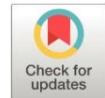


Análisis estático no lineal (push over) con aisladores sísmicos en los talleres de la Universidad Técnica de Ambato

Nonlinear static analysis (push over) with seismic isolators in the workshops of the Technical University of Ambato

- 1 Byron Leonardo Lopez Sánchez
Universidad Técnica de Ambato
- 2 José Andrés Sanchez Ruales
Universidad Técnica de Ambato
- 3 Christian Fabián Frías Córdova
Universidad Técnica de Ambato
- 4 Edmundo Sebastián Villegas Suarez
Universidad Técnica de Ambato



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 14/10/2023

Revisado: 09/11/2023

Aceptado: 10/12/2023

Publicado: 24/01/2024

DOI: <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v8i1.2836>

Cítese:

Lopez Sánchez, B. L., Sanchez Ruales, J. A., Frías Córdova, C. F., & Villegas Suarez, E. S. (2024). Análisis estático no lineal (push over) con aisladores sísmicos en los talleres de la Universidad Técnica De Ambato . Ciencia Digital, 8(1), 75-98. <https://doi.org/10.33262/cienciadigital.v8i1.2836>



CIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinaria, trimestral, que se publicará en soporte electrónico tiene como misión contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://cienciadigital.org>



La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec



Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Copia de la licencia: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>

Palabras

claves: Análisis estático, push over, aisladores, sísmicos talleres

Resumen

En el presente artículo se realiza un análisis del comportamiento estructural de dos estructuras con y sin la utilización de aisladores sísmicos. La una estructura se encuentra en el taller de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (FICM) mientras que la otra está en el taller de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial (FISEI), las dos pertenecientes a la Universidad Técnica de Ambato. Las estructuras tienen un sistema estructural de pórticos especiales sismo resistentes de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadoras. Primeramente, se realizó un marco metodológico. Posteriormente, para el análisis del comportamiento estructural se muestran los resultados del período fundamental de vibración, validación del análisis dinámico, derivas de piso, análisis estático no lineal, curva de capacidad, punto de desempeño, características del aislador elastomérico con núcleo de plomo, modelamiento en el software de ingeniería ETABS, comparación de resultados del período de vibración, comparación de derivas inelásticas, comparación de los desplazamientos, entre otros. Se concluye que, para el taller de la FICM la estructura empotrada presentó un desplazamiento máximo para un sismo de diseño de 1.162 cm, en la estructura con base asilada se redujo un 50.76% con un desplazamiento de 0.572 cm; mientras que, para el taller FISEI la estructura empotrada presentó un valor de 1.294 cm, y con la implantación de aisladores se reduce un 63.49% con un valor de 0.473 cm. Por lo tanto, con la incorporación de aisladores sísmicos las estructuras tienen mayor capacidad de disipación de energía.

Keywords:

Static analysis, push over, isolators, seismic workshops

Abstract

In this article, an analysis of the structural behavior of two structures with and without the use of seismic isolators is carried out. One structure is located in the workshop of the Faculty of Civil and Mechanical Engineering (FICM) while the other is in the workshop of the Faculty of Systems, Electronic and Industrial Engineering (FISEI), both belonging to the Technical University of Ambato. The structures have a structural system of special earthquake-resistant hot-rolled steel frames with stiffening diagonals. First, a methodological framework was created. Subsequently, for the analysis of structural behavior, the following are presented: the results of the fundamental period of vibration, validation of the dynamic analysis, floor drifts, nonlinear static analysis, capacity

curve, performance point, characteristics of the elastomeric insulator with lead core, modeling in the ETABS engineering software, comparison of vibration period results, comparison of inelastic drifts, comparison of displacements, among others. It is concluded that, for the FICM workshop, the embedded structure presented a maximum displacement for a design earthquake of 1.162 cm, in the structure with a fixed base it was reduced by 50.76% with a displacement of 0.572 cm; while, for the FISEI workshop, the embedded structure presented a value of 1.294 cm, and with the implementation of insulators it is reduced by 63.49% with a value of 0.473 cm. Therefore, with the incorporation of seismic isolators, the structures have a greater energy dissipation capacity.

Introducción

El Ecuador se encuentra en una región con un alto peligro de eventos sísmicos y volcánicos, teniendo como último evento el 16 de abril de 2016 en las provincias de Manabí y Esmeraldas un sismo de magnitud 7.8. El sismo causó alrededor de 700 fallecidos, más de 7000 heridos, 22.000 personas refugiadas, edificios destruidos o inhabitables y pérdidas económicas de alrededor de tres mil millones de dólares (Instituto Geofísico – EPN, 2020).

En el Campus Universitario del Valle de los Chillos, Cantón Rumiñahui, Provincia de Pichincha, se encuentran estructuras con aisladores sísmicos. La construcción tiene una superficie de 23338 metros cuadrados y se compone de 8 bloques arquitectónicos, de los cuales, 6 incluyen aisladores sísmicos de triple péndulo de fricción FPT. Según la investigación de Aguiar & Pazmiño (2016) se espera que las experiencias realizadas sean útiles para los proyectistas estructurales, ya que, la presencia de aisladores sísmicos ha contribuido al desarrollo de la Ingeniería Sismo Resistente.

En el país los talleres industriales no cumplen con todas las normas de construcción vigentes. Esta situación hace propicia para que los ingenieros estructurales deban tener en cuenta la importancia del uso de aisladores de base, más aún, si el Ecuador se encuentra en el cinturón de fuego del Pacífico.

La falta de estudios y evaluaciones del momento de ocurrencia de una actividad sísmica ha hecho que sea necesario la aplicación de criterios de análisis estático no lineal en los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial, utilizando un software especializado de elementos

finitos (ETABS), basado en normativas de construcción vigentes. Un análisis estático no lineal se utiliza para comprender de manera aproximada cómo funcionan las estructuras cuando se ven sometidas a movimientos sísmicos y sobrepasan su capacidad elástica.

