

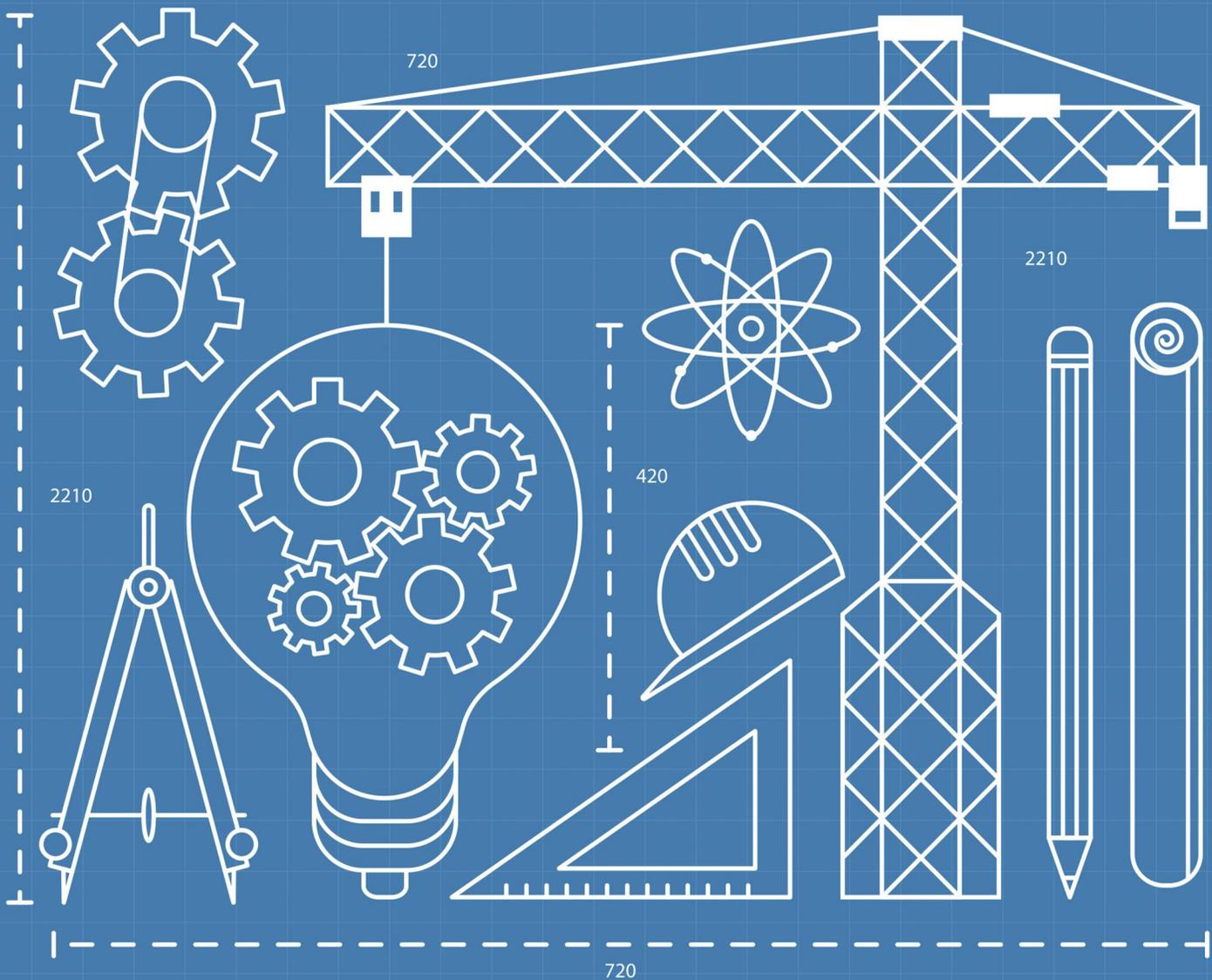
REVISTA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACAN

REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS

Enero-junio 2024 Número 6



U N I V E R S I D A D A U T Ó N O M A D E S I N A L O A



ENGINEERS

e-ISSN: 2683-2445



REVISTA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UAS

Órgano de difusión de la Facultad de Ingeniería, UAS

Dr. Robespierre Lizárraga Otero
Encargado del despacho de rectoría

Dr. Candelario Ortíz Bueno
Secretario General

M.C. Salvador Pérez Martínez

Dr. Mario Nieves Soto

Secretario de Administración y Finanzas

Director General de Investigación y Posgrado

M.I Guillermo Jesús Lazcano Beltrán
Presidente del Colegio de Ingeniería y
Tecnología

Dr. Carlos Ayala Barrón
Director de Editorial UAS

EDITOR

Dr. Edén Bojórquez Mora, Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Ingeniería, Facultad de Ingeniería Culiacán, Calzada de las Américas y Universitarios, s/n, Ciudad Universitaria, 80040 Culiacán Rosales, Sinaloa Culiacán Rosales, Sin., E-mail: eden@uas.edu.mx

Equipo Editorial

Lic. Karla Verónica López Ley, Coordinadora y Responsable de Maquetación.

MTE. Alan Gabriel Lazcano Beltrán, diseño y fotografía.

Comité Editorial

Dr. Edén Bojórquez Mora

Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Dr. Alfredo Reyes Salazar

Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Dr. Juan Bojórquez Mora

Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Dr. Eduardo René Fernández González

Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Dr. Fernando García Páez

Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Dr. Jorge Luis Almaral Sánchez

Universidad Autónoma de Sinaloa, México

Dr. Amador Terán Gilmore

Universidad Autónoma Metropolitana, México

Dr. Mauro Pompeyo Niño Lázaro

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Dr. Francisco L. Silva González

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Dr. Julián Carrillo

Universidad Militar de Nueva Granada, Colombia

Dra. Sonia Elda Ruiz Gómez

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Dr. Gustavo Palazzo

Universidad Tecnológica Nacional de Argentina, Argentina

Dr. Antonio Formisano

University of Naples Federico II, Napoli, Campania, Italia

Dr. Francisco López Almansa

Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España

Dr. Ivano Iovinella

University of Naples Federico II, Napoli, Campania, Italia

Dra. Yu Jiao

Tokyo Institute of Technology, Japón

Dr. Julián Londono

University of Exeter, Reino Unido

Perfil del Editor

Dr. Edén Bojórquez Mora

Profesor Investigador de Tiempo Completo Titular C de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa. Obtuvo el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa con mención honorífica. Posteriormente curso estudios de Maestría y Doctorado en Ingeniería en el Instituto de Ingeniería de la UNAM donde obtuvo el grado con mención honorífica. Cuenta con Posdoctorado por el Departamento de Ingeniería Estructural de la Universidad de Nápoles Federico II en Italia. Profesor-Investigador Repatriado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Sinaloa (2008-2009). Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores nivel 2, y miembro honorífico del Sistema Sinaloense de Científicos y Tecnólogos, así como del Cuerpo Académico Consolidado de Estructuras y Mecánica Básica.

El Dr. Bojórquez ha recibido numerosas distinciones como el PREMIO Nacional a la Mejor tesis de Doctorado (Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica, SMIS); Ingeniero Civil del Año por parte del Colegio de Ingenieros Civiles del Estado de Sinaloa; mejor artículo Científico de la Revista de Ingeniería Sísmica SMIS como autor único; VICEPRESIDENTE de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica; EDITOR de la Revista de Ingeniería Sísmica la más prestigiosa en su área escrita en español, Ingeniería y Tecnología UAS, EDITOR de Advances in Civil Engineering y Editor invitado



de revistas como Buildings, Shock and Vibration entre otras indizadas en JCR y SCOPUS. Líder en el ámbito de la Ingeniería Sísmica como lo demuestra la formación de varios Doctores en Ingeniería todos miembros del SNI y algunos de ellos líderes de Cuerpos Académicos (PRODEP-UAS). Ha formado a más de 100 estudiantes de verano científico y tesis de licenciatura, maestría y doctorado, donde ha obtenido PREMIOS por dirigir las mejores tesis de Licenciatura y Posgrado a nivel Nacional y Estatal. Cuenta con más de 300 artículos en congresos científicos y revistas indizadas JCR y CONACYT. Responsable de iniciar la Maestría y Doctorado en Ciencias de la Ingeniería en la Facultad de Ingeniería Culiacán UAS, donde ha sido Coordinador desde 2009 (programas del SNP del CONAHACYT). Actualmente, es MIEMBRO del Comité de Resiliencia de la Infraestructura del Colegio de Ingenieros Civiles de México y ha participado en más de 30 proyectos de investigación regionales, nacionales e internacionales en su mayoría como responsable. Es revisor de las revistas indizadas y congresos sobre estructuras, sismología, ingeniería sísmica e inteligencia artificial de mayor prestigio en el mundo. Ha

dado varias conferencias incluyendo magistrales en países como Emiratos Arabes Unidos, y es revisor de proyectos para asignar fondos a grupos de investigación por parte del Ministerio Italiano de Educación, así como del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías y de varias instituciones a nivel nacional e internacional.

Sus trabajos de investigación orientados principalmente a mitigar los efectos de los sismos sobre la infraestructura, lo han llevado a ser pionero en el desarrollo de medidas de intensidad sísmica a nivel mundial, siendo el único mexicano que ha propuesto una medida de intensidad sísmica generalizada. Entre sus aportaciones científicas destaca la creación de una nueva medida de intensidad sísmica (Intensidad IB) representativa del potencial destructivo de un terremoto, la cual está siendo reconocida por investigadores de las instituciones más prestigiadas a nivel mundial tales como las Universidades de Stanford en Estados Unidos, Imperial College de Londres, Bolonia, Pavía y Nápoles en Italia, Grenoble Francia, entre otras. Actualmente, el Dr. Bojórquez está trabajando en la generación de registros sísmicos, de viento, mapas de peligros y riesgos naturales, fragilidad y confiabilidad de estructuras, edificios con disipadores de energía, diseño sismo-resistente sustentable, diseño resiliente, efectos de réplicas, inteligencia artificial y otros temas encaminados a mejorar tanto los Reglamentos de Construcción del Mundo como el comportamiento estructural de las construcciones a nivel mundial sometidas a los efectos de fenómenos naturales.

Índice de contenido

6 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, Fernando Arias, Fernando Velarde, Henry Reyes¹, Amerika Sanchez¹, Melissa Rocha

20 Mortero polimérico elaborado con resina híbrida de poliéster insaturado (a partir de reciclaje de botellas de PET post-consumo) con nanoacoplante silano

Polymeric mortar made with unsaturated polyester hybrid resin (from post-consumer PET bottle recycling) with silane nanocoupling

A. Bórquez-Mendivil, J.A. Verdugo-Sánchez, A. Hurtado-Macías², J.E. Leal-Pérez, R.A. Vargas Ortíz, J. Flores-Valenzuela, F.G. Cabrera-Covarrubias, B.A. García-Grajeda, J.L. Almaral-Sánchez

33 Análisis de propiedades mecánicas e instrumentación de maquina universal para ensayo de materiales metálicos

Analysis of mechanical properties and instrumentation of a universal machine for testing metallic materials

Omar Payán-Serrano, Ismael Diaz-Peña, Brandon De La Cruz Nuñez, Fabrizio Llanes-López.

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 Bojorquez¹, Fernando Arias¹, Fernando Velarde¹, Henry Reyes¹, Amerika Sanchez¹, Melissa Rocha¹

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

¹ 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.

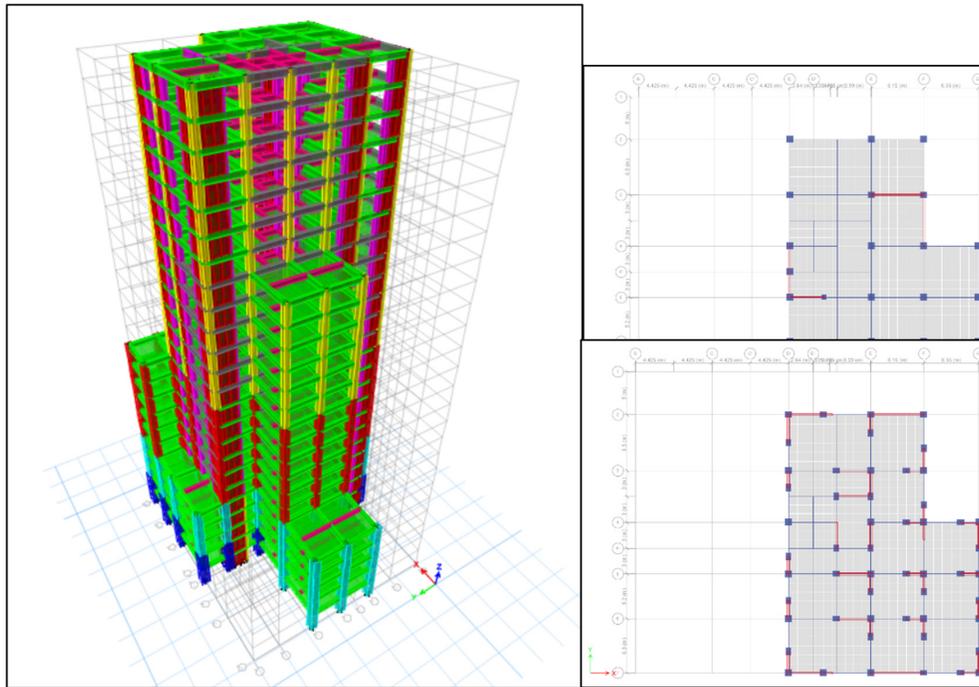


Figura 2. Modelo en ETABS y disposición de elementos laterales

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero Gr. 50.

