



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS REGULARES UTILIZANDO
LOSAS ALIVIANADAS Y POSTENSADAS**

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

AUTOR: Bryan Alejandro Gualoto Andrango
TUTOR: David Patricio Guerrero Cuasapaz

Quito - Ecuador
2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Bryan Alejandro Gualoto Andrango con documento de identificación N° 1718644444 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, 12 de octubre del 2023

Atentamente,



Bryan Alejandro Gualoto Andrango

1718644444


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

Yo, Bryan Alejandro Gualoto Andrango con documento de identificación N° 1718644444, 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: “Comportamiento estructural de edificios regulares utilizando losas alivianadas y postensadas”, 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, 12 de octubre del 2023

Atentamente,



Bryan Alejandro Gualoto Andrango

1718644444

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: **COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS REGULARES UTILIZANDO LOSAS ALIVIANADAS Y POSTENSADAS**, realizado por Bryan Alejandro Gualoto Andrango con documento de identificación N° 1718644444, 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, 12 de octubre del 2023

Atentamente,



Ing. David Patricio Guerrero Cuasapaz, MSc

1715215974

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE EDIFICIOS REGULARES UTILIZANDO LOSAS ALIVIANADAS Y POSTENSADAS

STRUCTURAL BEHAVIOR OF REGULAR BUILDINGS USING LIGHTENED AND POST-TENSIONED SLABS

Bryan Gualoto-Andrango ¹, David Guerrero-Cuasapaz ²

Resumen

El Ecuador se encuentra dentro del denominado Cinturón de Fuego del Pacífico, por lo que su actividad sísmica es alta y está expuesto a eventos sísmicos recurrentes, a tal punto de que estos movimientos telúricos se perciben con intensidad en varias provincias. Aquí la importancia de la implementación de métodos alternativos relativamente nuevos que vayan acorde a las diferentes necesidades y se adapten en las construcciones del país, para salvaguardar la seguridad estructural y humana, entre las nuevas tecnologías estructurales se destaca el uso del postensado en losas. Por tal motivo, este artículo tiene como objetivo evaluar el comportamiento estructural que presentan los edificios regulares utilizando losas alivianadas y postensadas, con el fin de realizar un análisis comparativo entre las respuestas estructurales. Para esto se realizó el estudio de cuatro modelos estructurales sometidos a un análisis estático y modal espectral. En base a los resultados obtenidos, se demuestra que con la implementación de losas postensadas en edificaciones regulares generan la reducción del 0,51 % en las derivas de piso por análisis modal espectral; la disminución del peso propio de la estructura en 2,04 % y 7,52 % y por la ausencia de vigas peraltadas se redujo 15,28 % en la altura de entrepiso, beneficiando con la implementación de 2 pisos a la estructura.

Palabras Clave: Comportamiento estructural, Losas alivianadas, Losas postensadas, Respuestas estructurales.

Abstract

Ecuador is located within the so-called Pacific Ring of Fire, so its seismic activity is high and it is exposed to recurring seismic events, to such an extent that these telluric movements are perceived with intensity in several provinces. Here the importance of the implementation of relatively new alternative methods that are consistent with the different needs and are adapted in the constructions of the country, to safeguard structural and human safety. Among the new structural technologies, the use of post-tensioning in slabs stands out. For this reason, this article aims to evaluate the structural behavior of regular buildings using lightened and post-tensioned slabs, in order to carry out a comparative analysis between the structural responses. For this, the study of four structural models subjected to a static analysis and spectral modal analysis was carried out. Based on the results obtained, they show that the implementation of post-tensioned slabs in regular buildings generates a 0.51% reduction in floor drifts by spectral modal analysis; a 2.04% and 7.52% reduction in the self-weight of the structure and a 15.28% reduction in the height between floors due to the absence of cambered beams, benefiting the structure with the implementation of two floors.

Keywords: Structural behavior, Lightened slabs, Post-tensioned slabs, Structural responses.

¹ Estudiante de ingeniería civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

² Docente de ingeniería civil – Universidad Politécnica Salesiana – Quito, Ecuador.

Autor para correspondencia: bgualotoa@est.ups.edu.ec; dguerrero@ups.edu.ec

1. Introducción

Los elementos estructurales de entrepiso más aplicados en las edificaciones son las losas alivianadas o aligeradas, por lo cual haciendo énfasis en las nuevas tecnologías de construcción se ha optado por indagar en la utilización y aplicación de las losas postensadas.

Diversos estudios se han realizado sobre su aplicación en la construcción, Según Hurtado [1] menciona que el estudio de la tecnología del postensado ha alcanzado altos niveles y estándares de calidad que respaldan su uso. La utilización de este método ha estado presente en varias regiones del mundo donde ha dado resultados óptimos y económicos.

Además, Montaña [2] explica que al utilizar losas postensadas se reduce la altura de cada entre piso entre 10 % - 20 %. Debido a que, al no tener vigas los espacios son mucho más limpios y estéticos cumpliendo así con una de las premisas del uso de este tipo de losa, el pre-esfuerzo introducido en las losas que balancean entre el 60 % - 90 % de la carga muerta de servicio, las deflexiones en las losas serán mínimas aún en claros largos de entre 7 a 10 metros.

Por otra parte, Manturano [3] indica que la aplicación del postensado en losas permite disminuir su espesor sin comprometer su comportamiento bajo cargas de servicio ni su capacidad de resistencia, además produce un efecto benéfico en el comportamiento estructural de la edificación.

Con base a los beneficios que otorga la implementación de este tipo de entrepiso a las edificaciones se optó por analizar un edificio usando losas alivianada y postensadas, con el fin de determinar cuál de estos tiene mejor comportamiento ante un evento sísmico.

Las respuestas estructurales deberán cumplir los requerimientos de la normativa actual vigente de la construcción NEC-15 [4]; las cuales son:

- Periodo de vibración.
- Porcentaje de participación modal.
- Cortante dinámico total.
- Deriva máxima de piso.

2. Materiales y Métodos

Los modelos analizados presentaron una geometría regular en planta y elevación. Además, fueron diseñados para uso residencial, con ubicación en la ciudad de Quito (Ecuador) siendo parte de la zona sísmica V con un valor del factor $Z= 0,40$ y suelo tipo D.

La geometría general del edificio cuenta con 4 ejes de columnas con una separación de 9 m entre ellas y tiene volados de una longitud de 4 m en cada fachada, dando como resultado unas dimensiones en planta de 35 m en sentido “X” y 35 m en sentido “Y”. En la Tabla 1, se muestran los parámetros geométricos faltantes de los modelos analizados.

Tabla 1: Parámetros geométricos de los edificios para su respectivo modelado.

Característica geométrica	Cantidad	Unidad
Modelo 1		
Altura entrepiso	3,50	m
Altura total	38,50	m
Número de niveles	11	U
Área planta tipo	1225	m ²
Modelo 2		
Altura entrepiso	3,50	m
Altura total	38,50	m
Número de niveles	11	U
Área planta tipo	1225	m ²
Modelo 3		
Altura entrepiso	2,965	m
Altura total	32,615	m
Número de niveles	11	U
Área planta tipo	1225	m ²
Modelo 4		
Altura entrepiso	2,965	m
Altura total	38,545	m
Número de niveles	13	U
Área planta tipo	1225	m ²

Los modelos que forman parte de este estudio, en relación con sus elementos estructurales fueron diseñados considerando los siguientes materiales.

En la Tabla 2, se presentan las propiedades del concreto que fueron utilizadas para el diseño de todos los modelos.

Tabla 2: Propiedades del concreto.

Material	Valor	Unidad
Concreto		
$f'c$	28	MPa
E_c	$4700*\sqrt{f'c}$	MPa
γ_{horm}	24	kN/m ³

En cambio, en la Tabla 3, se presentan las propiedades del acero que fueron utilizadas para el diseño de todos los modelos.

Tabla 3: Propiedades del acero.

