

# Optimización del diseño estructural de un edificio irregular ubicado en una zona de alta sismicidad

## Optimization of the structural design for an irregular building located in a high seismicity zone

Juan Bojorquez<sup>1</sup>, Fernando Arias<sup>1</sup>, Fernando Velarde<sup>1</sup>, Henry Reyes<sup>1</sup>, Amerika Sanchez<sup>1</sup>, Melissa Rocha<sup>1</sup>

### RESUMEN

El presente estudio se centra en la optimización de diferentes sistemas estructurales empleados en edificios de acero de gran altura, con un enfoque específico en la ciudad de Acapulco, Guerrero, una región conocida por su alta actividad sísmica. Utilizando el método modal espectral, se llevaron a cabo análisis para evaluar la capacidad de estos edificios para resistir las fuerzas sísmicas y otras cargas externas. Tras realizar un análisis detallado de varios modelos, se compararon los resultados en función de diversos parámetros ingenieriles, incluyendo la distorsión máxima entrepisos, el cortante basal, los desplazamientos y el peso total de las estructuras, este último considerado como una estimación del costo de los sistemas propuestos. Los hallazgos de este estudio indican que los marcos de acero se destacan como una opción viable para los edificios de altura en cuestión. Sin embargo, se identificaron áreas de mejora potencial, lo que sugiere oportunidades para optimizar aún más el diseño y la resistencia sísmica de estas estructuras. Este estudio proporciona una visión profunda y perspicaz sobre la optimización de sistemas estructurales en edificios de acero de gran altura, ofreciendo información valiosa para los ingenieros y profesionales del sector involucrados en proyectos similares.

Recibido: junio 2024  
Aceptado: junio 2024  
Publicado: junio 2024

### Palabras Clave:

Marcos de acero, zonas de alta sismicidad, edificios irregulares

### ABSTRACT

The present study focuses on the optimization of different structural systems employed in tall steel buildings, specifically in the city of Acapulco, Guerrero, a region known for its high seismic activity. Using a modal response spectrum analysis, the design criteria were established to assess the ability of these buildings to withstand seismic forces and other external loads. After performing a detailed analysis of various models, the results were compared based on several engineering parameters, including maximum inter-story drift, base shear, displacements, and the total weight of the structures, the latter being considered an estimate of the cost of the proposed systems. The findings of this study indicate that steel frames stand out as a viable option for the tall buildings in question. However, areas of potential improvement were identified, suggesting opportunities for further optimization of the design and seismic resistance of these structures. This study provides a deep and insightful perspective on the optimization of structural systems in tall steel buildings, offering valuable information for engineers and professionals in the field involved in similar projects.

### Keywords:

Steel buildings, high seismicity zones, irregular buildings

\*Autor para correspondencia: Juan Bojórquez Mora  
Dirección de correo electrónico: [juanbm@uas.edu.mx](mailto:juanbm@uas.edu.mx)

<sup>1</sup> Universidad Autónoma de Sinaloa, FIC, Culiacán Rosales, Sinaloa, México. C.P. 80040

## 1. INTRODUCCIÓN

En el territorio nacional, según estadísticas del Servicio Sismográfico Nacional, México experimenta en promedio 708 sismos de magnitud pequeña anualmente, aproximadamente 28 con magnitudes entre 5 y 5.9 al año, y al menos un sismo de magnitud entre 7 y 7.9 cada dos años [1]. Por lo tanto, es crucial que las construcciones en el país estén equipadas con sistemas estructurales que garanticen un comportamiento robusto frente a estos eventos. En respuesta a esta necesidad, diversos sistemas estructurales han sido desarrollados para ofrecer resistencia ante fuerzas laterales, destacándose los sistemas duales como altamente recomendados para edificaciones de mediana y gran altura en zonas de alta intensidad sísmica [2-6]. Ejemplos de elementos clave en estos sistemas incluyen muros de concreto reforzado, muros de corte y sistemas de contraventeo diagonal, integrados con marcos estructurales para formar sistemas duales eficaces [7-11]. Además, es común encontrar estructuras que priorizan el aspecto estético y que presentan múltiples irregularidades, las cuales pueden ser problemáticas e indeseables en zonas sísmicas activas [12-14]. Esta problemática motiva la necesidad de optimizar recursos materiales y económicos en el diseño estructural de edificaciones con configuraciones irregulares, especialmente en áreas con actividad sísmica constante.

Investigaciones recientes han abordado comparativas de sistemas estructurales para determinar cuáles ofrecen un mejor comportamiento ante características sísmicas adversas. Por ejemplo, estudios como el de Borah y Choudhury han destacado que los sistemas combinados de marcos y muros presentan un rendimiento superior en edificaciones altas bajo condiciones específicas de estudio [15]. Asimismo, investigaciones de Patel y Patel han demostrado que ubicar muros cerca del núcleo central puede mejorar significativamente el comportamiento sísmico de una estructura de gran altura [16].

En este contexto, la optimización de costos y el análisis de las implicaciones de las irregularidades estructurales son aspectos clave. Investigaciones como las de Elhegazy han identificado que los sistemas de marcos resistentes a momento son adecuados para edificios de baja y mediana altura, mientras que las estructuras con una relación altura-base mayor a tres requieren sistemas adicionales de arriostramiento

para optimizar costos directos [17]. Estos estudios subrayan la importancia de considerar el impacto de la configuración estructural en el rendimiento sísmico y económico de las edificaciones, especialmente las estructuras con irregularidades extremas [18].

Por otro lado, ciudades como Acapulco, Guerrero, que se destacan por su desarrollo turístico y estético, y presenta la necesidad de mantener un constante desarrollo de edificios estéticamente atractivos [19]; además, enfrenta desafíos considerables debido a su ubicación en una zona de alta actividad sísmica. Acapulco experimenta en promedio 119 sismos anuales, con magnitudes que oscilan entre 3.8 y 5.3 [20], lo cual, junto con factores como la acción del viento y la altura de los edificios, aumenta la complejidad del análisis y diseño estructural. Debido a la complejidad del diseño de estructuras fuertemente irregulares en zonas de alta sismicidad en este estudio, se realiza un análisis comparativo de una edificación con grandes irregularidades en planta y elevación implementando un sistema dual de marcos de acero estructural con contraventeos concéntricos, utilizando el software ETABS. La comparación se centrará en aspectos como cortante basal, desplazamiento lateral, distorsiones de entrepiso, periodo fundamental y el costo inicial como una función del peso de la estructura. Finalmente, una comparación del costo inicial contra las distorsiones de cada sistema estructural es obtenida.

