



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

DISEÑO Y MODELACIÓN DE DIAFRAGMAS METÁLICOS EN ACERO AL CARBONO

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero Civil

AUTOR: Josué Saúl Caicedo Ramírez
TUTOR: David Patricio Guerrero Cuasapaz

Quito - Ecuador
2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Josué Saúl Caicedo Ramírez con documento de identificación N° 1719096057, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 19 de febrero del 2024

Atentamente,



Josué Saúl Caicedo Ramírez

1719096057

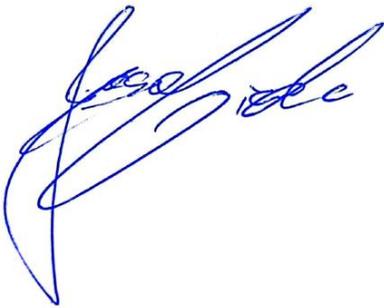
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Josué Saúl Caicedo Ramírez con documento de identificación N° 1719096057, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Artículo Académico: “Diseño y Modelación de Diafragmas Metálicos en Acero al Carbono” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de febrero del 2024

Atentamente,



Josué Saúl Caicedo Ramírez

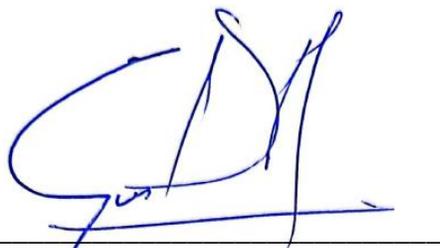
1719096057

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, David Patricio Guerrero Cuasapaz con documento de identificación N° 1715215974, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DISEÑO Y MODELACIÓN DE DIAFRAGMAS METÁLICOS EN ACERO AL CARBONO**, realizado por Josué Saúl Caicedo Ramírez con documento de identificación N° 1719096057, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Artículo Académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 19 de febrero del 2024

Atentamente,



Ing. David Patricio Guerrero Cuasapaz, MSc.

1715215974

DISEÑO Y MODELACIÓN DE DIAFRAGMAS METÁLICOS EN ACERO AL CARBONO

DESIGN AND MODELING OF METALLIC DIAPHRAGM IN CARBON STEEL

Josué Caicedo-Ramírez¹, Patricio Guerrero-Cuasapaz²

Resumen

Las estructuras están conformadas por varias partes, una de ellas son los diafragmas rígidos, son elementos estructurales que soportan cargas en dirección de la fuerza de gravedad, lo que ayuda a la estructura a no deformarse y tener un mejor comportamiento ante fuerzas externas. Como consecuencia de ello, en el presente estudio se modeló y fabricó diafragmas rígidos que sirvan para el uso de entresijos en las edificaciones. Los modelos fueron sometidos a fuerzas de carga por unidad de área, midiendo las deflexiones máximas alcanzadas y esfuerzos internos que estos generan en los distintos puntos de apoyos, logrando como resultado el diseño en comparación a los ensayos no difiera en las deflexiones, se realizó una pequeña comparación de dos estructuras de acero una hecha de losa con panel colaborante y otra con el diafragma rígido analizado, conociendo el valor máximo de sobrecarga que se puede aplicar en el elemento para que si deflexión siga en el rango apropiado dependiendo de la separación de apoyos. Se observó una disminución de hasta un 50 % del peso total de la estructura con el sistema de diafragmas rígidos en comparación con estructuras de acero tradicional.

Palabras Clave: deflexión, diafragmas rígidos, ensayos, esfuerzos, modelos matemáticos, módulos.

Abstract

Structures are made up of several parts, one of them being rigid diaphragms, which are structural elements that support loads in the direction of the force of gravity, which helps the structure not to deform and to have a better behavior in the face of external forces. As a consequence, in the present study, rigid diaphragms were modeled and fabricated to be used as mezzanine floors in buildings. The models were subjected to load forces per unit area, measuring the maximum deflections reached and internal forces that these generate in the different points of support, achieving as a result the design in comparison to the tests does not differ in the deflections, a small comparison of two steel structures was made, one made of slab with collaborating panel and the other with the analyzed rigid diaphragm, knowing the maximum value of overload that can be applied in the element so that its deflection remains in the appropriate range depending on the separation of supports. A decrease of up to 50 % of the total weight of the structure was observed with the rigid diaphragm system compared to traditional steel structures.

Keywords: deflection, efforts, essays, mathematical model, modules, rigid diaphragm.

¹ Estudiante de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

² Docente de Ingeniería Civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autores para correspondencia: jcaicedor2@est.ups.edu.ec; dguerrero@ups.edu.ec

1. Introducción

La empresa ARMO S.C.C. y el creador del producto, el ingeniero Carlos Vega son los promotores de la presente investigación estructural que se constituyó, como plan de titulación. Los recursos físicos y económicos necesarios para el desarrollo de esta fase fueron provistos por la empresa ARMO S.C.C. La investigación científica del comportamiento estructural del producto fue ideada y desarrollada entre el Ing. Patricio Guerrero, director del artículo académico, y el Sr. Josué Caicedo, aspirante a obtener el título de ingeniero civil.

Las propiedades físico-mecánicas de los materiales evolucionan por el avance de las nuevas tecnologías, estudio de los materiales, modelos y diseños constructivos, por este motivo, el ingeniero civil se ve en la necesidad de adaptarse e innovar junto con los nuevos cambios de las estructuras [1].

Las edificaciones construidas con acero, conocidas como estructuras metálicas, son más livianas presentando así un mejor desempeño ante las fuerzas sísmicas, ya que, estas son proporcionales al peso de la estructura, lo cual garantiza que mientras menos peso, recibe una menor carga sísmica [2].

Un diafragma se puede definir como un conjunto estructural horizontal o tenuemente alejado de la horizontal con espesores menores con respecto a sus demás dimensiones con la capacidad de operar bajo fuerzas en dirección de su propio plano, transmitiendo las cargas a los demás verticales [3].

Se considera que es un diafragma a un elemento estructural, que tiene dos de sus dimensiones mucho mayores a la tercera, desempeñado un papel importante en el funcionamiento de la estructura bajo los efectos de la gravedad y cargas horizontales. Entre sus funciones principales se encuentran que resiste la mayoría de las cargas de gravedad, proporciona soporte lateral para sistemas de resistencia sísmica, proporciona arriostramiento para evitar la inestabilidad de columnas, fija los miembros verticales de la estructura para que cumplan con

la resistencia sísmica y que transmiten fuerzas al sistema de resistencia sísmica principal de la estructura [4]-[5].

