

MÉTODO SENCILLO PARA CONSIDERAR LA IRREGULARIDAD DE ESTRUCTURAS EN EL DISEÑO SISMORRESISTENTE. APLICACIÓN EN LA DETERMINACIÓN DE ACELERACIONES DE PISO PARA EL DISEÑO SÍSMICO DE DIAFRAGMAS, APÉNDICES, Y ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES EN EDIFICIOS

José I. Restrepo⁽¹⁾, Mario E. Rodríguez⁽²⁾, Juan Nuñez⁽²⁾ y Eduardo Reinoso⁽²⁾

RESUMEN

Para fines de diseño, la NTC Sismo 2017 y la propuesta de la NTC Sismo 2023 tienen procedimientos para considerar las condiciones de regularidad tanto en planta, como en elevación, de las estructuras. Algunas de estos procedimientos intervienen para determinar las aceleraciones de piso, con soluciones que no son amigables. Para el diseño sísmico de diafragmas, apéndices y elementos no estructurales en edificios, es necesario conocer las aceleraciones de piso, con las cuales es posible definir las fuerzas sísmicas de diseño en estos elementos. Para estructuras que no son regulares, la NTCS 2017, especifican procedimientos de cómputo de aceleraciones de piso muy diferentes a los especificados para estructuras regulares, y diferentes también a los procedimientos de la ASCE 7-16 y 22. Edificios con distribuciones irregulares de rigidez o masa pueden tener demandas de aceleraciones de piso más grandes que las correspondientes a edificios regulares.

Para los casos de edificios que no tienen configuraciones estructurales regulares, este trabajo propone un método sencillo de penalización de las aceleraciones de piso especificadas para estructuras regulares por la NTCS 2017. Este método se basa en resultados del estudio de propiedades dinámicas de 23 edificios de concreto reforzado, de marcos, o duales, con un número de niveles que varían de 4 a 30, con diferentes niveles de irregularidad. Estos edificios fueron diseñados por empresas consultoras de México, y las propiedades dinámicas fueron obtenidas del análisis de estos edificios, llevados a cabo por estas empresas. Se dan ejemplos sencillos de aplicación del empleo del método de penalización propuesto para casos de edificios que no son regulares. Los resultados de estos ejemplos sugieren la conveniencia del empleo del método, por su sencillez, por la congruencia de los resultados de su aplicación con la respuesta esperada de la estructura, y porque la relación de masas que emplea el método es una medida eficaz para identificar el nivel de irregularidad de una estructura.

Palabras clave: diseño sismorresistente; irregularidad estructural; aceleraciones de piso; diseño diafragmas; apéndices

Artículo recibido el 05 de octubre de 2023 y aprobado para su publicación el 16 de enero de 2024. Se aceptarán comentarios y/o discusiones hasta cinco meses después de su publicación.

⁽¹⁾ Universidad de California, San Diego, e-mail: jrestrepo@ucsd.edu

⁽²⁾ Instituto de Ingeniería, UNAM. Circuito Escolar, S/N, Ciudad de México, 04510, e-mail: mrod@unam.mx; jujonute@gmail.com; EReinosoA@iingen.unam.mx

DOI: [10.18867/ris.111.662](https://doi.org/10.18867/ris.111.662)

A SIMPLE METHOD TO CONSIDER STRUCTURAL IRREGULARITIES IN EARTHQUAKE-RESISTANT DESIGN OF STRUCTURES. APPLICATION TO COMPUTING FLOOR ACCELERATIONS FOR THE SEISMIC DESIGN OF DIAPHRAGMS AND NONSTRUCTURAL COMPONENTS

ABSTRACT

The 2017 Mexico City Seismic Building Code (MCBC, 2017) and the proposal for the 2023 Mexico City Seismic Building Code (MCBC, 2023) have specific seismic design procedures for considering different structural vertical and horizontal irregularities. The specifications of these norms for defining horizontal seismic floor accelerations are excessively elaborated. The values of these accelerations are needed to determine the design seismic forces in diaphragms and nonstructural components. In the case of irregular structures, the MCBC 2017 specifies elaborated procedures for computing floor accelerations that are pretty different from those set for regular structures and also very different from those specified in the ASCE 7-16 (ASCE 7-16, 2017) and ASCE 7-22 (ASCE 7-22, 2022) for buildings with irregularities.

For buildings with structural vertical and horizontal irregularities, this study proposes that the values of floor acceleration specified for regular structures are amplified depending on the assessment of the structural irregularities of buildings. This procedure was derived from studying the dynamic properties of 23 reinforced concrete buildings with earthquake-resisting systems based on frames or walls. These buildings were designed by Mexican consulting companies who obtained dynamic properties of these buildings. This paper offers simple examples using the proposed penalty factor for considering structural vertical and horizontal irregularities when computing floor accelerations. Results from these examples indicate several convenient features of the proposed design procedure, such as the consistency between the compute results and the expected seismic response of a structure, and because the ratio of seismic masses that uses the proposed procedure is a simple tool for identifying the importance of structural irregularity in a building.

Keywords: earthquake-resistant design; structural irregularities; floor accelerations; diaphragm design; nonstructural components

INTRODUCCIÓN

El problema del diseño sísmico de edificios con irregularidades en planta o elevación ha sido objeto de diferentes investigaciones en el mundo (Das et al., 2021; Mwafy y Khalifa, 2017), y en general normativas en diversos países especifican fuerzas sísmicas de diseño en estructuras irregulares que son mayores que las especificadas para edificios regulares. Para fines de diseño, la Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo 2017 (NTC Sismo, 2017), y la propuesta de la Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo 2023 (NTC Sismo, 2023), consideran las condiciones de condiciones de regularidad tanto en planta, como en elevación, de las estructuras. Estas Normas tiene procedimientos extensos para la clasificación de las condiciones de regularidad, particularmente en el caso de la propuesta de la NTC Sismo 2023. La NTC Sismo 2017 especifica incrementar la resistencia lateral requerida con los factores 1/0.8 y 1/0.75, para los casos de estructuras irregulares y muy irregulares, respectivamente. La propuesta de la NTC Sismo 2023 tiene un criterio diferente para el diseño sismorresistente de estructuras que no son regulares, ya que penaliza las distorsiones límites en estas estructuras.

Para determinar las aceleraciones de piso, la NTC Sismo 2017 y la propuesta de la NTC Sismo 2023, toman en cuenta algunos aspectos de la irregularidad en planta de estructuras. Por ejemplo, la NTC Sismo 2017 especifica que, si en algún entrepiso el desplazamiento lateral de un punto de la planta excede en más del 20% el desplazamiento lateral promedio de los extremos de esta planta, la estructura se clasifica como irregular, y la determinación de aceleraciones de piso debe seguir procedimientos elaborados, diferentes a los del caso de estructuras regulares. En la propuesta de la NTC Sismo 2023, se dan procedimientos para considerar la clasificación de regularidad en estructuras, que en su mayor parte han cambiado respecto a los especificados en las NTC Sismo 2017. Por ejemplo, en el caso de irregularidad en planta, la propuesta de la NTC Sismo 2023 considera que una estructura es irregular en torsión o fuertemente irregular en torsión cuando en cualquiera de las plantas de la estructura existe un punto que bajo las acciones de diseño presente un desplazamiento lateral que excede en más de 15% o 30%, respectivamente, el desplazamiento lateral promedio de los extremos de la planta en la dirección de análisis. Estos procedimientos de estas Normas se basan en considerar los desplazamientos laterales de los diafragmas para determinar las condiciones de regularidad en estructuras. Sin embargo, las fuerzas de diseño para diafragmas, apéndices y elementos no estructurales, son el resultado de aceleraciones absolutas horizontales en los sistemas de piso, y no dependen de los desplazamientos laterales de los diafragmas. Esto cuestiona la racionalidad de la relación entre las condiciones de regularidad en estructuras consideradas en estas Normas y los posibles valores de las aceleraciones de piso en estructuras irregulares

A partir de 2017, la Norma Técnica Complementari para Diseño por Sismo en la Ciudad de México (NTCS, 2017) especifican procedimientos para el cómputo de las aceleraciones de piso. Estas normativas para la CDMX tienen procedimientos para el cómputo de estas aceleraciones que dependen de si la estructura es regular o no. Este enfoque es diferente a los procedimientos de la ASCE 7-16 y ASCE 7-22, ya que éstas no permiten el empleo de estructuras muy irregulares para niveles de importancia específicos en zonas de alta actividad sísmica en los Estados Unidos. Para el caso de diafragmas en edificios, la ASCE 7-16 y ASCE 7-22 especifican procedimientos de cómputo de aceleraciones de piso que son conceptualmente semejantes a los de las referidas normativas de la CDMX para el caso de estructuras regulares.

Edificios con distribuciones irregulares de rigidez o masa pueden tener demandas de aceleraciones de piso más grandes que las correspondientes a edificios regulares. Los casos de estructuras irregulares son permitidos en estas normativas para la CDMX, para lo cual, para el cómputo de aceleraciones de piso, especifican procedimientos de análisis que consideran combinaciones de aceleraciones en el plano del sistema de piso del edificio, que resultan de un análisis elástico tridimensional de la estructura bastante elaborado. No hay certidumbre de que un análisis elástico de un edificio y los procedimientos de las Normas permitan conocer de manera confiable la respuesta de un edificio que no es regular. El problema se agrava debido a que en general la práctica constructiva en México se caracteriza porque generalmente las estructuras no son regulares. Esta situación indica la necesidad de contar con un procedimiento sencillo de cómputo de aceleraciones de piso, que se pueda emplear en estructuras que no son regulares, lo que permitirá evitar el empleo de procedimientos excesivamente elaborados como los existentes en las NTCS (2017).