## 2. METODOLOGÍA

A continuación, se hace una descripción general de la metodología empleada.

### 2.1 Caso de estudio

El proyecto definido, cuenta con 23 niveles, 4 distintas secciones a nivel de planta y variación de altura entre algunos entrepisos, presentando características de irregularidad en planta y elevación. En la figura 1, se puede observar un modelo del edificio en vista isométrica, se conforma por dos niveles para uso comercial, sobre ellos tres niveles para uso laboral como oficinas y además 18 niveles destinados a uso habitacional.

### 2.2 Zona de estudio

El proyecto se supone localizado dentro de una posición concurrida de la ciudad de Acapulco, Guerrero, bajo las coordenadas Lon = - 99.85 O, Lat = 16.89 N.



Figura 1. Modelo 3D del proyecto

### 2.3 Procedimiento de análisis de cargas

Una vez establecidos los tipos de uso y configuración de la edificación, se definen los tipos de cargas bajo los cuales se verá sometida durante su vida útil. Según el Artículo 188 del Reglamento de Construcciones del municipio de Acapulco (RCO-ACA) del año 2002 [21], se deben tomar en cuenta los efectos de las cargas muertas, vivas, de sismo y de viento, cuando este último sea significativo en el diseño de toda estructura.

Para desarrollar el análisis sísmico, se utiliza el Manual de Diseño de Obras Civiles para Diseño por Sismo (MDOC-DS) publicado en 2015 [22]. Por lo tanto, siguiendo lo establecido por tales lineamientos, se definió un factor de comportamiento sísmico  $Q = 3$  y una distorsión límite permisible de  $\gamma = 0.015$ .

### 2.4 Irregularidades estructurales

Según el MDOC-DS, en su sección 3.3.2.2 “Una estructura es irregular si no cumple con una o hasta tres de las condiciones de regularidad descritas en el inciso 3.3.2.1”[22]. Por lo tanto, la estructura se identifica como irregular ya que:

- La estructura no es sensiblemente simétrica
- La estructura tiene una saliente cuya dimensión excede el 20% de la dimensión total en planta medida en paralelo.
- Los sistemas de piso cuentan con aberturas mayores al 20% de la dimensión paralela en planta.
- En el eje 4, de los niveles superiores, hay columnas restringidas en una sola dirección.

Además, debido a lo establecido en el MDOC-DS (2015), se indica que la estructura será considerada

fuertemente irregular, esto a razón de que la edificación no cumple con cuatro condiciones de regularidad.

### 2.5 Modelado en software

La figura 2 presenta los modelos 3D generados con el software ETABS. En este modelo se emplearon elementos del tipo “Frame” para representar las vigas, columnas y contraventeos, y elementos del tipo “Slab” para las losas. Así también, se definieron instrucciones de tipo “Diaphragms” a los entrepisos y azotea con el objetivo de tomar en cuenta el comportamiento de diafragma rígido, asegurando una unión monolítica entre losas, columnas y vigas. Además, se consideraron los efectos de segundo orden P-Delta. Para la representación de los muros se utilizaron elementos de tipo “Wall” a los que se les asignó la instrucción “Pier”, ya que mediante la misma se puede determinar la cantidad de acero que requiere el elemento, así como también, permite hacer una revisión global de su análisis.

Como se puede observar en la figura 2 se generaron múltiples modelos donde se realizaron variaciones de dimensión y posición de los elementos de rigidez lateral, tanto para el caso de muros de concreto como para el caso de contravientos concéntricos, también en la figura 2 se puede observar la geometría de las diferentes plantas, con alturas de entrepiso constantes de 3.5m. Dentro de los modelos se realizó la correspondiente asignación de cargas y materiales a los elementos estructurales cuyas características mecánicas para los casos del concreto reforzado, acero de refuerzo y acero estructural son las mostradas en la tabla 1.

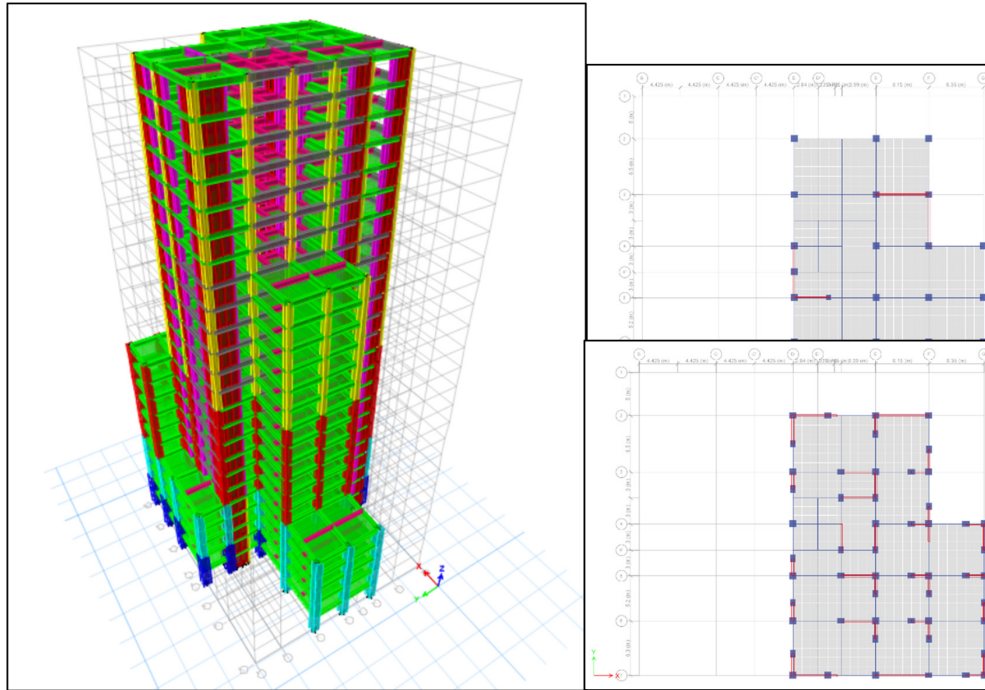


Figura 2. Modelo en ETABS y disposición de elementos laterales

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero Gr. 50.

Propiedad	Valor
Peso específico ( $\gamma_c$ )	7850 kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidad ( $E_c$ )	2038901.92 kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo de fluencia ( $f_y$ )	3515 kg/cm <sup>2</sup>
Esfuerzo de ruptura ( $f_u$ )	4920 kg/cm <sup>2</sup>

Tabla 2. Combinaciones para el análisis y diseño de las estructuras.

