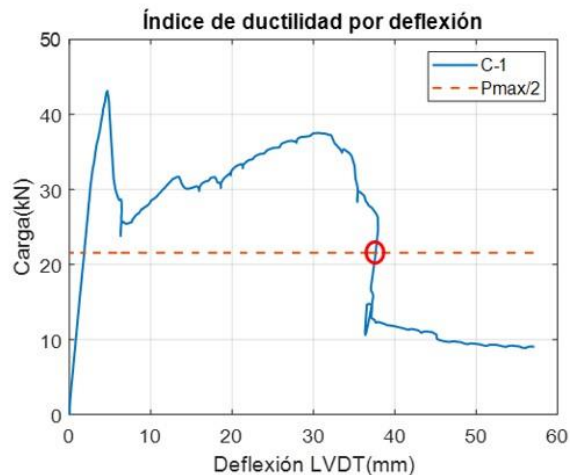


Figura 11. Cálculo de ductilidad tipo – probeta 1 grupo C

El índice de ductilidad por desplazamiento para cada grupo de probetas se presenta en la (Tabla 3) donde se observa que el promedio del índice de ductilidad para el grupo C es mayor al grupo P. Adicionalmente, los índices para ambos grupos son mayores a la unidad (1.0) lo que indica que para cada probeta se presenta una falla semi dúctil en su comportamiento.

ENGLISH VERSION.....

Tabla 3. Índice de ductilidad por deflexión por grupos de probetas

No.	Grupo C	Grupo P
1	8.04	3.81
2	15.94	2.96
3	4.28	11.70
4	14.73	6.00
5	9.46	5.44
6	5.83	7.98
7	6.56	5.16
$\overline{\Omega}_{SD}$	9.26	6.15

En el ensayo a flexión se evidenció el deslizamiento entre la lámina colaborante y la losa de concreto. Posterior a esto se presentó la formación de fisuras en la losa de concreto y finalmente con el arrugamiento de la lámina colaborante (fenómeno de pandeo local). Las fallas descritas se pueden observar en detalle en la (Figura 12) y (Figura 13). En dichas figuras, se observa que estos fenómenos se presentaron recurrentemente cerca a los apoyos, puntos de distribución de carga y/o al centro de luz de la probeta. Así mismo, se evidencia que el deslizamiento longitudinal se presentó al costado de mayor proximidad a la falla de la losa.



Figura 12. Deslizamiento o corrimiento longitudinal probeta grupo C

ENGLISH VERSION.....

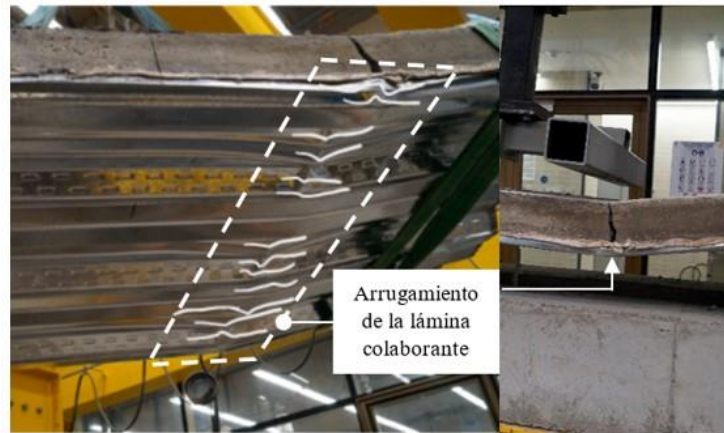


Figura 13. Arrugamiento (pandeo local) de lámina delgada

El comportamiento de la respuesta del sistema compuesto para las probetas del grupo C y P con respecto al desplazamiento, se describe por medio de tres regiones entre el punto de inicio de carga (0) y la ruptura (1, 2 y 3) mostrados en la (Figura 14) y (Figura 15). En un principio en la región 0-1, la carga asciende con una pendiente semi constante (comportamiento lineal) hasta llegar a la capacidad máxima lineal de la sección donde se presenta el desprendimiento de la lámina con respecto a la losa de concreto. Posteriormente, en la región 1-2 la carga desciende drásticamente considerándose posiblemente un mecanismo frágil de avance (posible pérdida de fricción entre el concreto y la lámina). Finalmente, en la región 2-3 la capacidad de la sección aumenta hasta llegar a la pérdida total de adherencia. En igual forma, se evidencia que la razón de cambio entre las variables de desplazamiento y carga es mayor para la región 2-3 que la 1-2. Este análisis se hizo de manera similar para las otras probetas. Los resultados se presentan en la (Tabla 4).