Para los casos de edificios que no tienen configuraciones estructurales regulares, este trabajo propone un procedimiento sencillo de penalización de las aceleraciones de piso especificadas para estructuras regulares por las NTCS 2017. Este procedimiento ha sido incluido en la nueva Norma Técnica Complementaria para Diseño por Sismo en la Ciudad de México (NTCS, 2023). El procedimiento se basa en resultados del estudio de propiedades dinámicas de 23 edificios de concreto reforzado, de marcos, o

duales, con un número de niveles que varían de 4 a 30, con diferentes niveles de irregularidad. Estos edificios fueron diseñados en México, y las propiedades dinámicas fueron obtenidas del análisis de estos edificios, llevados a cabo por los encargados de efectuar los proyectos estructurales de estos edificios, con procedimientos convencionales que se emplean en oficinas de ingeniería estructural para el diseño sísmico de edificios. Este trabajo muestra ejemplos sencillos de aplicación del empleo del procedimiento propuesto para casos de edificios que no son regulares, que muestran resultados que sugieren la conveniencia de su empleo, no solo por su sencillez, sino también por la congruencia de estos resultados con la respuesta esperada de la estructura. Además, estos ejemplos muestran algunas debilidades de los procedimientos de la Norma NTC Sismo 2017 y propuesta NTC Sismo 2023 para determinar las condiciones de regularidad en estructuras.

ACELERACIONES DE PISO ESPECIFICADAS EN LA NTC SISMO 2017

Estructuras regulares con diafragmas rígidos

En el caso de estructuras regulares con diafragmas rígidos, la aceleración absoluta horizontal de piso de un edificio de n niveles, en el nivel n se calcula como:

$$a_n = \sqrt{\left(\frac{1.6a_1}{Q'}\right)^2 + \eta_a a_o^2} \quad (1)$$

donde a_1 es la ordenada del espectro elástico de aceleraciones para el periodo fundamental del sistema en la dirección de análisis, y η_a se calcula como:

$$\eta_a = 1.4 \sqrt{n-1} \leq 5 \quad (2)$$

La aceleración absoluta en cualquier punto del i -ésimo diafragma se define como el producto $\Omega_i a_o$, donde a_o es la ordenada en el origen del espectro de diseño, y Ω_i un factor de amplificación, determinado como:

$$\Omega_i = \left(\frac{h_i}{h_n}\right) \left(\frac{a_n}{a_o} - 1\right) + 1 \quad (3)$$

Estructuras irregulares o muy irregulares con diafragmas rígidos

La aceleración horizontal absoluta horizontal en un punto del sistema de piso del nivel i del edificio, a_i , se calcula considerando las aceleraciones absolutas en las direcciones X y Y , a_{ix} y a_{iy} , respectivamente, como:

$$a_i = \sqrt{a_{ix}^2 + a_{iy}^2} \quad (4)$$

donde las aceleraciones a_{ix} y a_{iy} se calculan como:

$$a_{ix} = \sqrt{\sum \left(\frac{a_{ikx}}{Q'} \right)^2 + \sum a_{ijx}^2} \quad (5)$$

$$a_{iy} = \sqrt{\sum \left(\frac{a_{iky}}{Q'} \right)^2 + \sum a_{ijy}^2} \quad (6)$$

donde a_{ijx} y a_{ijy} son las aceleraciones absolutas en el nivel i en X y Y , respectivamente, producidas por el modo j , y resultan de un análisis elástico tridimensional de la estructura.

El primer sumando en las ecuaciones (5) y (6) toman en cuenta las aceleraciones máximas correspondientes a las componentes de los modos fundamentales de traslación, y de torsión alrededor del centro de masa. La cantidad de modos a considerar para el diseño debe ser tal que la suma de las masas modales sea mayor que el 90% de la masa total de la estructura.

El procedimiento de las normativas de la CDMX, NTCS (2017) para el cómputo de aceleraciones de piso en estructuras que no son regulares es excesivamente elaborado. Este procedimiento es muy diferente al especificado en la ASCE 7-16 y ASCE 7-22 para el cómputo de aceleraciones de piso en diafragmas de edificios, las cuales consideran modos traslacionales independientes, y la contribución de los modos superiores la simplifican considerando un solo término, como en el procedimiento de cómputo de aceleraciones de piso en estructuras regulares de la NTCS (2017). El procedimiento de esta Norma para el cómputo de aceleraciones de piso en estructuras que no son regulares en realidad no se ha aplicado en la práctica, debido a que los programas comerciales que se emplean en la práctica no tienen la característica de poder reducir solamente contribución de elástica de diseño de los modos fundamentales por el factor de reducción por comportamiento sísmico, Q' . Esto se debe a que estos programas llevan a cabo esta reducción para todos los modos considerados.

Se infiere que es deseable el poder contar con un procedimiento sencillo de cómputo de aceleraciones de piso en estructuras que no son regulares, procedimiento que se elabora en lo que sigue. Se propondrá para los casos de estructuras irregulares y fuertemente irregulares, un factor de penalización a aplicar a los valores de aceleraciones de piso que se obtienen con el procedimiento para el caso de estructuras regulares con diafragmas rígidos.

CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS RELEVANTES DE ESTRUCTURAS REGULARES

Este trabajo estudió las características de edificios regulares de concreto reforzado en suelo duro en la CDMX, diseñados en esta investigación para cumplir con los requisitos de la NTC Sismo 2017. Se consideraron los casos de siete edificios regulares, con una masa típica por nivel, con diferentes números de niveles, 1, 3, 5, 8, 10, 15 y 20. Estos edificios fueron de dos tipos, a base de marcos, y a base de la combinación de muros estructurales y marcos. Las plantas y elevaciones de estos edificios fueron típicas, cambiando solo las dimensiones y refuerzos de los elementos estructurales. La figura 1 muestra las elevaciones típicas de los edificios de 10 niveles de este grupo de edificios, el caso a base de marcos, figura 1a, así como el caso a base de la combinación de muros estructurales y marcos, figura 1b.

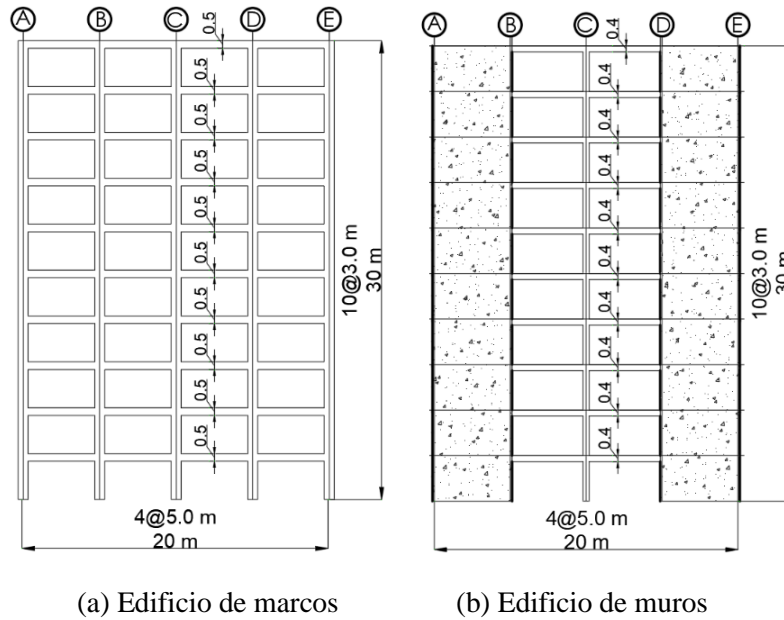
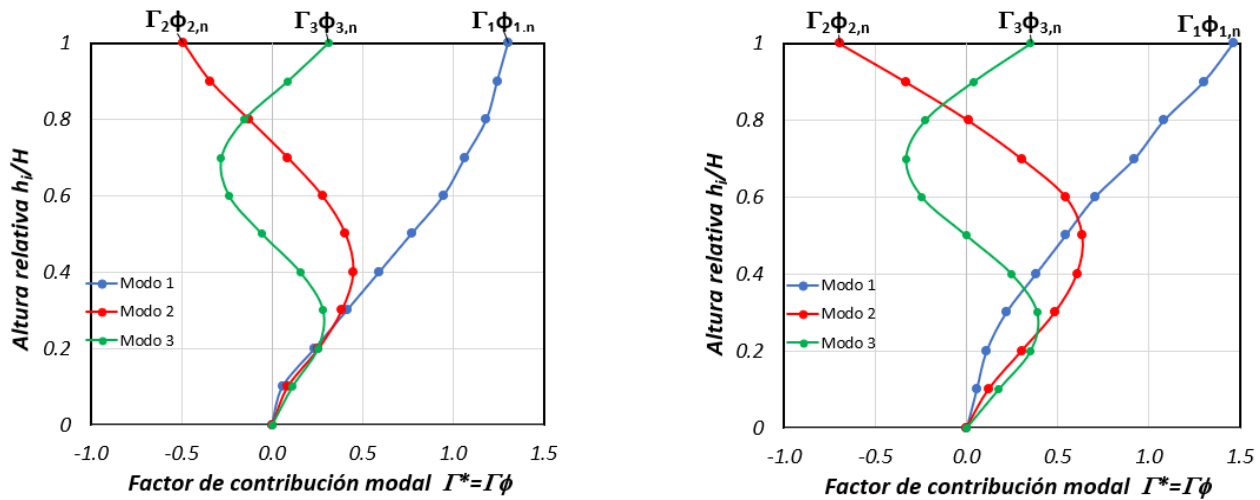


Figura 1. Elevaciones típicas de los edificios regulares de 10 niveles estudiados.