Estados límite de resistencia	
Clave	Combinación
C1	1.4CM
C2	1.3CD + 1.5CV
C3	1.1CM + 1.1CVR + 1.1Sx + 0.33Sy
C4	1.1CM + 1.1CVR + 0.33Sx + 1.1Sy
C5	1.1CM + 1.1CVR - 1.1Sx - 0.33Sy
C6	1.1CM + 1.1CVR - 0.33Sx - 1.1Sy
C7	1.1CM + 1.1CVR + 1.1Sx - 0.33Sy
C8	1.1CM + 1.1CVR + 0.33Sx - 1.1Sy
C9	1.1CM + 1.1CVR - 1.1Sx + 0.33Sy
C10	1.1CM + 1.1CVR - 0.33Sx + 1.1Sy
C11	1.1CM + 1.1CVR + 1.1Wx
C12	1.1CM + 1.1CVR + 1.1Wy
C13	1.1CM + 1.1CVR + 1.1WxN
C14	1.1CM + 1.1CVR + 1.1WyN
Estado límite de servicio	
Clave	Combinación
S1	CM + CV

## 2.7 Carga de sismo

El programa ETABS permite realizar el método modal espectral utilizando un espectro de diseño modificado, el cual ha sido construido a través del Programa de Diseño Sísmico (PRODISIS) para la zona de estudio, suponiendo un suelo tipo 1.

El espectro de respuesta fue afectado por los factores de comportamiento ( $Q$ ), de sobrerresistencia ( $R_o$ ), de redundancia ( $p$ ) y de regularidad ( $\alpha$ ). Tales factores se pueden localizar en la sección 3.3.1 del MDOC-DS[22].

La figura 3, muestra el espectro de diseño modificado para una estructura fuertemente irregular y de una regular, de forma en que se logren apreciar los incrementos en las aceleraciones. (aquí incluye en porcentaje el incremento que se obtiene al utilizar el espectro irregular).

## 2.8 Optimización de los sistemas estructurales

Previo a realizar el diseño, se identifica la necesidad de evaluar el comportamiento para alternativas con distinta distribución y ubicaciones de los contra-

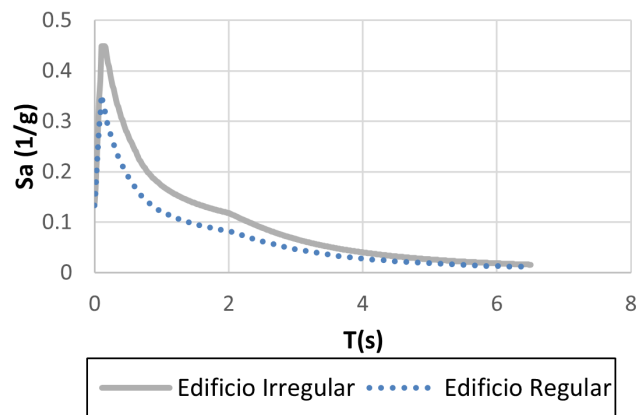


Figura 3. Espectros de Diseño Modificado

vientos, así como una continua reducción de estos a través de un proceso iterativo. Dicho proceso se lleva a cabo mediante una comparación de los casos en función de variables tanto económicas como estructurales. Los parámetros principales para esta etapa son el peso propio de los elementos de la edificación y las derivas o distorsiones de entrepiso. Estas variables fueron seleccionadas debido a que, por un lado, el peso representa el volumen del material principal de la edificación y, por consiguiente, es una forma de evaluar de manera indirecta el costo del edificio. Por otro lado, las distorsiones representan la capacidad que tiene la edificación para resistir las distintas solicitaciones; en otras palabras, para determinar si se encuentra dentro de los límites establecidos para la prevención del colapso. Aunque existen muchas más variables que se pueden integrar al análisis, para mantener el proceso simple es recomendable utilizar solo dos parámetros.

De esta manera, se desarrolla un proceso iterativo que parte de la variación de un valor, en este caso el peso, y fija como objetivo otro valor: el estado límite de colapso por distorsiones.

## 2.9 Evaluación de costos

En la etapa de evaluación de costos solo se consideran las alternativas de mejor comportamiento, donde se realiza una cuantificación de costos y precios unitarios a nivel de costo directo de obra, incluyendo materiales, mano de obra, desperdicios y todo lo necesario para su ejecución.

## 2.10 Comparativo de los casos diseñados

Se comparan los resultados económicos y de comportamiento de los sistemas seleccionados en las etapas previas, se evalúa que alternativa destaca en cada uno de los aspectos importantes en consideración.

### 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Se realizó el análisis de múltiples estructuraciones alternado la ubicación de los elementos diagonales. Como se observa en la Tabla 3, a cada modelo se le asignó una clave, cuyo primer término hace referencia a la distribución de los elementos (A, B, C, D y F), como se aprecia en la figura 4, el segundo al material acero (A), y el tercero en referencia las variaciones presentes en los contravientos, donde en “01” se implementan diagonales HSS8X5/8”, en “02” diagonales W10X68, ambas de tipo V invertida, y “03” con HSS8X5/8” de tipo X.

En una segunda ronda de análisis se tomaron solo los modelos con distribución C y D de contravientos,

donde se realizaron modificaciones en las dimensiones de columnas y vigas para 01-03, renombrando los casos con clave numérica de 04-06.

Según los resultados de la Tabla 3, se observa que, para el presente edificio, los sistemas con disposición en X tienden a tener un periodo de vibración más alto y una distorsión máxima de entrepiso mayor, además de ser los de mayor peso. En contraste, los modelos con disposición en V invertida muestran variaciones mínimas, incluso utilizando distintas secciones, y obtienen valores muy similares tanto en periodo como en distorsión. Destacan especialmente los siguientes modelos por su combinación de peso propio moderado y distorsión mínima de entrepiso: Modelo CA04, Modelo CA05, Modelo DA04

