

## Análisis no lineal de edificios de concreto reforzado con piso suave Nonlinear analysis of reinforced concrete buildings with soft floors

I. Antonio-De La Rosa <sup>a</sup>, R. Pérez Martínez <sup>a</sup>, C. Rodríguez Álvarez <sup>b,\*</sup>, H. Navarro Gómez <sup>b</sup>

<sup>a</sup> Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León, 66455, Monterrey, Nuevo León, México.

<sup>b</sup> Área Académica de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

### Resumen

Esta investigación tiene el objetivo de analizar el comportamiento no lineal de edificios con piso suave en planta baja, ubicados en la zona del estado de Guerrero. Este esfuerzo se orienta a analizar edificios que se asemejen a los reales con propiedades que generen respuestas críticas ante las características de los sismos y el tipo de suelo de la zona. Por tal razón, se eligieron edificios de cinco niveles con base rígida, sin considerar la interacción suelo-estructura. El procedimiento permite modelar la interacción dentro y fuera del plano de los muros de mampostería, así como analizar en el rango no lineal los efectos en la estructura ante cargas producidas por sismos.

*Palabras Clave:* comportamiento no lineal, piso suave, sismos.

### Abstract

This research has the objective of analyzing the non-linear behavior of buildings with a soft floor on the ground floor, located in the area of the state of Guerrero. This effort is aimed at analyzing buildings that resemble real ones with properties that generate critical responses to the characteristics of earthquakes and the type of soil in the area. For this reason, 5-story buildings with a rigid base were chosen, without considering the soil-structure interaction. The procedure allows to model the interaction inside and outside the plane of the masonry walls as well as to analyze in the non-linear range the effects on the structure when faced with loads produced by earthquakes.

Keywords: nonlinear behavior, soft floor, earthquakes.

### 1. Introducción

Esta investigación expone el análisis estático no lineal de edificios con piso suave en planta baja, ubicados en la zona del estado de Guerrero; dentro de las costas del mar pacífico de la República Mexicana, lugar donde se tiene mayor incidencia de sismos de magnitudes peligrosas para las estructuras o en alguna zona con condiciones similares.

Este esfuerzo se orienta a analizar edificios que se asemejen a los reales con propiedades que generen respuestas críticas ante las características de los sismos y el tipo de suelo de la zona. Por tal razón, se eligieron edificios de 5 niveles con base rígida, sin considerar la interacción suelo-estructura.

Para el desarrollo de la investigación se utilizaron métodos estocásticos para la obtención de las propiedades de los materiales, geometría de las secciones y cargas utilizando el programa *Simulation of Buildings* (SIB) versión 1.0, una herramienta elaborada para este propósito Rangel y Esteva (2013).

A partir de la información que se le proporciona, este programa genera los códigos de los modelos de los edificios en tres dimensiones, con propiedades simuladas, basados en las variaciones estadísticas de los diferentes parámetros que intervienen en la construcción de las secciones de concreto, listos para ejecutarse en el programa OpenSees versión 3.2.1, de acuerdo a McKenna y Fenves (2021)

\*Autor para la correspondencia: [profe\\_7479@uaeh.edu.mx](mailto:profe_7479@uaeh.edu.mx)

Correo electrónico: [ignaciodelarosa@gmail.com](mailto:ignaciodelarosa@gmail.com) (Ignacio Antonio-De La Rosa), [rho\\_p\\_m@yahoo.com](mailto:rho_p_m@yahoo.com) (Roberto Pérez Martínez), [profe\\_7479@uaeh.edu.mx](mailto:profe_7479@uaeh.edu.mx) (Cutberto Rodríguez Álvarez), [humberto\\_navarro@uaeh.edu.mx](mailto:humberto_navarro@uaeh.edu.mx) (Humberto Iván Navarro Gómez).

Puede considerarse entonces que cada modelo generado representa trasladar las condiciones que se presentan en la construcción real de un edificio a uno virtual expresado en números y códigos. En este caso se generaron 5 modelos de edificios con propiedades diferentes simuladas aleatoriamente usando el método de Monte Carlo.

El método de Montecarlo se trata de una técnica numérica para calcular probabilidades y otras cantidades relacionadas, utilizando secuencias de números aleatorios (Gómez 2005). Un ejemplo de su aplicación se evidencia en Chirino (2018), aquí, se realizan análisis numéricos de muros y marcos de concreto reforzado bajo el efecto *pulldown* (producto de subsidencia) se aplican cargas verticales en un punto para simular el efecto del hundimiento diferencial y obtener la respuesta de la estructura. En el estudio de las curvas de fragilidad (Moreno y Bairán, 2009), éstas se definen mediante una distribución lognormal, verificándose la hipótesis por medio de simulaciones realizadas por el método de Monte Carlo.

Los reglamentos de construcción en México aún no definen la frontera para el análisis de estructuras mediante métodos no lineales (Zuñiga, 2021), por lo que este trabajo expone en todo caso una metodología alterna que sirva para el diseño de edificaciones con mayor vulnerabilidad por proyectarse en zonas sísmicas.

## 2. Antecedentes

Existen investigaciones con diversos enfoques y tipos de edificios relacionadas con el análisis no lineal del fenómeno de piso suave. A continuación se mencionarán algunas:

### 2.1. Criterios de aceptación para el diseño sísmico por desempeño y confiabilidad de edificios de concreto reforzado, con piso suave en planta baja, desplantados en suelos blandos de la ciudad de México.

Díaz (2008) establece un método en base al desempeño y confiabilidad, utiliza software para el análisis no lineal y lo aplica a tres casos de estudio (a) Edificio de 7 niveles sin muros (b) Edificio de 14 niveles sin muros (c) Edificio de 14 niveles con muros. La geometría en planta se caracteriza por contar con 3 entrejes en una dirección y 4 en otra, la dimensión es 50% mayor que la dirección corta. Se trata de una estructura a base de marcos ortogonales en las dos direcciones.