Tipo de Material	Valor	Unidad
Acero de refuerzo		
f_y	420	MPa
E_s	210000	MPa
γ_{acero}	78,50	kN/m ³
Acero de preesfuerzo		
ϕ	12,70	mm
A	99	mm ²
f_{pu}	1860	MPa
f_{py}	$0,9*f_{pu}$	MPa
f_{pj}	$0,9*f_{py}$	MPa
f_{pe}	$0,8*f_{py}$	MPa
E_p	200000	MPa
γ_{acero}	78,50	kN/m ³

Las propiedades del acero de preesfuerzo tales como: resistencia a la rotura mínima f_{pu} , límite de fluencia f_{py} , módulo de elasticidad E_p y elongación total debido a la carga, deben acatar las especificaciones según la ASTM A416 como requisito para poder ser aprobados, certificados y posteriormente utilizados [5].

2.1. Sistemas Estructurales.

2.1.1. Sistema Dual

Sistema estructural compuesto tanto de pórticos especiales sismorresistentes como por muros estructurales, diseñados para resistir fuerzas sísmicas. Se entiende que una adecuada disposición

es ubicar los muros estructurales lo más simétricamente posible, hacia la periferia y que mantienen su longitud en planta en todo lo alto de la estructura. Para que la estructura sea considerada como un sistema dual, los muros deben absorber al menos el 75 % del corte basal en cada dirección [4].

Por otro lado, el sistema de una estructura para que sea considerada como dual, los pórticos resistentes a momentos deben tener la capacidad para resistir por lo menos el 25 % de las cargas sísmicas de diseño [6].

2.1.2 Muros Estructurales

Sistema en el que la resistencia sísmica está dada predominantemente por muros estructurales sobre los que actúa por lo menos el 70 % de la fuerza cortante en la base, los pórticos existentes o no, deberán ser diseñados para resistir el porcentaje restante de la fuerza cortante en la base [7].

2.1.3 Factor de reducción de respuesta sísmica R

Existe una discrepancia en cuanto a las definiciones y a los valores para los factores de reducción “R” que es asignado para cada tipo de estructura, que pueden causar errores en cuanto a la ductilidad que estos modelos alcanzan.

El factor “R” para un sistema dual no puede ser de 8 como se especifica en la norma NEC-15, puesto que los muros de corte son muy rígidos y no presentan ductilidad, por ende, tendrá un factor de reducción menor [8].

La norma ASCE 7-16 indica un factor de reducción “R” de 7 para pórticos especiales a momentos y “R” de 6 para pórticos ordinarios [6].

La recomendación descrita en la norma NEC-15 para sistemas de muros de corte es de un valor “R” de 5, pero la adición de columnas otorga ductilidad a los muros de corte y esto permite aumentar su factor “R” [4].

En referencia a la norma E.030-16 especifica los coeficientes de reducción de las fuerzas sísmicas “R” de 7 para concreto armado en el caso dual y un “R” de 6 para concreto armado en el caso de muros estructurales [9].

2.2. Modelo 1.

El modelo planteado para este sistema está conformado por elementos estructurales tales como columnas, vigas peraltadas, losas alivianadas bidireccionales y muros de corte, es por esta configuración que se optó por un factor de reducción “R” de 7.

En este caso se ha optado por el uso de casetones plásticos extraíbles con las siguientes dimensiones 0,60 x 0,60 x 0,25 [m] para las losas alivianadas.

En la Figura 1, se detalla la modelación de alivianamiento con dimensiones de 0,60 – 0,13 – 0,60 [m] con un peralte de 0,31 m.

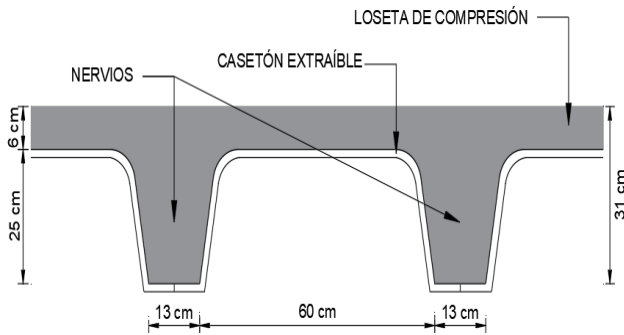


Figura 1. Losa alivianada.

En la Tabla 4, se muestran las secciones de los elementos estructurales correspondientes al modelo 1.

Tabla 4: Secciones de los elementos estructurales.

Elemento estructural	b x h	Unidad
Columnas		
Esquinera	0,85 x 0,90	m
Interna	0,80 x 1,10	m
Vigas		
Sentido X	0,50 x 0,75	m
Sentido Y	0,50 x 0,75	m
Muros de Corte		
Sentido X	0,41	m
Sentido Y	0,41	m
Elementos de borde (cabezales)		
Sentido X	1,00 x 1,10	m
Sentido Y	1,00 x 1,10	m

En la Figura 2, se muestra la vista en planta del modelo 1, además se visualiza su configuración geométrica como también la disposición de los elementos estructurales que conforman este sistema.

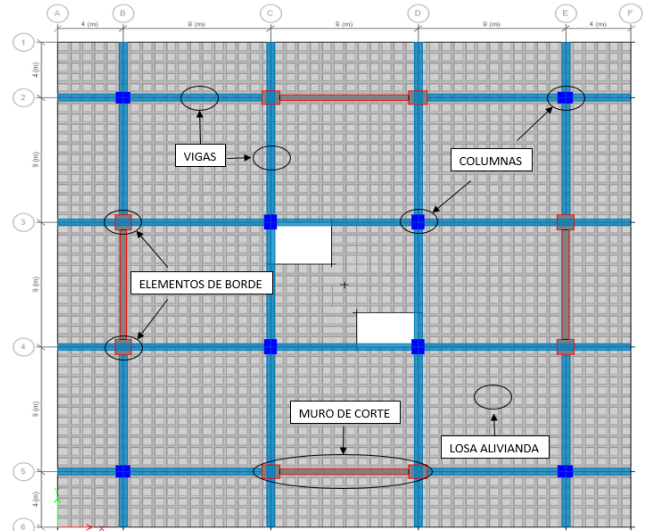


Figura 2. Vista en planta del modelo 1. [10]

En la Figura 3, se presenta el detalle en elevación del modelo 1, además se visualiza su configuración geométrica como también la disposición de los elementos estructurales que conforman este sistema.

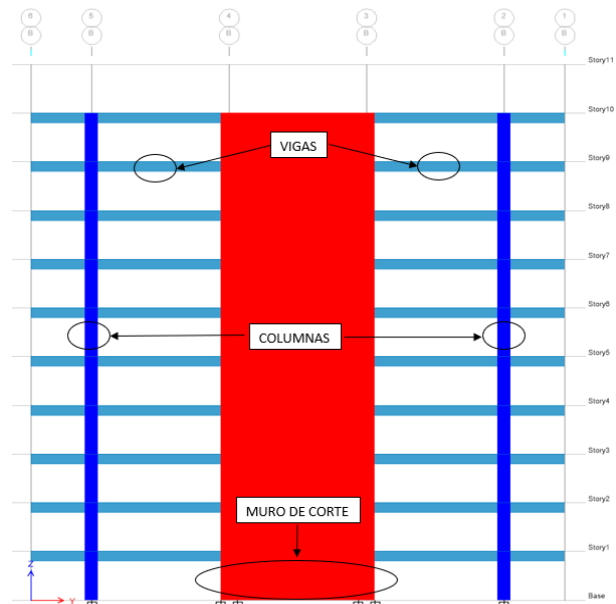


Figura 3. Elevación del modelo 1. [10]

2.3. Modelo 2.

El modelo planteado para este sistema está conformado por elementos estructurales tales como columnas, losas planas postensadas y muros de corte, es por esta configuración que se optó por un factor de reducción “R” de 6.

