

**ACTUALIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL
PROGRAMA MAMPOS PARA EL ANÁLISIS DE
EDIFICACIONES EN MUROS DE
MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL**



Universidad
del Cauca

Proyecto de Trabajo de Grado

**CRISTIAN ORTEGA HOYOS
LAURA MARCELA YASCUAL ALVAREZ**

Director: Ing. Esp. Andrés Felipe Coral Vargas

UNIVERSIDAD DEL CAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS
POPAYÁN, CAUCA
COLOMBIA

2023

**ACTUALIZACIÓN DEL PROGRAMA MAMPOS PARA EL ANÁLISIS DE
EDIFICACIONES EN MUROS DE MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL**

CRISTIAN ORTEGA HOYOS

LAURA MARCELA YASCUAL ALVAREZ

**Trabajo en modalidad de investigación presentado como requisito para optar al
título de Ingeniero Civil**

Director

Ing. Esp. ANDRÉS FELIPE CORAL VARGAS

UNIVERSIDAD DEL CAUCA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

DEPARTAMENTO DE ESTRUCTURAS

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN MECÁNICA ESTRUCTURAL JUMMOS

POPAYÁN, CAUCA

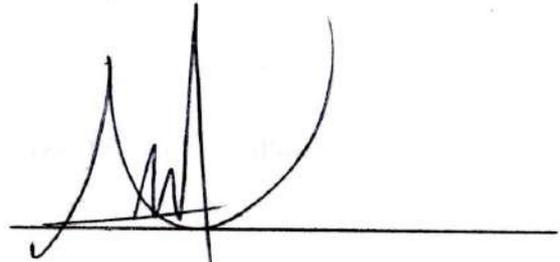
COLOMBIA

2023

PÁGINA DE ACEPTACIÓN

El director y los jurados han evaluado este documento titulado: "Actualización del programa MAMPOS para el análisis de edificaciones en muros de mampostería estructural", escuchando la sustentación del mismo por sus autores y lo encuentran satisfactorio por lo cual autorizan a los estudiantes Cristian Ortega Hoyos y Laura Marcela Yascual Alvarez, para que desarrollen las gestiones administrativas para optar al título de Ingeniero Civil.

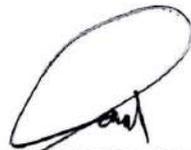
Firma del presidente del jurado

A handwritten signature in black ink, consisting of several sharp, vertical strokes and a large, sweeping curve on the right side, positioned above a horizontal line.

Firma del jurado

A handwritten signature in black ink, featuring a large, circular loop on the left side and a vertical stroke on the right, positioned above a horizontal line.

Firma del director

Andrés Coral 

A handwritten signature in black ink, with the name "Andrés Coral" written in a simple font above a horizontal line, followed by a large, stylized signature.

Popayán, 25 de Enero de 2023

Resumen

El siguiente trabajo presenta un software para el análisis plano de estructuras elaboradas en muros, el cual está orientado a la mampostería, haciendo uso del entorno de desarrollo integrado Microsoft Visual Studio en el lenguaje de programación Visual Basic y con el apoyo de librerías. El análisis de la estructura se realiza en el plano de los muros teniendo en cuenta teoría de resistencia de materiales, además se siguen procedimientos de cálculo para condiciones estáticas y dinámicas, junto con métodos numéricos presentados en diversos libros y documentos. El programa cuenta con una interfaz intuitiva que facilita el ingreso de datos y modelado de la estructura por parte del usuario y cuenta con herramientas que facilitan el dibujo del modelo de la estructura. Para el análisis sísmico se utilizan dos métodos, el estático usando el método de la fuerza horizontal equivalente, y el análisis dinámico empleando el método del análisis modal.

Palabras clave: muro, período, deriva, cortante, rigidez, fuerza, mampostería, análisis modal, fuerza horizontal equivalente.

DEDICATORIA

*A mi madre y a mi padre por los años
dedicados a mí.*

*A mis hermanas quienes siempre me
apoyaron.*

A mi mejor amiga por aguantarme.

*Finalmente, a todas las personas que
durante todo este proceso aportaron un
granito de arena para poder llegar hasta
aquí.*

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director, Ing. Andrés Felipe Coral Vargas, por ser quien nos guió en todo el proceso y con carisma nos motivó a seguir adelante en cada momento de duda, y la dedicación de su tiempo y sus conocimientos para desarrollar un buen trabajo.

A todos los orientadores, por compartir sus conocimientos y tener paciencia cuando el camino se tornaba enmarañado.

A mis familiares, amigos y seres queridos que cedieron un poco de su espacio para apoyarme en todo el camino.

A la Ing. Bianca Marcela Miranda Portilla por ser quien abrió las puertas a realizar este proyecto.

Cristian Ortega

DEDICATORIA

A mi madre por creer en mí.

*A mis primos y tíos por apoyarme en este
largo camino.*

*A mi mejor amiga por acompañarme en
los buenos y malos momentos.*

AGRADECIMIENTOS

A nuestro director, Ing. Andrés Felipe Coral Vargas, por su orientación y por dedicar su tiempo a compartir sus conocimientos para poder desarrollar nuestro trabajo de grado.

A mis profesores, por guiarme en cada paso de mi proceso académico y motivarme a desarrollar este trabajo.

A mi familia y amigos, por su cariño, apoyo y consejos que me permitieron crecer como persona y lograr esta meta.

A la Ing. Bianca Marcela Miranda Portilla, por darnos la oportunidad y por animarnos a crear este proyecto.

Laura Yascual

Tabla De Contenido

Introducción	9
Planteamiento del Problema	11
Justificación	13
Objetivos	14
Objetivo general	14
Objetivos específicos	14
I. Marco Teórico y Desarrollo del Programa	15
1. Hipótesis	15
Modelo de la losa	15
Modelo de distribución de fuerzas	16
2. Cálculo del Área	17
3. Cálculo de Centroides o centros de masas	21
Comprobación de Centroides y Áreas	24
4. Cálculo de Rigidez por Muro	26
Energía de Deformación por Flexión	28
Energía de Deformación por Fuerza Cortante	29
Factor de Forma en una Sección Rectangular	30
Rigidez en Muros de Cortante	32
Modelo de muros acoplados	34
Comparación De Rigidez Ejemplo 1	38
Comparación De Rigidez Ejemplo 2	39
5. Espectro de Aceleraciones	40
Zonas de Amenaza Sísmica	40
Coeficientes de Amplificación	45
Coeficiente de Importancia	48
Período de Vibración Fundamental de la Estructura	50
Cálculo del Espectro Elástico de Diseño	53
Comparación De Espectro	55
6. Método de la Fuerza Horizontal Equivalente	56
Comparación Fuerza Horizontal Equivalente	61
7. Análisis Modal	62

Modelo de Edificio de Corte	64
Matriz de Masa de la Estructura	65
Matriz de Rigidez de la Estructura	65
Solución al Modelo de un Grado de Libertad sin Amortiguamiento	66
Propiedades del Problema de Autovalores Estructurales	67
Métodos Numéricos Como Solución al Problema de los Valores Propios	68
Ejemplo Ilustrativo Para el Método de la Potencia Inversa	70
Aplicación del Método de la Potencia Inversa al Análisis Modal	74
Demostración Matriz [A] Invertible	74
Demostración Matriz [K]-1 Invertible.	75
Demostración Matriz [M] Invertible.	75
Corrección del Cortante Basal Obtenido Mediante el Método del Análisis Modal	81
Ejemplo De Corrección De Cortante Basal En MAMPOS Actualizado	83
Comparación de Resultados	84
MATLAB	84
Programa Original QBASIC	88
Programa Actualizado Visual Basic	88
8. Normalización de Vectores	88
II. Comparación De Resultados De Análisis	95
1. Estructura Ejemplo #1	95
Descripción General	95
Comparación con ETABS	97
Cortantes Estáticos	98
Cortantes Dinámicos con Sismo en Dirección X	100
Cortantes Dinámicos con Sismo en Dirección Y	103
Periodos de Vibración Para Análisis Dinámico	106
Resultados del Análisis Modal con MAMPOS Original VS MAMPOS Actualizado	107
Resultados Con Análisis Fuerza Horizontal Equivalente, MAMPOS Original Vs MAMPOS Actualizado	112
Comparación Derivas Obtenidas con el Método de la Fuerza Horizontal Equivalente	114
Derivas por piso en los Muros en dirección X con sismo en X, MAMPOS Actualizado VS MAMPOS Original	114
Derivas por piso en los Muros en dirección Y con sismo en Y, MAMPOS Actualizado VS MAMPOS Original	121

Cortantes y Momentos en los Muros, EXCEL (MANUAL) VS MAMPOS Actualizado	125
Muro MX1	127
Muro MX3	129
Muro MY1	130
Muro MY2	132
Comparación Derivas Obtenidas con el Método de Análisis Modal	133
Derivas por piso en los Muros en dirección X con sismo en X, MAMPOS Actualizado VS MAMPOS Original	133
Derivas por piso en los Muros en dirección Y con sismo en Y, MAMPOS Actualizado VS MAMPOS Original	140
III. MANUAL Y ESTRUCTURA DEL PROGRAMA	144
A. Estructura del programa	144
B. Menú Principal	144
C. Nuevo Proyecto	145
D. Ejemplo Llenado Datos Generales	147
E. Área de dibujo	148
Ejemplo Dibujo De Estructura Del Proyecto	150
IV. Conclusiones	160
V. Trabajos futuros	161
Bibliografía	162

Introducción

En Colombia, la norma NSR-10 en el capítulo A.3 admite diversos tipos de sistemas estructurales para que el diseñador emplee el que considere más conveniente para cada estructura en particular; dentro de éstos se destaca el uso del sistema de muros estructurales, este tipo de solución es práctica ya que los muros hacen parte de las divisiones y toman las cargas inducidas por los pisos superiores y las llevan al suelo de fundación convirtiéndose así en la estructura.

Los muros más comunes en nuestro medio son los de mampostería en sus múltiples formas, recientemente se ha hecho popular el uso de los muros de concreto, pero estos son más comunes en edificaciones de mayor número de pisos, especialmente por el costo asociado a las formaletas. Las unidades de mampostería (mampuesto), son piezas en forma de paralelepípedo en arcilla cocida, o concreto, sílice-cal. En nuestro medio hoy en día tenemos una serie de mampuestos denominados comúnmente como ladrillo, bloque, bocadillo, tolete, prensado, farol, etc.; estas unidades de mampostería se ligan por medio de los morteros, y con la adición de acero interno o externo, para tomar los esfuerzos de tensión, nos dan el conjunto de la mampostería.

Los muros son elementos bidimensionales con largo y espesor como dimensiones fundamentales, las cuales generan el plano sobre el que trabaja el muro a su vez es la dirección de mayor rigidez, en la dirección del espesor que es la dimensión menor, se asume que la rigidez y la resistencia son despreciables.

El sistema de muros de mampostería considera que las cargas aplicadas a la estructura deben ser soportadas únicamente por los muros, los cuales deben ser continuos desde la base hasta el último piso para poder ser considerados como muros estructurales o muros de carga; además, los muros pueden contar con refuerzo en acero -de forma interna o externa- y también pueden tener inyecciones de mortero para aumentar su resistencia. En cuanto a los materiales, la mampostería puede ser elaborada tanto en arcilla cocida como en concreto, el tipo de material debe elegirse teniendo en cuenta las necesidades del proyecto puesto que ambos materiales cuentan con un módulo de elasticidad y resistencia propios.

El programa MAMPOS, presentado en el presente documento, permite el análisis de estructuras en muros de mampostería, y si bien no permite la selección de refuerzos en acero o mortero, el programa ofrece la posibilidad de elegir el material de los

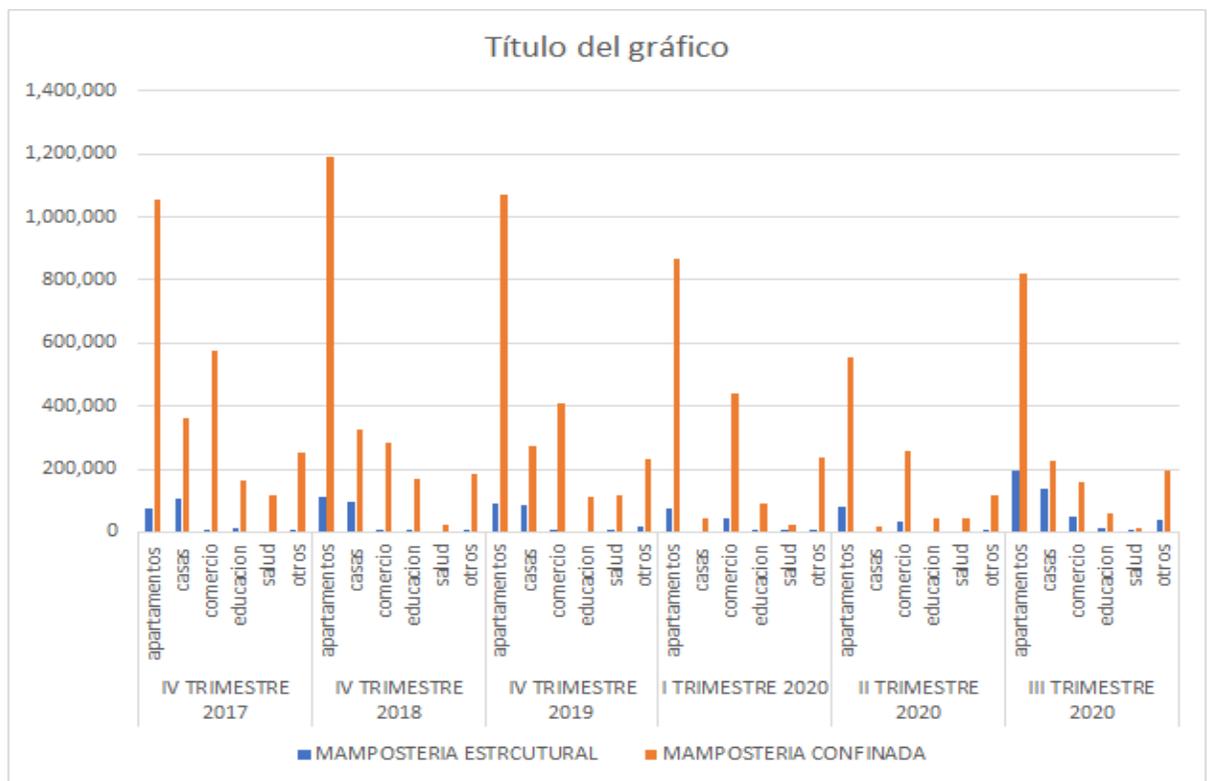
muros -arcilla o concreto- y su espesor. La interfaz desarrollada hace que el usuario pueda usar el programa intuitivamente tanto en el ingreso de información como en la lectura de los resultados de los análisis realizados.

En cuanto al procesamiento de la información, MAMPOS realiza análisis estático y dinámico usando el método de la fuerza horizontal equivalente y el método de análisis modal, respectivamente. MAMPOS cuenta con compatibilidad con archivos DWG, lo cual hace que el modelado de la estructura sea sencillo al tener un plano como base; la entrada de los datos necesaria para ejecutar el análisis de la estructura puede realizarse mediante tablas, casillas individuales y listas, para lograr esto se empleó la librería Litecad para crear la interfaz de trabajo y facilitar algunos de los procesos internos del programa MAMPOS. Hay que mencionar, además, el usuario puede elegir el método de análisis y si desea que se hagan correcciones automáticamente, lo cual se verá reflejado en los resultados.

En este documento se presenta la teoría necesaria para el desarrollo y buen funcionamiento del programa, también se presentan ejemplos para garantizar una mejor comprensión de los conceptos. Adicionalmente, se muestran diagramas de flujo de los procedimientos desarrollados por el programa. Finalmente, se muestran comparaciones de los resultados obtenidos con MAMPOS y softwares externos como ETABS y Excel para poder concluir respecto a la exactitud de los resultados obtenidos con MAMPOS; así mismo, se realizan comparaciones con cálculos realizados por MAMPOS original con el fin de evaluar las diferencias presentadas en ambos programas.

Planteamiento del Problema

En las diferentes especialidades de la ingeniería civil se debe cumplir con una serie de criterios y condiciones para garantizar la calidad y seguridad en las edificaciones tanto nuevas como existentes; en el caso de Colombia existe el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), en la cual no solo establece parámetros de diseño sino también propone métodos de análisis que pueden aplicarse teniendo en cuenta las características del proyecto y el sistema estructural que se desea diseñar; en este sentido podemos encontrar los sistemas de muros de carga que hacen uso de muros en mampostería estructural. En Colombia la mampostería estructural es empleada con frecuencia para la construcción de viviendas según la gráfica 1, tomada del Departamento Administrativo Nacional de Estado (DANE), se observa una alta ocupación de sistemas constructivos en mampostería.



Gráfica 1. Área en proceso nueva y por sistema constructivo m2

Naturalmente, se hace indispensable la construcción de herramientas parametrizadas que integren las especificaciones del reglamento NSR 10 y que permita hacer un

análisis de los parámetros disponibles en el reglamento, y así obtener proyectos seguros, funcionales y eficientes, desarrollados de forma óptima para su fin.

Dicho lo anterior, la Universidad del Cauca cuenta con una serie de programas desarrollados por el Ingeniero Juan Manuel Mosquera, en la cual existe un programa de nombre MAMPOS desarrollado en un lenguaje de programación llamado QuickBASIC. El programa mencionado anteriormente fue creado en el año 2008 y tiene como finalidad el análisis de estructuras en mampostería empleando el método de la fuerza horizontal equivalente, además cuenta con herramientas que facilitan el cálculo de parámetros necesarios para el análisis de mampostería estructural, por lo tanto, es preciso aprovechar la utilidad del programa ya que en la actualidad el sistema de mampostería estructural es ampliamente utilizado. Por tal razón, resulta necesario realizar una actualización del programa MAMPOS de acuerdo con el reglamento vigente y el desarrollo de un óptimo funcionamiento en equipos actuales y una interfaz más amigable con los usuarios.

Justificación

Teniendo en cuenta que la implementación de edificaciones construidas con el sistema de muros estructurales ha logrado un gran auge en Colombia según la gráfica 1, se propone realizar una actualización de MAMPOS en su código de programación y su interfaz gráfica acorde a los parámetros establecidos en la última actualización del reglamento colombiano, de tal forma que el ambiente de trabajo con el programa sea más ameno con el usuario, de esta forma se emplea un desarrollador de programas VISUAL STUDIO para realizar la modificación tanto del código como de la interfaz gráfica, para que los usuarios puedan correr el programa sin necesidad de instalar máquinas virtuales o realizar ningún procedimiento adicional en equipos que funcionan con sistemas operativos actuales, por lo que su uso será más sencillo y estará al alcance de más usuarios, convirtiéndose en una herramienta que contribuye al proceso educativo y al desarrollo de obras en mampostería.

Además, el sistema estructural de muros de carga es versátil en cuanto a sus materiales y métodos constructivos, ya que en él pueden emplearse no sólo diferentes tipo de bloques de mampostería o concreto, junto con el mortero de pega, sino que también permite incorporar barras de acero al mismo, lo que aumenta la resistencia a las cargas a las que será sometida la estructura; dicho lo anterior, también es importante considerar el aislamiento acústico que se obtiene precisamente por el tipo de materiales empleados, lo que le da mayor confort al usuario. Por otra parte, desde el punto de vista constructivo, es posible afirmar que este sistema posibilita la construcción de la estructura de manera rápida y sencilla, lo que implica un ahorro en mano de obra a comparación de otros sistemas estructurales.

Objetivos

Objetivo general

Actualizar el programa MAMPOS de acuerdo a la norma NSR-10 para el análisis plano de muros en el sistema de muros de mampostería estructural y su interfaz gráfica.

Objetivos específicos

- Implementar una nueva interfaz gráfica de entrada de datos.
- Comparar resultados

Programar el cálculo de:

- Fuerzas laterales estáticas (F.H.E.) y dinámicas (análisis modal)
- Cortantes y momentos por piso.
- Derivas lineales.
- Rigidez.

I. Marco Teórico y Desarrollo del Programa

1. Hipótesis

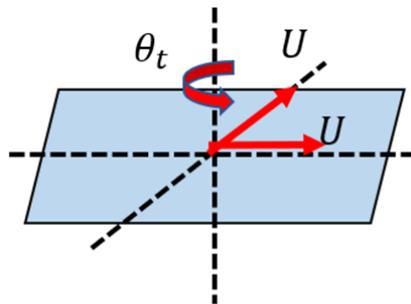
Modelo de la losa

Se considera a la losa como un diafragma rígido, es decir, es indeformable en su plano. Además, ésta es una membrana con 3 grados de libertad (ver ilustraciones 1, 2 y 3):

- 2 desplazamientos en su plano.
- 1 giro en su plano (torsional).

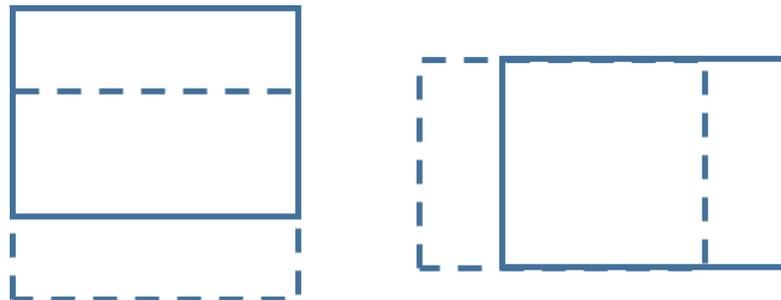
Adicionalmente, se considera que las losas no tienen rigidez a flexión fuera del plano.

Ilustración 1. Grados de libertad en losa



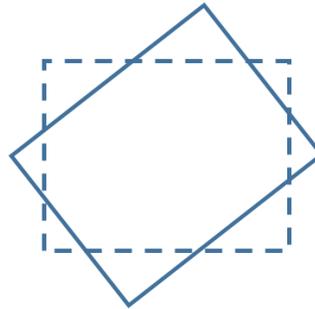
Nota. Elaboración propia

Ilustración 2. Desplazamientos en el plano de la losa



Nota. Elaboración propia

Ilustración 3. Giros en el plano de la losa

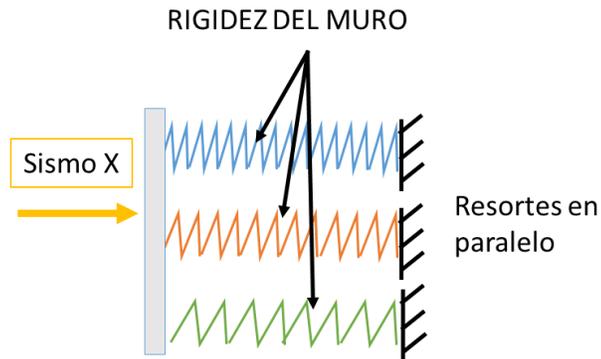


Nota. Elaboración propia

Modelo de distribución de fuerzas

En este caso únicamente se consideran las cargas laterales sobre un conjunto de muros que trabajan sobre su propio plano, de tal forma que la rigidez sea analizada para un sistema de muros en paralelo (ver imagen 4). El análisis se realiza en las direcciones perpendiculares X y Y, además, se considera un diafragma rígido y membrana (ver imagen 5).

Ilustración 4. Rigidez para muros en paralelo



Nota. Elaboración propia

$$K_{px} = \sum K_{mx_i}$$

$$K_{py} = \sum K_{my_i}$$

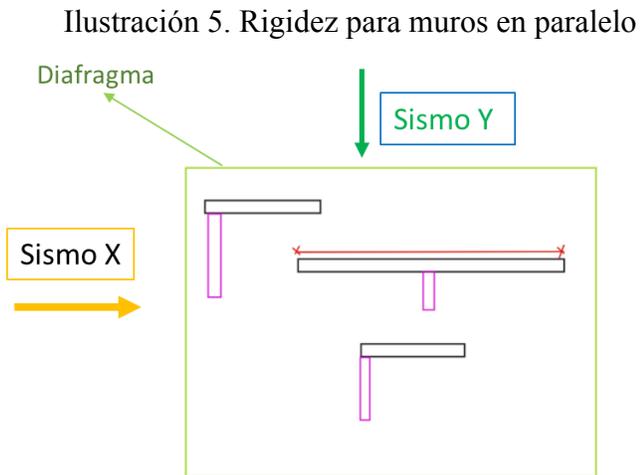
Donde:

K_{px} : rigidez total de piso en dirección X.

K_{py} : rigidez total de piso en dirección Y.

K_{mx_i} : rigidez del muro i en dirección X.

K_{my_i} : rigidez del muro i en dirección Y.

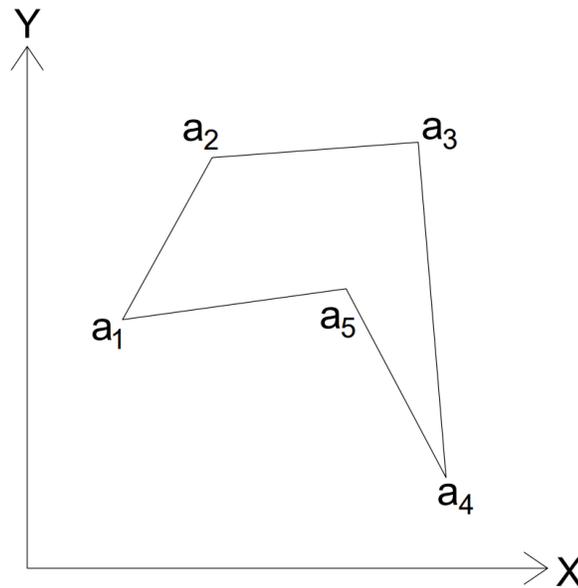


Nota. Elaboración propia

2. Cálculo del Área

El cálculo del área de una poligonal irregular puede efectuarse haciendo uso de la fórmula del área de Gauss o método de lazada, en el cual es un algoritmo matemático en el que se emplean las coordenadas de cada vértice de dicha poligonal para formar una matriz con éstas.

Ilustración 6. Poligonal irregular

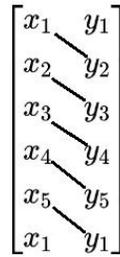


Nota. Elaboración propia

En la ilustración 6 se puede observar una poligonal irregular con coordenadas de sus vértices $a_1(x_1, y_1)$, $a_2(x_2, y_2)$, $a_3(x_3, y_3)$, $a_4(x_4, y_4)$, $a_5(x_5, y_5)$; ahora, se crea una matriz cuyas componentes sean las coordenadas de cada punto, repitiendo las coordenadas del primer punto al final de la matriz, como se muestra a continuación.

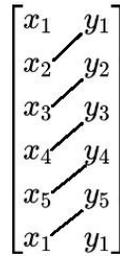
$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 \\ x_2 & y_2 \\ x_3 & y_3 \\ x_4 & y_4 \\ x_5 & y_5 \\ x_1 & y_1 \end{bmatrix}$$

Este método recibe su nombre debido al cruce de productos entre los elementos de la matriz, lo cual genera una forma similar a la de una lazada. El procedimiento inicia creando diagonales descendentes y hacia la derecha iniciando en el elemento x_1 y finalizando en el elemento y_1 , a continuación, se realiza la sumatoria de la multiplicación de los elementos conectados por cada diagonal.



$$A_{\text{suma}} = (x_1 \times y_2) + (x_2 \times y_3) + (x_3 \times y_4) + (x_4 \times y_5) + (x_5 \times y_1)$$

Posteriormente se crean diagonales descendentes y hacia la izquierda iniciando en el elemento y_1 y finalizando en el elemento x_1 , acto seguido se realiza la sumatoria de la multiplicación de los elementos conectados por cada diagonal.



$$A_{\text{resta}} = (y_1 \times x_2) + (y_2 \times x_3) + (y_3 \times x_4) + (y_4 \times x_5) + (y_5 \times x_1)$$

El área de la poligonal se estima mediante la siguiente expresión:

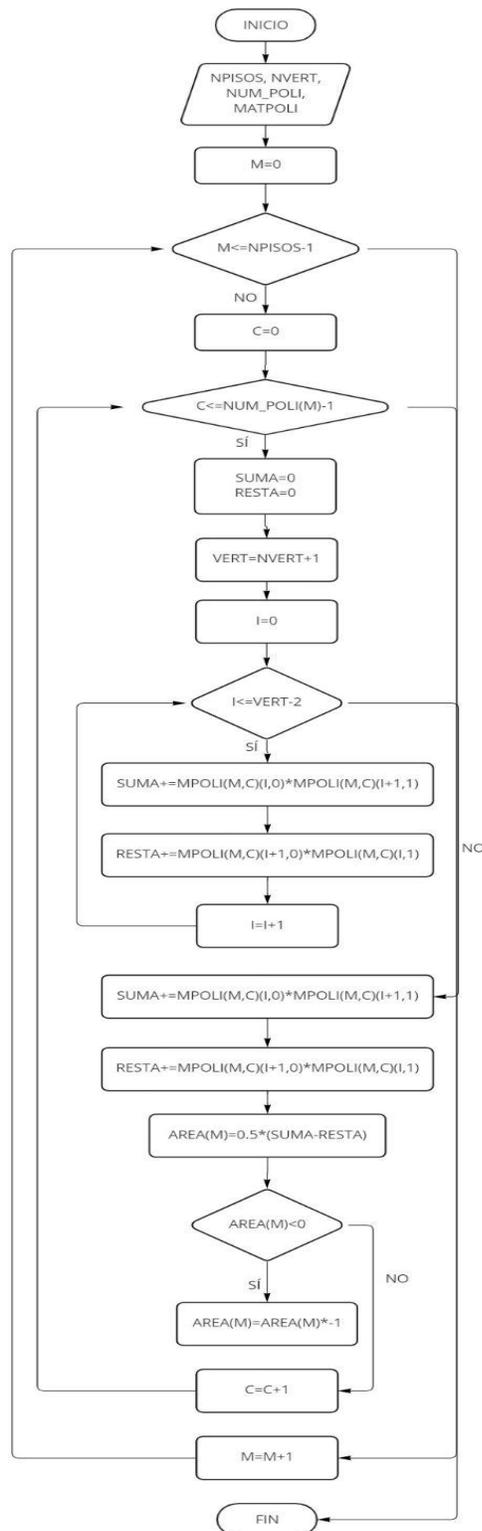
$$Area = \frac{1}{2} |(A_{\text{suma}} - A_{\text{resta}})|$$

$$Area = \frac{1}{2} |((x_1 \times y_2) + (x_2 \times y_3) + (x_3 \times y_4) + (x_4 \times y_5) + (x_5 \times y_1)) - ((y_1 \times x_2) + (y_2 \times x_3) + (y_3 \times x_4) + (y_4 \times x_5) + (y_5 \times x_1))|$$

De forma general, la fórmula mostrada anteriormente puede generalizarse para una poligonal de n vértices de la siguiente manera.

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} (x_i \times y_{i+1} + x_n \times y_1) - \sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} \times y_i + x_1 \times y_n) \right|$$

Ilustración 7. Diagrama de flujo para cálculo del área



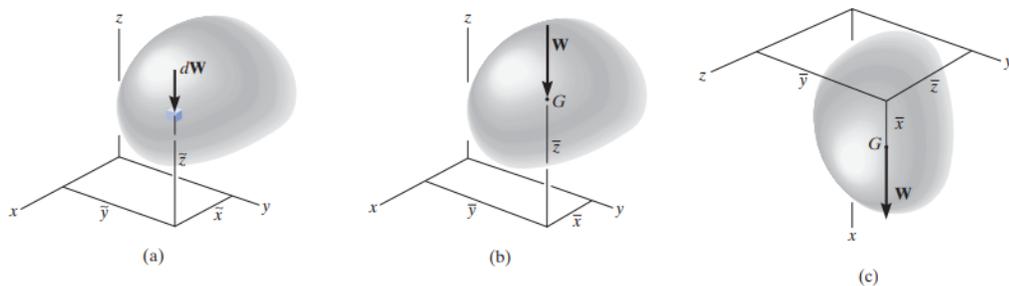
Nota. Elaboración propia.

3. Cálculo de Centroides o centros de masas

Para el cálculo del centroide o centro de masa (CM), se asume que las cargas son superficiales y constantes en toda el área

Consideremos un cuerpo homogéneo con masa conocida ubicado en un sistema coordenado en el plano XYZ, como se muestra en la ilustración 8.