El comportamiento de las cargas en un edificio depende, en gran medida, de la configuración de los diafragmas de cada piso o entrepiso. Estos diafragmas pueden ser: rígidos, semirrígidos o flexibles [6].

Por ello se diseñó un diafragma estructural metálico rígido, para definir que un diafragma sea rígido, se utiliza un criterio que es la relación geométrica en planta, es decir, cuando se tiene una relación largo-ancho (L/A) menor a 1:3 sin irregularidades [6]-[7].

Diseñando un diafragma metálico que resista cargas gravitacionales y su deformación sea mínima, el cual se pretende usar como método para ampliar las luces de apoyo o vigas secundarias, que forman parte de los apoyos donde están ubicadas las losas con panel metálico en la estructura.

Los diafragmas rígidos, al ser sometidos a una fuerza horizontal, se considera desplazamientos y rotaciones únicamente en su plano, ya que de estos depende la correcta distribución de las fuerzas, produciendo que dichos desplazamientos sean iguales en los elementos los soportan, de este modo, las fuerzas horizontales se distribuyen en los elementos de soporte en función de su rigidez [8]-[9].

Lo cual lleva al tema central de este documento que es la fabricación de diafragmas rígidos metálicos para su uso en entrepisos, como un nuevo modelo de sistema constructivo.

2. Materiales y Métodos

Después de analizar los diversos tipos de aceros disponibles en el mercado para la fabricación de los elementos que constituyen el diafragma rígido proyectado como el objeto de estudio, se optó por emplear acero ASTM A36. Este material presenta características específicas en cuanto a límite de fluencia y límite elástico, como detallado en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores de límite elástico y resistencia a la tracción (MPa) [10].

TIPO DE ACERO	Fy (MPa)	Fu (MPa)
ASTM A36	250	400-500
ASTM A572 Gr. 50	345	450
ASTM A588	345	450

Para llegar a la fabricación de las probetas primero, se analizaron las láminas y los tubos que lo conforman como una sola unidad por medio de modelos matemáticos y programas especializados en elementos finitos, una vez completado los modelos, se realiza por el método experimental, el registro de datos obtenidos para lograr tener una comparación de resultados entre el método experimental con el modelo matemático.

Para el diseño matemático se empleó el uso de un software especializado de elementos finitos, que en este caso es el SAP2000 [11], lo que permite discretizar el elemento a conveniencia del usuario teniendo en cuenta las condiciones de borde y la continuidad entre placa y tubo en el mallado final, los elementos fueron modelados como membranas (Shell) permitiendo dar las características mecánicas correspondientes a cada elemento, para que sigan siendo parte de un elemento global [11]-[12].

Se diseñó un diafragma metálico con materiales y medidas que se consiguen en el mercado, llegando a ser conformados por tubos de 2 pulgadas de diámetro con un espesor de 1,5 mm y, las planchas que están en la parte superior e inferior del elemento son planchas de 1,4 mm de espesor con longitud de 2440 mm y ancho de 1220 mm. La altura del elemento final tomando en cuenta los espesores de las planchas es de 118 mm.

Al conocer las dimensiones de las planchas superiores e inferiores, se realizó la distribución interna de los tubos de manera que no exista material sobrante, con ello se tiene la separación de tubos en sentido horizontal y vertical como se puede apreciar en la figura 2, y en la tabla 2 se aprecian los valores de cada variable en la distribución.

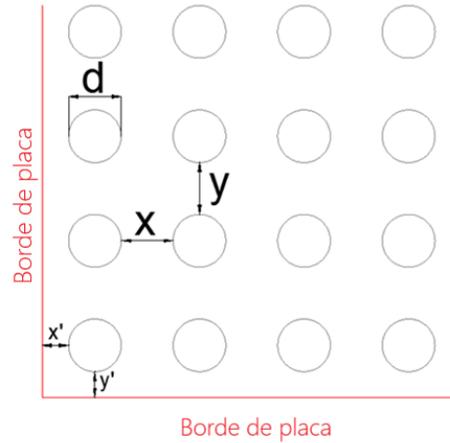


Figura 2. Modulación interna de la probeta que se replican a lo largo y ancho.

Tabla 2. Valores de las variables en la distribución.

Símbolo	Distancia (mm)
d	50,8
x	50
y	50
x'	25
y'	25

El ensamble del elemento se los realizó en taller, el propósito está en que exista el menor desperdicio posible, ya que, es un ambiente más controlado en logística, manipulación, control de los materiales y fabricación del diseño. Es decir, el diseño de cada módulo fue propuesto sin desperdicio haciendo uso del material en su totalidad [13].

Con los parámetros establecidos de dimensiones y separaciones se llevó a cabo el cálculo matemático, que condujo a determinar el peso total del diafragma rígido como unidad (módulo), de las placas y tubos que lo conforman.

En la figura 3 se puede apreciar un segmento del modelo ya discretizado tomando en cuenta las condiciones de borde por el mallado de cada elemento.

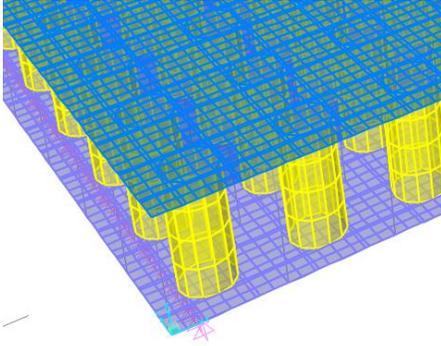


Figura 3. Discretización de los elementos del módulo.

Previo la realización de los análisis con cargas, se comprobó que el diafragma esté adecuadamente modelado en el programa, comparando los pesos que se obtiene del programa con los pesos sacados de forma matemática, para con ello tener una mayor confiabilidad entre el diafragma diseñado y el próximo a fabricar.

Para la fabricación de los diafragmas se los dividió por módulos, los cuales podemos apreciar en la tabla 3 en la cual se detalla las dimensiones de los materiales a usar para cada módulo, con ello, en la figura 4a se puede visualizar un ejemplo de los tres primeros módulos con la longitud de plancha mayor, a su vez, en la figura 4b se puede apreciar el módulo con la longitud menor.