Una de sus conclusiones importantes refiere que la presencia de condiciones para la formación del piso suave reduce la confiabilidad drásticamente. Lo anterior indica que la confiabilidad puede escogerse como criterio cuantitativo de aceptación para el diseño estructural, faltando por definir el estado límite en cada tipo de estructuración, en este caso los edificios con piso suave en planta baja.

### 2.2. Confiabilidad y optimización para diseño sísmico de edificios considerando la contribución de muros de mampostería.

En esta investigación Pérez (2010) plantea una metodología para el análisis de confiabilidad y optimización en el ciclo de vida de edificios de concreto reforzado que contienen muros de mampostería. Analiza tres casos de estudio (a) estructura sin muros (b) estructura con muros en un entreje en las 4 caras exteriores y (c) estructura con muros en dos caras paralelas completas. Considera muros con y sin refuerzo interior. La geometría del edificio es regular de 5 niveles, con 3 entrejes de iguales medidas en ambos sentidos a base de marcos.

El mismo autor (Pérez, 2010) concluye con la afirmación de que, en estructuras donde se considera la contribución de la rigidez y resistencia provocada por los muros de mampostería en tres crujeas, la confiabilidad  $\beta$  será mayor que los demás casos que fueron objeto de estudio, además que el acero de refuerzo interior afecta ligeramente el índice  $\beta$  del sistema. En caso de incluir muros de relleno en una sola crujea, el comportamiento será mejor para intensidades normalizadas con coeficiente de comportamiento sísmico  $Q$  menores a tres, comparando con el caso donde no hay muros, luego el proceso se invierte.

### 2.3. Confiabilidad sísmica de edificios de concreto considerando la contribución no planeada de muros de mampostería.

Se utilizan modelos tridimensionales para analizar los casos de estudio con el propósito de obtener funciones de confiabilidad de edificios a base de marcos de concreto reforzado que contienen muros no planeados de mampostería que causen el fenómeno de piso abierto. Se utiliza un modelo de diagonal equivalente para modelar los muros mediante la discretización por fibras. Los casos de estudio (a) estructura sin muros (b) estructura con muros en los niveles superiores a partir del segundo nivel en todo su perímetro exterior, con geometría regular y 5 niveles, con 3 entrejes de iguales medidas en ambos sentidos relación de aspecto igual a uno.

Rodríguez (2014) determina entre otros aspectos que cuando no se planea la presencia de muros de mampostería influye en forma considerable en la confiabilidad sobre todo en la etapa de alta deformación y daño.

### 2.4. Diseño sísmico basado en confiabilidad de edificios con marcos con planta baja abierta.

Pragalath (2015) evalúa el comportamiento sísmico de los edificios de piso suave diseñados con factores alternativos a través de un enfoque de diseño basado en el desempeño utilizando un método probabilístico. La justificación de este trabajo es que el diseño de los edificios en los cuales el primer piso es abierto y en los pisos superiores tienen muros de relleno, se diseñan como estructuras a base de marcos sin considerar la rigidez que le proporcionan los muros utilizando un factor de multiplicación, introducido en códigos internacionales, que amplifican la fuerza cortante en el primer piso.

Modela edificios de 2, 4, 6 y 8 niveles con muros de relleno en los niveles superiores, dejando sin muros la planta baja y

haciendo variaciones en la rigidez de las columnas. El total de casos de estudio son 47. La geometría del edificio es regular y simétrica, con 2 crujiás para los edificios de 2, 4 y 6 niveles y 4 crujiás para el edificio de 8 niveles.

Dentro de las conclusiones indica que es evidente que en los códigos y literatura no están encaminados a dar atención al problema del diseño sismorresistente de edificios que cuentan con piso débil en el primer nivel.

En relación a la reglamentación comenta que los principales códigos internacionales de diseño (ASCE/SEI-7, 2010; NZS 1170.5, 2004 e ICC IBC, 2012) prohíben la construcción de este tipo de edificios. Sin embargo, los países en desarrollo como India no pueden evitar tales edificios debido a la escasez de tierras en las áreas urbanas.

Por otra parte expresa que algunos códigos internacionales (IS 1893, Eurocode 8, SI, Bulgarian code, etc.) permiten esta categoría de edificios con una magnificación de fuerzas (MF) en las columnas del piso de nivel del suelo. Consta una amplia disparidad entre estos códigos en el valor del MF. De las curvas de fragilidad y los índices de desempeño alcanzado de los marcos de referencia desarrollados en este estudio las siguientes conclusiones generales pueden resaltarse:

i) En los marcos abiertos a nivel de suelo (OGS) sin MF regularmente resultan con mayor probabilidad de excedencia, en consecuencia, estos marcos son más vulnerables.

ii) En el caso de edificio de 2 niveles, la aplicación del MF solo en el piso del nivel de suelo mejora el desempeño del edificio. Sin embargo, para edificios de más de dos niveles, la aplicación del MF solo en el nivel del suelo hace al nivel adyacente vulnerable. Esto muestra que el esquema del MF aplicado solo en el nivel del suelo recomendado por la mayoría de los códigos internacionales no es una solución efectiva.

### *2.5. Modelado no lineal de un edificio de tres niveles a base de muros de mampostería.*

López (2021) realiza diversos modelos numéricos de un muro individual y una estructura de tres niveles, ambas de mampostería confinada. Efectúa diferentes análisis estructurales, lineales, no lineales, estáticos y dinámicos para ambos, evalúa las ventajas y desventajas de cada tipo de análisis, calibra un modelo para el análisis dinámico no lineal de muros, mediante articulaciones plásticas de cortante y momento flexionante, ante cargas laterales provocadas por sismo de gran intensidad registrado en México.

Dentro de sus conclusiones refiere que los análisis lineales reportan valores diferentes a los desarrollados en estructuras cuando han sido expuestas a varios ciclos de carga, por lo se genera un error elevado y, por tanto menor confiabilidad y en consecuencia, riesgo. Por lo que se debe considerar estas diferencias porque pueden ser significativas.