En el prediseño de losas postensadas se debe tener en cuenta los siguientes pasos: la primera consiste en la determinación del tamaño del elemento de concreto, la segunda establecer la trayectoria del tendón o tendones, la tercera calcular las fuerzas de presfuerzo y la cuarta el análisis de la estructura para evaluar o verificar los esfuerzos y las resistencias resultantes [11].

En la Figura 4, se detalla los elementos que contienen las losas postensadas con sus tendones no adheridos (torón de acero de alta resistencia con grasa anticorrosión dentro de una envoltura lisa).

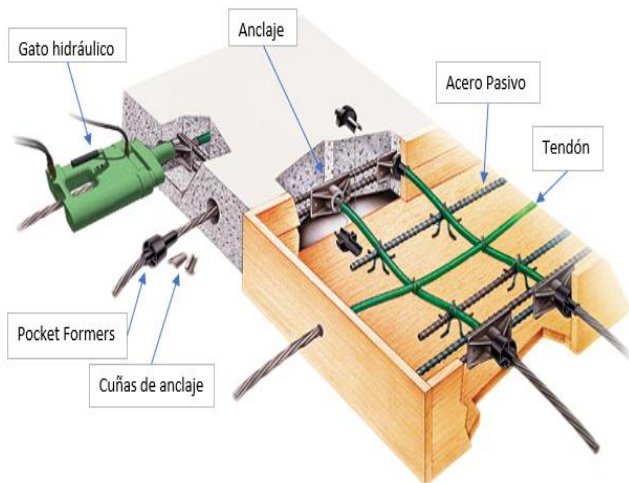


Figura 4. Losa postensada. [11]

Con respecto al espesor de la losa maciza para postensado se optó por cumplir la relación promedio ($L/40$ y $L/45$, siendo L la longitud promedio de las luces del tablero crítico) recomendada por el Post-Tensioning Manual [13] y se obtuvo un espesor de 0,215 m.

Por otro lado, los tipos de anclajes colocados en los extremos de la losa se los determinó según las recomendaciones que limitan la longitud permitida de los tendones, donde se establece que los tendones con longitudes menores o iguales a 38 m se tensa en un solo extremo dando a conocer que tendrá un anclaje activo y un pasivo, en cambio

para los tendones de mayor longitud hasta un máximo de 76 m se tensa en ambos extremos siendo así ambos anclajes activos [14].

Los tendones de acero de alta resistencia pueden transmitir esfuerzos al concreto dependiendo del tipo que se utilice: los tendones adheridos transmiten esfuerzos a lo largo de su longitud por la adherencia, por otro lado, los tendones que no son adheridos transmiten los esfuerzos una vez estos son tensados y anclados en sus extremos [15] siendo estos últimos los utilizados en este artículo.

La trayectoria de los tendones se define mediante las siguientes consideraciones: se los debe colocar en el centroide del peralte de la losa para no generar momentos en los extremos, a lo largo de su trayectoria se coloca tan solo el recubrimiento mínimo con el fin de maximizar su eficiencia dando como resultado una parábola entre los ejes de las columnas, la trayectoria que se recomienda utilizar al cruzar muros de corte es lineal para no causar esfuerzos erróneos [16].

En la Figura 5 se presenta la trayectoria de los tendones en la losa de los modelos de estudio.

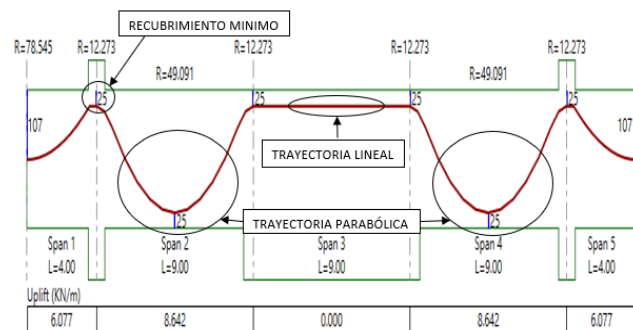


Figura 5. Trayectoria del tendón no adherido. [17]

Lo establecido en la norma ACI 318-19 para losas preesforzadas con cargas uniformemente distribuidas, el espaciamiento máximo “s” de los tendones o grupo de tendones en al menos una dirección debe ser el menor de entre $8 \cdot h$ (siendo h el espesor de la losa) y 1,50 m [18].

Los tendones de acero de alta resistencia que se distribuyen en el Ecuador de tipo mono torón son de baja relajación, cuya resistencia a la rotura mínima es de 1860 MPa, con un diámetro de 12,7 mm y con un área de 99 mm^2 [19].

En la Tabla 5, se muestran las secciones de los elementos estructurales correspondientes al modelo 2.

Tabla 5: Secciones de los elementos estructurales.

Elemento estructural	b x h	Unidad
Columnas		
Esquinera	0,85 x 0,85	m
Interna	0,80 x 0,95	m
Tendones no adheridos		
Sentido X	102	U
Sentido Y	102	U
Muros de Corte		
Sentido X	0,46	m
Sentido Y	0,46	m
Elementos de borde (cabezas)		
Sentido X	1,20 x 1,20	m
Sentido Y	1,20 x 1,20	m

En la Figura 6, se muestra la vista en planta del modelo 2, junto con su configuración geométrica como también la disposición de los elementos estructurales que conforman este sistema.

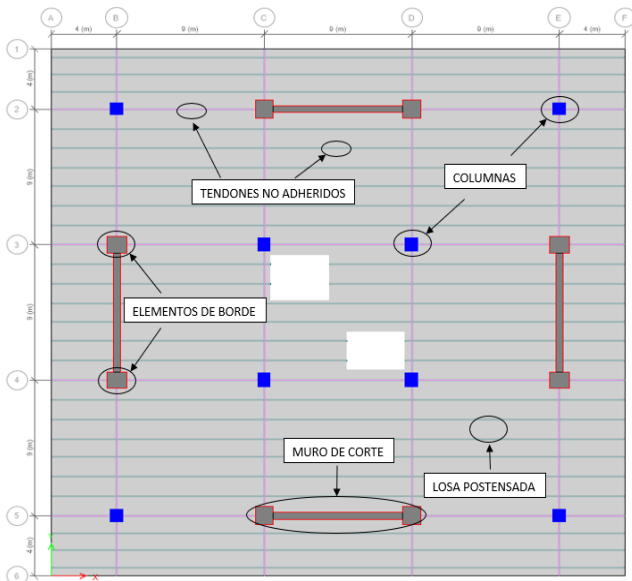


Figura 6. Vista en planta del modelo 2. [10]

En la Figura 7, se presenta el detalle en elevación del modelo 2, junto con su configuración geométrica como también la disposición de los

elementos estructurales que conforman este sistema.

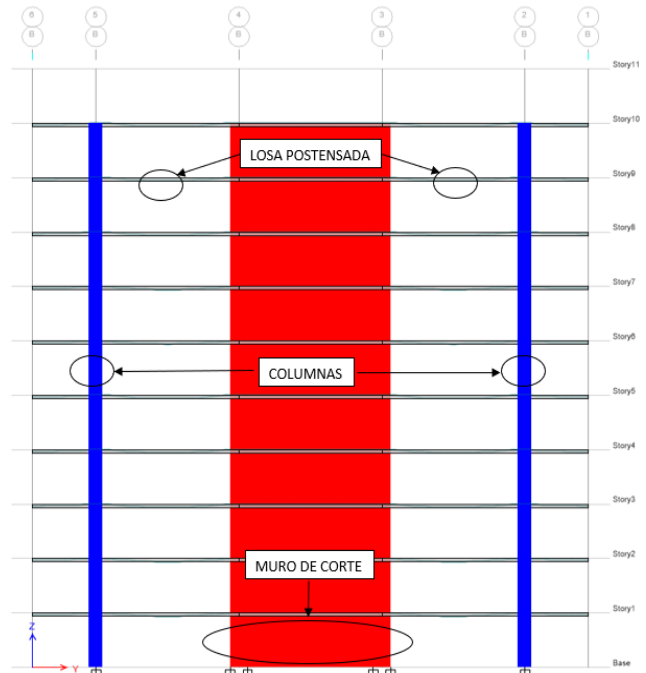


Figura 7. Elevación del modelo 2. [10]

En la Figura 8, se puede observar que mediante el software [17] se analizaron y se diseñaron las losas postensadas para los modelos que poseen este elemento estructural en su sistema.