*Tabla 3. Resultados del Análisis – Caso Acero*

Modelo	Tipo	Periodo de vibrar para el primer modo (s)	Distorsión máxima	Peso propio (ton)
AA01	V invertida	2.379	0.0651	8426.5
BA01	V invertida	2.357	0.0257	8421.24
BA02	V invertida	2.328	0.0259	8434.44
BA03	X	2.414	0.0246	8468.6
CA01	V invertida	2.041	0.0225	8503.69
CA02	V invertida	2.009	0.0222	8529.93
CA03	X	2.103	0.0229	8596.61
CA04	V invertida	1.545	0.0150	9973.15
CA05	V invertida	1.541	0.0150	9983.14
CA06	X	1.595	0.0155	10145.2
DA01	V invertida	1.933	0.0207	8547.31
DA02	V invertida	1.913	0.0205	8580.44
DA03	X	1.941	0.0209	8666.4
DA04	V invertida	1.561	0.0145	9681.1
DA05	V invertida	1.568	0.0151	9659.83
DA06	X	1.567	0.0157	10148.8
EA01	V invertida	2.037	0.0222	8542.95
EA02	V invertida	2.009	0.0219	8575.39
EA03	X	2.097	0.0226	8655.82
FA01	V invertida	1.955	0.0219	8585.87
FA02	V invertida	1.913	0.0217	8625.11
FA03	X	2.026	0.0221	8725.0

Estos modelos presentan una distorsión máxima de entrepiso relativamente baja, mientras que el peso propio es significativamente menor en comparación con otros modelos de la tabla. La selección final dependerá de consideraciones adicionales como el presupuesto disponible y otros requisitos específicos del proyecto.

En la figura 5 se presenta un gráfico que ilustra los resultados de cada uno de los modelos analizados en términos de peso propio de la estructura y distorsión de entrepiso. En este gráfico se observa claramente que algunos modelos exhiben un mejor comportamiento en cuanto a la relación peso-distorsión. En particular, se destaca que los modelos con configuración de tipo V invertida muestran una tendencia favorable en

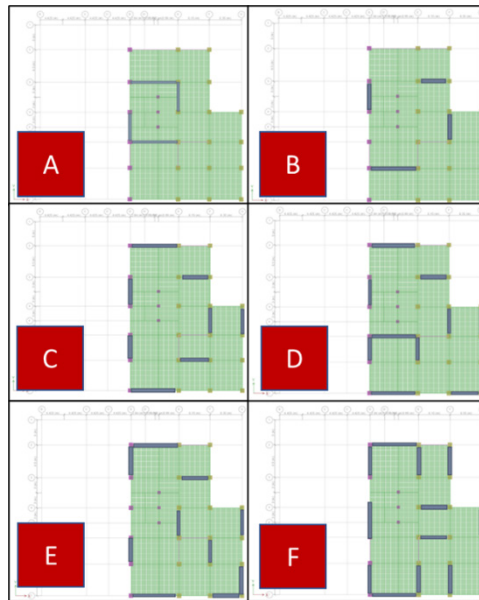


Figura 4. Modelos analizados de concreto reforzado

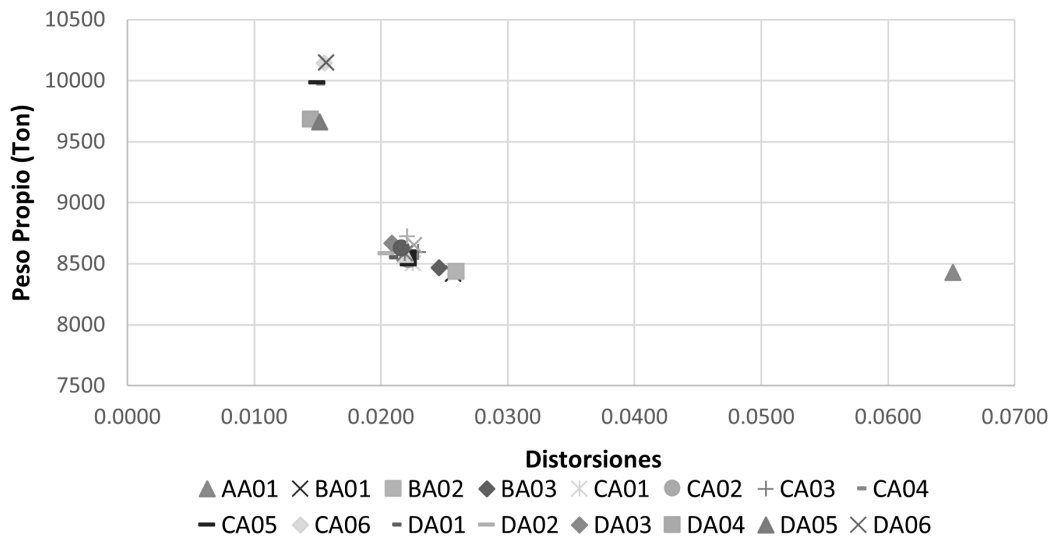


Figura 5. Peso Propio Vs Distorsiones – Caso Acero

cuanto a menor distorsión con respecto a su peso. Por otro lado, el modelo de configuración tipo A muestra el peor desempeño en comparación con los demás. Además, se observa que los modelos de las distribuciones B y C muestran un comportamiento ligeramente inferior en términos de distorsión en comparación con la alternativa D, a pesar de tener un peso mayor.

En un problema de optimización de más de una variable es necesario establecer algún criterio de selección de los mejores candidatos es por eso que en los siguientes párrafos se desarrolla un comparativo de la configuración de acero estructural que presentó mejores resultados (distribución D), contra otra de las alternativas presentadas (distribución C).

### 3.1 Diseño estructural – Caso CA06

A continuación, se desglosa el diseño de los elementos estructurales que conforman a la edificación del sistema estructural en acero con distribución de diagonales C. Las secciones finales, son resultado de un proceso iterativo mediante el software.

Se realiza la revisión de la eficiencia de los elementos. La Figura 6 representa la relación que existe entre las cargas actuantes sobre las cargas de diseño, en otras palabras, el porcentaje de eficiencia de los elementos. De esta manera se puede apreciar el comportamiento de vigas, columnas y contravientos, e identificar cual grupo de elementos cuenta con un sobre diseño, cual necesita un aumento de sección y cuáles podrían ser optimizados. Como se puede observar en la figura 6, los contravientos resultan ser los elementos más débiles debido a su porcentaje de eficiencia

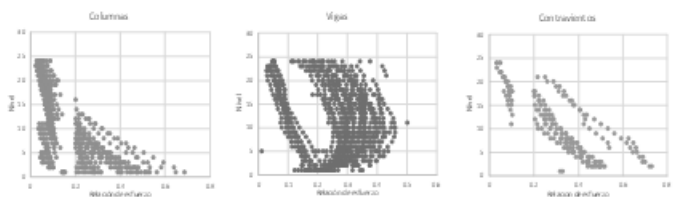


Figura 6. Relaciones de esfuerzo del modelo C.

mayor, esto es congruente con el criterio de diseño de los mismo, columna fuerte viga débil y contraviento más débil.