La realización de una evaluación estructural es fundamental, por lo que, se llevó a cabo un análisis estático no lineal mediante el uso de software de elementos finitos (ETABS), una revisión de todos los aspectos relacionados con el diseño y el estado actual de los talleres de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica (FICM), así como, de la Facultad de Ingeniería en Sistemas, Electrónica e Industrial (FISEI), cumpliendo con la norma ecuatoriana de la construcción NEC 2015, así como con normas internacionales como AISC 360, FEMA 440 y AISC 358.

En la investigación se compararon los planos estructurales con las estructuras in situ, se realizaron ensayos no destructivos, se inspeccionó y midió los cordones de soldadura, para detectar discontinuidades en la superficie se aplicó tintas penetrantes, se inspeccionó componentes soldados mediante ensayos con ultrasonido y se realizó ensayos con martillo.

En la simulación se utilizó un aislador elastomérico de núcleo de plomo (LRB) con capas intercaladas de neopreno y placas de acero con un núcleo cilíndrico de plomo en el centro. Las placas de acero proporcionan rigidez vertical para resistir cargas verticales, mientras que el núcleo de plomo proporciona rigidez horizontal para evitar el movimiento durante cargas de servicio y disipa energía en forma de calor al deformarse.

En función de la Norma Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications (ANSI/AISC, 2016) se analizaron las juntas soldadas de las conexiones de patín soldado sin refuerzo y alma soldada (WUF-W). Además, con la información recolectada se simuló las estructuras mediante el software ETABS 2018.

Por último, se llevó a cabo una comparación del comportamiento estructural de los talleres de la FICM y de la FISEI, que están actualmente contruidos bajo un sistema de pórticos especiales sismoresistentes de acero laminado en caliente con diagonales rigidizadores y conexiones precalificadas (conexión de patín soldado sin refuerzo y alma soldada (WUF-W).

En la presente investigación se realizó un diseño utilizando aisladores sísmicos en las estructuras de acero, ya que, mejoran el comportamiento de las mismas y consecuentemente se protege la vida de todos los ocupantes.

El objetivo de la presente investigación es el de realizar un análisis estático no lineal (push over) con aisladores sísmicos en los talleres de la Universidad Técnica De Ambato.

En el desarrollo de este tema de investigación se utilizó una metodología aplicada y descriptiva, debido a que utilizó herramientas computacionales para realizar los diagnósticos estructurales ante eventos sísmicos de las dos estructuras a estudiar. Las investigaciones y ensayos se realizaron en los talleres de la FICM y de la FISEI, ubicadas en el Campus Huachi de la Universidad Técnica de Ambato.

Marco metodológico

Hipótesis

El comportamiento estructural de los talleres de la FICM y de la FISEI, con la inclusión de aisladores sísmicos, mediante análisis estático no lineal (PUSH OVER), será mejor en comparación al comportamiento de esas mismas estructuras sin la inclusión de aisladores sísmicos.

Población

El estudio y los ensayos se realizaron en los talleres de la FICM y de la FISEI, ubicados en los predios de la Universidad Técnica de Ambato, Campus Huachi Chico.

Recolección de información

Se realizó un trabajo de campo donde se recolectó in situ información estructural de los talleres. Las investigaciones seleccionadas en el transcurso del desarrollo del proyecto de investigación ayudaron en interpretación de los resultados obtenidos.

Procesamiento de información

La información que fue recolectada, seleccionada y procesada sirvió para realizar los diseños estructurales de los talleres. Con los diseños se procedió a la simulación mediante un análisis PUSH OVER en ETABS 2018, con y sin la inclusión de aisladores sísmicos. El propósito de la simulación fue para determinar el estado actual de las estructuras y con la inclusión de aisladores sísmicos analizar su comportamiento

Resultados alcanzados

En el análisis estructural se determinó el nivel de riesgo que presentan los talleres de la FICM y de la FISEI. También fueron calculadas las características estructurales ante un posible fenómeno sísmico.

Planos Arquitectónicos

Se obtuvo los respectivos planos arquitectónicos y planos estructurales de los talleres de la FICM y de la FISEI. Los planos fueron proporcionados por la Dirección de Infraestructura Física de la Universidad Técnica de Ambato.

En la Figura 1 Render del modelo del taller de la FICM se presenta el diseño estructural realizado en el software ETABS 2018.

Figura 1. Render del modelo del taller de la FICM



Fuente: Elaboración propia basada en (ETABS, 2018)

En la Figura 2 Render del modelo del taller de la FISEI se presenta el diseño estructural realizado en el software ETABS 2018.

Figura 2. Render del modelo del taller de la FISEI



Fuente: Elaboración propia basada en (ETABS, 2018)

Resultados

Resultados de la estructura analizada con base fija

Análisis lineal de la estructura en estado actual

El software ETABS se utilizó para modelar el taller de la FICM y el taller de la FISEI. El análisis lineal se realizó siguiendo los estándares establecidos en la Norma Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente (Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2014).

Período fundamental de vibración:

En la verificación del período de vibración (T) se debe comprobar que el valor de T que se obtiene por el método 2 mediante análisis lineal, como se presenta en la Tabla 1 Período Fundamental Método 2, no supere en un 30% al valor de T_a obtenido del método 1

Tabla 1. Período Fundamental Método 2

TALLER FICM		TALLER FISEI	
Modo	Período (seg)	Modo	Período (seg)
1	0.317	1	0.292
2	0.232	2	0.256
3	0.208	3	0.231
4	0.157	4	0.166
5	0.152	5	0.158
6	0.116	6	0.116
7	0.106	7	0.108
8	0.106	8	0.106
9	0.106	9	0.106

Fuente: Elaboración propia

Debido a que el valor del período es menor que el 30% del período obtenido por el método 1 los dos talleres cumplen con este análisis estructural como se muestra en la Tabla 2 Verificación del período fundamental.

Tabla 2. Verificación del período fundamental

	TALLER FICM	TALLER FISEI
Método 1 (T_a)	0.3815	0.3815
Método 2 (T_a)	0.317	0.292
$1.3^{\circ}T_{a1}$	0.496	0.496
Condición	$T_{a2} \leq 1.3T_{a1}$	
Observación	CUMPLE	CUMPLE

Fuente: Elaboración propia

Participación de la masa modal

Es necesario verificar que los dos primeros modos de vibración tengan un movimiento traslacional y que el tercer modo de vibración se espera que sea torsional para que la estructura funcione correctamente.