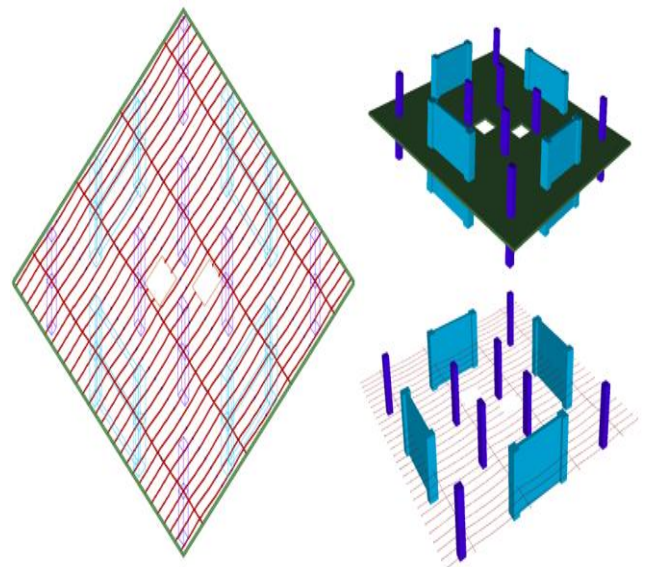


Figura 8. Modelado de la losa postensada. [17]

La disposición de los tendones en la losa consiste en concentrarlos en una dirección y distribuidos en la otra, esta opción reúne dos virtudes, por un lado, se eliminan todas las interferencias entre tendones sobre pilares, salvo un grupo de los distribuidos, y por otra se sigue aprovechando el beneficio que aportan los tendones de armadura activa frente a esfuerzos de punzonamiento [20]. Por aquellos beneficios esta opción es la más viable y la que más se utiliza.

2.4. Modelo 3.

El modelo planteado para este sistema está conformado por elementos estructurales tales como columnas, losas planas postensadas y muros de corte, es por esta configuración que se optó por un factor de reducción “R” de 6.

Para este modelo el espesor de la losa maciza para postensado es de 0,215 m.

Por otro lado, por el uso de las losas postensadas el beneficio es la reducción de la altura de entrepiso, por causa de la eliminación de las vigas peraltadas, esta es la única modificación en el modelo 3 por lo cual de tener 3,50 m se redujo el peralte de la viga y se sumó el espesor de la losa postensada para tener 2,956 m de altura de entrepiso.

En la Tabla 6, se muestran las secciones de los elementos estructurales correspondientes al modelo 3.

Tabla 6: Secciones de los elementos estructurales.

Elemento estructural	b x h	Unidad
Columnas		
Esquinera	0,85 x 0,85	m
Interna	0,80 x 0,95	m
Tendones no adheridos		
Sentido X	98	U
Sentido Y	98	U
Muros de Corte		
Sentido X	0,49	m
Sentido Y	0,49	m
Elementos de borde (cabezas)		
Sentido X	0,90 x 1,20	m
Sentido Y	0,90 x 1,20	m

En la Figura 9, se muestra la vista en planta del modelo 3, así como su configuración geométrica y la disposición de los elementos estructurales que conforman este sistema.

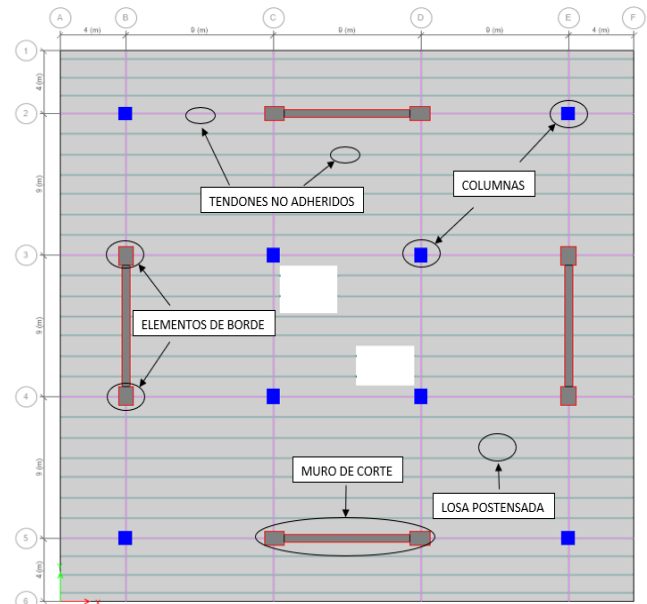


Figura 9. Vista en planta del modelo 3. [10]

En la Figura 10, se presenta el detalle en elevación del modelo 3, así como su configuración geométrica y la disposición de los elementos estructurales que conforman este sistema.

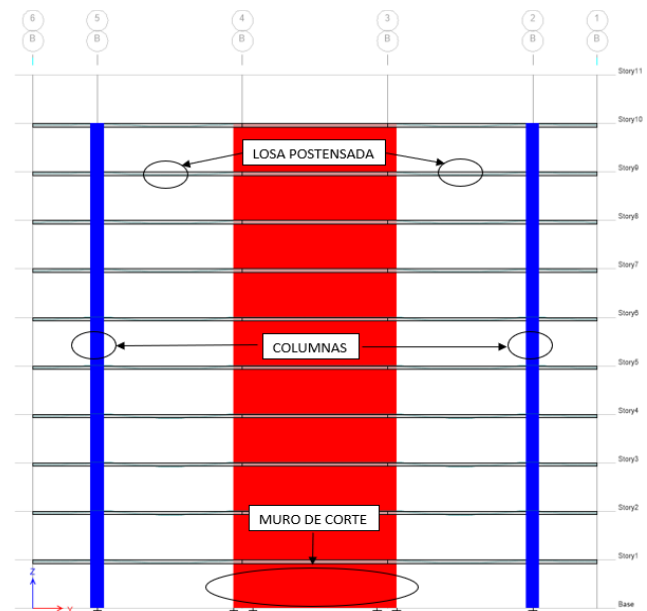


Figura 10. Elevación del modelo 3. [10]

2.5. Modelo 4.

El modelo planteado para este sistema está conformado por elementos estructurales tales como columnas, losas planas postensadas y muros de corte, es por esta configuración que se optó por un factor de reducción “R” de 6.

El espesor de la losa maciza para postensado es de 0,215 m y la altura de entrepiso es de 2,956 m.

Por el beneficio de usar losas postensadas y haber reducido la altura de entrepiso en el modelo 3 se originó la reducción de la altura total de la edificación, debido a ello fue posible adicionar 2 pisos más a la edificación con el fin de mantener la altura del modelo 1.

En la Tabla 7, se muestran las secciones de los elementos estructurales correspondientes al modelo 3.

Tabla 7: Secciones de los elementos estructurales.

Elemento estructural	b x h	Unidad
Columnas		
Esquinera	0,95 x 0,95	m
Interna	0,80 x 1,20	m
Tendones no adheridos		
Sentido X	96	U
Sentido Y	96	U
Muros de Corte		
Sentido X	0,52	m
Sentido Y	0,52	m
Elementos de borde (cabezales)		
Sentido X	1,20 x 1,50	m
Sentido Y	1,20 x 1,50	m

En la Figura 11, se muestra la vista en planta del modelo 4, adicionalmente se visualiza su configuración geométrica y la disposición de los elementos estructurales que conforman este sistema.