Tabla 3. Dimensiones de los módulos del diafragma rígido.

Módulo	Planchas			Tubos	
	Ancho	Longitud	Espesor	Diámetro (in)	Espesor (mm)
1	1220	2440	1,4	2	1,5
2	1220	2440	1,4	2	1,5
3	1220	2440	1,4	2	1,5
4	1220	1830	1,4	2	1,5



Figura 4a. Módulo fabricado de 1220 x 2440 mm.

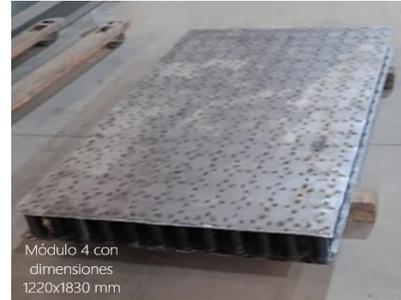


Figura 4b. Módulo fabricado de 1220x1830 mm.

Para la unión entre las planchas superiores e inferiores a los tubos y trabajen como unidad, se realizó por medio de soldadura intermitente, usando como material de aporte alambre sólido de 1,2 mm y la pieza de trabajo que son las planchas con los tubos, el gas de protección para la fusión que ayuda a estabilizar el arco se usó CO₂. Según el material y los resultados que se desea se requiere mezclas gaseosas y se controló el amperaje de forma adecuada [14].

Esto se puede observar en la figura 5, como un soldador certificado realiza el proceso de fabricación del módulo.



Figura 5. Fabricación de probetas (diafragmas rígidos).

Al momento de realizar los ensayos se usó perfiles de vigas armados como apoyos, ya que estos representarán fielmente la forma de estar apoyados los módulos en una estructura, con la separación acorde a los modelos matemáticos previstos, como se puede observar en la figura 6 en la cual el módulo se encuentra apoyado en sus extremos.



Figura 6. Módulo del diafragma apoyado en sus extremos listo para ensayar.

Como se aprecia en la figura 6, la forma de cómo se encuentra apoyado el diafragma rígido a los perfiles metálicos, en el modelo se replicó las condiciones de borde en los extremos, las cuales están modeladas en sentido longitudinal de la viga de apoyo, éste procedimiento se aplicó únicamente en la plancha inferior del diafragma, ya que esta se encuentra sobre las vigas de apoyo, a su vez los nodos de la plancha superior sus movimientos no están restringidos en ninguna dirección, tiene libertad de movimiento, como se aprecia en la figura 7 donde se presenta el modelo con las condiciones de borde previo a su análisis. Cada nodo que está apoyado a la viga está restringido al desplazamiento en sentido horizontal y vertical con respecto al plano de la plancha [15].

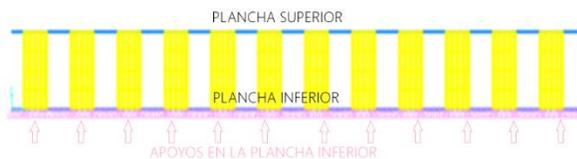


Figura 7. Condiciones de borde del diafragma.

En las edificaciones tradicionales en acero, para la construcción de losas se coloca placa colaborante, la cual tiene como apoyos vigas

secundarias o viguetas, las mismas que poseen distintas separaciones en las cuales se apoya la placa colaborante correspondiente. En esta investigación se realizaron los ensayos de módulos de diafragmas con distintas separaciones de apoyo y con distintas dimensiones para analizar su comportamiento, estas dimensiones se pueden apreciar en la tabla 4 que son las medidas de cada probeta de diafragma a modelar y ensayar.

En las edificaciones, las losas son las que reciben el peso de las personas, materiales, equipos, instalaciones eléctricas, sanitarias, etc. distribuidas por unidad de área (kg/m^2), esto dependiendo del uso que se le da a la misma, como se describe en la NEC-SE-CG (Cargas no Sísmicas) [16], por ende, en los modelos se aplicó carga por unidad de área, siendo una carga cíclica continua que se incrementa progresivamente en $50 \text{ kg}/\text{m}^2$ hasta llegar a la carga final de $700 \text{ kg}/\text{m}^2$.

Se puede observar en la figura 8 luego de haberse analizado el modelo de diafragma con cargas impuestas se ve la deflexión que surge en el centro de la misma ya que es el punto más desfavorable, tomando en cuenta que está con el contorno de la posición inicial para que se aprecie de mejor manera la deflexión que recibe.

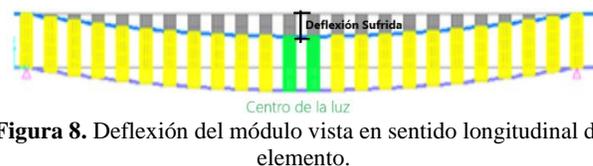


Figura 8. Deflexión del módulo vista en sentido longitudinal del elemento.

En el diafragma ya analizado se puede observar los esfuerzos que recibe tanto las planchas superiores como inferiores y los tubos, lo cual es un indicativo de la forma como trabaja el diafragma como unidad, de esta manera sus esfuerzos estén distribuidos o puntuales, en la figura 9 se puede observar la plancha inferior como sus esfuerzos están distribuidos de manera uniforme desde el centro del módulo a sus extremos, en las figuras 8a, 8b, 8c, se puede apreciar una ampliación de la figura 8 la cual presenta los resultados de los esfuerzos en cada elemento finito a través de una escala cromada en los puntos de análisis.

Tabla 4. Medidas de probetas y longitud de separaciones.