La figura 2 muestra las contribuciones modales de los tres primeros modos de los edificios regulares de 10 niveles a base de marcos y de muros mostrados en la figura 1. La contribución modal de un modo, I^* , se define como el producto del factor de participación I y el valor de la forma modal ϕ . Las figuras 2a y 2b muestra las contribuciones modales para los casos de los edificios a base de marcos y a base de muros estructurales, respectivamente. Es de interés la forma modal del primer modo, por influir de manera importante en la distribución de distorsiones de entrepiso, γ , en los diferentes niveles del edificio. Para comentar estas distorsiones de entrepiso se define la distorsión global de azotea, D_r , como:

$$D_r = \frac{\delta}{H} \quad (7)$$

donde δ es el desplazamiento del nivel azotea del edificio respecto a su base, y H es la altura del edificio. Si el valor de D_r es el mismo para el edificio de marcos y para el de muros, la inspección de las formas modales mostradas en la figura 2 sugiere que en el edificio a base de marcos los valores de γ resultan de amplificaciones de D_r que son mayores que para el caso del edificio regular a base de muros estructurales, principalmente en los niveles inferiores. Esta característica sugiere que es conveniente el empleo de edificios con muros estructurales, además de la conocida característica de mayor rigidez lateral de edificios con muros estructurales respecto a la de edificios a base de marcos.



(a) Edificio regular de 10 niveles, marcos

(b) Edificio regular de 10 niveles, muros

Figura 2. Contribuciones modales de los tres primeros modos para los casos de los edificios de 10 niveles a base de marcos, y de muros, mostrados en la figura 1.

La inspección de las formas modales en edificios también sugiere conocer cómo participan estos modos en edificios regulares y en los que no lo son. Por ejemplo, si la masa modal del primer modo traslacional es m_1 , y la masa total es m_T , se plantea la interrogante de cómo participa la relación de masa modal m_1/m_T en la respuesta sísmica de edificios, así como si esta relación podría ser una medida de la irregularidad estructural.

La figura 3 muestra los valores calculados con el programa tridimensional ETABS para la relación de masa modal m_1/m_T para los siete edificios regulares mencionados a base de marcos, y los siete edificios que emplean muros estructurales. Los resultados para estos dos grupos de edificios regulares mostrados en la Fig. 2 indican que la relación m_1/m_T para edificios con más de 5 niveles varía bastante menos que para los casos de edificios de pocos niveles. La relación m_1/m_T para edificios regulares altos de marcos tienden al valor 0.75, y para edificios regulares altos con muros estructurales, esta relación tiende al valor 0.65. Este último valor es congruente con el valor 0.61 correspondiente al valor de la relación m_1/m_T para un muro en voladizo con masa continua (Chopra, 2012), comparativa que se puede considerar válida si se considera la analogía de este muro con el caso del edificio con muros estructurales con infinito número de niveles.

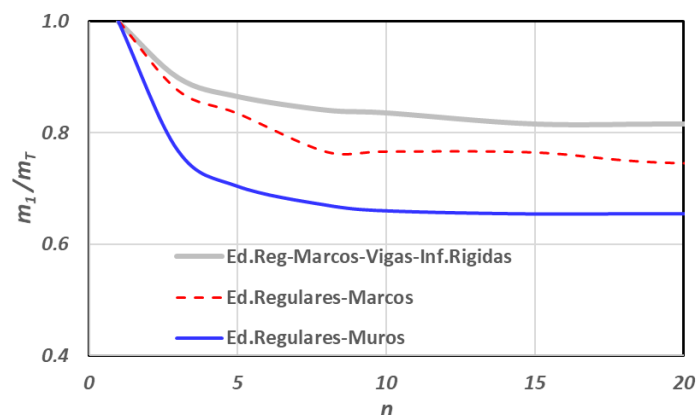


Figura 3. Curva de la relación modal m_1/m_T en función del número de niveles para estructuras a base de marcos y a base de muros.

En realidad, la respuesta dinámica de un edificio a base de marcos depende de la relación de rigideces trabe a columna, un caso extremo simplista que da una idea del efecto de esta relación es el caso de vigas de rigidez infinita. La Fig. 3 muestra los valores de la relación m_1/m_T para este caso para los edificios regulares de marcos mencionados. Estos resultados muestran que edificios regulares a base de marcos, en este caso con vigas de rigidez infinita, y con más de 5 niveles, tienden a un valor constante para la relación modal m_1/m_T , con un valor cercano a 0.8. Este valor es cercano al valor 0.82, el cual corresponde a la solución exacta de la relación m_1/m_T de la viga en voladizo de cortante uniforme (Lee et al., 2002).

En lo que sigue se investiga como varía la relación modal m_1/m_T para los casos de edificios que no son regulares.

CARACTERÍSTICAS DINÁMICAS RELEVANTES DE ESTRUCTURAS QUE NO SON REGULARES

Esta investigación emplea resultados del análisis modal de 23 edificios de concreto reforzado, marcos, o duales, con un número de niveles que varían de 4 a 30, con diferentes niveles de irregularidad. Estos edificios fueron analizados y diseñados por empresas consultoras de México, para ser construidos en el país. Como ejemplos ilustrativos de los 23 edificios mencionados, la figura 4 muestra una planta típica y vista 3D de un edificio clasificado como regular según la NTCS (2017). La figura 5 muestra una planta típica y vista 3D de un edificio clasificado como irregular según la NTCS (2017).

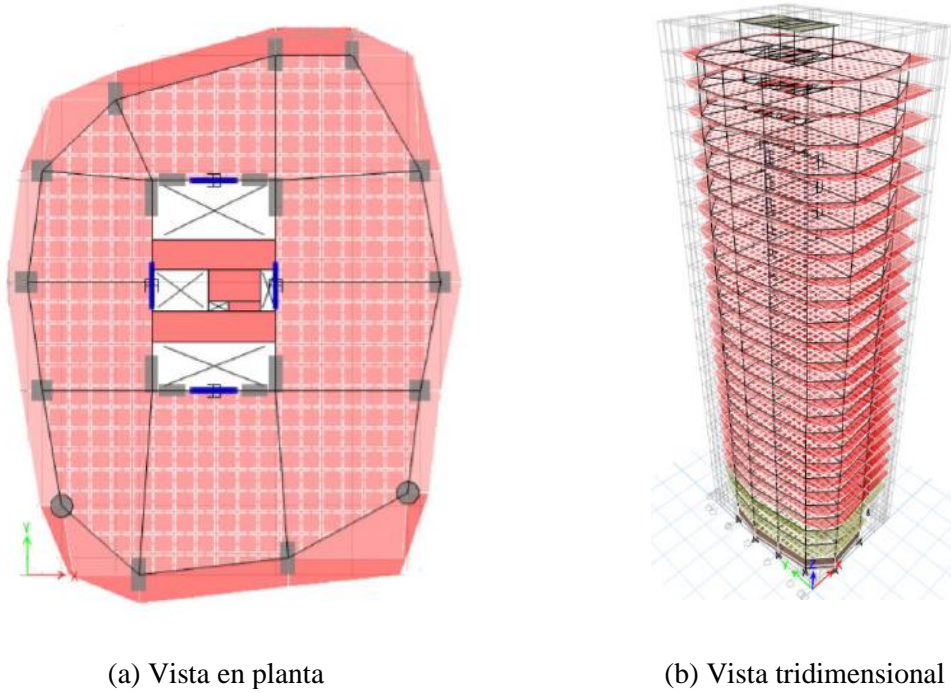


Figura 4. Ejemplo de edificio clasificado como regular.

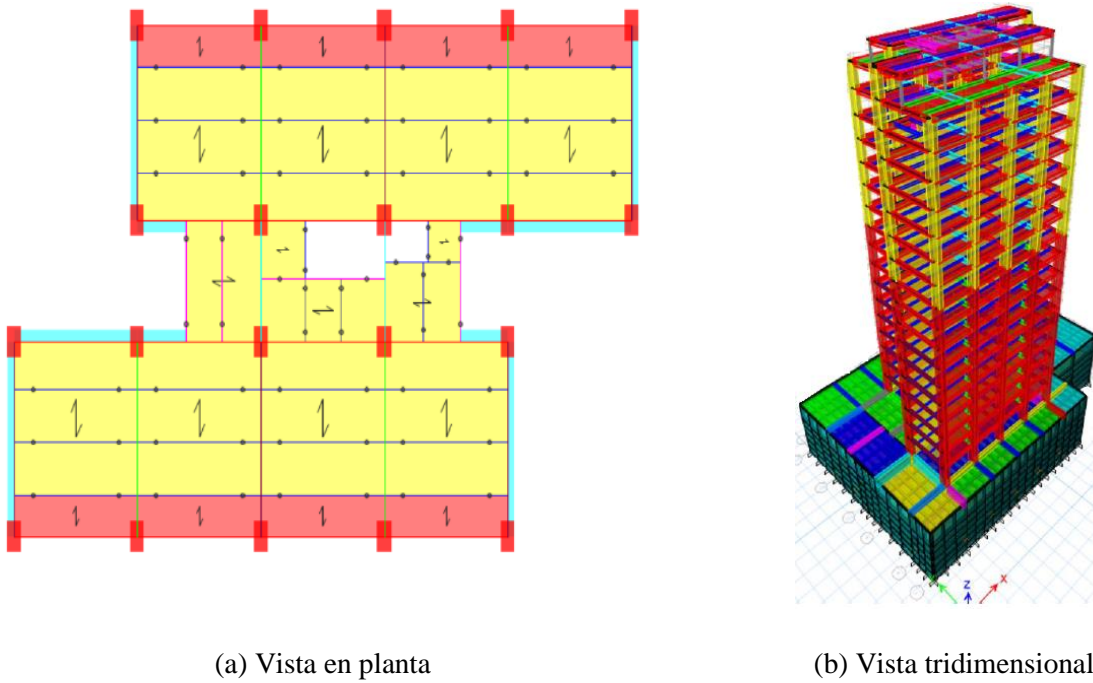


Figura 5. Ejemplo de edificio clasificado como irregular.

