

# Análisis de deflexión de propuestas de losas aligeradas con arreglo metálico tridimensional embebido

## Deflection analysis of proposals for lightened slabs with embedded three-dimensional metal arrangement

J. Hernández-Pérez <sup>a</sup>, A. Jiménez-Montoya <sup>b\*</sup>, J. B. Pascual-Francisco <sup>a</sup>, N. López-Segundo <sup>b</sup>

J. C. Contreras-Ramírez <sup>b</sup>, T. Miramar-Mena <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Área Académica de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Politécnica de Pachuca, 43830; Zempoala, Hidalgo, México.

<sup>b</sup> División de Ingeniería Civil, Tecnológico Nacional de México TES-San Felipe del Progreso, 50640, San Felipe del Progreso, México, México.

### Resumen

En este trabajo se evalúa la deflexión de dos propuestas de losa aligerada con peralte de 50 mm y estructura tridimensional embebida. Se proponen dos configuraciones de estructura (piramidal y cúbica) de varilla de acero grado 6000 de 4mm de diámetro. En una primera etapa, se evalúa la deflexión en losas convencionales mediante un método analítico y, posteriormente, se determina la deflexión en este tipo de losas mediante el método de elementos finitos, usando el software ANSYS. A partir de la validación de las simulaciones con el software, se procedió a realizar las mismas simulaciones ahora en las losas con estructura tridimensional. Los resultados obtenidos indican que las estructuras tridimensionales proveen más resistencia ante la deflexión en comparación con un armado de acero convencional. Además, se encontró que la estructura cúbica es la más resistente ante la flexión. Se discute la posible aplicación de losas con armado tridimensional para optimización de materiales mediante disminución del peralte en vivienda.

**Palabras Clave:** Concreto armado, losa tridimensional aligerada, deflexión, análisis por elemento finito.

### Abstract

In this work the deflection analysis of two types of lightened slabs of 50 mm with embedded three-dimensional metallic structure is presented. Two structure configurations (pyramidal and cubic) of 4 mm diameter grade 6000 steel rods are proposed. In the first stage, the deflection in conventional slabs is evaluated using an analytical method and, subsequently, the deflection in this type of slab is determined using the finite elements method using the ANSYS software. After the validation of the simulations with the software, the same simulations were performed for the slabs with three-dimensional structures. The results obtained show that three-dimensional structures provide more strength before deflection compared to conventional steel reinforcement. Furthermore, it was found that the cubic structure is the most resistant to bending. The possible application of slabs with three-dimensional reinforcement for optimization of materials by reducing the superelevation in housing is discussed.

**Keywords:** Reinforced concrete, lightened three-dimensional slab, deflection, finite element analysis.

## 1. Introducción

Las losas de concreto reforzado, en ingeniería civil son elementos estructurales de construcción con diversas configuraciones geométricas y mecánicas que consisten en el vertido de concreto, regularmente de resistencia de 150 a 250 kg/cm<sup>2</sup> sobre un entramado metálico bidimensional de varillas de 3/8 a 1/2" de diámetro. La incorporación de acero al concreto se le denomina concreto armado. En el caso de

incorporación algún tipo de tela, malla o fibra tejida no metálica (textil, de fibra de vidrio, plástica, etc.), se le suele denominar fibrocemento. Los elementos estructurales resultado de la aplicación estos tipos de refuerzo son por lo regular vigas y losas (American Concrete Institute, 2022). Al ser materiales compuestos, conforman un área de investigación cuya orientación se centra en la búsqueda de mejorar su desempeño fisicomecánico en propiedades como la resistencia a la compresión (Valencia Jiménez et al., 2020), flexión (Yerramala et al., 2013; Clarke, 2010), tensión (Do et al., 2022;

\*Autor para la correspondencia: [adan.jm@sfelipeprogreso.tecnm.mx](mailto:adan.jm@sfelipeprogreso.tecnm.mx)

**Correo electrónico:** J. Hernández-Pérez ([jahdez@upp.edu.mx](mailto:jahdez@upp.edu.mx)), A. Jiménez-Montoya ([adan.jm@sfelipeprogreso.tecnm.mx](mailto:adan.jm@sfelipeprogreso.tecnm.mx)), J. B. Pascual-Francisco ([jbpascualf@hotmail.com](mailto:jbpascualf@hotmail.com)), N. López-Segundo ([ic.lsnestor26@gmail.com](mailto:ic.lsnestor26@gmail.com)), J. C. Contreras-Ramírez ([charly.cr.2805@gmail.com](mailto:charly.cr.2805@gmail.com)), T. Miramar-Mena ([miramarmena06@gmail.com](mailto:miramarmena06@gmail.com)).

**Historial del manuscrito:** recibido el 27/11/2023, última versión-revisada recibida el 02/02/2024, aceptado el 29/02/2024 publicado el 12/04/2024. **DOI:** <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial.12140>

Shaheen et al., 2019), resistencia relativa a exposición al fuego (Greepala & Nimityongskul, 2009), soporte a cargas de impacto (Yerramala et al., 2016), pruebas de balística o blast (Li et al., 2017), propagación de cuarteaduras (Ahmad et al., 2014), entre otras. La vía para realizar el mejoramiento de estas propiedades varía, desde usar aditivos al concreto, modificar el tamaño de los agregados o incorporar refuerzos estructurales (plásticos, metales, telas, etc.) (Mohana et al., 2021), variando la disposición geométrica del mismo, el tamaño, etc. (Naaman, 2012).