Ilustración 8. Posición del elemento de análisis para centro de gravedad



Nota. Adaptado de Estática, capítulo 9 (p.448). por Rusell C. Hibbeler, 2010.

Este cuerpo puede dividirse en partículas de tamaño infinitesimal con masa diferencial (dW), además, asumimos que el elemento de análisis se encuentra en un campo gravitatorio en el que la gravedad tiene la misma magnitud y dirección en cualquier punto, de tal forma que los pesos de las partículas mencionadas anteriormente representan un sistema de fuerzas aproximadamente paralelas. El centro de gravedad de un cuerpo se define como el punto en el que actúa la resultante de los pesos de cada una de las partículas que lo componen.

Para calcular el peso de un cuerpo usando el concepto del diferencial de masa empleamos la siguiente expresión.

$$W = \int dW$$

La ubicación en X del centro de gravedad de la partícula dW con coordenadas $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$ se estima al igualar el momento generado por el peso del cuerpo con

respecto al eje Y, con la suma de los momentos generados por los pesos de las partículas con respecto al eje Y.

$$\bar{x}W = \int \tilde{x}dW$$

Donde:

\bar{x} : coordenada en X del centro de gravedad del cuerpo.

De forma análoga, se analiza la ubicación del centro de gravedad respecto al eje X.

$$\bar{y}W = \int \tilde{y}dW$$

Donde:

\bar{y} : coordenada en Y del centro de gravedad del cuerpo.

El análisis de la posición del centro de gravedad respecto al eje Z se realiza girando el sistema de coordenadas 90° respecto al eje Y.

$$\bar{z}W = \int \tilde{z}dW$$

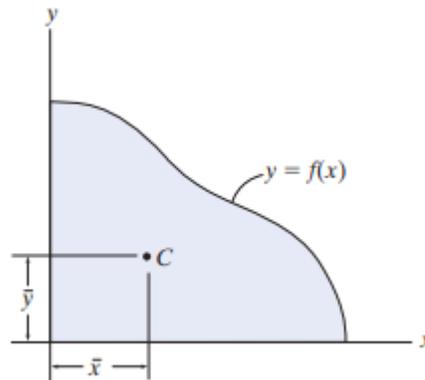
Donde:

\bar{z} : coordenada en Z del centro de gravedad del cuerpo.

En consecuencia, las coordenadas del centro de gravedad del cuerpo en los ejes X, Y, Z se calculan como:

$$\bar{x} = \frac{\int \tilde{x}dW}{\int dW} \quad \bar{y} = \frac{\int \tilde{y}dW}{\int dW} \quad \bar{z} = \frac{\int \tilde{z}dW}{\int dW}$$

Cuando el cuerpo de análisis cuenta con densidad constante, es posible afirmar que el centroide coincide con el centro de gravedad. Ahora bien, en el caso de las áreas contenidas en el plano XY (ver ilustración 9), su centroide se calcula usando integrales similares a las propuestas para el cálculo del centro de gravedad.

Ilustración 9. Área descrita por la curva $y = f(x)$.

Nota. Adaptado de *Estática, capítulo 9 (p.450)*. por Rusell C. Hibbeler, 2010.

$$\bar{x} = \frac{\int_A \tilde{x} dA}{\int_A dA} \quad \bar{y} = \frac{\int_A \tilde{y} dA}{\int_A dA}$$

Donde:

\bar{x} : coordenada en X del centroide del área.

\bar{y} : coordenada en Y del centroide del área.

Para eliminar el uso del método de integración, en el caso de los elementos o figuras compuestas resulta más sencillo determinar el centroide de área mediante la descomposición en figuras más simples con ubicación y dimensiones conocidas, para esto se usan fórmulas similares a las indicadas en el método de integración, pero en lugar de tomar infinitos diferenciales de área, usamos el área de las figuras simples en las que se dividió la figura inicial.

$$\bar{x} = \frac{\sum \tilde{x} A}{\sum A} \quad \bar{y} = \frac{\sum \tilde{y} A}{\sum A}$$

Donde:

(\tilde{x}, \tilde{y}) : coordenadas del centroide de cada figura simple del elemento compuesto.

(\bar{x}, \bar{y}) : coordenadas del centroide de la figura compuesta.

ΣA : área total de la figura compuesta.

A continuación, se indican los pasos para realizar el cálculo de centroides mediante la descomposición de áreas.

1. Defina la posición de los ejes de referencia.
2. Divida la figura compuesta en un número finito de figuras con formas más simples.
3. Si la figura compuesta cuenta con un vacío, entonces considere el área de la figura del vacío como negativa.
4. Determine las coordenadas \bar{x} , \bar{y} del centroide de cada figura definida en el paso 2.
5. Sume las áreas de cada figura definida en el paso 2.
6. Realice el producto de las coordenadas \bar{x} , \bar{y} con el área de cada figura definida en el paso 2.
7. Realice la sumatoria de los productos realizados en el paso 6.
8. Calcule las coordenadas del centroide de la figura compuesta como la división de las sumatorias obtenidas en el paso 7 y la sumatoria obtenida en el paso 2.

Comprobación de Centroides y Áreas

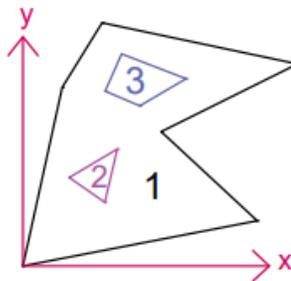
A continuación, se presenta el cálculo de centroides realizados en MAMPOS y AutoCAD para tres ejemplos, cada uno de ellos cuenta con áreas vacías (las de colores), esto con el fin de comparar los resultados obtenidos en cada uno de los softwares mencionados anteriormente y así evaluar la exactitud de MAMPOS.

Tabla 1. Cálculo de centroide para ejemplo 1 en AutoCAD

Figura	Observaciones	Área (m ²)	\bar{x}_i (m)	\bar{y}_i (m)	$A\bar{x}_i$ (m ³)	$A\bar{y}_i$ (m ³)	\bar{x} (m)	\bar{y} (m)
1	-	71.3153	5.0139	5.4182	357.568	386.401	5.05916	5.27161
2	Vacío	2.1987	3.2971	4.0009	7.249	8.797		
3	Vacío	4.4269	5.2052	8.2643	23.043	36.585		
Σ		64.690			327.276	341.019		

Nota. Elaboración propia

Ilustración 10. Ejemplo 1 para cálculo de centroide



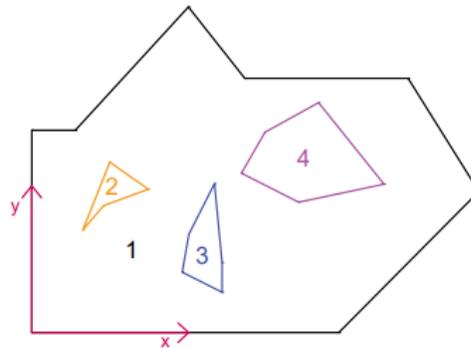
Nota. Elaboración propia

Tabla 2. Cálculo de centroide para ejemplo 2 en AutoCAD

Figura	Observaciones	Área (m ²)	\bar{x}_i (m)	\bar{y}_i (m)	$A\bar{x}_i$ (m ³)	$A\bar{y}_i$ (m ³)	\bar{x} (m)	\bar{y} (m)
1	-	490.6737	14.1189	9.36	6927.773	4592.706	13.81935	9.20151
2	Vacío	6.3416	5.7754	9.9687	36.625	63.218		
3	Vacío	12.2844	12.1609	5.9844	149.389	73.515		
4	Vacío	38.8497	19.4401	12.0953	755.242	469.899		
Σ		433.198			5986.516	3986.075		

Nota. Elaboración propia

Ilustración 11. Ejemplo 2 para cálculo de centroide



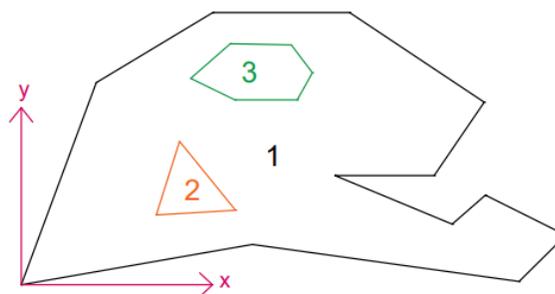
Nota. Elaboración propia

Tabla 3. Cálculo de centroide para ejemplo 3 en AutoCAD

Figura	Observaciones	Área (m ²)	\bar{x}_i (m)	\bar{y}_i (m)	$A\bar{x}_i$ (m ³)	$A\bar{y}_i$ (m ³)	\bar{x} (m)	\bar{y} (m)
1	-	301.9719	14.42	7.4926	4354.435	2262.555	14.63881	7.26767
2	Vacío	9.4491	9.7023	5.5386	91.678	52.335		
3	Vacío	16.9172	13.4903	12.2485	228.218	207.210		
Σ		275.606			4034.539	2003.010		

Nota. Elaboración propia

Ilustración 12. Ejemplo 2 para cálculo de centroide



Nota. Elaboración propia

Finalmente, en la tabla 4 se indican las coordenadas del centroide obtenidas en MAMPOS para cada ejemplo, junto con el porcentaje de diferencia de las coordenadas obtenidas en AutoCAD respecto a las obtenidas en MAMPOS.

Tabla 4. Cálculo de centroide para ejemplo 3 en AutoCAD

Ejemplo #	MAMPOS		AutoCAD		% diferencia AutoCAD respecto a MAMPOS	
	\bar{x} (m)	\bar{y} (m)	\bar{x} (m)	\bar{y} (m)	\bar{x} (m)	\bar{y} (m)
1	5.0591682	5.27165465	5.0591601	5.27160506	-0.0002	-0.0009
2	13.8192964	9.20147757	13.8193533	9.20150782	0.0004	0.0003
3	14.6388325	7.26761796	14.6388125	7.26766636	-0.0001	0.0007

Nota. Elaboración propia

Analizando los resultados mostrados en la tabla 4, es evidente que las coordenadas de centroides obtenidas con MAMPOS son muy similares a las obtenidas con información extraída de AutoCAD, por lo tanto, los porcentajes de diferencia entre los resultados obtenidos con éstos software son muy bajos, lo cual permite concluir que las coordenadas estimadas con MAMPOS cuentan con la suficiente exactitud.

4. Cálculo de Rigidez por Muro

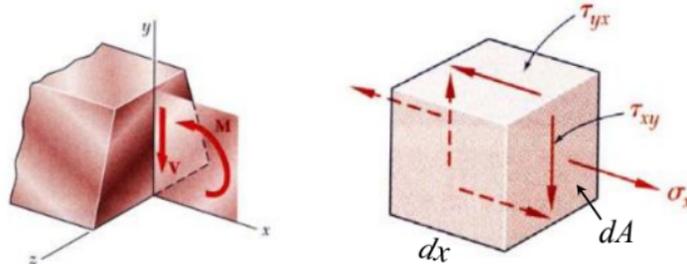
Al presentarse una excitación debida a un sismo, se generan movimientos en la edificación que deben ser resistidos por la inercia y rigidez de los elementos estructurales, de tal forma que las deformaciones o desplazamientos no sean excesivos. En muros altos, tiene importancia la deformación por flexión, por lo cual las rigideces de piso dependen de la distribución de la fuerza lateral en altura, las fuerzas en cada piso dependen de las rigideces y estas a su vez dependen de las fuerzas, por lo que se hace indispensable un proceso iterativo. Cuando las fuerzas laterales se distribuyen proporcionalmente a la rigidez de cada muro, calculada por un desplazamiento unitario de su extremo superior, es decir aplicando una fuerza en dicho extremo y dividiéndola entre el desplazamiento que esta produce, el error cometido es tolerable. Alternativamente, las rigideces de los diferentes pisos en los sistemas estructurales de muros altos pueden ser calculadas suponiendo una distribución de fuerzas en cada muro, semejante a las cargas globales de la edificación, es decir, a las fuerzas de piso calculadas con el método de fuerza horizontal equivalente. Para cada muro y con la ayuda de la resistencia de materiales,

pueden determinarse los desplazamientos debidos tanto a flexión y cortante y la rigidez del muro.

En particular, MAMPOS hace uso de las hipótesis enunciadas anteriormente para realizar el cálculo de la rigidez, esto considerando que sólo se considera el trabajo en el plano del muro y se desprecia el trabajo realizado en sentido perpendicular al plano del muro.

La obtención de las ecuaciones necesarias para determinar la rigidez de un muro parte del análisis de una partícula de área infinitesimal, en la cual se aplican esfuerzos normales y cortantes (ver ilustración 13).

Ilustración 13. Elemento de análisis para ecuaciones de rigidez



Nota. Adaptado de conferencias de clase "Concreto armado 2", por Ing. Julio Cesar Diago Franco, 2021.

A partir de la imagen mostrada anteriormente, es posible definir las ecuaciones correspondientes los esfuerzos que actúan sobre el elemento de análisis, es decir:

$$\sigma_x = \frac{My}{I} \quad \tau_{xy} = \frac{VQ}{bI_z}$$

Donde:

σ_x : esfuerzo normal.

M: momento en el elemento.

y: distancia medida desde el centroide a la cara superior del elemento.

I: inercia del elemento.

τ_{xy} : esfuerzo cortante.

V: fuerza cortante.

Q: momento estático del área.

b: ancho.

I_z : inercia del elemento respecto al eje z.

Además, definimos la ecuación de la energía de deformación como:

$$U = \int_V U_o dV$$

Donde:

U: energía de deformación.

La energía de deformación total del sistema se establece como la suma de la energía de deformación por flexión y la energía de deformación por fuerza cortante, es decir:

$$U_{total} = U_{flexión} + U_{compresión}$$

Energía de Deformación por Flexión

Usando las ecuaciones presentadas anteriormente tenemos:

$$U_{flexión} = \int_V U_o dV$$

$$U_{flexión} = \int_V \frac{\sigma_x^2}{2E} dV$$

Donde:

E: módulo de elasticidad.

$$U_{flexión} = \int_L \int_A \frac{M^2 y^2}{2EI^2} dA dx$$

$$U_{flexión} = \int_L \frac{M^2}{2EI} \left(\int_L y^2 dA \right) dx$$

Donde $I = \int_A y^2 dA$ es la inercia axial. Entonces:

$$U_{flexión} = \int_L \frac{M^2}{2EI} dx$$

Energía de Deformación por Fuerza Cortante

$$U_{cortante} = \int_v U_0 dV$$

$$U_{cortante} = \int_V \frac{\tau_{xy}^2}{2G} dV$$

Donde:

G: módulo de corte.

$$U_{cortante} = \int_L \int_A \frac{V^2 Q^2}{2G b^2 I_z^2} dA dx$$

$$U_{cortante} = \int_L \frac{V^2 A}{2G A I_z^2} \left(\int_A \frac{Q^2}{b^2} dA \right) dx$$

Donde $\eta = \frac{A^2}{I_z^2 \left(\int_A \frac{Q^2}{b^2} dA \right)}$ es el factor de forma para esfuerzo cortante.

Entonces:

$$U_{cortante} = \int_0^L \eta \frac{V^2}{2GA} dx$$

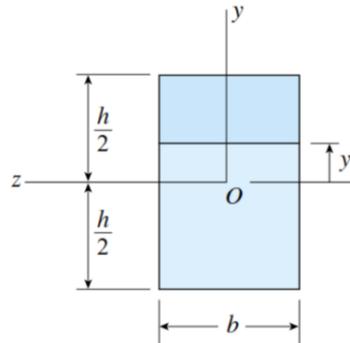
Finalmente, la energía de deformación total es:

$$U = \int_L \frac{M^2}{2EI} dx + \int_L \eta \frac{V^2}{2GA} dx$$

Factor de Forma en una Sección Rectangular

En cuanto al factor de forma, es posible desarrollar la fórmula mostrada en la sección de energía de deformación por fuerza cortante, esto evaluando una sección rectangular (ver ilustración 14).

Ilustración 14. Sección rectangular de análisis



Nota. Adaptado de conferencias de clase “Concreto armado 2”, por Ing. Julio Cesar Diago Franco, 2021.

Como se estableció anteriormente, el factor de forma requiere de la variable Q , la cual está en función de la geometría de la sección a analizar.

$$Q = A^* \bar{y}^*$$

Donde:

$$A^* = b \left(\frac{h}{2} - y_1 \right)$$

Donde:

b: base de la sección.

h: altura de la sección.

y_1 : distancia entre el centroide de la sección y el centroide de la región superior de ésta.

$$\bar{y}^* = \frac{1}{2} \left(\frac{h}{2} + y_1 \right)$$

Entonces,

$$Q = \frac{b}{2} \left(\frac{h^2}{4} - y_1^2 \right)$$

Reemplazando en la fórmula general de factor de forma tenemos:

$$\eta = \frac{bh}{\left(\frac{bh^3}{12} \right)^2} \int_A \frac{\frac{b^2}{4} \left(\frac{h^4}{16} - \frac{h^2 y_1^2}{2} + y_1^4 \right)}{b^2} dA$$

$$\eta = \frac{144}{bh^5} \int_{-h/2}^{h/2} \frac{1^2}{4} \left(\frac{h^4}{16} - \frac{h^2 y_1^2}{2} + y_1^4 \right) b dy_1$$

$$\eta = \frac{36}{h^5} \int_{-h/2}^{h/2} \frac{1^2}{4} \left(\frac{h^4}{16} - \frac{h^2 y_1^2}{2} + y_1^4 \right) dy_1$$

$$\eta = \frac{72}{h^5} \int_0^{h/2} \frac{1^2}{4} \left(\frac{h^4}{16} - \frac{h^2 y_1^2}{2} + y_1^4 \right) dy_1$$

$$\eta = \frac{72}{h^5} \left(\frac{h^4 y_1}{16} - \frac{h^3 y_1^3}{6} + \frac{y_1^5}{5} \right) \Big|_0^{h/2}$$

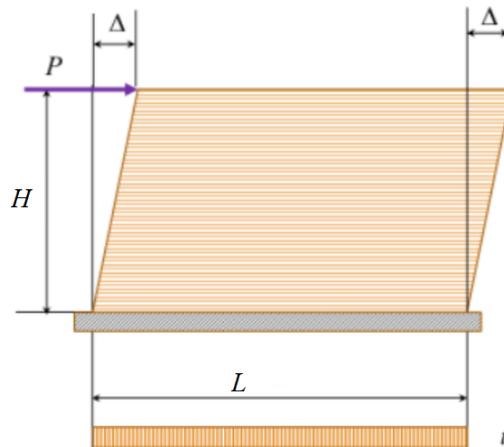
$$\eta = 72 \left(\frac{1}{32} - \frac{1}{48} + \frac{1}{160} \right)$$

$$\eta = \frac{6}{5}$$

Rigidez en Muros de Cortante

La rigidez se define como la oposición de la estructura a la deformación o al desplazamiento, en consecuencia puede expresarse como la relación entre la deformación y la carga aplicada lateralmente, como se muestra en la siguiente ilustración.

Ilustración 15. Carga y desplazamiento en un muro de cortante



Nota. Adaptado de conferencias de clase “Concreto armado 2”, por Ing. Julio Cesar Diago Franco, 2021.

Donde:

P: carga lateral aplicada al muro.

Δ: desplazamiento del muro.

H: altura del muro.

L: largo del muro.

t: espesor del muro.

El desplazamiento total del muro puede estimarse como la suma de los desplazamientos por flexión y por cortante mediante derivadas parciales, es decir:

$$\Delta = \frac{\partial U}{\partial P}$$

$$\Delta = \int_H \frac{M}{EI} \cdot \frac{\partial M}{\partial P} dx + \int_H \eta \frac{V}{GA} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} dx$$

Alternativamente, el desplazamiento total producido por la fuerza P sobre el muro puede estimarse haciendo uso de la siguiente fórmula.

$$\Delta = \Delta_f + \Delta_v$$

Donde:

Δ_f : desplazamiento por flexión.

Δ_v : desplazamiento por cortante.

$$\Delta_f = \frac{PH^3}{3E_m I_m}$$

Donde:

E_m : módulo de elasticidad del muro.

I_m : inercia del muro.

$$I_m = \frac{tL^3}{12}$$

$$\Delta_v = \eta \frac{PH}{A_m G_m}$$

Donde:

A_m : área de la sección transversal del muro.

$$G_m = 0.4E_m$$

Reemplazando en la ecuación de desplazamiento total tenemos:

$$\Delta = \frac{4PH^3}{E_m tL^3} + \frac{3PH}{tLE_m}$$

$$\Delta = \frac{P}{tE_m} \left[3 \left(\frac{H}{L} \right) + 4 \left(\frac{H}{L} \right)^3 \right]$$

Como se estableció anteriormente, la rigidez se estima como la relación entre la fuerza aplicada y el desplazamiento que produce, entonces:

$$K = \frac{P}{\Delta} = \frac{tE_m}{3 \left(\frac{H}{L} \right) + 4 \left(\frac{H}{L} \right)^3}$$

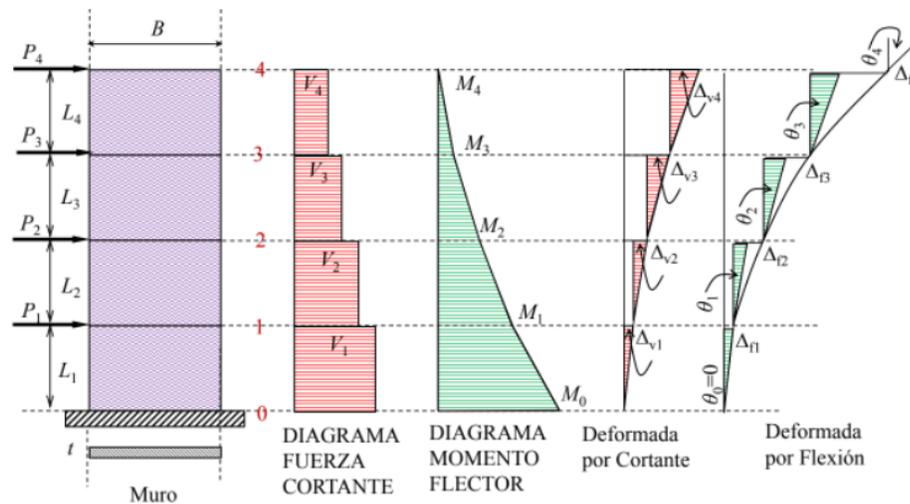
Si tomamos $\alpha = \frac{H}{L}$, tenemos:

$$K = \frac{tE_m}{3\alpha + 4\alpha^3}$$

Modelo de muros acoplados

Se debe agregar que las fuerzas laterales no sólo generan desplazamientos en la estructura, sino también producen momentos flectores y fuerzas cortantes, como se indica en la ilustración 16. Cabe aclarar que para la rigidez de cada muro se asume una magnitud y distribución de fuerzas de todo el edificio.

Ilustración 16. Momentos flectores, fuerzas cortantes y desplazamientos en estructura con sistema de muros de corte



Nota. Adaptado de conferencias de clase "Concreto armado 2", por Ing. Julio Cesar Diago Franco, 2021.

Donde:

V_i : cortante en el nivel i .

M_i : momento en el nivel i .

A modo de ejemplo, a continuación, se indica el cálculo de cortante para la estructura mostrada en la ilustración 16, pero el procedimiento es análogo para una estructura de n pisos.

$$V_4 = P_4$$

Donde:

P : fuerza obtenida mediante el método de la fuerza horizontal equivalente.

$$V_3 = P_3 + P_4$$

$$V_2 = P_2 + P_3 + P_4$$

$$V_1 = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

Así mismo, se muestra el cálculo de los momentos flectores para la estructura ejemplo, pero el procedimiento es análogo para una estructura de n pisos.

$$M_4 = 0$$

$$M_3 = P_4 H_4$$

$$M_2 = P_3 H_3 + P_4 (H_3 + H_4)$$

$$M_1 = P_2 H_2 + P_3 (H_2 + H_3) + P_4 (H_2 + H_3 + H_4)$$

$$M_0 = P_1 H_1 + P_2 (H_1 + H_2) + P_3 (H_1 + H_2 + H_3) + P_4 (H_1 + H_2 + H_3 + H_4)$$

En la estimación de las deformaciones por cortante se hace uso de la fórmula demostrada anteriormente, en dónde la fuerza P será el cortante por piso.

$$\Delta_{V_i} = \frac{3V_n H_n}{tLE}$$

Donde:

Δ_{V_i} : deformación por cortante del muro i en el nivel n.

Por otra parte, el cálculo de las deformaciones por flexión puede estimarse mediante el método del momento de área.

$$\theta_i = \theta_{i-1} + \frac{M_{i-1} + M_i}{2EI} \cdot H_i$$

Se realiza la aclaración de que el valor de Θ en el nivel cero debe ser igual a cero, en este

caso no se aplica la fórmula del método del momento área.

$$\Delta_{f_i} = \theta_{i-1} H_i + \frac{2M_{i-1} + M_i}{6EI} \cdot H_i^2$$

Donde:

Δ_{f_i} : deformación por flexión del muro i en el nivel n.

Finalmente, la rigidez de los muros se expresa como:

$$V_i = \Delta V_i + \Delta f_i$$

$$K_i = \frac{V_i}{\Delta_{ti}}$$

Donde:

K_i : rigidez del elemento i en el nivel n .

Δ_{ti} : deformación total del elemento i en el nivel n .

$$K_i = \frac{tE}{3\left(\frac{H_i}{L}\right) + \beta_i\left(\frac{H_i}{L}\right)^3}$$

El coeficiente β se despeja una vez se han calculado las rigideces de cada elemento, para esto se usa la fórmula mostrada a continuación.

$$\beta_i = \frac{\frac{tE}{K_i} - 3\left(\frac{H_n}{L}\right)}{\left(\frac{H_n}{L}\right)^3}$$

Donde:

β_i : coeficiente del elemento i en el nivel n .

Para obtener la rigidez por piso se realiza la sumatoria de las rigideces de cada uno de los elementos estructurales.

$$K_{\text{total}} = \sum_{i=1} K_i$$

Donde:

K_{total} : rigidez total por piso.

Comparación De Rigidez Ejemplo 1

Tabla 5. Cálculo de rigidez en Excel ejemplo #1, muro MX1

PISO	PUNTO	INERCIA (cm ⁴)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (KN/M ²)	CARGA LATERAL (kN)	LONG MURO (m)	ESPESOR MURO (m)	ALTURA (cm)	
0	0	-		-	-	-	-	
1	1	0.3048625	4000000	61.214	2.9	0.15	3	
2	2	0.3048625	4000000	139.291	2.9	0.15	3	
3	3	0.3048625	4000000	225.318	2.9	0.15	3	
4	4	0.3048625	4000000	316.952	2.9	0.15	3	
CORTANTE (Kn)	MOMENTO FLECTOR (KN*m)	Δv_i (m)	θ_i (rad)	Δf_i (m)	Δt_i (m)	$(\Delta t_i/H_i) \times 100$ (%)	$K_i = V_i/\Delta t_i$ (kN/cm)	β_i
-	6850.674	0	0	0	0	0	0	0
742.775	4622.349	0.0038	0.0141	0.023	0.0264	0.88	28155	16
681.561	2577.666	0.0035	0.0230	0.057	0.0604	2.01	11283	45
542.27	950.856	0.0028	0.0273	0.076	0.0792	2.64	6845	76
316.952	0	0.0016	0.0285	0.084	0.0859	2.86	3689	144

Nota. Elaboración propia

Ilustración 17. Cálculo de rigidez en Mampos actualizado ejemplo #1, muro MX1

PROPIEDADES DE LA ESTRUCTURA
 MUROS PARALELOS A LA DIRECCION X DE LA ESTRUCTURA
 LOSA ESTRUCTURA PISO: 1

PISO	MURO #	COORD Y(Ordenada) (m)	RIGIDEZ X (KN/m)	COORD. Ycr (m)	L. MURO (m)
1	MX1	5.90	28,828.97	1.44	2.90
2	MX1	5.90	11,416.70	1.38	2.90
3	MX1	5.90	6,806.14	1.37	2.90
4	MX1	5.90	3,596.45	1.36	2.90

Nota. Elaboración propia

Tabla 6. Porcentaje de diferencia entre las rigideces calculadas

PISO	RIGIDEZ EXCEL	RIGIDEZ MAMPOS	% DIFERENCIA
1	28155.42785	28828.97	2.34
2	11283.15505	11416.7	1.17
3	6844.867445	6806.14	0.57
4	3689.496767	3596.45	2.59

Nota. Elaboración propia

Comparación De Rigidez Ejemplo 2

Tabla 7. Cálculo de rigidez en Excel ejemplo #2, muro MX1

PISO	PUNTO	INERCIA (cm ⁴)	MÓDULO DE ELASTICIDAD (KN/M ²)	CARGA LATERAL (kN)	LONG MURO (m)	ESPESOR MURO (m)	ALTURA (cm)	
0	0	-		-	-	-	-	
1	1	0.207267188	4000000	145.26	2.55	0.15	3	
2	2	0.207267188	4000000	221.93	2.55	0.15	2.5	
3	3	0.207267188	4000000	345.002	2.55	0.15	4	
4	4	0.207267188	4000000	504.388	2.55	0.15	3	
5	5	0.207267188	4000000	181.58	2.55	0.15	2.5	
CORTANTE (Kn)	MOMENTO FLECTOR (KN*m)	Δv_i (m)	θ_i (rad)	Δf_i (m)	Δt_i (m)	$(\Delta t_i/H_i) \times 100$ (%)	$K_i = V_i / \Delta t_i$ (kN/cm)	β_i
-	13962.464	0	0	0	0	0	0	0
1398.16	9767.984	0.0082	0.0429	0.068	0.0764	2.55	18296	18
1252.9	6635.734	0.0061	0.0677	0.14	0.1464	5.85	8560	71
1030.97	2511.854	0.0081	0.0897	0.321	0.3295	8.24	3129	48
685.968	453.95	0.0040	0.0951	0.279	0.2831	9.44	2423	150
181.58	0	0.0009	0.0958	0.239	0.2398	9.59	757	838

Nota. Elaboración propia

Ilustración 18. Cálculo de rigidez en Mampos actualizado ejemplo #2, muro MX1

PROPIEDADES DE LA ESTRUCTURA
 MUROS PARALELOS A LA DIRECCION X DE LA ESTRUCTURA
 LOSA ESTRUCTURA

PISO MURO #	COORD Y (Ordenada) (m)	RIGIDEZ X (KN/m)	COORD. Ycr (m)	L. MURO (m)
1 MX1	5.23	18,197.16	-0.77	2.55
2 MX1	5.23	8,513.73	-0.80	2.55
3 MX1	5.23	3,111.34	-0.81	2.55
4 MX1	5.23	2,409.15	-0.81	2.55
5 MX1	5.23	754.73	-0.82	2.55

Nota. Elaboración propia

Tabla 8. *Cálculo de rigidez en Excel ejemplo #2, muro MXI*

PISO	RIGIDEZ EXCEL	RIGIDEZ MAMPOS	% DIFERENCIA
1	18295.565	18197.16	0.537862467
2	8560.34743	8513.73	0.544574035
3	3128.71055	3111.34	0.555198308
4	2422.65653	2409.15	0.557509132
5	757.277198	754.73	0.336362655

Nota. Elaboración propia

5. Espectro de Aceleraciones

El análisis sísmico de las estructuras contempla cierto grado de incertidumbre puesto que se trabaja con la probabilidad de ocurrencia del sismo, el tiempo de retorno y la intensidad del mismo. Para evaluar la acción del sismo sobre la edificación, la NSR-10 propone el uso de un espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de la gravedad, el cual se basa en el estudio de un conjunto de acelerogramas, éstos también fueron usados para asignar un evento sísmico delimitado por las condiciones geológicas de la zona y posteriormente definir el nivel de amenaza sísmica en una región determinada con el fin de simplificar el proceso de análisis al estimar una aceleración máxima, asumiendo como parámetro general un coeficiente de amortiguamiento del 5% obtenido mediante análisis estadísticos.

Además, en el cálculo de la aceleración de diseño también influye el tipo de edificación a evaluar, ya que dependiendo de su uso se establece un coeficiente de importancia que influye en los cálculos necesarios para definir la curva del espectro.