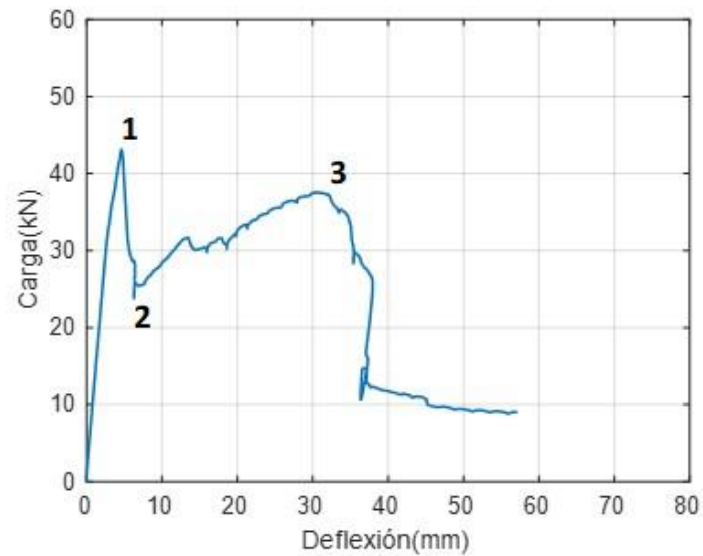


Figura 14. Carga vs Deflexión grupo C probeta 1

ENGLISH VERSION.....