Además enfatiza que los análisis no lineales tienen la ventaja de brindar información más precisa sobre el

comportamiento de los elementos estructurales, dando pauta de conocer mejor el comportamiento esperado de la estructura en diferentes momentos y poder hacer un diseño eficiente.

### **3. Materiales y Métodos.**

La ingeniería estructural se involucra con el factor de vulnerabilidad, con el propósito de disminuir el riesgo sísmico, esto último se puede lograr mediante la implementación de métodos confiables para tener estructuras que tengan un adecuado comportamiento ante fuerzas inducidas por sismos de alta peligrosidad.

En este trabajo se analiza el comportamiento no lineal de la estructura para un edificio cuya relación de aspecto en planta es de 1.50, formado por un sistema de marcos de concreto reforzado en dos direcciones ortogonales, libre de muros primero y después con muros en todos los niveles excepto en planta baja para provocar el piso suave.

De acuerdo a Quinto (2021) las características más influyentes que causan la irregularidad por piso blando, son el cambio brusco de rigidez, discontinuidad de los muros de albañilería, vigas más rígidas que las columnas y tener un piso más alto que los pisos adyacentes.

Estructuras con irregularidad causadas por piso suave son edificadas en todo el mundo, sobre todo en ciudades donde existe una gran demanda de espacios para construir y/o en metrópolis donde existe poco espacio y la edificación vertical es de las pocas alternativas que se pueden elegir.

Al respecto Hernández y Tena (2017), al analizar la normativa y diseño actual del piso suave, señalan que, el proyecto y construcción de estructuras con presencia de niveles donde se puede encontrar la aparición de pisos suaves es aún muy común hoy en día, esto sobre todo en edificios de pequeña y mediana altura, incluso en casas habitación, lo anterior con el fin de usar los espacios sin muros como estacionamientos, espacios de negocios, lobbies, entre otros; provocando la irregularidad estructural conocida como piso débil.

Ruiz et al. (2020), comentan que la práctica constructiva de edificios con planta baja débil es muy común en las grandes ciudades y en zonas urbanas con poco espacio. México no queda exento al respecto ya que es común ver construcciones de edificios cuyo piso bajo se utiliza como estacionamiento, lobby o área comercial.

En las costas del Pacífico mexicano, donde se localiza el estado de Guerrero y en particular en la zona de Acapulco, también se observa la construcción de edificios con piso suave, esta zona su ubica dentro del denominado Cinturón de Fuego, donde ocurre hasta el 90 por ciento de la actividad sísmica del planeta, esto hace aún más vulnerables a estas estructuras.

Con el propósito de minimizar la incertidumbre debida a la cantidad de variables por considerar, este trabajo utiliza registros de estaciones en suelo firme cercanas al puerto de

Acapulco, con el fin de aproximar de mejor forma el comportamiento del modelo utilizado.

El modelo contempla el uso de los criterios de desempeño sísmico y su representación matemática en el análisis no lineal que incluyen la utilización de modelo de discretización por fibras de vigas y columnas, así como de las diagonales que simulan los muros de mampostería cuando se forma el fenómeno de piso suave.

En la primera fase del análisis del sistema estructural, se considera el comportamiento histerético de los elementos mediante OpenSees; posteriormente se toma en cuenta la presencia de los muros, estableciendo la interacción dentro y fuera del plano de éstos paneles, aspecto que regularmente no es contemplado por los diseñadores.

### 3.1 Método de desempeño

El criterio denominado por desempeño sísmico, permite evaluar cómo se comporta una estructura que fue concebida para resistir fuerzas sísmicas, y verificar si en realidad tienen la capacidad de contrarrestarlas. Lo anterior de acuerdo al método de capacidad con la curva Pushover (Comartin, Niewiarowski y Rojahn, 1996).

El análisis estático no lineal, *Pushover*, es una herramienta de gran utilidad, permite estimar el desempeño de un sistema estructural frente a sismos de diferentes intensidades, mediante este análisis es posible exponer los puntos débiles de un diseño que se elabora mediante un análisis estático convencional.

Otros conceptos relacionados que se implementan en el programa OpenSees (Mckenna y Fenves (2021)), son los que se presentan continuación:

### 3.2 Propiedades simuladas, medias y nominales

Las características geométricas y las resistencias de materiales de los elementos estructurales que conforman la estructura pueden considerarse como variables aleatorias y caracterizarse por función de densidad de probabilidades por medio de sus dos primeros momentos estadísticos (media y desviación estándar). Dichas propiedades medias son obtenidas de muestras de laboratorio de uno o varios lotes y/o por mediciones físicas (Pérez, 2010).

Para este trabajo se proporciona al SIB la información resultado del análisis elástico lineal, se realizan internamente un conjunto de cinco simulaciones por cada una de las estructuras analizadas y se genera un archivo de propiedades medias.

Las propiedades simuladas se pueden definir, como aquellas caracterizadas por una función de densidad de probabilidades utilizando sus variaciones estadísticas de media y desviación estándar simuladas, utilizando el método de Monte Carlo. Así se pueden generar a partir de una estructura base, infinidad de edificios cada uno con diferentes secciones

transversales, diámetros de varillas, posición de varillas, propiedades de los materiales, etcétera.

Por seguridad para el diseño se emplean propiedades nominales, que son valores conservadores, mayores para el caso de las cargas y menores en las resistencias. Existen varios criterios de aceptación o rechazo de productos, en la ingeniería la que más se emplea es la propuesta por Meli (1976), aquí las propiedades nominales son obtenidas al dividir por uno o más el coeficiente de variación  $V$  el valor de las propiedades medias de la resistencia.

En este trabajo las propiedades nominales son consideradas aquellas con valores de referencia de algún código o reglamento, por ejemplo, en el Reglamento de construcción para la Ciudad de México (Arnal y Betancourt, 2019), el concreto de alta resistencia se define como aquel que tiene una resistencia nominal a la compresión igual o mayor a  $400 \text{ kg/cm}^2$ .