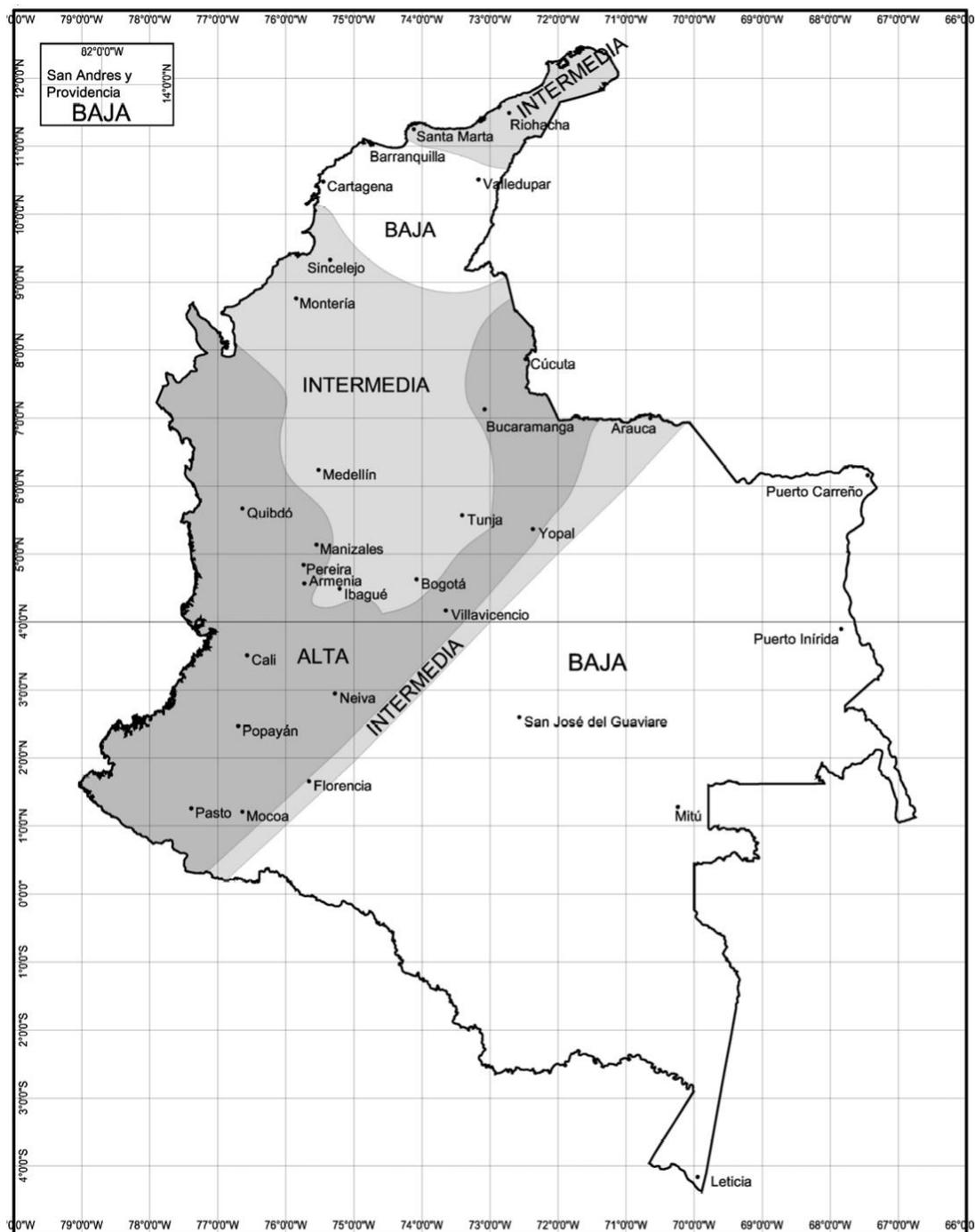
Zonas de Amenaza Sísmica

Las zonas de amenaza sísmica fueron creadas producto del análisis estadístico de la información sismológica histórica disponible con el objetivo de asignar parámetros sísmicos a determinadas regiones del país teniendo en cuenta los acelerogramas de cada una de ellas, de tal forma que, al realizar la evaluación de la probabilidad de excedencia de uno de los parámetros mencionados anteriormente, ésta exceda el 10% en 50 años dentro de un período de retorno promedio de 475 años.

La zonificación de amenaza sísmica tiene dos enfoques: uno cualitativo y otro cuantitativo. En el primero se divide la amenaza en nivel alto, intermedio o bajo, mientras que el segundo se establecen valores numéricos correspondientes a cada nivel de amenaza, esto se logra mediante la aplicación de los coeficientes de aceleración horizontal pico efectiva (A_A) y velocidad horizontal pico efectiva (A_V), los cuales son una medida de la propagación de la onda del sismo al nivel de roca.

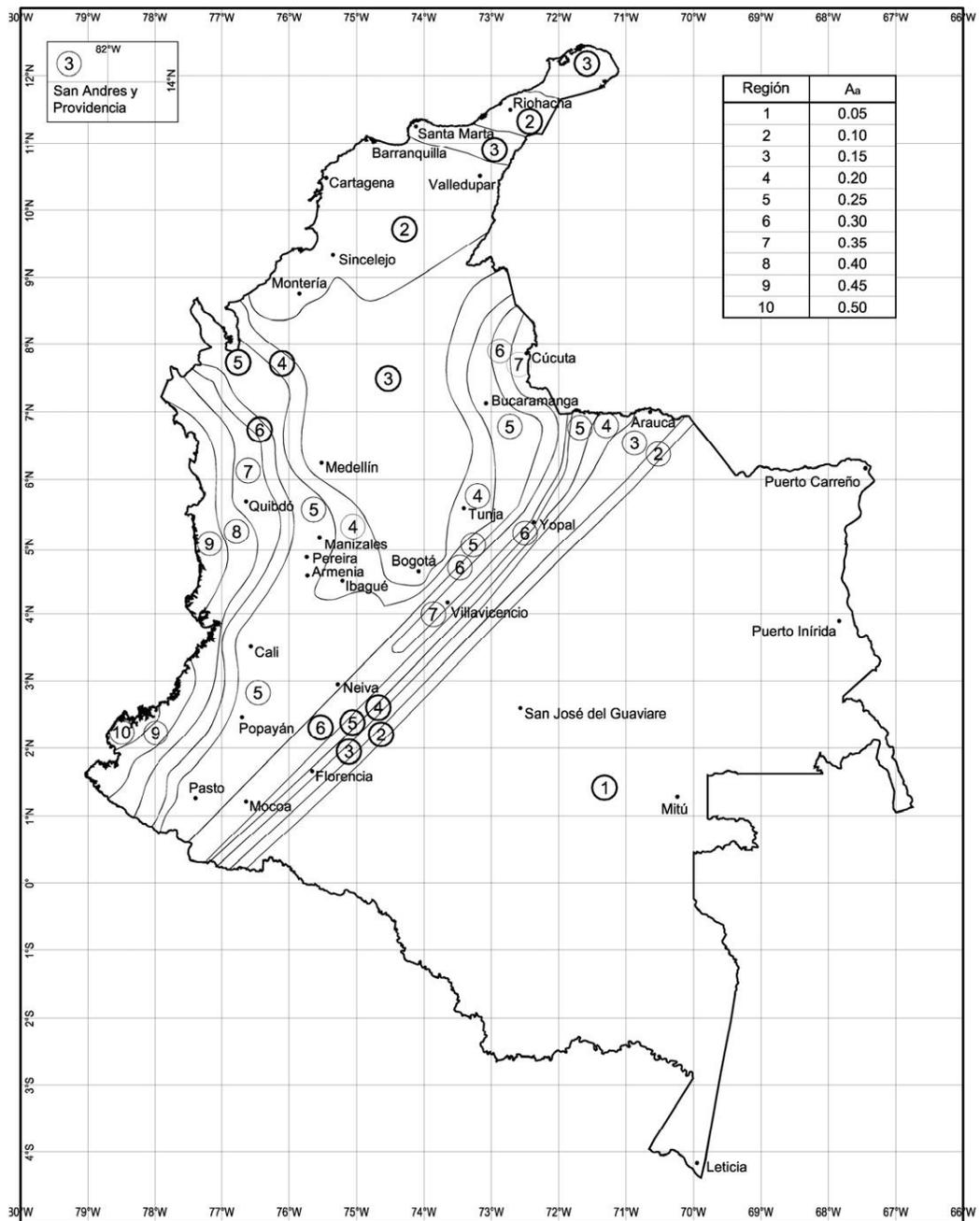
En las figuras presentadas a continuación se muestran los enfoques de la zonificación sísmica en función de A_A y A_V .

Ilustración 19. Mapa cualitativo de zonificación de amenaza sísmica en función de A_A y A_V



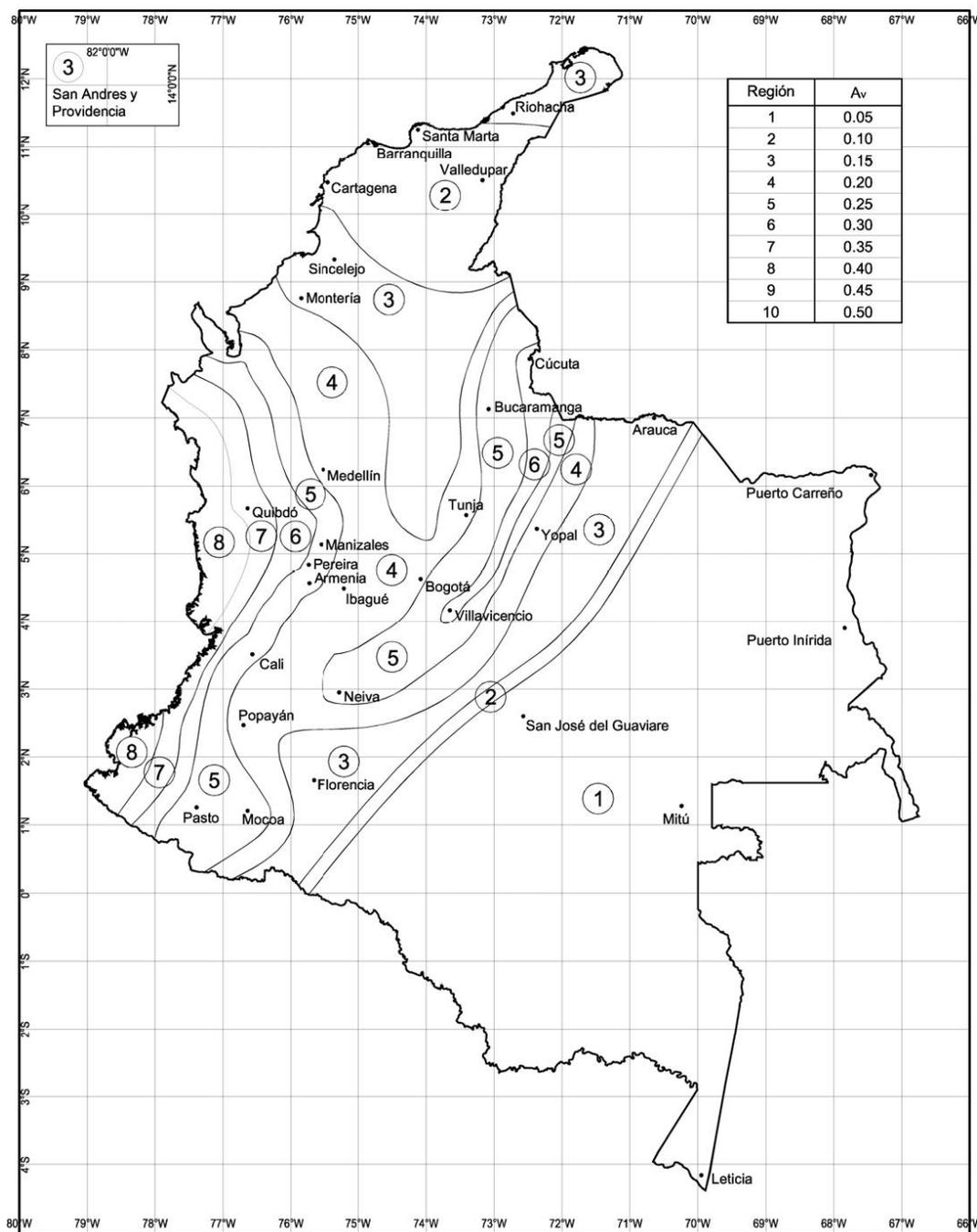
Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-17), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Ilustración 20. Mapa cuantitativo de zonificación de amenaza sísmica de valores de A_A



Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-18), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Ilustración 21. Mapa cuantitativo de zonificación de amenaza sísmica de valores de A_v



Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-19), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Coefficientes de Amplificación

Para la elaboración del espectro de diseño se requiere de factores que buscan amplificar los efectos de la aceleración de la onda de sismo en roca mediante el análisis de la velocidad de propagación de la onda de corte en los estratos de suelo, éstos evalúan la respuesta sísmica de forma local y dependen del tipo de suelo sobre el cual se encuentra cimentada la estructura. En este sentido se cuenta con los coeficientes adimensionales de amplificación para períodos de vibración cortos (F_a) y para períodos de vibración intermedios (F_v).

En la zona de períodos cortos se hace uso del coeficiente A_a , mientras que para la zona de períodos intermedios se emplea el coeficiente A_v . La NSR-10 establece el valor de dichos coeficientes para cada perfil de suelo, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 9. Valores de F_a

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_a \leq 0.1$	$A_a = 0.2$	$A_a = 0.3$	$A_a = 0.4$	$A_a \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.2	1.2	1.1	1.0	1.0
D	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0
E	2.5	1.7	1.2	0.9	0.9
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-23), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

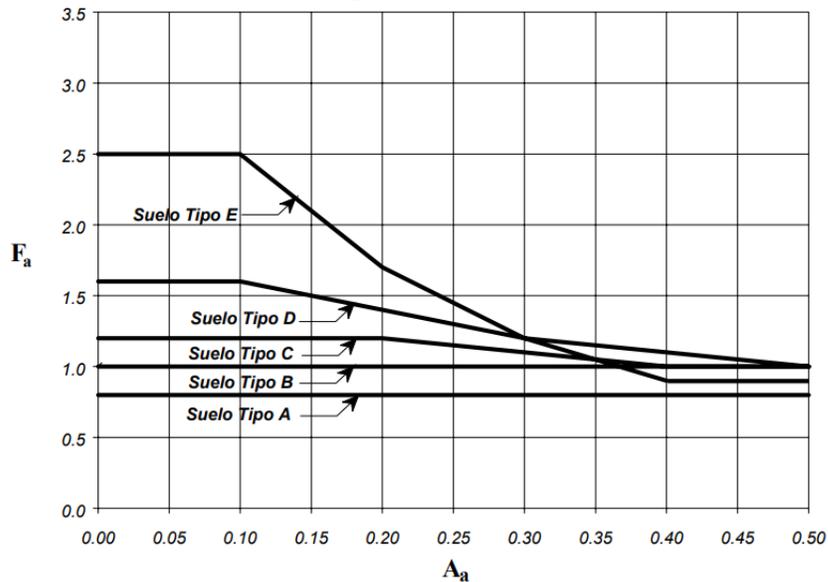
Tabla 10. Valores de F_v

Tipo de Perfil	Intensidad de los movimientos sísmicos				
	$A_v \leq 0.1$	$A_v = 0.2$	$A_v = 0.3$	$A_v = 0.4$	$A_v \geq 0.5$
A	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
B	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
C	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
D	2.4	2.0	1.8	1.6	1.5
E	3.5	3.2	2.8	2.4	2.4
F	véase nota	véase nota	véase nota	Véase nota	véase nota

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-24), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

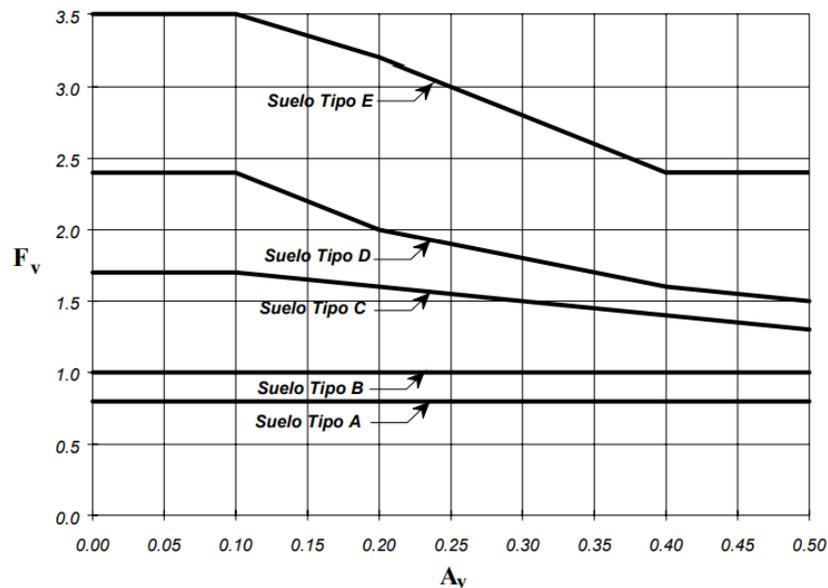
Cabe aclarar que, si se cuentan con valores intermedios de A_A y A_V , los coeficientes F_a y F_v pueden ser estimados mediante una interpolación ya que su comportamiento es lineal.

Ilustración 22. Comportamiento del coeficiente F_a



Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-24), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Ilustración 23. Comportamiento del coeficiente F_v



Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-25), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Para definir el perfil de suelo es necesario realizar previamente un estudio geotécnico realizado por un ingeniero geotecnista que describa sus características físicas y mecánicas a una profundidad de 30 m con tomas de muestras cada 1.5m. En el caso de que se cuente con un perfil de suelo tipo F, la evaluación no debe limitarse a 30 m de profundidad y se requieren consideraciones especiales.

Lo anterior tiene por objetivo clasificar el perfil de suelo como lo requiere la norma en la tabla mostrada a continuación.

Tabla 11. Clasificación de los perfiles de suelo

Tipo de perfil	Descripción	Definición
A	Perfil de roca competente	$\bar{v}_s \geq 1500$ m/s
B	Perfil de roca de rigidez media	1500 m/s > $\bar{v}_s \geq 760$ m/s
C	Perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	760 m/s > $\bar{v}_s \geq 360$ m/s
	perfiles de suelos muy densos o roca blanda, que cumplan con cualquiera de los dos criterios	$\bar{N} \geq 50$, o $\bar{s}_u \geq 100$ kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	Perfiles de suelos rígidos que cumplan con el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	360 m/s > $\bar{v}_s \geq 180$ m/s
	perfiles de suelos rígidos que cumplan cualquiera de las dos condiciones	$50 > \bar{N} \geq 15$, o 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²) > $\bar{s}_u \geq 50$ kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)
E	Perfil que cumpla el criterio de velocidad de la onda de cortante, o	180 m/s > \bar{v}_s
	perfil que contiene un espesor total H mayor de 3 m de arcillas blandas	IP > 20 w $\geq 40\%$ 50 kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²) > \bar{s}_u
F	Los perfiles de suelo tipo F requieren una evaluación realizada explícitamente en el sitio por un ingeniero geotecnista de acuerdo con el procedimiento de A.2.10. Se contemplan las siguientes subclases: F₁ — Suelos susceptibles a la falla o colapso causado por la excitación sísmica, tales como: suelos licuables, arcillas sensitivas, suelos dispersivos o débilmente cementados, etc. F₂ — Turba y arcillas orgánicas y muy orgánicas (H > 3 m para turba o arcillas orgánicas y muy orgánicas). F₃ — Arcillas de muy alta plasticidad (H > 7.5 m con Índice de Plasticidad IP > 75) F₄ — Perfiles de gran espesor de arcillas de rigidez mediana a blanda (H > 36 m)	

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-22), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Tabla 12. Criterios para clasificación de suelos de perfiles C, D o E

Tipo de perfil	\bar{v}_s	\bar{N} o \bar{N}_{ch}	\bar{s}_u
C	entre 360 y 760 m/s	mayor que 50	mayor que 100 kPa (≈ 1 kgf/cm ²)
D	entre 180 y 360 m/s	entre 15 y 50	entre 100 y 50 kPa (0.5 a 1 kgf/cm ²)
E	menor de 180 m/s	menor de 15	menor de 50 kPa (≈ 0.5 kgf/cm ²)

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-23), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Como se puede observar, dentro de la clasificación del perfil de suelo se requiere de la velocidad media de la onda de cortante (\overline{Vs}), el número de golpes del ensayo de penetración estándar (\overline{N}), resistencia media al corte (\overline{Su}), el índice de penetración (IP), la humedad o contenido de agua (w), el número de golpes del ensayo de penetración estándar en perfiles con suelos cohesivos (\overline{Nch}) y el espesor de la capa de suelos cohesivos (H). Adicionalmente, en el perfil de suelo F la norma establece la realización de ensayos *in situ* que permitan su clasificación en las subclases especificadas.

Coefficiente de Importancia

El coeficiente de importancia se interpreta como la cuantificación de los niveles de seguridad requeridos teniendo en cuenta la importancia de la estabilidad y buen funcionamiento de la estructura y tiene como base la magnitud de la afectación a la comunidad en caso de que ésta resulte afectada a causa de un sismo. La NSR-10 establece cuatro grupos de clasificación, como los describe Rochel (2012).

- Grupo IV (edificaciones indispensables)

Edificaciones que deben seguir funcionando después de un sismo debido a que prestan atención a la comunidad y sus funciones no pueden ser trasladadas a otra edificación de forma rápida.

Dentro de este grupo encontramos:

- Hospitales, clínicas y centros de salud que cuenten con quirófanos, salas de cuidados intensivos, salas de neonatos y emergencias.
- Aeropuertos, estaciones ferroviarias, estaciones de sistemas masivos de transporte, centrales telefónicas, de telecomunicación y radiodifusión.
- Refugios para emergencias, hangares de aeronaves de servicios de emergencia y centrales de navegación.
- Centrales de operación y control de líneas vitales de energía eléctrica, agua, combustibles, información y transporte.
- Estructuras que contengan elementos explosivos, tóxicos y dañinos para el público.

- Estructuras que contengan plantas de generación eléctrica de emergencia, tanques y estructuras parte del sistema contra incendios.
- Grupo III (edificaciones de atención a la comunidad)

Edificaciones indispensables para la atención a la comunidad en cuanto a servicios de salud y comunidad, que deben seguir en funcionamiento después de un sismo y que no se encuentran contempladas en el grupo IV.

- Estaciones de bomberos, defensa civil, policía, cuarteles de fuerzas armadas y sedes de oficinas de prevención y atención de desastres.
- Garajes de vehículos de emergencia.
- Estructuras y equipos de centros de atención de emergencias.
- Guarderías, escuelas, colegios, universidades y otros centros de enseñanza.
- Estructuras del grupo II de las que el propietario requiere que cuenten con seguridad adicional.
- Estructuras designadas por la administración municipal, distrital, departamental o nacional.
- Grupo II (estructuras de ocupación especial)
 - Edificaciones donde se reúnan más de doscientas personas en un mismo salón.
 - Graderías al aire libre donde pueda haber más de dos mil personas a la vez.
 - Almacenes y centros comerciales con más de 500 m² por piso.
 - Edificaciones que presten servicios de salud y que no se encuentren cubiertas en el grupo IV.
 - Edificaciones donde trabajen y residan más de tres mil personas.
 - Edificios gubernamentales.
- Grupo I (estructuras de ocupación normal)

Edificaciones contempladas en la NSR-10 pero que no se encuentran cubiertas por los grupos II, III y IV.

Además, junto con la clasificación presentada anteriormente, la norma define el coeficiente a emplear para cada una de ellas, como se indica a continuación.

Tabla 13. Valores del coeficiente de importancia

Grupo de uso	Coeficiente de importancia, I
IV	1.50
III	1.25
II	1.10
I	1.00

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-26), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Período de Vibración Fundamental de la Estructura

Según el título A de la NSR-10, el período fundamental “debe obtenerse a partir de las propiedades de su sistema de resistencia sísmica, en la dirección bajo consideración, de acuerdo a los principios de la dinámica estructural, utilizando un modelo matemático linealmente elástico de la estructura” (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010, pp. A-64), para esto se dispone de la siguiente fórmula.

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i \delta_i^2)}{\sum_{i=1}^n (f_i \delta_i)}} \leq C_u * T_a$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-64), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Donde:

m_i : parte de la masa de la estructura que se encuentra en el nivel i .

f_i : fuerza sísmica horizontal en el nivel i obtenida mediante el método de la fuerza horizontal equivalente.

δ_i : desplazamiento horizontal en el nivel i con respecto a la base de la estructura, debido a las fuerzas horizontales f_i .

Cu: coeficiente usado para calcular el período máximo permisible.
 Ta: período de vibración fundamental aproximado.

Además, a modo de chequeo se debe tener en cuenta que el valor calculado para el período fundamental no debe exceder $C_u T_a$, cuyas fórmulas se muestran a continuación.

$$C_u = 1.75 - 1.2 A_v F_v \geq 1.2$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-64), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Donde:

Av: coeficiente de aceleración que representa la velocidad horizontal pico efectiva para diseño.

Fv: coeficiente de amplificación que afecta la aceleración de la zona en períodos intermedios, debida a los efectos del sitio.

Si el período de la estructura excede $C_u T_a$, entonces se requiere aumentar la rigidez en la dirección de análisis.

La norma ofrece como alternativa la estimación y uso de un período fundamental de vibración aproximado (T_a)

$$T_a = C_t h^\alpha$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-64), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Donde:

Ct: coeficiente utilizado para calcular el período de la estructura.

h: altura de la estructura.

α : exponente para ser utilizado en el cálculo del período aproximado T_a .

Los valores de Ct y α dependen del sistema estructural empleado en la edificación, para esto la norma dispone la siguiente tabla.

Tabla 14. Valores de C_t y α para cálculo del período aproximado

Sistema estructural de resistencia sísmica	C_t	α
Pórticos resistentes a momentos de concreto reforzado que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.047	0.9
Pórticos resistentes a momentos de acero estructural que resisten la totalidad de las fuerzas sísmicas y que no están limitados o adheridos a componentes más rígidos, estructurales o no estructurales, que limiten los desplazamientos horizontales al verse sometidos a las fuerzas sísmicas.	0.072	0.8
Pórticos arriostrados de acero estructural con diagonales excéntricas restringidas a pandeo.	0.073	0.75
Todos los otros sistemas estructurales basados en muros de rigidez similar o mayor a la de muros de concreto o mampostería	0.049	0.75
Alternativamente, para estructuras que tengan muros estructurales de concreto reforzado o mampostería estructural, pueden emplearse los siguientes parámetros C_t y α , donde C_w se calcula utilizando la ecuación A.4.2-4.	$\frac{0.0062}{\sqrt{C_w}}$	1.00

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-64), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Para el cálculo del coeficiente C_w , se emplea la siguiente fórmula.

$$C_w = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^{n_w} \left[\left(\frac{h_n}{h_{wi}} \right)^2 \frac{A_{wi}}{1 + 0.83 \left(\frac{h_{wi}}{l_{wi}} \right)^2} \right]$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-64), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Donde:

A_B : área de la edificación en su base, en m^2 .

h_{wi} : altura del muro i medida desde la base, en m.

l_{wi} : longitud medida horizontalmente, en metros, de un muro estructural i en el primer nivel de la estructura y en la dirección en estudio.

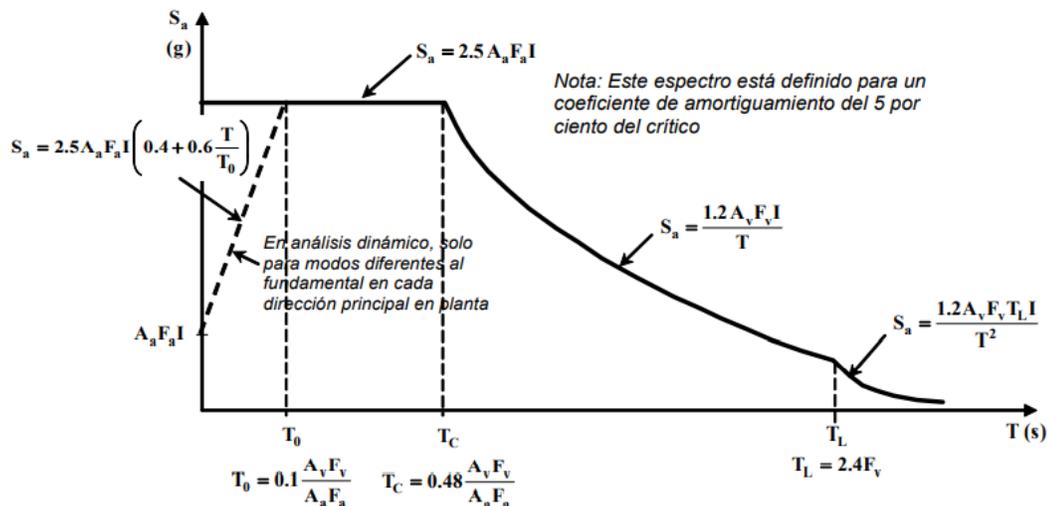
Las fórmulas presentadas anteriormente corresponden a un estimativo inicial del período para calcular las fuerzas sísmicas. Después de realizar el dimensionamiento de la estructura, el período fundamental debe ser calculado nuevamente mediante el

uso de métodos como el análisis modal para posteriormente ser comparado con el estimativo inicial, de tal forma que si el primero difiere en más del 10% con el inicial, se debe repetir el proceso de análisis usando el período calculado después del dimensionamiento estructural, esto es un proceso iterativo hasta que se cumpla que el período final estimado difiera en máximo 10% del período inicial.

Cálculo del Espectro Elástico de Diseño

Con la creación del espectro elástico de aceleraciones de diseño se busca suavizar las curvas obtenidas en espectros de aceleraciones reales mediante el uso de una envolvente que permite la estimación de la máxima aceleración horizontal como porcentaje de la gravedad (S_a).

Ilustración 24. Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de la gravedad



Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-27), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Como se observa en la imagen mostrada anteriormente, el cálculo de S_a depende del período fundamental de la estructura, además se define un período de vibración para cada zona del espectro, es decir:

- T_0 : período de vibración en el cual inicia la zona de aceleraciones constantes o meseta del espectro.

$$T_0 = 0.1 \frac{A_v F_v}{A_a F_a}$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-27), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

- T_c : período correspondiente a la transición de la zona de aceleraciones constantes y la parte descendente de éste. Se usa para períodos de vibración cortos.

$$T_C = 0.48 \frac{A_v F_v}{A_a F_a}$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-26), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

- T_L : período correspondiente al inicio de la zona de desplazamiento aproximadamente constante en el espectro. Usado para períodos de vibración largos.

$$T_L = 2.4 F_v$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-27), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Para el cálculo de S_a se hace uso de tres ecuaciones que corresponden a cada zona del espectro.