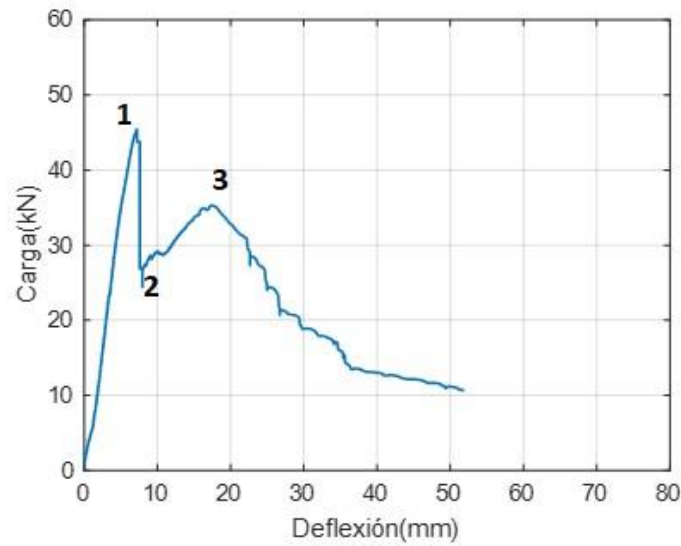


Figura 15. Carga vs Deflexión grupo P probeta 1

Tabla 4. Resumen de carga y deflexión de los puntos de distorsión por probeta

Probeta	Rango Distorsión (P[kN] - y[mm])		
	R 0-1	R 1-2	R 2-3
C1	43.12 - 4.66	23.85 - 6.29	37.47 - 31.10
C2	42.51 - 3.64	21.69 - 5.51	36.36 - 27.22
C3	50.90 - 4.36	33.54 - 5.88	39.94 - 16.14
C4	51.75 - 3.97	26.54 - 9.77	31.54 - 40.21
C5	41.30 - 2.66	19.57 - 4.18	34.42 - 17.59
C6	46.41 - 3.14	26.21 - 6.77	37.94 - 16.09
C7	50.48 - 2.78	23.88 - 4.83	33.13 - 10.69
P1	44.92 - 7.03	25.00 - 7.95	35.21 - 17.75
P2	53.71 - 7.57	26.34 - 8.57	34.85 - 15.25
P3	43.41 - 4.96	25.16 - 8.63	37.98 - 31.10
P4	49.23 - 5.46	26.64 - 7.83	38.24 - 28.29
P5	51.81 - 4.52	28.72 - 6.08	35.84 - 27.72
P6	49.73 - 4.02	35.75 - 7.00	42.56 - 19.33
P7	31.24 - 6.21	21.78 - 7.82	37.75 - 19.08

3.1 Deflexión

Las deflexiones en el rango elástico se evaluaron hasta el punto en donde se presenta la primera pérdida en la capacidad de la sección. De estos datos, se obtuvo un modelo lineal promedio, con base en los diferentes ensayos hechos (ver (Figura 17) y (Figura 16)). Con relación a la recta presentada se presentó el cálculo del trabajo aproximado durante el ensayo en el rango elástico (ver (Tabla 5)) y se asumió como una medida de la energía disipada por acción mecánica elástica (Ayneto Gubert and Ferrer Ballester, 2012). En promedio, el grupo P tiene una mayor capacidad de disipación de energía (dado que las probetas tuvieron deflexiones en el centro de la luz, sistemáticamente con mayor magnitud comparadas con las del grupo C), que aquellas para el grupo C.

ENGLISH VERSION.....

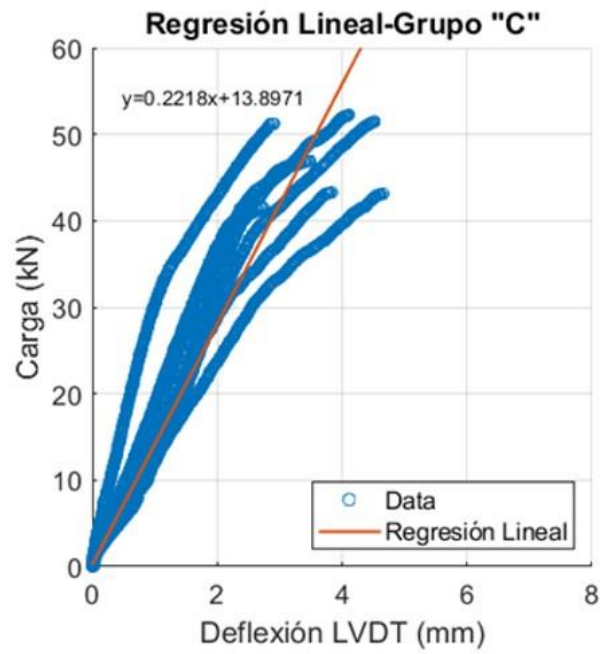


Figura 16. Regresión lineal carga vs deflexión grupo C

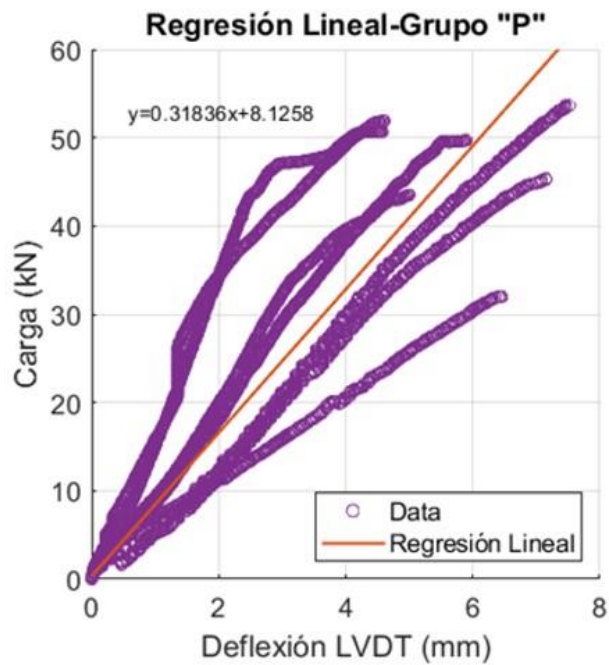


Figura 17. Regresión lineal carga vs deflexión grupo P

Tabla 5. Resultado de la variable Trabajo (W) en el rango elástico para cada grupo de probetas

ENGLISH VERSION.....