### 3.3 Simulación de edificios

El programa SIB (Rangel y Esteva, 2015) puede generar tantos edificios como sean necesarios. En este estudio se trabaja con 5 edificios simulados, este conjunto de edificios es una familia con variantes en la estructura generada a base de la simulación de propiedades originales de un edificio diseñado, que a su vez será la muestra que se utilizará para la experimentación y poder desarrollar este trabajo.

Se pueden generar un mayor número de edificios, sin embargo, el tiempo de análisis computacional de cada uno requiere de días sin que el equipo pueda apagarse, tomando como referencia trabajos como el de Díaz (2008) y Rodríguez (2014), donde el número de edificios analizados se encuentra en este rango, se decide que la familia de edificios para este trabajo sea de cinco.

Para considerar las incertidumbres de la estructura, relacionadas con las diferentes cargas y los elementos constitutivos tales como dimensiones en sección transversal, colocación del acero de refuerzo, recubrimiento, el área de barras, etcétera, se utiliza la técnica de simulación de Montecarlo, usando los modelos probabilistas calibrados en el programa SIB.

En la tabla 1. se muestran los parámetros con propiedades estadísticas geométricas utilizadas para la simulación de los edificios, calculados mediante el SIB.

Tabla 1: Propiedades estadísticas geométricas obtenidas mediante el programa SIB

Parámetro	Valor medio normal	Desviación std normal
Dimensiones de columnas	0.002032	0.0066548
Ancho de trabes	0.00254	0.0036576
Peralte de trabes	-0.002794	0.0054356
Recubrimiento en columnas	0.002794	0.015748
Recubrimiento en trabes	0.002794	0.015748
Área de acero en columnas	1.01	0.0404
Área de acero en trabes	1.03	0.0618
Separación de estribos en columnas	1.00	0.02
Separación de estribos en trabes	1.00	0.03
Área de estribos en columnas	1.00	0.015
Área de estribos en trabes	1.00	0.015

### 3.4 Análisis de la estructura

La información de salida del programa SIB (en lenguaje tcl), se ingresa al programa OpenSees, cuyo proceso permite ejecutar los diferentes tipos de análisis: gravitacional, modal, sísmico no lineal o pushover, con estos es posible construir las curvas pushover y las curvas histeréticas del análisis sísmico. Información que permite obtener la demanda sísmica y capacidad del sistema.

#### 3.4.1 Análisis no lineal

Por medio del programa OpenSees se elabora el análisis no lineal para determinar la respuesta más allá del rango lineal tanto en los casos de análisis sísmico como el análisis pushover. Se utiliza el modelo del elemento viga-columna por fibras de acuerdo con Taucer, Spacone y Filippou (1991), cuya solución se determina mediante la implementación de un método iterativo que utiliza en cada iteración el método de Newton-Raphson y para la integración en toda la formulación el método de Gauss-Lobato.

#### 3.5 Tipo de Modelos utilizados por el análisis no lineal.

- Modelos de plasticidad concentrada (lumped): En éste, el comportamiento inelástico de los marcos de concreto reforzado se concentra en los extremos de las vigas y columnas Taucer, Spacone y Filippou (1991).
- Modelo de distribución no lineal: Considera que la no linealidad del material puede tomar lugar en cada sección del elemento y el comportamiento del elemento es derivado por la integración ponderada de la respuesta de la sección.
- Módulo por fibras: Son los modelos más promisorios para el análisis no lineal de los elementos de concreto reforzado, basados en la flexibilidad de las fibras de los miembros. En estos modelos los elementos son divididos en fibras longitudinales.

#### 3.6 Modelo de puntal para muros de mampostería.

El fenómeno de piso suave, se origina cuando en un edificio a base de marcos ortogonales se le construyen muros de mampostería sin una correcta separación, ya que esto puede repercutir en el sistema estructural debido a que el modelo con que se diseña desprecia la contribución de los muros.

Para modelar los muros de mampostería, se utilizará el modelo desarrollado por Kadysiewski y Mosalam (2009), que ya está integrado en el programa OpenSees. En este modelo la inherente interacción entre las respuestas dentro y fuera del plano se abordan explícitamente. Para cada panel de relleno el modelo consta de un miembro diagonal, formado de dos elementos viga-columna, unidos en el nodo de punto medio (Figura 1).

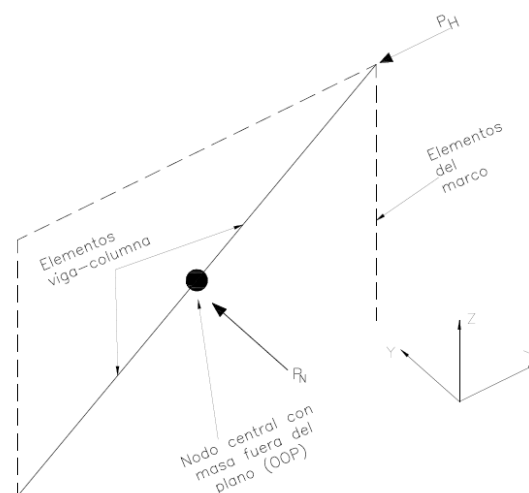


Figura 1: Croquis del modelo del puntal de mampostería (Kadysiewski y Mosalam, 2009)

Para incluir el modelo del puntal, bajo el concepto de fibras basado en flexibilidad se usa el algoritmo, escrito en lenguaje tcl (Rodríguez, 2014).

En México no hay información de investigaciones similares que se adapten de una forma precisa a la teoría de este puntal. Es decir, los datos necesarios no están actualmente disponibles o calibrados para usarse en el cálculo de las propiedades de las fibras que se requieren utilizar para la modelación del puntal que posteriormente se integrará al edificio completo.

Por lo antes indicado se propone la subdivisión de los muros en módulos, para determinar las propiedades de las fibras de las diagonales para un módulo y luego afectarlas por un factor de equivalencia. Son tres los factores que afectan a las propiedades determinadas de los puntales, que a continuación se describen.

Primero se subdivide una crujía en módulos con dimensiones no mayores de 2.50 m tanto en dirección horizontal ( $L_m$ ), como vertical ( $h_m$ ), figura 2.