La tabla 1 muestra las características de los 23 edificios estudiados. Las columnas 2 y 3 de esta tabla muestra la identificación del edificio y el número de niveles, respectivamente; las columnas 4 y 5 muestran el tipo de sistema estructural en cada dirección del edificio. La columna 6 de la Tabla 1 lista los requisitos que los edificios cumplen o no cumplen de las secciones 5.1, 5.2 y 5.3, correspondientes a estructuras regulares, irregulares o muy irregulares, respectivamente, del Capítulo 5 de la NTC Sismo (2017) para la CDMX. Con el empleo de estos requisitos es posible llevar a cabo la clasificación de los edificios en estudio que se muestra en la columna 7 de la tabla.

Tabla 1. Características de los 23 edificios estudiados

Num.	Edificio	# Niveles	Sistema Estructural		Requisitos de la seccion 5 de la NTCS 2017	Clasificación
			Dirección X	Dirección Y		
1	2	3	4	5	6	7
1	LO1	13	Dual	Dual	Cumple 1,2,3,6,8,9,10, No cumple 4-Nota: Tienen BRBs.	Regular
2	BAC	26	Dual	Dual	Cumple-1,2,3,4,6,8,9,10.	Regular
3	GAFE	4	Dual	Dual	Cumple-1,2,3,4,8,9,10.	Regular
4	GU7	5	Marcos	Dual	Cumple-1,2,3,4,6,8,9,10, No cumple 11, Nota: Muros comienzan en vigas.	Irregular
5	AR3	10	Dual	Marcos	Cumple 1,3,6,8,9,10, No cumple 2 y 4.	Irregular
6	CODV	16	Dual	Dual	Cumple 1,2,4,6,8,9,10, No cumple 3, 11.	Irregular
7	ORHE	5	Dual	Dual	Cumple 1,2,3,6,8,9,10, No cumple 4 y 12.	Irregular
8	UX2	5	Muros	Dual	Cumple-1,2,3,8,9,10, No cumple 4 y 6, Nota:Muros comienzan en vigas.	Irregular
9	CF	16	Marcos	Marcos	Cumple-1,2,3,6,9,10, No cumple 4,8 y 12.	Irregular
10	RE50	7	Muros	Muros	Cumple 1,2,3,4,8,9,10, No cumple 6.	Irregular
11	SGM	9	Dual	Dual	Cumple 1,2,3,4,8,9,10, No cumple 11.	Irregular
12	CCU	7	Muros	Muros	Cumple-1,2,3,4,8,9,10, No cumple 6.	Irregular
13	STI-L	5	Dual	Dual	Cumple 1,2,6,8,9,10, No cumple 3 y 4.	Irregular
14	VILCIS	9	Dual	Dual	Cumple 1,2,8,9,10, No cumple 3,4 y 6.	Irregular
15	SE34	5	Marcos	Dual	Cumple-2,3,8,9,10, No cumple-1,4 y 6.	Muy irregular
16	PTA	20	Marco	Dual	Cumple 1,2,3,4,6,8,9,10, No cumple 5.3 (2), Nota: Los voladizos se sostiene con diagonales y elementos verticales como tensores.	Muy irregular
17	LA4	26	Marco	Marco	Cumple 1,2,6,8,9,10, No cumple 3, 4 y 11.	Muy irregular
18	IGL-O	7			Cumple 2,3,8,9,10, No cumple 1,4 y 6.	Muy irregular
19	RN47	18	Dual	Marcos	Cumple 1,2,3,6,8,9,10, No cumple 4 y 5.3 (1).	Muy Irregular
20	SLP2	10			Cumple 1,2,6,8,9,10, No cumple 3,4 y 5.3 (1).	Muy Irregular
21	AR2	5	Marcos	Dual	Cumple 1,2,3,4,8,9,10, No cumple 6 y 11, Nota: Muros comienzan en vigas, Ensanchamiento de columna en piso superior.	Muy Irregular
22	SA8	5	Muros	Muros	Cumple 2,3,8,9,10, No cumple 1,4,6. Nota:Muros comienzan en vigas, losa de transferencia.	Muy Irregular
23	TL	30	Marcos	Marcos	Cumple-1,2,3,6,8,9,10, No cumple 4, 11 y 12.	Muy Irregular

La tabla 2 corresponde a la misma base de datos de 23 edificios de la tabla 1, algunas de cuyas características, como la identificación del edificio y el número de niveles se muestran nuevamente en las columnas 2 y 3 de la tabla 2, respectivamente. Los periodos fundamentales traslacionales de los edificios en las direcciones X y Y se muestran en las columnas 4 y 5 de la tabla 2, respectivamente. Las columnas 6 a la 7 de la tabla 2 muestra la relación modal m_1/M_T para el caso del primer modo traslacional en X que contribuye en X y Y, respectivamente. La columna 8 de la tabla 2 muestra la suma de estas contribuciones en X y Y. Las columnas 9 a 11 muestra cómo se obtiene la relación modal m_1/M_T para el caso el caso del primer modo traslacional en la dirección Y, siguiendo el mismo procedimiento descrito para el caso del

primer modo traslacional en X . Finalmente, la columna 12 de la tabla 2 muestra los resultados del cómputo de la relación modal m_1/m_T para los 23 edificios en estudio, obtenidos para cada edificio como el menor valor de esta relación para las direcciones X y Y , dadas en las columnas 8 y 11 de la tabla 2, respectivamente.

Tabla 2. Características dinámicas de los 23 edificios estudiados

Num.	Edificio	# Niveles	Periodos (s)		Primer modo trans. en X (m_1/m_T)			Primer modo trans. en Y (m_1/m_T)			m_1/m_T
			T_x	T_y	U_x	U_y	U_{x+U_y}	U_x	U_y	U_{x+U_y}	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	LO1	13	0.98	0.91	0.64	0.01	0.65	0.01	0.64	0.65	0.65
2	BAC	26	3.19	3.42	0.64	0.01	0.65	0.01	0.68	0.69	0.65
3	GAFE	4	0.39	0.50	0.90	0.00	0.90	0.00	0.86	0.86	0.86
4	GU7	5	0.23	0.46	0.53	0.00	0.53	0.00	0.54	0.54	0.53
5	AR3	10	1.28	0.39	0.60	0.00	0.60	0.00	0.54	0.54	0.54
6	CODV	16	2.65	2.85	0.49	0.03	0.52	0.01	0.54	0.55	0.52
7	ORHE	5	1.43	1.35	0.65	0.00	0.65	0.00	0.61	0.61	0.61
8	UX2	5	0.23	0.12	0.48	0.00	0.48	0.00	0.46	0.46	0.46
9	CF	16	2.14	1.67	0.52	0.00	0.52	0.00	0.49	0.49	0.49
10	RE50	7	2.11	0.92	0.46	0.00	0.46	0.00	0.42	0.42	0.42
11	SGM	9	2.63	1.53	0.44	0.00	0.44	0.00	0.43	0.43	0.43
12	CCU	7	0.52	1.14	0.44	0.01	0.44	0.00	0.57	0.57	0.44
13	STI-L	5	0.37	0.54	0.49	0.01	0.49	0.02	0.41	0.43	0.43
14	VILCIS	9	1.14	1.22	0.51	0.00	0.51	0.00	0.50	0.50	0.50
15	SE34	5	0.23	0.75	0.26	0.02	0.28	0.00	0.59	0.59	0.28
16	PTA	20	2.06	2.70	0.29	0.00	0.29	0.00	0.18	0.18	0.18
17	LA4	26	4.30	4.21	0.33	0.01	0.34	0.02	0.35	0.37	0.34
18	IGL-O	7	0.32	0.44	0.38	0.00	0.38	0.01	0.49	0.49	0.38
19	RN47	18	1.66	1.42	0.34	0.00	0.34	0.00	0.33	0.33	0.33
20	SLP2	10	1.26	1.18	0.35	0.00	0.35	0.00	0.35	0.35	0.35
21	AR2	5	0.20	0.79	0.41	0.02	0.43	0.00	0.50	0.50	0.43
22	SA8	5	0.26	0.42	0.31	0.13	0.44	0.11	0.20	0.31	0.31
23	TL	30	3.41	4.81	0.42	0.00	0.42	0.00	0.39	0.39	0.39

Los valores de la relación modal m_1/m_T para los 23 edificios en estudio que muestra la tabla 2 se grafican en la figura 6, en función del número de niveles de estos edificios. Para fines de comparación se muestran los valores de la relación modal m_1/m_T para el caso de edificios regulares con muros estructurales, mostrados también en la Fig. 3. Los resultados de la figura 6 indican una clara relación entre los valores de la relación modal m_1/m_T y la clasificación de irregularidad de edificios según las NTC Sismo (2017). Por ejemplo, la relación m_1/m_T , para el caso de los edificios definidos como muy irregulares, tiene valores aproximadamente en el intervalo entre 0.2 y 0.4, para el caso de edificios irregulares, el intervalo de valores de esta relación es de 0.4 a 0.6. Como muestra la figura 6, los edificios regulares tienen valores de m_1/m_T mayores que 0.6, muy cercanos a los valores de esta relación para el caso del edificio regular hipotético de 10 niveles a base de muros, cuyos resultados se muestran en la figura 3, y nuevamente en la figura 6 con línea continua.