W_e Grupo C	W_e Grupo P
J (kN*mm)	J (kN*mm)
105.5	153.1

En lo concerniente al rango inelástico, se evaluó la energía absorbida en forma de daño (por el sistema compuesto) mediante la evaluación aproximada del trabajo. Dicho trabajo se evaluó numéricamente como el área bajo la curva, mediante la suma finita de trapecios infinitesimales. Al igual que en el rango elástico se evidenció mayor trabajo para el grupo P, como se puede apreciar en la (Tabla 6).

Tabla 6. Resumen de la variable Trabajo (W) en el rango inelástico para cada grupo de probetas

W_i Grupo C	W_i Grupo P
J (kN*mm)	J (kN*mm)
982.7	997.6

Finalmente, con los valores de las deflexiones experimentales en el centro de la luz, se comparó para los dos tipos de probetas bajo estudio vs la deflexión teórica (ver (Figura 18)). Como resultado, para el grupo C se identificaron diferencias de uno a tres veces con las deflexiones teóricas con respecto a las experimentales y el grupo P de uno a cinco veces de las deflexiones teóricas a las experimentales. Lo anterior se puede deber a fallas localizadas en puntos diferentes al centro de la luz, punto de deflexión máxima esperada, defectos de fabricación y fallas de colocación. Se asume que el concreto al ser una donación es de calidad, y por ende no se tiene errores asociados a la producción del concreto.

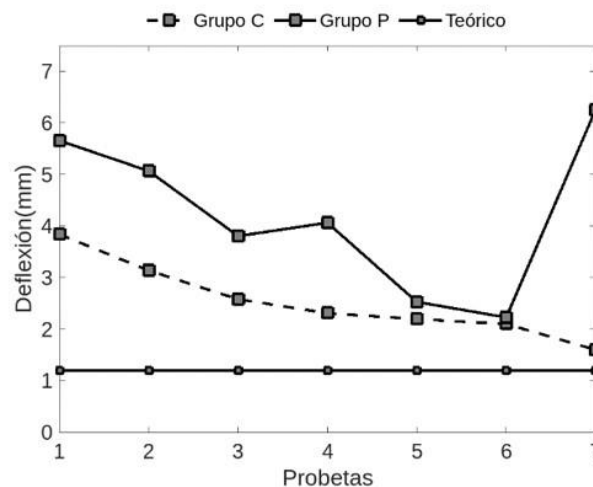


Figura 18. Deflexión teórica y experimental para los grupos C y P de probetas

3.2 Cortante longitudinal

Con relación al cortante longitudinal evaluado, se obtuvieron los coeficientes de enlace de cortante siguiendo lo estipulado en el estándar T-CD 2017 (American National Standards Institute & Steel Deck Institute, 2017) que arrojó como resultado los coeficientes denominados k5 y k6 (Coeficientes de enlace de cortante obtenidos por medio de un análisis de regresión lineal a partir de datos experimentales por cada espesor individual de lámina colaborante) para los grupos de

ENGLISH VERSION.....

probetas C de 461.26 y 0, y P de 464.99 y 0 respectivamente (ver (Ecuación 2))

$$Vt = bd \left(\frac{k5}{l'} + k6 \right) = 12 \cdot 4.33 \cdot \left(\frac{461.26}{l'} \right) * (0.0254)^2 \quad (2)$$

En función del cortante teórico mencionado y el cortante experimental, la dispersión del cortante teórico versus el experimental, indica valores para el grupo C de 17% y el grupo P del 13% como se muestra en la (Figura 19).