En el caso del cambio de geometría, se han implementado arreglos tridimensionales predominantemente de textiles (Mishra, 2018), de polímeros y fibra de vidrio en tres dimensiones (Sasi & Peled, 2015). En estos estudios, se demostró que la incorporación de arreglos tridimensionales contribuye en la disminución de delaminaciones, agrietamientos y deflexiones, disipando de manera global la energía de deflexión en la losa, en contraste con las losas regulares. En el caso de arreglos tridimensionales metálicos “puros”, acorde al criterio de Naaman, solamente existe la malla tipo Watson, descontinuada alrededor de los años 80 debido a altos costos; sin embargo, algunos de los arreglos que pueden considerarse tridimensionales son los correspondientes a la incorporación de fibras en la matriz de concreto (Carrillo & Silva-Páramo, 2016), los llamados arreglos de compuestos multicapa (Yerramala et al., 2013; Shaheen et al., 2019), del tipo sándwich, tales como los propuestos por Abdulla & Khatab (2014) y Rifaie & Hantoosh (2022), o el trabajo de Guerra-García et al. (2013), en el que se realiza una propuesta CAD de tres tipos de placas sándwich de concreto reforzado con fibra metálica destinadas a aplicaciones en viviendas rurales.

En el presente trabajo, se proponen dos configuraciones de refuerzo con arreglo tridimensional (piramidal cuadrada y cúbica) para losas de concreto reforzado, utilizando alambrión de acero grado 6000, de 4mm (5/32 in). Se evalúa el comportamiento mecánico de probetas con diferentes cargas utilizando el software ANSYS®, simulando ensayos de flexión de tres puntos. Se comparan los resultados con los de las probetas de losas convencionales con armado de acero de 3/8. Se hace un análisis de los diferentes porcentajes de reducción de deflexión de las configuraciones tridimensionales.

## 2. Metodología

### 2.1. Dimensionamiento y determinación de cargas del sujeto de control (losa regular)

Se analizan analíticamente losas con refuerzo de acero bidimensional, siendo las dimensiones largo  $L(cm)$ , ancho  $b(cm)$  y peralte  $h(cm)$ , como se indica en la Figura 1. Debido a que, acorde a las Normas Técnicas Complementarias (NTC) del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal versión 2018 (Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial de la CDMX, 2018) las dimensiones de espacios habitacionales oscilan de los 220cm a los 420cm, se propone que el largo  $L(cm)$  de los sujetos de control a calcular sea de 300 cm. A efectos de realizar un análisis unitario de cargas, se propone que sea considerada como un panel-losa de entrepiso de dimensiones habitacionales acorde a los criterios de la

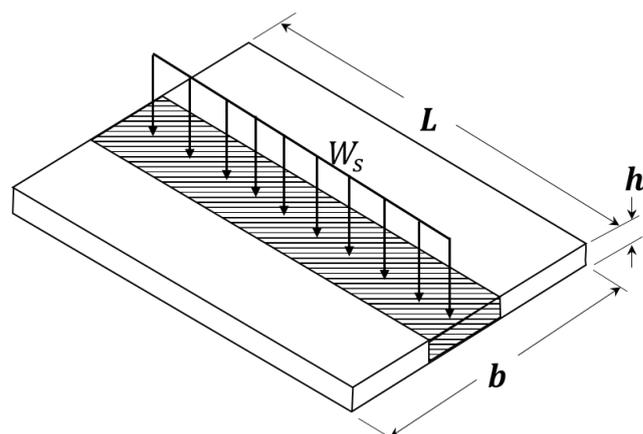


Figura 1. Dimensiones y distribución de carga en una losa.

norma ACI-318-19 (American Concrete Institute, 2022) cuyo ancho  $b(cm)$  sea de 100 cm. En cuanto a la altura, o peralte  $h(cm)$ , acorde al reglamento ACI, se establece que el peralte mínimo  $h_{min}(cm)$  necesario para losas habitacionales está dado por  $h_{min} = l/28$ , considerando a la losa como una placa continua simplemente apoyada. De este modo,  $h_{min} = 10.71cm$ , por lo que se proponen 2 losas de control regulares con armado plano:  $L1$  y  $L2$ . La primera de  $h = 10 cm$  y, a efectos de evaluar una reducción en el peralte como medio de aligeramiento y la segunda losa de  $h = 5 cm$ , las dos con el mismo valor de  $L$  y  $b$ . Bajo este criterio de dimensiones, se clasifica como losa en una dirección, por lo que, para su análisis en flexión, solamente se requieren apoyos en los extremos de dicha dirección, trabajando como una losa simplemente apoyada. La carga total  $w_s(kg/m^2)$  de la losa se considera bajo la ecuación:

$$w_s = C_m + C_v \quad (1)$$

donde  $C_m(kg/m^2)$  es la carga muerta de la losa, incluyendo peso propio, plafones, acabados, etc., y  $C_v(kg/m^2)$  es la carga viva de la losa, estimada acorde al criterio de cargas vivas unitarias de las NTC. Se determina que  $w_s = 723 kg/m^2$ .