Las dos estructuras muestran un comportamiento traslacional en los dos primeros modos de vibración y un comportamiento torsional en el tercer modo de vibración, por lo que, no hay problemas de torsión. La Tabla 3 muestra los factores de participación de masa nodal y % de torsión

Tabla 3. Factores de participación de masa modal y % de torsión

Modo	TALLER - FICM				Comportamiento
	Ux	Uy	Rz	%Torsión	
1	0.0395	0.0000	0.0077	19.49	Traslacional
2	0.0000	0.7925	0.0025	0.32	Traslacional
3	0.0469	0.0028	0.6968	1485.71	Torsional
Modo	TALLER – FISEI				Comportamiento
	Ux	Uy	Rz	%Torsión	
1	0.0463	0.0000	0.0120	25.92	Traslacional
2	0.0000	0.8509	0.0016	0.19	Traslacional
3	0.0452	0.0020	0.7292	1613.27	Torsional

Fuente: Elaboración propia

Acumulación de la masa modal

Según la Norma Ecuatoriana de la Construcción todos los modos de vibración deben acumularse en cada una de las direcciones horizontales el 90% de la masa total de la edificación. La acumulación del 90% de masa para el taller FICM se da en el onceavo modo de vibración para las dos direcciones en X e Y. Para el taller FISEI se da la acumulación en el décimo para la dirección X y en el onceavo modo para la dirección Y. Para ambos casos cumplen ya que se encuentran en los modos establecidos para el análisis.

Validación del análisis dinámico

La Norma Ecuatoriana de la Construcción establece en la sección 6.2.2 el valor límite del cortante dinámico cuando se realiza un análisis dinámico espectral. Este valor que se aplica en la base de las estructuras no debe superar el 80% para estructuras regulares o el 85% para estructuras irregulares del cortante obtenido por el método estático.

La Tabla 4 Validación del Análisis Dinámico presenta el cortante basal dinámico en dirección X & Y, el mismo que supera el 85% del cortante estático para estructuras irregulares validando el análisis dinámico.

Tabla 4. Validación del Análisis Dinámico

	Cortante (Ton)		%	Observación
	Estático	Dinámico		
TALLER FICM				
Dirección X	35.572	30.399	85.46	Cumple
Dirección Y	57.226	49.072	85.75	Cumple
TALLER FISEI				
Dirección X	36.028	30.693	85.19	Cumple
Dirección Y	57.459	49.314	85.82	Cumple

Fuente: Elaboración propia

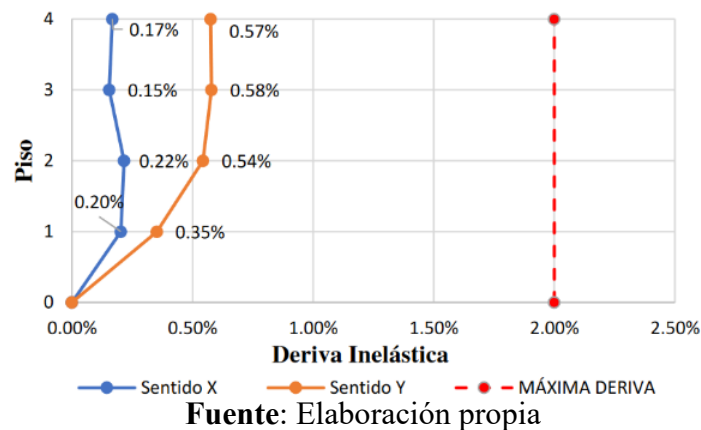
Derivas de piso

Derivas provocadas por el cortante estático

Las derivas inelásticas generadas por el cortante estático no supera el límite máximo del 2%. Presentando un valor máximo de 0.58% en la dirección Y para el Taller de la FICM y un valor máximo de 0.61% en la dirección Y para el taller de la FISEI.

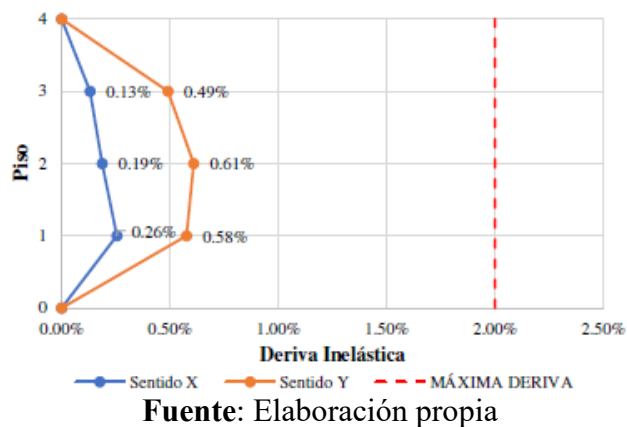
En la Figura 3 Derivas inelásticas por cortante estático del taller de la FICM se muestran los valores de derivas inelásticas por cortante estático de la estructura del taller.

Figura 3. Derivas inelásticas por cortante estático del taller de la FICM



En la Figura 4 Derivas inelásticas por cortante estático del taller de la FISEI se muestran los valores de derivas inelásticas por cortante estático de la estructura del taller.

Figura 4. Derivas inelásticas por cortante estático del taller de la FISEI

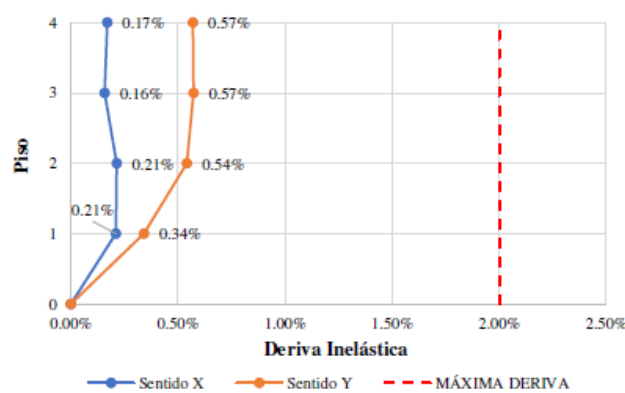


Derivas provocadas por el cortante dinámico

Las derivas inelásticas generadas por el cortante dinámico no supera el límite máximo del 2%. Presentando un valor máximo de 0.57% en la dirección Y para el Taller FICM y un valor máximo de 0.57% en la dirección Y para el taller FISEI.