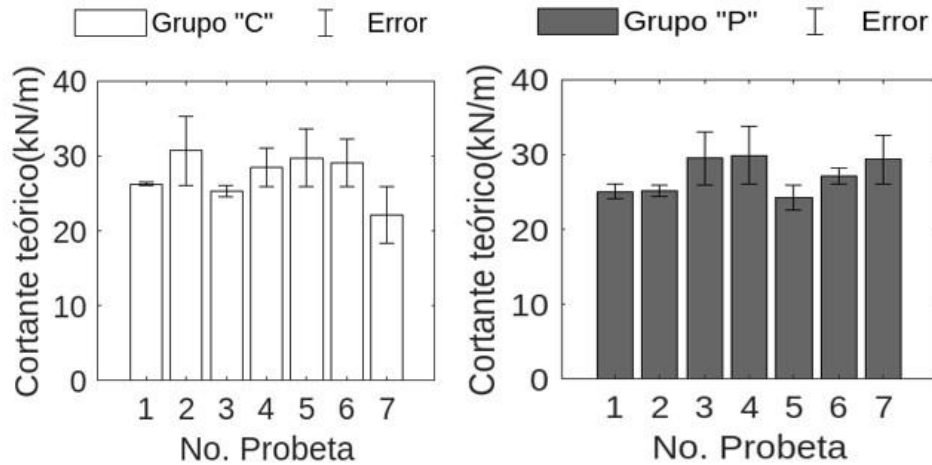


Figura 19. Dispersión cortante longitudinal probetas Grupo C y Grupo P

3.3 Medición del Flujo Magnético Superficial

El proceso de toma de datos del flujo superficial magnético superficial (longitudinal) generado por las deformaciones en la lámina colaborante (mediante el magnetómetro), se realizó con el objetivo de analizar los cambios de esta señal magnética de las diferentes probetas estudiadas.

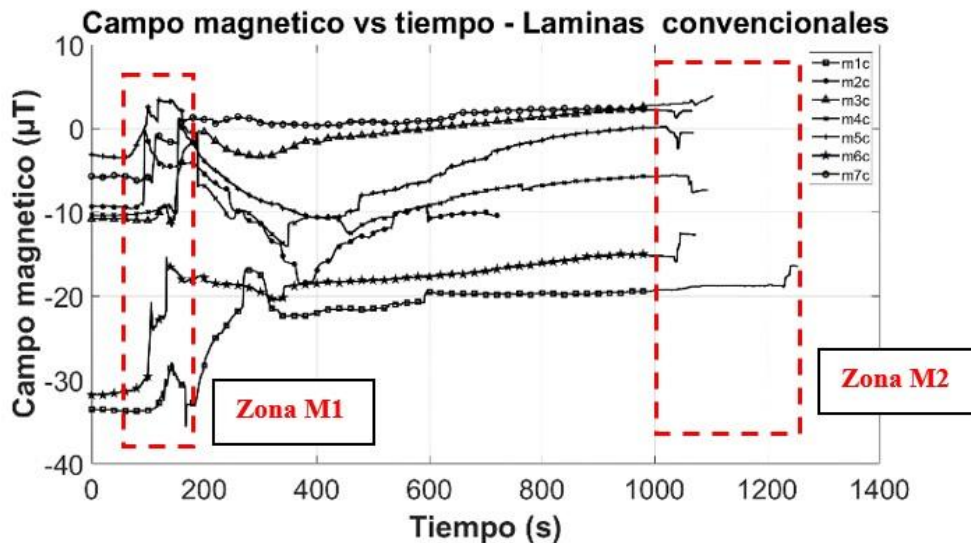


Figura 20. Resultado de las mediciones de campo magnético láminas convencionales – Grupo C

ENGLISH VERSION.....