### 2.2. Cálculo de deflexión

#### 2.2.1 Cantidad de varillas a utilizar

La cantidad de varillas de acero a utilizarse como refuerzo en una losa regular se denota con  $N$ . Para calcularlo, primero se debe obtener el momento máximo  $M_{max}(kg \cdot cm)$  producido por  $w$  y  $L$ :

$$M_{max} = \frac{wL^2}{8} \quad (2)$$

Éste a su vez, sustituye al momento resistente a la flexión  $M_R(kg \cdot cm)$ , dado por:

$$M_R = f_r \cdot b \cdot d^2 \cdot f''_c \cdot q (1 - 0.5q) \quad (3)$$

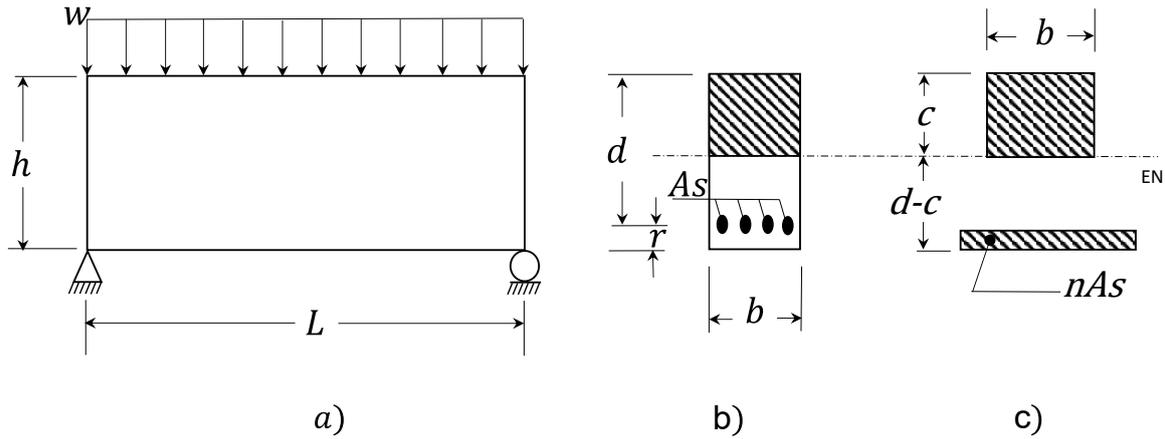


Figura 2. Esquema de la losa a calcular. En a) se observa la losa simplemente apoyada, en b) la sección de la losa, en c), la sección transformada con el eje neutro.

donde  $f_r = 0.9$  es el factor de resistencia a la flexión,  $f''_c (kg/cm^2)$  es la resistencia del concreto reducida con valor igual a 0.85 veces la resistencia del concreto  $f'_c = 200 kg/cm^2$ ,  $d$  es el peralte efectivo de la losa con valor de 8.5cm (ver Figura 2) para la losa de 10 cm y de 4.5 cm para la losa de 5 cm de peralte,  $q$  es el índice de refuerzo, el cual se obtiene sustituyendo  $M_R = Mmax = 81348.75 kg.cm$  en  $M_R = q f'_c L^2$ , resultando en  $q = 0.076518$  para la losa de 10 cm y  $q = 0.3107$  para la losa de 5 cm de peralte. Para calcular  $N$ , se utiliza la ecuación:

$$N = As / a_s \quad (4)$$

donde  $As (cm^2)$  y  $a_s (cm^2)$  son el área de acero para una losa y el área de una varilla respectivamente, como se puede apreciar en la Figura 2. Se decide utilizar varilla de 3/8 in, por lo que  $a_s = 0.71 cm^2$ .  $As$  se determina por

$$As = pbd \quad (5)$$

donde  $p$  es la cuantía de acero, determinable por:

$$p = \frac{q f'_c}{f_y} \quad (6)$$

donde  $f_y (kg/cm^2)$  es el esfuerzo de fluencia del acero, con valor de  $4200 kg/cm^2$ . Resolviendo, para la losa de 10 cm de peralte (L1) se tiene que  $N = 3.70 \approx 4$  varillas y para la losa de 5 cm de peralte (L2)  $N \approx 10$  varillas. La separación entre varillas  $S (m)$ , se determina con  $S = (100 \cdot a) / As$ , obteniéndose  $S = 0.2696 m \approx 0.25 m$  para L1 y  $S \approx 10cm$  para la L2

### 2.2.2 Deflexión inmediata

Se calcula la deflexión  $\Delta_c (cm)$  de la losa de acuerdo al primer método de Yu y Winter (González-Cuevas & Robles-Fernández, 2013), considerándola como una placa apoyada en sus extremos. Para calcular la deflexión inmediata  $\Delta_c$ , se emplea la expresión:

$$\Delta_c = \frac{5}{384} * \frac{wL^4}{E_c I_{ag}} \quad (7)$$

donde  $E_c (N/m^2)$  es el módulo de elasticidad del concreto, que se determina con  $E_c = 14000 \sqrt{f'_c}$ , por lo cual se obtiene  $E_c = 19798.899 kg/cm^2$ ;  $I_{ag} (m^4)$  es el momento de inercia de la sección agrietada y transformada (ver Figura 2c), determinado por:

$$I_{ag} = \frac{b(c)^3}{3} + nA_s(d - c)^2 \quad (8)$$

Donde  $c (cm)$  representa la profundidad del eje neutro (EN) se obtiene con:

$$b c^2 = 2nA_s(d - c) \quad (9)$$

donde  $n$  es la relación modular, que se determina por:

$$n = \frac{E_s}{E_c} \quad (10)$$

donde  $E_s = 2 \times 10^6 kg/cm^2$  es el módulo elasticidad del acero. Resolviendo los parámetros para la ecuación (9), se obtiene que  $\Delta_c = 0.365 cm$  para la losa de 10 cm y  $\Delta_c = 3.55 cm$  para la de 5 cm.