En la Figura 5 Derivas inelásticas por cortante dinámico del taller FICM se muestran los valores de derivas inelásticas por cortante dinámico de la estructura del taller.

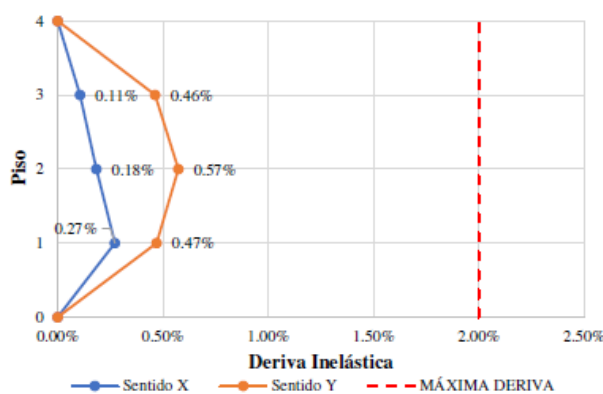
Figura 5. Derivas inelásticas por cortante dinámico del taller FICM



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 6 Derivas inelásticas por cortante dinámico del taller FISEI se muestran los valores de derivas inelásticas por cortante dinámico de la estructura del taller.

Figura 6. Derivas inelásticas por cortante dinámico del taller FISEI



Fuente: Elaboración propia

Análisis estático no lineal

En primer lugar, se llevó a cabo un análisis estático no lineal para evaluar el desempeño sísmico de las dos estructuras. El objetivo del análisis es determinar la curva de capacidad y obtener el punto de desempeño para los niveles de amenaza sísmica referenciados en la

Norma Ecuatoriana de Construcción. Para lograr este objetivo, se utiliza la metodología establecida en la Norma Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440 (Federal Emergency Management Agency, 2005).

Para las vigas, columnas y riostras, que son elementos que resisten cargas laterales, se colocan rotulas plásticas en los extremos de cada uno, indicando la zona donde se espera fluencia de la sección, lo que permite definir la capacidad individual de cada sección que integra la estructura. Según la Norma Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 356 (Federal Emergency Management Agency, 2000) se ubica entre el 5 % y el 95 %.

Asignación de rótulas plásticas

Las rotulas plásticas se asignan a cada elemento que resiste las cargas laterales como son vigas, columnas y riostras, estas están ubicadas en los extremos de cada una donde se espera la fluencia de la sección que permite definir la capacidad individual de cada sección que integra la estructura. De acuerdo con la Norma Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 356 se ubica a un 5% y al 95%.

Rotulas plásticas para vigas: Su asignación se toma a partir de lo descrito en el artículo ASCE 41-13: Seismic evaluation and retrofit rehabilitation of existing buildings (Pekelnicky et al., 2012), tomando en cuenta que estos elementos tienen un comportamiento a la flexión.

Rotulas plásticas para columnas: Su asignación se toma a partir de lo descrito en el artículo ASCE 41-13: Seismic evaluation and retrofit rehabilitation of existing buildings (Pekelnicky et al., 2012), tomando en cuenta que estas secciones se comportan a flexo-compresión.

Rotulas plásticas de riostras: Su asignación se toma a partir de lo descrito en el artículo ASCE 41-13: Seismic evaluation and retrofit rehabilitation of existing buildings (Pekelnicky et al., 2012), tomando en cuenta que estos elementos tienen un comportamiento a tracción y compresión.

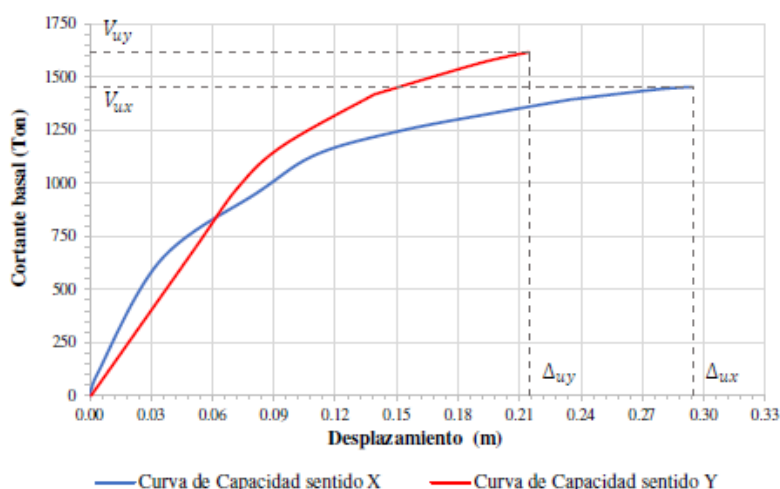
Resultados del análisis estático no lineal Pushover

Curva de capacidad

Como resultado del análisis no lineal se determina la curva de capacidad para las dos direcciones de análisis para cada estructura, dicha curva representa la relación del cortante total en la base con su respectivo desplazamiento del último piso, hasta que la edificación llegue al colapso.

La Figura 7 representa la curva de capacidad para el Taller FICM, donde la curva en la dirección X se obtiene un cortante basal último de 1453.144 ton con un desplazamiento de 29.46 cm y para la dirección Y el cortante basal último es de 1617.01 ton con un desplazamiento último de 21.45 cm. Los valores representan la capacidad máxima de la estructura una vez que pase este límite producirá el colapso de la misma.