Propiedad	Valor
Peso específico (γ_c)	7850 kg/m ³
Módulo de Elasticidad (E_c)	2038901.92 kg/cm ²
Esfuerzo de fluencia (f_y)	3515 kg/cm ²
Esfuerzo de ruptura (f_u)	4920 kg/cm ²

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 (α). 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-

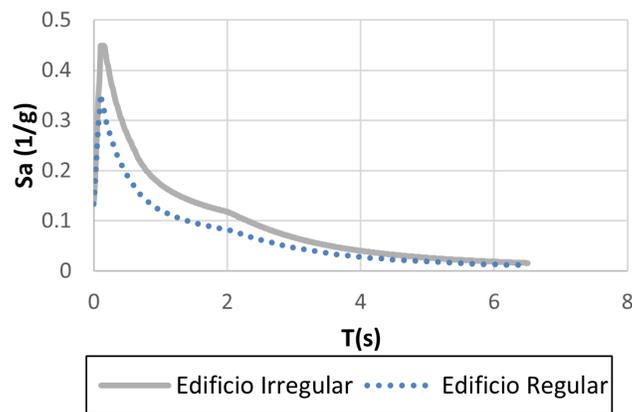


Figura 3. Espectros de Diseño Modificado

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

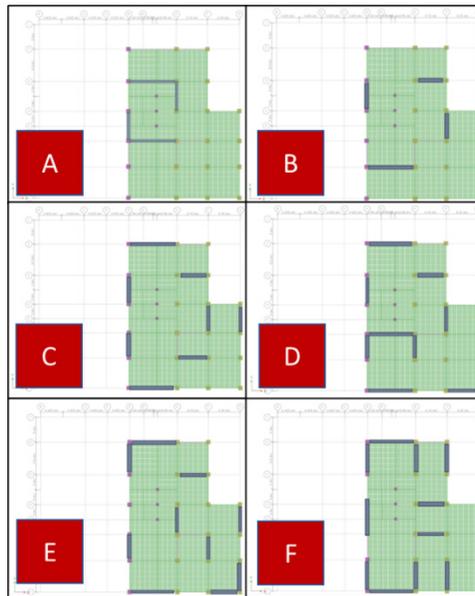


Figura 4. Modelos analizados de concreto reforzado

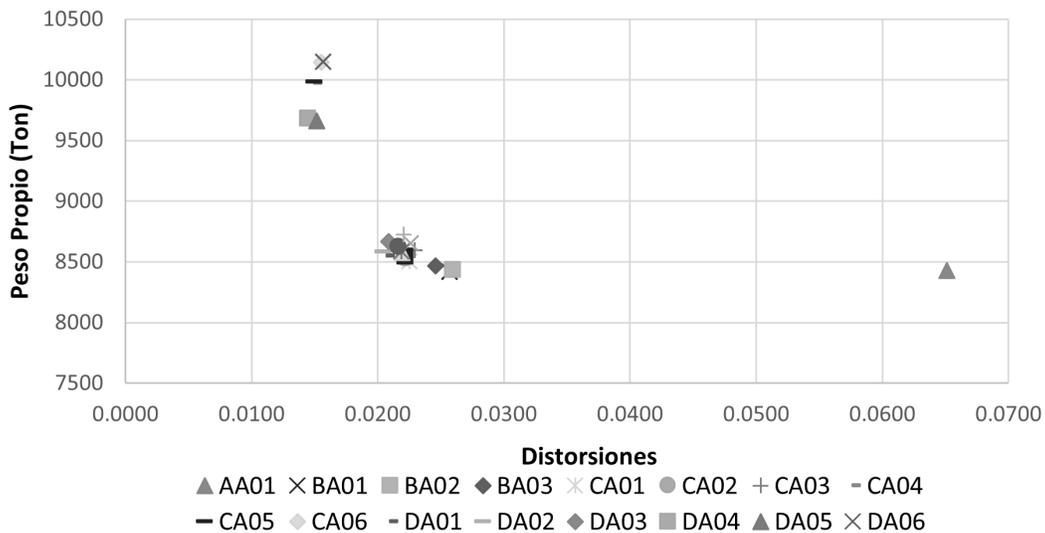


Figura 5. Peso Propio Vs Distorsiones – Caso Acero

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

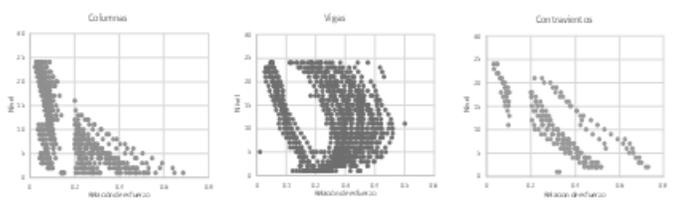


Figura 6. Relaciones de esfuerzo del modelo C.

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.

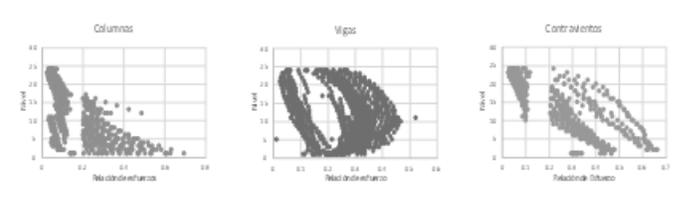


Figura 7. Relaciones de Esfuerzos del modelo D.

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

Concepto: Estructura metálica con acero estructural A50. Incluye: materiales, mano de obra, herramienta, equipo y todo lo necesario para su correcta ejecución.				Unidad Kg
Material/Mano de obra/Equipo	Cantidad	Unidad	Costo	Importe
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

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

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.

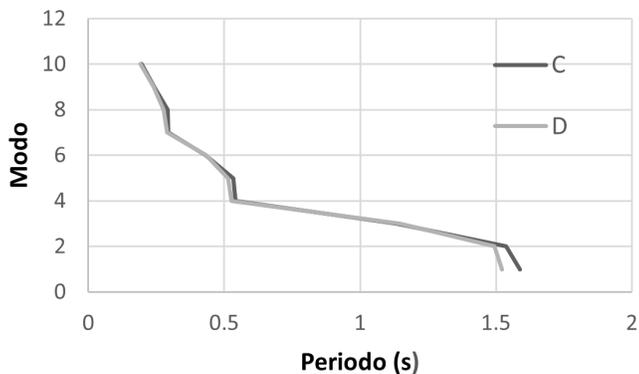


Figura 8. Modo vs Periodo de vibración de las estructuras

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

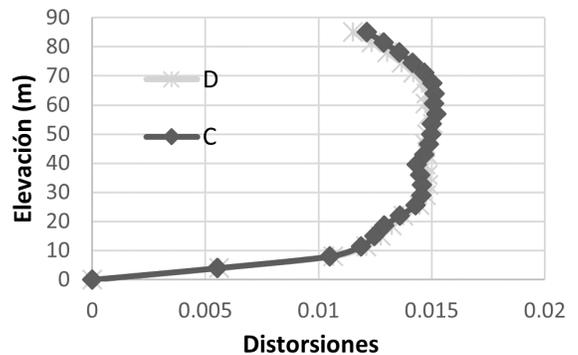


Figura 10. Distorsiones en dirección Y

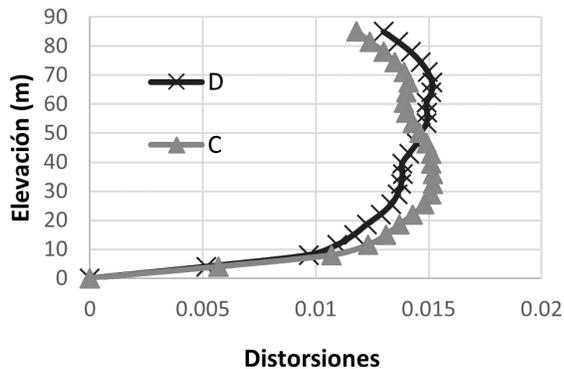


Figura 9. Distorsiones en dirección X

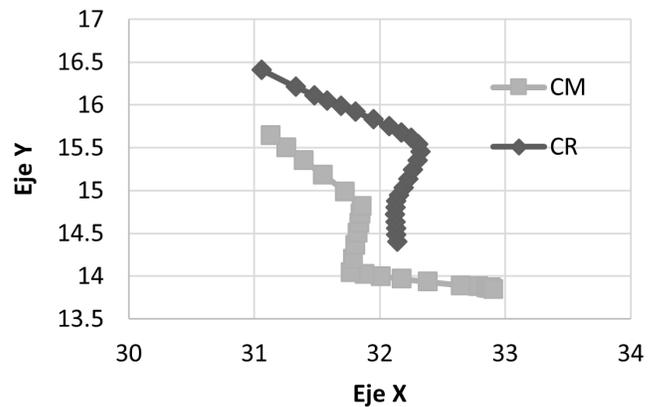


Figura 11. Posiciones de centro de masa y rigidez vista en planta - Modelo C

el grafico, 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.

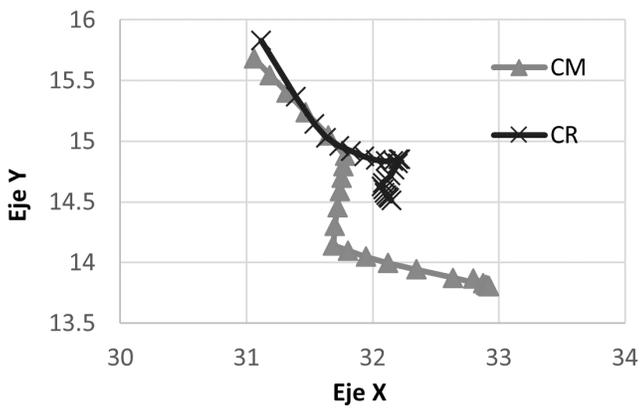


Figura 12. Posiciones de centro de masa y rigidez vista en planta - Modelo D.

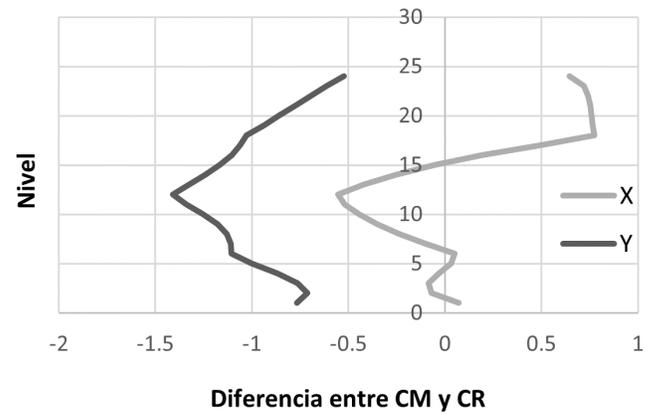


Figura 14. Diferencias entre CM y CR en elevación – Modelo D.

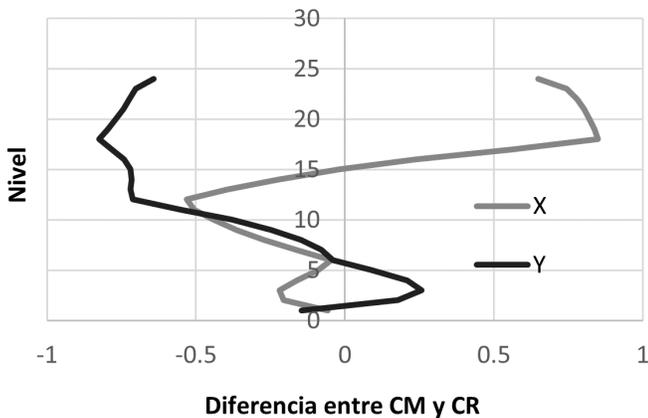


Figura 13. Diferencias entre centro de masa (CM) y centro de rigidez (CR) en elevación – Modelo C.

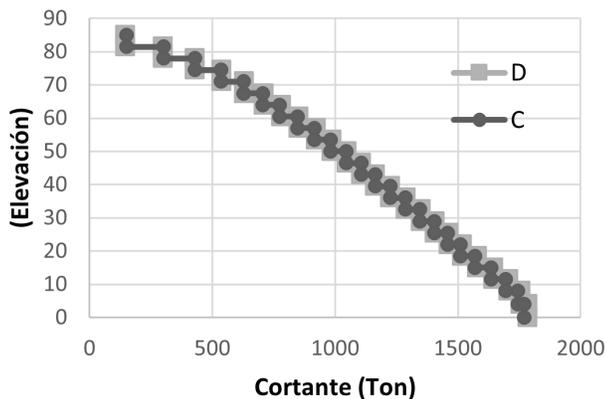


Figura 15. Cortantes de entrecapota para un sismo en el eje X.

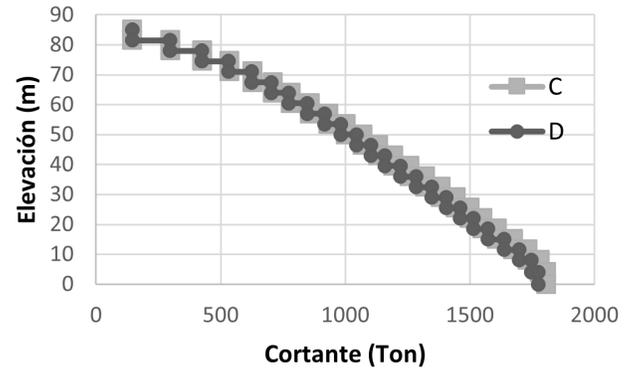


Figura 16. Cortante de entrecapota para un sismo en el eje Y

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.

[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.

[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.

[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.

[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*.