Al determinar la deflexión analítica de la losa para la carga considerada mediante ANSYS, se observó que los valores obtenidos eran similares a los calculados analíticamente de una losa constituida únicamente por concreto. El momento de inercia de la sección completa de una losa sin considerar el refuerzo se da por:

$$I_g = \left[ \frac{bh^3}{12} \right] \quad (11)$$

Este término se sustituiría en lugar de  $I_{ag}$  en (8), determinando así la deflexión de una losa sin refuerzo de acero. La deflexión  $\Delta_b (cm)$  debida a este momento de inercia ajustado se muestra en la Tabla 1. Estrictamente, los elementos estructurales de concreto armado (como losas) deben contener acero de refuerzo; sin embargo, se realizó esta suposición para efectos de comparación.

### 2.2.3 Deflexión de largo plazo

Se calcula basado en el primer Método de Yu y Winter, pero considerando una edad de concreto de 28 días y una edad duración de la carga de 5 años. Ello conlleva a modificar los módulos de elasticidad, acorde a la normativa ACI, a un valor reducido  $E_{ct} = 0.377 E_c$ . Usando este factor, se replantean los cálculos de  $I_{ag}$  y  $c$ , para estimar  $\Delta_c$  en la ecuación (8). A este nuevo resultado se asigna la variable  $\Delta_c'$  (cm). La deflexión total  $\Delta_t$  (cm) de la losa se calcula como  $\Delta_t = \Delta_c + \Delta_c'$ .

Por otro lado, Serrano-Guzmán & Pérez-Ruiz, (2010) indican que el cálculo del módulo de elasticidad estático del concreto estimado por el método de la ACI puede estar sobreestimado hasta un 24%, por lo que implicaría un ajuste del mismo con repercusiones en un aumento la deflexión. Bajo esta premisa, se calcula una deflexión inmediata ajustada  $\Delta_{ca}$  (cm) al sustituir el módulo de elasticidad  $E_c = 159667 \text{ kg/cm}^2$  en la ecuación (8), implicando una deflexión a largo plazo ajustada  $\Delta_{ca}'$  (cm); así como una deflexión total ajustada  $\Delta_{ta}$  (cm).

De acuerdo a las normas ACI y NTC, la deflexión máxima permitida  $\Delta_{max}$  (cm) se determina por  $\Delta_{max} = L/180$  (clasificación de losas sujetas únicamente a cargas vivas sin sostener elementos estructurales) por lo que resulta  $\Delta_{max} = 1.66 \text{ cm}$ . Para efectos de comparación, se agregará una configuración de una losa L3 de 5cm de peralte con 10 varillas, con el resto de parámetros dimensionales y de carga iguales a L1 y L2 (ver Tabla 1), para observar el efecto de la reducción de peralte sin añadir refuerzo adicional y valorar el caso en que se rebase  $\Delta_{max}$  al contener menor cantidad de acero, se validará si el procedimiento es capaz de estimar una deflexión comparable con un análisis de elemento finito.

Los resultados de los valores calculados para las losas L1, L2 y L3 se resumen en la Tabla 1.

### 2.3. Validación mediante software de la deflexión de losas L1, L2 y L3.

Para validación del cálculo analítico de la deflexión descrito en la sección anterior, se opta por utilizar el software de Ingeniería Asistida por Computadora (CAE, por sus siglas en inglés) ANSYS Workbench®, versión académica 2023 (ANSYS Inc., 2023). Para realizar la simulación de deflexión  $\Delta_{CAE}$  (cm) en este software se siguieron los siguientes pasos: definir tipo de análisis, selección de materiales, creación modelo geométrico del sistema, definir restricciones, aplicación de cargas, realizar el mallado, generar la solución y resultados. En primera instancia, se define el tipo de análisis a realizar (en este caso, un análisis estático estructural). Posteriormente, se definen las propiedades de los materiales, que para este caso son dos: el acero estructural y el concreto. Se usan los mismos valores de módulo de elasticidad considerados en el método analítico. El siguiente paso es la modelación geométrica del sistema digitalmente mediante el dibujo asistido por computadora (CAD), para lo cual se usa el módulo de SpaceClaim del ANSYS. En esta primera etapa, los modelos de losa analizados son de L1, L2 y L3. En cuanto a las restricciones del modelo, se especifica como una placa simplemente apoyada, restringiendo la rotación en las aristas perpendiculares a L, permitiendo rotación en el eje “x” y restringiendo el desplazamiento en el eje “x”, “y”, y “z”

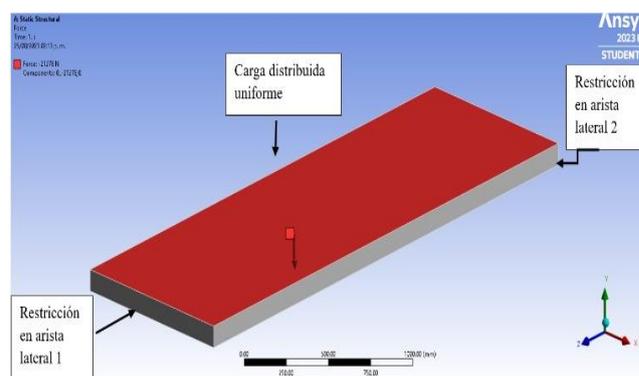


Figura 3. Restricciones y carga aplicada en el modelo de la losa.