Así también, se tiene la información que permite identificar un 90% de participación de masa para el octavo modo de vibrar. Por otro lado, se establece un valor de distorsión máxima de 0.015 para una elevación de 46.5 metros de altura.

### 3.2 Diseño estructural – Caso DA06

De igual forma que en el caso anterior se realizó el diseño de los elementos mediante un proceso iterativo utilizando software. En la figura 7 se desglosa el comportamiento de los elementos estructurales estableciendo una relación de esfuerzos

Porcentaje de participación de masas: 90% alcanzado en el modo 8.

Distorsión máxima a una altura de 36 metros (décimo nivel) igual a 0.0145. Para este caso también se observa que el criterio de diseño es adecuado siendo los contravientos los elementos más débiles de la edificación.

### 3.3 Comparativo económico

Los costos calculados en esta sección son representativos y no reflejan valores detallados para ser utilizados como base para una presupuestación real. Sin embargo, los resultados pueden utilizarse como un referente aproximado, útil para crear una comparativa e identificar la superioridad de una estructura con respecto a otra.

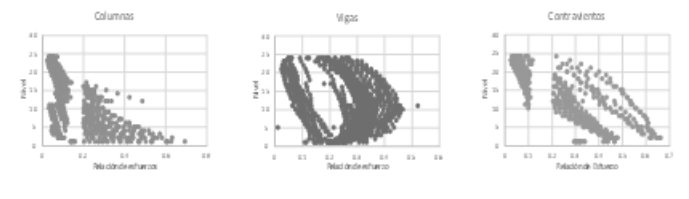


Figura 7. Relaciones de Esfuerzos del modelo D.



Se desarrolla el concepto para el habilitado y colocación de los elementos de acero estructural (ver Tabla 4), donde se desglosan los costos unitarios que contemplan el costo del material, el anticorrosivo, soldadura, mano de obra y maquinaria.

En la Tabla 5, se muestra un cuadro comparativo donde se desarrollan los costos directos de construcción correspondiente a cada uno de los elementos principales del sistema, vigas, columnas y contravientos.

La cuarta columna de la tabla, con título “Comparativo”, refleja la diferencia que existe entre los costos de un sistema respecto al otro. Significa que los gastos para columna del modelo C son superiores en 1.83 veces a los del modelo D, el costo de las vigas es superior en 1.11 veces y por último el costo de los elementos diagonales es menor por 0.79 veces. Finalmente, la estructuración del modelo C cuenta con un costo superior al modelo D, en por lo menos un 59%.

Tabla 4. Análisis de precios unitarios

<b>Concepto: Estructura metálica con acero estructural A50. Incluye: materiales, mano de obra, herramienta, equipo y todo lo necesario para su correcta ejecución.</b>				<b>Unidad Kg</b>
<b>Material/Mano de obra/Equipo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Unidad</b>	<b>Costo</b>	<b>Importe</b>
Perfil estructural A50	1.05	Kg	\$25.00	\$26.25
Anticorrosivo primario-oxido	0.0009	cb	\$950.56	\$0.86
Soldadura E70 para perfiles estructurales	0.03	kg	\$30.33	\$0.91
Cuad. Soldador: 1 soldador y 1 ayudante	0.00102	jor	\$1,101.76	\$1.12
Cuad. Metálica: 1 Est. Metálico y 1 ayudante	0.0075	jor	\$1,101.76	\$8.26
Soldadora 300 Amp	0.004	hr	\$109.77	\$0.44
Grúa convertible	0.0035	hr	\$1,755.00	\$6.14
				\$43.98

Tabla 5. Comparativo económico

<b>Elementos</b>	<b>Modelo C Costo total</b>	<b>Modelo D Costo total</b>	<b>Comparativo (C/D)</b>
<i>Columna</i>	\$287,702,295.80	\$157,114,835.15	<b>1.83</b>
<i>Viga</i>	\$60,052,618.02	\$54,328,781.09	<b>1.11</b>
<i>Contraviento</i>	\$10,947,634.18	\$13,824,899.07	<b>0.79</b>
<b>Total =</b>	<b>\$358,702,548.00</b>	<b>\$225,268,515.31</b>	<b>1.59</b>

### 3.4 Comparativo del desempeño estructural

Con este apartado se busca identificar las variaciones que presentaron los modelos estructurales en sus resultados de uno de los modelos respecto a otro. Por lo tanto, los parámetros estructurales son: distorsiones de entrepiso, periodos de vibración, posición de centro de masa y fuerzas cortantes.

Periodos y modos de vibración. En la Figura 8 se presenta un gráfico comparativo de los periodos (en segundos) de la estructura contra su respectivo modo de vibración.

Se identifica que ambos modelos poseen un comportamiento similar, al mantener una misma tendencia. A pesar de ello, el modelo tipo C, mantiene periodos de vibración ligeramente mayores en todos los modos, y como se observa, mucho más notable en el primero.

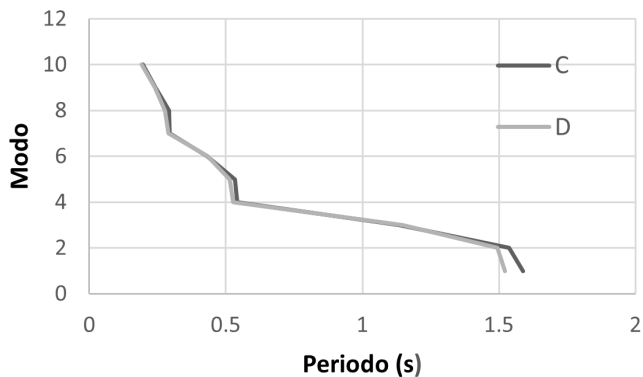


Figura 8. Modo vs Periodo de vibración de las estructuras

Distorsiones de entrepiso. En las figuras 9 y 10 se muestra el comportamiento por distorsiones de las estructuraciones para los casos C y D sobre los ejes X y Y respectivamente.

Las distorsiones máximas de entrepiso que se presentan en dirección X son similares para ambos casos, sin embargo, se identifica máximo de distorsiones en niveles superiores para el caso D y en niveles medios o inferiores para el caso C.

Por otro lado, el comportamiento en dirección Y es practicante idéntico, con pocas diferencias apreciables.