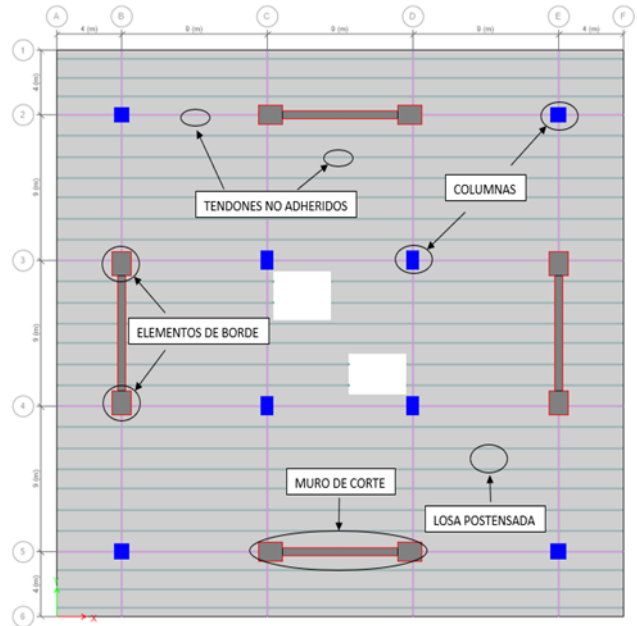


Figura 11. Vista en planta del modelo 4. [10]

En la Figura 12, se presenta el detalle en elevación del modelo 4, adicionalmente se visualiza su configuración geométrica y la disposición de los elementos estructurales que conforman este sistema.

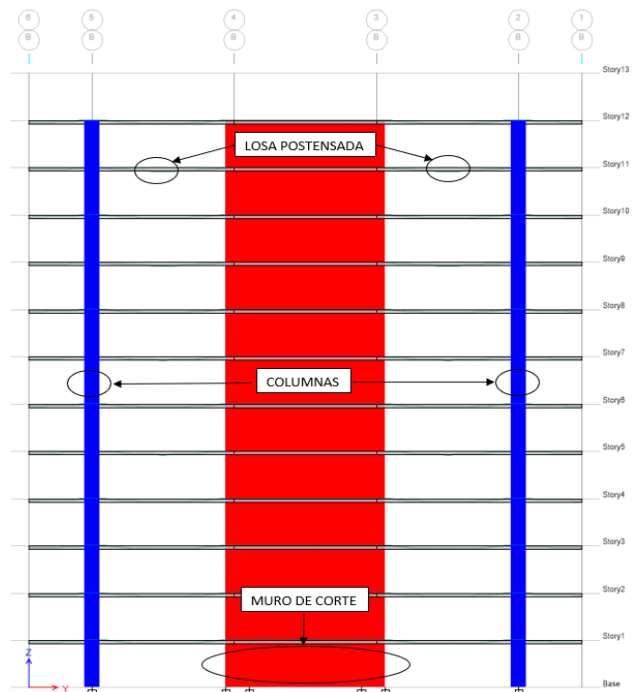


Figura 12. Elevación del modelo 4. [10]

3. Resultados y Discusión

Con el fin de verificar los requerimientos exigidos a cumplir por la norma NEC-SE-DS 2015 [4] tales como son las respuestas estructurales, se obtuvieron los resultados de los modelos descritos en la sección anterior.

3.1. Periodos de vibración.

Mediante el software [10] se realizó el análisis sísmico considerando la normativa vigente de la construcción, se obtuvieron los resultados de los periodos de vibración.

En la Tabla 8, se indican los periodos de vibración necesarios para poder cumplir lo establecido en la norma NEC-15 [4].

Tabla 8: Periodos de vibración según la NEC-15.

Periodo	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
T calculado (s)	0,8502	0,8502	0,7508	0,851
1.30% T calculado (s)	1,105	1,105	0,976	1,106

Es así que los valores de los periodos de vibración obtenidos del software [10] se encuentran ubicados dentro de los rangos permitidos, cumpliendo con la norma NEC-15 [4].

En la Tabla 9, se observa que el modelo 1 tiene el mayor periodo de vibración de 0,887 seg, a comparación del modelo 2 y del modelo 4 que presentan una disminución de 0,9 % y de 0,22 % respectivamente. Se toma como referencia a estos tres modelos por tener una altura total aproximada de 38,50 m.

Tabla 9: Resultados de la participación modal.

Modelo	Modo	Periodo (s)	UX	UY	RZ
1	1	0,887	0,7013	0	0
	2	0,885	0	0,7012	0
	3	0,696	0	0	0,7025

2	1	0,879	0,6229	0,0702	0
	2	0,878	0,0702	0,6729	0
	3	0,653	0	0	0,6959
3	1	0,754	0,6793	0,0144	0
	2	0,753	0,0144	0,6792	0
	3	0,559	0	0	0,6965
4	1	0,885	0,6619	0,0256	0
	2	0,884	0,0257	0,6617	0
	3	0,656	0	0	0,6907

Al analizar la Tabla 9 se visualiza que los modelos que utilizan losas postensadas tienen periodos de vibración menores al modelo que utiliza losas alivianadas, estos resultados se deben a la configuración estructural de estos modelos dado que al no contar con vigas peraltadas que ayuden a contrarrestar las fuerzas laterales, resulta en muros de corte con mayores dimensiones y por ello obtienen mayor rigidez.

En la Tabla 10, se indica los 3 primeros periodos de vibración principales de los modelos estudiados.

Tabla 10: Comportamiento de los modos de vibración.

Modelo	Modo	Dirección	Comportamiento
1	1	X	Traslacional
	2	Y	Traslacional
	3	Z	Torsional
2	1	X	Traslacional
	2	Y	Traslacional
	3	X	Torsional
3	1	X	Traslacional
	2	Y	Traslacional
	3	Z	Torsional
4	1	X	Traslacional
	2	Y	Traslacional
	3	Z	Torsional

Se puede observar en la Tabla 10, que en todos los modelos de estudio se cumple la recomendación de la NEC-15 [4] donde enfatiza que los dos primeros modos de vibración deben tener un comportamiento de manera traslacional, mientras que el tercer modo de vibración un comportamiento de manera torsional.

3.2. Porcentaje de participación modal.

Los resultados obtenidos mediante el software [10] deben representar que la masa modal acumulada de la estructura se desplaza en el sentido de análisis con un valor igual o mayor al 90 % de la masa total de la estructura, esto es lo que nos indica la norma NEC-15 [4].

En la Figura 13 se detalla los modos de vibración y sus respectivos porcentajes de masa modal en el sentido de análisis.

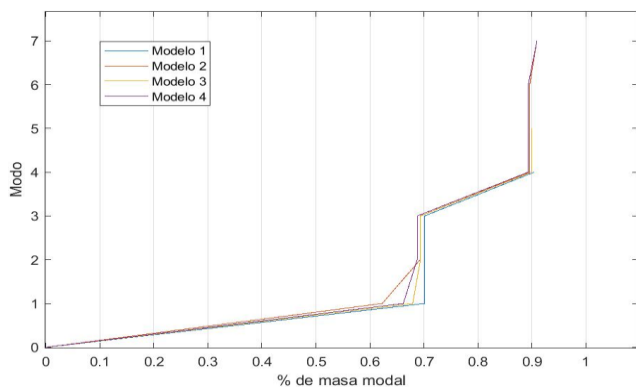


Figura 13. Comportamiento modal Sum UX.

En la Figura 14 se detalla los modos de vibración y sus respectivos porcentajes de masa modal en el sentido de análisis.