Esto a medida que se hace el ensayo a flexión, para poder comparar el comportamiento, que la variable magnética presentó en función del tiempo, y poder correlacionar los datos del flujo magnético superficial (en el punto de análisis) con la deflexión en el centro de la luz en función del tiempo. Los resultados para las diferentes probetas se presentan en la (Figura 20) (para el Grupo C), y en la (Figura 21) (para el Grupo P). Es interesante ver las zonas M1 y M2, como comportamientos magnéticos diferenciadores del fin de la elasticidad y del inicio de la ruptura del sistema compuesto

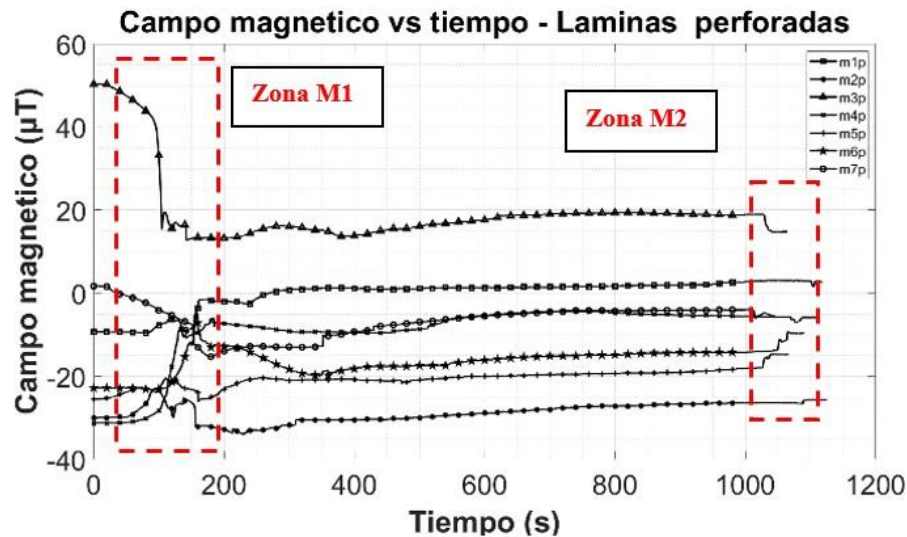


Figura 21. Resultado gráfico de las mediciones de campo magnético en láminas perforadas – Grupo P

En la (Figura 20) y la (Figura 21) se reportaron los datos obtenidos del magnetoscopio, para el grupo de láminas convencionales y perforadas respectivamente, evidenciado en los dos grupos, patrones en el comportamiento del flujo magnético superficial. Estos patrones permiten establecer una estrecha relación del flujo magnético (μT) con la aplicación de la carga y el comportamiento de esta variable en el tiempo.

Es interesante observar cómo el comportamiento del flujo magnético superficial emanado por la lámina de steel deck durante el ensayo, en gran medida se asemeja al comportamiento gráfico de la capacidad de carga de las probetas, en función del tiempo. El campo magnético presenta eventos de mayor magnitud, en instantes de tiempo que coinciden con la ruptura de la probeta o en eventos de altas concentraciones de carga y deflexión (ver (Figura 22)). El cambio del campo magnético permitió hacer un seguimiento de los fenómenos más importantes que sufre la lámina durante servicio; esto resultados resultan asemejarse más a los gráficos de capacidad del problema en cuanto a que la falla se presenta más cerca al sensor magnético.

El análisis cuantitativo del cambio de esta señal magnética indica capacidad a esfuerzos de tensión mayores para las láminas con ventilados en comparación con las láminas que no la tienen.

Es interesante ver como el campo magnético superficial, presenta los mismos saltos en el tiempo que cuando la probeta presenta pérdida de capacidad de carga. Lo anterior sugiere que dichos saltos en la señal magnética son indicadores de daño en el sistema de entrepiso compuesto, siendo estos indicadores totalmente no destructivos y no invasivos al entrepiso. Este comportamiento podría ser usado como una alarma de falla controlada en el entrepiso (o de máxima carga en el rango elástico), especialmente la formación de la zona M1 (ver (Figura 20) y (Figura 21)).