Efecto de algunas idealizaciones en la respuesta sísmica de edificios de acero

Effect of some idealizations on the seismic response of steel buildings

Mario D. Llanes Tizoc¹, Federico Valenzuela Beltrán¹, Victor E. Baca Machado¹, Juan D. Trasviña Soberanes², Edén Bojórquez¹, Juan Bojórquez¹ y Alfredo Reyes Salazar^{1*}

RESUMEN

Se calculan las respuestas sísmicas de varios modelos de marcos de acero resistentes a momentos (MARM) usando la matriz de masa concentrada (*MCC*) y se comparan con las obtenidas con la matriz de masa consistente (*MCS*). La precisión de representar la energía disipada en términos del Amortiguamiento de Rayleigh (*CR*) considerando los dos primeros modos laterales de vibrar también se evalúa. Asimismo, las respuestas se calculan considerando solo un elemento por viga y se comparan con las obtenidas al asumir dos y tres elementos. Se muestra que los cortantes de entrepiso y los momentos flexionantes en columnas se subestiman en promedio hasta en un 15% y 35%, respectivamente, al usar la matriz *MCC*. Las fuerzas de amortiguamiento de piso horizontales se subestiman hasta en un 350% si se utilizan los modos 1 y 2 en la construcción de la matriz *CR*. Los momentos flexionantes en columnas se subestiman hasta en un 15% si en el modelado estructural se usa solo un elemento por viga. Los resultados de este estudio indican que los errores introducidos en términos de desplazamientos son despreciables si se utiliza la matriz *MCC*, o un elemento por viga, pero se pueden introducir errores significativos en el diseño debido a la sobreestimación o subestimación de las fuerzas de diseño. Por ello, se recomienda utilizar la matriz *MCS* y dos elementos por viga en el modelado del sistema estructural estudiado. Asimismo, se recomienda utilizar el primer modo y uno superior en la derivación de la matriz *CR*.

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

Palabras Clave:

Edificios de acero, matriz de masas, respuesta sísmica.

Keywords:

Steel buildings, mass matrix, seismic response.

ABSTRACT

The seismic responses of several moment-resisting steel frame (MARM) models are calculated using the concentrated mass matrix (*MCC*) and compared with those obtained with the consistent mass matrix (*MCS*). The accuracy of representing the dissipated energy in terms of Rayleigh Damping (*CR*) considering the first two lateral modes of vibration is also evaluated. Similarly, the responses are calculated considering only one element per beam and are compared with those assuming two and three elements. It is shown that the story shears and bending moments in columns are underestimated on average by up to 15% and 35%, respectively, when using the *MCC* matrix. The story horizontal damping forces are underestimated by up to 350% if modes 1 and 2 are used in the construction of the *CR* matrix. Bending moments in columns are underestimated by up to 15% if only one element per beam is used in the structural modeling. The results of this study indicate that the errors introduced in terms of displacements are negligible if the *MCC* matrix, or one element per beam, is used, but significant errors can be introduced in the design due to overestimation or underestimation of the design forces. Therefore, it is strongly recommended to use the *MCS* matrix and two elements per beam in the modeling of the structural system studied. It is also recommended to use the first mode and one higher in the derivation of the *CR* matrix.

*Autor para correspondencia: Alfredo Reyes Salazar
Dirección de correo electrónico: reyes@uas.edu.mx

¹Profesor, Facultad de Ingeniería, Culiacán, Universidad Autónoma de Sinaloa

²Estudiante de doctorado

1. INTRODUCCIÓN

No hay duda de que el diseño apropiado de estructuras en regiones de alta sismicidad depende significativamente de procedimientos o métodos de análisis precisos y confiables para estimar las fuerzas a la que estarán sometidas después de su construcción. La precisión de dichos métodos depende a su vez en gran medida de un número significativo de parámetros aleatorios que pueden circunscribirse en dos grupos: (a) los asociados a las cargas sísmicas a las que estará sometida la estructura y (b) los asociados a la modelación de la estructura en sí.

En relación con el primer grupo, las cargas sísmicas usualmente se expresan en términos de espectros de diseño. Los métodos modernos para construir tales espectros se basan en un análisis probabilístico del peligro sísmico del sitio en que se desplantará la estructura. El nivel de actividad sísmica en todas las fallas que contribuyen al peligro sísmico de la región es un factor crucial que debe ser considerado. Específicamente los factores que deben tomarse en cuenta incluyen la magnitud de los terremotos, las distancias del sitio a las fallas, los mecanismos de las fallas, la geología de la trayectoria de las ondas sísmicas desde la fuente hasta el sitio y las condiciones locales del sitio.

En el segundo grupo se tiene que definir un número considerable de aspectos, comenzando con el sistema estructural más apropiado para soportar las cargas de la edificación y los materiales (acero, concreto...) que serán utilizados. Junto con ello se tendrá que definir el uso de vigas, columnas, losas (probablemente una combinación), elementos de contraventeo, conexiones, así como también el tipo de cimentación. En esta idealización deben considerarse todos los elementos que contribuyan significativamente a la respuesta estructural. Las propiedades elásticas e inelásticas de los materiales, así como también las propiedades geométricas de las secciones de los elementos, deben de especificarse.

Dentro de estas definiciones se dan una serie de idealizaciones asociadas al análisis sísmico de la estructura cuyo efecto muchas veces es ignorado y puede resultar en diseños no conservadores. Entre ellos podemos mencionar las formulaciones de las matrices de masa (M), amortiguamiento (C) y rigidez (K). El modelo de matriz de masa concentrada (MCC) generalmente se usa para la primera matriz, mientras que el modelo de amortiguamiento de Rayleigh (Cr) se

usa para la segunda. Además, en la formulación de dichas matrices, solo un elemento se usa para representar cada miembro estructural (viga o columna). Algunos aspectos relacionados con la precisión de estas prácticas asociados al comportamiento sísmico de uno de los sistemas estructurales más usados en edificios de acero, i.e. marcos resistentes a momento (MRM), constituye el principal objetivo de esta investigación.

2. REVISION DE LITERATURA Y OBJETIVOS

Un número considerable de proyectos de investigación han sido desarrollados con el objetivo de evaluar el efecto del modelado de las matrices M y C en la respuesta de estructuras. Entre los primeros se tiene el de Archer [1], quien estudió el efecto de una matriz de masa consistente para vigas. Rea et al. [2] estimaron el amortiguamiento existente en algunos prototipos especiales de marcos de acero consistentes en una plataforma sostenida por columnas. Wilson y Penzien [3] desarrollaron dos métodos para cuantificar numéricamente la matriz C . Crisp [4] realizó un análisis comparativo de diferentes modelos de amortiguamiento para cuantificar su efecto sobre la Respuesta sísmica inelástica de marcos de concreto reforzado. Stavrinidis et al. [5], utilizando el Método de Elemento Finito, propuso una versión mejorada de la matriz de masa consistente en términos de tiempo de cálculo para miembros unidimensionales (1D) y bidimensionales (2D). Léger y Dussault [6] estudiaron la influencia de la representación matemática del amortiguamiento viscoso en la disipación de energía para estructuras modeladas como sistemas de varios grados de libertad. Michaltsos y Konstantakopoulos [7], para el caso especial de una torre de paredes delgadas, consideraron el efecto de la inercia rotacional de los miembros estructurales agregando una masa concentrada adicional. Kowalsky y Dwairi [8] analizaron la precisión del uso del amortiguador viscoso equivalente mientras se utiliza en el diseño basado en desplazamiento directo. Archer y Whalen [9] presentaron un procedimiento para diagonalizar la matriz M considerando grados de libertad traslacionales y rotacionales. Val y Segal [10] calcularon las respuestas de estructuras modeladas como sistemas de un grado de libertad con amortiguamiento viscoso y las compararon con las de amortiguamiento histerético. Contribuciones importantes al estado del arte del tópico abordado también pueden encontrarse en muchas otras investigaciones [11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24].

Las investigaciones antes mencionadas representan sin duda un gran avance hacia la comprensión de los efectos de modelar las matrices M y C en la respuesta sísmica de edificios de acero. Sin embargo, hay varios aspectos que no han sido estudiados o que requieren investigación adicional. Por ejemplo, edificios de acero de diferentes alturas, modelados como sistemas complejos de varios grados de libertad, tomando en cuenta parámetros de respuestas locales y globales, no han sido considerados. La precisión de representar la energía disipada en términos del amortiguamiento de Rayleigh no ha sido evaluada. El efecto del número de elementos usados para representar los miembros estructurales también requiere investigación adicional. Algunos de estos problemas se abordan en esta investigación para el caso de edificios con MARM. Los objetivos principales son:

(a) Calcular las respuestas locales y globales de los modelos utilizados suponiendo que la matriz de masa es de tipo concentrada (MCC) y comparar los resultados con los de considerar la matriz de masa consistente (MCS).

(b) Determinar la precisión de representar la energía disipada en términos del amortiguamiento de

Rayleigh (Cr) considerando los dos primeros modos de vibrar.

(c) Estudiar el efecto sobre la respuesta de considerar uno, dos, o tres elementos por viga en la estructura.

3. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO

Para cumplir con los objetivos antes mencionados, las respuestas de tres edificios de acero ante la acción de varios registros sísmicos se calculan modelándolos, como se indicó anteriormente, mediante marcos de acero complejos de varios grados de libertad, por lo que las contribuciones de los modos superiores se consideran explícitamente. Los modelos utilizados fueron diseñados como parte de un Proyecto de la SAC [25] y se asume que se ubican en suelos firmes de una zona altamente sísmica. Representaciones bidimensionales (2D) de estos edificios, que consisten en los marcos de acero perimetrales resistentes a momento de los edificios tridimensionales, son específicamente utilizados como modelos en el estudio, su elevación se muestra en la Figura 1. Los modelos, que son de baja, media, y gran altura, se definen como Modelos 1, 2 y 3, y

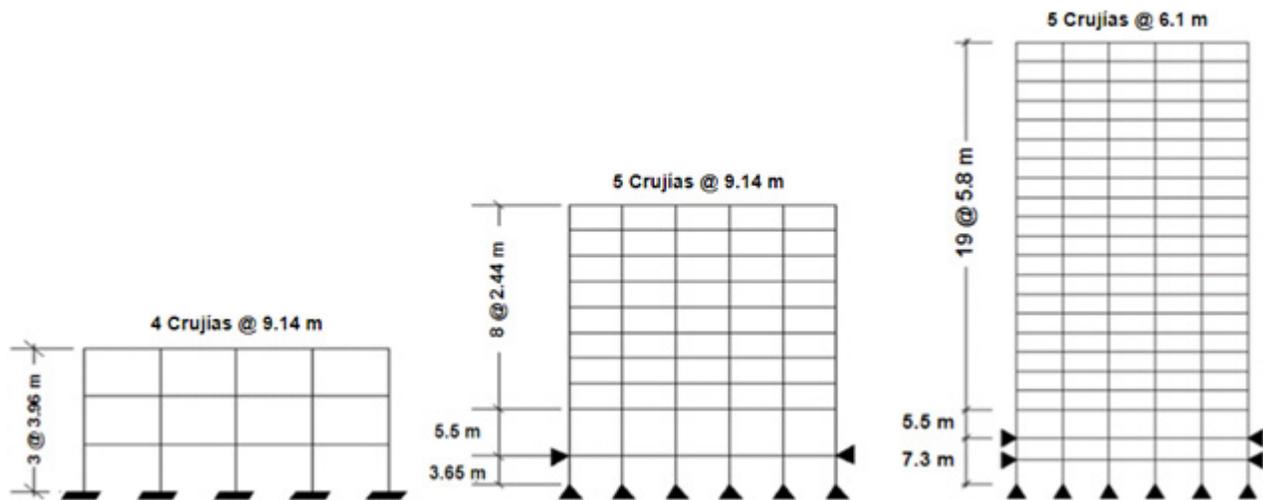


Fig. 1. Elevación de los modelos usados en el estudio

tienen períodos fundamentales de 1.03 s, 2.38 s y 4.07 s, respectivamente.

Información adicional, como es la geometría en planta y la sección (tipo W) de cada uno de los miembros, se pueden encontrar en la literatura [25, 26]. Los análisis no lineales paso a paso requeridos se realizan con el software Ruaumoko [27] en donde a su vez se usa el Método de Aceleración Promedio de Newmark con un intervalo de tiempo (DT) de 0.005 s, para resolver el sistema de ecuaciones diferenciales que gobiernan el problema dinámico. Los efectos de desplazamiento grandes también se consideran en el análisis dinámico.

Los resultados de la matriz de masa MCC se comparan con los de la matriz MCS. Si el orden de los grados de libertad de un miembro prismático con eje recto de un marco plano (caso de esta investigación) son los mostrados en la Figura 2, las formas de las matrices MCC y MCS es como se muestra en las Ecuaciones (1) y (2), respectivamente. En dicha figura y ecuaciones m representa la masa por unidad de longitud.

La matriz de amortiguamiento de Rayleigh se representa por la Ecuación 3. Dicho modelo se obtiene de una combinación de la matriz de masa y la matriz de rigidez; como se observa de la ecuación la matriz de masa consistente y la matriz de rigidez tangente (K_t) se usan en dicha ecuación. 3% de amortiguamiento viscoso ($\zeta=3\%$) usualmente se fija en los dos primeros modos para determinar los coeficientes α y β de dicha matriz. La precisión de esta práctica se evalúa fijando la cantidad mencionada de amortiguamiento en el primer y tercer modo, primer y cuarto modo, y primer y sexto modo, para el modelo baja, mediana y gran altura, respectivamente. Se utilizaron vigas y vigas-columna para representar los miembros estructurales horizontales y verticales, respectivamente.