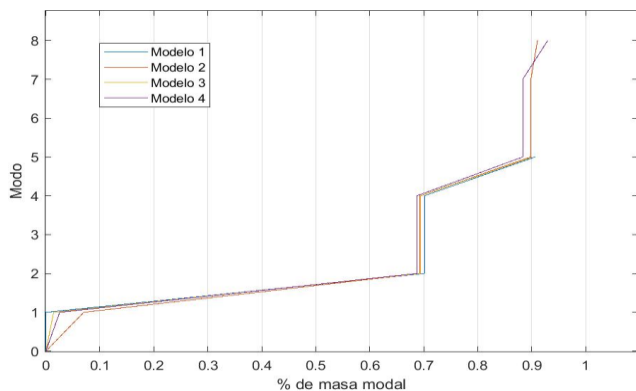


Figura 14. Comportamiento modal Sum UY.

En la Figura 15 se detalla los modos de vibración y sus respectivos porcentajes de masa modal en el sentido de análisis.

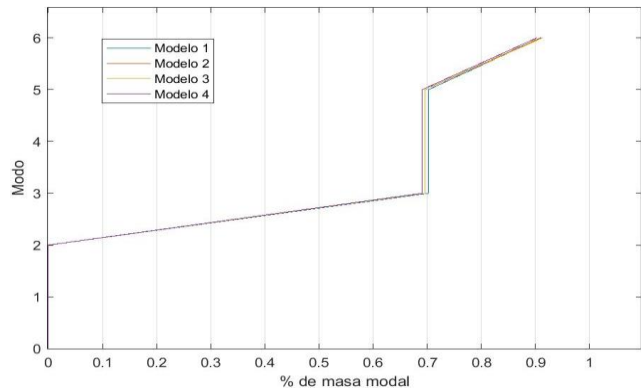


Figura 15. Comportamiento modal Sum RZ.

En las anteriores figuras se puede observar que en todos los modelos estudiados la participación modal de la masa en los sentido Sum UX, Sum UY, Sum RZ es mayor al 90 % de las masas acumuladas por lo que se está cumpliendo con lo especificado en la norma NEC-15 [4].

La NEC-15 [4] menciona que se deben considerar en el análisis todos los modos de vibración que contribuyan significativamente a la respuesta total de la estructura.

En la Tabla 11, se indica el número de modos de vibración necesarios para cumplir con lo especificado en la norma NEC-15.

Tabla 11: Resultados del modo de vibración necesario.

Modelo	Modo	Sum UX	Sum UY	Sum RZ	Unidad
1	6	0,904	0,905	0,911	%
2	8	0,909	0,911	0,909	%
3	6	0,900	0,902	0,913	%
4	8	0,909	0,929	0,903	%

Se puede observar en la Tabla 11 el número de modos de vibración necesarios para cumplir con el requerimiento del porcentaje de participación modal como se menciona en la NEC-15 [4].

3.3. Cortante dinámico total.

Su valor no debe ser < 80 % del cortante basal estático, esto nos indica la norma NEC-15 para estructuras regulares [4].

En la Figura 16 se detalla la fuerza de corte en cada modelo en el sentido de análisis para su verificación.

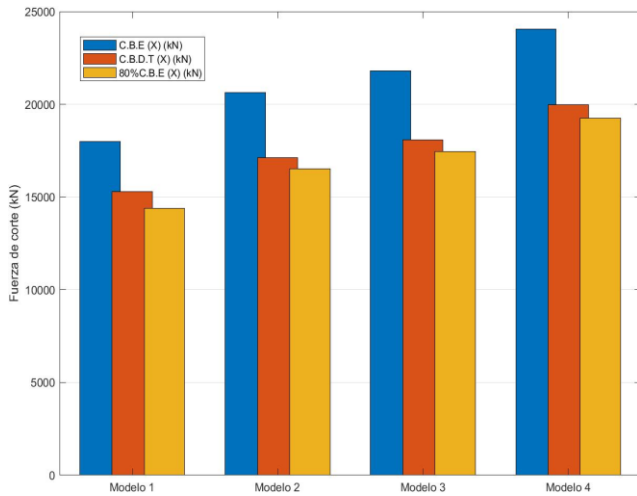


Figura 16. Valores mínimos de cortante dinámico total en X.

En la Figura 17 se detalla la fuerza de corte en cada modelo en el sentido de análisis para su verificación.

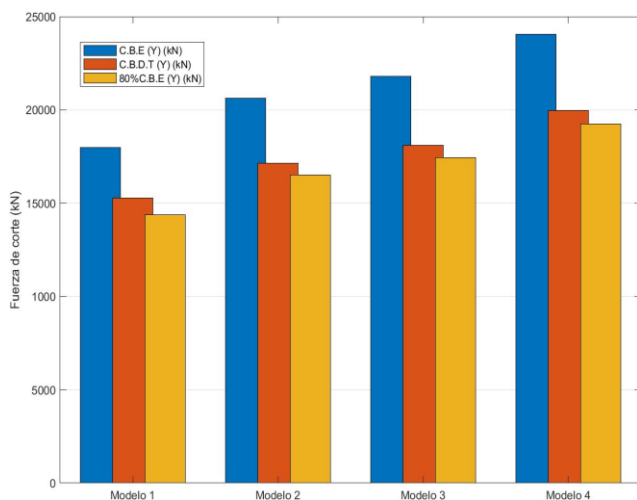


Figura 17. Valores mínimos de cortante dinámico total en Y.

Analizando los valores del cortante dinámico total se verificó que en todos los modelos estudiados se sobrepasa el porcentaje mínimo del

80 % del cortante basal estático que se encuentra establecido en la norma NEC-15 [4].

3.4. Derivas de piso.

La norma NEC-15 [4] establece que las derivas máximas inelásticas no deben superar el valor permisible, el cual corresponde al 2 % para hormigón armado.

En la Figura 18 se observa que en el modelo 1 su máxima deriva de piso por análisis estático presentó un valor de 0,9912 % y el modelo 2 con un valor de 1,0035 % dando una diferencia de 0,0123 % resultando un incremento del 1,24 %, además con respecto al modelo 4 presentó un valor de 1,0157 % dando una diferencia de 0,0245 % resultando un incremento del 2,74 %. En cambio, el modelo 1 respecto a su máxima deriva de piso por análisis modal espectral presentó un valor de 0,8164 % y el modelo 2 con un valor de 0,8123 % dando una diferencia del 0,0041 % resultando una reducción del 0,51 %, además con respecto al modelo 4 presentó un valor de 0,8208 % dando una diferencia de 0,0044 % resultando un incremento del 0,54 %.

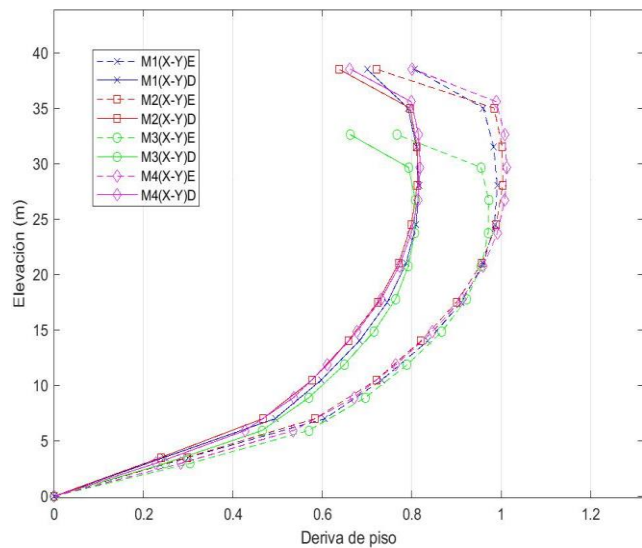


Figura 18. Derivas máximas de piso.

El modelo 2 presenta una mejora en su máxima deriva de piso por análisis modal espectral obteniendo un valor menor debido a su configuración estructural con respecto al modelo 1.

Se puede observar en la Figura 18, que las derivas de piso tanto por análisis estático como por análisis modal espectral son muy semejantes entre sí, evidenciándose que la diferencia entre los valores de los 4 modelos son mínimas casi despreciables.