(articulación). En la segunda arista lateral de la losa (que se encuentra en el extremo opuesto de la primera arista) se define una restricción en el eje y, permitiendo libre desplazamiento y rotación en los demás ejes (apoyo simple). Una vez definidas las restricciones, se aplica la carga distribuida uniforme, cuya magnitud es de  $723 \text{ kg/m}^2$ , como se muestra en la Figura 3.

En el proceso de mallado las entendidas geométricas son cubiertas por elementos. Al tratarse de un material compuesto, se usaron mallados diferentes para cada material individual. Para el caso del concreto, se utilizaron elementos sólidos hexaédricos (SOLID 65) con tamaños de 25 mm y para el caso de las varillas se utilizaron elementos tipo link o lineales de 25 mm (LINK 8) como se muestra en la Figura 4b. Se procede a obtener la solución del sistema bajo un análisis elástico y a continuación, se despliegan los resultados obtenidos del análisis, como se muestra en la Figura 4, que ilustra la deflexión obtenida en la losa L1,  $\Delta_{CAE} = 0.448 \text{ cm}$ . Este procedimiento se aplicó para las losas con peralte de L2 y L3, cuyos resultados se reportan en la Tabla 1.

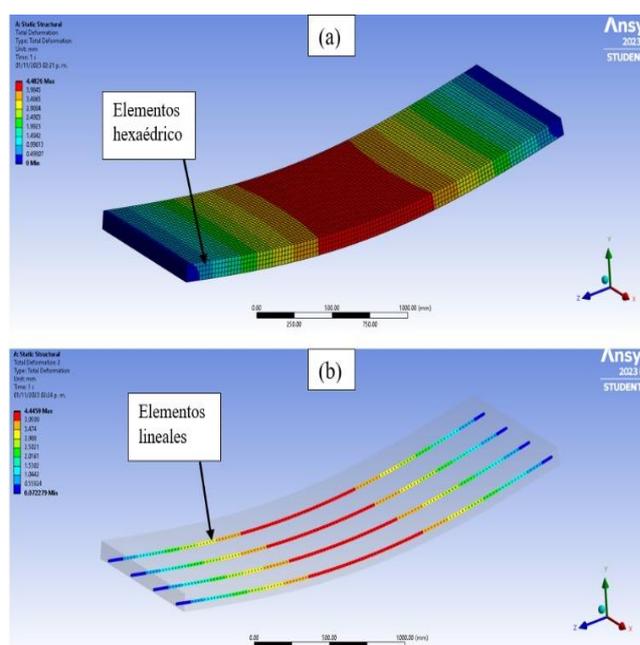


Figura 4. Simulación de deflexión en losa convencional: (a) deflexión en el material compuesto, (b) deflexión en las varillas.

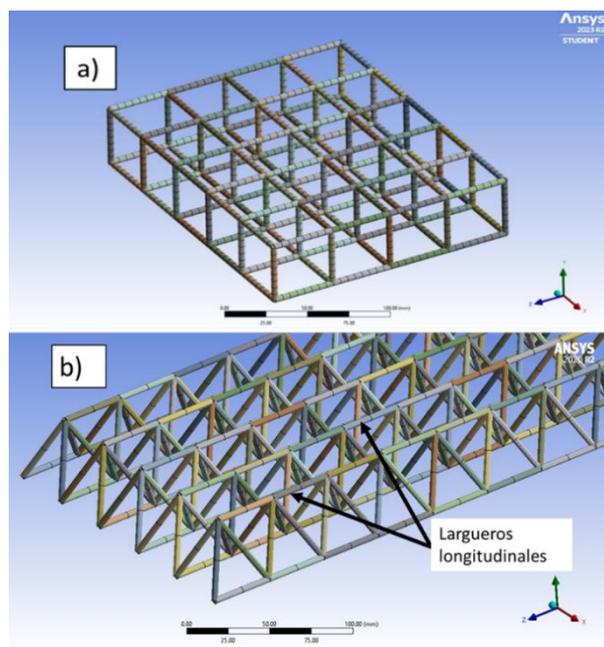


Figura 5. Arreglos tridimensionales embebidos en el concreto: (a) estructura con elementos cúbicos, (b) estructura con elementos

2.4. Análisis CAE de losa regular escalada L4 y losas con arreglo tridimensional cúbico L5 y piramidal rectangular L6.

Con la finalidad de corroborar el efecto del escalamiento de la losa L3 se modeló una losa regular de armado plano de dimensiones  $L = 300\text{cm}$ ,  $b = 20\text{cm}$  y  $h = 5\text{cm}$ , a la que se etiquetó como L4. Se mantienen iguales el resto de los parámetros de L3, tales como la cantidad y diámetro de varillas (en este caso, al estar escalada en la base, se utilizan solamente dos varillas). Como núcleo de la presente investigación, se propone como alternativa de losa aligerada, dos losas con refuerzo de arreglo tridimensional, L5 y L6, a fin de comparar su resistencia a deflexión con la losa L4 (escalada de L3). La losa L5 se configuró con una varilla de acero grado 6000, de diámetro 4 mm (aproximadamente  $5/32\text{ in}$ ) con un arreglo cúbico, de lado 4 cm con dimensiones  $L = 300\text{cm}$ ,  $b = 20\text{ cm}$  y  $h = 5\text{ cm}$  (ver Figura 5a. La losa L6 se modeló como