Con el objetivo de evaluar la precisión de usar solo un elemento por miembro, los resultados se comparan con los de utilizar dos y tres elementos estructurales por miembro. Se consideran tres grados de libertad en cada nodo. Las zonas del panel se supone que son rígidas. El comportamiento histerético bilineal con una

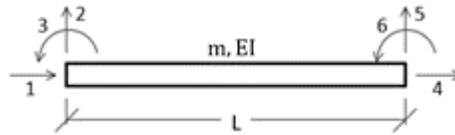


Figura 2. Grados de Libertad de un miembro prismático con eje recto de un marco plano.

$$M_{CC} = \frac{mL}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_{CS} = \frac{mL}{420} \begin{bmatrix} 140 & 0 & 0 & 70 & 0 & 0 \\ 0 & 156 & 22L & 0 & 54 & -3L \\ 0 & 22L & 4L^2 & 0 & 13L & -3L^2 \\ 70 & 0 & 0 & 140 & 0 & 0 \\ 0 & 54 & 13L & 0 & 156 & -22L \\ 0 & -13L & -3L^2 & 0 & -22L & 4L^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

rigidez de post-fluencia del 3% asume en el estudio. La acción combinada de cargas axiales y momentos flexionantes se toma en cuenta de acuerdo al modelo propuesto por Chen y Atsuta [28].

$$C_R = \alpha M_{CS} + \beta K_t \quad (3)$$

Los registros sísmicos usados en la modelación numérica fueron seleccionados de tal manera que su forma espectral, régimen tectónico, magnitud, y la distancia de falla, son similares a los que controlan el peligro sísmico del área donde se ubican los edificios. Las principales características de dichos registros pueden verse en la Tabla 1. En dicha tabla los símbolos *M*, *DE* y *AMT* denotan la magnitud, la dis-

tancia epicentral y la aceleración máxima del terreno del evento sísmico.

Para obtener diferentes niveles de deformación, los registros sísmicos se escalan de acuerdo a la media geométrica de la aceleración espectral ($S_{a,avg}$) calculada como el promedio de las pseudo aceleraciones (S_a) durante un rango de períodos. El rango de períodos para calcular $S_{a,avg}$ varía de $0.2T_1$ a $1.6T_1$, con incrementos constantes de 0.01 s, donde T_1 es el período fundamental del modelo. Los valores de $S_{a,avg}$ varían a su vez de 0.2g a 1.4 g, con incrementos uniformes de 0.2 g para el Modelo 1, mientras que para el Modelo 2 dicho rango va desde 0.1 g hasta a 0.8 g con incrementos constantes de 0.1 g. Para el caso del Modelo 3, el rango de variación de $S_{a,avg}$ va de 0.05g a 0.35g con incrementos constantes de 0.05g. Es importante aclarar que los valores máximos de $S_{a,avg}$ se fijaron de tal manera que la máxima deformación inelástica máxima, en términos de desplazamientos de entrepiso, fue de alrededor de 4% para cualquiera de los modelos.

Tabla 1. Registros Sísmicos (RS)

DESIGNACIÓN	ESTACIÓN	M	DE (km)	AMT (g)		PERIODO (s)	
				N-S	E-O	N-S	E-O
RS1	Imperial Valley, 1940	6.9	10	0.46	0.68	0.53	0.46
RS2	Imperial Valley, 1979	6.5	4.1	0.39	0.49	0.16	0.34
RS3	Landers, 1992	7.3	36	0.42	0.43	0.73	0.33
RS4	Kern, 1952	7.3	25	0.52	0.36	0.25	0.23
RS5	Loma Prieta, 1989	7.0	12.4	0.67	0.97	0.21	0.2
RS6	Northridge, 1994, Newhall	6.7	6.7	0.68	0.66	0.31	0.31
RS7	Northridge, 1994, Rinaldi	6.7	7.5	0.53	0.58	0.39	0.29
RS8	Northridge, 1994, Sylmar	6.7	6.4	0.57	0.82	0.31	0.36
RS9	North Palm Springs, 1986	6.0	6.7	1.02	0.99	0.17	0.21
RS10	Coyote Lake, 1979	5.7	8.8	0.59	0.33	0.15	0.21
RS11	Morgan Hill, 1984	6.2	15	0.32	0.55	0.18	0.16
RS12	Parkfield, 1966, Cholame	6.1	3.7	0.78	0.63	0.37	0.30
RS13	Parkfield, 1966, Cholame	6.1	8	0.69	0.79	0.17	0.21
RS14	North Palm Springs, 1986	6.0	9.6	0.52	0.38	0.13	0.21
RS15	Whittier, 1987	6.0	3.62	0.77	0.48	0.70	0.28

4. RESULTADOS

4.1 Matriz de masa concentrada vs consistente

4.1.1 Parámetros de respuesta locales

En esta sección los momentos flexionantes y las cargas axiales resultantes sobre los miembros de los modelos obtenidos con la matriz MCC se comparan con los de la matriz Mcs. La comparación se hace para cada piso, modelo estructural, dirección, registro sísmico e intensidad sísmica. Para cargas axiales, la comparación se realiza para columnas interiores y exteriores, mientras que para el caso de momentos flexionantes, además de columnas, también se hace para vigas interiores y exteriores. Los parámetros RM_I y RA dadas por las Ecuaciones 4 y 5 se usan en la comparación de momentos flexionantes y cargas axiales, respectivamente. En la Ecuación 4, los términos BCC y BCS representan los momentos flexionantes obtenidos con las formulaciones de masa concentrada y consistente, respectivamente. El numerador y denominador de la Ecuación 5 tienen un significado similar, pero ahora se comparan cargas axiales. Dado que los resultados son bastante similares para ambas direcciones horizontales, la discusión se centra principalmente en los de la dirección NS. Además, sólo se presentan los valores de RM_I y RA promediados sobre todos los registros sísmicos.

$$R_{M1} = \frac{B_{CC}}{B_{CS}} \quad (4)$$

$$R_{A1} = \frac{A_{CC}}{A_{CS}} \quad (5)$$

Los valores promedio de RM_I en la dirección N-S, para columnas exteriores e interiores y para los tres modelos, se muestran en la Fig. 3. Se observa que para columnas exteriores (Ver Figs. 3a, 3b y 3c) el nivel de subestimación es mayor que en columnas interiores si se utiliza la matriz MCC. Para los tres modelos, los valores de RM_I disminuyen si $S_{a,avg}$ y el número de piso son mayores; por otra parte, tienden a aumentar con la altura del modelo. Los valores mínimos promedio de RM_I son aproximadamente 0.65, 0.68 y 0.80, lo que indica subestimaciones promedio máximas de 35%,

32% y 20%, para los Modelos 1, 2 y 3, respectivamente. Considerando las gráficas de los registros sísmicos individuales (no mostrados en el artículo), los niveles máximos correspondientes de subestimación son de alrededor del 66%, 58% y 42%. También se observa que (Figs. 3b, 3d y 3f) la subestimación de los momentos flexionantes en columnas interiores es menos significativa que la de las exteriores; para los Modelos 1 y 2 las subestimaciones máximas individuales y promedio rondan el 21% y el 11%, respectivamente; para el Modelo 3, por otro lado, los momentos de flexión son esencialmente los mismos para MCC y Mcs.

También se calcularon los valores medios de RM_I para vigas interiores y exteriores, pero no se presentan los resultados. Cabe mencionar, sin embargo, que el nivel de subestimación es similar al de columnas interiores.

Gráficas similares a las de momentos flexionantes también se construyeron para el caso de cargas axiales pero no se presentan. Vale la pena comentar, sin embargo, que a diferencia de momentos flexionantes, las cargas axiales en columnas exteriores se sobreestiman cuando se usan la matriz MCC. Los máximos valores promedio de sobreestimación son 60%, 22% and 5% para los Modelos 1, 2 y 3, respectivamente.

4.1.2 Parámetros de respuesta globales

Las demandas sísmicas en términos de parámetros de respuesta globales como son los cortantes y desplazamientos de entrepiso también se estudiaron, sin embargo, solo unos pocos resultados se comentan aquí. Para el caso de cortantes de entrepiso se muestra que el máximo nivel de subestimación promedio es de aproximadamente 5%, 14% y 12%, para el Modelo 1, 2 y 3, respectivamente. Los correspondientes niveles máximos de subestimación considerando registros sísmicos individuales (no mostrados) son 15%, 30% y 26%. Los niveles de subestimación para desplazamientos de entrepiso son menores que los de casos de cortantes de entrepiso de tal forma que puede decirse que, en términos de valores promedio, los desplazamientos de entrepiso son precisamente estimados cuando se usa la matriz de masas concentrada.

4.2 Precisión del Modelo de Rayleigh

Existen varios aspectos del modelo de amortiguamiento de Rayleigh que necesitan ser estudiados. Sin embargo, en este estudio solo se muestra la inconveniencia de algunos de ellos. Es común calcular las

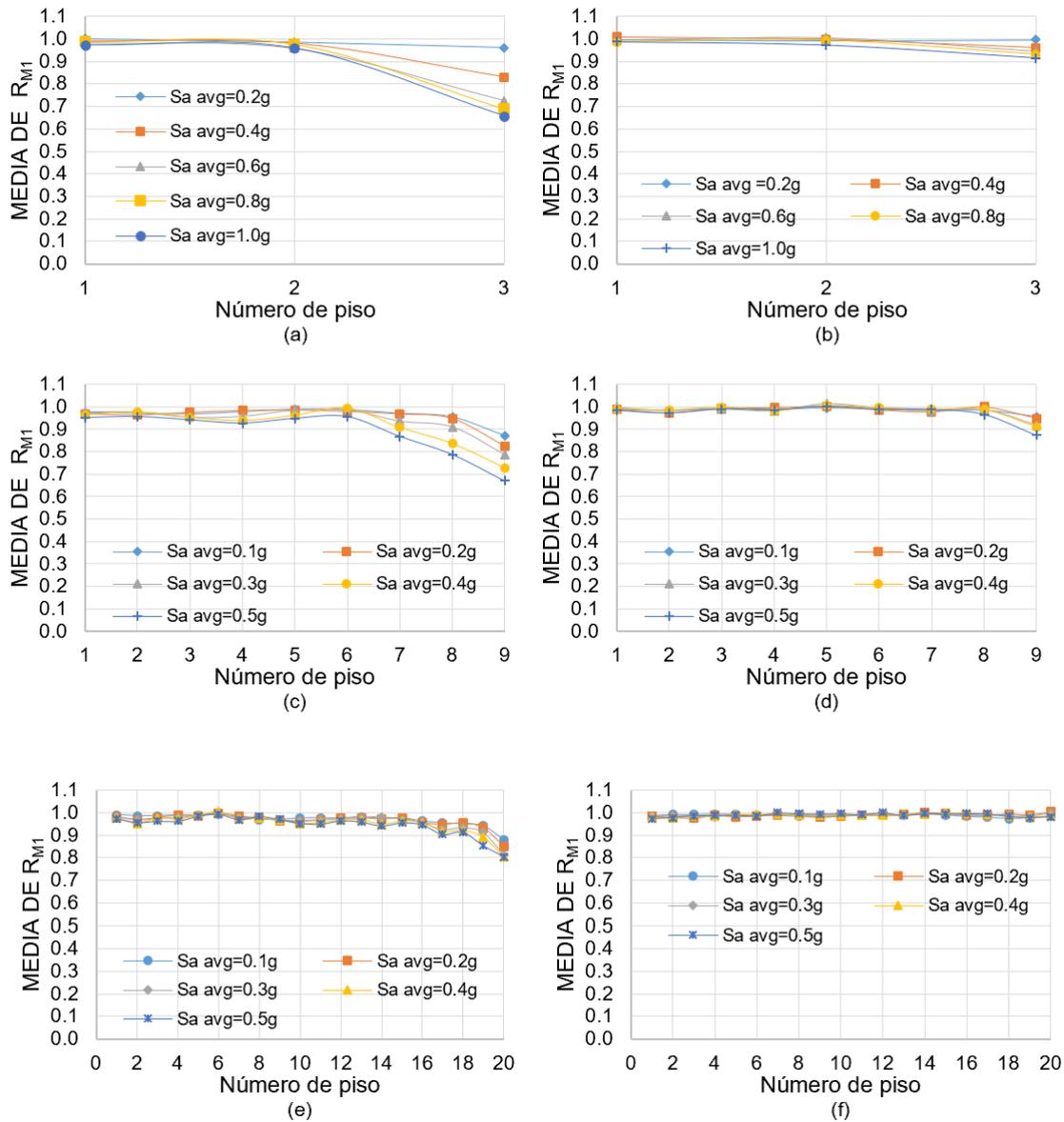


Fig. 3 Valores promedio de RM1: (a)-(c)-(e)→columnas exteriores, Modelos 1-2-3; (b)-(d)-(f)→columnas interiores, Modelos 1-2-3

constantes de proporcionalidad (α y β en la Ecuación 3) de la matriz de CR utilizando los dos primeros modos laterales de vibrar; este procedimiento es denominada aquí como Caso 1. En esta sección del artículo se contrastan los resultados de este enfoque con los obtenidos al considerar el primer modo 1 y uno superior (definido como Caso 2) en términos de las fuerzas de amortiguamiento horizontal desarrolladas en los pisos. Los modos particulares utilizados en el Caso 2, como se mencionó en la Sección 3 del artículo, son los modos 1 y 3, los modos 1 y 4, y los modos 1 y 6, para los Modelos 1, 2 y 3, respectivamente. En cualquiera de los casos, está claro que el uso del modelo de amortiguamiento de Rayleigh conducirá a grandes cantidades de amortiguamiento en los modos superiores.