3.5. Datos adicionales.

En la Figura 19, se puede visualizar los desplazamientos horizontales relacionados con las alturas totales de los modelos, por lo cual el modelo 1 presentó un valor máximo de desplazamiento de 0,0604 m por análisis estático y el modelo 2 con un valor de 0,0695 m dando una diferencia de 0,0091 m resultando un incremento del 15,07 %, además con respecto al modelo 4 presentó un valor de 0,0702 m dando una diferencia de 0,0098 m resultando un incremento del 16,23 %. En cambio, el modelo 1 respecto a su valor máxima de desplazamiento por análisis modal espectral presentó un valor de 0,0495 m y el modelo 2 con un valor de 0,0559 m dando una diferencia del 0,0064 m resultando un incremento del 12,77 %, además con respecto al modelo 4 presentó un valor de 0,0564 m dando una diferencia de 0,0069 m resultando un incremento del 13,94 %.

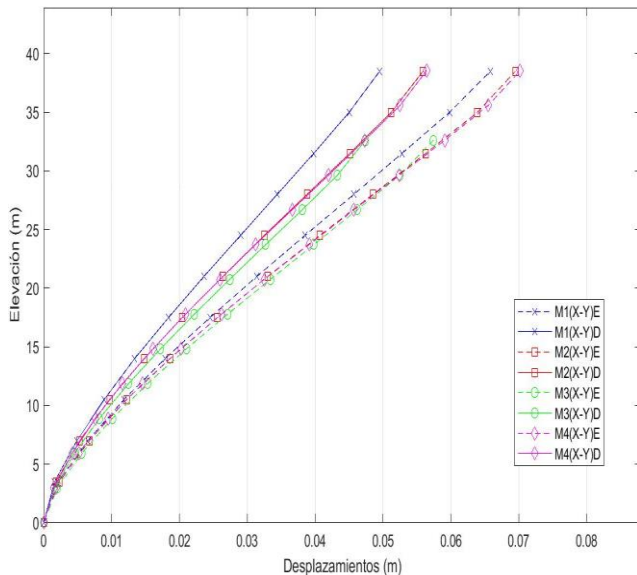


Figura 19. Desplazamientos horizontales de piso.

El modelo 2 y el modelo 4 que utilizan losas postensadas presentaron mayores desplazamientos

con respecto al modelo 1 que utiliza losas alivianadas esto debido a su configuración estructural.

La norma NEC-15 [4] recomienda considerar los efectos torsionales, refiriéndose como los efectos debidos a la torsión accidental, dicha verificación se debe realizar tanto para estructuras regulares como para estructuras irregulares. El factor de amplificación torsional (A_x) no tendrá que exceder de un valor = 3.

Tabla 12: Resultados del factor de amplificación torsional.

Modelo	Story	Max Drift (m)	Svg Drift (m)	A_x	Análisis
1	8	0,007174	0,006608	0,819	Estático
	8	0,006293	0,005323	0,971	Modal Espectral
2	1	0,002466	0,002217	0,859	Estático
	1	0,002056	0,001750	0,959	Modal Espectral
3	1	0,002142	0,001903	0,880	Estático
	1	0,001816	0,001526	0,983	Modal Espectral
4	1	0,002008	0,001759	0,905	Estático
	1	0,001673	0,001390	1,006	Modal Espectral

En la Tabla 12, se puede verificar que el valor obtenido del factor de amplificación torsional es menor al valor establecido en la norma NEC-15 [4], por ende los modelos no presentan torsión accidental.

En la Figura 20 se detalla la distribución de las fuerzas cortantes por piso de cada modelo ante un evento sísmico.

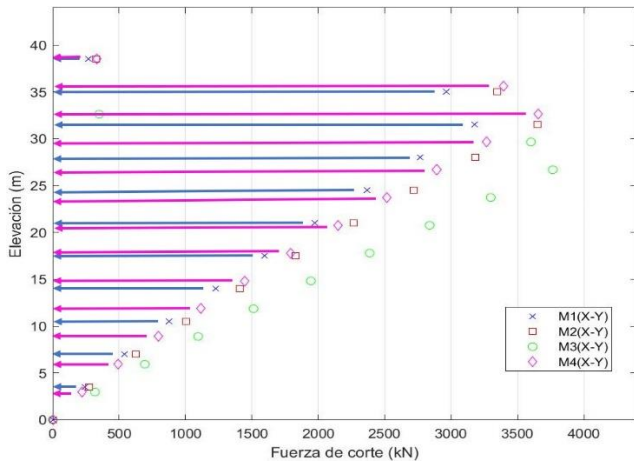


Figura 20. Elevación vs Fuerza de corte distribuida por piso.

En la Tabla 13, se indica la sumatoria de las fuerzas cortantes distribuidas por piso dando como resultado el cortante basal en la base de cada modelo.

Tabla 13: Cortante basal en los modelos.

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Cortante basal (kN)	17983,66	20638,50	21803,60	24055,96

Se puede comprobar que el valor obtenido en la Tabla 13 resulta al valor de la fuerza cortante de piso en la base como se observa en la Figura 21, dando a entender que los valores están correctos.

En la Figura 21 se presentan las fuerzas cortantes por piso de cada modelo por un evento sísmico.

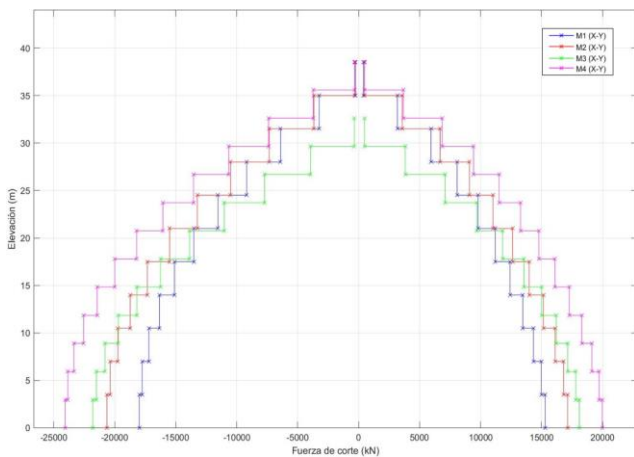


Figura 21. Elevación vs Fuerzas de corte por piso.

Se puede observar que para el modelo 1 que utiliza losas alivianadas tiene un valor en el cortante de piso dinámico de 15286,10 kN y en el cortante de piso estático de 17983,60 kN, mientras que para el modelo 2 que utiliza losas postensadas tiene un valor en el cortante de piso dinámico de 17129,90 kN y en el cortante de piso estático de 20638,50 kN presentando un incremento del 12,06 % y del 14,76 % respectivamente, mientras que el modelo 4 presentó un valor en el cortante de piso dinámico de 19966,40 kN y en el cortante de piso estático de 24055,90 kN, presentando un incremento del 30,61 % y del 33,76 %, demostrando que para el modelo con losas postensadas incrementa, a causa de que para estos modelos se utilizó un valor de “R” de 6, en cambio para el modelo 1 se utilizó un valor de “R” de 7.

En la Figura 22 se compara el peso propio de cada modelo, con el fin de verificar el beneficio del uso de losas postensadas.

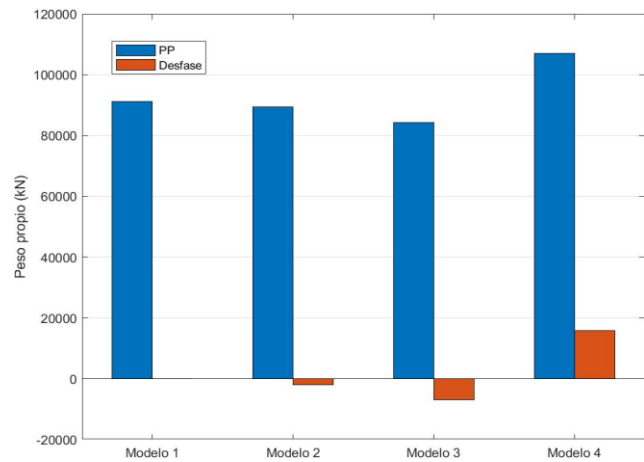


Figura 22. Peso propio de la estructura.