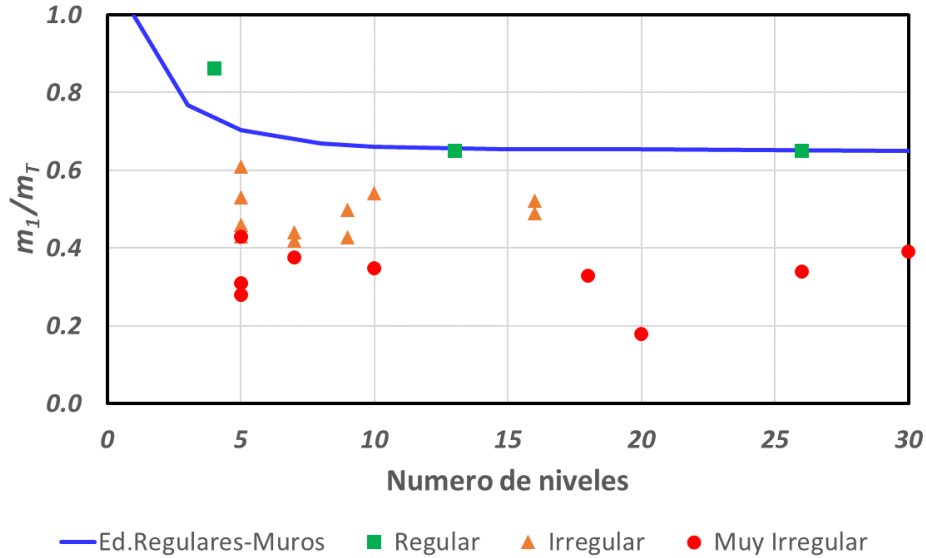


Figura 6. Relación modal m_1/m_T para los 23 edificios en estudio, y para edificios regulares a base de muros estructurales.

DEFINICIÓN DE ACELERACIONES DE PISO EN EDIFICIOS CON DIAFRAGMAS RÍGIDOS CON DIFERENTES NIVELES DE IRREGULARIDAD

Para definir las aceleraciones de piso de un edificio irregular con diafragmas rígidos, esta investigación propone emplear el criterio de penalizar las aceleraciones de piso de un edificio regular empleando el factor de penalización λ_p , factor que, como se muestra más adelante, toma en cuenta los valores de relación modal m_1/m_T . Con este criterio la aceleración de piso del nivel azotea se define como:

$$a_n = \lambda_p \sqrt{\left(\frac{1.6a_1}{Q'}\right)^2 + \eta_a a_o^2} \quad (8)$$

donde η_a se define con la ec. (2). Como en el caso de estructuras regulares, la aceleración absoluta en cualquier punto del i -ésimo diafragma se define como el producto $\Omega_i a_o$, y Ω_i se define con la ec. (3).

El factor de penalización, λ_p , en la ec. (8) se define como:

$$\lambda_p = \min \left(2, \max \left(1, \left(\frac{2n+1.2}{3.2n \frac{m_1}{m_T}} \right) \right) \right) \quad (9)$$

Esta definición del factor de penalización λ_p se basa en el criterio de que el valor de este factor se limita al intervalo de valores entre 1 y 2. El valor de 2 de este intervalo se basa en el criterio de evitar los casos de que en estructuras que no son regulares, se tengan factores de penalización que correspondan a resistencias en estructuras mayores que las elásticas de diseño. Además, se puede mostrar que para el caso

de un edificio regular a base de muros estructurales con infinito número de niveles, con la ecuación (9) se obtiene el valor $\lambda_p = 1$. Como se comentó antes, el caso de este edificio se puede comparar con el caso de un muro en voladizo con masa continua, donde $m_I/m_T = 0.61$.

La figura 7 muestra resultados del empleo de la ecuación (9) para el cómputo del factor de penalización, λ_p , para los 23 edificios de la base de datos de este estudio. Estos resultados muestran que para estructuras regulares el factor de penalización λ_p es igual a 1, para estructuras irregulares, λ_p varía aproximadamente en el intervalo de 1.2 a 1.6, y en estructuras muy irregulares λ_p tiene valores en el intervalo de 1.6 a 2.

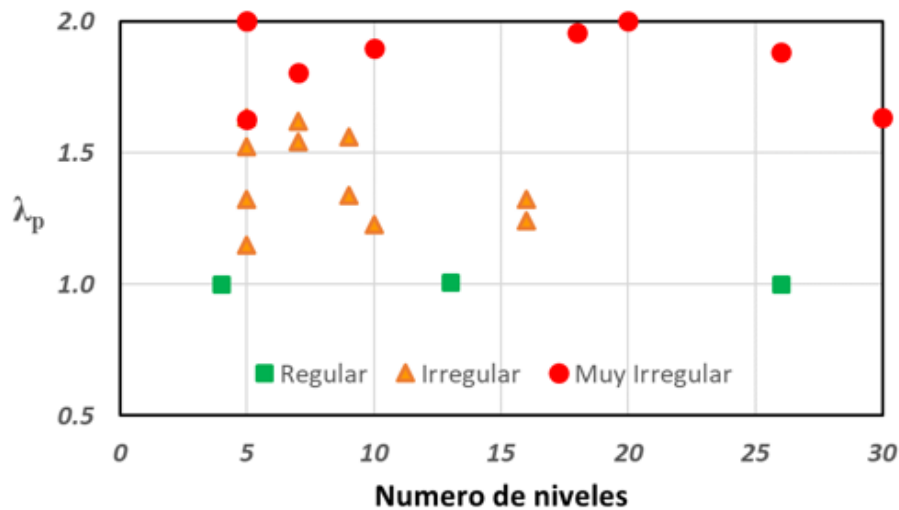


Figura 7. Factor de penalización λ_p para los 23 edificios en estudio.

Es de interés interpretar la variación del parámetro λ_p cuando se consideran diversos casos de irregularidad de edificios con diversos números de niveles, n . Para ello se estudia una población de edificios con estructuras clasificadas como muy irregulares, irregulares, y regulares de acuerdo con el capítulo 5 de la NTC S (2017), para lo cual para la relación m_I/m_T se consideran los valores 0.3, 0.5 y 0.7, respectivamente, valores que resultan de la interpretación de los resultados mostrados en la figura 6. Los resultados de la variación del parámetro λ_p para esta población de edificios se muestran en la figura 8. Estos resultados indican que, para edificios de más de 10 niveles con estructuras regulares, irregulares, y muy irregulares, los valores de λ_p para las relaciones de m_I/m_T empleadas, tienden a ser constantes e iguales a 1, 1.3 y 2, respectivamente.

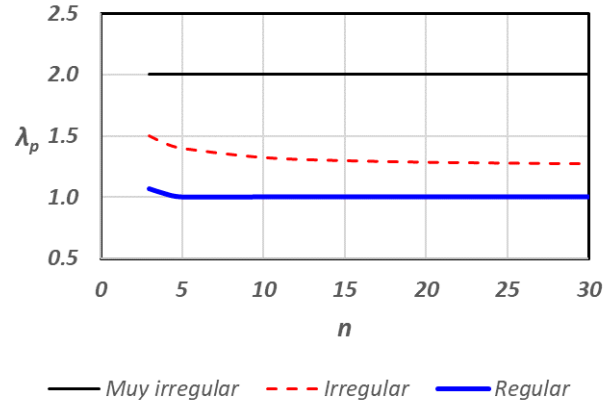


Figura 8. Factor de penalización λ_p para edificios con estructuras con diferentes tipos de irregularidad.

La NTCS 2017 emplean un criterio de corrección del factor Q' por irregularidad, con el cual las fuerzas sísmicas de diseño se amplifican en estructuras que no son regulares. Aun cuando el factor de penalización que se propone en este estudio tiene fines diferentes al mencionado factor de corrección de Q' de la NTCS 2017, es de interés poner en evidencia que este factor de corrección para estructuras que no son regulares tiene una distribución escalonada con solo dos valores. El criterio propuesto lleva a valores del factor de penalización en una estructura irregular con variación continua, dependiendo del valor no solo del número de niveles del edificio, sino también de los valores de relación modal m_1/m_T . Esta observación sugiere la conveniencia de explorar en el futuro el uso del empleo del factor de penalización λ_p como factor de corrección del factor Q' por irregularidad.

PROPUESTA PARA LA NORMA TECNICA COMPLEMENTARIA PARA EL DISEÑO POR SISMO 2023 PARA DETERMINAR ACELERACIONES DE PISO EN EDIFICIOS

Determinación de a_n para estructuras regulare

Para obtener la aceleración absoluta del extremo superior del edificio, a_n , se propone emplear la ecuación (8), donde para estructuras regulares el factor de penalización λ_p es igual a 1, y η_a se calcula con la ecuación (2).