Una vez que se fija ζ en dos modos, su valor en cualquiera de los modos se puede obtener usando la Ecuación 6 [29], donde n indica el número de modo. Los valores de ζ resultantes para los tres modelos en estudio, para los Casos 1 y 2, se muestran en la Fig. 4. Como se comentó anteriormente, se supone que la relación de amortiguamiento en los dos modos utilizados para calcular α y β es 3% (indicado por la curva “valor de referencia”). Se observa de la figura que los valores de ζ en los modos que no se utilizaron para calcular los coeficientes de proporcionalidad, no son consistentes con lo observado en pruebas de vibración forzada de estructuras, donde se muestra que ζ es aproximadamente igual para todos los modos [29, 30]); los valores son menos consistentes para el Caso 1.

$$\zeta_n = \frac{\alpha}{2\omega_n} + \frac{\beta\omega_n}{2} \quad (6)$$

Generalmente se cree que las fuerzas de amortiguamiento (F_A) en una estructura son pequeñas de tal manera que cualquier error derivado del uso del modelo de amortiguamiento de Rayleigh no tiene un efecto significativo en la respuesta sísmica. Además, muchos usuarios de software de análisis sísmico asumen que, si se especifica una cierta cantidad de amortiguamiento viscoso en dos modos, por ejemplo 3% del amortiguamiento crítico, entonces la estructura tendrá en realidad un 3% de amortiguamiento crítico. En esta sección del artículo, se muestra que esta percepción no es correcta y que los valores de F_A resultantes del modelo de Rayleigh pueden introducir errores considerables en la respuesta. Para ello, para cada modelo se calculan para cada piso las fuerzas de amortiguamiento horizontales promedio usando los modos 1 y 2 (Caso 1) en la construcción de matriz CR y se comparan con los obtenidos usando el modo 1 y un modo superior (Caso 2). La comparación se realiza usando el cociente RFA dado por la Ecuación 7. En dicha ecuación F_{DA1} y F_{DA2} , para cualquier piso, representan las fuerzas de amortiguamiento promediadas sobre todos los nodos del piso en cuestión para los Casos 1 y 2, respectivamente.

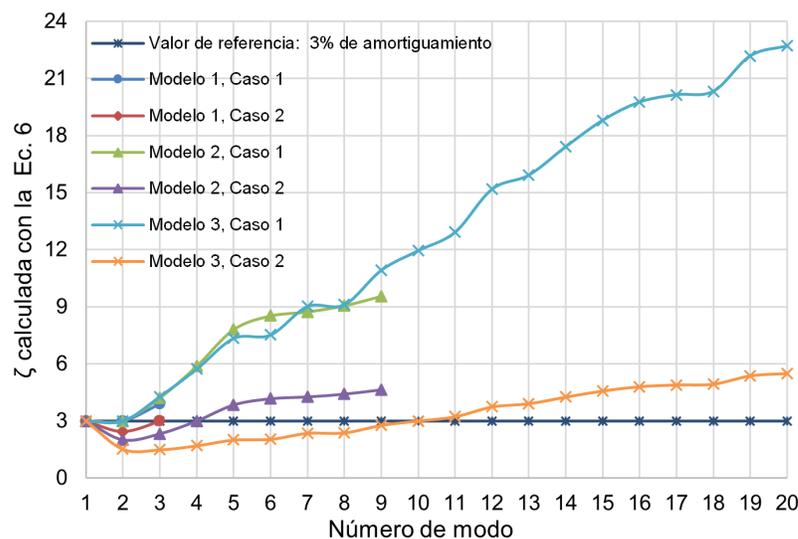


Fig. 4 Valores de ζ de acuerdo con el modelo de Rayleigh (Ecuación 6)

$$R_{FA} = \frac{F_{DA1}}{F_{DA2}} \quad (7)$$

Los valores de R_{FA} se presentan en las Figs. 5a, 5b y 5c, para los Modelos 1, 2 y 3, respectivamente. Los resultados indican que los valores pueden ser mucho mayores que la unidad, lo que indica que las fuerzas de amortiguamiento se sobreestiman cuando se usan los modos 1 y 2 en la construcción de la matriz CR . Para un modelo dado, los valores tienden a disminuir a lo largo de la altura del modelo, pero esencialmente no varían con la intensidad sísmica. Los valores tienden a aumentar a medida que el modelo se hace más alto: las sobreestimaciones máximas son de alrededor

del 10%, 115% y 225% para los modelos 1, 2 y 3, respectivamente.

4.3 Uno vs más de un elemento por miembro

En esta sección del artículo se cuantifica la precisión de usar un solo elemento para modelar cada viga en comparación con la de usar dos o tres elementos. Se asume que la respuesta es más precisa cuando se usa más de un elemento por miembro ya que la distribución de masa es más real (más uniforme). Solo se comparan los momentos flexionantes en vigas; la comparación para algunos otros parámetros se comenta brevemente.

Para efectuar la comparación se usa el parámetro $RM2$ dado por la Ecuación 8. En dicha ecuación, $M1E$ y $M2E$ representan los momentos flexionantes en los

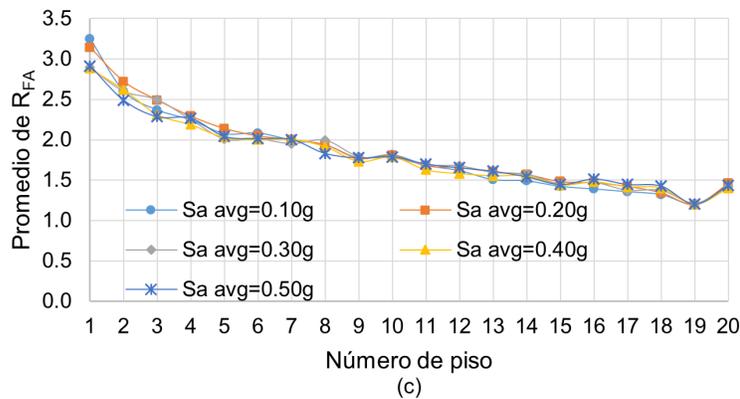
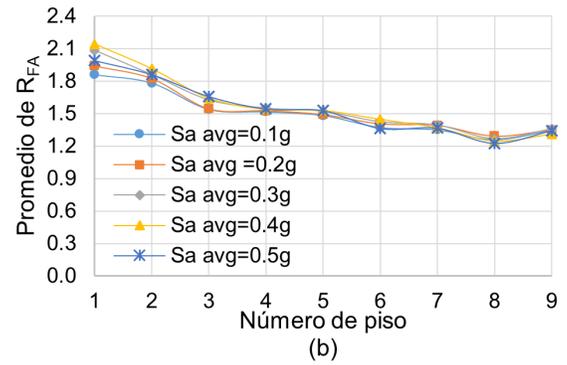
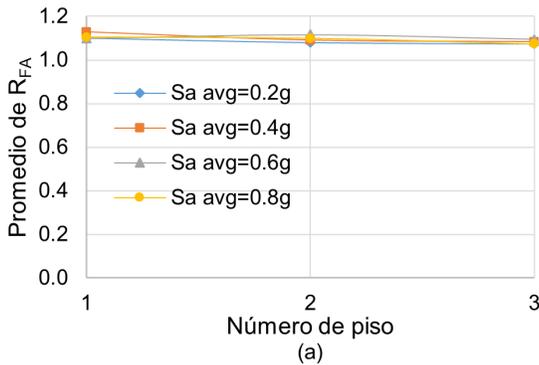


Fig. 5 Valores promedio de RFA, dirección NS: (a) Modelo1, (b) Modelo 2, (c) Modelo 3

extremos de las vigas cuando se usan uno y dos elementos para modelarlas, respectivamente.

$$R_{M2} = \frac{M_{1E}}{M_{2E}} \quad (8)$$

Los promedios de R_{M2} para vigas exteriores, así como para las interiores, se presentan en la Fig. 6 para todos los modelos. Se observa que para comportamiento elástico (valores más pequeños de $S_{a,avg}$), los

momentos flexionantes se subestiman cuando se usa un solo elemento por miembro; el nivel de subestimación aumenta con el número de piso; las cantidades observadas de subestimación promedio son 19%, 35%, 22% para los Modelos 1, 2 y 3, respectivamente. Para deformaciones intermedias o grandes, en cambio, los valores son esencialmente iguales a la unidad en casi todos los casos, lo que implica que los momentos flectores en las vigas sin nodos intermedios son muy similares a los resultantes de la consideración de un nodo intermedio.

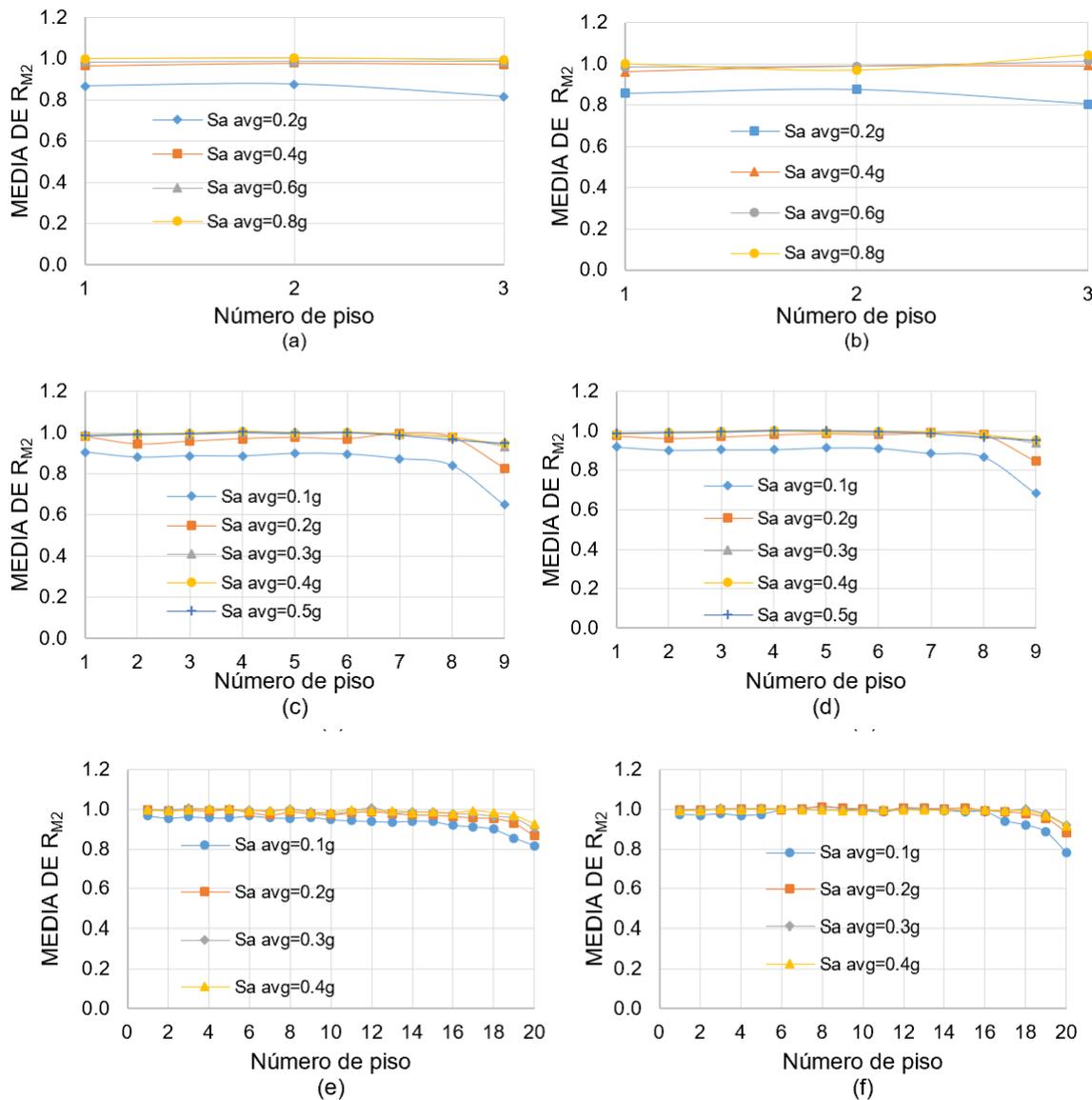


Fig. 6. Valores promedio de R_{M2} : (a)-(c)-(e)→vigas exteriores, Modelos 1-2-3; (b)-(d)-(f)→ vigas interiores, Modelos 1-2-3

Aunque no se proporcionan gráficas para otros parámetros de respuesta, vale la pena mencionar que los cortantes entre pisos pueden sobreestimarse si se utiliza solo un elemento por viga en el modelado estructural; se observa una sobreestimación media de hasta 21%. Los desplazamientos de entrepiso, por el contrario, se calculan con precisión. Para grandes deformaciones, las cargas axiales y los momentos flectores en columnas pueden sobreestimarse hasta en un 95% y 48%, respectivamente; pero para deformaciones pequeñas y moderadas, los momentos flectores en columnas se subestiman hasta en un 15%. La subestimación o sobreestimación obtenida al comparar las respuestas de los modelos sin nudos intermedios con las de dos nudos intermedios, es bastante similar a la de comparar las respuestas de los modelos sin nodo intermedio con las de un nodo intermedio. Por lo que se puede decir que hay convergencia en las respuestas cuando se consideran tres elementos por viga.

5. CONCLUSIONES

En este artículo las respuestas sísmicas de marcos de acero resistentes a momentos (MARF) se calculan considerando la matriz de masa concentrada (MCC) y se contrastan con las calculadas considerando la matriz de masa consistente (MCS). La precisión de representar la energía disipada en términos del amortiguamiento de Rayleigh (CR) considerando los dos primeros modos laterales de vibrar también se evalúa. Asimismo, las respuestas también se calculan considerando solo un elemento por viga y se comparan con las de asumir dos y tres elementos. Los principales resultados son:

(1) Los cortantes de entrepiso y los momentos flexionantes en columnas se subestiman en promedio hasta en un 15% y 35%, respectivamente, al usar la matriz MCC .

(2) Las fuerzas de amortiguamiento de piso horizontales se subestiman hasta en un 350% si se utilizan los modos 1 y 2 en la construcción de la matriz CR .

(3) Los momentos flexionantes en columnas se subestiman hasta en un 15% si en el modelado estructural se utiliza solo un elemento por viga.

(4) Los miembros estructurales en MRF normalmente se diseñan en términos de resistencia como vigas o viga-columnas para soportar las fuerzas internas; luego se revisan los desplazamientos laterales. Los resultados de este estudio indican que los errores

introducidos en términos de desplazamientos son despreciables si se utiliza la matriz MCC , o un elemento por viga, pero se pueden introducir errores significativos en el diseño debido a la sobreestimación o subestimación de las fuerzas de diseño. Por ello, se recomienda utilizar la matriz MCS y dos elementos por viga en el modelado del sistema estructural estudiado. Asimismo, se recomienda utilizar el primer modo y uno superior en la derivación de la matriz CR .