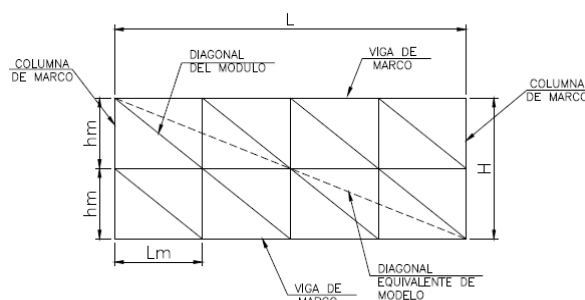


Figura 2: Croquis del modelo del puntal de mampostería adaptado.

Los factores son los siguientes:

*FWf*: Factor relacionado con el peso. En este trabajo se usará la relación que existe entre el área equivalente de la diagonal completa y la de un módulo.

Factor de peso: relación entre el área de una diagonal equivalente y el área de la diagonal de un módulo. Debido a que las áreas equivalentes de las diagonales están relacionadas con la altura del muro, entonces se puede decir que:

$$FWf = \frac{H}{hm} \tag{1}$$

*FAf*: Factor relacionado con área. Se usará la cantidad de módulos.

*H*: Altura total de la crujía

*Hm*: Altura de subdivisiones en crujía

$$FWf = nm \tag{2}$$

*nm* = Número de módulos

*Fdzf*: Factor relacionado con la distancia centrada de las fibras y la inercia. Será igual a la relación entre la longitud de la diagonal completa y la diagonal del módulo.

$$Fdz = \frac{Lde}{Ldm} \tag{3}$$

*Lde* = Longitud de la diagonal equivalente

*Ldm* = Longitud de la diagonal del módulo

### 3.7 Casos de estudio

Para el análisis se consideran una familia de cinco edificios con muros desligados utilizando propiedades simuladas y propiedades medias, aquí la estructura no considera alguna contribución por parte de los paneles de mampostería, por lo que no se hace necesario incluir los puntales que representan a los muros.

En el siguiente paso se analiza la familia de edificios con muros ligados, se utilizarán los mismos del caso anterior, pero se incluyen los puntales que modelan a los muros, es decir aquí se considera que los muros se encuentran ligados a los marcos.

En la tabla número dos se relacionan los cinco edificios modelados inicialmente con las incertidumbres de carga y elementos constitutivos sin considerar aportación alguna por la presencia de muros. Después los mismos cinco edificios, pero con la contribución de los muros.

Tabla 2: Tipo de edificación con corrida en el programa SIB

Tipo de edificio	Archivos generados con SIB	Puntal de muros
Con Muros Desligados de propiedades simuladas	Si	No
Con muros Ligados (piso suave) de propiedades simuladas.	Si	Si

La figura 3 muestra las características generales de la estructura (edificio tipo), se trata de un edificio de oficinas de 3 crujías en ambas direcciones, con claros largos 1.50 veces mayores que los más cortos y de 5 niveles, con marcos en ambos sentidos de concreto reforzado.

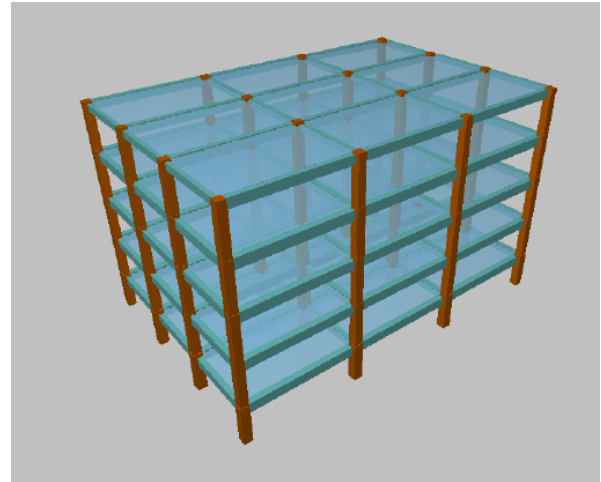
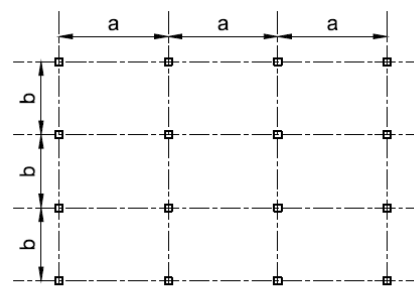


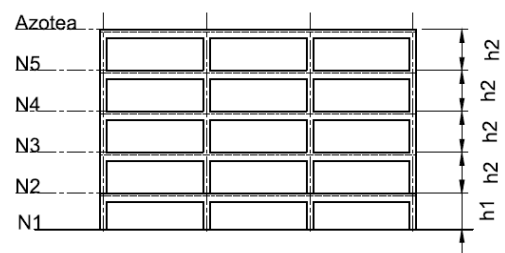
Figura 3: Estructura de Edificio tipo.

El modelo adaptado para formar el fenómeno de piso suave, tiene muros de ladrillo rojo recocido en todo el perímetro a partir del nivel 2 hasta el último nivel.

A continuación, la figura 4 muestra las características en planta y alzado del edificio tipo que es analizado, como se puede observar en este caso la estructura no cuenta con muros de mampostería, es decir se deprecia cualquier posible contribución por parte de los muros.



Planta típica



Corte longitudinal

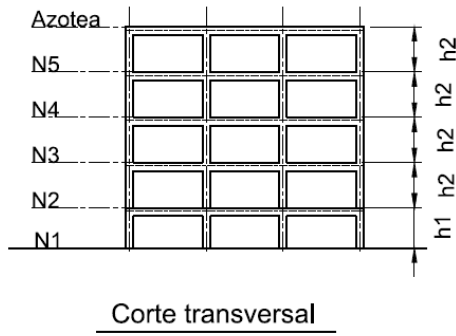


Figura 4: Casos de estudio, Edificio con muros desligados.