Determinación de a_n para estructuras irregulares o fuertemente irregulares

En los casos de estructuras clasificadas como irregulares o fuertemente irregulares según la sección 2.2 de las NTC Sismo 2023, se puede emplear la ec. (8), utilizando un factor de penalización λ_p dado por la siguiente ecuación:

$$\lambda_p = \min \left(2, \max \left(1.2, \left(\frac{2n + 1.2}{3.2n \frac{m_1}{m_T}} \right) \right) \right) \quad (10)$$

La ecuación (9) se convierte en la ecuación (10) propuesta para la NTC Sismo 2023 para los casos de estructuras irregulares o fuertemente irregulares, empleando en la ecuación (9) de manera conservadora el valor 1.2 en lugar de 1.

EVALUACIÓN DE PROCEDIMIENTOS PARA CONSIDERAR LA IRREGULARIDAD EN ESTRUCTURAS SEGÚN LAS NTC SISMO 2017, PROPUESTA NTC SISMO 2023 Y PROPUESTA DE ESTE ESTUDIO. APLICACIÓN A LA DETERMINACION DE ACELERACIONES DE PISO

De acuerdo con la NTC Sismo 2017, en las estructuras que no son regulares, para el cómputo de aceleraciones de piso en estas estructuras es necesario emplear las ecuaciones (4) a (6), ya comentadas. En la propuesta de la NTC Sismo 2023, se dan procedimientos para considerar la clasificación de regularidad en estructuras, que en su mayor parte han cambiado respecto a los especificados en la NTC Sismo 2017, pero que siguen empleando criterios como el de la evaluación de desplazamientos laterales en los diafragmas para definir las condiciones de regularidad.

En lo que sigue se evalúan estos procedimientos de clasificación de regularidad en planta de las referidas Normas, y se comparan con el procedimiento que emplea el factor de penalización λ_p propuesto en este trabajo. Para ello se desarrollan dos ejemplos, el primero se refiere a un edificio irregular con diafragma rígido, y el segundo es el caso de un edificio con diafragma flexible.

Edificio irregular con diafragma rígido

La figura 9 muestra la planta de un edificio irregular con diafragma rígido que se estudia, el cual tiene un nivel. Las secciones transversales de columnas y vigas del edificio tienen dimensiones 40cm x 40cm, y 40cm x 50cm, respectivamente. Los muros son de concreto estructural de espesor 30 cm. El sistema de piso consiste en una losa maciza de 15cm. La figura 9 muestra que en este caso las direcciones principales del edificio coinciden con las direcciones de los ejes coordenados X y Y.

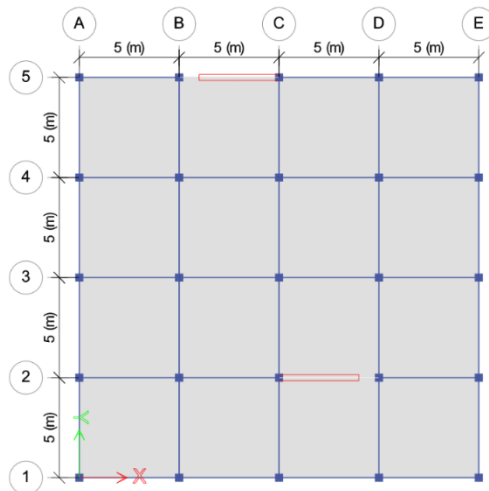


Figura 9. Planta de un edificio con muros y marcos.

Con el programa ETABS se llevó a cabo el análisis modal espectral del edificio empleando un espectro dado por SASID para una zona de Santa Fe en la Ciudad de México. Los resultados de desplazamientos laterales del edificio obtenidos con el programa se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Desplazamientos laterales del edificio

Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Direction	Maximum mm	Average mm	Ratio
Story1	Sismo X	LinRespSpec	Max		X	0.527	0.392	1.345
Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Direction	Maximum mm	Average mm	Ratio
Story1	Sismo Y	LinRespSpec	Max		Y	6.818	6.814	1.001

Los resultados de la tabla 3 indican que el desplazamiento de un punto en la planta excede en más del 30% el promedio de los desplazamientos de los extremos de la misma, de acuerdo con la sección 5 de las NTCS 2017, estos resultados llevan a clasificar a la estructura como muy irregular. De acuerdo con la sección 5.2.2 de la propuesta de NTCS 2023, estos resultados llevan a clasificar a la estructura como fuertemente irregular en torsión.

Las columnas 4 y 5 de la tabla 4 muestra los periodos traslacionales en cada dirección. Las columnas 6 a la 7 de la tabla 4 muestra la relación modal m_1/M_T para el caso del primer modo traslacional en X que contribuye en X y Y, respectivamente. La columna 8 de la tabla 4 muestra la suma de estas contribuciones en X y Y. Las columnas 9 a 11 de la tabla 4 muestra resultados semejantes a los de las columnas 6 a 8, pero para el caso las contribuciones del primer modo traslacional en Y. Finalmente, la columna 12 de la tabla 4 muestra los resultados del cómputo de la relación modal m_1/m_T para el edificio en estudio, y la columna 13 de la tabla 4 muestra que el valor del factor de penalización calculado con la ecuación (10) es igual a 1.67.

Tabla 4. Características dinámicas del edificio estudiado

Num.	Edificio	# Niveles	Periodos (s)		Primer modo traslacional en X (m_1/m_T)			Primer modo traslacional en Y (m_1/m_T)			m_1/m_T	λ_p
			T_x	T_y	U_x	U_y	U_x+U_y	U_x	U_y	U_x+U_y		
1	Ejemplo	1	0.08	0.30	0.60	0.00	0.60	0.00	1.00	1.00	0.60	1.67

En lo que sigue se estudia el mismo edificio del caso anterior, pero ahora el edificio se orienta 30° respecto a las direcciones de los ejes coordenados X y Y, como indica la figura 10.

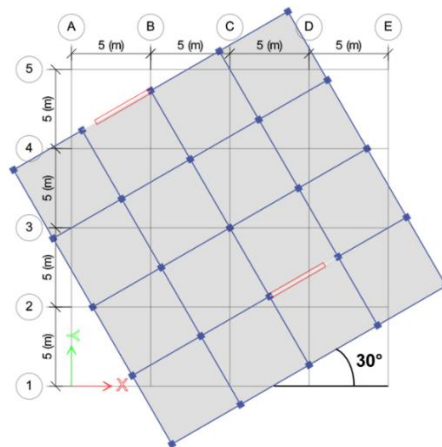


Figura 10. Orientación del edificio y de los ejes coordenados.

Con el programa ETABS se llevó a cabo el análisis modal espectral del edificio con el mismo espectro dado por SASID para una zona de Santa Fe en la Ciudad de México que se empleó para el edificio del caso anterior. Los resultados de desplazamientos laterales del edificio obtenidos con el programa ETABS para el edificio de la Fig. 10 se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Desplazamientos laterales del edificio rotado

	Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Direction	Maximum mm	Average mm	Ratio
▶	Story1	Sismo X	LinRespSpec	Max		X	1.788	1.751	1.021
	Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Direction	Maximum mm	Average mm	Ratio
▶	Story1	Sismo Y	LinRespSpec	Max		Y	5.119	5.116	1.001

De acuerdo con la sección 5 de la NTCS 2017, los resultados de la tabla 5 indican la estructura clasifica como regular. De acuerdo con la clasificación de irregularidades en planta de la propuesta de NTCS 2023, estos resultados llevan a clasificar a la estructura como regular en torsión. Esto indica que la estructura en estudio se clasifica como muy irregular con el empleo de un sistema de coordenadas como en el caso del ejemplo anterior, y la misma estructura, pero rotada, se convierte en estructura regular para otro sistema de coordenadas.

La tabla 6 muestra características dinámicas del edificio rotado respecto a los ejes de coordenadas X y Y empleados. Como muestra esta tabla, la relación de masas m_1/m_T es igual a 0.60. Tanto este valor, como el valor del factor de penalización λ_p que muestra la columna 13 de la tabla 6, son idénticos a los calculados para el ejemplo anterior, en el cual la orientación del edificio coincidía con la dirección de los ejes coordenados. Estos resultados indican que el factor de penalización es invariante respecto a los ejes coordenados que se empleen. Esta propiedad de invarianza no la tiene los procedimientos de la NTCS 2017 y de la propuesta de NTCS 2023 para considerar si una estructura es regular.

Tabla 6. Características Dinámicas del edificio rotado

Num.	Edificio	# Niveles	Periodos (s)		Primer modo translacional en X (m_1/m_T)			Primer modo translacional en Y (m_1/m_T)			m_1/m_T	λ_p
			T_x	T_y	U_x	U_y	U_x+U_y	U_x	U_y	U_x+U_y		
1	Ejemplo	1	0.08	0.30	0.45	0.15	0.60	0.25	0.75	1.00	0.60	1.67

Edificio con diafragma flexible

De acuerdo con la sección 2.8 de la propuesta de NTC por Sismo 2023 (NTC Sismo, 2023) se considera que un diafragma de piso es rígido en su plano si no existe flexibilidad excesiva del diafragma de acuerdo con la sección 5.2.4 de esta propuesta de Norma. Esta sección especifica que existe la condición de flexibilidad excesiva del diafragma cuando un punto de una planta tiene un desplazamiento lateral que excede en más del 30% el desplazamiento lateral en el mismo punto en un análisis en que la estructura se modele suponiendo la condición de diafragma rígido. La condición de diafragma de piso flexible se define de manera diferente en las NTCS 2017, pero también requiere la revisión de desplazamientos laterales en el diafragma para definir la condición de diafragma flexible.