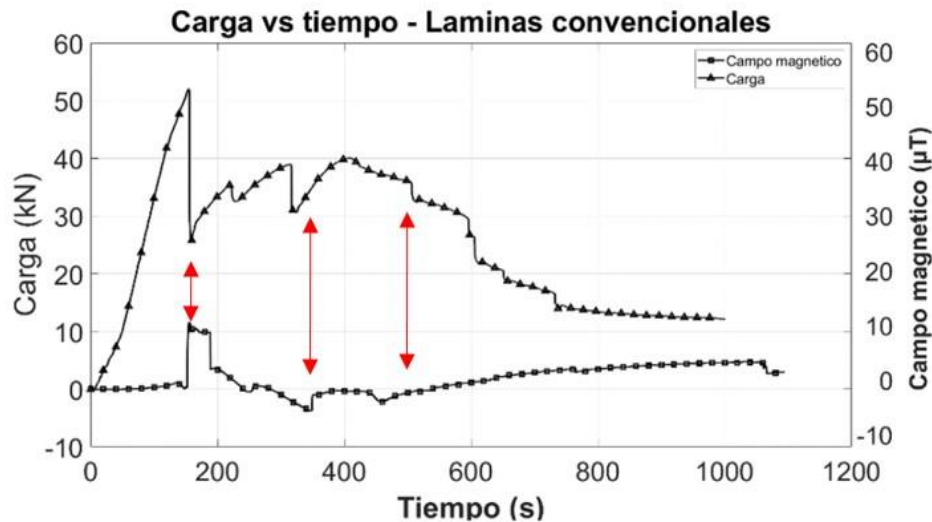


Figura 22. Grafica comparativa del campo magnético y el cambio de la carga en el tiempo – probeta 4 convencional

4. Conclusiones

Los resultados experimentales del comportamiento a la falla de la deflexión del sistema de entrepiso de estudio para los entrepisos con láminas perforadas, tienen el mismo comportamiento que los resultados de otros autores (Marimuthu et al., 2007), validando la aplicación de carga, la tipología del ensayo elegido y los comportamientos esperados en la presente investigación. De hecho, es posible en la presente investigación determinar el comportamiento post deslizamiento, el cual se caracteriza por presentar grandes desplazamientos en el centro de la luz, con una capacidad limitada de manera asintótica en la capacidad de carga (con tendencia a la pérdida de capacidad, ver (Figura 11), (Figura 14) y la (Figura 15). Lo anterior también indica que la lámina de acero perforada, y en el plano de falla al presentar una superficie lisa y sin rugosidad residual, permite un deslizamiento similar a la lámina clásica del deck (no perforada).

La presente investigación buscó analizar el comportamiento mediante ensayos a flexión, de tableros en acero para comportamiento compuesto con lámina colaborante perforada (P) desde la comparación con un grupo base de tableros en lámina colaborante convencional (C) o comercial en el mercado colombiano.

En referencia a la capacidad portante obtenida del ensayo se estableció que no se presenta un diferencial significativo entre los sistemas compuestos. Esto es evidente debido a que la carga máxima del grupo P no es superior en todas las probetas al grupo C. En igual forma, la diferencia de carga promedio es de 0.413kN siendo una magnitud pequeña para validar la superioridad de un grupo sobre otro.

Algo semejante ocurre para las variables de deslizamiento longitudinal donde la diferencia es mínima entre grupos. Es por tanto que la variable mencionada para cada grupo de probetas presenta un comportamiento similar y por ende la inclusión de perforados sobre lámina colaborante no varía el deslizamiento longitudinal de falla.

Sin embargo, para la variable de deflexión en el límite elástico se puede observar una diferencia entre los grupos de probetas. En tal sentido, el grupo P presentó una mayor deflexión que el grupo C que puede deberse a que el grupo P al tener una lámina perforada reduce la rigidez de la sección haciendo de esta una sección compuesta de mayor ductilidad en este rango. En efecto, la carga máxima en promedio es mayor para el grupo P, gracias a que la falla del sistema es el deslizamiento longitudinal el cual se restringe por medio de la fricción entre la lámina colaborante y losa de concreto, lo que indica una mayor adherencia a cortante longitudinal en el grupo P.