- Para períodos de vibración menores que T_c .

$$S_a = 2.5 A_a F_a I$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-27), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

- Para períodos de vibración mayores que T_c y menores que T_L

$$S_a = \frac{1.2A_v F_v I}{T}$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-26), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

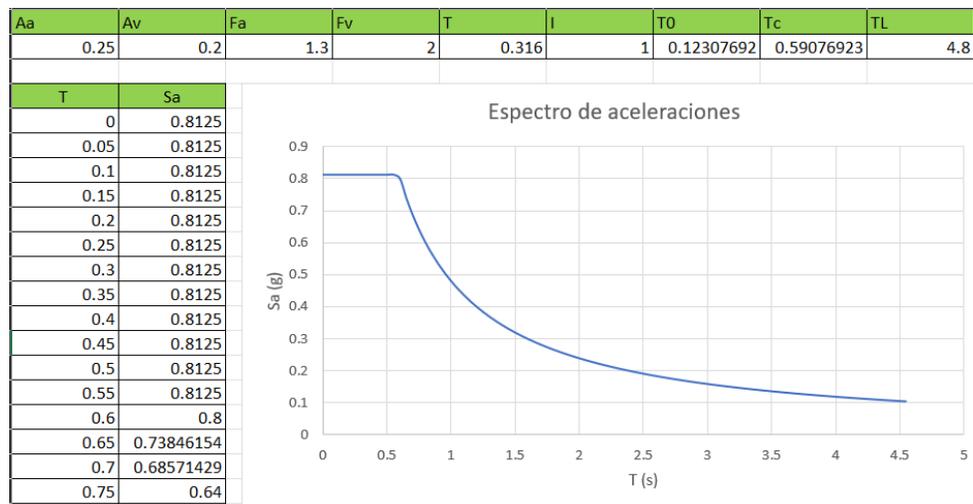
- Para períodos de vibración mayores que T_L

$$S_a = \frac{1.2A_v F_v T_L I}{T^2}$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-27), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

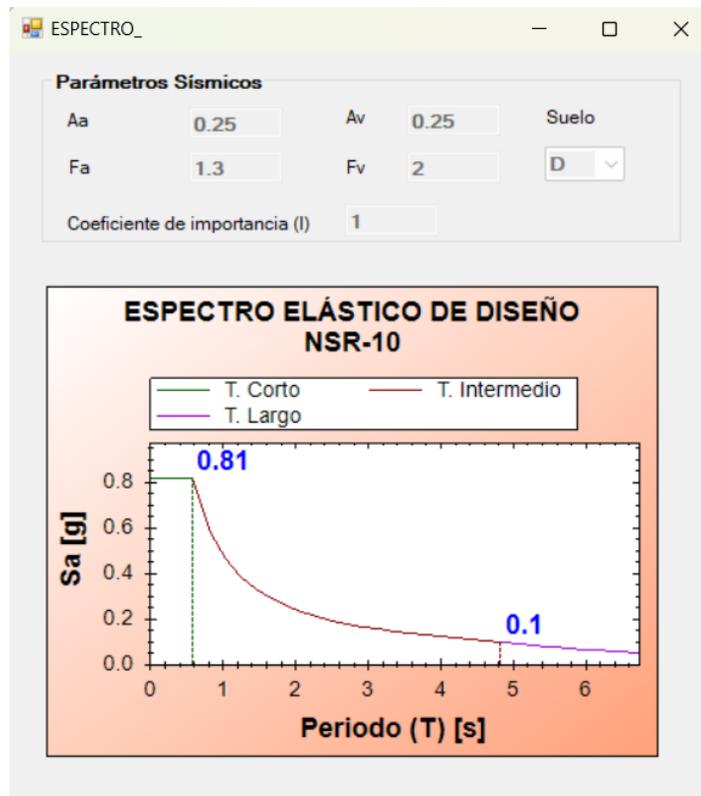
Comparación De Espectro

Ilustración 25. Espectro elástico de aceleraciones de diseño como fracción de la gravedad



Espectro de aceleración programado en EXCEL del ejemplo #1, fuente propia

Ilustración 26. Espectro de aceleración obtenido en MAMPOS actualizado del ejemplo #1



Nota. Elaboración propia

Se observa que los espectros calculados manualmente con Excel y el espectro de MAMPOS actualizado son similares.

Comparando las normas NSR-10 y NSR-98 se encontraron algunas diferencias tanto en las ecuaciones empleadas en los cálculos como en factores empleados en los mismos, como por ejemplo en el cálculo del espectro de aceleraciones de diseño.

6. Método de la Fuerza Horizontal Equivalente

En el diseño y análisis estructural se realiza la evaluación de las cargas que debe soportar la edificación y sus componentes, la carga muerta se calcula como el peso propio de la estructura, mientras que los valores para carga viva se encuentran definidos en el título B de la NSR-10 y se definen teniendo en cuenta el tipo de uso; ahora bien, para la estimación de las fuerzas sísmicas horizontales se requiere la selección de un método de análisis que se acople al modelo estructural de la

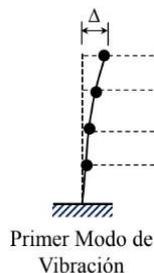
edificación siguiendo los principios de la mecánica estructural como la masa, rigidez y aceleración y que permita obtener la distribución de fuerzas horizontales en la estructura.

La NSR-10 en el capítulo A.3 propone el uso del método de la fuerza horizontal equivalente en los siguientes casos:

- Todas las edificaciones, regulares e irregulares, en las zonas de amenaza sísmica baja.
- Todas las edificaciones, regulares e irregulares, pertenecientes al grupo de uso I, localizadas en zonas de amenaza sísmica intermedia.
- Edificaciones regulares, de 20 niveles o menos de 60 m de altura o menos medidos desde la base, en cualquier zona de amenaza sísmica, exceptuando edificaciones localizadas en lugares que tengan un perfil de suelo tipo D, E o F, con períodos de vibración mayores de $2T_c$.
- Edificaciones irregulares que no tengan más de 6 niveles ni más de 18 m de altura medidos a partir de la base.
- Estructuras flexibles apoyadas sobre estructuras más rígidas que cumplan los requisitos A.3.2.4.3.

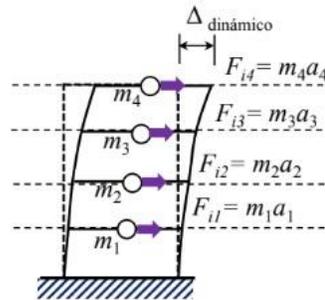
Las ecuaciones empleadas en este método provienen de métodos empíricos bajo la hipótesis de que la estructura se encuentra en el primer modo de vibración (ver ilustración 27) en el que se idealiza la edificación siguiendo un modelo de péndulo invertido, de tal forma que la masa se encuentra concentrada en un punto (ver ilustración 28) y se soporta sobre un elemento con rigidez lateral y amortiguamiento; así mismo, se supone que la estructura se deforma debido a fuerzas estáticas o inerciales estimadas mediante el uso de S_a , éstas generan movimiento lateral sobre la edificación.

Ilustración 27. Idealización de la estructura en el primer modo de vibración



Nota. Adaptado de conferencias de clase “Concreto armado 2”, por Ing. Julio Cesar Diago Franco, 2021.

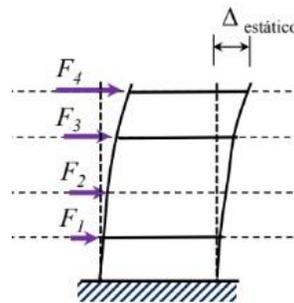
Ilustración 28. Estructura con masas concentradas y fuerzas inerciales



Fuerzas Inerciales

Nota. Adaptado de conferencias de clase “Concreto armado 2”, por Ing. Julio Cesar Diago Franco, 2021.

Ilustración 29. Estructura con fuerzas inerciales y desplazamientos



Fuerza Lateral Equivalente

Nota. Adaptado de conferencias de clase “Concreto armado 2”, por Ing. Julio Cesar Diago Franco, 2021.

La fuerza sísmica horizontal en cualquier nivel de la estructura se calcula con la siguiente ecuación.

$$F_x = C_{vx} \cdot V_s$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-65), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Donde:

Fx: fuerza sísmica horizontal en un nivel x, en kN.

C_{vx} : coeficiente de reparto sísmico en el nivel x , adimensional.

V_s : cortante basal, en kN.

Para la determinación de la distribución de fuerzas sísmicas horizontales se hace uso del coeficiente de distribución de reparto sísmico, el cual se estima haciendo uso de la siguiente fórmula.

$$C_{vx} = \frac{m_x h_x^k}{\sum_{i=1}^n (m_i h_i^k)}$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-65), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Donde:

m_x, m_i : parte de la masa sísmica total de la edificación que está posicionada en el nivel x o i , en kg.

h_x, h_i : altura en metros, medida desde la base, del nivel x o i , en m.

k : exponente relacionado con el período fundamental de la edificación.

El valor del exponente k depende del período de vibración fundamental de la edificación, se cuentan con 4 casos:

- A. Para T menor o igual a 0.5 segundos, $k = 1.0$.
- B. Para T entre 0.5 y 2.5 segundos, $k = 0.75 + 0.5T$
- C. Para T mayor que 2.5 segundos, $k = 2.0$.

El cortante basal, como su nombre lo indica, corresponde al cortante presentado en la base de la estructura y, a modo de chequeo en términos estáticos, éste debe ser igual a la sumatoria de los cortantes por piso. Para su cálculo, la NSR-10 establece la ecuación presentada a continuación.

$$V_s = S_a \cdot g \cdot M$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-65), por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Donde:

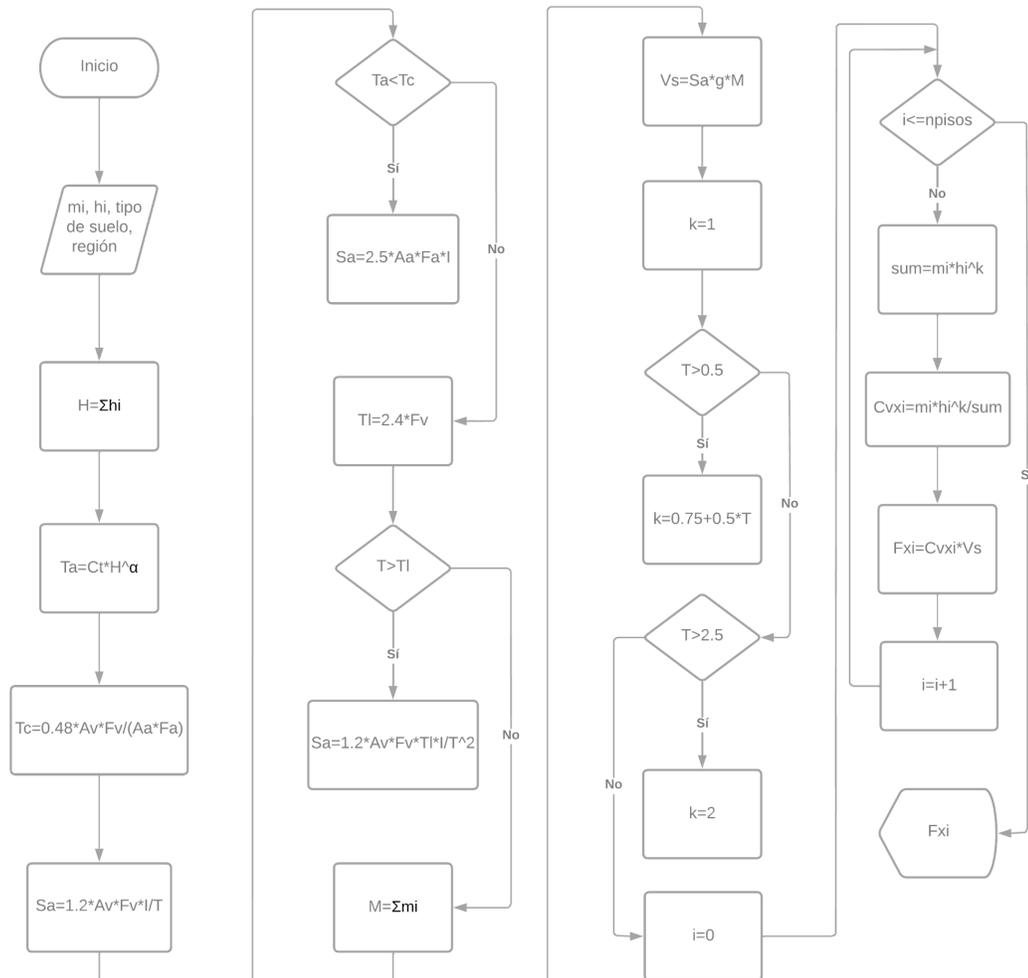
Sa: valor del espectro de aceleraciones de diseño expresado como fracción de la gravedad para un período de diseño dado para un sistema de un grado de libertad, en m/s^2 .

g: aceleración debida a la gravedad, en m/s^2 .

M: masa sísmica total de la edificación, en kN.

A continuación, se muestra el diagrama de flujo para el procedimiento de cálculo de fuerzas sísmicas mediante el método de la fuerza horizontal equivalente.

Ilustración 30. Diagrama de flujo para método de fuerza horizontal equivalente



Nota. Elaboración propia.

Comparación Fuerza Horizontal Equivalente

Tabla 15. Método de Fuerza Horizontal Equivalente en Excel

PISO #	ALTURA PISO (m)	Hx	PESO SISMICO (KN)	MASA PISO (Kg)	MASA TOTAL EDIFICACIÓN	ALTURA TOTAL EDIFICIO (m)	PERÍODO FUNDAMENTAL EDIFICACIÓN (T)	TIPO DE SUELO
1	3	3	337.47	34400.6	137602.4465	12	0.32	D
2	3	6	337.47	34400.6				
3	3	9	337.47	34400.6				
4	3	12	337.47	34400.6				
Ton de masa					137.6024465			
COEFICIENTE DE IMPORTANCIA (I)	REGIÓN	Av	Aa	Fa	Fv	Tc	TI	Sa
1	5	0.2	0.25	1.3	2	0.59076923	4.8	0.8125
M (Kg)	Vs (KN)	K	$(m_i * h_i^k)$	Cvx	Fx			
137602.446	1096.7775	1	103201.835	0.100	109.678			
			206403.670	0.200	219.356			
			309605.505	0.300	329.033			
			412807.339	0.400	438.711			
		Σ	1032018.349	1.000	1096.778			

Nota. Elaboración propia

Ilustración 31. Resultados MAMPOS actualizado del ejemplo #1

```

=====
                    RESULTADOS DEL ANALISIS
                    METODO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE
=====

-. # de pisos      : 4
periodo de vibracion aproximado (ta) = 0.316
periodos en la direccion x y y (tx,ty)= 0.872  0.264
aceleracion basal (sa)x, (sa)y
= 0.550  0.813
cortante basal (vs)x, (vs)y
= 742.773  1,096.773
Peso total del edificio (KN)
= 1,349.875

PISO    ALTURA    COEF.DE REPARTO    FUERZA SISMICA
#        (m)          (en x, en y)       (en x, en y)
1        3.000        0.082  0.100         61.214  109.678
2        3.000        0.188  0.200         139.291  219.356
3        3.000        0.303  0.300         225.318  329.033
4        3.000        0.427  0.400         316.952  438.711

```

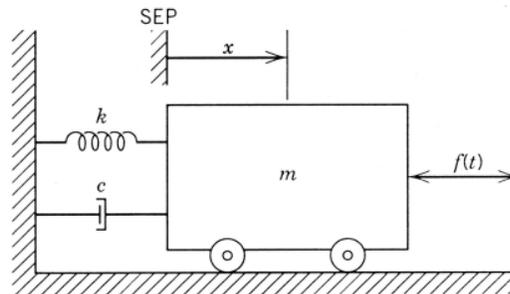
Nota. Elaboración propia

Se compararon los resultados de Fuerza Horizontal Equivalente (FHE) para la dirección Y, los coeficientes de reparto son iguales y también las fuerzas sísmicas, obteniendo resultados similares manualmente en Excel y en Mamos actualizado.

7. Análisis Modal

El análisis modal permite obtener las características dinámicas inherentes a la estructura -cómo los modos de vibración, la frecuencia y el amortiguamiento- mediante un modelo matemático en el que se idealiza la estructura como un sistema de un grado de libertad con el fin de que el comportamiento o respuesta de ésta se ajuste al modelo matemático propuesto inicialmente en el que la estructura reacciona ante una excitación de magnitud establecida. Este análisis establece que la respuesta de vibración puede expresarse como la combinación lineal de un conjunto de movimientos armónicos simples llamados modos de vibración, los cuales se definen a partir de las propiedades físicas del sistema.

Ilustración 32. Sistema de un grado de libertad



Nota. Adaptado de ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL: TEORÍA Y PRÁCTICA (p. 51), por Manuel Rodríguez Súnico, 2005.

Donde:

m: masa del elemento.

f(t): fuerza dinámica aplicada al elemento en función del tiempo.

x: desplazamiento.

k: rigidez.

c: amortiguamiento.

Como se observa en la ilustración 32, el sistema de 1 grado de libertad sólo permite el desplazamiento en una dirección y restringe el movimiento en otros ejes, junto con la generación de momento. Como plantea Rodríguez (2005), la ecuación general que describe el movimiento del sistema representado en la ilustración 32 es:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = f(t)$$

Nota. Adaptado de ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL: TEORÍA Y PRÁCTICA (p. 51), por Manuel Rodríguez Súnico, 2005.

Donde:

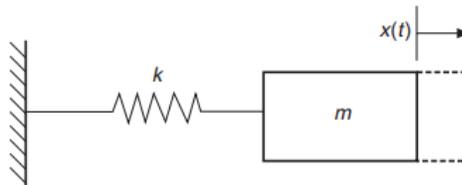
- m: matriz de masa de la estructura.
- k: matriz de rigidez de la estructura.
- f(t): matriz de fuerzas dinámicas.
- c: amortiguamiento de la estructura.
- \dot{x} : velocidad del sistema.
- \ddot{x} : aceleración del sistema.

Se hace uso del modelo de un grado de libertad con vibración libre sin amortiguamiento como caso particular, lo cual se describe en la siguiente ecuación.

$$m\ddot{x} + kx = 0$$

Nota. Adaptado de ANÁLISIS MODAL OPERACIONAL: TEORÍA Y PRÁCTICA (p. 51), por Manuel Rodríguez Súnico, 2005.

Ilustración 33. Sistema de un grado de libertad sin amortiguamiento

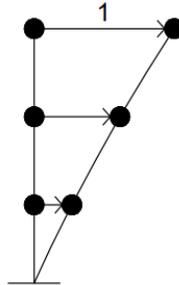


Nota. Adaptado de Modal Analysis (p. 51), por Jimin He & Zhi-Fang Fu, 2001.

Al tener una estructura sin amortiguamiento se garantiza que los modos de vibración se encuentran normalizados respecto a un valor unitario máximo, es decir, los puntos de análisis en la estructura llegan a su deflexión máxima ó mínima, las cuales son evaluadas respecto a un punto de referencia que coincide con el punto en el que se

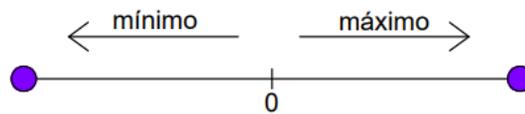
concentra la masa en la idealización de la estructura para el primer modo de vibración.

Ilustración 34. Sistema con modos de vibración normalizados



Nota. Elaboración propia.

Ilustración 35. Deflexiones máximas y mínimas



Nota. Elaboración propia.

Modelo de Edificio de Corte

El uso del modelo de edificio de corte permite la simplificación del análisis dinámico estructural mediante la asociación de los conceptos de masa, rigidez y desplazamiento. Este modelo trabaja con las siguientes consideraciones o hipótesis:

- La masa de cada entrepiso debe concentrarse a la altura de las vigas del nivel de análisis.
- Las columnas cuentan con gran rigidez axial, lo cual permite considerarlas infinitamente rígidas en esta dirección y no se presenta desplazamiento vertical.
- Las losas y vigas se consideran rígidas axialmente.
- Las columnas se consideran flexibles lateralmente, permitiendo su desplazamiento en esta dirección.
- Debido a la rigidez de las vigas, no existe giro en las uniones viga-columna.

Como consecuencia de las hipótesis enunciadas anteriormente, el único grado de libertad de la estructura se encuentra en el desplazamiento horizontal de las masas concentradas en cada piso, de tal manera que para un edificio de n pisos se tienen n grados de libertad puesto que existe una masa concentrada por cada piso.

Matriz de Masa de la Estructura

Para la solución de la fórmula que representa el comportamiento dinámico de la estructura, se plantea una matriz diagonal cuadrada en la cual se encuentran las masas concentradas de cada piso; además, dicha matriz es cuadrada y su tamaño es igual al número de pisos, por cada piso se tiene 1 grado de libertad.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & m_2 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & m_{n-1} & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & m_n \end{bmatrix}$$

Nota. Adaptado de REAJUSTE DE MATRICES DE RIGIDEZ Y FLEXIBILIDAD PARA SISTEMAS APORTICADOS por Garcés, F., Genatios, C., Lafuente, M., & Mebarki, A., 2002.

Generalmente, el número de modos de vibración depende el número de grados de libertad, como caso particular para el presente proyecto se trabaja con un sistema idealizado de 1 grado de libertad por piso en el que únicamente se permite el desplazamiento en el eje x , de tal forma que el número total de modos de vibración de la estructura es igual al número de pisos y, en consecuencia, el tamaño de la matriz de masa es igual al número de pisos.

Matriz de Rigidez de la Estructura

La matriz de rigidez de la estructura se construye como una matriz simétrica cuadrada, la cual tiene tamaño igual al número de pisos, por cada piso se tiene 1 grado de libertad. Ésta se encuentra conformada por la rigidez de piso, es decir, la sumatoria de la rigidez de cada elemento estructural en el nivel de análisis.

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & \cdots & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 & \cdots & \vdots \\ \vdots & -k_3 & \ddots & & -k_n \\ 0 & \cdots & \cdots & -k_n & k_n \end{bmatrix}$$

Nota. Adaptado de REAJUSTE DE MATRICES DE RIGIDEZ Y FLEXIBILIDAD PARA SISTEMAS APORTICADOS por Garcés, F., Genatios, C., Lafuente, M., & Mebarki, A., 2002.

Como se indicó anteriormente en el apartado de la matriz de masa de la estructura, la idealización de la estructura al sistema de 1 grado de libertad por piso tiene como consecuencia que el número de modos de vibración sea igual al número de pisos, de tal forma que el tamaño de la matriz de rigidez es igual al número de pisos de la edificación.

Solución al Modelo de un Grado de Libertad sin Amortiguamiento

En la estimación del período natural de vibración de la estructura se hace uso de las matrices de rigidez y masa mostradas anteriormente, desarrollando el cálculo del determinante mostrado en la siguiente expresión.

$$|[K] - \lambda[M]| = 0$$

Donde:

λ : valor propio.

Del desarrollo del determinante se obtiene un polinomio de grado igual al número de modos de vibración de la estructura, en el cual se tiene como incógnita los valores propios de la matriz. Una vez calculados los valores propios de la matriz, es posible estimar la frecuencia natural circular que le corresponde a cada uno de ellos. Vale la pena aclarar que la frecuencia natural circular no depende de la masa y rigidez de la estructura, sino de los valores propios obtenidos al resolver el determinante, en consecuencia, es posible tener la misma frecuencia natural circular en estructuras con diferentes valores de rigidez y masa.

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Donde:

ω : frecuencia natural circular, en rad/seg.

En cuanto a los valores propios, la frecuencia natural circular puede estimarse haciendo uso de las siguientes fórmulas.

$$\lambda = \omega^2$$

$$\omega = \sqrt{\lambda}$$

Posteriormente, se estima el período vibración de la estructura empleando la frecuencia natural circular.

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Donde:

T: período fundamental de vibración de la estructura, en segundos.

Propiedades del Problema de Autovalores Estructurales

Suárez (2014) enuncia las siguientes propiedades del problema de autovalores estructural.

1. Los autovalores λ_j del problema $[K]\{\phi_j\} = \lambda_j[M]\{\phi_j\}$ con $[K]$ y $[M]$ reales y simétricas y $[M]$ positiva definida son reales.
2. Los autovalores λ_j del problema $[K]\{\phi_j\} = \lambda_j[M]\{\phi_j\}$ con $[K]$ y $[M]$ reales y simétricas y $[M]$ positiva definida son positivos y sólo pueden ser cero si $[K]$ es positiva semidefinida.
3. Los autovectores $\{\phi_j\}$ del problema $[K]\{\phi_j\} = \lambda_j[M]\{\phi_j\}$ con $[K]$ y $[M]$ reales y simétricas son ortogonales respecto a la matriz $[M]$ y $[K]$, o sea:

$$\begin{aligned}\{\phi_i\}^T[M]\{\phi_j\} &= 0 \text{ si } i \neq j \\ \{\phi_i\}^T[K]\{\phi_j\} &= 0 \text{ si } i \neq j\end{aligned}$$

4. Si los autovectores $\{\phi_j\}$ del problema $[K]\{\phi_j\} = \lambda_j[M]\{\phi_j\}$ están normalizados respecto a la matriz $[M]$:

$$\{\phi_i\}^T[M]\{\phi_j\} = 1 \quad ; \quad j = 1, \dots, n$$

5. Los autovectores $\{\phi_j\}$ del problema $[K]\{\phi_j\} = \lambda_j[M]\{\phi_j\}$ con $[K]$ y $[M]$ reales y simétricas son linealmente independientes.
6. cualquier vector arbitrario $\{u\}$ puede ser expresado como una combinación lineal de los autovectores del problema $[K]\{\phi_j\} = \lambda_j[M]\{\phi_j\}$. Esto se conoce como el “Teorema de la Expansión” y se puede expresar como:

$$\{u\} = \sum_{j=1}^n c_j \{\phi_j\} = [\Phi]\{c\}$$

Métodos Numéricos Como Solución al Problema de los Valores Propios

Como lo indican E y Fu (2001), la estimación de los valores propios en estructuras con múltiples modos de vibración no se calcula como las raíces del polinomio característico debido a que éste procedimiento no tiene la precisión necesaria; por este motivo, en este caso se propone el uso del método de la potencia inversa como un método o algoritmo numérico que emplea iteraciones con el fin de calcular el valor propio de módulo mínimo de una matriz invertible, la cual tiene la siguiente relación con los autovalores y autovectores: sean (λ, v) un par valor-vector propio de la matriz invertible $[A]$, entonces $(\frac{1}{\lambda}, \{v\})$ es un par valor-vector propio de $[A]^{-1}$.

Como se mencionó anteriormente, el método de la potencia inversa trabaja con una matriz invertible A de tamaño $n \times n$ con n valores propios y vectores propios asociados de la siguiente forma.

$$|\mu_1| < |\mu_2| < |\mu_3| < \dots < |\mu_n|$$

Donde:

μ_n : vector propio de la matriz $[A]^{-1}$.

$$\left| \frac{1}{\lambda_1} \right| < \left| \frac{1}{\lambda_2} \right| < \left| \frac{1}{\lambda_3} \right| < \dots < \left| \frac{1}{\lambda_n} \right|$$

Donde:

λ_n : valor propio de la matriz $[A]$.

Con $\{v_1\}$, $\{v_2\}$, $\{v_3\}$, ..., $\{v_n\}$ vectores propios asociados a cada valor propio.

Para la aplicación del método se sigue el procedimiento enunciado a continuación:

1. Calcular la inversa de la matriz $[A]$, obteniendo $[A]^{-1}$.
2. Crear un vector $\{\phi_0\}$ de n elementos para iniciar la iteración. Se recomienda el uso de un vector en el cual todas sus componentes sean 1.

$$\{\phi_0\} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix}$$

3. Multiplicar el vector $\{\phi_0\}$ por A^{-1} .

$$\{\beta_1\} = [A]^{-1}\{\phi_0\}$$

4. Del vector resultante del paso 3, tomar la componente de mayor módulo (c_1) y multiplicar su inverso por el vector β_1 .

$$\{\varphi_1\} = \frac{\{\beta_1\}}{c_1}$$

5. Realizar los pasos 3 y 4 hasta que la componente c_n converja.
6. Tomar c_n como el valor propio de módulo máximo de $[A]^{-1}$.
7. Calcular el vector propio asociado a c_n .

$$\{v\} = \frac{\{\beta_n\}}{c_n} = \frac{\{\beta_n\}}{\mu_{max}}$$

8. Calcular el valor propio de módulo mínimo de [A].

$$\lambda_{min} = \frac{1}{\mu_{max}}$$

9. Calcular el vector propio asociado a λ_{max} .

Ejemplo Ilustrativo Para el Método de la Potencia Inversa

El ejemplo que será desarrollado a continuación fue planteado por Palacios (2008) y muestra de forma sencilla el uso del método de la potencia inversa. Consideremos la matriz A:

$$A = \begin{pmatrix} -18 & 40 \\ -12 & 26 \end{pmatrix}$$

Calculamos la inversa de A.

$$|A| = \begin{vmatrix} -18 & 40 \\ -12 & 26 \end{vmatrix} = -468 + 480 = 12$$

$$A^{-1} = \frac{1}{12} \begin{pmatrix} 26 & -40 \\ 12 & -18 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 13/6 & -10/3 \\ 1 & -3/2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2.1667 & -3.333 \\ 1 & -1.5 \end{pmatrix}$$

Aplicamos el método de la potencia inversa a $[A]^{-1}$ tomando a X como vector inicial para la iteración.

$$X^{(0)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Iteración 1

$$y^{(1)} = A^{-1}X^{(0)} = \begin{pmatrix} 2.1667 & -3.333 \\ 0 & -1.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1.1666 \\ -0.5 \end{pmatrix}$$

$$c_1 = -1.666$$

$$X^{(1)} = \frac{1}{c_1} y^{(1)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.4286 \end{pmatrix}$$

Iteración 2

$$y^{(2)} = A^{-1} X^{(1)} = \begin{pmatrix} 2.1667 & -3.333 \\ 1 & -1.5 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0.4286 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.7381 \\ 0.3571 \end{pmatrix}$$

$$c_2 = 0.7381$$

$$X^{(2)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.4839 \end{pmatrix}$$

Iteración 3

$$y^{(3)} = A^{-1} X^{(2)} = \begin{pmatrix} 0.5538 \\ 0.2742 \end{pmatrix}$$

$$c_3 = 0.5538$$

$$X^{(3)} = \frac{1}{c_3} y^{(3)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.4951 \end{pmatrix}$$

Iteración 4

$$y^{(4)} = A^{-1} X^{(3)} = \begin{pmatrix} 0.5162 \\ 0.2574 \end{pmatrix}$$

$$c_4 = 0.5162$$

$$X^{(4)} = \frac{1}{c_4} y^{(4)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.4984 \end{pmatrix}$$

Iteración 5

$$y^{(5)} = A^{-1} X^{(4)} = \begin{pmatrix} 0.5052 \\ 0.2524 \end{pmatrix}$$

$$c_5 = 0.5054$$

$$X^{(5)} = \frac{1}{c_5} y^{(5)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.4995 \end{pmatrix}$$

Iteración 6

$$y^{(6)} = A^{-1} X^{(5)} = \begin{pmatrix} 0.5018 \\ 0.2508 \end{pmatrix}$$

$$c_6 = 0.5018$$

$$X^{(6)} = \frac{1}{c_6} y^{(6)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.4998 \end{pmatrix}$$

Iteración 7

$$y^{(7)} = A^{-1} X^{(6)} = \begin{pmatrix} 0.5006 \\ 0.2503 \end{pmatrix}$$

$$c_7 = 0.5006$$

$$X^{(7)} = \frac{1}{c_7} y^{(7)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.4999 \end{pmatrix}$$

Iteración 8

$$y^{(8)} = A^{-1}X^{(7)} = \begin{pmatrix} 0.5002 \\ 0.2501 \end{pmatrix}$$

$$c_8 = 0.5002$$

$$X^{(8)} = \frac{1}{c_8}y^{(8)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Iteración 9

$$y^{(9)} = A^{-1}X^{(8)} = \begin{pmatrix} 0.5001 \\ 0.2501 \end{pmatrix}$$

$$c_9 = 0.5001$$

$$X^{(9)} = \frac{1}{c_9}y^{(9)} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

En las iteraciones 8 y 9 se observa que se llega a una convergencia en 0.5, entonces el valor propio de módulo máximo para $[A]^{-1}$ es:

$$\mu_{\max} = 0.5$$

y el vector propio asociado de μ_{\max} es

$$V = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

A continuación, calculamos el valor propio de módulo mínimo de $[A]$

$$\lambda_{\min} = \frac{1}{\mu_{\max}} = \frac{1}{0.5} = 2$$

El valor propio asociado a λ_{\min} es

$$V = \begin{pmatrix} 1 \\ 0.5 \end{pmatrix}$$

Aplicación del Método de la Potencia Inversa al Análisis Modal

Para analizar si el método de la potencia inversa puede aplicarse al análisis modal, es necesario reescribir la ecuación del problema de autovalores y autovectores de la siguiente forma.

$$[K]\{\phi\} = \lambda[M]\{\phi\}$$

$$\{\phi\} = \lambda[K]^{-1}[M]\{\phi\}$$

Teniendo en cuenta lo dispuesto anteriormente, la matriz $[A]$ debe ser invertible para que el método de la potencia inversa pueda ser aplicado. A continuación, se demuestra que $[A]$ es invertible partiendo de la hipótesis que la matriz de rigidez es invertible.