Las dimensiones utilizadas son  $a=9.0$  m,  $b=6.00$  m,  $h1=3.15$  m y  $h2=3.55$  m.

La figura cinco ilustra el edificio tipo que se considera para la estructura considerando la aportación de los muros de mampostería, el dibujo en planta es igual en ambos casos, sin embargo, a partir del nivel dos (N2), cuenta con la presencia de muros de relleno, esto ocurre también para el nivel tres (N3), el nivel cuatro (N4) y nivel cinco, como se puede ver en los esquemas de elevación denominada muros largos y en el lado corto donde se indica como muros cortos

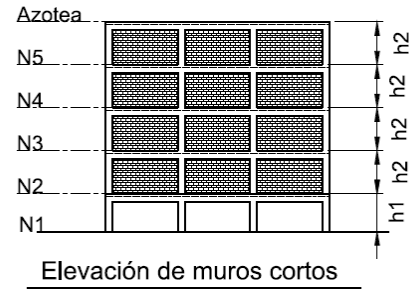
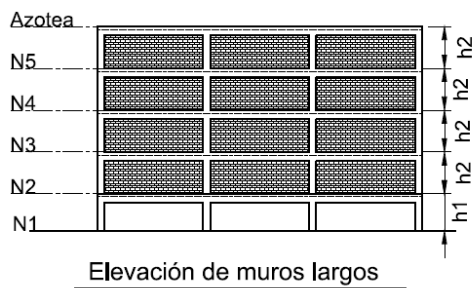
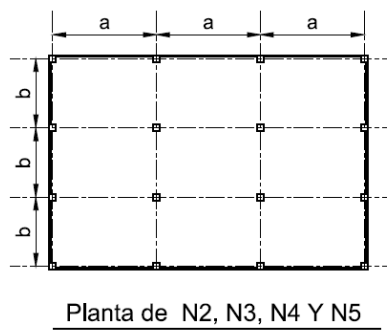
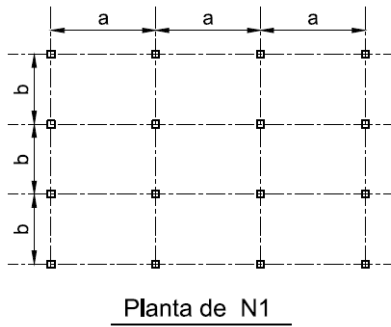


Figura 5: Casos de estudio, Edificio con muros ligados

El espectro de diseño se eligió considerando los siguientes parámetros: localización Acapulco, suelo tipo I, categoría B.

### 3.8 Modelado del edificio

La estructura se diseña mediante el programa Cypecad Versión 2021, (software para diseño de estructuras que ha sido desarrollado por la empresa CYPE desde 1983). Se considera un modelo donde se incluyen los elementos estructurales del edificio (columnas, vigas y losas); se incrementan cargas gravitacionales distribuidas y lineales (muros), en cada nivel. En el análisis sísmico se incluyen la información correspondiente al espectro de diseño y el programa realiza un análisis dinámico modal espectral, mediante el que se determina las fuerzas en cada modo de vibrar.

La superposición modal para el cálculo de fuerzas, desplazamientos, etc. se realiza con el método CQC (*Complete Quadratic Combination*). No se considera la interacción suelo-estructura. El programa calcula en forma automática el peso propio de los elementos (losas, vigas y columnas).

La tabla 3 muestra los parámetros utilizados para determinar las cargas por sismo para el diseño del edificio de estudio.

Tabla 3: Parámetros para determinar las cargas por sismo

Tipo de estructura	B
Zona Sísmica	D
Tipo de suelo	I
Factor de comportamiento sísmico ( Q )	2.0
Coefficiente c=	0.50
Ta=	0.0
Tb=	0.60
r=	1/2

### 3.9 Generación de edificios simulados

Con los resultados de diseño obtenidos mediante el programa Cypecad se elabora la información que requiere el SIB, seleccionando las secciones representativas de cada viga y columna donde se localizan los elementos mecánicos a considerar (momentos negativos y positivos).

Los datos aportados por el programa SIB se exportan al OpenSees para ser procesados y así estar en condiciones de realizar los diferentes análisis de la estructura contando con dos familias de 5 edificios, una con muros desligados y otra con muros ligados (piso suave).

Una de las ventajas que ofrece esta herramienta es el análisis no lineal, para el que se utiliza el modelo de fibras de los elementos viga-columna, considerando puntos de control ubicados en los extremos de los elementos y tres puntos intermedios en cada viga y columna respectivamente.

Con los edificios simulados se pueden realizar 17 tipos de análisis en OpenSees. Para los casos de estudio se realizan los siguientes: Gravitational Case (1), para calcular los modos de vibrar de la estructura sin contemplar la interacción provocado por el suelo, se desarrollan: Modal analysis without ISE in x-direction (2) y Modal analysis without ISE in z-direction (3); para el análisis sísmico considerando a las losas de entrepiso como un diafragma rígido, se realizan los análisis: Earthquake x-direction with rigid diaphragm (7) y Earthquake z-direction with rigid diaphragm (8); para desarrollar el análisis pushover estático: Static Pushover with rigid diaphragm in x-direction (10) y Static Pushover with rigid diaphragm in z-direction (11).

#### 4. Resultados

Para llevar a cabo el análisis de la familia de edificios con pushover controlado por desplazamientos, se utiliza un vector de cargas triangular invertido correspondiente con el vector de cargas sísmicas del análisis modal. Se hace un análisis de los edificios con muros desligados y con muros ligados de los casos de edificios con propiedades simuladas y medias, obteniendo las fuerzas cortantes y desplazamientos para cada pseudotiempo, con estos valores se construyen las curvas Cortante-Desplazamiento (V-d); ver figuras 6, 7, 8, y 9.

Las figuras 6 y 7 muestran el comportamiento respecto al desplazamiento en función del esfuerzo cortante, en dirección x; en la figura 6 con muros desligados y en la figura 7 considerando la contribución de muros. Se aprecia que la presencia de los muros de relleno limita el desplazamiento global de la estructura, lo que se interpreta como mayor rigidez al sistema.