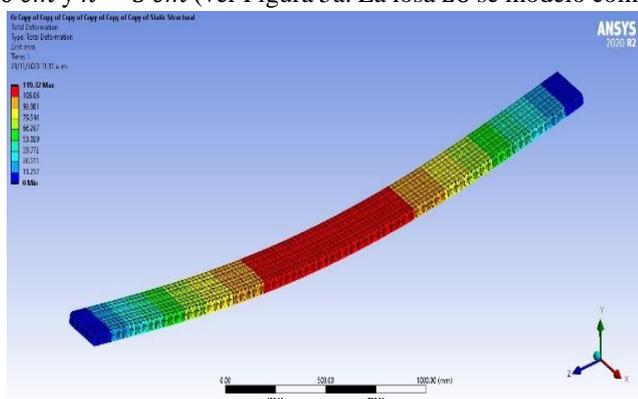


Figura 6. Deflexión de la losa L5 a  $3000\text{kg}/\text{m}^2$

un arreglo piramidal, de módulo 4 cm, con conectores longitudinales en las puntas de las aristas (Figura 5b).

Estas losas (L4, L5 y L6) se simularon como placas simplemente apoyadas en sus extremos, bajo cargas distribuidas de  $723\text{ kg}/\text{m}^2$ ,  $1000\text{kg}/\text{m}^2$ ,  $2000\text{kg}/\text{m}^2$  y  $3000\text{kg}/\text{m}^2$ , bajo las condiciones descritas en el apartado 2.3 para losas regulares. En la Figura 6, se puede observar la simulación de deflexión para losas con arreglo tridimensional cúbico L5 a  $3000\text{kg}/\text{m}^2$ .

Los resultados completos de la simulación, se pueden visualizar en la Tabla 2.

3. Resultados y análisis

3.1. Resultados de cálculos analíticos vs CAE en losas L1, L2 y L3.

Las deflexiones inmediatas y totales calculadas analíticamente bajo una carga de  $723\text{kg}/\text{m}^2$  para las losas de 10 cm y de 5 cm de peralte con refuerzos de 4 y 10 varillas respectivamente, no superaron la deflexión máxima establecida por el ACI. En el caso de la losa de 5 cm de peralte con 4 varillas, se superó solo en el caso de deflexión total (31%), pero no inmediata. Para el caso de las deflexiones obtenidas por ANSYS, únicamente la losa de 10 cm de peralte se mantiene con un valor menor al máximo permitido ( $\Delta_{max}=1.66\text{ cm}$ ) superando las losas de 5 cm de peralte con 4 y 10 varillas de refuerzo en un 169% y 113%, respectivamente, presentándose dos situaciones. Las losas de 5 cm, con o sin el acero de refuerzo requerido por normatividad no cumplen con la deflexión máxima al calcularse bajo este método.

Tabla 1. Parámetros de deflexión para una losa de 5cm y 10 cm

Parámetro	Losa L1	Losa L2	Losa L3
$h(\text{cm})$	10	5	5
$b(\text{cm})$	100	100	100
$L(\text{cm})$	300	300	300
$d(\text{cm})$	8.5	4.5	4.5
$N$	4	4	10
$S(\text{cm})$	26	26	10
$As(\text{cm}^2)$	2.84	2.84	8.52
$a(\text{cm}^2)$	0.71	0.71	0.71
$w_s \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right)$	723	723	723
$f_y(\text{kg}/\text{m}^2)$	4200	4200	4200
$f_r$	0.9	0.9	0.9
$f'_c(\text{kg}/\text{cm}^2)$	200	200	200
$E_c(\text{kg}/\text{cm}^2)$	197988.99	197988.99	197988.99
$\Delta_c(\text{cm})$	0.261	1.051	0.540
$\Delta'_c(\text{cm})$	0.32	1.13	0.80
$\Delta_t(\text{cm})$	0.581	2.181	1.34
$\Delta_{ca}(\text{cm})$	0.271	1.104	0.582
$\Delta'_{ca}(\text{cm})$	0.34	1.49	0.90
$\Delta_{ta}(\text{cm})$	0.611	2.594	1.482
$\Delta_b(\text{cm})$	0.4621	3.697	3.697
$\Delta_{CAE}(\text{cm})$	0.446	3.615	3.47

En segundo lugar, las deformaciones inmediatas  $\Delta_c$  obtenidas de manera analítica bajo el método de la ACI y Yu y Winter

implican diferencias porcentuales sustanciales respecto a las obtenidas por método de elemento finito (41%, para el caso de la losa de 10 cm y 70% para la losa de 5 cm de peralte). Esta diferencia se reduce si en la comparación, para el dato analítico, se considera la deflexión total  $\Delta_t$  en lugar de la deflexión inmediata; o bien, al utilizar el módulo de elasticidad de  $159667 \text{ kg/cm}^2$  en referencia al trabajo de Serrano-Guzmán & Pérez-Ruiz, (2010) para estimar la deflexión inmediata o total ajustada. Sin embargo, las diferencias porcentuales entre la deflexión analítica considerando el momento de inercia de la sección completa  $I_g$  respecto al método CAE son menores al 3.24% y 4.3% respectivamente para las losas de 10 y 5 cm de peralte, lo que pareciera indicar que ANSYS simula la losa como si ésta estuviera constituida únicamente por concreto. Esto se descarta al observar que la incorporación de acero tiene un efecto en reducción de la deflexión cuando se compara la losa regular vs las losas con refuerzo tridimensional, únicamente en el software. Bajo esta premisa, no se considera conveniente utilizar un modelo analítico como base de comparación del comportamiento de losas regulares dadas las discrepancias obtenidas, ni para la estimación de deflexiones de losas reforzadas con arreglos tridimensionales embebidos en concreto. Al no contar con un modelo matemático adecuado, se recomienda utilizar únicamente el método CAE como base de estimación de las deflexiones para losas de arreglo tridimensional embebidas en concreto, y compararlas posteriormente con futuras pruebas de laboratorio.