Demostración Matriz $[A]$ Invertible

La matriz $[A]$ es invertible si existe una matriz $[B]$ que al ser multiplicada por la matriz $[A]$, su resultado sea la matriz identidad, es decir:

$$[A][B] = [B][A] = [I] \quad (1)$$

Si se cumple la igualdad (1), entonces se dice que $[B]$ es la inversa de $[A]$ y se denota por $[A]^{-1}$. Entonces, tenemos:

$$[A][A]^{-1} = [A]^{-1}[A] = [I] \quad (2)$$

Sean $[C]$ y $[D]$ dos matrices invertibles de tamaño $n \times n$. Entonces $[CD]$ es invertible y

$$([C][D])^{-1} = [D]^{-1}[C]^{-1} \quad (3)$$

En nuestro caso, la matriz $[A]$ está compuesta por el producto de la inversa de la matriz de rigidez y la matriz de masa, es decir:

$$[A] = [K]^{-1}[M] \quad (4)$$

Usando las ecuaciones (4) y (3) para reemplazar en (2) tenemos que la matriz $[A]$ es invertible si y sólo si

$$[K]^{-1}[M]([M]^{-1}[K^{-1}]^{-1}) = ([M]^{-1}[K^{-1}]^{-1})[K]^{-1}[M] \quad (5)$$

Demostración Matriz $[K]^{-1}$ Invertible.

Usando la ecuación (2) tenemos:

$$[K^{-1}]([K^{-1}])^{-1} = ([K^{-1}])^{-1}[K^{-1}]$$

$$[K]^{-1}[K] = [K][K]^{-1}$$

Por hipótesis, tenemos que la matriz de rigidez $[K]$ es invertible, entonces

$$[I] = [I]$$

Por lo tanto, $[K]^{-1}$ es invertible.

Demostración Matriz $[M]$ Invertible.

La matriz de masa $[M]$ es una matriz diagonal de tamaño $n \times n$. Entonces $[M]$ es invertible si y sólo si su determinante es distinto de cero.

Para una matriz triangular superior, inferior o diagonal (triangular superior e inferior) tenemos que su determinante se calcula como el producto de sus componentes en la diagonal.

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ \vdots & m_2 & & & \vdots \\ \vdots & & \ddots & m_{n-1} & \vdots \\ 0 & \cdots & \cdots & \cdots & m_n \end{bmatrix}$$

$$\det[M] = m_{11}m_{22} \dots m_{n-1}m_n \quad (7)$$

Puesto que ningún elemento de la diagonal de la matriz $[M]$ es cero, entonces evaluando en (7) tenemos:

$$\det[M] \neq 0$$

Por lo tanto, $[M]$ es invertible.

Como $[M]$ y $[K]^{-1}$ son matrices invertibles, podemos usar la ecuación (3), entonces, volviendo a la ecuación (5) tenemos:

$$\left([K]^{-1}[M]\right)\left([M]^{-1}[K]\right) = \left([M]^{-1}[K]\right)\left([K]^{-1}[M]\right) \quad (8)$$

Aplicamos la propiedad asociativa de la multiplicación en (8)

$$[K]^{-1}\left([M][M]^{-1}\right)[K] = [M]^{-1}\left([K][K]^{-1}\right)[M]$$

$$[K]^{-1}[I][K] = [M]^{-1}[I][M]$$

Además, tenemos por propiedad que toda matriz multiplicada por la matriz identidad es igual a la matriz original, entonces

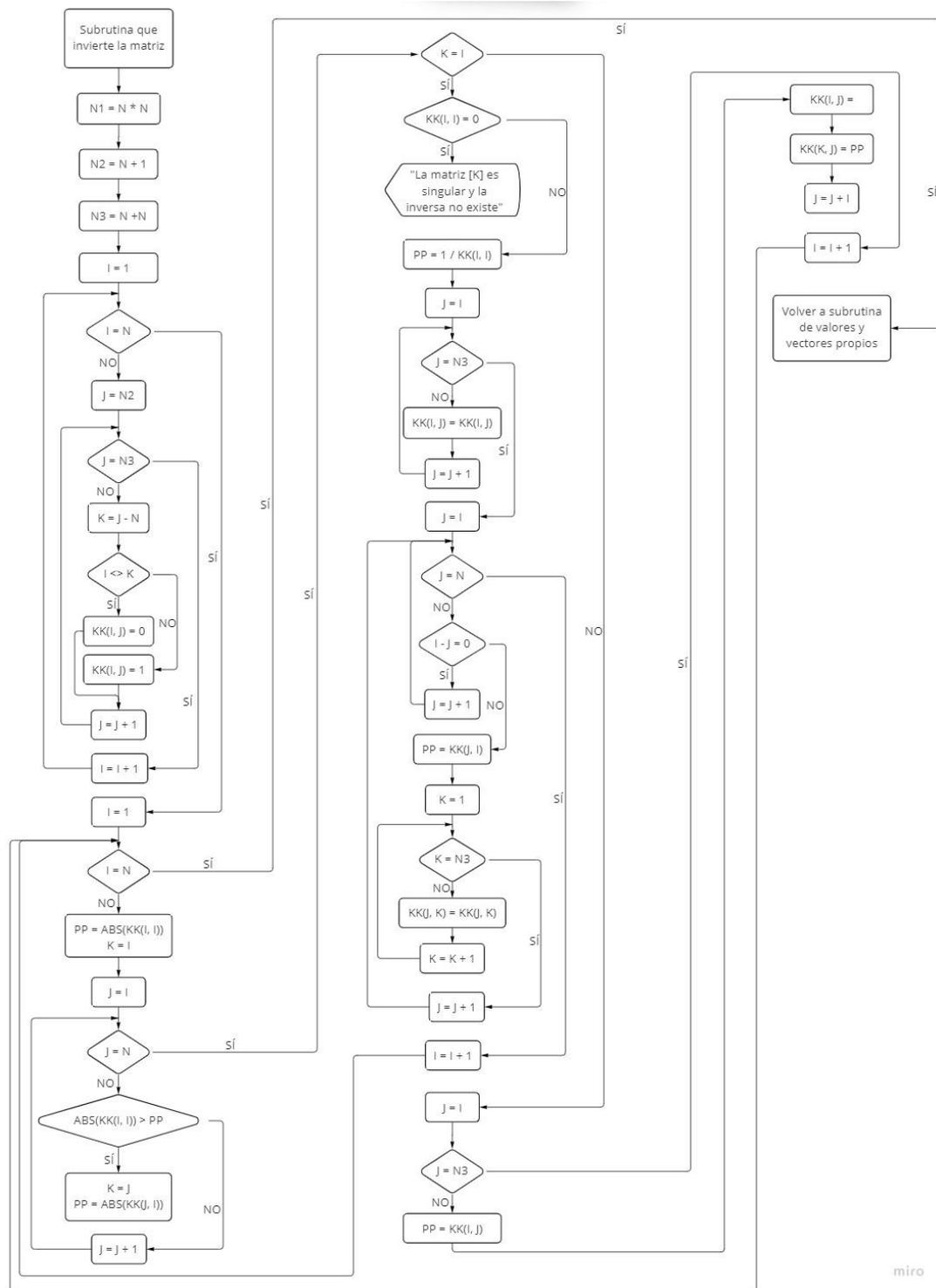
$$[K]^{-1}[K] = [M]^{-1}[M]$$

$$I = I$$

En consecuencia, $[A]$ es invertible y puede aplicarse la ecuación:

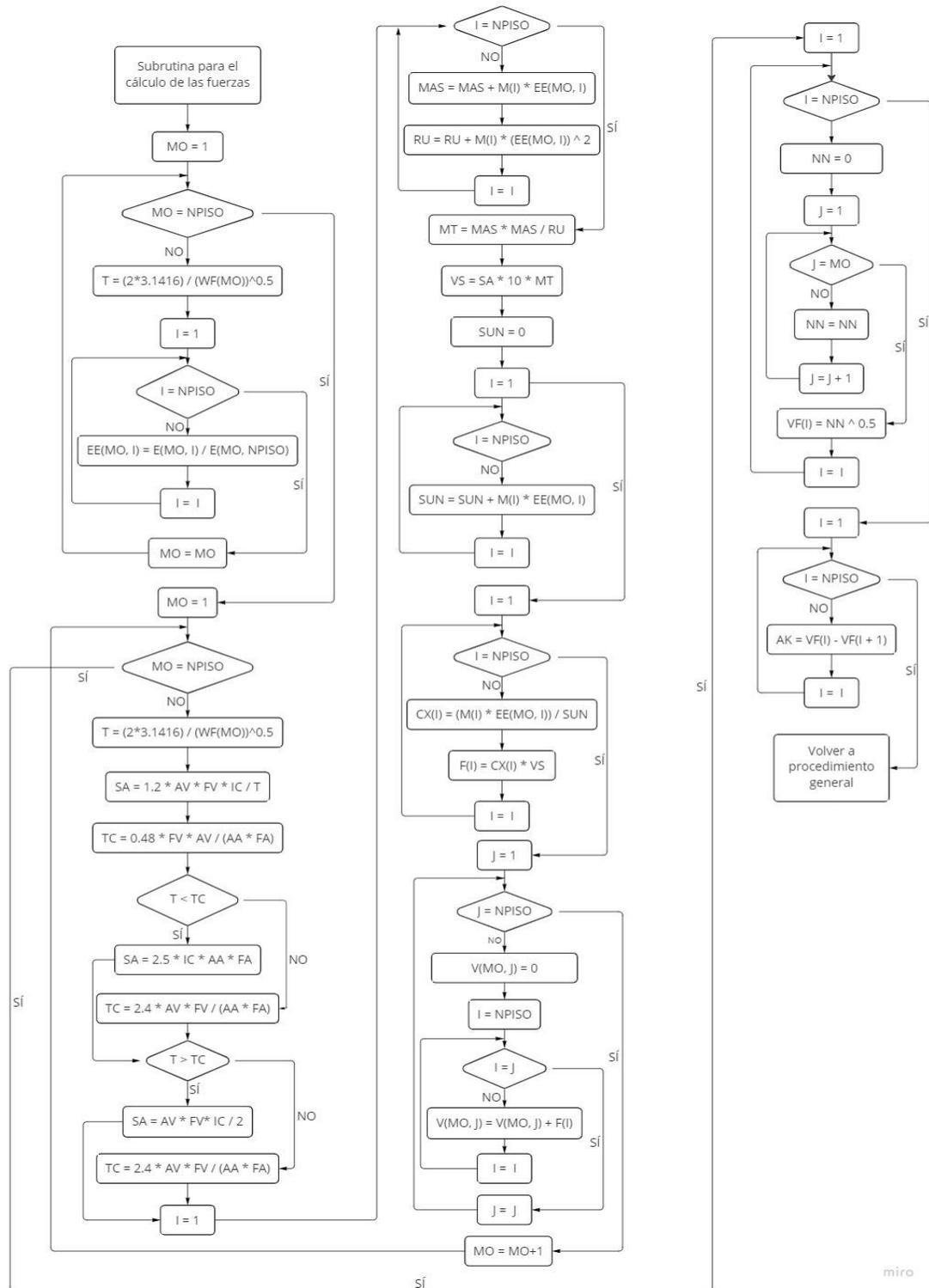
$$\{\phi\} \cdot \frac{1}{\lambda} = [A][\phi]$$

Ilustración 36. Diagrama de flujo para subrutina de cálculo de la inversa de una matriz



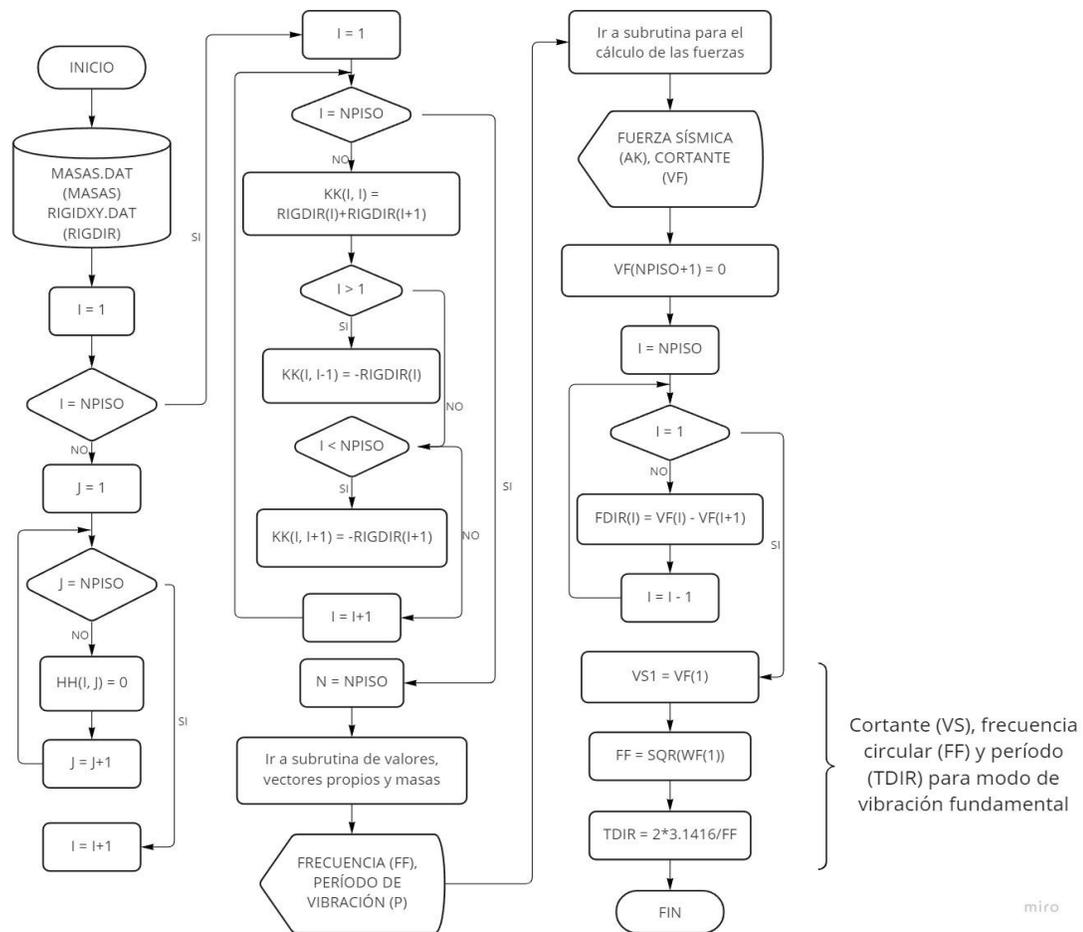
Nota. Elaboración propia

Ilustración 38. Diagrama de flujo para subrutina de cálculo de fuerzas



Nota. Elaboración propia

Ilustración 39. Diagrama de flujo para procedimiento general de análisis modal



Nota. Elaboración propia

Corrección del Cortante Basal Obtenido Mediante el Método del Análisis Modal

Como lo estipula la NSR-10 en el capítulo A.5.4.5, el cortante sísmico basal obtenido al realizar el método del análisis modal (cortante dinámico) no debe ser menor al 80% en estructuras regulares y 90% en estructuras irregulares, del cortante sísmico basal estimado mediante el método de la fuerza horizontal equivalente (cortante estático), este ajuste se realiza debido a la pérdida de masa al aplicar los métodos numéricos necesarios para el correcto desarrollo del método de análisis modal; en consecuencia, se establecen factores de corrección en caso de que las condiciones mencionadas anteriormente no se cumplan, dichos factores de corrección deben multiplicar los

parámetros de respuesta sísmica obtenidos, como fuerzas en los pisos y fuerzas en los elementos en la dirección de análisis. Así mismo, se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- A. El período fundamental de vibración de la estructura (en segundos) empleado para calcular el cortante estático no debe ser mayor al calculado como $C_u T_a$. Además, cuando se usen los procedimientos de interacción suelo-estructura es posible usar el valor de cortante estático reducido por esta razón.
- B. Cuando el valor del cortante dinámico sea menor que el 80% para estructuras regulares, o que el 90% para estructuras irregulares, del cortante estático, se deben aplicar los siguientes factores de corrección:
 - Factor de corrección para estructuras irregulares

$$0.8 \frac{V_s}{V_{tj}}$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-70), por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

Donde:

V_s : cortante basal dinámico, en kN.

V_{tj} : cortante basal estático, en kN.

- Factor de corrección para estructuras irregulares

$$0.9 \frac{V_s}{V_{tj}}$$

Nota. Adaptado de NSR-10, Título A (p. A-71), por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010.

- C. Cuando el cortante dinámico para cualquier dirección de análisis exceda lo estipulado en el literal A, los parámetros de la respuesta dinámica total pueden reducirse proporcionalmente, esto a criterio del diseñador.

Ejemplo De Corrección De Cortante Basal En MAMPOS Actualizado

MAMPOS realiza el respectivo análisis de cortantes estáticos y dinámicos con el fin de determinar si es necesario aplicar el factor de corrección adecuado según sea el caso, para ello es necesario activar la opción que se indica en la siguiente ilustración:

Ilustración 40. Ventana de Datos Generales del ejemplo #1

DATOS_GENERALES

N° DE NPISOS

ESPESOR DE MUROS (m)

¿LOS PISOS TIENEN LA MISMA ALTURA? SI NO

ALtura DE NPISOS (m)

MATERIAL

MODULO DE ELASTICIDAD (kPa)

MAMPOSTERÍA (M)

CONCRETO (C)

DATOS GENERALES DE LAS LOSAS

	ID_PISO	ALTURA_PISO (m)	CARGA MUERTA (kn/m2)	CARGA VIVA (Kn/M2)	L PARA EXC DIR x (m)	L PARA EXC DIR x y (m)
▶	1	3	10	10	6	6
	2	3	10	10	6	6
	3	3	10	10	6	6
	4	3	10	10	6	6

TIPO DE SUELO

Aa

Av

C. importancia

ESTRUCTURA IRREGULAR ESTRUCTURA REGULAR

ANALISIS MODAL ANALISIS F.H.E

CORREGIR AUTOMATICAMENTE EL CORTANTE BASAL NO CORREGIR EL CORTANTE BASAL

GUARDAR

Nota. Elaboración propia

Ilustración 41. Resultados de corrección basal para el ejemplo #1

```

----- COMPROBACIÓN DE CORTANTE BASAL -----
** DIR. X **
CORTANTE PARA Tx= 742.773
CORTANTE MODAL= 555.850

** DIR. Y **
CORTANTE PARA Ty= 1,096.773
CORTANTE MODAL= 816.042

SE DEBE CORREGIR LAS FUERZAS MODALES EN LA DIR. X
SE DEBE CORREGIR LAS FUERZAS MODALES EN LA DIR. Y

FACTOR DE CORRECCION EN X: 1.069
FACTOR DE CORRECCION EN Y: 1.075
=====
RESULTADOS CORREGIDOS DEL ANALISIS
METODO DEL ANALISIS MODAL
=====
-. # DE PISOS : 4
# PISO ALTURA FUERZA SISMICA
(en x, en y)
1 3 47.088 61.195
2 3 98.369 147.966
3 3 148.971 248.018
4 3 299.790 420.240

```

Nota. Elaboración propia

Comparación de Resultados

MATLAB

En el programa MATLAB se realizó el registro de las matrices de masa y de rigidez de la estructura como datos de entrada, esto con el fin de calcular la frecuencia natural circular y período para cada modo de vibración, como se muestra a continuación.

Ilustración 42. Programación en MATLAB para cálculo de frecuencias naturales circulares y períodos de vibración.

```

2   clc, clear all
3   m=[33.74 0 0 0;0 33.74 0 0;0 0 33.74 0;0 0 0 33.74]
4   kk=[56802.78 -15938.26 0 0;-15938.26 25404.51 -9466.25 0;0 -9466.25 14455.66 -4989.41;0 0 -4989.41 4989.41]
5   kkinv=inv(kk)
6   [phi,lam]=eig(kk,m)
7   w1=sqrt(lam(1,1))
8   w2=sqrt(lam(2,2))
9   w3=sqrt(lam(3,3))
10  w4=sqrt(lam(4,4))
11  T1=2*pi()/w1
12  T2=2*pi()/w2
13  T3=2*pi()/w3
14  T4=2*pi()/w4
15  mj=phi'*m*phi

```

Nota. Elaboración propia

- Matriz de masa.

m =

33.7400	0	0	0
0	33.7400	0	0
0	0	33.7400	0
0	0	0	33.7400

- Matriz de rigidez.

kk =

1.0e+04 *				
5.6803	-1.5938	0	0	
-1.5938	2.5405	-0.9466	0	
0	-0.9466	1.4456	-0.4989	
0	0	-0.4989	0.4989	

- Matriz inversa de rigidez.

kkinv =

```
1.0e-03 *
0.0245    0.0245    0.0245    0.0245
0.0245    0.0872    0.0872    0.0872
0.0245    0.0872    0.1929    0.1929
0.0245    0.0872    0.1929    0.3933
```

- Vectores propios.

phi =

```
0.0128    0.0329   -0.0604   -0.1573
0.0443    0.0963   -0.1170    0.0687
0.0886    0.0998    0.1079   -0.0133
0.1402   -0.0965   -0.0257    0.0011
```

- Valores propios.

lam =

```
1.0e+03 *
0.0544     0         0         0
0         0.3008     0         0
0         0         0.7680     0
0         0         0         1.8897
```

- Frecuencias naturales circulares para cada modo de vibración.

w1 =

7.3745

w2 =

17.3429

$$w_3 =$$

$$27.7120$$

$$w_4 =$$

$$43.4707$$

- **Períodos de vibración para cada modo de vibración.**

$$T_1 =$$

$$0.8520$$

$$T_2 =$$

$$0.3623$$

$$T_3 =$$

$$0.2267$$

$$T_4 =$$

$$0.1445$$

Programa Original QBASIC

Ilustración 43. Frecuencias naturales circulares y períodos de vibración en programa MAMPOS original.

```

*****
RESULTADOS DEL ANALISIS MODAL
*****

LA ESTRUCTURA TIENE 4 MODOS DE VIBRACION
VALORES FRECUENCIALES Y DE PERIODOS EN CADA MODO SON:

```

MODO DE VIBRACION	FRECUENCIA (rad/seg)	PERIODO (seg)
1	7.2606	0.8654
2	17.0731	0.3680
3	27.2842	0.2303
4	42.8180	0.1467

Nota. Elaboración propia

Programa Actualizado Visual Basic

Ilustración 44. Frecuencias naturales circulares y períodos de vibración en programa MAMPOS actualizado.

```

*****
RESULTADOS DEL ANALISIS MODAL
*****

LA ESTRUCTURA TIENE 4 MODOS DE VIBRACION
VALORES FRECUENCIALES Y DE PERIODOS EN CADA MODO SON:

```

MODO DE VIBRACION	FRECUENCIA rad/seg	PERIODO seg
1	7.374	0.852
2	17.341	0.362
3	27.709	0.227
4	43.466	0.145

Nota. Elaboración propia

8. Normalización de Vectores

Por definición, tenemos que los vectores son elementos de un espacio vectorial que corresponde a una estructura algebraica, además, cuentan con magnitud, dirección y

sentido. En el procedimiento de normalización, se obtiene un vector de magnitud 1 con la misma dirección y sentido que un vector dado, es decir:

$$\vec{L} = \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|}$$

Donde:

\vec{L} : vector en \mathbb{R}^n .

$|\vec{L}|$: magnitud o norma del vector \mathbf{L} .

Como se observa en la anterior fórmula, la normalización del vector se logra mediante la división de cada una de las componentes de dicho vector entre la norma del mismo. Por ejemplo, para un vector $\mathbf{L} = (3, 4)$, su norma es:

$$|\vec{L}| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$$

Entonces, al normalizar el vector \mathbf{L} obtenemos un nuevo vector al que llamamos vector \mathbf{P} , como se muestra a continuación.

$$\vec{P} = \left(\frac{3}{5}, \frac{4}{5} \right)$$

Para verificar que el procedimiento de normalización se realizó correctamente, calculamos la norma del vector \mathbf{P} .

$$|\vec{P}| = \sqrt{\left(\frac{3}{5}\right)^2 + \left(\frac{4}{5}\right)^2} = 1$$

Con el fin de comprobar que los resultados obtenidos en el programa MAMPOS actualizado sean correctos, se realizó la comparación con los resultados obtenidos en MATLAB, en este caso es necesario hacer la aclaración que en el programa MATLAB se obtienen vectores propios normalizados respecto a la matriz de masa, en consecuencia, fue necesario normalizar los vectores propios obtenidos con el programa MAMPOS para poder realizar una comparación adecuada; además, en este caso se ilustran los vectores propios obtenidos en el sentido X, es decir, usando períodos de vibración y rigidez en la dirección X.

A continuación, se muestran los vectores propios obtenidos en MATLAB para cada uno de los períodos de vibración de la estructura.

- Vector propio para el primer modo de vibración.

```
0.0128  
0.0443  
0.0886  
0.1402
```

- Vector propio para el segundo modo de vibración.

```
0.0329  
0.0963  
0.0998  
-0.0965
```

- Vector propio para el tercer modo de vibración.

```
-0.0604  
0.1170  
0.1079  
-0.0257
```

- Vector propio para el cuarto modo de vibración.

```
-0.1573  
0.0687  
-0.0133  
0.0011
```

Así mismo, se muestran los vectores propios obtenidos en MAMPOS.

- Vector propio para el primer modo de vibración.

```
0.0920  
0.3160  
0.6320  
1.0000
```

- Vector propio para el segundo modo de vibración.

-0.3410
-0.9980
-1.0340
1.0000

- Vector propio para el tercer modo de vibración.

2.3460
4.5470
-4.1930
1.0000

- Vector propio para el cuarto modo de vibración.

-139.3620
60.8200
-11.7790
1.0000

Los vectores propios de MAMPOS normalizados son los siguientes:

- Vector propio para el primer modo de vibración.

0.0129
0.0443
0.0886
0.1402

- Vector propio para el segundo modo de vibración.

-0.0329
-0.0963
-0.0998
0.0965

- Vector propio para el tercer modo de vibración.

0.0604
0.1170
-0.1079

0.0257

- Vector propio para el cuarto modo de vibración.

-0.1573

0.0687

-0.0133

0.0011

Agregando a lo anterior, se indican los vectores propios obtenidos en el programa MAMPOS original elaborado por el Ing. Juan Manuel Mosquera.

- Vector propio para el primer modo de vibración.

0.0910

0.3160

0.6320

1.0000

- Vector propio para el segundo modo de vibración.

-0.3400

-0.9970

-1.0350

1.0000

- Vector propio para el tercer modo de vibración.

2.3480

4.5570

4.1970

1.0000

- Vector propio para el cuarto modo de vibración.

-139.3620

60.8200

-11.7790

1.0000

Finalmente, en las tablas mostradas a continuación se indica el porcentaje de diferencia entre los valores de los vectores propios obtenidos en MATLAB y los obtenidos en MAMPOS actualizado, además se muestra el porcentaje de diferencia

entre los valores de los vectores propios obtenidos en MAMPOS actualizado y los obtenidos en MAMPOS original, respectivamente.

Tabla 16. Porcentaje de diferencia entre vectores propios de MATLAB y vectores propios de MAMPOS actualizado

MODO DE VIBRACIÓN DIRECCIÓN X	MAMPOS NUEVO	MATLAB	% DIFERENCIA MATLAB A MAMPOS NUEVO
1	0.0129	0.0128	-0.78
	0.0443	0.0443	0.00
	0.0886	0.0886	0.00
	0.1402	0.1402	0.00
2	-0.0329	0.0329	0.00
	-0.0963	0.0963	0.00
	-0.0998	0.0998	0.00
	0.0965	-0.0965	0.00
3	0.0604	-0.0604	0.00
	0.1170	0.117	0.00
	-0.1079	0.1079	0.00
	0.0257	-0.0257	0.00
4	-0.1573	-0.1573	0.00
	0.0687	0.0687	0.00
	-0.0133	-0.0133	0.00
	0.0011	0.0011	0.00

Nota. Elaboración propia

Evaluando los vectores propios obtenidos con MAMPOS y los obtenidos con MATLAB, es posible afirmar que los métodos numéricos aplicados en MAMPOS son confiables, los porcentajes de diferencia son bajos.

Tabla 17. Porcentaje de diferencia entre vectores propios de MAMPOS actualizado y vectores propios de MAMPOS original

MODO DE VIBRACIÓN DIRECCIÓN X	MAMPOS ING. JUAN	MAMPOS NUEVO	% DIFERENCIA MAMPOS NUEVO A MAMPOS ING. JUAN
1	0.091	0.0920	1.10
	0.316	0.3160	0.00
	0.632	0.6320	0.00
	1	1.0000	0.00
2	-0.34	-0.3410	0.29
	-0.997	-0.9980	0.10
	-1.035	-1.0340	-0.10
	1	1.0000	0.00
3	2.348	2.3460	-0.09
	4.557	4.5470	-0.22
	-4.197	4.1930	-199.90
	1	1.0000	0.00
4	-139.969	-139.3620	-0.43
	61.021	60.8200	-0.33
	-11.79	-11.7790	-0.09
	1	1.0000	0.00

Nota. Elaboración propia

En cuanto a los vectores calculados con MAMPOS original y MAMPOS actualizado, la diferencia porcentual entre los datos obtenidos son lo suficientemente bajos, por lo tanto, los resultados de MAMPOS original son confiables, esto teniendo en cuenta que los resultados de MAMPOS actualizados fueron comparados con MATLAB para verificar su exactitud.

II. Comparación De Resultados De Análisis

Anteriormente se realizó la comparación de frecuencias, valores y vectores propios haciendo uso de MATLAB, puesto que se buscó comprobar el adecuado desarrollo de los métodos numéricos empleados en el código de programación de MAMPOS; ahora bien, también es necesario comprobar que los resultados obtenidos con el análisis estructural son acertados, para esto se hizo uso de ETABS, software en el cual se modelaron estructuras a modo de ejemplo con el fin de comparar cortantes y períodos.

Como particularidad en la rigidez, MAMPOS evalúa dicho parámetro en las direcciones X y Y de forma independiente, es decir, si la dirección del sismo sigue al eje X entonces únicamente se tiene en cuenta la rigidez de los muros paralelos al eje X y si la dirección del sismo sigue al eje Y entonces únicamente se tiene en cuenta la rigidez de los muros paralelos al eje Y. Ahora bien, ETABS no realiza el procedimiento descrito anteriormente, sino que toma la rigidez como la suma de las rigideces de los muros dispuestos simultáneamente en las direcciones X y Y; en consecuencia, para cada una de las estructuras de ejemplo fue necesaria la creación de dos modelos separados en ETABS para evaluar los parámetros dinámicos en cada dirección de análisis.

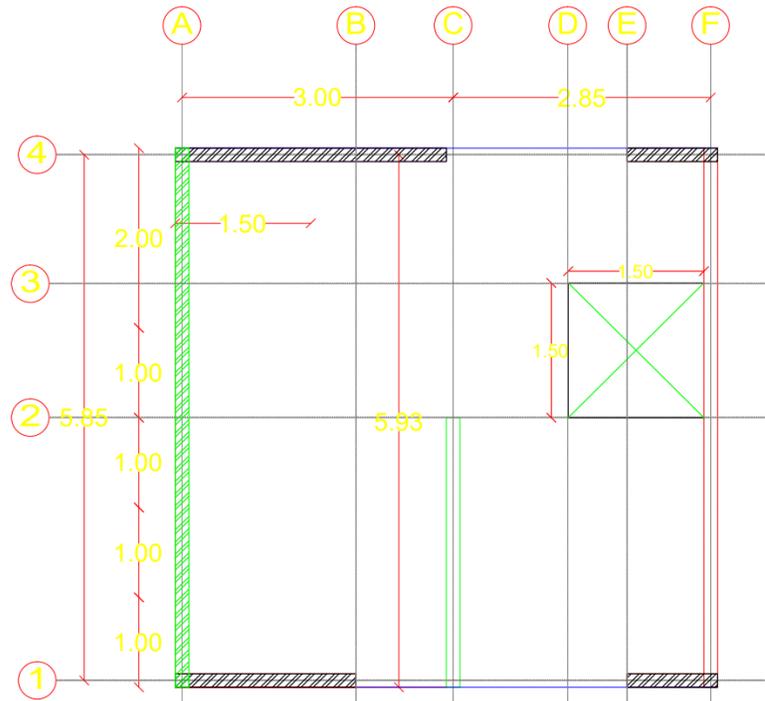
Adicionalmente, se muestra la comparación de MAMPOS actualizado y cálculos manuales en valores de fuerzas horizontales, cortantes y momentos en los muros. También se incluye la comparación de los resultados del análisis modal para MAMPOS original y MAMPOS actualizado.