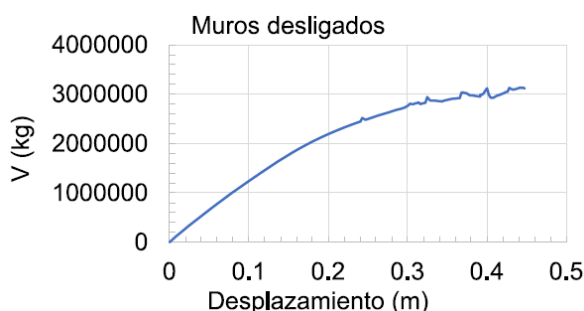


Figura 6: Pushover de Edificio 1 con muros desligados a la estructura en dirección x

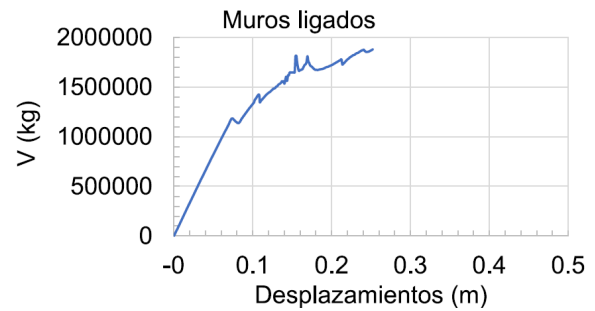


Figura 7: Pushover de Edificio 1 con muros ligados a la estructura en dirección x

Las figuras 8 y 9 muestran el comportamiento respecto al desplazamiento en función del esfuerzo cortante, en dirección z (perpendicular a x); en la figura 8 con muros desligados y en la figura 9 considerando la contribución de muros. Se aprecia que la presencia de los muros de relleno limita el desplazamiento global de la estructura, lo que se interpreta como mayor rigidez al sistema.

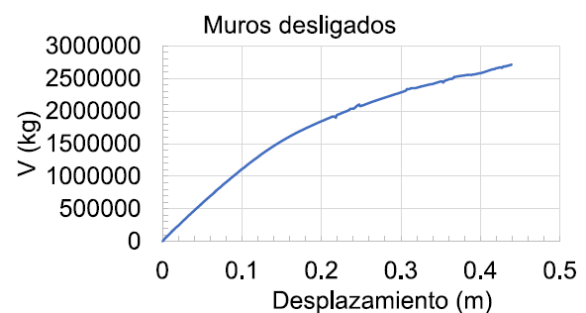


Figura 8: Pushover de Edificio 1 con muros desligados a la estructura en dirección Z

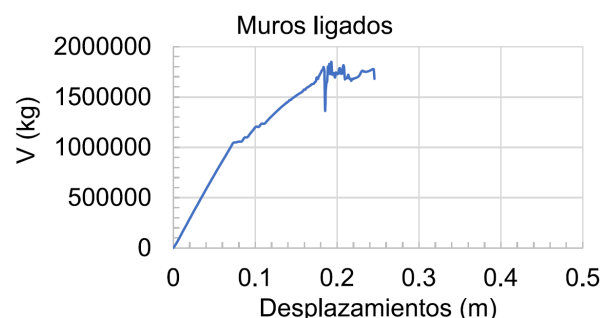


Figura 9: Pushover de Edificio 1 con muros ligados a la estructura en dirección Z

Para obtener la rigidez tangente de cada edificio en las dos direcciones es necesario tener la curva elastoplástica, la cual se construye con base a la igualdad de las áreas de la curva pushover como se puede ver en la figura 10 y 11. La rigidez tangente es el resultado de dividir el valor de la Fuerza cortante de fluencia entre el valor del desplazamiento asociado a éste.



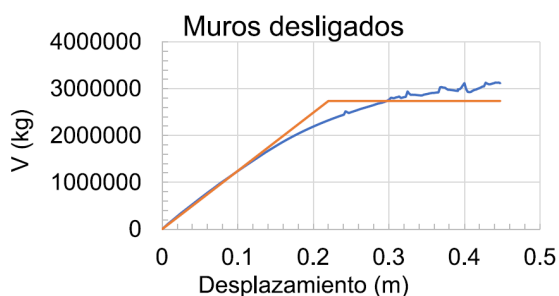


Figura 10: Pushover y curva bilineal de Edificio 1 con muros desligados a la estructura en dirección x

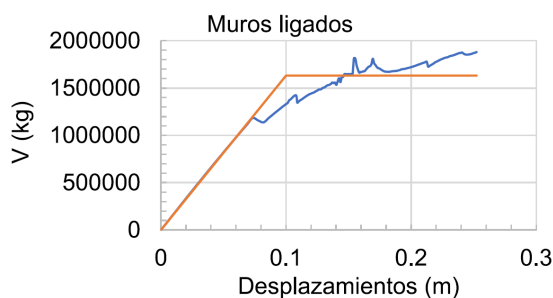


Figura 11: Pushover y curva bilineal de Edificio 1 con muros desligados a la estructura en dirección x

Con los resultados también es posible hacer una comparación entre los edificios con muros desligados y ligados con el objetivo de revisar el comportamiento de los segundos respecto de los primeros, a través de gráficas como la que se muestra en figura 12.

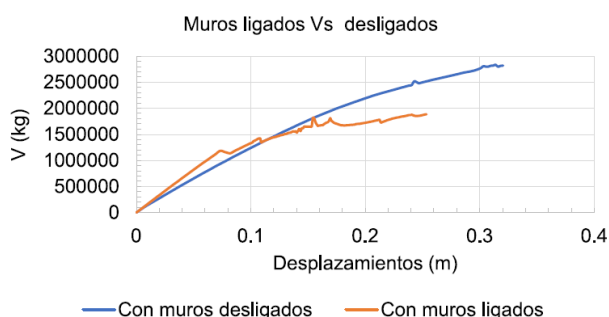


Figura 12: Comparación de Pushover con muros desligados y ligados en dirección X.