Ensayo número	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Altura del elemento (mm)	Número de apoyos	Distancia de apoyos (mm)
1	2440	1220	118	2	2440
2	2440	1220	118	3	1220
3	4880	1220	118	4	1626
4	7320	1220	118	5	1830
5	9150	1220	118	5	2440-1830

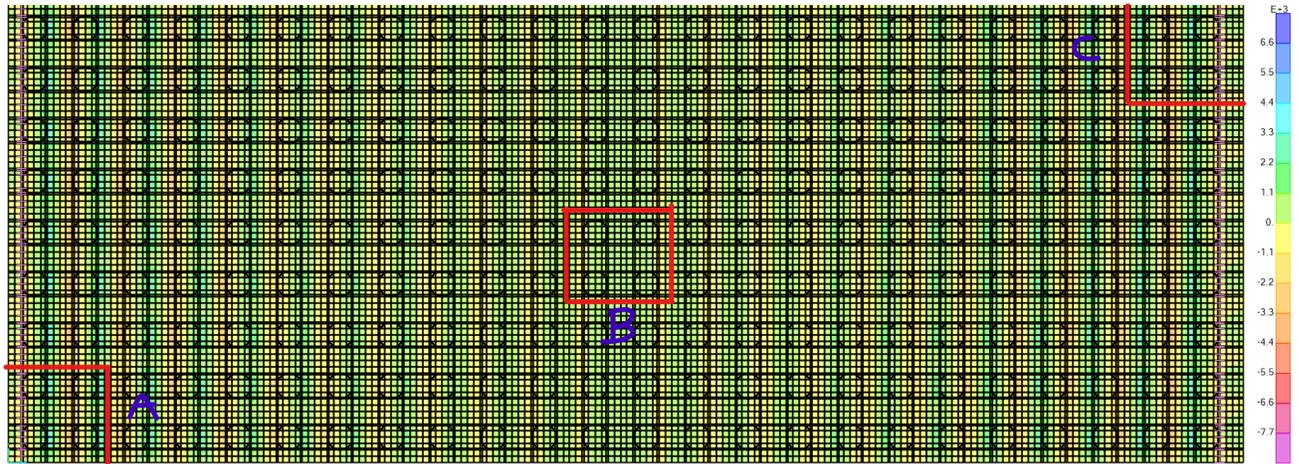


Figura 9. Distribución de esfuerzos en la placa inferior.

La figura 9a es una ampliación de la plancha inferior ubicada en el extremo inferior izquierdo de la misma, lo cual indica que por acción de los tubos y de la carga sobre impuesta distribuida en esos puntos recibe esfuerzos de compresión y tensión.

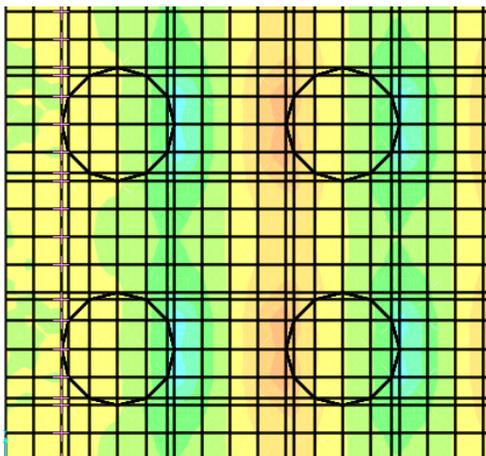


Figura 9a. Ampliación inferior izquierda de la plancha superior.

En la figura 9b se puede apreciar en la gama de esfuerzos representado por colores, los esfuerzos de tensión producto de los tubos en esas intersecciones disminuye, pero seguirán presentes a lo largo de la plancha.

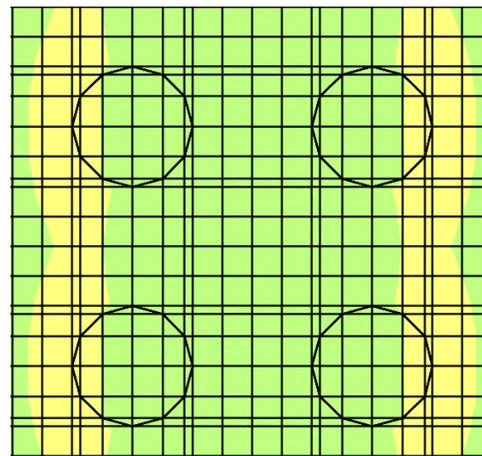


Figura 9b. Ampliación central de la plancha superior.

La Figura 9c constituye una ampliación de la placa inferior localizada en el extremo superior derecho. Se evidencia una concordancia en la

distribución cromática con la Figura 8a, situada en el extremo opuesto. Este fenómeno no solo sugiere una homogeneidad estructural, sino también insinúa que, bajo la influencia de las cargas externas, los esfuerzos se transmiten de manera equitativa a lo largo de la totalidad de la plancha.

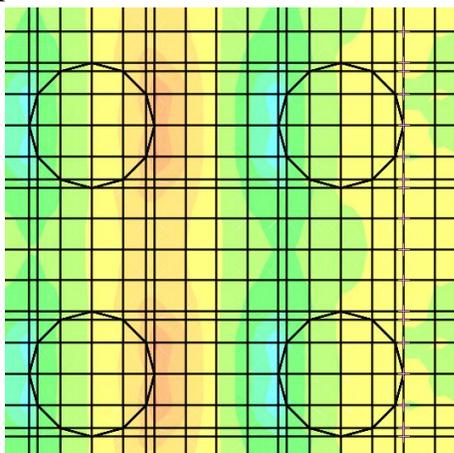


Figura 9c. Ampliación central de la plancha superior.

Como se puede apreciar en la tabla 5, en la cual están los esfuerzos máximos de compresión o tracción que sufre la placa inferior en las secciones a, b y c lo cual indica que no supera el valor de esfuerzo último.

Tabla 5. Esfuerzos resultantes en la placa inferior.

Cuadrante	Esfuerzo máximo (MPa)	Esfuerzo último A36 (MPa)
a	453	460
b	30	460
c	453	460

Al realizar los ensayos, para poder tener una carga similar a la impuesta en la modelación estructural, se usó una carga equivalente, ya que no es posible dar una carga uniforme en toda el área de superficie, por tanto, es más práctico cargar por peso de elementos. Por tal motivo se calculó una carga equivalente en kg usando perfiles metálicos para realizar los ensayos, se usó perfil tubular hueco de 200x100x6x6000 mm y perfil tipo “G” (correas) de 200x50x15x3x6000 mm como se puede observar en la figura 10.



Figura 10. Perfiles que son usados como sobre carga para los ensayos.