1. Estructura Ejemplo #1

Descripción General

La estructura consta de 4 pisos con una altura de 3 m cada uno, en los que se encuentran 4 muros en dirección X y 3 muros en dirección Y dispuestos sobre una losa de 33.75 m² de área, cada piso cuenta con una carga muerta de 10 kN/m² y carga viva de 2 kN/m². Los muros cuentan con un espesor de 0.15 m.

Ilustración 45. Plano estructura ejemplo 1



Nota. Elaboración propia

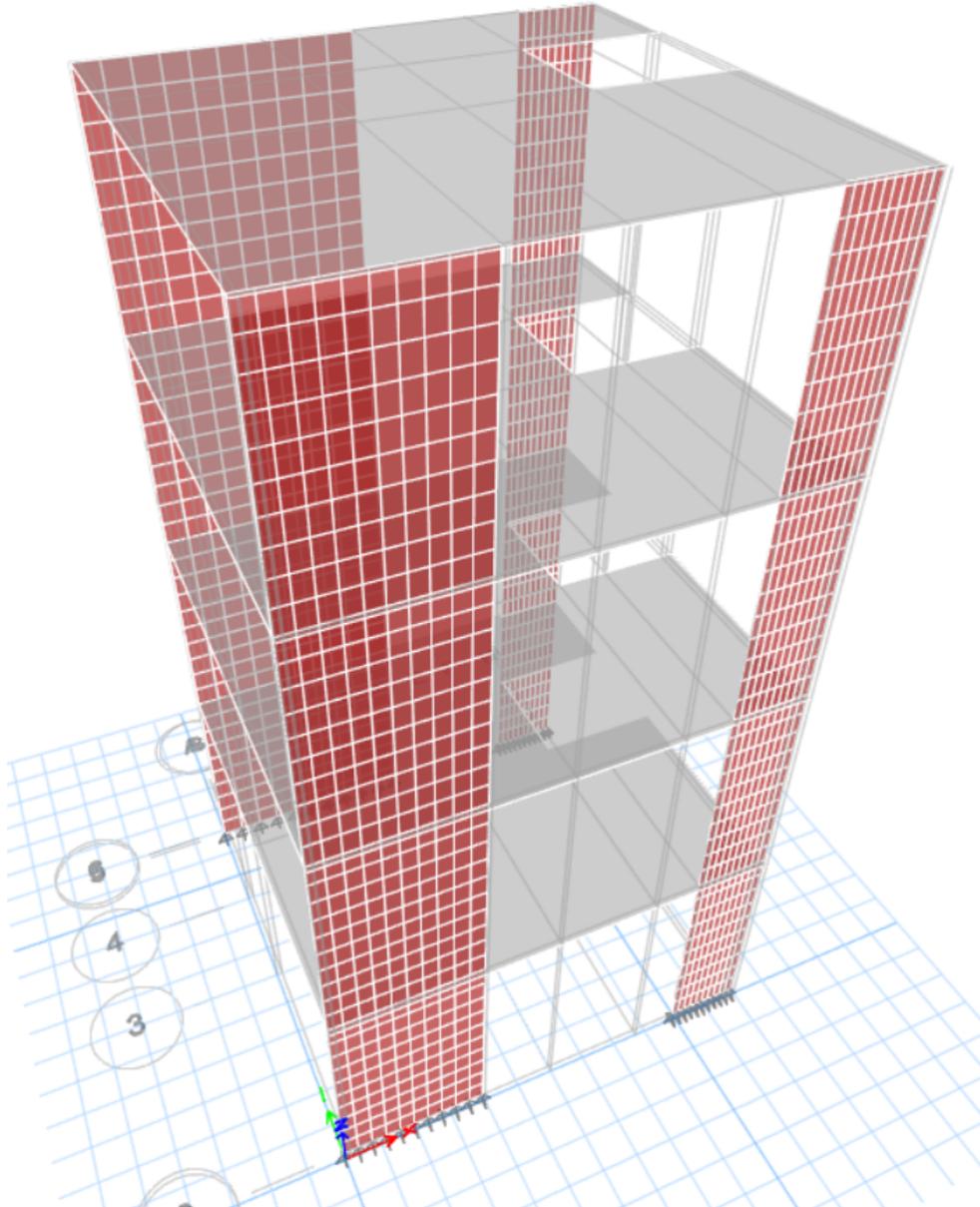
En cuanto a parámetros sísmicos, la estructura se encuentra en la zona 5, nivel de importancia I y tipo de suelo D, con lo cual tenemos los siguientes coeficientes de amplificación:

- A_v : 0.2
- A_a : 0.25
- F_a : 1.3
- F_v : 2

Como parte del análisis sísmico, se realizó el cálculo del período de vibración aproximado empleado en el cálculo de cortantes estáticos; para este caso tenemos un período de 0.32 segundos. Adicionalmente, para la corrección del cortante modal se usó el factor para estructuras regulares especificado en la norma.

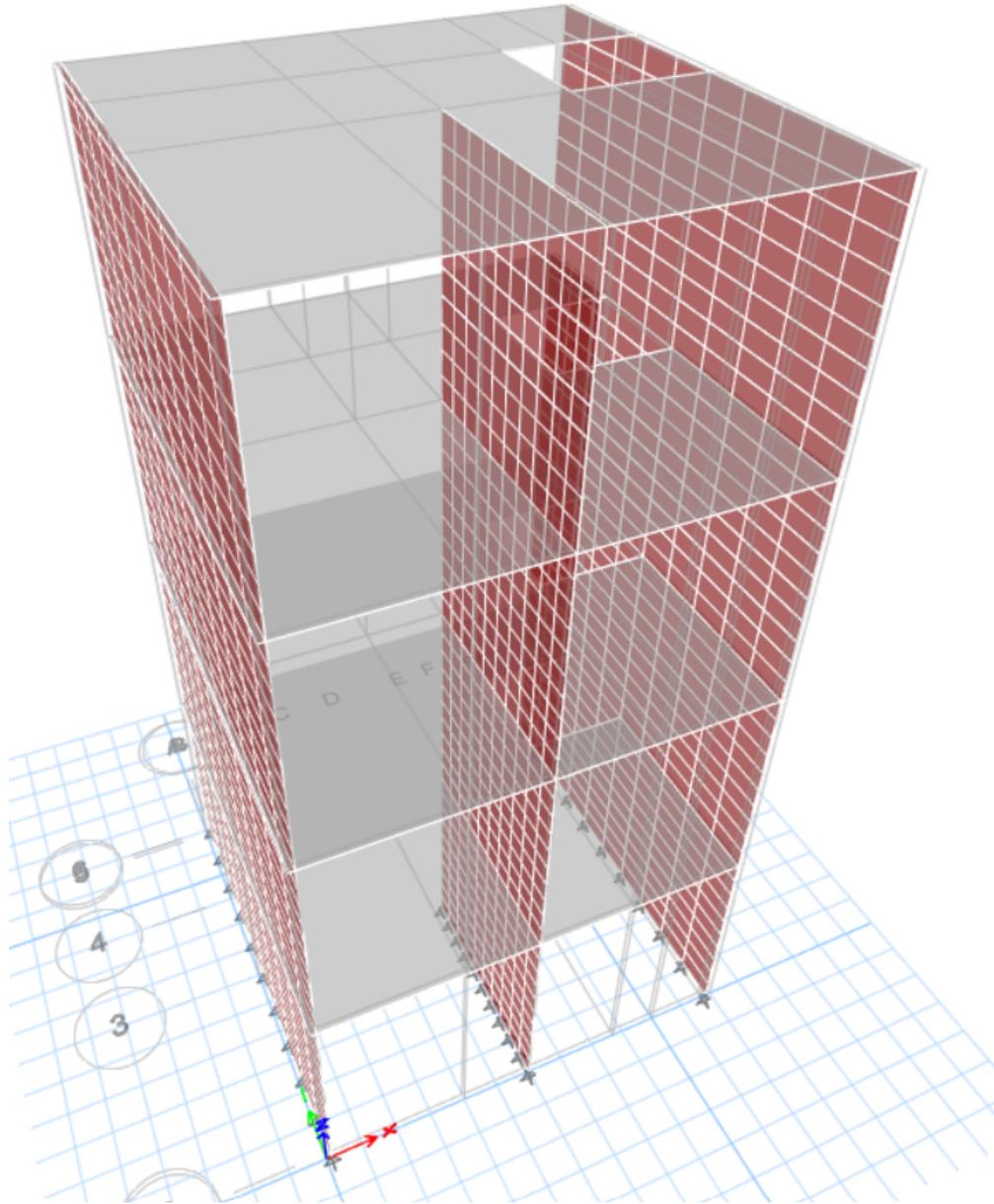
Comparación con ETABS

Ilustración 46. Modelo en ETABS para sismo en X



Nota. Adaptado de ETABS

Ilustración 47. Modelo en ETABS para sismo en Y



Nota. Adaptado de ETABS

Cortantes Estáticos

El cálculo de fuerzas sísmicas estáticas por piso se realizó usando el método de la Fuerza Horizontal Equivalente, en el cual se emplearon los pesos sísmicos por piso, la altura de cada piso y los parámetros sísmicos definidos anteriormente para elaborar el

espectro de aceleraciones. A continuación, se muestran los cortantes obtenidos en MAMPOS y ETABS, respectivamente.

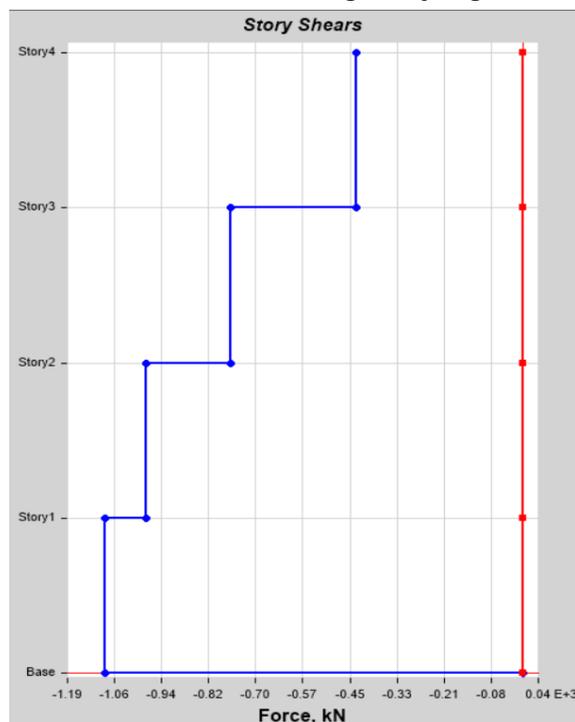
Ilustración 48. Cortantes estáticos para ejemplo 1 en MAMPOS

CALCULO DE LAS FUERZAS SISMICAS RESULTADOS DEL ANALISIS METODO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE					
-. # DE PISOS : 4					
PERIODO DE VIBRACION APROXIMADO (Ta) = 0.32					
PERIODOS EN LA DIRECCION X y Y (Tx,Ty)= 0.38 0.26					
ACELERACION BASAL (Sa)x, (Sa)y = 0.813 0.813					
CORTANTE BASAL (Vs)x, (Vs)y = 1096.4 1096.4					
MASA TOTAL DEL EDIFICIO = 134.94					
PISO #	ALTURA (mts)	COEF. DE REPARTO (en x, en y)		FUERZA SISMICA (en x, en y)	
1	3.00	0.100	0.100	109.64	109.64
2	3.00	0.200	0.200	219.28	219.28
3	3.00	0.300	0.300	328.92	328.92
4	3.00	0.400	0.400	438.55	438.55

Nota. Elaboración propia

Como se observa en la ilustración 48, los cortantes tanto en la dirección X como en la dirección Y, esto debido a que las variables consideradas en el método para el cálculo son iguales para ambas direcciones de análisis.

Ilustración 49. Cortantes estáticos para ejemplo 1 en ETABS



Nota. Adaptado de ETABS

Tabla 17. Cortantes por piso ejemplo 1 en ETABS

TABLE: Story Forces							
Story	Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	Location	P	VX
						kN	kN
Story4	Sx	LinStatic	Step By Step	1	Top	0	-435.825
Story4	Sx	LinStatic	Step By Step	2	Top	0	-435.825
Story4	Sx	LinStatic	Step By Step	3	Top	0	-435.825
Story3	Sx	LinStatic	Step By Step	1	Top	0	-762.6937
Story3	Sx	LinStatic	Step By Step	2	Top	0	-762.6937
Story3	Sx	LinStatic	Step By Step	3	Top	0	-762.6937
Story2	Sx	LinStatic	Step By Step	1	Top	0	-980.6062
Story2	Sx	LinStatic	Step By Step	2	Top	0	-980.6062
Story2	Sx	LinStatic	Step By Step	3	Top	0	-980.6062
Story1	Sx	LinStatic	Step By Step	1	Top	0	-1089.5625
Story1	Sx	LinStatic	Step By Step	2	Top	0	-1089.5625
Story1	Sx	LinStatic	Step By Step	3	Top	0	-1089.5625

Nota. Adaptado de tablas de resultados de ETABS

En la tabla mostrada a continuación se indica el porcentaje de diferencia de las fuerzas estáticas calculadas con ETABS y las fuerzas estáticas calculadas con MAMPOS.

Tabla 18. Porcentaje de diferencia entre fuerzas por piso ejemplo 1 en ETABS respecto a fuerzas por piso en MAMPOS

Piso #	Fx FHE (kN)	Fx ETABS (kN)	%diferencia Fx ETABS respecto a Fx FHE
1	109.64	108.96	-0.62
2	219.28	217.91	-0.63
3	328.92	326.87	-0.63
4	438.55	435.87	-0.61
Vs (kN)	1096.39	1089.6	-0.62

Nota. Elaboración propia

Cortantes Dinámicos con Sismo en Dirección X

En la ilustración 50 y en la tabla 19 se muestran los cortantes basales estático y dinámico (obtenido mediante el uso del análisis modal) para la estructura ejemplo en

MAMPOS y ETABS, respectivamente, para sismo en dirección X; de los valores presentados es posible concluir que en ambos casos es necesario realizar la corrección de cortantes dinámicos puesto que éstos son menores al 80% del cortante basal estático obtenido para cada caso. Además, se observa que el cortante basal dinámico de ETABS es 15.29% mayor que el obtenido en MAMPOS.

Ilustración 50. Cortantes basales estático y dinámico en dirección X para ejemplo 1 en MAMPOS

```

** DIR. X **
CORTANTE PARA Ta=    1096.4
CORTANTE MODAL=     524.5

```

Nota. Elaboración propia

Tabla 19. Cortantes basales estático y dinámico en dirección X para ejemplo 1 en ETABS

TABLE: Base Reactions				
Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	FX
				kN
Sx	LinStatic	Step By Step	1	-1089.5625
Sx	LinStatic	Step By Step	2	-1089.5625
Sx	LinStatic	Step By Step	3	-1089.5625
SxDinam	LinRespSpec	Max		611.3602

Nota. Adaptado de tablas de resultados de ETABS

Teniendo en cuenta los resultados mostrados anteriormente, se deben usar los siguientes factores de corrección o coeficientes de amplificación:

- Para estructura modelada en MAMPOS: 1.67
- Para estructura modelada en ETABS: 1.43

Para realizar la respectiva comparación entre los cortantes dinámicos obtenidos en ambos programas, se proporcionan las tablas 20 y 21 en las que se encuentran dichas fuerzas sin ser afectadas por el coeficiente de amplificación; además, en la tabla 22 se muestran los cortantes afectados por el coeficiente de amplificación.

Ilustración 51. Fuerzas sísmicas dinámicas y cortantes dinámicos para sismo en X en ejemplo 1 en MAMPOS sin aplicar coeficiente de amplificación

PISO #	MASA	COEF. DE REPARTO	FUERZA SISMICA	CORTANTE
1	33.747	0.045	23.551	524.495
2	33.747	0.155	81.222	500.944
3	33.747	0.31	162.578	419.723
4	33.747	0.49	257.144	257.144

Nota. Elaboración propia

Tabla 20. Cortantes dinámicos para sismo en X en ejemplo 1 en ETABS sin aplicar coeficiente de amplificación

TABLE: Story Forces						
Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P	VX
					kN	kN
Story4	SxDinam	LinRespSpec	Max	Top	0	298.1804
Story4	SxDinam	LinRespSpec	Max	Bottom	0	298.1804
Story3	SxDinam	LinRespSpec	Max	Top	0	446.054
Story3	SxDinam	LinRespSpec	Max	Bottom	0	446.054
Story2	SxDinam	LinRespSpec	Max	Top	0	550.2162
Story2	SxDinam	LinRespSpec	Max	Bottom	0	550.2162
Story1	SxDinam	LinRespSpec	Max	Top	0	611.3602
Story1	SxDinam	LinRespSpec	Max	Bottom	0	611.3602

Nota. Adaptado de tablas de resultados de ETABS

Tabla 21. Cortantes dinámicos para sismo en X en ejemplo 1 en MAMPOS y ETABS sin coeficiente de amplificación

Piso #	Cortante dinámico MAMPOS sin coeficiente de amplificación	Cortante dinámico ETABS sin coeficiente de amplificación	% diferencia cortantes sin coeficiente de amplificación ETABS respecto a MAMPOS
1	524.5	611.36	15.29
2	500.94	550.22	9.38
3	419.72	446.05	6.08
4	257.144	298.18	14.78

Nota. Elaboración propia

Tabla 22. Cortantes dinámicos para sismo en X en ejemplo 1 en MAMPOS y ETABS con coeficiente de amplificación

Piso #	Cortante dinámico MAMPOS con coeficiente de amplificación	Cortante dinámico ETABS con coeficiente de amplificación	% diferencia cortantes con coeficiente de amplificación ETABS respecto a MAMPOS
1	875.915	874.2448	-0.19
2	836.5698	786.8146	-6.13
3	700.9324	637.8515	-9.42
4	429.43048	426.3974	-0.71

Nota. Elaboración propia

Cortantes Dinámicos con Sismo en Dirección Y

En la ilustración 52 y la tabla 23 se muestran los cortantes basales estáticos y dinámicos obtenidos en MAMPOS y ETABS, respectivamente, para sismo en dirección Y; en este caso es posible afirmar que debe realizarse la corrección a los cortantes dinámicos aplicando los coeficientes de amplificación a los cortantes conseguidos al aplicar el método de análisis modal, puesto que éstos son menores al 80% del cortante basal estático obtenido para cada caso. Además, se observa que el cortante basal dinámico de ETABS es 4.9% mayor que el obtenido en MAMPOS.

Ilustración 52. Cortantes basales estático y dinámico en dirección Y para ejemplo 1 en MAMPOS

```

** DIR. Y **
CORTANTE PARA Ta= 1096.4
CORTANTE MODAL= 794.8

```

Nota. Elaboración propia

Tabla 23. Cortantes basales estático y dinámico en dirección Y para ejemplo 1 en ETABS

TABLE: Base Reactions				
Output Case	Case Type	Step Type	Step Number	FY
				kN
Sy	LinStatic	Step By Step	1	-1089.5625
Sy	LinStatic	Step By Step	2	-1089.5625
Sy	LinStatic	Step By Step	3	-1089.5625
SyDinam	LinRespSpec	Max		834.7089

Nota. Adaptado de tablas de resultados de ETABS

Evaluando los resultados anteriormente, se tienen los siguientes coeficientes de amplificación para cortantes dinámicos:

- Para estructura modelada en MAMPOS: 1.1
- Para estructura modelada en ETABS: 1.04

Con el objetivo de realizar la respectiva comparación de resultados entre MAMPOS y ETABS, se proporcionan las tablas 24 y 25 en las que se encuentran los cortantes modales sin aplicar el coeficiente de amplificación, junto con los cortantes afectados por el coeficiente de amplificación calculado para cada caso.

Ilustración 53. Fuerzas sísmicas dinámicas y cortantes dinámicos para sismo en Y en ejemplo 1 en MAMPOS sin aplicar coeficiente de amplificación

PISO #	MASA	COEF. DE REPARTO	FUERZA SISMICA	CORTANTE
1	33.747	0.056	44.731	794.698
2	33.747	0.167	132.488	749.968
3	33.747	0.31	246.661	617.479
4	33.747	0.467	370.818	370.818

Nota. Elaboración propia

Tabla 24. Cortantes dinámicos para sismo en Y en ejemplo 1 en ETABS sin aplicar coeficiente de amplificación

TABLE: Story Forces						
Story	Output Case	Case Type	Step Type	Location	P	VY
					kN	kN
Story4	SyDinam	LinRespSpec	Max	Top	0	389.5688
Story4	SyDinam	LinRespSpec	Max	Bottom	0	389.5688
Story3	SyDinam	LinRespSpec	Max	Top	0	620.2213
Story3	SyDinam	LinRespSpec	Max	Bottom	0	620.2213
Story2	SyDinam	LinRespSpec	Max	Top	0	762.6812
Story2	SyDinam	LinRespSpec	Max	Bottom	0	762.6812
Story1	SyDinam	LinRespSpec	Max	Top	0	834.7089
Story1	SyDinam	LinRespSpec	Max	Bottom	0	834.7089

Nota. Adaptado de tablas de resultados de ETABS

Tabla 25. Cortantes dinámicos para sismo en Y en ejemplo 1 en MAMPOS y ETABS sin coeficiente de amplificación

Piso #	Cortante dinámico MAMPOS sin coeficiente de amplificación	Cortante dinámico ETABS sin coeficiente de amplificación	% diferencia cortantes sin coeficiente de amplificación ETABS respecto a MAMPOS
1	794.7	834.71	4.91
2	749.97	762.68	1.68
3	617.48	620.22	0.44
4	370.82	389.57	4.93

Nota. Elaboración propia

Analizando los cortantes dinámicos de MAMPOS y ETABS, junto con el porcentaje de diferencia entre éstos, si bien algunos valores difieren más de lo esperado, estas diferencias son pequeñas por lo tanto se considera que los resultados de MAMPOS son similares a ETABS.

Tabla 26. Cortantes dinámicos para sismo en Y en ejemplo 1 en MAMPOS y ETABS con coeficiente de amplificación

Piso #	Cortante dinámico MAMPOS con coeficiente de amplificación	Cortante dinámico ETABS con coeficiente de amplificación	% diferencia cortantes con coeficiente de amplificación ETABS respecto a MAMPOS
1	874.17	868.0984	-0.7
2	824.967	793.1872	-3.93
3	679.228	645.0288	-5.17
4	407.902	405.1528	-0.68

Nota. Elaboración propia

Al observar los resultados de la tabla 26 podemos concluir que, al igual que en la tabla 25, los cortantes de MAMPOS modificados por el factor de amplificación en comparación con los calculados con ETABS, continúan teniendo un porcentaje de diferencia mayor al esperado, pero éste no es lo suficientemente grande como para descartar los resultados del análisis realizados con MAMPOS.

Periodos de Vibración Para Análisis Dinámico

El análisis dinámico especifica el uso de un período de vibración para cada dirección de análisis de la estructura y cada modo de vibración. Para el presente ejemplo se realizó la comparación del período correspondiente al primer modo de vibración en las direcciones X y Y puesto que éste es el que genera las condiciones más críticas en la estructura en cuanto a desplazamientos.

Tabla 27. Períodos de vibración para primer modo de vibración en dirección X y Y

Dirección de sismo	Período MAMPOS (seg)	Período ETABS (seg)	% diferencia período ETABS respecto a MAMPOS
X	0.852	0.814	-4.56
Y	0.259	0.249	-3.94

Nota. Elaboración propia

Evaluando los períodos de vibración obtenidos, los resultados de ambos programas tienen valores cercanos, en consecuencia, el porcentaje de diferencia entre éstos es bajo. Es importante recalcar que la diferencia entre los valores de cortantes de MAMPOS mostrados en las tablas 21 y 25 es una consecuencia de la diferencia entre los períodos de vibración de MAMPOS y ETABS.

Resultados del Análisis Modal con MAMPOS Original VS MAMPOS Actualizado

Los resultados del análisis modal obtenidos con MAMPOS actualizado fueron comparados con los resultados con los valores mostrados en MAMPOS original, esto con el fin de evaluar las diferencias que pueden presentarse debido a los cambios en la norma de sismoresistencia con la que fue diseñado cada uno de estos programas.

Ilustración 54. Características y posición de muros en MAMPOS actualizado

***** CARACTERISTICAS DE LOS MUROS ESTRUCTURALES *****				
MUROS ESTRUCTURALES EN LA DIRECCION X				
MURO #	ESPESOR (m)	MATERIAL (C o M)	LONGITUD (m)	ABSCISA (m)
MX1	0.15	M	2.92	5.92
MX2	0.15	M	0.93	5.92
MX3	0.15	M	0.93	0.08
MX4	0.15	M	1.92	0.08

***** CARACTERISTICAS DE LOS MUROS ESTRUCTURALES *****				
MUROS ESTRUCTURALES EN LA DIRECCION Y				
MURO #	ESPESOR (m)	MATERIAL (C o M)	LONGITUD (m)	ORDENADA (m)
MY1	0.15	M	5.85	5.93
MY2	0.15	M	2.92	3.07
MY3	0.15	M	5.85	0.08

Nota. Elaboración propia

Ilustración 55. Características y posición de muros en MAMPOS original

MUROS ESTRUCTURALES EN LA DIRECCION X

MURO #	ESPESOR (m)	MATERIAL (C o M)	LONGITUD (m)	ABSCISA (m)
1X	0.15	M	2.9	5.9
2X	0.15	M	0.9	0.1
3X	0.15	M	0.9	5.9
4X	0.15	M	1.9	0.1

MUROS ESTRUCTURALES EN LA DIRECCION Y

MURO #	ESPESOR (m)	MATERIAL (C o M)	LONGITUD (m)	ORDENADA (m)
1Y	0.15	M	5.8	0.1
2Y	0.15	M	2.9	3.1
3Y	0.15	M	5.8	5.9

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Como se puede observar, la presentación de la información en MAMPOS original y MAMPOS actualizado es muy similar; los cambios realizados en MAMPOS actualizado tienen como fin garantizar que el usuario pueda comprender la información ingresada al programa de forma clara y ordenada, de tal forma que, si existe algún error en la digitación de valores o en el modelado de la estructura, éstos puedan ser identificados fácilmente.

Ilustración 56. Rigidez y excentricidad en MAMPOS actualizado

RESUMEN DE LAS LOSAS ESTRUCTURALES					
PISO #	S. RIG X (kN/m)	S. RIG Y (kN/m)	S. RIG T (kN/m ²)	EXC X (mts)	EXC Y (mts)
1	39,683	347,525	2,979,443	0.15-0.45	-1.22-1.82
2	15,460	166,593	1,423,371	0.15-0.45	-1.28-1.88
3	9,180	105,302	899,118	0.15-0.45	-1.29-1.89
4	4,837	58,098	495,876	0.15-0.45	-1.30-1.90

Nota. Elaboración propia

Ilustración 57. Rigidez y excentricidad en MAMPOS actualizado

RESUMEN DE LAS LOSAS ESTRUCTURALES						
PISO	S. RIG X	S. RIG Y	S. RIG T	EXC X		
EXC Y	(kN/m)	(kN/m)	(kN/m ²)	(mts)		
(mts)						
1	39675	347478	2929333	0.15	-0.45	-1.21
-1.81						
2	15461	166601	1399589	0.15	-0.45	-1.27
-1.87						
3	9176	105266	883740	0.15	-0.45	-1.28
-1.88						
4	4834	58059	487231	0.15	-0.45	-1.29
-1.89						

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

En cuanto a los resultados de rigidez y excentricidad en ambos programas, no se encuentran diferencias significativas en los valores, sino que la presentación de éstos en MAMPOS actualizado se encuentran de forma más organizada y clara, lo que permite entender la información con mayor facilidad.

Ilustración 58. Resultados iniciales del método de análisis modal en MAMPOS actualizado

```

=====
                      RESULTADOS DEL ANALISIS
                      METODO DEL ANALISIS MODAL
=====V=====
-. # DE PISOS      : 4
PERIODO DE VIBRACION APROXIMADO (Ta) = 0.316
PERIODOS EN LA DIRECCION X y Y (Tx,Ty)= 0.872 0.264
ACELERACION BASAL (Sa)x (Sa)y = 0.813 0.813
CORTANTE BASAL F.L.E. (Vs)x, (Vs)y (KN) = 742.773 1,096.773
CORTANTE BASAL MODAL (Vm)x, (Vm)y (KN) = 555.850 816.042

----- COMPROBACIÓN DEL PERIDO MÁXIMO -----
EL VALOR DE TX EXCEDE A T_MAXIMO, FAVOR RIGIDIZAR LA ESTRUCTURA EN X
EL VALOR DE TY NO EXCEDE EL T_MAXIMO

----- COMPROBACIÓN DE CORTANTE BASAL -----
** DIR. X **
CORTANTE PARA Ta= 742.773
CORTANTE MODAL= 555.850

** DIR. Y **
CORTANTE PARA Ta= 1,096.773
CORTANTE MODAL= 816.042

SE DEBE CORREGIR LAS FUERZAS MODALES EN LA DIR. X
SE DEBE CORREGIR LAS FUERZAS MODALES EN LA DIR. Y

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 59. Resultados iniciales del método de análisis modal en MAMPOS original

```

CALCULO DE LAS FUERZAS SISMICAS
RESULTADOS DEL ANALISIS
METODO DEL ANALISIS MODAL

-. # DE PISOS      : 4
PERIODO DE VIBRACION APROXIMADO (Ta) =      0.32
PERIODOS EN LA DIRECCION X y Y (Tx,Ty)=      0.87      0.26
CORTANTE BASAL F.L.E. (Vs)x, (Vs)y =      742.7      1096.9
CORTANTE BASAL MODAL (Vm)x, (Vm)y =      555.8      816.0

EL CORTANTE BASAL MODAL DEBE SER MAYOR AL 80% DEL CORTANTE CALCULADO
CON BASE EN Ta

** DIR. X **
CORTANTE PARA Ta=      742.7
CORTANTE MODAL=      555.8

** DIR. Y **
CORTANTE PARA Ta=      1096.9
CORTANTE MODAL=      816.0

SE DEBE CORREGIR LAS FUERZAS MODALES EN LA DIR. X
SE DEBE CORREGIR LAS FUERZAS MODALES EN LA DIR. Y

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Como se observa en las ilustraciones 58 y 59, a diferencia de MAMPOS original, MAMPOS actualizado realiza el chequeo de período máximo y añade una sugerencia para el usuario en cuanto a la rigidización de la estructura en caso de ser necesario.