Centros de Masa y Rigidez. Las figuras 11 y 12 representan la posición de los centros de masa (CM) y centros de rigidez (CR), vistos a nivel de planta para los modelos C y D respectivamente. La forma de leer

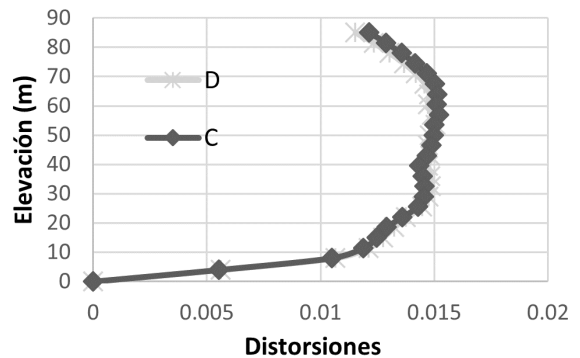


Figura 10. Distorsiones en dirección Y

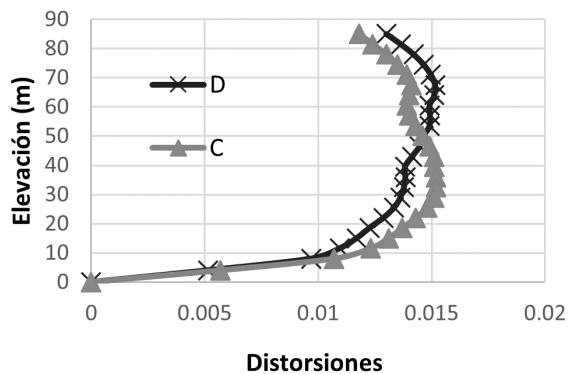


Figura 9. Distorsiones en dirección X

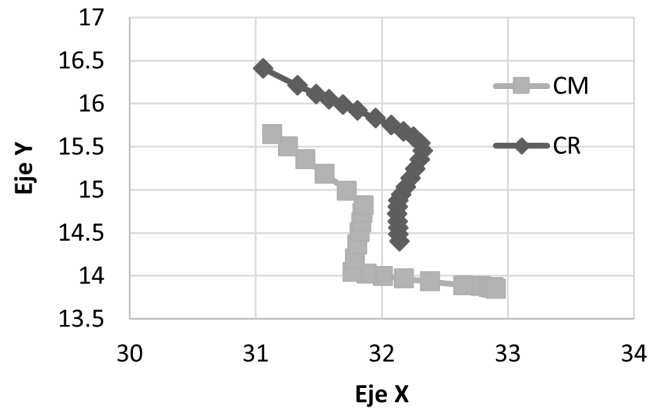


Figura 11. Posiciones de centro de masa y rigidez vista en planta - Modelo C

el gráfico, es de izquierda a derecha, donde los puntos de la izquierda representan las coordenadas en los niveles inferiores y a su derecha los superiores consiguientes.

Para ambos casos se observa un comportamiento similar en los centros de masa, sin embargo, los centros de rigidez varían de un caso a otro, mostrando una mayor coincidencia con respecto a los niveles inferiores en el caso D por sobre C. Tal aspecto se aprecia de mejor forma en las figuras 13 y 14, las cuales representan en elevación las diferencias entre los centros de masa y rigidez para las coordenadas X y coordenadas Y, medida en metros, donde la cercanía de las curvas

a cero representa una coincidencia entre los puntos CM y CR.

La alineación entre el centro de masa y el centro de rigidez es fundamental en el diseño de edificios, especialmente aquellos con alta irregularidad. Garantizar esta coincidencia mejora la distribución de cargas, reduce la torsión y los desplazamientos laterales, y optimiza el uso de materiales, lo cual en conjunto contribuye a una mayor seguridad y desempeño estructural durante eventos sísmicos. Las observaciones realizadas en los casos C y D, junto con las representaciones gráficas en las figuras 13 y 14, destacan la importancia de esta alineación para evaluar y mejorar el comportamiento estructural de edificios irregulares.

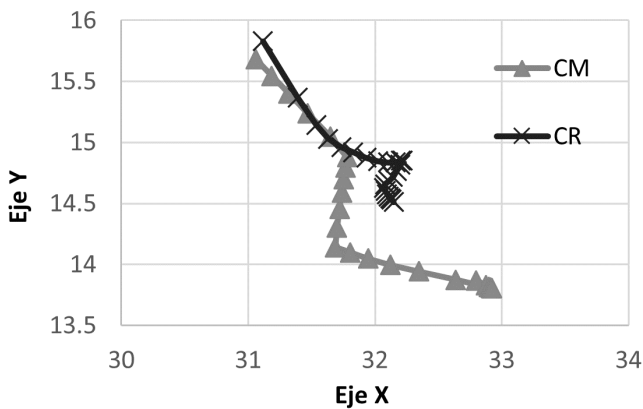


Figura 12. Posiciones de centro de masa y rigidez vista en planta - Modelo D.

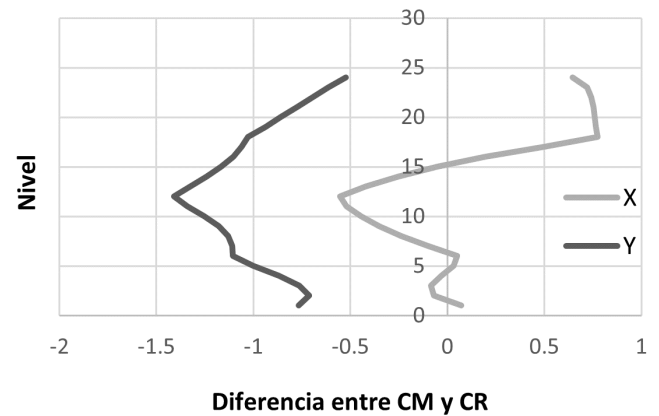


Figura 14. Diferencias entre CM y CR en elevación - Modelo D.

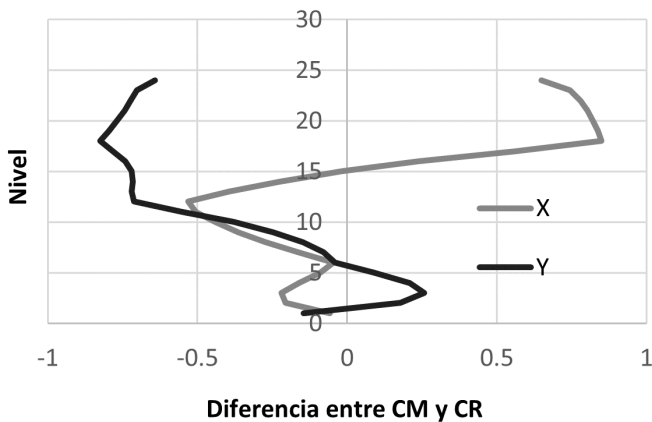


Figura 13. Diferencias entre centro de masa (CM) y centro de rigidez (CR) en elevación - Modelo C.