Es generalmente aceptado que la condición de diafragma de piso flexible lleva a valores de fuerzas sísmicas en el plano del diafragma bastante mayores que los valores de las fuerzas actuantes en diafragma de piso rígido. Esto merece ser revisado, ya que la definición de flexibilidad del diafragma de piso de las referidas Normas se basa en considerar desplazamientos laterales del diafragma, mientras que las fuerzas sísmicas en el plano del diafragma son causadas por aceleraciones absolutas horizontales, que no dependen de los desplazamientos laterales del diafragma. Es decir, la condición de diafragma flexible o rígido no sería relevante en el problema de la predicción de valores de aceleraciones sísmicas absolutas en diafragmas de piso. Para ilustrar y confirmar esta última observación, en lo que sigue se muestra un ejemplo de cómputo de aceleraciones de piso en un edificio con la condición de piso rígido o flexible.

La figura 11 muestra las dimensiones y características de la planta del edificio de un nivel de concreto reforzado que se estudia. Esta figura muestra que el edificio es regular, tiene muros estructurales en ambas direcciones, de espesor igual a 30cm, así como columnas y vigas con dimensiones de secciones transversales de 40cm x 40cm y 40cm x 50cm, respectivamente. El sistema de piso del edificio consiste en una losa maciza de 15cm.

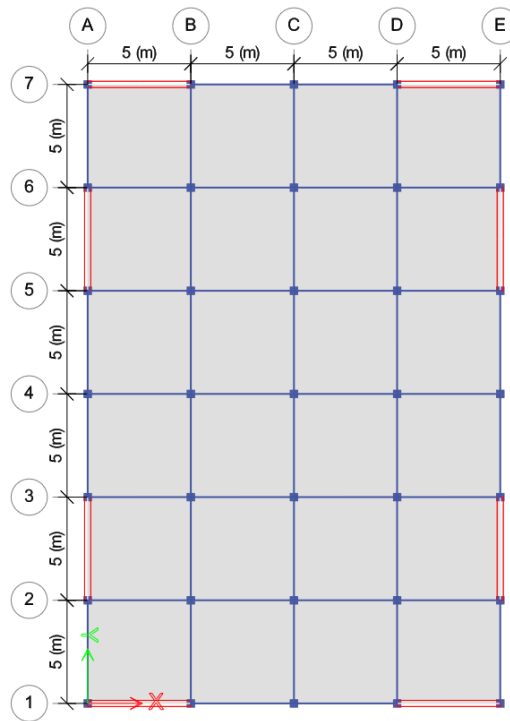


Figura 11. Dimensiones y características de la planta del edificio de un nivel de concreto.

Con el programa ETABS se llevó a cabo el análisis modal espectral del edificio con el mismo espectro dado por SASID para una zona de Santa Fe en la Ciudad de México que se empleó para el edificio del caso anterior. Para el edificio en estudio se consideraron dos casos, uno con diafragma rígido, y otro con diafragma flexible, para este último caso el sistema de piso se modeló con elementos *shell*.

La Figura 12 muestra una vista en planta de los edificios en su configuración deformada que resultan del análisis modal mencionado. El desplazamiento lateral en la dirección X del diafragma rígido es igual a 0.156 m, y el desplazamiento lateral máximo en un punto del diafragma flexible es igual a 0.345, de acuerdo con la sección 5.2.4.1 de la propuesta de NTC por Sismo 2023, este resultado lleva a clasificar a la estructura como muy irregular por tener flexibilidad excesiva en el diafragma

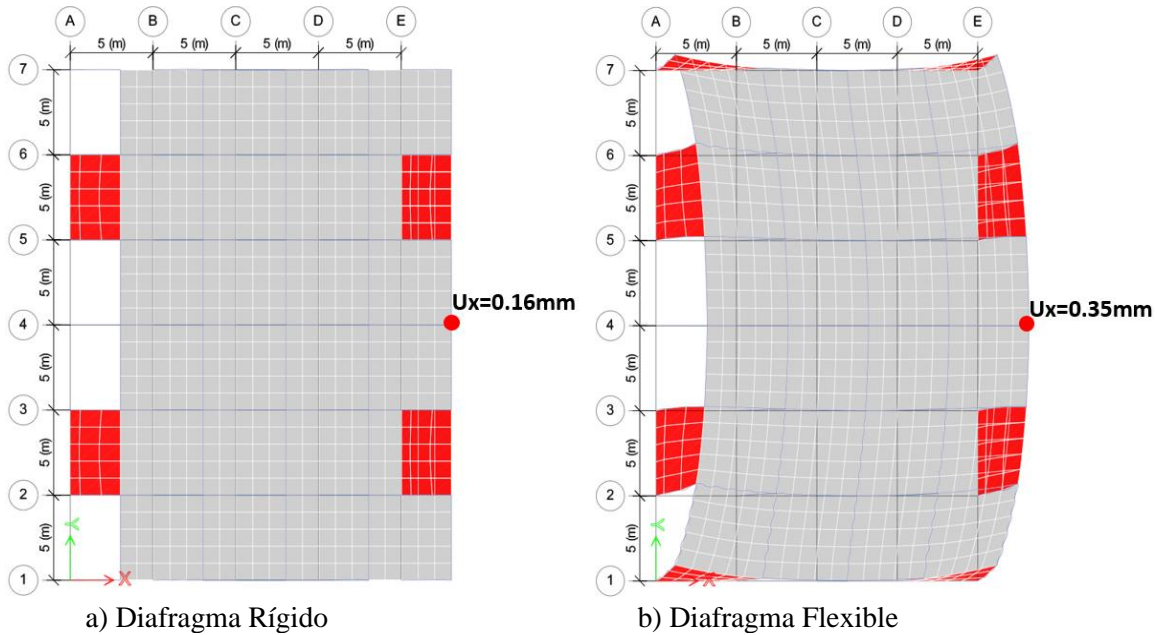


Figura 12. Vista en planta de la configuración deformada debido al sismo en X de los edificios con diafragma rígido o flexible.

Las tablas 7 y 8 muestran las propiedades dinámicas del edificio con diafragma rígido y del edificio con diafragma flexible, respectivamente. Estas propiedades permiten obtener los valores de la relación modal m_I/m_T y del factor de penalización λ_p para estos edificios. Este factor para el caso del edificio con diafragma rígido es igual a 1 por ser regular. En el caso del edificio con diafragma flexible, la columna 13 de la tabla 8 muestra en paréntesis el valor del factor de penalización λ_p que se obtiene empleando la ecuación (9). El número 1.2 en la columna 13 de la tabla 8 es el valor que se obtiene empleando la ecuación (10), que estipula la propuesta de NTC por Sismo 2023 (NTC Sismo, 2023), lo que resulta de considerar que, dado que la estructura no es regular por tener diafragma flexible, rige el límite 1.2 de la ecuación (10).

Tabla 7. Características Dinámicas del edificio con diafragma rígido

Edificio con diafragma rígido												
Num.	Edificio	# Niveles	Periodos (s)		Primer modo translacional en X (m_I/m_T)			Primer modo translacional en Y (m_I/m_T)			m_I/m_T	λ_p
			T_x	T_y	U_x	U_y	U_x+U_y	U_x	U_y	U_x+U_y		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Ejemplo	1	0.06	0.06	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1

Tabla 8. Características Dinámicas del edificio con diafragma flexible

Edificio con diafragma flexible												
Num.	Edificio	# Niveles	Periodos (s)		Primer modo translacional en X (m_I/m_T)			Primer modo translacional en Y (m_I/m_T)			m_I/m_T	λ_p
			T_x	T_y	U_x	U_y	U_x+U_y	U_x	U_y	U_x+U_y		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Ejemplo	1	0.08	0.07	0.94	0.00	0.94	0.00	0.99	0.99	0.94	1.2 (1.06)

Los resultados de la tabla 8 indican que, en el caso del edificio con diafragma flexible, las aceleraciones de piso serían iguales a las del edificio considerado regular, amplificadas por el factor de penalización igual a 1.2. En lo que sigue se comparan los resultados de este procedimiento, con los valores de las aceleraciones de piso en los edificios en estudio con diafragma rígido y con diafragma flexible, obtenidas mediante análisis del tipo dinámico lineal. Para este estudio se emplean tres registros de aceleraciones: 1) registro sintético dado por SASID para una zona de Santa Fe en la Ciudad de México, 2) registro ACAZ1308.211 obtenido en Acapulco en el sismo del 8 abril 2014, las aceleraciones se amplificaron por el factor 2.5, 3) Componente E-W del registro SCT del sismo del 19 septiembre 1985. Estos registros de aceleraciones se muestran en la figura 13.