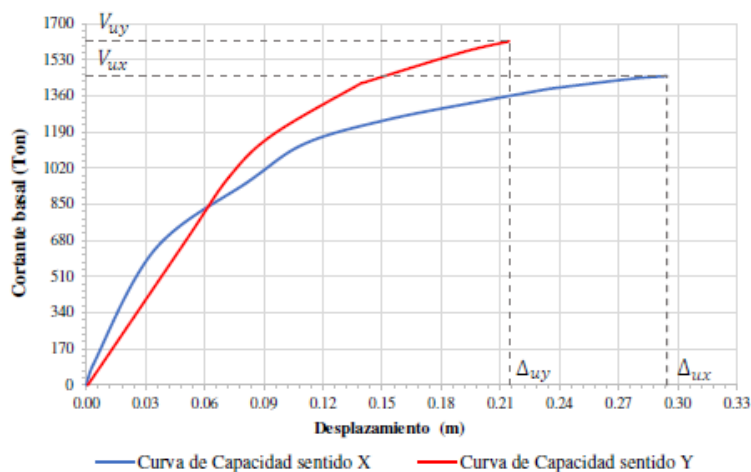
Figura 7. Curva de capacidad del Taller de la FICM



Fuente: Elaboración propia

La Figura 8 Curva de capacidad del taller de la FISEI muestra en la dirección X un cortante basal último de 1413.52 ton con un desplazamiento de 25.0 cm, mientras en la dirección Y el cortante basal último es de 1608.75 ton con un desplazamiento último de 16.76 cm. Los valores representan la capacidad máxima de la estructura, una vez que sobrepase este límite se producirá el colapso de la misma.

Figura 8. Curva de capacidad del taller de la FISEI



Fuente: Elaboración propia

Punto de desempeño

Mediante el método de la linealización equivalente propuesto por la Norma de la Federal Emergency Management Agency (2005) se determinan los puntos de desempeño. El método consiste en un procedimiento gráfico que compara la capacidad de la estructura para resistir fuerzas laterales con la demanda sísmica. Los valores de desplazamiento y fuerza de corte de cada punto de desempeño se obtuvieron del software ETABS 2018.

En la Tabla 5 Puntos de desempeño en la dirección X del taller de la FICM se presentan los valores de cada punto de desempeño para la dirección X, con su valor de fuerza de corte y desplazamiento que corresponde a cada nivel de amenaza sísmica.

Tabla 5. Puntos de desempeño en la dirección X del taller de la FICM

Dirección	Nivel de sismo	Dp (m)	V (ton)
X-X	Raro	0.035	643.449
	Muy Raro	0.050	742.208

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6. Puntos de desempeño en la dirección Y del taller de la FICM se presentan los valores de cada punto de desempeño para la dirección Y, con su valor de fuerza de corte y desplazamiento que corresponde a cada nivel de amenaza sísmica.

Tabla 6. Puntos de desempeño en la dirección Y del taller de la FICM

Dirección	Nivel de sismo	Dp (m)	V (ton)
Y-Y	Raro	0.024	312.111
	Muy Raro	0.035	473.368

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7 Puntos de desempeño en la dirección X del taller de la FISEI se presentan los valores de cada punto de desempeño para la dirección X, con su valor de fuerza de corte y desplazamiento que corresponde a cada nivel de amenaza sísmica.

Tabla 7. Puntos de desempeño en la dirección X del taller de la FISEI

Dirección	Nivel de sismo	Dp (m)	V (ton)
X-X	Raro	0.012	298.909
	Muy Raro	0.032	689.675

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 Puntos de desempeño en la dirección Y del taller de la FISEI se presentan los valores de cada punto de desempeño para la dirección Y, con su valor de fuerza de corte y desplazamiento que corresponde a cada nivel de amenaza sísmica.

Tabla 8. Puntos de desempeño en la dirección Y del taller de la FISEI

Dirección	Nivel de sismo	Dp (m)	V (ton)
Y-Y	Raro	0.019	334.951
	Muy Raro	0.029	508.009

Fuente: Elaboración propia basada

Resultados de la estructura analizada con aisladores sísmicos

Características del aislador elastomérico con núcleo de plomo para los talleres de la FICM y la FISEI

Para el análisis sísmico se va a utilizar el aislador de tipo elastomérico con núcleo de plomo. En la Tabla 9 se presentan las propiedades geométricas del aislador.

Tabla 9. Propiedades geométricas del aislador

Descripción	Símbolo	Valor
Diámetro de la goma	Do	520 mm
Diámetro del núcleo de plomo	Di	90 mm
Espesor total de la goma	H	120 mm
Espesor de cada capa de goma	tr	5 mm

Fuente: Catalogo de proveedor Dynamic Isolation Systems

En la Tabla 10 se presentan las características físicas y mecánicas del aislador elastomérico con núcleo de plomo para los talleres de la FICM y la FISEI, además se presentan las propiedades dinámicas que se utilizó para la modelación en el software ETABS 2018.

Tabla 10. Características físicas y mecánicas de aislador elastomérico con núcleo de plomo.

Descripción	Valores		Unidades
	Taller FICM	Taller FISEI	
Diámetro de aislador (DI)	235.55	247.62	mm
Altura del aislador sin planchas (HI)	234.88	234.88	mm
Rigidez efectiva (Keff)	9.48	10.42	T/m
Amortiguamiento efectivo (Beff)	0.1395	0.1370	
Rigidez elástica (Ke)	73.30	81.07	T/m
Fuerza de fluencia (Fy)	1.386	1.496	T
Radio de rigidez post fluencia (Kd/Ke)	0.10	0.10	
Carga axial ultima (Pumax)	35.55	39.29	T
Rigidez efectiva lineal (Kv)	2998.88	3632.45	T/m

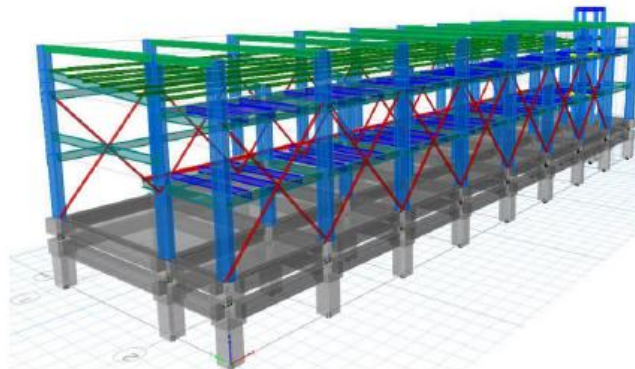
Fuente: Elaboración propia

Modelamiento en el software de ingeniería ETABS

La comprobación de los resultados con la implantación de los aisladores se realiza mediante la modelación en el software ETABS 2018, para lo cual, se coloca los aisladores en la estructura a través de un Link/ Support properties,

En la Figura 9 Modelación del taller de la FICM base aislada se muestra la modelación en tres dimensiones con el software de ingeniería estructural ETABS.