(5) Una de las principales justificaciones en el pasado para no utilizar la matriz MCS , o más de un elemento por miembro, fue la gran demanda de tiempo de cómputo (que implicaba un mayor costo). Sin embargo, hoy en día esta justificación ya no es válida, al menos para edificios modelados como sistemas 2D. Usando computadoras modernas junto con sistemas operativos eficientes, la diferencia entre los tiempos de cómputo derivados de usar las matrices MCC y MCS , se ha reducido significativamente.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se desarrolló gracias al apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) en términos de la beca de maestría otorgada al M.C. Juan Daniel Trasviña Soberanes. El apoyo recibido por parte de la Universidad Autónoma de Sinaloa a través del proyecto de investigación “Amortiguamiento de Rayleigh vs el de Wilson y Penzien en la respuesta sísmica de edificios de acero” con clave PRO_A8_013_PROFAPI 2022, también es apreciado.

6. REFERENCIAS

[1] Archer, J. S. (1965). “Consistent matrix formulations for structural analysis using finite-element techniques.” *AIAA Journal*, 3(10), 1910–1918.

[2] Rea, D., Clough, R. W., and Bouwkamp, J. G. (1971). Damping capacity of a model steel structure.

[3] Wilson, E. L., and Penzien, J. (1972). “Evaluation of orthogonal damping matrices.” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 4(1), 5–10.

[4] Crips, D. . (1980). “Damping models for inelastic structures.” University of Canterbury, Christchurch.

[5] Stavrinidis, C., Clinckemaillie, J., and Dubois, J. (1989). "New concepts for finite-element mass matrix formulations." *AIAA Journal*, 27(9), 1249–1255.

[6] Léger, P., and Dussault, S. (1992). "Seismic-Energy Dissipation in MDOF Structures." *Journal of Structural Engineering*, 118(5), 1251–1269.

[7] Michaltsos, G. T., and Konstantakopoulos, T. G. (2000). "A simplified dynamic analysis for estimation of the effect of rotary inertia and diaphragmatic operation on the behaviour of towers with additional masses." *Structural Engineering and Mechanics*, 10(3), 277–288.

[8] Kowalsky, M.; Dwairi, H. Investigation of Jacobson's equivalent viscous damping approach as applied to displacement-based seismic design. In *Proceedings of the 13th world conference on earthquake engineering*; Vancouver, Canada, 2004.

[9] Archer, G. C., and Whalen, T. M. (2005). "Development of rotationally consistent diagonal mass matrices for plate and beam elements." *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 194(6–8), 675–689.

[10] Val, D. V., and Segal, F. (2005). "Effect of damping model on pre-yielding earthquake response of structures." *Engineering Structures*, 27(14), 1968–1980.

[11] Dwairi, H.M.; Kowalsky, M.J.; Nau, J.M. Equivalent Damping in Support of Direct Displacement-Based Design. *J. Earthq. Eng.* 2007, 11, 512–530.

[12] Sarigul, M.; Boyaci, H. Nonlinear vibrations of axially moving beams with multiple concentrated masses Part I: Primary resonance. *Struct. Eng. Mech.* 2010, 36, 149–163.

[13] Rodrigues, H.; Varum, H.; Arêde, A.; Costa, A. A comparative analysis of energy dissipation and equivalent viscous damping of RC columns subjected to uniaxial and biaxial loading. *Eng. Struct.* 2012, 35, 149–164.

[14] Jehel, P.; Léger, P.; Ibrahimbegovic, A. Initial versus tangent stiffness-based Rayleigh damping in inelastic time history seismic analyses. *Earthq. Eng. Struct. Dyn.* 2014, 43, 467–484.

[15] Chai, Y.H.; Kowalsky, M.J. Influence of Nonviscous Damping on Seismic Inelastic Displacements. *J. Struct. Stab. Dyn.* 2015, 15, 1450074.

[16] Puthanpurayil, A.M.; Lavan, O.; Carr, A.J.; Dhakal, R.P. Elemental damping formulation: An alternative modelling of inherent damping in nonlinear dynamic analysis. *Bull. Earthq. Eng.* 2016, 14, 2405–2434.

[17] Zand, H.; Akbari, J. Selection of Viscous Damping Model for Evaluation of Seismic Responses of Buildings. *KSCE J. Civ. Eng.* 2018, 22, 4414–4421.

[18] Kshirsagar, B.D.; Goud, S.C.; Khan, S.N. Vibration analysis of femur bone by using consistent mass matrices and fast fourier transform analyzer. *Mater. Today Proc.* 2020, 26, 2254–2259.

[19] Carr, A.J. RUAUMOKO–Inelastic Dynamic Analysis Program; Department of Civil Engineering, University of Canterbury: Christchurch, New Zealand, 2016.

[20] Chopra, A. *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 4th ed.; Prentice Hall: Upper Saddle River, NJ, USA, 2011.

[21] Kinoshita, T.; Nakamura, N.; Kashima, T. Characteristics of the first-mode vertical vibration of buildings based on earthquake observation records. *JAPAN Archit. Rev.* 2021, 4, 290–301.

[22] Chen, W.F.; Atsuta, T. Interaction equations for biaxially loaded sections. *J. Struct. Div.* 1972, 98, 1035–1052.

[23] Paz, M.; Leigh, W. *Structural Dynamics—Theory and Computation*, 5th ed.; Kluwer Academic Publishers: Boston, MA, USA, 2004.

[24] Clough, R.; Penzien, J. *Dynamics of Structures*, 3rd ed.; Computers & Structures Inc. Berkeley, CA, USA, 1995.

[25] Federal Emergency Management Agency (FEMA). *State of the Art Report on Systems Performance of Steel Moment Frames Subjected to Earthquake Ground Shaking*; FEMA 355C; FEMA: Washington, DC, USA, 2000. Reston, VA, USA, 2016; ISBN 9780784414248.

[26] Valenzuela-Beltran, F.; Llanes-Tizoc, M.D.; Bojorquez, E.; Bojorquez, J. and Reyes-Salazar A.; Evaluation of the effect of local rotation and vertical displacements modes in the nonlinear seismic response of steel frames; Eng Struct, 286 (2023); <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116097>.

[27] Carr, A. RUAUMOKO, Inelastic dynamic analysis program 2016.

[28] Chen, W.F.; Atsuta, T. Interaction equations for biaxially loaded sections, 1971 (72-9); 1971.

[29] Clough R., Penzien J. Dynamics of Structures. 3rd ed. Berkeley, California: Computers & Structures Inc.; 1995.

[30] Chopra A. Dynamics of structures. New Jersey: Prentice Hall; 2012.

Instrumentación electrónica de una máquina para pruebas de torsión

Electronic instrumentation of a torsion testing machine

Omar Payán-Serrano^{1*}, Ismael Diaz-Peña¹, Carlos Sandoval-Leon², Kevin Bravo-Verdugo²

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es instrumentar una maquina para pruebas de torsión de la marca italiana METRO COM sin interrumpir o alterar el funcionamiento de su sistema mecánico original de medición y graficación. Esta máquina no cuenta con sistemas electrónicos, sin embargo, es robusta y confiable debido a que esta constituida principalmente por sistemas mecánicos. Por lo tanto, resulta interesante utilizar las nuevas tecnologías para mejorar la experiencia de uso, aumentar la precisión y extender la vida útil de equipos didácticos valiosos. El proceso de instrumentación es planeado e implementado en la maquina para pruebas de torsión utilizando electrónica (sensores) para la medición digital de las variables físicas y programación para la comunicación inalámbrica e interfaz gráfica para la presentación de los datos.

Recibido: marzo 2024

Aceptado: mayo 2024

Publicado: junio 2024

Palabras Clave:

Propiedades mecánicas ,
maquina universal, instrumen-
tación

Keywords:

Mechanical properties; univer-
sal machine, instrumentation.

ABSTRACT

The aim of this work is to instrument a torsion testing machine of the Italian brand METRO COM without interrupting or altering the operation of its original mechanical measurement and graphing system. This machine does not have electronic systems; however, it is robust and reliable because it consists mainly of mechanical systems. Therefore, it is interesting to use new technologies to improve the user experience, increase accuracy and extend the useful life of valuable educational equipment. The instrumentation process is planned and implemented in the torsion testing machine using electronics (sensors) for digital measurement of physical variables and programming for wireless communication and data presentation with graphical interface.

1. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas determinan el comportamiento del material cuando es sometido a esfuerzos o tratamientos mecánicos externos y cambios de temperatura [1]. El conocimiento de estas propiedades permite que la selección del material para el diseño, fabricación de piezas y conjuntos mecánicos sea una tarea más objetiva [2-3]. Por tal motivo para la mayoría de las aplicaciones las propiedades mecánicas son consideradas de gran importancia; principalmente en el tema de diseño y construcción de obras civiles [4-5].

*Autor para correspondencia. Omar Payan Serrano

Dirección de correo electrónico: omar.ps@culiacan.tecnm.mx

¹ Profesor del Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán

² Estudiante de Licenciatura de Ingeniería Mecatrónica del Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán

En muchas universidades o centros de investigación se cuentan con equipos y/o maquinaria robusta donde se realizan experimentos para obtener propiedades mecánicas de los materiales (Fig. 1) [6]. Debido a que muchos de estos equipos tienen más de 20 años de antigüedad, los sistemas de instrumentación y presentación de resultados son en su mayoría sistemas mecánicos que carecen de elementos para procesar la información y compartirla de manera precisa [7].

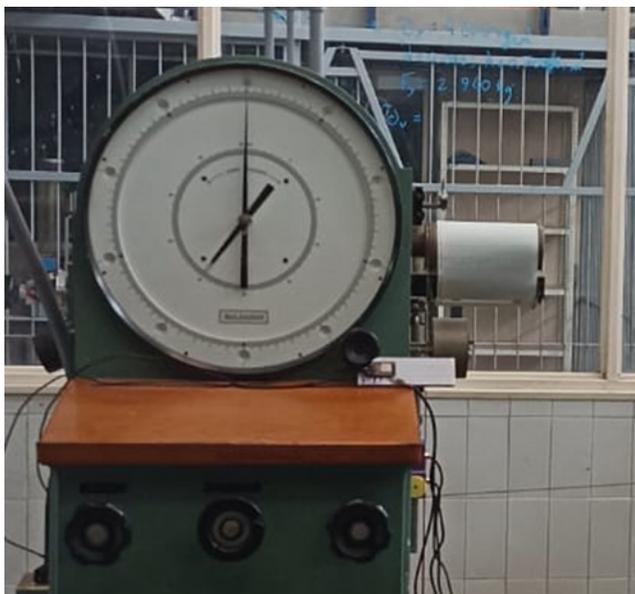


Fig. 1. Maquina universal para pruebas mecánicas con instrumentación mecánica.

En los últimos años, ha habido un aumento en el uso de la instrumentación electrónica en equipos didácticos [8]. La instrumentación electrónica ofrece una serie de ventajas, como la mayor precisión y sensibilidad, y la capacidad de recopilar y analizar datos de forma más rápida y sencilla.

Hay una serie de formas de aprovechar los equipos ya existentes para dotarlos de instrumentación electrónica. Una forma es instalar sensores y actuadores electrónicos en los equipos existentes (Fig. 2) [6-7]. Esto puede permitir a los estudiantes recopilar datos y controlar los equipos de forma remota.

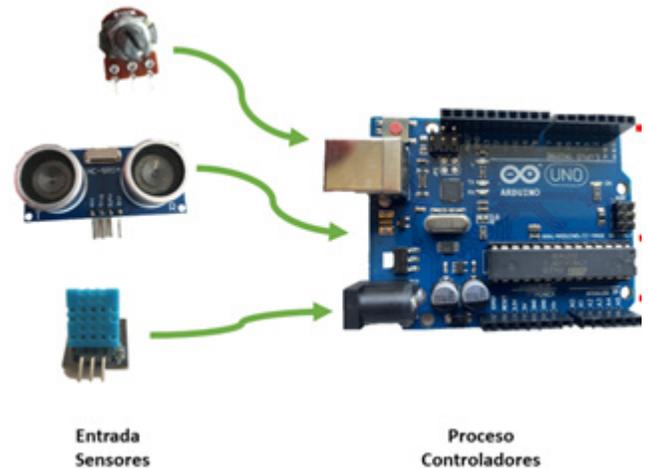


Fig. 2. Instrumentación electrónica

El laboratorio de pruebas destructivas del departamento Metal-Mecánica del Tecnológico Nacional de México Campus Culiacán cuenta con equipos robustos y valiosos que requieren de actualización en lo referente a la adquisición y presentación de los datos; uno de estos equipos es la máquina para pruebas de torsión, la cual se detalla a continuación.

2. MAQUINA PRUEBAS DE TORSIÓN

Un equipo fundamental para realizar la medición de las propiedades mecánicas es la máquina para pruebas de torsión [9]. Debido al año de fabricación, muchos de este tipo de equipos son poco modernos y carecen de la presentación de resultados en formato digital. Sin embargo, la mayoría de estas máquinas están compuesta principalmente de los mismos elementos (Fig. 3).

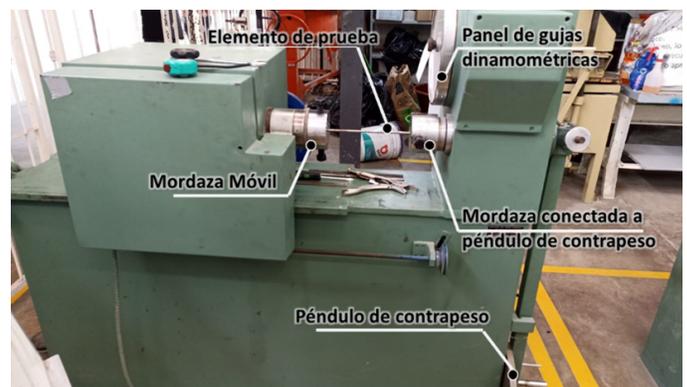


Fig. 3. Elementos de la máquina para pruebas de torsión de la marca italiana METRO COM.