Cada luz recibió carga de manera uniforme con el peso correspondiente al ensayo, este peso o sobrecarga se lo puede observar en la tabla 6, la cual muestra la cantidad, tipo de perfiles, el peso correspondiente con su equivalencia que fueron usados en el ensayo 1, se realizó de la misma manera para los ensayos del 2 al 5. Se registró el tiempo desde la carga hasta su descarga para conocer el lapso sometido a esfuerzo y lograr medir la deformación hasta su posición inicial. Lo cual indica que si regresa a su posición inicial después de haber sido cargado el acero estaba trabajando en el rango de fluencia, que dice que se deforma por acción de una fuerza externa pero una vez retirada esa fuerza regresa a su posición inicial, es decir, que está trabajando en su zona elástica [17].

Con la finalidad de mejorar en precisión al momento de registrar los resultados se fabricó un dispositivo metálico con un volado y un parante de soporte, dicho dispositivo describe forma de “L”, el cual se coloca al centro de las luces, en donde se marcó puntos de referencia con ayuda de una plomada, los puntos son el lugar donde se midieron los datos, esto se puede apreciar en la figura 11.



Figura 11. Preparación para el control de deflexiones.

Tabla 6. Carga equivalente para ensayo 1.

Sobre carga kg/m ²	Ensayo 1.- 2440x1220 con apoyos en los extremos con una luz de 2440						Diferencia en kg de ensayo
	Carga equivalente puntual al centro de la luz entre los apoyos (kg)	Número de tubos por luz	Número de correas por luz		Total en kg a ensayar		
		kg		kg			
50	149	1	163	0	0	163	14
100	298	1	163	3	132	295	-3
150	447	2	325	3	132	457	10
200	595	3	488	2	88	576	-19
250	744	4	651	2	88	739	-5
300	893	5	814	2	88	902	9
350	1042	6	977	2	44	1021	-21
400	1191	7	1139	1	44	1183	-8
450	1340	8	1302	1	44	1346	6
500	1488	8	1302	4	175	1477	-11
550	1637	10	1628	0	0	1628	-9
600	1786	11	1791	0	0	1791	5
650	1935	12	1953	0	0	1953	18
700	2084	12	1953	3	132	2085	1



Figura 13. Deflexiones de un modelo con sus módulos unidos.

Para el registro de deflexiones en varios puntos, se llevó a cabo la medición en el centro de la luz, dado que es en este punto donde la deflexión es mayor, representando el escenario más crítico, tal como se evidenció en el modelo analizado mediante el software [18], se señaló tres puntos de referencia a lo largo del eje del dispositivo, como se indica en la figura 12, con la finalidad de no depender únicamente de una única medida, con lo cual se recolectó más valores.

En la figura 13 se aprecian las deformaciones de un modelo de diafragma continuo con la unión de varios módulos trabajando como unidad, por lo tanto, en cierto número de ensayos se ubicó la unión de los módulos entre los apoyos como se puede apreciar en la figura 14, esto con el fin de analizar si trabaja de la misma manera que lo hace en el programa ya que el comportamiento debe asemejarse.



Figura 14. Unión de módulos en el vano de los apoyos.

Tabla 7. Deflexiones calculadas máximas permitidas según la ACI 318-14 [20].

Member	Condition	Deflections to be considered	Deflection limitation
Flat roofs	Not supporting or attached to nonstructural elements likely to be damaged by large deflections	Immediate deflection due to maximum of L_r , S and R	$L/180$
Floors	Immediate deflection due to L Likely to be damaged by large deflections	$L/360$ That part of the total deflection occurring after attachment of nonstructural elements, which is the sum of the time-dependent deflection due to all sustained loads and the immediate deflection due to any additional live load	$L/480$
Roof or floors	Supporting or attached to nonstructural elements Not likely to be damaged by large deflections		$L/240$

En obra no siempre se tendrán separaciones de apoyos que coincidan con la unión, ya que, se pretende usar luces con mayor separación entre apoyos (vigas secundarias), aumentando la distancia lo que provoca una reducción en el número de las vigas secundarias.

Con el fin de tener una guía de control para las deflexiones en los módulos, se usó la norma que se aprecia en la tabla 7 que pertenece al ACI 318-14 en la sección 24.2.2 que posee el nombre de “Maximum permissible calculated deflections”, es un código para deflexiones en losas de concreto, no obstante, brinda una referencia de valores de deflexiones permisibles ya que, el módulo a fabricar es totalmente de acero, más su uso es proyectado para losas [19],

Otra referencia puede ser la indicada por el eurocodigo 3, en el cual se habla sobre deflexiones de vigas en acero, no para losas de acero, por ello está clasificado en uso de suelos y techos, lo cual varía la ecuación a usar entre $L/250$, $L/300$, $L/350$ y $L/500$ sabiendo que L es la longitud de las luces entre apoyos. Esta norma fue suplantando a la norma DIN 18800-3 ya que en la mayoría de los países europeos usan el eurocodigo como norma base [21]-[22].

Con ellos se calcularon las deflexiones permitidas según el ACI en losas para cada uno de los ensayos lo cual podemos ver en la tabla 8 la cual nos indica la deflexión máxima que debería sufrir.

Tabla 8. Deflexiones máximas calculadas según ACI.

Deflexión máxima admitida (mm)	
Ensayo 1	10,17
Ensayo 2	5,08
Ensayo 3	6,78
Ensayo 4	7,63
Ensayo 5	10,17

3. Resultados y Discusión

Para suscitar una mejor comparación en los resultados entre los diafragmas y los ensayos, se tabularon los datos alcanzados de los ensayos ya que, en los modelos es fácil determinar la deflexión mayor en el sistema, a su vez, en los ensayos se obtuvieron datos de distintos puntos y se los promediaron para así tener un resultado final con el cual se puedan comparar.

Las deflexiones máximas obtenidas en los modelos se observan en la tabla 9, la cual está estructurada de acuerdo con el modelo y la sobre carga impuesta en cada ciclo, está representando la deflexión más grande en todo el sistema que se obtiene en el centro de la luz entre los apoyos.

En la figura 15 se aprecia el comportamiento en los módulos de acuerdo con la aplicación de cargas sometidas, se observa que describe un comportamiento lineal, el cual es directamente proporcional a la carga que recibe.

Tabla 9. Datos de las máximas deflexiones en los modelos.