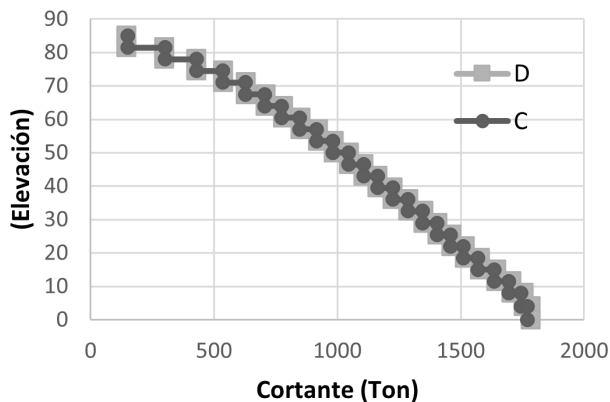


Figura 15. Cortantes de entrecapota para un sismo en el eje X.

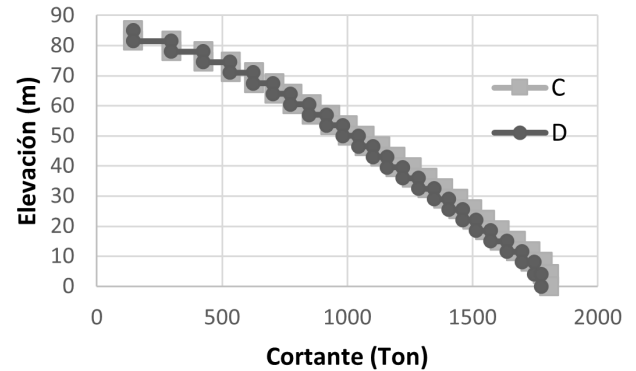


Figura 16. Cortante de entrecapota para un sismo en el eje Y

Cortante de entrecapota. En el análisis de los modelos estructurales, se ha revisado la fuerza cortante de entrecapota, revelando que, aunque los modelos pueden experimentar fuerzas cortantes similares, las formas de deformación y los niveles de desempeño en términos de distorsión pueden ser significativamente diferentes.

Las Figuras 15 y 16 ilustran los comportamientos de las estructuras respecto a las fuerzas cortantes de entrecapota en las direcciones X y Y, respectivamente. Estos gráficos muestran que, a pesar de la similitud en las fuerzas cortantes aplicadas, las respuestas estructurales varían considerablemente. Este fenómeno se debe a diferencias en la distribución de rigidez de cada modelo. Las diferencias en la forma y la rigidez de los modelos resultan en respuestas distintas en términos de distorsión, subrayando la importancia de un enfoque integral en el diseño y análisis estructural para asegurar un desempeño óptimo y seguro.

#### 4 CONCLUSIONES

En este artículo se desarrolla un estudio para comparar diferentes sistemas estructurales en el diseño de un edificio con gran irregularidad ubicado en una zona de gran sismicidad. Se compara el comportamiento y costo directo para distintas disposiciones elementos de arriostramiento lateral en forma de contraventeo concéntrico, analizando contravientos en V invertida y en X, para posiciones distintas dentro de los marcos estructurales, además considerando una variación

entre secciones de tipo “cajón” y perfiles sección “W o IPR”. De manera general, el sistema estructural de acero mostró resultados favorables. Por un lado, se determinó que la elección entre secciones tipo “Cajón” o “W” depende del costo y facilidad de adquisición de los elementos. Así también, se identificó que los elementos cumplen con los criterios de resistencia bajo cargas de diseño, pero sus dimensiones se ven afectadas por las distorsiones generadas por el sismo, esto quiere decir que para resistir los efectos de distorsión generados por el sismo se produce un aumento del 15% en el peso de la estructura. Además, se determinó que el uso de contravientos de tipo X es desfavorable, siendo más eficiente utilizar contravientos concéntricos en V invertida. Dentro del comparativo final, la configuración D del “Caso acero” mostró ventajas en comparación con la configuración C. Por lo tanto, para equilibrar el comportamiento de las estructuraciones C y D, fue necesario aumentar la sección de las columnas de C, lo cual incrementó el costo de la estructura. Debido a ello, la alternativa D presentó una distorsión máxima un 7% menor que la configuración C y un peso 30% menor. Finalmente, la estructuración C resulta casi 1.6 veces más costosa que la estructuración D, lo que destaca la importancia de una disposición adecuada de los elementos.

Los resultados subrayan la importancia de que los centros de masa y rigidez estén lo más cercanos posible entre sí. Esto se debe a que edificios con periodos estructurales y pesos similares pueden experimentar comportamientos muy diferentes en términos de dis-

torsiones de entrepiso. La atención a este detalle en el diseño puede marcar una diferencia significativa en la seguridad y eficacia de los edificios, particularmente aquellos con alta irregularidad desplantados en zonas de alta sismicidad.

#### 4.1 Recomendaciones

1.- Es crucial monitorear los centros de masa y rigidez en proyectos arquitectónicos con irregularidades tanto en planta como en elevación. Este monitoreo reduce la posibilidad de torsión por cargas laterales y facilita la colocación de elementos para aumentar la rigidez lateral, mejorando así la estabilidad estructural.

2.- Para estructuras con claros cercanos a 10 metros, se recomienda el uso de contravientos de tipo V invertida en lugar de tipo X. Este tipo de contraviento ofrece ventajas en términos de distribución de cargas y comportamiento estructural en claros largos, asegurando una respuesta más eficiente ante cargas laterales.

3.- Es esencial realizar un análisis detallado de la relación de esfuerzos para identificar la eficiencia de los elementos estructurales. Este análisis permite optimizar los grupos de secciones que puedan ser mejorados, garantizando un uso eficiente de los materiales y un mejor desempeño estructural.

4.- En el dimensionamiento de los elementos, se sugiere aumentar la sección de vigas y contravientos siguiendo la filosofía de "Columna Fuerte - Viga Débil - Contraviento más Débil". Las columnas representan el mayor costo dentro del sistema estructural y los perfiles en vigas y contravientos contribuyen significativamente al comportamiento ante distorsiones. Esta estrategia mejora la seguridad estructural al distribuir mejor las cargas y las deformaciones.