### 3.2. Resultados CAE de deflexión para Losas L4, L5 y L6

Tabla 2. Comparativa de deflexión de losas L4, L5 y L6 de 5cmx20cmx300cm a cargas diversas.

Losa	Deflexión	Carga ( $\text{kg/m}^2$ )			
		723	1000	2000	3000
L4	(mm)	34.7	48.05	96.11	144.17
L5		28.75	39.77	79.54	119.32
L6		29.6	40.93	81.87	122.82

De la Tabla 2, se puede apreciar que tanto las losas convencionales como con arreglo tridimensional tienen una

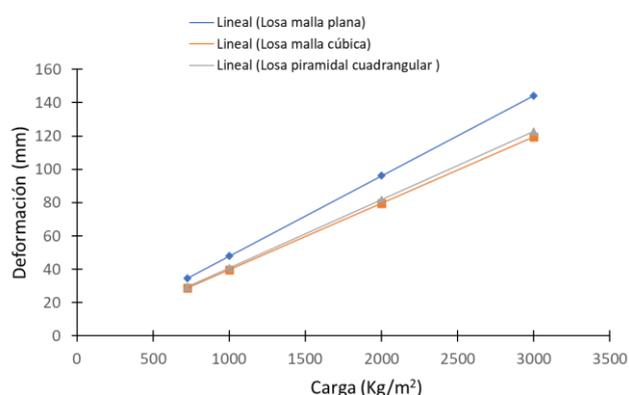


Figura 7. Comparativa de deflexión de losas L4, L5 y L6 ante cargas diversas.

tendencia a deflexión elástica, a pesar de haber superado la deflexión máxima  $\Delta_{max}$  establecida por el ACI, como lo muestra la Figura 7. Esta relación lineal permite calcular que,

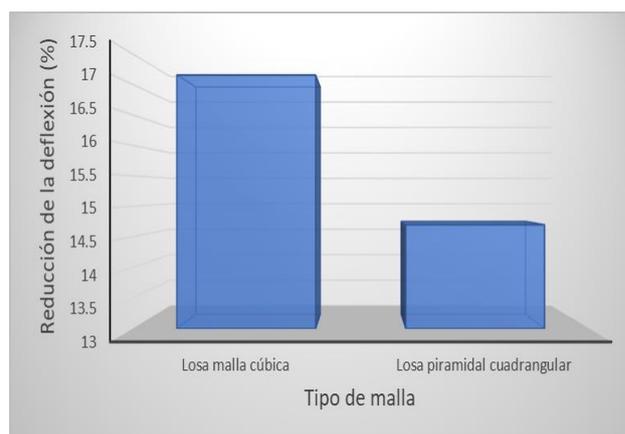


Figura 8. Porcentaje de reducción de deflexión de las losas con arreglo tridimensional en comparación con la losa regular

para losas de 5cm de peralte, carga máxima que éstas pueden soportar en el límite con  $\Delta_{max}$  es de  $346.83 \text{ kg/m}^2$  para la losa plana,  $419.09 \text{ kg/m}^2$  para la losa con arreglo cúbico y  $406.93 \text{ kg/m}^2$  para la losa con arreglo piramidal.

Se puede notar, con el escalamiento realizado de la losa L4 respecto a la losa L3, que las deflexiones de las losas escaladas son iguales de las losas de tamaño completo, lo que permitía escalar el análisis en ANSYS a el tamaño de losa para adaptarlo al de probetas de laboratorio y compararlo con probetas reales de esas dimensiones, sin necesidad de experimentar en modelos de tamaño completo.

En la Figura 8 se muestra la reducción de la deflexión de las losas con arreglo tridimensional en comparación con las losas de armado plano, dando como resultado una reducción en la deflexión del 17.24% en las losas de arreglo cúbico y del 14.69% en las losas de arreglo piramidal cuadrangular.

## 4. Conclusiones

En este trabajo se presentó una metodología analítica y numérica por elementos finitos para la evaluación de deflexión en losas convencionales. El procedimiento numérico se extendió para el análisis de deflexión en losas aligeradas con estructuras tridimensionales de acero embebidas en concreto. Se encontró que las losas aligeradas con estructura tridimensional son más resistentes ante la deflexión comparado con la losa de control convencional (con armado plano y 5 cm de peralte). La estructura tridimensional con elementos cúbicos fue que sufrió menor deflexión, con una diferencia de 2.95%, versus la estructura piramidal cuadrada. Basado en los resultados este estudio preliminar, las potenciales aplicaciones de las losas con refuerzos tridimensionales se proyectan para aquellas con requerimientos de alta ductilidad. Al deflectarse menor que las losas regulares, se puede aligerar al disminuir el peralte. Al corroborar esta propiedad, tal como indican los estudios disponibles en la literatura, se puede esperar que presente también la capacidad de reducir delaminaciones y agrietamientos, así como infiltraciones al disipar homogéneamente las energías de deflexión, al tratarse de arreglos tridimensionales; sin embargo, para ello, se requiere profundizar en la investigación de dichas propiedades para esta propuesta. Por otra parte, dado que la complejidad de armado de la estructura piramidal la hace menos práctica para una losa con dimensiones reales, se puede sugerir que la losa con