Sobre carga kg/m ²	Deflexión máxima (mm)				
	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4	Modelo 5
0	0,819	0,214	0,383	0,503	0,965
50	1,759	0,460	0,824	1,083	2,072
100	2,698	0,705	1,273	1,663	3,180
150	3,638	0,951	1,717	2,242	4,287
200	4,578	1,197	2,162	2,823	5,395
250	5,518	1,442	2,607	3,404	6,502
300	6,457	1,688	3,051	3,984	7,610
350	7,397	1,934	3,496	4,564	8,717
400	8,337	2,179	3,941	5,144	9,825
450	9,276	2,425	4,386	5,724	10,932
500	10,216	2,671	4,831	6,304	12,012
550	11,156	2,916	5,276	6,885	13,137
600	12,096	3,162	5,721	7,465	14,243
650	13,035	3,408	6,166	8,045	15,349
700	13,976	3,654	6,608	8,625	16,424

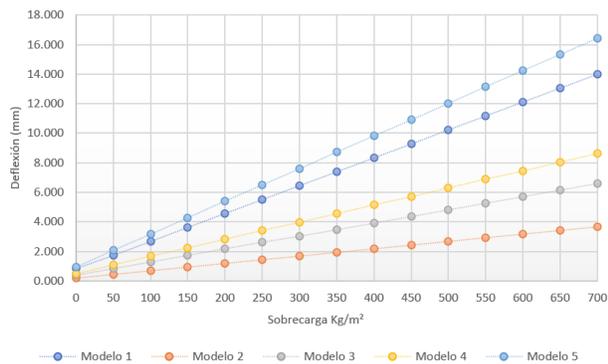


Figura 15. Gráfico de las deflexiones obtenidas.

En la figura 15 se puede observar que la deflexión máxima en los modelos analizados no supera los 16,5 mm lo cual podemos constatar en la tabla 9, el modelo 1 y el modelo 5 al tener separaciones de apoyos similares se puede comprobar que sus deflexiones son similares en los puntos de sobrecarga, a su vez mientras menor sea la separación de apoyos en el sistema menor será la deflexión como se puede observar en el modelo 2 el cual posee las menores separaciones de apoyo y sus deflexiones son las menores en todas las analizadas.

En la tabla 10 se puede observar el resultado de las tabulaciones en los ensayos, fueron medidas

en puntos del centro de las luces para tener valores mucho más precisos, trazando un eje en el centro de la luz del módulo para medir entre 3 a 4 resultados por luz, tomando en cuenta que en dichos puntos fueron los señalados con la plomada, se registraron todos los resultados para así evitar o tener el menor porcentaje de error por medición. Por ello en las tablas siguientes se indica el promedio de deflexiones medidas en el centro de las luces para cada ensayo.

Como se puede ver en la figura 16 los resultados de las deflexiones con las cargas impuestas no describen la forma de una recta perfecta, a su vez tienen puntos donde no aumenta o disminuye como el modelo matemático, se puede apreciar también que las deflexiones son proporcionales al peso, esto sería motivo ya que al ser un software especializado tiene mayor precisión en los valores obtenidos, a su vez en los ensayos, la incapacidad de medir los decimales se atribuye a las limitaciones del instrumento utilizado, que es un medidor láser con una tolerancia especificada de +/- 2 mm.

Tabla 10. Datos del promedio de las deflexiones en los ensayos.

Sobre carga kg/m ²	Promedio de deflexiones calculadas (mm)				
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50	1,000	0,000	0,556	0,667	1,417
100	2,000	0,833	1,222	1,250	3,083
150	3,250	1,000	1,556	2,000	4,083
200	3,500	1,500	2,222	3,250	5,333
250	5,250	1,667	2,778	3,417	6,167
300	6,500	1,667	2,778	3,917	7,167
350	7,500	1,667	3,556	4,750	8,333
400	8,750	1,833	4,111	4,833	9,667
450	9,000	1,833	4,222	5,675	10,778
500	10,000	2,000	4,778	6,000	11,778
550	11,500	2,667	5,000	6,556	12,556
600	12,500	3,167	5,444	7,222	13,667
650	13,250	3,500	5,889	7,778	14,333
700	15,000	3,833	6,889	8,778	15,167

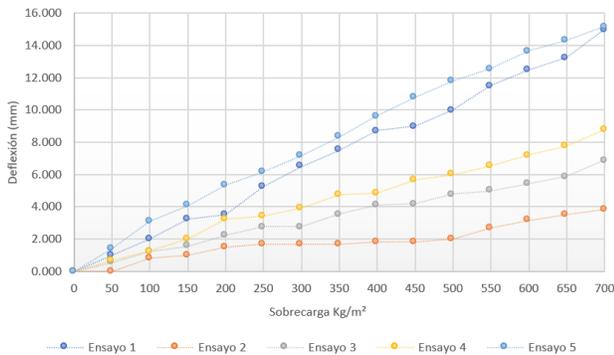


Figura 16. Gráfico de las deflexiones calculadas en los ensayos.

En el análisis del Gráfico 16, se observa que las tabulaciones derivadas de los modelos y los resultados experimentales exhiben similitudes, aunque no son idénticas. En cada una de las diversas cargas aplicadas, se manifiesta una variabilidad, como se detalla en la Tabla 11, que presenta las diferencias de deflexiones entre los modelos analizados.

En la Figura 17, se evidencia que las diferencias máximas surgen en los ensayos 1 y 5, superando 1 mm entre sí, es pertinente señalar que estas desigualdades no son uniformes en todos los ensayos, ya que, en numerosos puntos medidos, las divergencias en deflexiones son inferiores a 0,6 mm, lo cual sugiere una mayor concordancia con los modelos, especialmente en aquellos puntos donde las diferencias son menores.

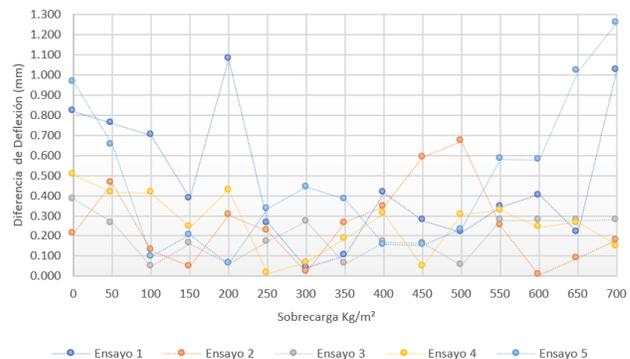


Figura 17. Diferencias en las deflexiones calculadas en los ensayos y modelos.