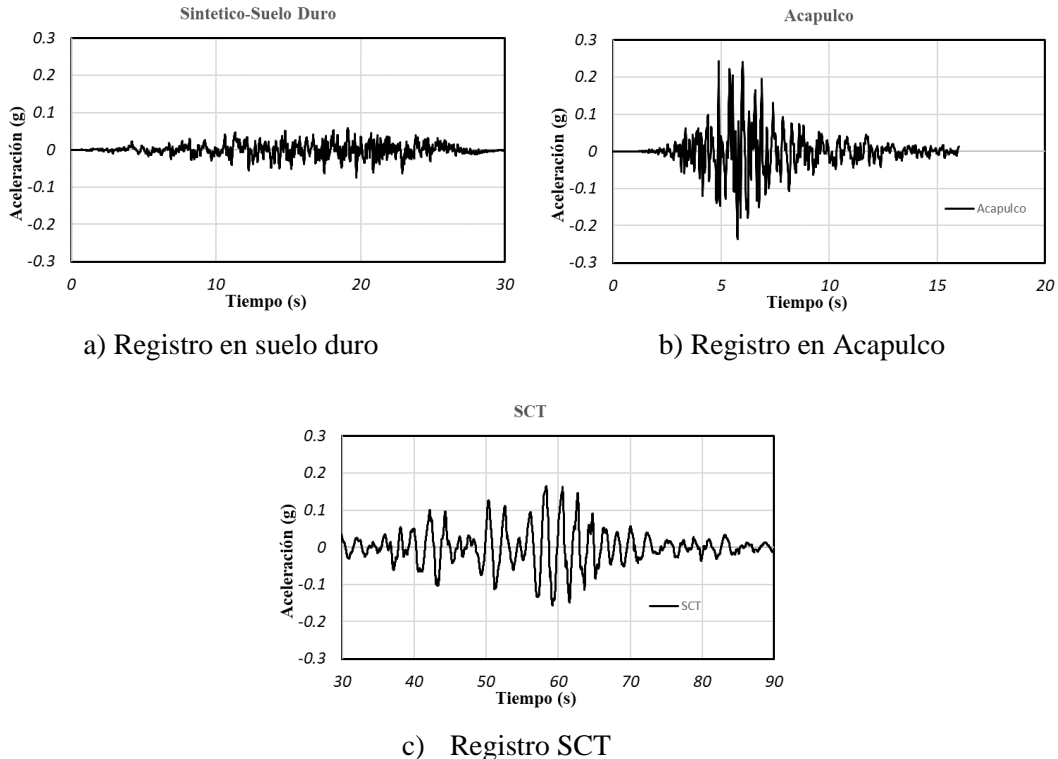


Figura 13. Registros de aceleraciones empleados.

La tabla 9 muestra resultados de los valores de aceleraciones absolutas de piso máximas obtenidas del análisis dinámico lineal empleando el programa ETABS, para los casos de los edificios con diafragma rígido y con diafragma flexible, empleando los tres registros de aceleraciones del terreno mencionados. La última línea de esta tabla muestra el valor de la relación entre la aceleración de piso calculada para el caso de diafragma flexible y la aceleración del caso diafragma rígido. Los resultados indican que la amplificación máxima de aceleraciones de piso en el edificio con diafragma flexible, respecto a las aceleraciones de piso del edificio con diafragma rígido, no excede el valor 1.2, valor que coincidentemente es igual al valor calculado para λ_p para el edificio con diafragma flexible como indica la Tabla 8.

Tabla 9. Aceleraciones absolutas máximas en edificios con diafragmas rígido y flexible (mm/s^2)

Aceleraciones absolutas máximas en edificios con diafragmas rígido y flexible (mm/s^2)			
Acelerograma	Sintetico	Acapulco	SCT 1985
Diafragma Rígido	27.2	313.0	106.4
Diafragma Flexible	30.2	376.9	114.5
Acel. Diafragma Flexible/Acel. Diafragma Rígido	1.11	1.20	1.08

Estos resultados sugieren que es razonable determinar las aceleraciones de piso de estructuras con pisos clasificados como flexibles, empleando las expresiones propuestas en este trabajo para estructuras con diafragmas rígidos. Esta propuesta ha sido incluida en la nueva NTC por Sismo 2023, lo que es un cambio respecto a la Norma NTC Sismo 2107, la cual especifica que, en los casos de estructuras con diafragmas flexibles, es necesario llevar a cabo análisis dinámicos elásticos bastante elaborados, que deben tomar en cuenta los grados de libertad requeridos para considerar las deformaciones de los diafragmas en su plano.

CONCLUSIONES

1. El procedimiento de la norma NTCS 2017 para el cómputo de aceleraciones de piso en estructuras que no son regulares es excesivamente elaborado, por lo que en general no se ha aplicado en la práctica. Este procedimiento es muy diferente al especificado en la ASCE 7-16 y ASCE 7-22 para el cómputo de aceleraciones de piso en diafragmas de edificios, que se caracteriza por ser amigable, como también lo es el procedimiento de cómputo de aceleraciones de piso de la norma NTCS 2017 para el caso de estructuras regulares.
2. Esta investigación empleó resultados de análisis dinámicos elásticos empleando una base de datos de edificios, definida por 23 edificios de concreto reforzado, marcos, o duales, con un número de niveles que varían de 4 a 30, con diferentes niveles de irregularidad. Estos edificios fueron analizados y diseñados por empresas consultoras de México. Para esta base de datos se obtuvieron valores de la relación modal m_1/m_T , donde m_1 es la masa modal del primer modo, y m_T es la masa total. Los resultados encontrados mostraron una clara relación entre los valores de relación modal m_1/m_T y la clasificación de irregularidad de los edificios según la NTC Sismo 2017. Esto muestra que esta relación modal es una propiedad dinámica fundamental en la respuesta sísmica de estructuras, que permite identificar irregularidades estructurales. En el caso de los edificios clasificados como muy irregulares, para relación modal m_1/m_T se obtuvieron valores aproximadamente en el intervalo entre 0.2 y 0.4. En el caso de edificios irregulares, el intervalo de valores de esta relación fue de 0.4 a 0.6. Para edificios regulares se encontraron valores de esta relación mayores que 0.6, muy cercanos a los valores de esta relación para el caso estudiado de un edificio regular hipotético de 10 niveles a base de muros.

3. Para definir las aceleraciones de piso de un edificio irregular con diafragmas rígidos, esta investigación propone emplear el criterio de penalizar las aceleraciones de piso de un edificio regular empleando el factor λ_p , factor que toma en cuenta los valores de la relación modal m_i/m_T .
4. Los resultados encontrados de la aplicación del método que se propone para definir las aceleraciones de piso de los edificios de la base de datos empleada muestran que para estructuras regulares el factor de penalización λ_p es igual a 1, para estructuras irregulares, λ_p varía aproximadamente en el intervalo de 1.2 a 1.6, y en estructuras muy irregulares λ_p tiene valores en el intervalo de 1.6 a 2.
5. Esta investigación mostró que es razonable aplicar el método propuesto para determinar aceleraciones de piso en edificios con diafragmas rígidos, a los casos de edificios con diafragmas flexibles.
6. Esta investigación ha mostrado que el factor de penalización propuesto λ_p es invariante respecto a los ejes coordenados que se empleen. Esto es, para el caso de una estructura, el valor de λ_p es constante, independiente de las direcciones de los ejes X y Y que se empleen. Esta propiedad de invarianza no la tiene los procedimientos de las NTCS 2017 y de la nueva NTCS 2023 para considerar si una estructura es regular. Esto implica que si para ciertos ejes X y Y, estas Normas clasifican una estructura como regular, es posible que para ejes X y Y con direcciones diferentes al caso anterior, la misma estructura clasificaría como irregular. Esto no es una característica deseable en el diseño sismorresistente.
7. El método que propone este estudio para definir las aceleraciones de piso de edificios con diferentes niveles de irregularidad ha sido incluido en la nueva NTC Sismo 2023. Esto se debe a la sencillez del método, así como en la congruencia entre resultados del cómputo del factor de penalización λ_p propuesto y la clasificación de irregularidad de los edificios de la base de datos empleada.
8. Aun cuando el factor de penalización que se propone en este estudio tiene fines diferentes al mencionado factor de corrección de Q' por irregularidad de las NTCS 2017, es de interés poner en evidencia que este factor de corrección para estructuras que no son regulares tiene una distribución escalonada, con solo dos valores. El criterio propuesto lleva a valores del factor de penalización en una estructura irregular con variación continua, dependiendo del valor no solo del número de niveles del edificio, sino también de los valores de relación modal m_i/m_T . Esta observación y la simplicidad del procedimiento que se propone para identificar la irregularidad estructural, sugieren la conveniencia de explorar en el futuro el uso del empleo del factor de penalización λ_p como factor de corrección del factor Q' por irregularidad.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a las empresas Jean Ingenieros y CRC Ingenieros Civiles SA de CV, por proporcionar información de las características geométricas y propiedades dinámicas de los 23 edificios estudiados en esta investigación. Esta información fue relevante para llevar a cabo la investigación descrita en este

artículo. Se agradece al Dr Amador Terán por sus comentarios que ayudaron a mejorar los resultados de este trabajo. Se agradece al programa PAPIIT, de la UNAM, por el patrocinio al proyecto de investigación 34-IN101222, relacionado con el tema de esta investigación.

REFERENCIAS

- ASCE/SEI 7-16, (2016), “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, American Society of Civil Engineers. Estados Unidos
- ASCE/SEI 7-22, (2022), “Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures”, American Society of Civil Engineers. Estados Unidos
- Das P., Dutta S. y Datta T. (2021), “Seismic Behavior of Plan and Vertically Irregular Structures: State of Art and Future Challenges”, *Natural Hazard Review Journal*, ASCE, 22 (2), 1-17
- Chopra, A. K. (2012). *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering*, 4th ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 992 pp
- Mwafy, A. y Khalifa S., (2017), Effect of vertical structural irregularity on seismic design of tall buildings”, *Struct Design Tall Spec. Build.*, 26, 1-22, DOI: 10.1002/tal.1399.
- NTC Sismo, (2017). Norma Técnicas Complementarias por Sismo. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.
- NTC Sismo, (2023). Propuesta de Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo, para discusión pública, junio 2023.
- NTC Sismo, (2023). Norma Técnica Complementaria para el Diseño por Sismo, para discusión pública, Gaceta Oficial de la Ciudad de México, 6 de noviembre 2023.
- Lee, W. H., Jennings, P., Kisslinger, C., & Kanamori, H. (Eds.). (2002). *International handbook of earthquake & engineering seismology, Part A*. Elsevier.