Ilustración 60. Resultados corregidos del método de análisis modal en MAMPOS actualizado

```

FACTOR DE CORRECCION EN X: 1.069
FACTOR DE CORRECCION EN Y: 1.075
=====
RESULTADOS CORREGIDOS DEL ANALISIS
METODO DEL ANALISIS MODAL
=====
-. # DE PISOS      : 4
#      PISO      ALTURA      FUERZA SISMICA
      (en x,      en y)
      1          3          47.088  61.195
      2          3          98.369  147.966
      3          3          148.971 248.018
      4          3          299.790 420.240

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 61. Resultados corregidos del método de análisis modal en MAMPOS original

RESULTADOS FINALES DEL ANALISIS
METODO DEL ANALISIS MODAL

PISO #	ALTURA (mts)	FUERZA SISMICA (en x, en y)	
1	3.00	44.05	56.92
2	3.00	91.99	137.59
3	3.00	139.30	230.65
4	3.00	280.42	390.89

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Las fuerzas sísmicas después de realizar la corrección al método de análisis modal fueron mayores en MAMPOS actualizado a comparación de MAMPOS original.

Ilustración 62. Derivas para piso 4 en MAMPOS actualizado

```

-----
                LOSA ESTRUCTURAL PISO                                4
-----
EXCENTRICIDAD EN X (mts) =0.151 -0.449
EXCENTRICIDAD EN Y (mts) =-1.304 -1.904
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) =299.790 , 420.240
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-mts) =: -390.876 -570.750
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-mts) =63.446 -188.698
DERIVAS C.M. en X y Y (mm) = 61.973 7.233
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) = -0.78825 -1.15099
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) = 0.12795 -0.38053
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y: 0.028 , 0.002

*****
                DERIVAS LINEALES
                SISMO EN LA DIRECCION X
                LOSA ESTRUCTURA PISO                                4
*****
MURO #   ORDENADA   Derv Xcm   Derv Xtr1   Derv Xtr2   Derv tot
          (mts)     (mm)      (mm)       (mm)       (mm)
MX1      5.920      61.973    -1.077     -1.572     60.896
MX2      5.920      61.973    -1.077     -1.572     60.896
MX3      0.080      61.973     3.527     5.149     67.123
MX4      0.080      61.973     3.527     5.149     67.123

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 63. Derivas para piso 4 en MAMPOS original

LOSA ESTRUCTURAL PISO 4					
=====					
EXCENTRICIDAD EN X (mts)		0.154	-0.446		
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)		-1.293	-1.893		
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN)		280.4	390.9		
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-m)		-362.6	-530.9		
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-m)		60.1	-174.4		
DERIVAS C.M. en X y Y (mm)		58.01	6.73		
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000)		-0.744	-1.090		
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000)		0.123	-0.358		
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y		0.0279	0.0023		

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION X					
MURO #	COORD Ycr	Deri. Xcm	Deri. Xtr1	Deri. Xtr2	Deri.
tot.	(mts)	(mm)	(mm)	(mm)	
(mm)					
1X	5.90	58.01	-1.01	-1.48	
58.01					
2X	0.10	58.01	3.31	4.84	
62.85					
3X	5.90	58.01	-1.01	-1.48	
58.01					
4X	0.10	58.01	3.31	4.84	
62.85					

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Resultados Con Análisis Fuerza Horizontal Equivalente, MAMPOS Original Vs MAMPOS Actualizado

Con el fin de identificar la variación entre los resultados obtenidos en MAMPOS original y MAMPOS actualizado usando el método de la fuerza horizontal equivalente, a continuación, se presentan las magnitudes de fuerzas sísmicas junto con la variación que presentan las mismas al realizar el análisis en los sentidos X y Y usando ambos programas.

Cabe aclarar que tanto las características, posición de muros, rigideces y excentricidades empleadas en este método son las mismas que se mostraron en las ilustraciones 54, 55, 56 y 57, por lo que en este apartado no serán mostradas de nuevo.

Ilustración 64. Fuerzas sísmicas con método FHE para MAMPOS actualizado

```

=====
                      RESULTADOS DEL ANALISIS
                      METODO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE
                      =====
- . # de pisos      : 4
período de vibración aproximado (ta) = 0.316
períodos en la dirección x y y (tx,ty)= 0.872  0.264
aceleración basal (sa)x, (sa)y      = 0.550  0.813
cortante basal (vs)x, (vs)y          = 742.773  1,096.773
Peso total del edificio (KN)         = 1,349.875

      PISO      ALTURA      COEF.DE REPARTO      FUERZA SISMICA
      #          (m)          (en x, en y)          (en x, en y)
      1          3.000      0.082  0.100          61.214  109.678
      2          3.000      0.188  0.200          139.291  219.356
      3          3.000      0.303  0.300          225.318  329.033
      4          3.000      0.427  0.400          316.952  438.711

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 65. Fuerzas sísmicas con método FHE para MAMPOS original

```

CALCULO DE LAS FUERZAS SISMICAS
RESULTADOS DEL ANALISIS
METODO DE LA FUERZA LATERAL EQUIVALENTE

- . # DE PISOS     : 4
PERIODO DE VIBRACION APROXIMADO (Ta) = 0.32
PERIODOS EN LA DIRECCION X y Y (Tx,Ty) = 0.87 0.26
ACELERACION BASAL (Sa)x, (Sa)y = 0.550 0.813
CORTANTE BASAL (Vs)x, (Vs)y = 742.7 1096.9
MASA TOTAL DEL EDIFICIO = 135.00

      PISO      ALTURA      COEF.DE REPARTO      FUERZA SISMICA
      #          (m)          (en x, en y)          (en x, en y)
109.69      1          3.00      0.082  0.100          61.20
219.38      2          3.00      0.188  0.200          139.27
329.06      3          3.00      0.303  0.300          225.29
438.75      4          3.00      0.427  0.400          316.93

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 28. Porcentaje de variación de fuerzas sísmicas de MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original

Piso	Fuerza sísmica MAMPOS actualizado (kN)		Fuerza sísmica MAMPOS original (kN)		%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS	
	En X	En Y	En X	En Y	En X	En Y
1	61.214	109.678	61.2	109.69	0.023	-0.011
2	139.291	219.356	139.27	219.38	0.015	-0.011
3	225.318	329.033	225.29	329.06	0.012	-0.008
4	316.952	438.711	316.93	438.75	0.007	-0.009

Nota. Elaboración propia

Como se observa en la tabla 28, no existen diferencias significativas en las fuerzas sísmicas calculadas tanto en MAMPOS original como en MAMPOS actualizado, esto se confirma con los bajos porcentajes de diferencia que se presentan entre los resultados obtenidos con ambos programas debido a que el valor de los períodos de vibración con los que fueron calculados -en sismos con sentidos X y Y- presentan diferencias de milésimas entre ellos.

Es pertinente mencionar que las fuerzas sísmicas mostradas en esta sección corresponden a las calculadas con los períodos de vibración reales al presentarse un sismo en dirección X o Y, más no corresponden a las fuerzas sísmicas calculadas con el período aproximado (T_a) con el cual se inició el análisis de la estructura.

Comparación Derivas Obtenidas con el Método de la Fuerza Horizontal Equivalente

Derivas por piso en los Muros en dirección X con sismo en X, MAMPOS Actualizado VS MAMPOS Original

A continuación, se muestran las derivas por muro en cada uno de los pisos que componen la estructura, junto con el porcentaje de diferencia entre los resultados obtenidos con MAMPOS actualizado y MAMPOS original, esto ante la presencia de un sismo en dirección X.

Ilustración 66. Derivas con método FHE para muro piso 4 con sismo en X en MAMPOS actualizado

```

-----
LOSA ESTRUCTURAL PISO                                4
-----
EXCENTRICIDAD EN X (mts) =0.151 -0.449
EXCENTRICIDAD EN Y (mts) =-1.304 -1.904
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) =316.952 , 438.711
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-mts) =: -413.252 -603.423
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-mts) =66.235 -196.992
DERIVAS C.M. en X y Y (mm) = 65.521 7.551
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) = -0.83338 -1.21688
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) = 0.13357 -0.39726
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y: 0.028 , 0.002

*****
DERIVAS LINEALES
SISMO EN LA DIRECCION X
LOSA ESTRUCTURA PISO                                4
*****
MURO #   ORDENADA   Derv Xcm   Derv Xtr1   Derv Xtr2   Derv tot
          (mts)     (mm)      (mm)       (mm)       (mm)
MX1      5.920      65.521    -1.139     -1.662     64.382
MX2      5.920      65.521    -1.139     -1.662     64.382
MX3      0.080      65.521     3.728     5.444     70.965
MX4      0.080      65.521     3.728     5.444     70.965

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 67. Derivas con método FHE para muro piso 4 con sismo en X en MAMPOS actualizado

```

LOSA ESTRUCTURAL PISO 4
=====
EXCENTRICIDAD EN X (mts)           0.154 -0.446
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)          -1.293 -1.893
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN)   316.9  438.8
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-m) -409.8 -600.0
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-m)  67.5 -195.8
DERIVAS C.M. en X y Y (mm)         65.56  7.56
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) -0.841 -1.231
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000)  0.139 -0.402
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y     0.0279 0.0023

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION X

MURO #   COORD Ycr   Deri. Xcm   Deri. Xtr1   Deri. Xtr2   Deri.
tot.
          (mts)     (mm)       (mm)       (mm)
(mm)
1X       5.90      65.56      -1.14      -1.67
65.56
2X       0.10      65.56       3.74       5.47
71.03
3X       5.90      65.56      -1.14      -1.67
65.56
4X       0.10      65.56       3.74       5.47
71.03

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 29. Comparación fuerzas sísmicas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 4 con sismo en X

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MX1	64.382	65.56	-1.81
MX2	64.382	65.56	-1.81
MX3	70.965	71.03	-0.09
MX4	70.965	71.03	-0.09

Nota. Elaboración propia

Ilustración 68. Derivas con método FHE para muro piso 3 con sismo en X en MAMPOS actualizado

```

-----
                LOSA ESTRUCTURAL PISO                                3
-----
EXCENRICIDAD EN X (mts) =0.151 -0.449
EXCENRICIDAD EN Y (mts) =-1.294 -1.894
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) =542.271 , 767.744
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-mts) =: -1,114.748 -1,630.282
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-mts) =182.010 -541.863
DERIVAS C.M. en X y Y (mm) = 59.072 7.291
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) = -1.23982 -1.81320
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) = 0.20243 -0.60266
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y: 0.029 , 0.003

*****
                DERIVAS LINEALES
                SISMO EN LA DIRECCION X
                LOSA ESTRUCTURA PISO                                3
*****
MURO #   ORDENADA   Derv Xcm   Derv Xtr1
                (mts)   (mm)       (mm)
                (mm)       (mm)
MX1      5.920      59.072    -1.706    -2.496    57.366
MX2      5.920      59.072    -1.706    -2.496    57.366
MX3      0.080      59.072     5.534     8.093    67.166
MX4      0.080      59.072     5.534     8.093    67.166

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 69. Derivas con método FHE para muro piso 3 con sismo en X en MAMPOS original

```

LOSA ESTRUCTURAL PISO 3
=====
EXCENTRICIDAD EN X (mts)          0.154 -0.446
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)          -1.283 -1.883
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN)  542.2  767.8
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-m) -1105.6 -1621.0
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-m)  185.4 -538.6
DERIVAS C.M. en X y Y (mm)        59.09  7.29
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000)  -1.251 -1.834
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000)  0.210 -0.609
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y     0.0294 0.0026
  
```

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION X

MURO # tot.	COORD Ycr (mts)	Deri. Xcm (mm)	Deri. Xtr1 (mm)	Deri. Xtr2 (mm)	Deri. (mm)
1X 59.09	5.90	59.09	-1.71	-2.51	
2X 67.22	0.10	59.09	5.55	8.13	
3X 59.09	5.90	59.09	-1.71	-2.51	
4X 67.22	0.10	59.09	5.55	8.13	

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 30. Comparación fuerzas sísmicas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 3 con sismo en X

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MX1	57.366	59.09	-2.96
MX2	57.366	59.05	-2.89
MX3	67.166	67.22	-0.08
MX4	67.166	67.22	-0.08

Nota. Elaboración propia

Ilustración 70. Derivas con método FHE para muro piso 2 con sismo en X en MAMPOS actualizado

```

-----
                LOSA ESTRUCTURAL PISO                2
-----
EXCENTRICIDAD EN X (mts) =0.151 -0.449
EXCENTRICIDAD EN Y (mts) =-1.279 -1.879
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) =681.562 , 987.100
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-mts) =: -1,986.261 -2,910.731
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-mts) =330.613 -985.520
DERIVAS C.M. en X y Y (mm) = 44.084 5.925
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) = -1.39546 -2.04496
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) = 0.23227 -0.69238
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y: 0.026 , 0.002

*****
                DERIVAS LINEALES
                SISMO EN LA DIRECCION X
                LOSA ESTRUCTURA PISO                2
*****
MURO #   ORDENADA   Derv Xcm   Derv Xtr1   Derv Xtr2   Derv tot
          (mts)      (mm)       (mm)       (mm)       (mm)
MX1      5.920        44.084    -1.942     -2.845     42.143
MX2      5.920        44.084    -1.942     -2.845     42.143
MX3      0.080        44.084     6.208     9.097     53.182
MX4      0.080        44.084     6.208     9.097     53.182
    
```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 71. Derivas con método FHE para muro piso 2 con sismo en X en MAMPOS original

```

LOSA ESTRUCTURAL PISO 2
=====
EXCENTRICIDAD EN X (mts)      0.153 -0.447
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)     -1.268 -1.868
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) 681.5 987.2
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-m) -1969.8 -2894.2
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-m) 336.6 -979.7
DERIVAS C.M. en X y Y (mm)      44.08 5.93
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) -1.407 -2.068
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) 0.240 -0.700
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y 0.0262 0.0024

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION X
MURO #   COORD Ycr   Deri. Xcm   Deri. Xtr1   Deri. Xtr2   Deri.
tot.      (mts)       (mm)       (mm)       (mm)
(mm)
1X      5.90        44.08      -1.94      -2.86
44.08
2X      0.10        44.08       6.22       9.14
53.21
3X      5.90        44.08      -1.94      -2.86
44.08
4X      0.10        44.08       6.22       9.14
53.21
    
```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 31. Comparación fuerzas sísmicas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 2 con sismo en X

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MX1	42.143	44.08	-4.49
MX2	42.143	44.08	-4.49
MX3	53.182	53.21	-0.05
MX4	53.182	53.21	-0.05

Nota. Elaboración propia

Ilustración 72. Derivas con método FHE para muro piso 1 con sismo en X en MAMPOS actualizado

```

-----
                LOSA ESTRUCTURAL PISO                                1
-----

EXCENTRICIDAD EN X (mts) =0.150  -0.450
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)  =-1.219  -1.819
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) =742.776 , 1,096.778
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-mts) =: -2,891.892 -4,262.029
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-mts) =494.700 -1,479.500
DERIVAS C.M. en X y Y (mm) = 18.718 3.156
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) = -0.97062 -1.43048
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) = 0.16604 -0.49657
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y: 0.014 , 0.002

*****
                DERIVAS LINEALES
                SISMO EN LA DIRECCION X
                LOSA ESTRUCTURA PISO                                1
*****
MURO #   ORDENADA   Derv Xcm   Derv Xtr1   Derv Xtr2   Derv tot
          (mts)     (mm)      (mm)       (mm)       (mm)
MX1      5.920      18.718    -1.408     -2.075     17.310
MX2      5.920      18.718    -1.408     -2.075     17.310
MX3      0.080      18.718     4.260     6.279     24.997
MX4      0.080      18.718     4.260     6.279     24.997

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 73. Derivas con método FHE para muro piso 1 con sismo en X en MAMPOS original

```

LOSA ESTRUCTURAL PISO 1
=====

EXCENTRICIDAD EN X (mts)          0.152 -0.448
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)          -1.209 -1.809
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN)  742.7 1096.9
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-m) -2867.9-4237.9
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-m) 503.0-1471.4
DERIVAS C.M. en X y Y (mm)        18.72  3.16
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) -0.979 -1.447
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000)  0.172 -0.502
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y     0.0136 0.0016

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION X

MURO #      COORD Ycr      Deri. Xcm      Deri. Xtr1      Deri. Xtr2      Deri.
tot.
(mm)        (mts)          (mm)           (mm)            (mm)
1X          5.90           18.72          -1.41           -2.08
18.72
2X          0.10           18.72           4.27            6.31
25.03
3X          5.90           18.72          -1.41           -2.08
18.72
4X          0.10           18.72           4.27            6.31
25.03

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 32. Comparación fuerzas sísmicas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 1 con sismo en X

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MX1	17.31	18.72	-7.83
MX2	17.31	18.72	-7.83
MX3	24.997	25.03	-0.13
MX4	24.997	25.03	-0.13

Nota. Elaboración propia

Al evaluar los resultados mostrados en las tablas de comparación de fuerzas sísmicas para sismo en X, se tiene que en para todos los muros la mayor diferencia en derivas se presenta en el piso 1; además, en los muros MX1 y MX2 aumenta el porcentaje de diferencia entre los valores calculados con MAMPOS actualizado y MAMPOS original a medida que el piso disminuye, es decir, en el piso 4 se presentan las

menores variaciones en los valores de deriva y éstas variaciones aumentan a medida que se llega al piso 1.

Derivas por piso en los Muros en dirección Y con sismo en Y, MAMPOS Actualizado VS MAMPOS Original

A continuación, se muestran las derivas por muro en cada uno de los pisos que componen la estructura, junto con el porcentaje de diferencia entre los resultados obtenidos con MAMPOS actualizado y MAMPOS original, esto ante la presencia de un sismo en dirección Y.

Ilustración 74. Derivas con método FHE para muro piso 4 con sismo en Y en MAMPOS actualizado

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y LOSA ESTRUCTURA PISO						4

MURO # (mts)	COORD Xcr (mm)	Derv Ycm (mm)	Derv Ytr (mm)	Derv Ytr2 (mm)	Derv tot. (mm)	
MY1	5.930	7.551	0.390	0.000	7.941	
MY2	3.070	7.551	0.008	0.000	7.559	
MY3	0.080	7.551	0.000	1.164	8.715	

Nota. Elaboración propia

Ilustración 75. Derivas con método FHE para muro piso 4 con sismo en Y en MAMPOS original

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y					
MURO # tot.	COORD Xcr (mts)	Deri. Ycm (mm)	Deri. Ytr1 (mm)	Deri. Ytr2 (mm)	Deri. (mm)
1Y	0.10	7.56	-0.40	1.17	
8.72					
2Y	3.10	7.56	0.01	-0.04	
7.57					
3Y	5.90	7.56	0.40	-1.16	
7.96					

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 33. Comparación fuerzas sísmicas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 4 con sismo en Y

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MY1	7.941	7.96	-0.24
MY2	7.559	7.57	-0.15
MY3	8.715	8.72	-0.06

Nota. Elaboración propia

Ilustración 76. Derivas con método FHE para muro piso 3 con sismo en Y en MAMPOS actualizado

```

DERIVAS LINEALES
SISMO EN LA DIRECCION Y
LOSA ESTRUCTURA PISO 3
*****
MURO #   COORD Xcr   Derv Ycm   Derv Ytr   Derv Ytr2   Derv tot.
(mts)    (mm)         (mm)       (mm)       (mm)        (mm)
MY1      5.930       7.291     0.591     0.000       7.882
MY2      3.070       7.291     0.012     0.000       7.303
MY3      0.080       7.291     0.000     1.765       9.056

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 77. Derivas con método FHE para muro piso 3 con sismo en Y en MAMPOS original

```

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y
MURO #   COORD Xcr   Deri. Ycm   Deri. Ytr1   Deri. Ytr2   Deri.
tot.
(mm)     (mts)       (mm)       (mm)       (mm)
1Y       0.10       7.29      -0.61       1.77
9.07
2Y       3.10       7.29       0.02      -0.06
7.31
3Y       5.90       7.29       0.61      -1.76
7.90

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 34. Comparación fuerzas sísmicas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 3 con sismo en Y

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MY1	7.882	7.9	-0.23
MY2	7.303	7.31	-0.10
MY3	9.056	9.07	-0.15

Nota. Elaboración propia

Ilustración 78. Derivas con método FHE para muro piso 2 con sismo en Y en MAMPOS actualizado

```

*****
                DERIVAS LINEALES
                SISMO EN LA DIRECCION Y
                LOSA ESTRUCTURA PISO                                2
*****

MURO #   COORD Xcr   Derv Ycm   Derv Ytr   Derv Ytr2   Derv tot.
  (mts)   (mm)         (mm)       (mm)       (mm)        (mm)
MY1      5.930       5.925     0.678     0.000       6.604
MY2      3.070       5.925     0.014     0.000       5.939
MY3      0.080       5.925     0.000     2.028       7.954
*****

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 79. Derivas con método FHE para muro piso 2 con sismo en Y en MAMPOS original

```

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y

MURO #   COORD Xcr   Deri. Ycm   Deri. Ytr1   Deri. Ytr2   Deri.
tot.
  (mm)   (mts)         (mm)         (mm)         (mm)
1Y      0.10         5.93        -0.70        2.03
7.96
2Y      3.10         5.93         0.02        -0.07
5.95
3Y      5.90         5.93         0.70        -2.03
6.62

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 35. Comparación fuerzas sísmicas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 2 con sismo en Y

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MY1	6.604	6.62	-0.24
MY2	5.939	5.95	-0.19
MY3	7.954	7.96	-0.08

Nota. Elaboración propia

Ilustración 80. Derivas con método FHE para muro piso 1 con sismo en Y en MAMPOS actualizado

```

*****
DERIVAS LINEALES
SISMO EN LA DIRECCION Y
LOSA ESTRUCTURA PISO
*****
1
*****
MURO #   COORD Xcr   Derv Ycm   Derv Ytr   Derv Ytr2   Derv tot.
(mts)    (mm)        (mm)       (mm)       (mm)        (mm)
MY1      5.930       3.156      0.485      0.000       3.641
MY2      3.070       3.156      0.010      0.000       3.166
MY3      0.080       3.156      0.000      1.455       4.611

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 81. Derivas con método FHE para muro piso 1 con sismo en Y en MAMPOS original

```

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y
MURO #   COORD Xcr   Deri. Ycm   Deri. Ytr1   Deri. Ytr2   Deri.
tot.
(mm)
1Y       0.10        3.16        -0.50        1.46
4.62
2Y       3.10        3.16        0.02        -0.05
3.17
3Y       5.90        3.16        0.50        -1.45
3.65

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 36. Comparación fuerzas sísmicas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 1 con sismo en Y

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MY1	3.641	3.65	-0.25
MY2	3.166	3.17	-0.13
MY3	4.611	4.62	-0.19

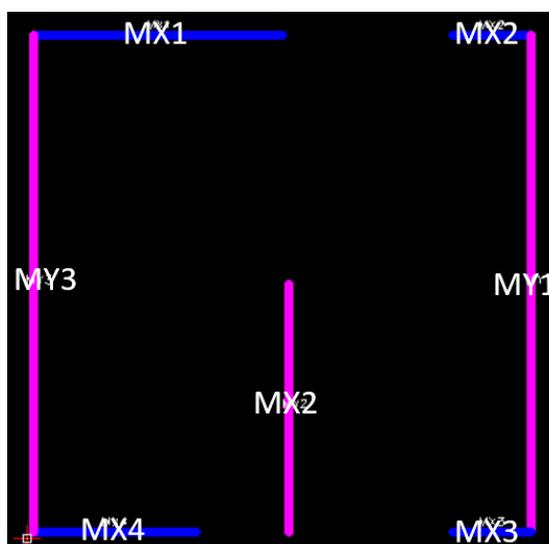
Nota. Elaboración propia

De forma general, en el caso del sismo en Y se cuenta con una variación máxima de derivas de 0.25% y la variación mínima se encuentra en 0.06%, teniendo que MAMPOS original presenta mayores derivas. A diferencia de las derivas presentadas en el sismo en X, para el sismo en Y los porcentajes de diferencia entre MAMPOS actualizado y MAMPOS original en su totalidad son inferiores al 0.3%.

Cortantes y Momentos en los Muros, EXCEL (MANUAL) VS MAMPOS Actualizado

La comprobación de los cortantes, fuerzas laterales y momentos se realizó de forma manual, es decir, los resultados obtenidos en MAMPOS fueron comparados con cálculos realizados en EXCEL.

Ilustración 82. Nomenclatura de muros en MAMPOS



Nota. Elaboración propia

En la ilustración 82 se indica el nombre que MAMPOS le asigna a cada uno de los muros dibujados, ésta nomenclatura depende de la dirección en la que se encuentra el muro, de tal forma que los muros en la dirección X reciben la nomenclatura MX, mientras que los muros en la dirección Y reciben la nomenclatura MY.

Se toma como información base los valores de las fuerzas recibidas por cada muro posicionado en cada una de las direcciones de análisis, para esto se extrae información entregada por VISUAL STUDIO al correr el código programado en MAMPOS.

Ilustración 83. Fuerzas para muros en X

(0, 0)	27.330779375045665
(0, 1)	2.2989898611249195
(0, 2)	4.88152771962741
(0, 3)	36.424357582304026
(1, 0)	71.823742628486173
(1, 1)	2.6546031481098833
(1, 2)	4.0137954457619394
(1, 3)	34.461396250805905
(2, 0)	111.59807270969117
(2, 1)	3.7604542104108516
(2, 2)	4.7377698430122752
(2, 3)	41.772058206715556
(3, 0)	224.87909434221831
(3, 1)	7.2352417518393031
(3, 2)	7.832099551500745
(3, 3)	70.140947820960761

Nota. Extraído de Visual Studio

Ilustración 84. Fuerzas para muros en Y

(0, 0)	41.7116483660829
(0, 1)	17.137464165696677
(0, 2)	81.389245003735141
(1, 0)	87.049011078827334
(1, 1)	12.879217918024402
(1, 2)	125.77220278859784
(2, 0)	131.47971112277705
(2, 1)	17.269947988059453
(2, 2)	163.41051678271074
(3, 0)	207.12196687727825
(3, 1)	26.044608550586265
(3, 2)	227.27833568138439

Nota. Extraído de Visual Studio

La información mostrada anteriormente se almacena en una matriz de tamaño 4x4 para las fuerzas aplicadas a muros en dirección X, mientras que para los muros dispuestos en la dirección Y se emplea una matriz de tamaño 4X3. Para facilitar la comprensión de los valores mostrados en VISUAL STUDIO, se elaboraron las tablas 37 y 38 en las cuales se indica el valor de la fuerza aplicada a cada uno de los muros de la estructura modelada.

Tabla 37. Fuerzas aplicadas a muros en dirección X

Piso	Fuerza (kN)			
	MX1	MX2	MX3	MX4
1	27.331	2.299	4.881	36.424
2	71.824	2.655	4.01	34.462
3	111.598	3.76	4.738	41.772
4	224.879	7.23	7.832	70.141

Nota. Elaboración propia

Tabla 38. Fuerzas aplicadas a muros en dirección Y

Piso	Fuerza (kN)		
	MY1	MY2	MY3
1	41.712	17.137	81.389
2	87.049	12.879	125.772
3	131.479	17.269	163.41
4	207.122	26.045	228.278

Nota. Elaboración propia

Para la realización del chequeo de cortantes y momentos se tomaron como ejemplo los muros MX1, MX3, MY1 y MY2, pero el procedimiento es análogo para todos los muros de la estructura.

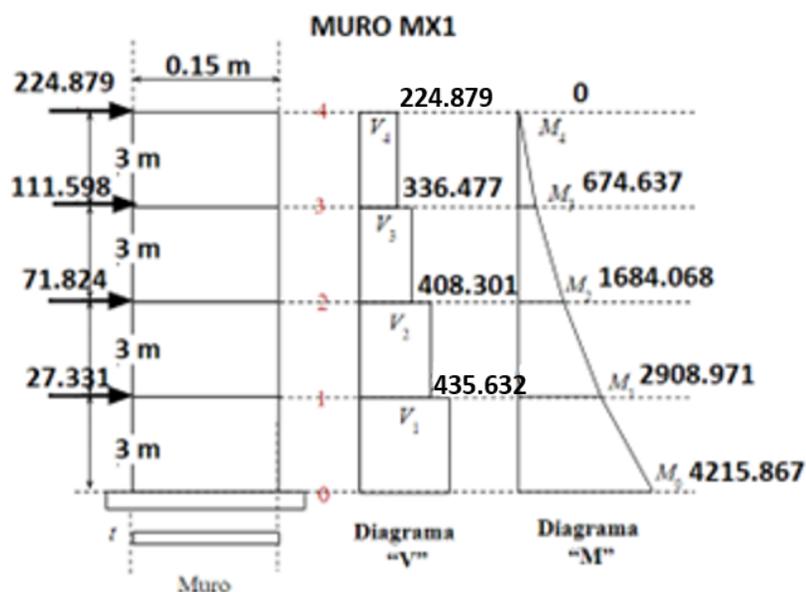
Muro MX1

Tabla 39. Fuerzas, cortantes y momentos para muro MX1 calculados con Excel

Piso	ID Muro	Altura piso (m)	Fuerza (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN*m)
1	MX1	3	27.331	435.632	4215.867
2			71.824	408.301	2908.971
3			111.598	336.477	1684.068
4			224.879	224.879	674.637

Nota. Elaboración propia

Ilustración 85. Distribución fuerzas, cortantes y momentos calculados para muro MX1 con Excel



Nota. Elaboración propia

Tabla 40. Comparación cortantes Excel y MAMPOS para muro MX1

Piso	ID Muro	Cortante Excel (kN)	Cortante MAMPOS (kN)	%diferencia Excel respecto a MAMPOS
1	MX1	435.632	435.6	0.0073
2		408.301	408.3	0.0002
3		336.477	336.5	-0.0068
4		224.879	224.9	-0.0093

Nota. Elaboración propia

Tabla 41. Comparación momentos Excel y MAMPOS para muro MX1

Piso	ID Muro	Momento Excel (kN*m)	Momento MAMPOS (kN*m)	%diferencia Excel respecto a MAMPOS
1	MX1	4215.867	4216	-0.0032
2		2908.971	2909.5	-0.0182
3		1684.068	1683.8	0.0159
4		674.637	674.6	0.0055

Nota. Elaboración propia

De forma general, tanto para los valores de cortantes como para los valores de momentos, se presenta un porcentaje muy bajo de diferencia entre Excel y MAMPOS, por lo que es posible afirmar que los cálculos realizados por MAMPOS son correctos y sus resultados pueden ser usados para el análisis de la estructura.

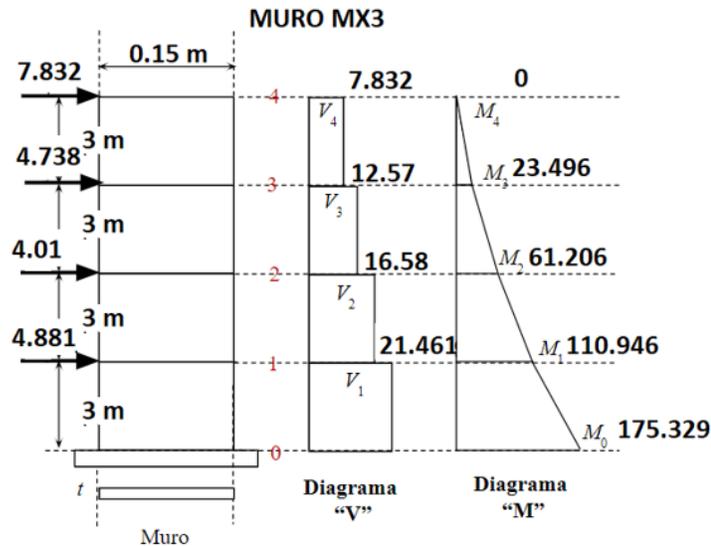
Muro MX3

Tabla 42. Fuerzas, cortantes y momentos para muro MX3 calculados con Excel

Piso	ID Muro	Altura piso (m)	Fuerza (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN*m)
1	MX3	3	4.881	21.461	175.329
2			4.01	16.58	110.946
3			4.738	12.57	61.206
4			7.832	7.832	23.496

Nota. Elaboración propia

Ilustración 86. Distribución fuerzas, cortantes y momentos calculados para muro MX3 con Excel



Nota. Elaboración propia

Tabla 43. Comparación cortantes Excel y MAMPOS para muro MX3

Piso	ID Muro	Cortante Excel (kN)	Cortante MAMPOS (kN)	%diferencia Excel respecto a MAMPOS
1	MX3	21.461	21.5	-0.1816
2		16.58	16.6	-0.1206
3		12.57	12.6	-0.2384
4		7.832	7.8	0.4094

Nota. Elaboración propia

Tabla 44. Comparación momentos Excel y MAMPOS para muro MX3

Piso	ID Muro	Momento Excel (kN*m)	Momento MAMPOS (kN*m)	%diferencia Excel respecto a MAMPOS
1	MX3	175.329	164.7	6.2518
2		110.946	110	0.8563
3		61.206	61.2	0.0098
4		23.496	23.5	-0.0170

Nota. Elaboración propia

De manera semejante, los valores de cortante y momento para el muro MX3 tanto en Excel como en MAMPOS en su mayoría son muy cercanos y la diferencia que existe entre éstos es baja, a excepción del muro posicionado en el piso 1 puesto que éste es el que presenta mayor porcentaje de diferencia entre datos, aun así, esto no afecta la confiabilidad de los resultados obtenidos en MAMPOS.

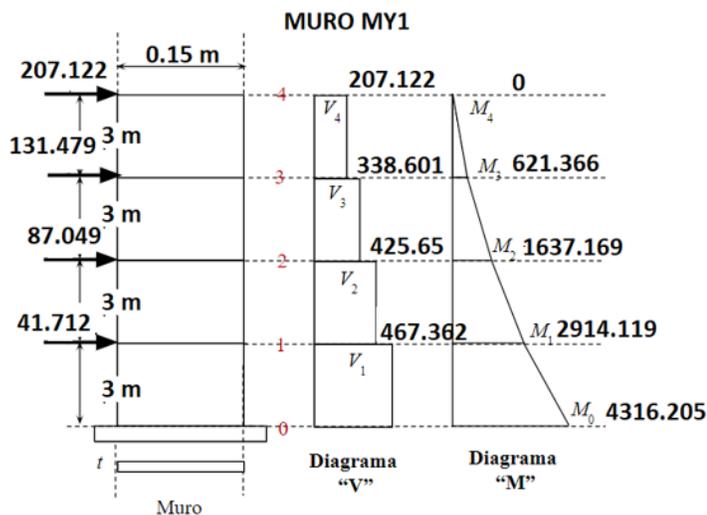
Muro MY1

Tabla 45. Fuerzas, cortantes y momentos para muro MY1 calculados con Excel

Piso	ID Muro	Altura piso (m)	Fuerza (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN*m)
1	MY1	3	41.712	467.362	4316.205
2			87.049	425.65	2914.119
3			131.479	338.601	1637.169
4			207.122	207.122	621.366

Nota. Elaboración propia

Ilustración 87. Distribución fuerzas, cortantes y momentos calculados para muro MY1 con Excel



Nota. Elaboración propia

Tabla 46. Comparación cortantes Excel y MAMPOS para muro MY1

Piso	ID Muro	Cortante Excel (kN)	Cortante MAMPOS (kN)	%diferencia Excel respecto a MAMPOS
1	MY1	467.362	467.4	-0.0081
2		425.65	425.7	-0.0117
3		338.601	338.6	0.0003
4		207.122	207.1	0.0106

Nota. Elaboración propia

Tabla 47. Comparación momentos Excel y MAMPOS para muro MY1

Piso	ID Muro	Momento Excel (kN*m)	Momento MAMPOS (kN*m)	%diferencia Excel respecto a MAMPOS
1	MY1	4316.205	4315.1	0.0256
2		2914.119	2914.1	0.0007
3		1637.169	1637.4	-0.0141
4		621.366	621.4	-0.0055

Nota. Elaboración propia

Los resultados de cortantes y momentos obtenidos en Excel y MAMPOS no presentan variaciones significativas, lo cual se ve reflejado en los bajos porcentajes de diferencia de valores entre ambos programas, por lo cual podemos concluir que los cálculos realizados por MAMPOS son correctos y sus resultados pueden ser usados para el análisis de la estructura.

Muro MY2

Tabla 48. Fuerzas, cortantes y momentos para muro MY2 calculados con Excel

Piso	ID Muro	Altura piso (m)	Fuerza (kN)	Cortante (kN)	Momento (kN*m)
1	MY2	3	17.137	73.33	596.646
2			12.879	56.193	376.656
3			17.269	43.314	208.077
4			26.045	26.045	78.135

Nota. Elaboración propia

Ilustración 88. Distribución fuerzas, cortantes y momentos calculados para muro MY2 con Excel

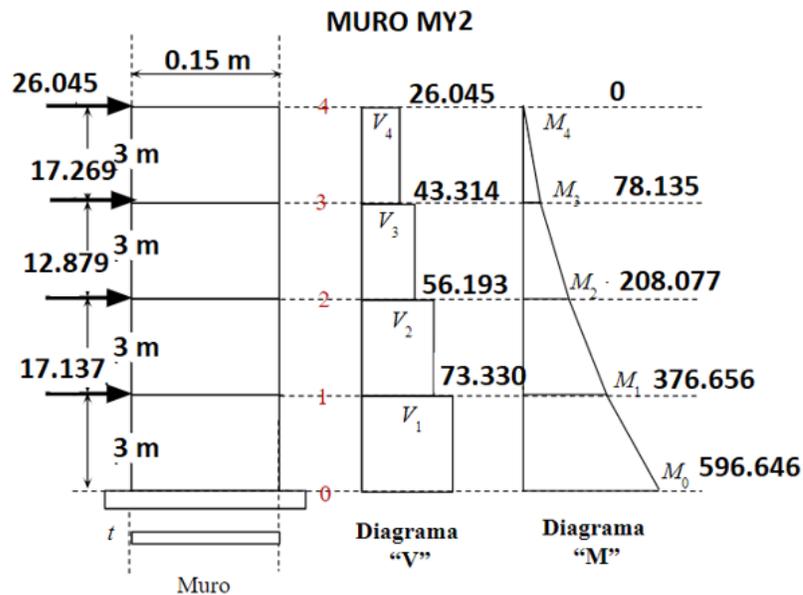


Tabla 49. Comparación cortantes Excel y MAMPOS para muro MY2

Piso	ID Muro	Cortante Excel (kN)	Cortante MAMPOS (kN)	%diferencia Excel respecto a MAMPOS
1	MY2	73.33	73.1	0.3141
2		56.193	56.1	0.1656
3		43.314	43.2	0.2635
4		26.045	26	0.1729

Nota. Elaboración propia

Tabla 50. Comparación momentos Excel y MAMPOS para muro MY2

Piso	ID Muro	Momento Excel (kN*m)	Momento MAMPOS (kN*m)	%diferencia Excel respecto a MAMPOS
1	MY2	596.646	595.9	0.1251
2		376.656	375.4	0.3340
3		208.077	207.7	0.1813
4		78.135	78	0.1729

Nota. Elaboración propia

En el caso del muro MY2, se presentan mayores porcentajes de diferencia entre los valores de cortante y momentos calculados con Excel y MAMPOS, esto a comparación de la mayoría de los porcentajes de diferencia obtenidos en los muros MX1, MX3 y MY1; a pesar de esto, la diferencia de resultados obtenidos sigue siendo considerablemente baja, lo cual es indicativo de la confiabilidad de los cálculos realizados por MAMPOS.

Comparación Derivas Obtenidas con el Método de Análisis Modal

Derivas por piso en los Muros en dirección X con sismo en X, MAMPOS Actualizado VS MAMPOS Original

A continuación, se muestran las derivas por muro en cada uno de los pisos que componen la estructura, junto con el porcentaje de diferencia entre los resultados

obtenidos con MAMPOS actualizado y MAMPOS original, esto ante la presencia de un sismo en dirección X.

Ilustración 89. Derivas para muro piso 4 con sismo en X en MAMPOS actualizado