El modelo 2 presentó una reducción del peso propio de 1864,342 kN que resuelta en un 2,04 % en comparación al peso propio del modelo 1, en cambio el modelo 3 presentó una reducción del peso propio de 6863,499 kN que resulta en un 7,52 % con respecto al modelo 1.

Por otro lado, el modelo 4 muestra un incremento del peso propio de 15835,108 kN que resulta en un 17,35 % en referencia al modelo 1, esto debido a la implementación de 2 pisos adicionales.

En la Tabla 14, se indican las deflexiones máximas en las losas de todos los modelos estudiados.

Tabla 14: Deflexiones en losas.

Deflexiones	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4
Corto plazo (mm)	13,04	8,69	8,88	8,05
Largo plazo (mm)	16,30	12,51	12,70	11,86

Como se puede observar las losas postensadas tienen menores deflexiones a corto plazo en un promedio aproximado de 34,51 % con respecto a las losas alivianadas y un promedio aproximado de 24,19 % con respecto a las deformaciones a largo plazo, dando a entender que es una de las tantas ventajas que tiene este nuevo sistema de construcción.

4. Conclusiones

Los periodos de vibración obtenidos en los modelos que utilizan losas postensadas tienen un valor relativamente menor comparados con el modelo que utiliza losas alivianadas, pero esta pequeña diferencia está debido a sus configuraciones estructurales, por ende los modelos 2 , 3 y 4 al no contar con la presencia de vigas requiere de muros de corte con mayores dimensiones, ya que estos reciben el mayor porcentaje de las fuerzas laterales y además proporcionan de rigidez a la estructura, de la misma manera se corrobora que el uso de losas postensadas reduce el peso propio de la estructura, dando como resultado que las secciones de los elementos estructurales tengan menores dimensiones, por lo que se concluye que al implementar losas postensadas como sistema de entrepiso a un sistema estructural se le está proporcionando rigidez y ligereza, mismas propiedades que son de importancia para un adecuado comportamiento ante un sismo.

Mediante los resultados comparativos se pudo observar que ambos sistemas estructurales tienen un comportamiento estructural eficiente y seguro, pero el modelo 2 que implementa losas postensadas

como sistema de entrepiso, mostro ventajas leves en el periodo de vibración, en derivas de piso por análisis modal espectral y en la disminución del peso propio. Sin mencionar que, por la presencia del preesfuerzo inducido en la losa balancean un porcentaje de la carga muerta de servicio; las deflexiones presentes en la losa son mínimas o menores; por la no presencia de vigas producen una reducción de altura de entrepiso para lograr introducir pisos adicionales si fuera requerido y referente a su proceso constructivo tiene menores plazos de ejecución según A. Cerdá [21].

En conclusión, el modelo con losas postensadas demuestra que en ciertos puntos tiene ventajas leves sobre el modelo con losas alivianadas, esto se demostró en el análisis comparativo entre las respuestas estructurales, recalando que se cumplieron todas las verificaciones que recomienda la norma NEC-SE-DS 2015 [4], generando confiabilidad en el uso y en la aplicación de este tipo de entrepiso en edificios regulares sismorresistentes.

Referencias

- [1] J. Hurtado, “Comparación técnica-económica del entrepiso de un edificio con sistema dual que emplea losas de hormigón armado o de hormigón postensado” Tesis para obtención de título de Ingeniero Civil, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2018.
- [2] A. Montaña, “Diseño y aplicación de sistemas de postensado de losas con tendones no adheridos en estructuras de uso habitacional y comercial” Artículo académico, Universidad Privada Boliviana, La Paz, Bolivia, 2008.
- [3] H. Manturano, “Uso de la losa postensada y su comportamiento estructural en el sótano del hotel la Paz” Tesis para obtención de título de Ingeniero Civil, Universidad César Vallejo, Lima, Perú, 2017.
- [4] NEC 15, “NEC-SE-DS. Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente. Norma Ecuatoriana de la Construcción” [online] Ecuador:

- Ministerio de desarrollo urbano y vivienda, 2015. Disponible en: https://issuu.com/gustavochohlongalcivar/docs/nec_se_ds__peligro_sismico_
- [5] ASTM A416, “Especificación normalizada para torón de acero, de siete alambres sin recubrimiento para concreto preesforzado” [online] Estados Unidos de América, 2006. Disponible en: <https://docplayer.es/16952268-Especificacionnormalizada-paratoron-deace-ro-de-siete-alambres-sinrecubrimiento-paraconcretopreesforzado1.html>
- [6] ASCE 7-16, “Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures” [online] Estados Unidos de America, 2016. Disponible en: <https://aulaseproinca.blogspot.com/2017/12/descarga-el-codigo-ascesei-7-16-pdf.html>
- [7] Ingegeek, “Sistemas estructurales de concreto armado” [online] Perú, 2021. Disponible en: <https://www.ingegeek.site/2021/12/07/sistemas-estructurales-de-concreto-armado/>
- [8] J. Hurtado, S. Morales & L. Hernández, “Competividad en costos: Postensado en losas” Artículo Científico, INGENIO, Quito, Ecuador, 2019.
- [9] A&E. Silqa, “Sistemas estructurales y coeficiente básico de reducción de las fuerzas sísmicas” [online] Perú, 2023. Disponible en: <https://www.facebook.com/photo?fbid=208215465547825&set=a.116933064676066>
- [10] ETABS. “Software Especializado en el Análisis Estructural” [online] USA: CSI, 2018. Disponible en: <https://www.csiamerica.com/products/etabs>
- [11] M. Sánchez, “Análisis y diseño estructural de concreto postensado” Tesis para obtención de título de Ingeniero Civil, Universidad Pontificia Boliviana, La Paz, Bolivia, 2014.
- [12] J. Monfort, “Cálculo de losas postensadas en edificación” Tesina de Especialidad, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, España, 2005.
- [13] PTI. “Post-Tensioning Manual (Sixth Edition)” Estados Unidos de América: Post-Tensioning Institute, 2006.
- [14] A. Ramos, “Diseño de Losas Postensadas” [Curso Virtual Streaming-Online] Perú: YoV University, 2021. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=LKe-K9wediI&list=PLNMJB98IFmTk4POsJD_oM3IksK7HgdeqY
- [15] A. Gonzáles & L. Herbozo, “Propuesta de peralte de losas postensadas como parte del sistema lateral para edificios altos con núcleo rígido” Tesis para obtención de título de Ingeniero Civil, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú, 2019.
- [16] E. Arellano, “Diseño sísmico de la conexión columna-losa postensada aligerada” Tesis para obtención de título de Doctor en Ingeniería Estructural, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Azcapotzalco, México, 2013.
- [17] ADAPT-Builder. “Software Especializado en Elementos Finitos” [online] USA: RISA, 2018. Disponible en: <https://risa.com/products/adapt-builder>
- [18] Comité ACI 318, “Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-19)” [online] Estados Unidos de América, 2019. Disponible en: https://civilshare.files.wordpress.com/2016/07/aci_318s_19_en_espanol.pdf
- [19] A. Bekaert, “Catalogo, Soluciones para la construcción” [online] Ecuador, 2023. Disponible en: <https://idealalambrec.bekaert.com/sobre-ideal-alambrec-bekaert/biblioteca-de-catalogos>
- [20] J. Bravo, “Diseño de losas postensadas en edificaciones, con aplicación al caso del edificio -Parque tecnológico-” Monografía previa a la obtención del título de especialista análisis y diseño de acero y de hormigón”, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2013
- [21] Á. Cerdá, “Estudio del proceso constructivo de losas postensadas” Proyecto final de carrera, Escuela Técnica Superior de Gestión en la edificación, Valencia, España, 2014.