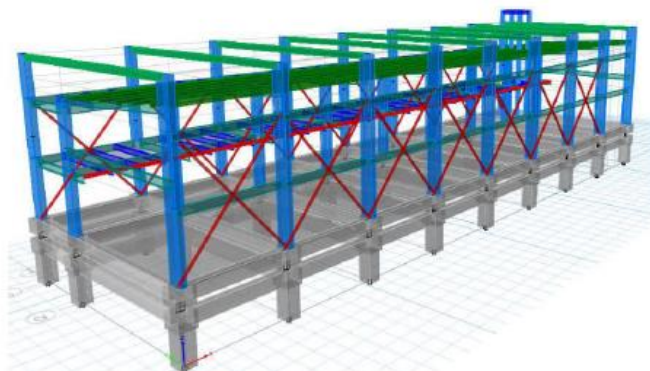
Figura 9. Modelación del taller de la FICM base aislada



Fuente: Elaboración propia basada en (ETABS, 2018)

En la Figura 10 Modelación del taller de la FISEI base aislada se muestra la modelación en tres dimensiones con el software de ingeniería estructural ETABS.

Figura 10. Modelación del taller de la FISEI base aislada



Fuente: Elaboración propia basada en (ETABS, 2018)

Resultados del análisis estructural

Período de vibración fundamental de la estructura aislada:

Las siguientes tablas muestran períodos altos debido al uso de aisladores de base. Las masas que participan en los modos de traslación deben representar al menos el 90% de su participación. Si no lo hacen, se deberá realizar una nueva distribución de sus rigideces.

Los dos primeros modos de vibración de los talleres de la FICM tienen un movimiento traslacional. La dirección X y la dirección Y tienen una participación superior al 90% en el segundo modo. Además, el tiempo de análisis es $T = 2.824$ s.

En la Tabla 11 se presentan los modos de vibración y participación de masas del taller de la FICM con aisladores.

Tabla 11. Modos de vibración y participación de masas del taller de la FICM con aisladores.

Modo	Periodo sec	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ
1	2.824	0.003	0.637	0.000	0.00	0.83	0.00
2	2.697	0.765	0.004	0.000	1.00	0.92	0.00
3	2.270	0.001	0.128	0.000	1.00	1.00	0.00
4	0.316	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
5	0.257	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
6	0.239	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
7	0.174	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
8	0.130	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
9	0.115	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
10	0.106	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Los dos primeros modos de vibración de los talleres de la FISEI producen un movimiento traslacional, mientras que el tercer modo presenta una participación mayor al 90% para la dirección X y el segundo modo para la dirección Y. Además, el tiempo de análisis es de $T = 2.798$ s. En la Tabla 12 se presentan los modos de vibración y participación de masas del Taller FISEI con aisladores.

Tabla 12. Modos de vibración y participación de masas del Taller FISEI con aisladores

Modo	Periodo sec	UX	UY	UZ	Sum UX	Sum UY	Sum UZ
1	2.798	0.004	0.640	0.000	0.00	0.81	0.00
2	2.671	0.769	0.005	0.000	1.00	0.82	0.00
3	2.247	0.001	0.129	0.000	1.00	1.00	0.00
4	0.290	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
5	0.252	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
6	0.235	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
7	0.171	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
8	0.125	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
9	0.116	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00
10	0.108	0.000	0.000	0.000	1.00	1.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Comparación de resultados

- Comparación de resultados del período de vibración:

En la Tabla 13 se presentan los resultados del período de vibración de los dos talleres para cada sistema estructural. Como se puede observar se genera un incremento en los períodos de vibración de los dos talleres con los aisladores, ya que, este análisis considera la flexibilidad en el nivel donde se ubicó el aislador formando un modelo de acoplamiento uniforme entre la base y el nivel del aislador. Esto produce un modelo más flexible en relación con los talleres de base fija.

Tabla 13. Período de vibración para los diferentes sistemas estructurales

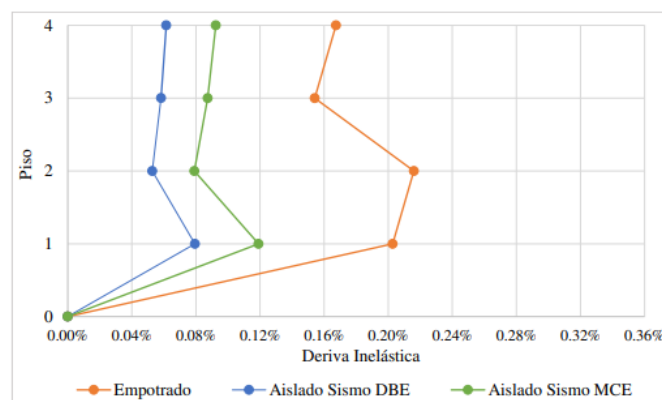
PERÍODO (seg.)					
TALLER FICM			TALLER FISEI		
Modo	Empotrado	Aislado	Modo	Empotrado	Aislado
1	0.317	2.824	1	0.292	2.798
2	0.232	2.697	2	0.256	2.671
3	0.208	2.27	3	0.231	2.247
4	0.157	0.316	4	0.166	0.290
5	0.152	0.257	5	0.158	0.252
6	0.116	0.239	6	0.116	0.235
7	0.106	0.174	7	0.108	0.171

Fuente: Elaboración propia

- Comparación de derivas inelásticas:

Para comparar los dos sistemas analizados, la estructura empotrada en su base y la estructura aislada, las derivas de piso son un parámetro crucial. Las máximas derivas de piso del sistema empotrado se determinaron por el espectro sismo de diseño (DBE) y el espectro sismo máximo considerado (MCE) para cada dirección de análisis. Al comparar estas derivas con las del sistema aislado se puede ver que presenta una reducción en las mismas.

En la Figura 11 Derivas inelásticas del taller de la FICM convencional y aislado en dirección X se observa que para una estructura empotrada la deriva máxima es del 0,22% en el segundo piso. Cuando se implementan los aisladores se observa una reducción del 64% en un sismo de diseño con un valor máximo de 0,08%, mientras que, para un sismo máximo considerado, la reducción es del 45% con un valor máximo de 0,12%.