Tabla 11. Diferencia de deflexiones entre los modelos y ensayos.

Sobre carga kg/m ²	Diferencia en las deflexiones (mm)				
	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Ensayo 4	Ensayo 5
0	0,819	0,214	0,383	0,503	0,965
50	0,759	0,460	0,268	0,416	0,655
100	0,698	0,128	0,051	0,413	0,097
150	0,388	0,049	0,161	0,242	0,204
200	1,078	0,303	0,060	0,427	0,062
250	0,268	0,225	0,171	0,013	0,335
300	0,043	0,021	0,273	0,067	0,443
350	0,103	0,267	0,060	0,186	0,384
400	0,413	0,346	0,170	0,311	0,158
450	0,276	0,592	0,164	0,049	0,154
500	0,216	0,671	0,053	0,304	0,234
550	0,344	0,249	0,276	0,329	0,581
600	0,404	0,005	0,277	0,243	0,576
650	0,215	0,092	0,277	0,267	1,016
700	1,024	0,179	0,281	0,153	1,257

Adicionalmente, se realizó una comparación entre una estructura de acero elaborada de manera tradicional con losa de panel metálico y con el diafragma rígido analizado, ya que su uso es destinado en losas, las dimensiones de los modelos están descritas en la tabla 12, en la cual está se indica las separaciones entre columnas y la altura de entre piso.

Tabla 12. Dimensiones de las estructuras.

Modelo	Lado longitudinal (m)	Lado transversal (m)	Separación de correas (m)	Altura entrepiso (m)
Estructura de acero tradicional	7,32	3,66	1,83	2,4
Diafragmas rígidos	7,32	3,66	1,83	2,4

Se modeló la estructura con losa de estructura tradicional para tener una comparación en cuanto a los pesos y como afecta en el comportamiento estructural, como se puede observar en la figura 18 el modelo de la estructura con losa equivalente de panel colaborante.

En la figura 19 se puede observar la misma estructura modelada pero ahora con el diafragma rígido diseñado.

Las dos estructuras fueron modeladas y optimizadas mediante un enfoque que incorpora no solo cargas verticales, sino también la consideración de cargas sísmicas para su análisis, se han tenido en cuenta cargas como se detalla en la tabla 13, con el objetivo de generar una evaluación general de su comportamiento estructural.

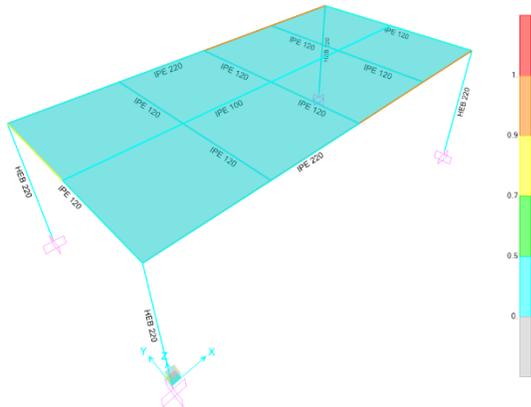


Figura 18. Modelo de la estructura analizado de modelo tradicional.

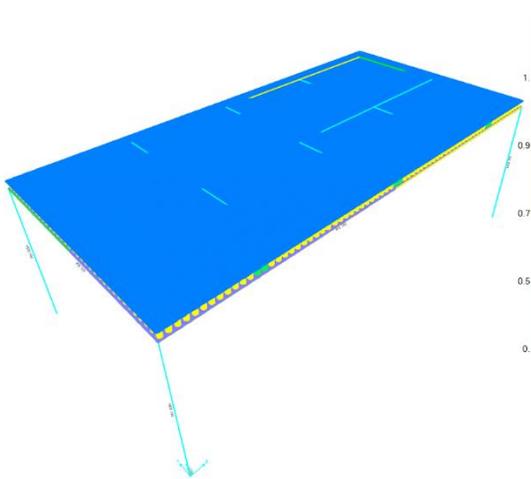


Figura 19. Modelo de la estructura analizado con diafragmas rígidos.

Tabla 13. Sobrecargas impuestas para los modelos realizados.

Modelo	Carga viva (kg/m ²)	Carga muerta (kg/m ²)
Estructura de acero tradicional	200	500
Diafragmas rígidos	200	500

Como se puede ver en los modelos, la estructura realizada con los módulos como losa presenta un peso considerablemente menor al usando losa equivalente. Lo cual garantiza que reciba una menor carga sísmica ya que el cortante basal que recibe la estructura depende del peso que tiene la misma [23], es decir, que con el nuevo módulo se garantiza una menor carga.

En la tabla 14 se puede apreciar solo el peso de la estructura metálica, sin tener en cuenta el peso de entrepiso

Tabla 14. Peso en estructura metálica.

Modelo	Peso total en estructura metálica (kg)	Peso sobre área (kg/m ²)
Estructura de acero tradicional	1275,06	47,59
Diafragmas rígidos	970,58	36,23

4. Conclusiones

Los diafragmas rígidos diseñados y modelados exhiben una consistencia significativa en sus deflexiones bajo las cargas aplicadas, es importante destacar que esta investigación sienta las bases para investigaciones subsiguientes en el ámbito.

En la evaluación de las deflexiones, se observa que, no se evidencian variaciones significativas con respecto al modelo, los ensayos del 2 al 4 exhiben diferencias mínimas en las deflexiones en comparación con los valores modelados, sin embargo, tanto el ensayo 1 como el 5 requieren que su carga no exceda los 450 kg/m², ya que, en caso contrario, las deflexiones resultantes superarían los cálculos establecidos por la norma ACI 318-14. Es relevante señalar que, aunque esta norma está diseñada para losas de concreto, su aplicación proporciona un indicativo de las deflexiones estructurales en losas.

En el modelo de una estructura usando losa de estructura de acero tradicional y el diafragma rígido diseñado se obtiene una reducción de al

menos un 50 % en peso total de estructura, y un 20% en peso de estructura metálica, existe esa diferencia ya que en donde existe mayor peso es en comparación a una losa de hormigón y la losa del módulo equivalente ya que está con un peso representativo de 42,30 kg/m².