De la misma forma, se comparó la variable deflexión en el límite elástico, en este caso sobre la base del modelo de elementos finitos planteado, relacionando las deflexiones experimentales de las teóricas. En particular, para todas las probetas se evidenció una magnitud experimental mayor a la teórica ocasionando que se pueda inferir mayor capacidad en servicio real a la teórica.

ENGLISH VERSION.....

En cuanto al comportamiento presentado a lo largo del ensayo, se observó para ambos grupos fallas semejantes con una secuencia temporal de fisuras en la losa de concreto cercana a puntos de concentración de carga y el centro de la luz, arrugamiento del alma en zona de mayor concentración de fisuras y deslizamiento longitudinal progresivo. La localización de la falla se presentó regularmente cerca de los puntos de distribución de carga (tercios medios de la luz de las probetas) más que en el centro de la luz.

De hecho, del comportamiento descrito anteriormente se debe distinguir el punto de carga máxima o punto de cambio en el comportamiento, ya que posterior a este punto se presenta el inicio de la falla por deslizamiento longitudinal progresivo, es decir que existe pérdida de adherencia entre la lámina colaborante de la losa de concreto y por ende la sección deja de ser compuesta y trabaja la losa de concreto independiente de la lámina colaborante.

El cambio del campo magnético es capaz de detectar los eventos de carácter físico más importantes que ocurren durante la ejecución del ensayo (descritos anteriormente), como lo pueden ser el desprendimiento de la lámina del concreto, las tensiones en la lámina de acero producto de la sobrecarga de la probeta, las deflexiones elásticas y plásticas que sufre la lámina de acero. Esto se evidenció por la aparición de zonas claramente discernibles: M1 para elasticidad, M2 para ruptura.

En conjunto todas estas similitudes entre las gráficas de carga y magnetismo, teniendo en cuenta las variaciones en la ubicación de la falla, resulta en un tipo de medición que funcionara como opción de control no invasivo a elementos de acero, en este caso a láminas del sistema de entepiso compuesto, para controlar su comportamiento durante servicio.

5. Agradecimientos

El grupo de investigadores quiere agradecer a la empresa ACESCO, por el patrocinio a la presente investigación, especialmente con las láminas objeto del presente estudio.

6. Referencias

- American Institute of Steel Construction, A. (2016).** Specification for Structural Steel Buildings AISC 360-16 (2016th ed.). AISC.
- American National Standards Institute, & Steel Deck Institute. (2017).** C-2017 Standard for Composite Steel Floor Deck-Slabs.
- ANSI - SDI. (2022).** SD-2022 - Standard for Steel Deck.
- ASTM (2015).** Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Pub. L. No. C39/C39M - 15a
- Ayneto Gubert, J.; Ferrer Ballester, M. (2012).** Mecánica del medio continuo en la ingeniería: teoría y problemas resueltos. 281. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36613>
- Ferrer, M.; Marimon, F.; Crisinel, M. (2006).** Designing cold-formed steel sheets for composite slabs: An experimentally validated FEM approach to slip failure mechanics. *Thin-Walled Structures*, 44, 1261–1271. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2007.01.010>
- Marimuthu, V.; Seetharaman, S.; Arul Jayachandran, S.; Chellappan, A.; Bandyopadhyay, T. K.; Dutta, D. (2007).** Experimental studies on composite deck slabs to determine the shear-bond characteristic ($m-k$) values of the embossed profiled sheet. *Journal of Constructional Steel Research*, 63(6), 791–803. <https://doi.org/10.1016/J.JCSR.2006.07.009>
- Nunez-Moreno, F. A. (2014).** Piezo-Barkhausen Pulse Signal Analyses (BPSA) and Determination of the Fatigue Life of AISI-1018 Steel Near the Endurance Limit. <http://repository.iit.edu/handle/10560/3342>
- Sabelli, R.; Sabol, T.; Easterling, W. S. (2011).** Seismic Design of Composite Steel Deck and Concrete-filled Diaphragms - A guide for Practicing Engineers.
- Wright, H. D.; Evans, H. R.; Harding, P. W. (1987).** The use of profiled steel sheeting in floor construction. *Journal of Constructional Steel Research*, 7(4), 279–295.