Lo anterior muestra que: para el caso de edificios con presencia de muros, los desplazamientos son menores, lo que se traduce en un incremento de la rigidez, sin embargo, su capacidad de deformación disminuye. Lo anterior también se puede observar en los valores de rigidez en las tablas 4 y 5.

Tabla 4: Rigidez Tangente en dirección X y Z obtenida a partir del análisis Pushover para edificios con muros desligados

Rigidez tangente con muros desligados dir X y Z		
Edificio	$K_0$ (Kg/m) en dir. X	$K_0$ (Kg/m) en dir. Z
EDIF1	12,440,791	11,289,391
EDIF2	13,240,237	9,528,079
EDIF3	12,592,942	10,808,451
EDIF4	13,174,137	11,018,054
EDIF5	13,331,740	10,938,754

Tabla 5: Rigidez Tangente en dirección X y Z obtenida a partir del análisis Pushover para edificios con muros ligados

Rigidez tangente con muros ligados dir X y Z		
Edificio	$K_0$ (Kg/m) en dir. X	$K_0$ (Kg/m) en dir. Z
EDIF1	16,315,399	14,347,351
EDIF2	16,012,006	14,041,708
EDIF3	15,869,826	14,315,941
EDIF4	15,915,857	14,888,476
EDIF5	15,888,251	14,109,826

## 5. Conclusiones

De los análisis de capacidad con el método de pushover se puede observar que cuando se presenta el piso blando, la estructura pierde aproximadamente 50% de capacidad de deformación, resultando como consecuencia una estructura frágil, con una ductilidad reducida.

El fenómeno de piso suave por lo tanto es una causa de comportamiento no adecuado para las estructuras conformadas mediante concreto reforzado y que se localizan en zonas con peligro sísmico.

Las estructuras que son diseñadas sin contemplar el confinamiento de muros a los elementos viga - columna, deben de ser supervisadas para que se edifiquen con el mismo criterio; un mal proceso constructivo, puede propiciar la irregularidad de piso débil, y en consecuencia, mayor vulnerabilidad al sistema, sobre todo en zonas sísmicas.

Las normas técnicas complementarias para sismo del reglamento de construcciones para la Ciudad de México 2017, establecen el análisis no lineal para casos especiales, por lo que el presente trabajo puede ser una guía para cumplir con lo establecido en este código.

## Referencias

Arnal, L., Betancourt, M., (2019). Reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Editorial Trillas, Ciudad de México.

Chirino, Y. L., (2018). Análisis numérico de muros y marcos de concreto reforzado bajo el efecto del pulldown producto de la subsidencia. Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Comartin, C., Niewiarowski, R., Rojahn, C., (1996) ATC-40 seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. SSC 96, 1.

Díaz, J. L., (2008). Criterios de aceptación para el diseño sísmico por desempeño y confiabilidad de edificios de concreto reforzado, con piso suave en planta baja, desplantados en suelos blandos de la ciudad de México. UNAM, México, D. F.

Gómez, J. J., (2005) El método de Monte Carlo, curso de estadística. <http://benasque.org/benasque>.

Hernández, D. A., Tena, A., (2017). El piso suave en edificaciones: Una Mirada a la normativa y al diseño actual. Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica. XXI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica. Guadalajara, Jalisco. Mexico.

Kadysiewski, S., Mosalam, K. M., (2009). Modeling of unreinforced masonry infill walls considering in-plane and out-of-plane interaction, PEER Reports 2008/102, volume 70. Pacific Earthquake Engineering Research Center Berkeley, California, USA.

López, X., (2021). Modelado no lineal de un edificio de tres niveles a base de muros de mampostería, Ciudad Universitaria, Cd. México.

- McKenna, F., Fenves, G., (2021). Open Sees. Pacific Earthquake Engineering Research Center. University of California, Berkeley.
- Meli, R., (1976). Bases para los criterios de diseño estructural del proyecto del reglamento de construcciones para el Distrito Federal. Cuaderno de Investigación No. 375. 2ª edición, Instituto de Ingeniería, UNAM. México D.F.
- Perez, R., (2010). Confiabilidad y Optimización para el diseño sísmico de edificios considerando la contribución de muros de mampostería. Tesis doctoral, Programa de maestría y Doctorado en Ingeniería, UNAM, México D.F.
- Pragalath, H., (2015). Reliability Based Seismic Design of Open Ground Storey Framed Buildings. PhD thesis, National Institute of Technology Rourkela.
- Quinto, J. S., (2019). Estudio de la irregularidad por piso blando y su influencia en la estabilidad de edificios de albañilería confinada en la ciudad de Huancavelica, provincia de Huancavelica. Perú.
- Rangel, J. G., Esteva, L., (2013). SIB reference manual. Manual de referencia para uso de programa SIB. Universidad Veracruzana.
- Rodríguez, E. M., (2014). Confiabilidad sísmica de edificios de concreto considerando la contribución no planeada de muros de mampostería. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2014.
- Ruiz, S. E., Jiménez, R., Santos, M. A., Orellana, M. A., (2020). Evaluación de la fragilidad de dos soluciones de rehabilitación para un edificio con planta baja débil dañado durante el sismo 19/s17. *Revista de Ingeniería Sísmica* No. 102, 1-25 DOI: 10.18867/ris.102.513
- Taucer F. F., Spacone E. y Filippou F. C., (1991) "A Fiber Beam–Column Element for Seismic Response Analysis of Reinforced Concrete Structures". Technical report, Centro de Investigación en Ingeniería Sísmica del Pacífico (PEER), Universidad de California, Berkeley, California.
- Taucer, F., Spacone, E., Filippou, F. C., (1991). A fiber beam-column element for seismic response analysis of reinforced concrete structures, volume 91. *Earthquake Engineering Research Center, College of Engineering, University of California, Berkeley.*
- Zuñiga, M. D., (2021) Comportamiento no lineal de un edificio de concreto reforzado instrumentado. Conferencia Coordinación de ingeniería estructural del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Ciudad de Mexico.