Dependiendo del rango del torque aplicado a las probetas, las máquinas se clasifican en hidráulicas y electromecánicas. En la Fig. 4 se muestra mayor detalle de los elementos para presentar resultados. Las agujas describen visualmente el torque desarrollado durante la prueba. El panel cuenta con dos agujas, una está directamente conectada al movimiento del péndulo de contrapeso, mientras que la otra se encuentra libre y puede ser manipulada de manera manual o ser guiada por la aguja del péndulo. Al inicio de una prueba de torsión, la aguja del péndulo apuntará al cero de la escala del panel torquímetro, antes de empezar a aplicar fuerza a la probeta, se deberá colocar manualmente la aguja libre en la misma posición de la otra. Por lo tanto, cuando se desarrolla torque en la probeta, la aguja del péndulo moverá a la aguja libre, y cuando la probeta falle, la aguja del péndulo volverá a cero mientras que la aguja libre quedara indicando el torque máximo soportado por la probeta. Finalmente, el graficador mecánico dibuja físicamente en papel, mediante un rodillo giratorio, una curva escalada a dos ejes que representa torque y deformación angular generados durante la prueba. La Fig. 5 muestra una curva dibujada por la graficadora mecánica, donde se puede observar sutilmente las zonas típicas del comportamiento del acero, donde el eje horizontal de la gráfica describe la torsión o deformación angular de la probeta y el eje vertical el torque aplicado durante el proceso de una prueba destructiva. Sin embargo, en la actualidad la presentación de resultados en formato de impresión física implica una experiencia poco atractiva e impráctica para el tema de procesamiento computacional de los datos. Por tal motivo, la adaptación de un sistema digital para la adquisición de datos puede resultar una mejora de la experiencia de uso y de la precisión de la información.

Si bien es poco atractivo e impreciso el formato de presentación de datos, original de la máquina, es importante tener en cuenta la robustez y confiabilidad del dispositivo debido a que funciona bajo el principio del péndulo con contrapeso. Tal como se muestra en la Fig. 6, cuando el péndulo se encuentra descansando con una vertical normal común a los ejes de la mordaza y el disco de contrapeso W , la distancia x es cero, por lo tanto, el torque $T=W \cdot x$ también será cero; en el momento en que se desarrolla torque en la mordaza, entonces el péndulo rotará hasta generar la adecuada distancia x que permita contrarrestar o compensar el torque aplicado. La máxima rotación del péndulo es de 45 grados, mientras que la aguja del torquímetro

puede girar casi 360°, esto es por un sistema de engranes que permite transmitir y amplificar el movimiento.



Fig. 4. Graficadora y panel de agujas de torquímetro.



Fig. 5. Curva dibujada por la graficadora mecánica incorporada originalmente en la máquina para pruebas de torsión

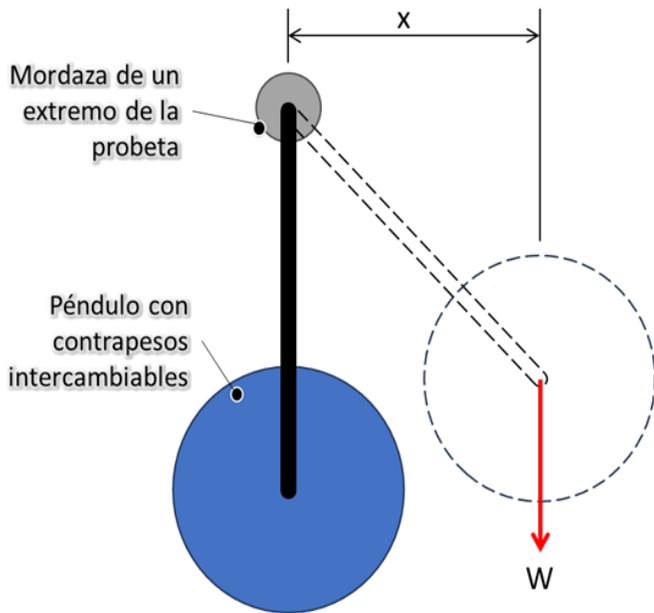


Fig. 6. Aumento del torque con la rotación del péndulo.

La maquina cuenta con dos discos contrapeso, lo que permite trabajar con dos escalas en el panel de agujas. La escala exterior mide de cero hasta 5 kgf·m y se utiliza cuando un solo disco contrapeso es montado como péndulo, mientras que la escala interior mide de cero hasta 10 kgf·m y se utiliza cuando los dos discos contrapesos son montados como péndulo. Es posible mejorar la precisión de lectura y registro utilizando un sistema electrónico de adquisición de datos instalado en la maquina sin interrumpir las funciones del sistema original de medición mecánico.

3. SISTEMA ELECTRÓNICO/DIGITAL PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Hoy en día existen una aceptable variedad de sistemas electrónicos de libre uso y configuración (Fig. 7), conocidos como placas de desarrollo. Las placas de desarrollo son dispositivos que cuenta con un microcontrolador (microchip) reprogramable, el cual, puede ejecutar instrucciones para un fin específico [10], [11]. Generalmente estas placas cuentan con entradas y salidas análogas y/o digitales para permitir la comunicación con sensores externos, haciendo uso de la electrónica digital. Además, en el mercado hay una gran disponibilidad de transductores del tipo sensor (Fig. 5), los cuales permiten transformar o convertir

una determinada manifestación física en una salida de información legible por un sistema electrónico como lo pueden ser las tarjetas de desarrollo anteriormente planteadas.

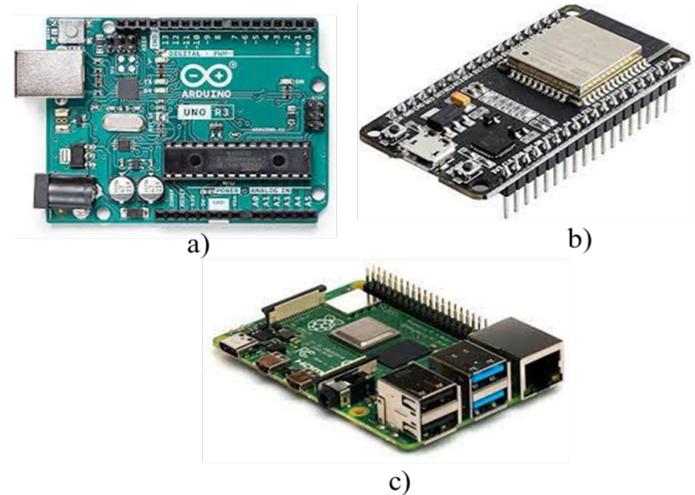


Fig. 7. Placas electrónicas de desarrollo. a) Arduino UNO. b) ESP32. c) Raspberry PI.

Dentro del gran universo de sensores disponibles, en la Fig. 8 se muestran algunos de los más utilizados. La celda de carga convierte la fuerza en una salida eléctrica medible; este tipo de transductor ofrece una relación directa con una de las variables de interés, la fuerza. Las celdas de cargas suelen ser económicamente accesibles para pequeñas capacidades, sin embargo, su valor incrementa drásticamente para aplicaciones donde se aplican elevadas cargas. El módulo MPU9250 es una unidad de medición económica con 3 sensores basados en sistemas microelectromecánicos, los cuales permiten medir la velocidad de giro en 3 ejes (giroscopio), la aceleración de desplazamiento en 3 ejes (acelerómetro) y un magnetómetro para definir la dirección en 3 ejes con respecto al norte polar. Este módulo ofrece una gran versatilidad debido a que es posible procesar la información de los 3 sensores y calcular parámetros como desplazamiento, orientación, velocidad, aceleración, posición, etc. Sin embargo, debido a que utiliza microelementos-electromecánicos, las altas vibraciones y los fuertes campos magnéticos cercanos al dispositivo generan ruido significativo en sus señales de salida. Una alternativa altamente robusta es el transductor conocido como encoder, codificador o generador de pulsos [12]. El encoder suele ser un dispositivo electromecánico usado

para medir la posición angular de un eje al describirla mediante un código digital, por lo tanto, es un dispositivo menos susceptible al ruido externo generado por vibración o campos magnéticos. Sin embargo, este tipo de sensor no ofrece de manera directa la medición de torque y deformación angular. Es por este motivo que se requiere de adaptaciones mecánicas y procesamiento matemático para convertir y relacionar la posición angular, dada por el encoder, con las variables de interés.

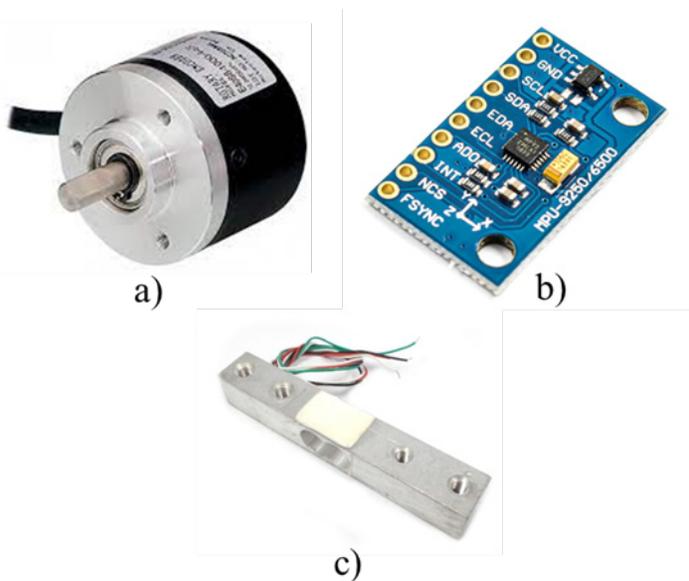


Fig. 8. Transductores tipo sensor. a) Encoder. b) Módulo MPU9250. c) Celda de carga.

En la Fig. 9 se muestra de manera general el proceso para la adquisición de datos digitales. El sensor o los sensores envían la información digital a una placa de desarrollo, la cual interpreta pulsos eléctricos de acuerdo con su código de programación y posteriormente se comunica a una computadora con la finalidad de un mayor procesamiento y/o presentación visual de la información.

4. ANÁLISIS DE GRAFICADOR MECÁNICO

Para la implementación de los elementos del sistema de adquisición de datos se analizó y estudió el principio de funcionamiento de todos los sistemas (eléctrico y mecánico) con apoyo del manual e inspección visual de la dinámica de los componentes. Se observó que el giro del rodillo es generado por el

movimiento de una cuerda, la cual está conectada o relacionada con la rotación de la mordaza móvil, es decir, describe la torsión o deformación angular de la probeta (Fig. 10). Por otra parte, una varilla conectada al péndulo a través de un mecanismo simple adquiere un movimiento lineal debido a la rotación del péndulo.

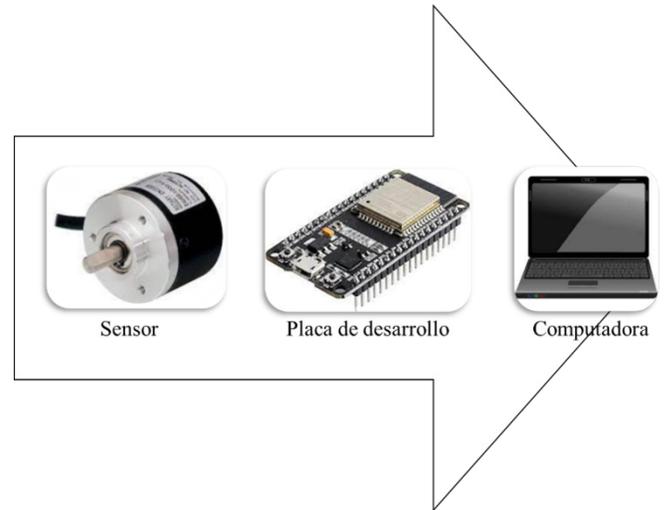


Fig. 9. Proceso general para la adquisición de datos digitales.

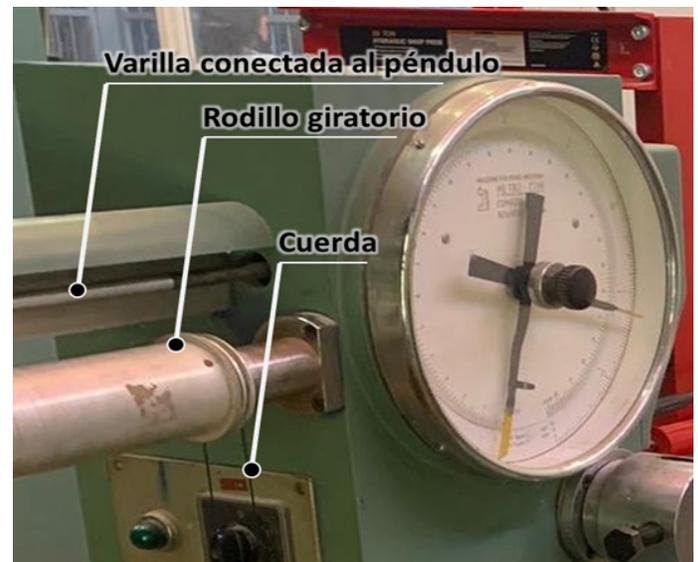


Fig. 10. Elementos del graficador mecánico.

Por lo anteriormente señalado, la rotación del rodillo en combinación con el movimiento horizontal de la varilla permite a una pluma, sostenida en la varilla, graficar escaladamente la curva Torque-Deformación en tiempo real durante las pruebas de torsión.



Fig. 11. Papel y lápiz sobre la graficadora mecánica.

5. INSTALACIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN ELECTRÓNICA

A partir del análisis de funcionamiento del graficador mecánico, se propone la implementación de un sistema electrónico de adquisición de datos utilizando una placa de desarrollo ESP32 y dos encoders. El ESP32 será el encargado de recibir la información de los sensores (encoder) y registrarla en un archivo de texto.

Un encoder es instalado tal como se muestra en la Fig. 12. Utilizando impresión 3D es relativamente sencillo resolver el problema de montaje de los sensores, debido a que no se requiere de soportes metálicos de

gran resistencia; la impresión 3D ofrece una solución versátil y personalizada para la creación de soportes para sensores. A partir de un rollo de filamento plástico es posible obtener diseños justos a las necesidades específicas del sensor y la aplicación. Aprovechando un elemento metálico sobresaliente de la máquina, se diseñaron e imprimieron elementos plásticos para mantener un encoder fijo con el objetivo de registrar el desplazamiento de la cuerda que describe la deformación angular en las pruebas de torsión. La Fig. 13 muestra el diseño 3D del soporte y la polea que permiten contener el sensor y transmitir el movimiento de la cuerda al eje del encoder, respectivamente.



Fig. 12. Instalación de encoder para la deformación angular.

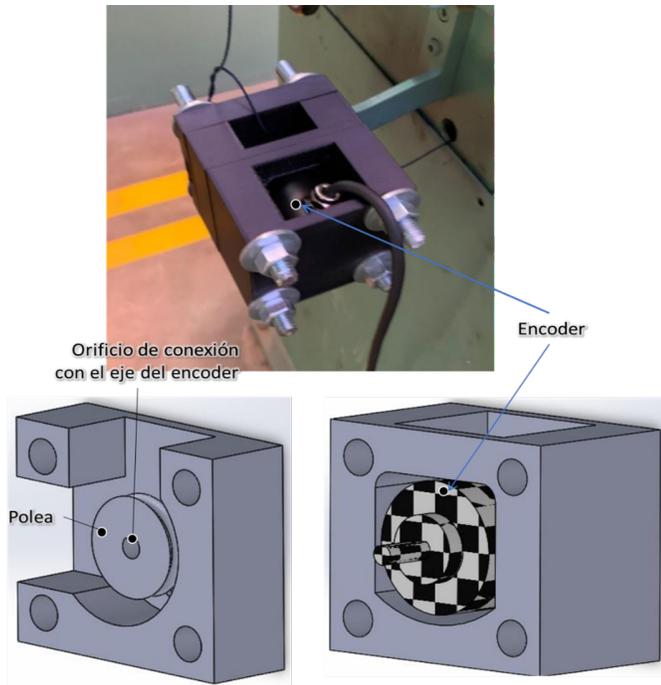


Fig. 13. Diseños 3D del soporte encoder deformación.



Fig. 14. Instalación del encoder para registrar el torque.

El segundo encoder, destinado a registrar algún movimiento relacionado al torque de las pruebas, es instalado a lado del rodillo giratorio con la finalidad de adquirir digitalmente la translación de la varilla (Fig. 14). Con la finalidad de no perder datos debido a posibles deslizamientos por falta de fricción, para el encoder se diseñó un engrane y en la varilla se adhirió un pequeño tramo de banda dentada (Fig. 15).

Como se puede observar, las bases y poleas para los sensores fueron construidas a partir de impresión 3D con filamento PLA. De esta manera se logó una implementación de instrumentación económica y poco invasiva al no interrumpir el proceso original para la graficadora física.

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la prueba destructiva por torsión (ver Fig. 16) de una probeta de 10 mm de diámetro, 170 mm de longitud, acero A36, y utilizando el sistema de medición electrónico. Las señales digitales provenientes de los sensores son recibidas y procesadas en la placa de desarrollo ESP32 para posteriormente ser comunicadas de forma inalámbrica a cualquier equipo computación que cuente con navegador web.



Fig. 15. Conexión varilla y encoder.

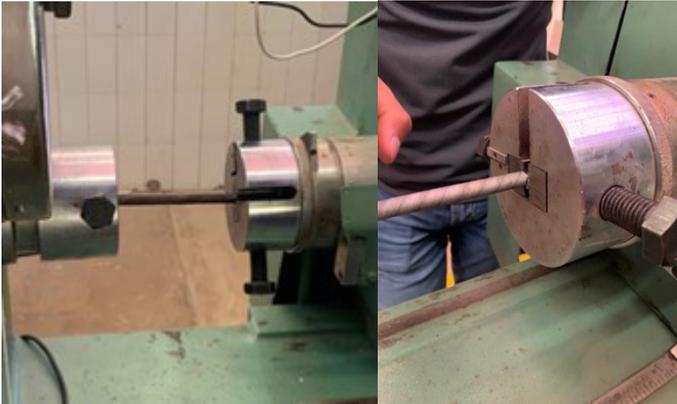


Fig. 16. Ensayo o prueba destructiva por torsión.

La Fig. 17 muestra el grafico digital construido a partir de mas de 2000 pares de datos (torque y deformación angular) obtenidos durante el ensayo de torsión, donde se puede observar el material empieza a presentar comportamiento elastoplástico a partir de los 4 kgf·m de torque.

Considerando que el esfuerzo de fluencia a cortante T_Y en el acero A36 se presenta a los 150 MPa [13] y utilizando la ecuación $T_Y = \tau_y c/J$, donde T_Y es el torque máximo elástico, c es el radio y J es el momento polar de inercia; es posible calcular el torque máximo permisible para no exceder la resistencia elástica de la pieza. De acuerdo con las características dimensionales de la probeta, el torque máximo elástico permisible es de 3 kgf·m. En torsión, los esfuerzos cortantes no se distribuyen de manera uniforme (Fig. 18), por este motivo, el torque que corresponde a la deformación contentamente plástica T_p es mayor que T_Y . El torque T_p para un eje circular sólido hecho de un material elastoplástico puede ser 4/3 veces T_Y [14].

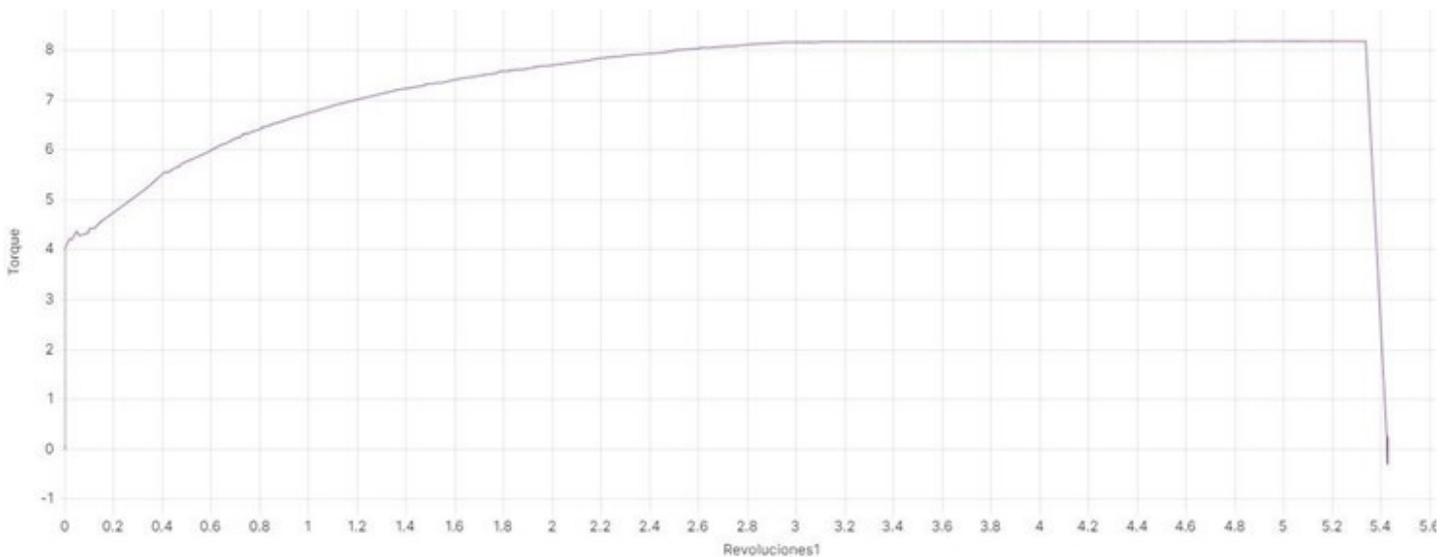


Fig. 17. Ensayo o prueba destructiva por torsión

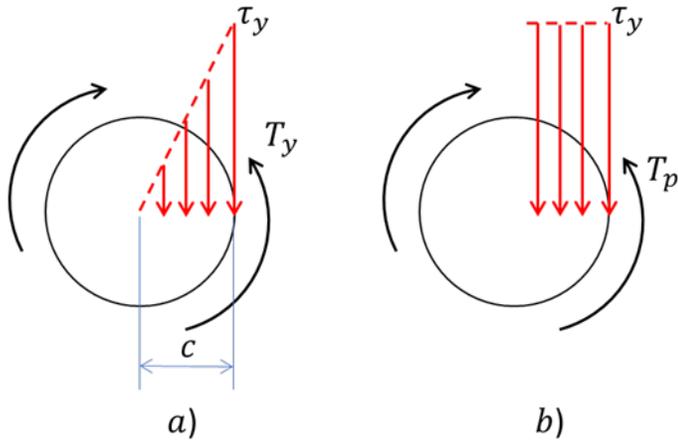


Fig. 18. Distribución de esfuerzo cortante en un elemento de sección circular sujeto a torsión.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se estudio el principio de funcionamiento de una máquina para pruebas destructivas de torsión del tipo electromecánico; con el objetivo de implementar elementos electrónicos y sistemas computacionales para mejorar la experiencia y precisión de los ensayos didácticos. Sin modificar los sistemas originales de instrumentación y graficación mecánicos, se colocaron sensores del tipo encoder rotativos para registrar el movimiento de algunos elementos de la máquina, los cuales están relacionados con las variables torque y deformación angular. Las señales de los encoders fueron recibidas y procesadas en una placa de desarrollo del tipo ESP32 para posteriormente ser comunicada, de manera inalámbrica, la información de los pares ordenados de datos que son graficados en forma digital en cualquier dispositivo con navegación web. La grafica obtenida por el sistema electrónico, debido a un ensayo de torsión, muestra un comportamiento tipo del material utilizado, es decir, empieza con una etapa lineal elástica, seguido de un proceso de plastificación y endurecimiento, para finalmente llegar a la ruptura. Además, el torque T_p correspondiente a los cálculos debido al tipo de material y las dimensiones de la pieza, corresponde a la deformación contentamente plástica que se aprecia en

la gráfica digital. Por lo tanto, se considera que la instrumentación electrónica de máquinas robustas puede contribuir en la extensión y aprovechamiento de la vida útil de los equipos didácticos.

REFERENCIAS

- [1] J. Pelleg, "Mechanical properties of materials," *Solid Mechanics and its Applications*, vol. 190, pp. 1–634, 2013, doi: 10.1007/978-94-007-4342-7/COVER.
- [2] P. R. N. Childs, *Mechanical Design: Second Edition*. 2003. doi: 10.1016/B978-0-7506-5771-6.X5000-4.
- [3] P. F. Koshelev, "Mechanical properties of materials at low temperatures," *Strength of Materials*, vol. 3, no. 3, 1971, doi: 10.1007/BF01527440.
- [4] I. Nishiyama, H. Kuramoto, and H. Noguchi, "Guidelines: Seismic Design of Composite Reinforced Concrete and Steel Buildings," *Journal of Structural Engineering*, vol. 130, no. 2, 2004, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:2(336).
- [5] C. Qiu, J. Qi, and C. Chen, "Energy-Based Seismic Design Methodology of SMABFs Using Hysteretic Energy Spectrum," *Journal of Structural Engineering*, vol. 146, no. 2, p. 04019207, Feb. 2020, doi: 10.1061/(asce)st.1943-541x.0002515.
- [6] C. Romero-Piedrahita, A. Rodriguez-Valencia, and M. Monroy-Jaramillo, "Ensamble e instrumentación de un banco didáctico para pruebas de arranque en motores de combustión interna," *Revista UIS Ingenierías*, vol. 19, no. 3, 2020, doi: 10.18273/revuin.v19n3-2020004.
- [7] S. Oriola Requena and F. Oriola Requena, "Instrumentación del Preludio de La revoltosa para agrupación de cámara. Una propuesta didáctico-interpretativa para la enseñanza y práctica de la música de cámara.," *ARTSEDU-CA*, no. 30, 2021, doi: 10.6035/artseduca.5725.
- [8] E. E. Kabanova and E. A. Vetrova, "The use of modern Electronic Gadgets in the educational process of the University," *European Journal of Contemporary Education*, vol. 8, no. 3, 2019, doi: 10.13187/ejced.2019.3.524.
- [9] G. M. D. Almaraz, L. M. T. Duarte, and C. J. T. Pacheco, "Tension-Torsion Fatigue Tests on the proton Ex-

change membrane Nafion 115, used in fuel cells,” South Florida Journal of Development, vol. 2, no. 5, 2021, doi: 10.46932/sfjdv2n5-037.

[10]I. Pérez, “Arduino IDE,” Publicación semestral, vol. 11, no. 21, 2023.

[11]Espressif, “ESP32 Series Datasheet,” Espressif Systems, 2022.

[12]E. Reyes-Flores, “Tipos de Sensores,” Con-Ciencia Serrana Boletín Científico de la Escuela Preparatoria Ixtlahuaco, vol. 1, no. 2, 2019.

[13]S. Schmauder, C. S. D. Chen, K. K. Chawla, N. Chawla, W. Chen, and Y. Kagawa, Handbook of mechanics of materials. 2019. doi: 10.1007/978-981-10-6884-3.

[14]C. W. de Silva, Mechanics of Materials. 2013. doi: 10.1201/b15431.