Según la evaluación de los esfuerzos presentados en la tabla 5, se identifica una perfilación donde los esfuerzos son más elevados en los extremos y disminuyen gradualmente hacia el centro de la luz, este patrón sugiere la existencia de puntos en el mallado de elementos donde los esfuerzos tienden a concentrarse, en consecuencia, se recomienda ampliar la investigación en estas ubicaciones específicas para un análisis más detenido.

Agradecimiento

Se extiende el agradecimiento a la Empresa ARMO, bajo la representación del Ingeniero Carlos Vega, por su rol como impulsora del plan de investigación y por facilitar las condiciones necesarias para la realización y ejecución del proyecto. La empresa ha proporcionado apoyo económico y acceso a recursos físicos, incluyendo la disponibilidad de su taller. Se agradece también el acompañamiento, esfuerzo y respaldo incondicional de todos aquellos que participaron en el proceso de investigación y ejecución del plan. Su contribución, ya sea a través de apoyo emocional, orientación o inspiración, así como su experiencia, comprensión y paciencia en el complejo camino de la investigación, han sido fundamentales. La guía constante y la fe inquebrantable en mis conocimientos y habilidades han sido motivadoras para alcanzar la culminación de este trabajo. La gratitud por su inmenso apoyo a lo largo de todo el proceso es difícil de expresar con palabras.

Referencias

[1] R. Zepeda, “Construcción sostenible y madera: realidades, mitos y oportunidades. Tecnología en Marcha”, pp. 92-101, 2008.

- [2] S. Canola, “9 Razones por las que la Construcción en Acero es más Rápida” 2017 [En Línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/9-razones-por-las-que-la-construcci%C3%B3n-en-acero-es-m%C3%A1s-canola>. [Accedido: 14-nov-2023].
- [3] J. McCormac, “Análisis de estructuras-métodos clásico y matricial”. Alfaomega Grupo Editor, (2010)
- [4] R. Rueda, “ESTUDIO PARAMÉTRICO DEL COMPORTAMIENTO SÍSMICO DE DIAFRAGMAS EN EDIFICACIONES”, trabajo para la obtención del título de magister en Ing. Civil, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2016.
- [5] A. Dona, A. Catillo, “Diferencia entre Diafragmas Rígidos y Flexibles”, Instituto Mexicano de la Construcción en Acero [En Línea]. Disponible en: <https://www.imca.org.mx/newsletters/news19.php#:~:text=Diafragma%20r%C3%ADgido%3A%20No%20cambia%20su,las%20esquinas%20siguen%20siendo%20cuadradas>. [Accedido: 15-nov-2023]
- [6] M. C. García Moreno and R. Á. Shimabuku Landaure, “Evaluación estructural de una edificación con diafragma de entrepiso flexible y comparación con la división de la estructura a través de juntas sísmicas para edificaciones,” Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), Lima, Perú, 2018.
- [7] ASCE, American Society of Civil Engineers.
- [8] K. Kandrachoff, “Diafragmas en Estructuras”, 2021 [En Línea]. Disponible en: <https://www.linkedin.com/pulse/diafragmas-en-las-estructuras-kevin-kandrachoff/?originalSubdomain=es> [Accedido: 15-nov-2023]
- [9] P. VÉLEZ, “Estudio de los diafragmas horizontales flexibles para entrepiso y cubierta”, Doctoral dissertation, UNIVERSIDAD DE CUENCA, Cuenca, Ecuador, 2015.
- [10] MIDUVI, “Guía Práctica Para el Diseño de Estructuras de Acero de Conformidad con la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015”, NEC 2015 pp. 18, 2015.
- [11] CSi SPAIN, “Información General” SAP2000, [En Línea]. Disponible en: <https://www.csiespana.com/software/2/sap2000>. [Accedido: 15-nov-2023].

- [12] S. Chapra, R. Canale, “Métodos Numéricos Para Ingenieros” vol. 7, pp. 691-709.
- [13] P. Serrano, “Construcción industrializada ¿Qué es y qué beneficios tiene?”, 2021 [En Línea]. Disponible en: <https://www.caloryfrio.com/construccion-sostenible/construccion-industrializada-que-es-que-beneficios-tiene.html>. [Accedido: 15-nov-2023]
- [14] M. López, “Losas Compuestas: Procedimientos de Ensayo”, monografías, 2008, [En Línea]. Disponible en: <https://www.monografias.com/trabajos66/losas-compuestas-procedimientos-ensayo/losas-compuestas-procedimientos-ensayo>. [Accedido: 15-nov-2023].
- [15] B. Voronin, “Sobre la cinemática de engranajes de dos grados de libertad.” Ingeniería Mecánica. Tecnología y Desarrollo, 2004
- [16] MIDUVI, “Norma Ecuatoriana de la Construcción Cargas No Sísmicas”, NEC_SE_CG 2015, 2015.
- [17] V. González, J. Botero, R. Rochel, J. Vidal, M Álvarez, “Propiedades mecánicas del acero de refuerzo utilizado en Colombia”. Ingeniería y Ciencia, 1(1), 67-76, 2015.
- [18] Sky Civ, “Deflexión de Viga: Definición, Fórmula y ejemplos”, 2015-2023, [En Línea] Disponible en: <https://skyciv.com/es/docs/tutorials/beam-tutorials/what-is-deflection/>. [Accedido: 16-nov-2023].
- [19] A. García, A. P., & F. Chóez, “Estudio comparativo de los diseños sísmicos, de una estructura de pórticos dúctiles resistentes a flexión de hormigón armado, usando las especificaciones NEC–2015, ASCE 7-16 de la asociación Estadounidense de Ingenieros Civiles; ACI 318-14 del Instituto Estadounidense del hormigón armado”, trabajo de tesis, La Libertad, Universidad Estatal Península de Santa Elena, 2019.
- [20] ACI (American Concrete Institute) Committee 318. (2014). Building Code Requirements or Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14).
- [21] European Committee for Standardization, "Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (EN 1993-1-1)," Brussels, Belgium: CEN, 2015.
- [22] Norma DIN 18800, "Design of Steel Structures: General Rules and Rules for Buildings."
- [23] F. Crisafulli, “Diseño sismorresistente de construcciones de acero”. Santiago de Chile: Asociación Latinoamericana del Acero-Alacero. 2018.