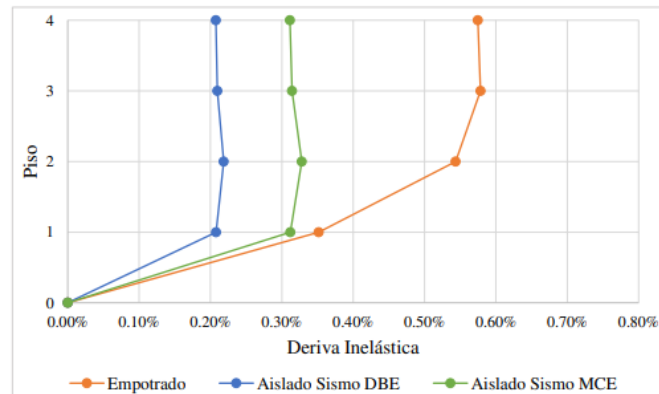
Figura 11. Derivas inelásticas del taller de la FICM convencional y aislado en dirección X


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 12 Derivas inelásticas del taller de la FICM convencional y aislado en dirección Y se observa un valor máximo de deriva de 0,58% en el tercer piso para una

estructura empotrada, mientras que con la implementación de aisladores se observa una reducción del 62% en un sismo de diseño con un valor máximo de 0,22%, y una reducción del 43% en un sismo máximo considerado con un valor máximo de 0,33%.

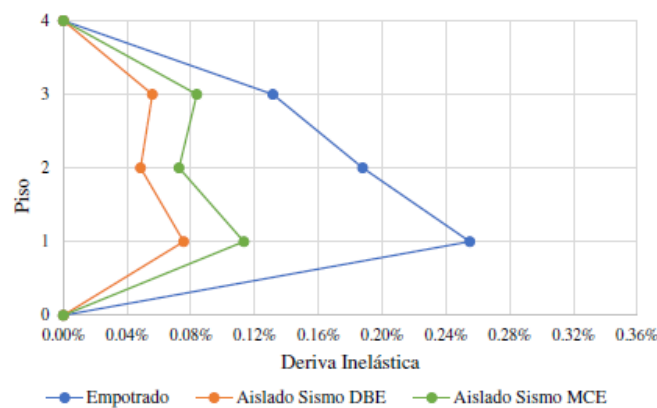
Figura 12. Derivas inelásticas del taller de la FICM convencional y aislado en dirección Y



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 13 Derivas inelásticas del taller de la FISEI convencional y aislado en dirección X se observa que la estructura empotrada tiene un valor máximo de deriva de 0,26% en el primer piso, mientras que la implementación de aisladores reduce un 69% para un sismo de diseño con un valor máximo de 0,08%, y para un sismo máximo considerado se reduce un 58% con un valor máximo de 0,11%.

Figura 13. Derivas inelásticas del taller de la FISEI convencional y aislado en dirección X

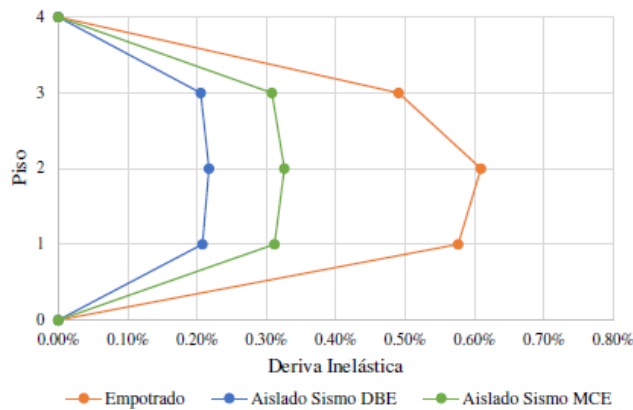


Fuente: Elaboración propia

En la Figura 14 Derivas inelásticas del Taller de la FISEI convencional y aislado en dirección Y se observa que la estructura empotrada presenta un valor máximo de deriva del 0,61% en el segundo piso, mientras que la implementación de aisladores produce una reducción del 64 % en un sismo de diseño con un valor máximo del 0,22%, y una

reducción del 46 % en un sismo máximo considerado con un valor máximo del 0,33%. Todos estos resultados cumplen con los valores especificados en NEC-15. 4.2.5.5.

Figura 14. Derivas inelásticas del Taller de la FISEI convencional y aislado en dirección Y



Fuente: Elaboración propia

- Comparación de los desplazamientos máximos

Se determina los desplazamientos máximos obtenidos por efecto del sismo en dirección X e Y, los dos resultados son comparados con respecto a la estructura con base empotrada considerando que el edificio se moverá, aunque el mismo se encuentre aislada.

En las siguientes figuras se puede observar que los desplazamientos en la estructura empotrada en la base son aproximadamente el doble a comparación con la estructura con aislación, tanto con el sismo de diseño como también para el sismo máximo considerado; permitiendo obtener una mejor idea del comportamiento de la estructura frente a un sismo.

Desplazamiento del taller FICM:

En la Tabla 14 Desplazamiento en la dirección X y porcentaje de reducción con sistema de aislación en el taller de la FICM con un sismo de diseño se obtiene un desplazamiento máximo de 0.572 cm reduciendo un 50.76% en comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 0.858 con una reducción del 26.15%.

Tabla 14. Desplazamiento en la dirección X y porcentaje de reducción con sistema de aislación en el taller de la FICM

Nivel	Empotrado (cm)	Sismo DBE		Sismo MCE	
		Desplazamiento (cm)	% Reducción	Desplazamiento (cm)	% Reducción
4	1.162	0.572	50.76	0.858	26.15
3	0.872	0.351	59.75	0.576	33.90
2	0.831	0.244	70.59	0.467	43.86
1	0.481	0.028	94.26	0.141	70.62
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15 Desplazamiento en la dirección Y y porcentaje de reducción con sistema de aislación en el taller de la FICM con un sismo de diseño se obtiene un desplazamiento máximo de 1.440 cm reduciendo un 46.70 % en comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 2.159 cm con una reducción del 20.05 %.