estructura cúbica podría ser una mejor opción para su implementación. En trabajos futuros, se puede generar un modelo escalado en ANSYS para adaptarlo al tamaño de probetas de laboratorio para validar experimentalmente mediante ensayos estandarizados, como la prueba de flexión de tres puntos y la de tensión y compresión, a fin de generar un estudio más completo.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional del México por el financiamiento del proyecto 17768.23-PD.

## Referencias

- Abdulla, A. I., & Khatab, H. R. (2014). Behavior of Multilayer Composite Ferrocement Slabs with Intermediate Rubberized Cement Mortar Layer. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39(8), 5929–5941. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1171-y>
- Ahmad, T., Arif, M., & Masood, A. (2014). Experimental Investigations on Ferrocement Roof Slab System for Low Cost Housing. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series A*, 95(1), 9–18. <https://doi.org/10.1007/s40030-014-0066-y>
- American Concrete Institute. (2022). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural: ACI 318S-19*.
- ANSYS Inc. (2023). ANSYS WorkBench. In 2023. ANSYS Inc. .
- Carrillo, J., & Silva-Páramo, D. (2016). Ensayos a flexión de losas de concreto sobre terreno reforzadas con fibras de acero. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 17(3), 317–330. <https://doi.org/10.1016/j.riit.2016.07.003>
- Clarke, R. P. (2010). Study of full-scale elements of a ferrocement roof system for Caribbean application. *Construction and Building Materials*, 24(3), 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.09.003>
- Do, T. D. D., Yen, K.-J., Yen, C.-H., & Hung, C.-C. (2022). Impact of tension stiffening on the tensile and flexural behavior of ECC ferrocement. *Construction and Building Materials*, 329, 127201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127201>
- González-Cuevas, O. M., & Robles-Fernández, F. (2013). *Aspectos fundamentales del concreto reforzado* (4th ed.). Limusa.
- Greepala, V., & Nimityongskul, P. (2009). Influence of Heating Envelope on Structural Fire Integrity of Ferrocement Jackets. *Fire Technology*, 45(4), 385–404. <https://doi.org/10.1007/s10694-008-0056-6>
- Guerra-García, L. M., Da Costa-Baêta, F., Ferreira-Tinôco, I. da F., Osorio-Saraz, J. A., & Osorio-Hernández, R. (2013). Evaluación del comportamiento mecánico de tres clases de placas tipo sándwich de ferrocemento para la construcción en vivienda rural. *DYNA*, 80(181), 210–218.
- Li, J., Wu, C., Hao, H., Su, Y., & Li, Z.-X. (2017). A study of concrete slabs with steel wire mesh reinforcement under close-in explosive loads. *International Journal of Impact Engineering*, 110, 242–254. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2017.01.016>
- Mishra, R. (2018). FEM based prediction of 3D woven fabric reinforced concrete under mechanical load. *Journal of Building Engineering*, 18, 95–106. <https://doi.org/10.1016/j.jobte.2018.03.003>
- Mohana, R., Prabavathy, S., & Leela Bharathi, S. M. (2021). Sustainable utilization of industrial wastes for the cleaner production of ferrocement structures: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 291, 125916. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125916>
- Naaman, A. E. (2012). Evolution in Ferrocement and Thin Reinforced Cementitious Composites. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 37(2), 421–441. <https://doi.org/10.1007/s13369-012-0187-4>
- Procuraduría Ambiental y de Ordenamiento Territorial de la CDMX. (2018). *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal*.
- Rifaie, W. Al, & Hantoosh, N. M. (2022). New Composite Floor Construction. *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ASET53988.2022.9735119>
- Sasi, E. A., & Peled, A. (2015). Three dimensional (3D) fabrics as reinforcements for cement-based composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 74, 153–165. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.04.008>
- Serrano-Guzmán, M. F., & Pérez-Ruiz, D. D. (2010). Análisis de sensibilidad para estimar el módulo de elasticidad estático del concreto. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 2, 17–30. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=361233547002>
- Shaheen, Y. B. I., Etman, Z. A., & Gomaa, O. (2019). Structural behavior of thin ferrocement plates with and without stiffeners subjected to compression loading. *Asian Journal of Civil Engineering*, 20(2), 237–260. <https://doi.org/10.1007/s42107-018-0101-9>
- Valencia Jiménez, E., Pérez Lara y Hernández, M. Á., & Arjona Catzim, I. F. (2020). Análisis del comportamiento mecánico a compresión de paneles estructurales prefabricados de ferrocemento. *Perspectivas de La Ciencia y La Tecnología*, 3(6), 138–147. <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas/article/view/253>
- Yerramala, A., Rama Chandurdu, C., & Bhaskar Desai, V. (2016). Impact strength of metakaolin ferrocement. *Materials and Structures*, 49(1–2), 5–15. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0469-2>
- Yerramala, A., Ramachandurdu, C., & Bhaskar Desai, V. (2013). Flexural strength of metakaolin ferrocement. *Composites Part B: Engineering*, 55, 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.029>