5.- Por último, se recomienda utilizar sistemas estructurales compuestos por elementos de acero estructural en edificaciones irregulares ubicadas en zonas de alta sismicidad. Los elementos de acero ofrecen flexibilidad y resistencia, mejorando la capacidad de la estructura para absorber y disipar energía sísmica, lo que resulta en una solución tanto económica como efectiva.

#### AGRADECIMIENTOS

La elaboración del presente trabajo se desarrolló gracias al apoyo brindado por el Consejo Nacional

de Humanidades Ciencia y Tecnología (CONAHCyT) durante el transcurso de los estudios de Posgrado del segundo autor. El primer autor agradece el apoyo brindado bajo el proyecto Ciencia Básica 287103.

#### REFERENCIAS

[1] Franco, S., Iglesias, A., & Fukuyama, E. (2020). Moment Tensor Catalog for Mexican Earthquakes: Almost Two Decades of Seismicity. *Geofísica Internacional*, 59, 54-80. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2020.59.2.2081>.

[2] Ali, J., Qadir Bhatti, A., Khalid, M., Waheed, J., & Zuberi, S. (2015). A comparative Study to Analyze the Effectiveness of Shear Walls in Controlling Lateral Drift for Medium to High Rise Structures (10-25 Storeys). 2015 2nd International Conference on Geological and Civil Engineering, IPCBEE, 80, 31-36. <https://doi.org/10.7763/IPCBEE>.

[3] Alashkar, Y., Nazar, S., & Ahmed, M. (2015). A Comparative Study of Seismic Strengthening of RC Buildings by Steel Bracings and Concrete Shear walls. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 2(2), 24-34.

[4] Tena Colunga, A. (2010). Irregularidad Estructural y su Efecto en la Respuesta Sísmica de Edificios. *Memorias V Congreso Iberoamericano de Ingeniería Civil en honor del Dr. José Grases, Mérida, Venezuela*, 1-57.

[5] R. C. M., Narayan, K. S., B. V., S., & Reddy, D. V. (2012). Effect of Irregular Configurations on Seismic Vulnerability of RC Buildings. *Architecture Research*, 2(3), 20-26. <https://doi.org/10.5923/j.arch.20120203.01>.

[6] Deshpande, A. A., Shinde, S. B., & Dumne, S. M. (2016). Comparative study on seismic response of vertically irregular RC buildings. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13(04), 33-37. <https://doi.org/10.9790/1684-1304043337>.

[7] Gallegos, M. F., Araya-Letelier, G., Lopez-Garcia, D., & Parra, P. F. (2023). Seismic collapse performance of high-rise RC dual system buildings in subduction zones. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e02042. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02042>.

[8] Velarde Cruz, F. de J., Bojorquez Mora, J., & Bojorquez Mora, E. (2022). Structural reliability of reinforced concrete buildings and dual system. *Ingeniería Sísmica*, 107, 74-90. <https://doi.org/10.18867/ris.107.626>.

[9] Mibang, D., & Choudhury, S. (2021). Unified Performance-Based Design of RC Dual system. National Institute of Technology Silchar. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-566220/v1>.

[10] Zhang, L., Wang, C., Chen, C., & Cui, M. (2024). Seismic Performance Assessment of Composite Frame-High-Strength Steel Plate Wall Core Tube Resilient Structural System. *Buildings*, 14(1), 301. <https://doi.org/10.3390/buildings14010301>.

[11] Probabilistic Modeling of Seismic Risk Based Design for a Dual System Structure. (2017). *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 49(2), 179-192. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2017.49.2.2>.

[12] Al Agha, W., & Umamaheswari, N. (2021). Analytical study of irregular reinforced concrete building with shear wall and dual Framed-Shear wall system by using Equivalent Static and Response Spectrum Method. *Materials Today: Proceedings*, 43(Part 2), 2232-2241. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.525>.

[13] Rathnasiri, S. C., Jayasinghe, J. A. S. C., & Bandara, C. S. (2024). Development of simplified method based on degree of irregularity to identify the seismic vulnerability of plan irregular reinforced concrete buildings. *ICE Proceedings Structures and Buildings*. <https://doi.org/10.1680/jstbu.23.00123>.

[14] Samanta, M. (2024). Investigation on Influence of Pile Foundation on Seismic Response of Irregular Building Considering Soil-Structure Interaction. In *Proceedings of the Indian Geotechnical Conference 2022, Geotechnics: Learning, Evaluation, Analysis and Practice (GEOLEAP)*. Lecture Notes in Civil Engineering, Springer. [https://doi.org/10.1007/978-981-97-1737-8\\_11](https://doi.org/10.1007/978-981-97-1737-8_11).

[15] Borah, M., & Choudhury, S. (2023). Seismic Performance of Tall Buildings with Different Structural Systems. 90-107. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-05509-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-031-05509-6_8).

[16] Patel, J., & Patel, P. (2023). Site-Specific Response Spectrum Analysis of Various Wall-Frame Composite Tall Buildings. 167-181. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1608-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1608-5_13).

[17] Elhegazy, H., Ebid, A., AboulHaggag, S., Mahdi, I., & AbdelRashid, I. (2023). Cost optimization of multi-story steel buildings during the conceptual design stage. *Innovative Infrastructure Solutions*, 8(1), 36. <https://doi.org/10.1007/s41062-022-00999-2>.

[18] Varum, H., Melo, J., Furtado, A., & Lima, A. (2022). Irregularities in RC Buildings: Perspectives in Current Seismic Design Codes, Difficulties in Their Application and Further Research Needs. 1-18. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-83221-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-83221-6_1).

[19] Valenzuela Valdivieso, E. (2010). La construcción y evolución del espacio turístico de Acapulco (México) The construction and evolution of the tourist space of Acapulco (Mexico). 30, 163-190.

[20] Ramírez Guzmán, A. H., Talavera Mendoza, O., Díaz Villaseñor, E., & Ocampo Marín, L. F. (2016). Precursores de terremotos en las brechas sísmicas de Acapulco, Guerrero, México. *Tlamati*, 7(2), 55-59.

[21] Reglamento de Construcciones para el Municipio de Acapulco de Juárez, Guerrero. *Gaceta Municipal*, 2002.

[22] Comisión Federal de Electricidad (CFE). (2020). *Manual de Diseño de Obras Civiles: Diseño por Sismo*.

[23] *Gaceta Oficial de la Ciudad de México*. (2017). *Normas Técnicas Complementarias sobre Criterios y Acciones para el Diseño Estructural de las Edificaciones*.