Tabla 15. Desplazamiento en la dirección Y y porcentaje de reducción con sistema de aislación en el taller de la FICM

Nivel	Empotrado (cm)	Sismo DBE		Sismo MCE	
		Desplazamiento (cm)	% Reducción	Desplazamiento (cm)	% Reducción
4	2.701	1.440	46.70	2.159	20.05
3	2.490	1.340	46.17	2.011	19.26
2	2.306	1.256	45.52	1.885	18.28
1	0.919	0.629	31.56	0.903	1.70
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia

Desplazamiento del Taller FISEI:

En la Tabla 16 Desplazamiento en la dirección X y porcentaje de reducción con sistema de aislación en el taller de la FISEI con un sismo de diseño se obtiene un desplazamiento máximo de 0.473 cm reduciendo un 63.49% en comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 0.921 cm con una reducción del 28.82 %.

Tabla 16. Desplazamiento en la dirección X y porcentaje de reducción con sistema de aislación en el taller de la FISEI

Nivel	Empotrado (cm)	Sismo DBE		Sismo MCE	
		Desplazamiento (cm)	% Reducción	Desplazamiento (cm)	% Reducción
4	1.294	0.473	63.49	0.921	28.82
3	1.071	0.273	74.55	0.709	33.80
2	0.898	0.143	84.04	0.485	45.99
1	0.613	0.031	94.92	0.147	76.06
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 17 Desplazamiento en la dirección Y y porcentaje de reducción con sistema de aislación en el taller de la FISEI con un sismo de diseño se obtiene un desplazamiento máximo de 1.368 cm reduciendo un 53.85 % a comparación de una estructura empotrada y para un sismo máximo considerado un valor máximo de 2.052 cm con una reducción del 30.78 %.

Tabla 17. Desplazamiento en la dirección Y y porcentaje de reducción con sistema de aislación en el taller de la FISEI

Nivel	Empotrado (cm)	Sismo DBE		Sismo MCE	
		Desplazamiento (cm)	% Reducción	Desplazamiento (cm)	% Reducción
4	2.965	1.368	53.85	2.052	30.78
3	2.941	1.341	54.39	2.012	31.58
2	2.757	1.250	54.66	1.875	31.99
1	1.336	0.628	52.98	0.942	29.46
0	0.000	0.000	0.00	0.000	0.000

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

- Para el Taller FICM la estructura empotrada presentó un desplazamiento máximo para un sismo de diseño de 1.162 cm, para la estructura con base fija se redujo un 50.76% con un desplazamiento de 0.572 cm. Mientras que para el taller FISEI presenta para la estructura empotrada un valor de 1.294 cm, y con la implantación de aisladores se reduce un 63.49% con un valor de 0.473 cm. Por lo tanto, con la incorporación de aisladores sísmicos las estructuras tienen mayor capacidad de disipación de energía.
- Según el análisis lineal realizado a la estructura del taller de la FICM cumple con los requisitos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Su período fundamental de vibración es de 0.317 segundos, menor que el 30% del período obtenido por el método 1, y su comportamiento traslacional es adecuado en los dos primeros modos de vibración.
- Según el análisis lineal realizado a la estructura del taller de la FISEI, la estructura cumple con los requisitos establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Su período fundamental de vibración de la estructura es de 0,292 segundos, lo que es menor al 30% del período obtenido por el método 1. En el chequeo de torsión, la estructura presenta un buen comportamiento traslacional en los dos primeros modos de vibración.
- La curva de capacidad para las dos direcciones del análisis y el punto de desempeño se obtuvieron a partir del análisis estático no lineal de los talleres de la FICM y de la FISEI. Estos resultados indican que las dos estructuras cumplen con los niveles de amenaza establecidos por el Comité Visión 2000.

- Se determinó el dimensionamiento del aislador elastomérico con núcleo de plomo LRB con las especificaciones de la norma ASCE 7-16, sus propiedades son obtenidas del catálogo del proveedor Dynamic Isolation Systems con un diámetro de la goma de 520 mm, diámetro del núcleo de plomo de 90 mm, espesor de la goma de 120 mm y el espesor de cada capa de goma de 5 mm.
- El período de la estructura con aislador LRB (Elastomérico con núcleo de plomo) se incrementó a comparación de la estructura empotrada, para el taller FICM con un período aislado de 2.824 segundos y el taller FISEI con un valor de 2.798 segundos, por lo que, los aisladores son capaces de disminuir la demanda sísmica, con lo cual, es posible diseñar estructuras elásticas que ya no requieren incursionar en el rango inelástico.
- Se verifican las derivas de piso de las dos estructuras, concluyendo que para el taller FICM con un sismo de diseño se redujo un 64% a comparación de la estructura empotrada y para un sismo máximo considerado se redujo un 45%, mientras para el taller FISEI se obtuvo una reducción del 69% para un sismo de diseño y un 58% para un sismo máximo.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Referencias bibliográficas

- Instituto Geofísico - EPN. (16 de abril de 2020). *Instituto Geofísico - EPN*. Obtenido de <https://www.igepn.edu.ec/interactuamos-con-usted/1810-cuatro-anos-despues-del-terremoto-de-pedernales-un-testimonio-sobre-el-peligro-sismico-en-el-ecuador>
- Aguiar, R., & Pazmiño, E. (2016). Detalles constructivos debido a los aisladores sísmicos en las construcciones de la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, en Ecuador. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, vol. 21, pp. 217-256.
- ANSI/AISC. (2016). *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications*. USA: ANSI/AISC 358-16.
- Computers and Structures, Inc. (2018). *ETABS*. California: CSI.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción. (2014). *Peligro Sísmico Diseño Sismo Resistente*. Ecuador.
- Federal Emergency Management Agency. (2005). *Improvement of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures FEMA 440*. Washington: FEMA.

Federal Emergency Management Agency. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings FEMA 356*. Washington: FEMA.

Pekelnicky, R., Engineers, S. D., Chris Poland, S. E., & Engineers, N. D. (2012). ASCE 41-13: Seismic evaluation and retrofit rehabilitation of existing buildings. *Proceedings of the SEAOC*.

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Ciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Ciencia Digital**.



Indexaciones