```

-----
                LOSA ESTRUCTURAL PISO                                4
-----
EXCENTRICIDAD EN X (mts) =0.151 -0.449
EXCENTRICIDAD EN Y (mts) =-1.304 -1.904
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) =299.790 , 420.240
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-mts) =: -390.876 -570.750
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-mts) =63.446 -188.698
DERIVAS C.M. en X y Y (mm) = 61.973 7.233
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) = -0.78825 -1.15099
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) = 0.12795 -0.38053
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y: 0.028 , 0.002

*****
                DERIVAS LINEALES
                SISMO EN LA DIRECCION X
                LOSA ESTRUCTURA PISO                                4
*****
MURO #   ORDENADA   Derv Xcm   Derv Xtr1   Derv Xtr2   Derv tot
          (mts)      (mm)       (mm)       (mm)       (mm)
MX1      5.920      61.973    -1.077     -1.572     60.896
MX2      5.920      61.973    -1.077     -1.572     60.896
MX3      0.080      61.973     3.527     5.149     67.123
MX4      0.080      61.973     3.527     5.149     67.123

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 90. Derivas para muro piso 4 con sismo en X en MAMPOS original

```

LOSA ESTRUCTURAL PISO 4
=====
EXCENTRICIDAD EN X (mts)           0.154 -0.446
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)          -1.293 -1.893
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN)   280.4 390.9
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-m) -362.6 -530.9
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-m)  60.1 -174.4
DERIVAS C.M. en X y Y (mm)         58.01  6.73
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000)  -0.744 -1.090
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000)  0.123 -0.358
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y      0.0279 0.0023

                DERIVAS LINEALES   SISMO EN LA DIRECCION X
MURO #   COORD Ycr   Deri. Xcm   Deri. Xtr1   Deri. Xtr2   Deri.
tot.     (mts)          (mm)       (mm)       (mm)
(mm)
1X       5.90        58.01      -1.01      -1.48
58.01
2X       0.10         58.01       3.31       4.84
62.85
3X       5.90        58.01      -1.01      -1.48
58.01
4X       0.10         58.01       3.31       4.84
62.85

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 51. Comparación derivas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 4 con sismo en X

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS
MX1	60.896	58.01	4.85
MX2	60.896	58.01	4.85
MX3	67.123	62.85	6.58
MX4	67.123	62.85	6.58

Nota. Elaboración propia

En general, se observa que la diferencia de derivas entre ambos programas es amplia puesto que supera el 4%, esto debido a que la magnitud de las fuerzas en MAMPOS actualizado es mayor que las calculadas en MAMPOS original.

Ilustración 91. Derivas para muro piso 3 con sismo en X en MAMPOS actualizado

```

-----
                LOSA ESTRUCTURAL PISO                                3
-----

EXCENTRICIDAD EN X (mts) =0.151 -0.449
EXCENTRICIDAD EN Y (mts) =-1.294 -1.894
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) =448.761 , 668.258
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-mts) =: -971.406 -1,420.537
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-mts) =164.219 -488.880
DERIVAS C.M. en X y Y (mm) = 48.886 6.346
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) = -1.08040 -1.57992
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) = 0.18264 -0.54373
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y: 0.029 , 0.003

*****
                DERIVAS LINEALES
                SISMO EN LA DIRECCION X
                LOSA ESTRUCTURA PISO                                3
*****
MURO #   ORDENADA   Derv Xcm   Derv Xtr1   Derv Xtr2   Derv tot
          (mts)      (mm)      (mm)      (mm)      (mm)
MX1      5.920       48.886   -1.487    -2.175    47.399
MX2      5.920       48.886   -1.487    -2.175    47.399
MX3      0.080       48.886    4.822     7.052    55.938
MX4      0.080       48.886    4.822     7.052    55.938

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 92. Derivas para muro piso 3 con sismo en X en MAMPOS original

```

=====
LOS A ESTRUCTURAL PISO 3
=====
EXCENTRICIDAD EN X (mts)          0.154 -0.446
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)          -1.283 -1.883
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN)  419.7  621.5
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-m) -901.2-1321.3
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-m)  155.6 -451.9
DERIVAS C.M. en X y Y (mm)        45.74  5.90
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) -1.020 -1.495
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000)  0.176 -0.511
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y     0.0294 0.002

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION X

MURO #      COORD Ycr      Deri. Xcm      Deri. Xtr1      Deri. Xtr2      Deri.
tot.
(mm)
1X          5.90           45.74          -1.39           -2.04
45.74
2X          0.10           45.74           4.52           6.63
52.37
3X          5.90           45.74          -1.39           -2.04
45.74
4X          0.10           45.74           4.52           6.63
52.37

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 52. Comparación derivas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 3 con sismo en X

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MX1	47.399	45.74	3.56
MX2	47.399	45.74	3.56
MX3	55.938	52.37	6.59
MX4	55.938	52.37	6.59

Nota. Elaboración propia

Al igual que las derivas presentadas para el piso 4, los porcentajes de diferencia entre derivas de MAMPOS actualizado y MAMPOS original son significativos debido a la diferencia de la magnitud de las fuerzas con las que cada programa trabaja, siendo MAMPOS actualizado el software que emplea fuerzas mayores.

Ilustración 93. Derivas para muro piso 2 con sismo en X en MAMPOS actualizado

```

-----
                LOSA ESTRUCTURAL PISO                2
-----
EXCENTRICIDAD EN X (mts) =0.151 -0.449
EXCENTRICIDAD EN Y (mts) =-1.279 -1.879
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) =547.131 , 816.224
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-mts) =: -1,671.021 -2,448.431
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-mts) =287.098 -855.735
DERIVAS C.M. en X y Y (mm) = 35.389 4.899
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) = -1.17399 -1.72016
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) = 0.20170 -0.60120
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y: 0.026 , 0.002

*****
                DERIVAS LINEALES
                SISMO EN LA DIRECCION X
                LOSA ESTRUCTURA PISO                2
*****
MURO #   ORDENADA   Derv Xcm   Derv Xtr1
          (mts)      (mm)       (mm)       Derv Xtr2   Derv tot
          (mm)
MX1      5.920      35.389    -1.633     -2.393      33.756
MX2      5.920      35.389    -1.633     -2.393      33.756
MX3      0.080      35.389     5.223      7.652      43.042
MX4      0.080      35.389     5.223      7.652      43.042

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 94. Derivas para muro piso 2 con sismo en X en MAMPOS original

```

LOSA ESTRUCTURAL PISO 2
=====
EXCENTRICIDAD EN X (mts)      0.153 -0.447
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)     -1.268 -1.868
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) 511.7 759.1
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-m) -1550.1 -2277.3
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-m) 271.8 -791.1
DERIVAS C.M. en X y Y (mm)    33.10 4.56
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) -1.108 -1.627
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) 0.194 -0.565
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y 0.0262 0.0024

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION X

MURO #   COORD Ycr   Deri. Xcm   Deri. Xtr1   Deri. Xtr2   Deri. .
tot.
          (mts)      (mm)       (mm)       (mm)
(mm)
1X      5.90         33.10      -1.53       -2.25
33.10
2X      0.10         33.10       4.89       7.19
40.29
3X      5.90         33.10      -1.53       -2.25
33.10
4X      0.10         33.10       4.89       7.19
40.29

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 53. Comparación derivas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 2 con sismo en X

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MX1	33.756	33.1	1.96
MX2	33.756	33.1	1.96
MX3	43.042	40.29	6.60
MX4	43.042	40.29	6.60

Nota. Elaboración propia

En este caso se observa la disminución del porcentaje de diferencia entre derivas de MAMPOS actualizado y MAMPOS original para los muros MX1 y MX2, aunque se conserva el porcentaje de diferencia para los muros MX3 y MX4, esto con respecto a los resultados mostrados para los pisos 3 y 4.

Ilustración 95. Derivas para muro piso 1 con sismo en X en MAMPOS actualizado

```

-----
                LOSA ESTRUCTURAL PISO                                1
-----
EXCENTRICIDAD EN X (mts) =0.150 -0.450
EXCENTRICIDAD EN Y (mts) =-1.219 -1.819
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN) =594.219 , 877.419
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-mts) =: -2,395.524 -3,529.465
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-mts) =418.366 -1,250.918
DERIVAS C.M. en X y Y (mm) = 14.974 2.525
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000) = -0.80402 -1.18461
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000) = 0.14042 -0.41985
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y: 0.014 , 0.002

*****
                DERIVAS LINEALES
                SISMO EN LA DIRECCION X
                LOSA ESTRUCTURA PISO                                1
*****
MURO #   ORDENADA   Derv Xcm   Derv Xtr1   Derv Xtr2   Derv tot
                (mts)   (mm)       (mm)       (mm)       (mm)
MX1      5.920        14.974    -1.166     -1.719     13.808
MX2      5.920        14.974    -1.166     -1.719     13.808
MX3      0.080         14.974     3.529     5.200     20.174
MX4      0.080         14.974     3.529     5.200     20.174

```

Nota. Elaboración propia

Ilustración 96. Derivas para muro piso 1 con sismo en X en MAMPOS original

```

LOSA ESTRUCTURAL PISO 1
=====
EXCENTRICIDAD EN X (mts)          0.152 -0.448
EXCENTRICIDAD EN Y (mts)          -1.209 -1.809
CORTANTES SISMICOS EN X y Y (KN)  555.8  816.0
TORSORES DE PISO FUERZA EN X (KN-m) -2222.2 -3282.8
TORSORES DE PISO FUERZA EN Y (KN-m)  395.6 -1157.0
DERIVAS C.M. en X y Y (mm)        14.01  2.35
GIROS LOSA FUERZA EN X (rad*1000)  -0.759 -1.121
GIROS LOSA FUERZA EN Y (rad*1000)   0.135 -0.395
INDICE DE ESTABILIDAD EN X y Y      0.0136 0.0016

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION X

MURO #      COORD Xcr   Deri. Xcm   Deri. Xtr1   Deri. Xtr2   Deri.
tot.
(mm)        (mts)       (mm)        (mm)         (mm)
1X          5.90        14.01       -1.09        -1.61
14.01
2X          0.10        14.01        3.31         4.89
18.89
3X          5.90        14.01       -1.09        -1.61
14.01
4X          0.10        14.01        3.31         4.89
18.89

```

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 54. Comparación derivas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 1 con sismo en X

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MX1	13.808	14.01	-1.45
MX2	13.808	14.01	-1.45
MX3	20.174	18.89	6.57
MX4	20.174	18.89	6.57

Nota. Elaboración propia

Como se mencionó en el análisis realizado para el piso 2, en el piso 2 los muros MX3 y MX4 continúan con la tendencia de aumento de deriva total en MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original; en este caso, los muros MX1 y MX2 presentan mayor deriva en MAMPOS original, caso contrario a lo mostrado en los pisos 2, 3 y 4.

Derivas por piso en los Muros en dirección Y con sismo en Y, MAMPOS Actualizado VS MAMPOS Original

A continuación, se muestran las derivas por muro en cada uno de los pisos que componen la estructura, junto con el porcentaje de diferencia entre los resultados obtenidos con MAMPOS actualizado y MAMPOS original, esto ante la presencia de un sismo en dirección Y.

Ilustración 97. Derivas para muro piso 4 con sismo en Y en MAMPOS actualizado

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y LOSA ESTRUCTURA PISO 4					

MURO # (mts)	COORD Xcr (mm)	Derv Ycm (mm)	Derv Ytr (mm)	Derv Ytr2 (mm)	Derv tot. (mm)
MY1	5.930	7.233	0.374	0.000	7.607
MY2	3.070	7.233	0.008	0.000	7.241
MY3	0.080	7.233	0.000	1.115	8.348

Nota. Elaboración propia

Ilustración 98. Derivas para muro piso 4 con sismo en Y en MAMPOS original

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y					
MURO # tot.	COORD Xcr (mts)	Deri. Ycm (mm)	Deri. Ytr1 (mm)	Deri. Ytr2 (mm)	Deri. (mm)
1Y 7.77	0.10	6.73	-0.36	1.04	
2Y 6.74	3.10	6.73	0.01	-0.03	
3Y 7.09	5.90	6.73	0.36	-1.04	

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 55. Comparación derivas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 4 con sismo en Y

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MY1	7.607	7.09	7.04
MY2	7.241	6.74	7.17
MY3	8.348	7.77	7.17

Nota. Elaboración propia

Ilustración 99. Derivas para muro piso 3 con sismo en Y en MAMPOS actualizado

DERIVAS LINEALES						
SISMO EN LA DIRECCION Y						
LOSA ESTRUCTURA PISO 3						

MURO #	COORD Xcr	Derv Ycm	Derv Ytr	Derv Ytr2	Derv tot.	
(mts)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
MY1	5.930	6.346	0.533	0.000	6.880	
MY2	3.070	6.346	0.011	0.000	6.357	
MY3	0.080	6.346	0.000	1.593	7.939	

Nota. Elaboración propia

Ilustración 100. Derivas para muro piso 3 con sismo en Y en MAMPOS original

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y					
MURO #	COORD Xcr	Deri. Ycm	Deri. Ytr1	Deri. Ytr2	Deri. tot.
(mm)	(mts)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1Y	0.10	5.90	-0.51	1.49	7.39
2Y	3.10	5.90	0.02	-0.05	5.92
3Y	5.90	5.90	0.51	-1.48	6.41

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 56. Comparación derivas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 3 con sismo en Y

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MY1	6.88	6.41	7.07
MY2	6.357	5.92	7.12
MY3	7.939	7.39	7.16

Nota. Elaboración propia

Ilustración 101. Derivas para muro piso 2 con sismo en Y en MAMPOS actualizado

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y LOSA ESTRUCTURA PISO 2					

MURO # (mts)	COORD Xcr (mm)	Derv Ycm (mm)	Derv Ytr (mm)	Derv Ytr2 (mm)	Derv tot. (mm)
MY1	5.930	4.899	0.589	0.000	5.489
MY2	3.070	4.899	0.012	0.000	4.912
MY3	0.080	4.899	0.000	1.761	6.661

Nota. Elaboración propia

Ilustración 102. Derivas para muro piso 2 con sismo en Y en MAMPOS original

DERIVAS <u>LINEALES</u> <u>SISMO</u> EN LA DIRECCION Y					
MURO # <u>tot.</u>	COORD <u>Xcr</u> (mts)	<u>Deri. Ycm</u> (mm)	<u>Deri. Ytr1</u> (mm)	<u>Deri. Ytr2</u> (mm)	<u>Deri.</u>
(mm)					
1Y	0.10	4.56	-0.56	1.64	
6.20					
2Y	3.10	4.56	0.02	-0.05	
4.57					
3Y	5.90	4.56	0.56	-1.64	
5.12					

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 57. Comparación derivas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 2 con sismo en Y

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MY1	5.489	5.12	6.96
MY2	4.912	4.57	7.21
MY3	6.661	6.2	7.17

Nota. Elaboración propia

Ilustración 103. Derivas para muro piso 1 con sismo en Y en MAMPOS actualizado

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y LOSA ESTRUCTURA PISO						1

MURO #	COORD Xcr	Derv Ycm	Derv Ytr	Derv Ytr2	Derv tot.	
(mts)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	
MY1	5.930	2.525	0.410	0.000	2.935	
MY2	3.070	2.525	0.008	0.000	2.533	
MY3	0.080	2.525	0.000	1.230	3.755	

Nota. Elaboración propia

Ilustración 104. Derivas para muro piso 1 con sismo en Y en MAMPOS original

DERIVAS LINEALES SISMO EN LA DIRECCION Y					
MURO #	COORD Xcr	Deri. Ycm	Deri. Ytr1	Deri. Ytr2	Deri. tot.
(mm)	(mts)	(mm)	(mm)	(mm)	
1Y	0.10	2.35	-0.39	1.15	3.50
2Y	3.10	2.35	0.01	-0.04	2.36
3Y	5.90	2.35	0.39	-1.14	2.74

Nota. Tomado de resultados de MAMPOS original

Tabla 58. Comparación derivas MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original en piso 1 con sismo en Y

ID Muro	Deriva total MAMPOS actualizado (mm)	Deriva total MAMPOS original (mm)	%diferencia MAMPOS actualizado respecto a MAMPOS original
MY1	2.935	2.74	6.87
MY2	2.533	2.36	7.07
MY3	3.755	3.5	7.03

Nota. Elaboración propia

En este caso se observa que, de forma general para todos los pisos, las derivas en MAMPOS actualizado son mayores a las derivas obtenidas con MAMPOS original con un porcentaje alrededor del 7%, lo cual representa un porcentaje bajo.

III. MANUAL Y ESTRUCTURA DEL PROGRAMA



A. Estructura del programa



B. Menú Principal



1. **NUEVO PROYECTO:** permite iniciar un proyecto desde cero.
2. **ABRIR PROYECTO:** si existe previamente un proyecto realizado con el programa y se haya guardado, se puede abrir para continuar trabajando sobre él.
3. **CERRAR:** cierra la ventana de menú principal y finaliza el programa.
4. Minimiza la ventana.
5. Expande la ventana hasta cubrir la pantalla.
6. Cierra el programa.

C. Nuevo Proyecto

DATOS_GENERALES

N° DE NPISOS 1

ESPESOR DE MUROS (m) 2 3

¿LOS PISOS TIENEN LA MISMA ALTURA? SI NO

ALTURA DE NPISOS (m)

SELECCIONAR MATERIAL

	MODULO DE ELASTICIDAD (kPa)	PESO ESPECÍFICO (kN/m ³)
MAMPOSTERÍA (M)	4000000	18
CONCRETO (C)	21000000	24

PESO PROPIO MUROS ESTRUCTURALES (ME)

SI CONSIDERAR Este peso propio se adiciona a la carga muerta

NO CONSIDERAR

5 DATOS GENERALES DE CARGAS Y PISOS

	LOSA PISO	ALTURA_PISO (m)	CARGA MUERTA (kn/m ²)	CARGA VIVA (Kn/M ²)	L PARA EXC DIR x (m)	L PARA EXC DIR y (m)
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

6

TIPO DE SUELO

Aa 0.25

Av 0.2

C. importancia 1

7 ESTRUCTURA IRREGULAR

ESTRUCTURA REGULAR

8 CORREGIR AUTOMATICAMENTE EL CORTANTE BASAL

NO CORREGIR EL CORTANTE BASAL

9 ANALISIS MODAL

ANALISIS F.H.E

10 ACEPTAR

1. **N° DE PISOS:** se digita la cantidad de pisos que tiene el proyecto al cual se va a analizar.
2. **ESPESOR DE MUROS:** se digita un espesor general para todos los muros, nota: este espesor se puede modificar más adelante para cada muro.

3. **¿LOS PISOS TIENEN LA MISMA ALTURA?** Si se chulea la opción “si” se activará una casilla especial para introducir la altura, que automáticamente se visualizará en la tabla.
4. **SELECCIÓN DEL MATERIAL:** Se escoge el material para los muros, ya sea concreto o mampostería (ladrillo), inicialmente viene definidos los materiales con los valores de módulo de elasticidad, pero si se tienen módulos diferentes se pueden modificar, de igual manera se puede hacer para los pesos específicos y si se debe considerar el peso propio o no.
5. **DATOS GENERALES DE CARGA Y PISOS:** una tabla para digitar los valores de cargas y longitudes de excentricidades que presenta el proyecto.
6. **DATOS PARA EL ESPECTRO:** el tipo de suelo, según la región varía desde A hasta F, se debe también digitar el valor de Aa (aceleración horizontal), Av (velocidad horizontal) y el Coeficiente de importancia. Para más información consulte: **TITULO A, NSR-10**
7. **ESTRUCTURA:** Se determina si el perímetro de la losa tiene forma regular o irregular.
8. **CORRECCIÓN:** si se debe hacer una corrección en las fuerzas para realizar el análisis estructural (se hace la corrección automáticamente) de lo contrario se debe seleccionar la opción de **NO CORREGIR EL CORTANTE BASAL**.
9. **ANÁLISIS:** se debe seleccionar con cual método se analiza la estructura, ya sea **MODAL** o **FUERZA HORIZONTAL EQUIVALENTE**.
10. **ACEPTAR:** después de llenar los campos de Datos generales, se debe aceptar para continuar el proyecto.

D. Ejemplo Llenado Datos Generales

DATOS_GENERALES

N° DE NPISOS

SELECCIONAR MATERIAL

ESPESOR DE MUROS (m)

MODULO DE ELASTICIDAD (kPa)

PESO ESPECÍFICO (kN/m3)

MAMPOSTERÍA (M)

CONCRETO (C)

24

¿LOS PISOS TIENEN LA MISMA ALTURA? SI NO

ALTURA DE NPISOS (m)

PESO PROPIO MUROS ESTRUCTURALES (ME)

SI CONSIDERAR NO CONSIDERAR

Este peso propio se adiciona a la carga muerta

DATOS GENERALES DE CARGAS Y PISOS

	LOSA PISO	ALTURA_PISO (m)	CARGA MUERTA (kn/m2)	CARGA VIVA (Kn/M2)	L PARA EXC DIR x (m)	L PARA EXC DIR y (m)
	1	3	10	10	6	6
	2	3	10	10	6	6
	3	3	10	10	6	6
▶	4	3	10	10	6	6

TIPO DE SUELO

Aa

Av

C. importancia

ESTRUCTURA IRREGULAR ESTRUCTURA REGULAR

ANALISIS MODAL ANALISIS F.H.E

CORREGIR AUTOMATICAMENTE EL CORTANTE BASAL NO CORREGIR EL CORTANTE BASAL

ACEPTAR

Se construye la ventana de **DATOS GENERALES** con la información del proyecto.

E. Área de dibujo



1. **BARRA DE HERRAMIENTAS:** Se encuentran todas las herramientas para dibujar los muros y losas de piso, guardar proyecto y abrir un proyecto existente y finalmente las opciones para realizar el análisis de la estructura. Entre esas herramientas están:

1.1. GENERALES

- **DATOS GENERALES:** regresa a la ventana de datos generales, por si se debe hacer alguna corrección.
- **PLANTILLA MUROS** permite importar una plantilla en formato DXF o DWG de AutoCAD para los muros, también permite eliminar dicha plantilla después de ser usada. **NOTA: EL DIBUJO DEBE ESTAR GUARDADO EN UN ARCHIVO DE AUTOCAD VERSIÓN 2013 O ANTERIOR.**
- **PLANTILLA LOSA:** permite importar una plantilla en formato DXF o DWG de AutoCAD para las losas haciendo individualmente para cada piso, también permite eliminar dicha plantilla después de ser usada. **Nota: el dibujo debe estar guardado en un archivo de AutoCAD versión 2013 o anterior.**
- **GUARDAR:** guarda el archivo de dibujo como también la información de DATOS GENERALES.

- **ABRIR ARCHIVO:** permite abrir un archivo ya guardado con anterioridad para seguir trabajando sobre él.

1.2. MODELAR/DIBUJAR

- **MUROS:** permite dibujar los muros de manera ortogonal, en la ventana de MUROS. Nota: en las ventanas de pisos no se permite dibujar los muros.
- **DIBUJAR LOSA:** dibuja la losa de manera autónoma para cada piso, no permite dibujar en la ventana MUROS.
- **DIBUJAR VACÍOS:** dibuja los vacíos de manera autónoma para cada piso, no permite dibujar en la ventana MUROS.

1.3. CÁLCULOS

- **LEER GEOMETRÍA:** toma toda la información de los elementos dibujados en la zona de trabajo y la ubica numéricamente en la tabla 6.
- **ANÁLISIS:** realiza el análisis según lo especificado en el menú DATOS GENERALES y ubica parte de la información en la tabla 6.

1.4. RESULTADOS

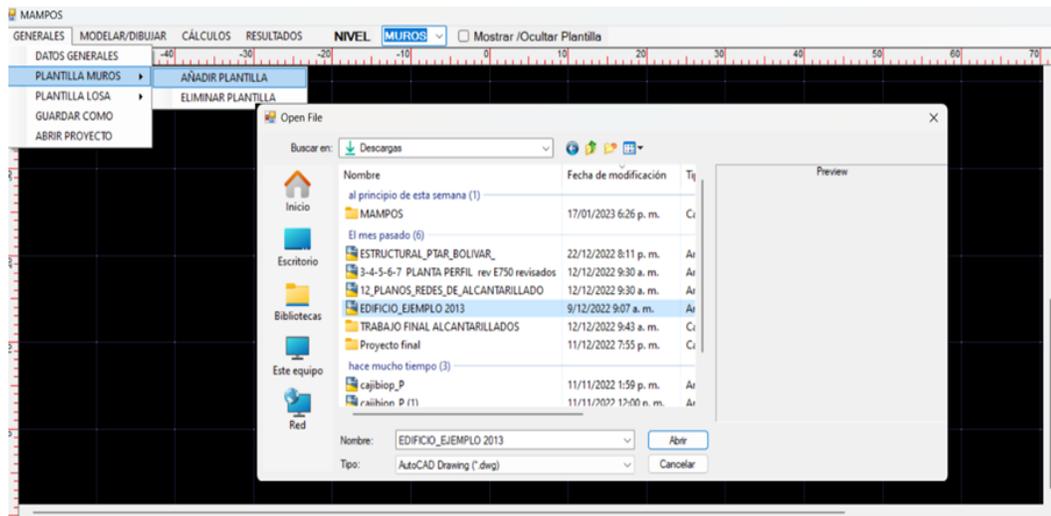
- **ANÁLISIS MODAL:** muestra un documento tipo TXT con los resultados obtenidos en el análisis modal.
- **RESULTADOS FUERZAS Y DERIVAS:** muestra un documento tipo TXT con los resultados del Análisis Estructural.
- **CORRECCIÓN DE CORTANTE DINÁMICA:** muestra los resultados con la corrección cuando se emplea análisis Modal.
- **RIGIDEZ DE PISO:** devuelve una ventana con la rigidez total por piso en dirección X e Y.
- **ESPECTRO:** abre una ventana que muestra el diagrama del espectro con los valores obtenidos.
- **PESO PROPIO MURO:** abre una ventana que muestra una tabla con los pesos propios por piso de la estructura. Nota: si no se considera el peso propio de la estructura, esta tabla muestra valores en cero.

2. **NIVEL:** Muestra las ventanas de muros y pisos individualmente para trabajar sobre cada uno de los pisos de manera independiente. Si no se quieren

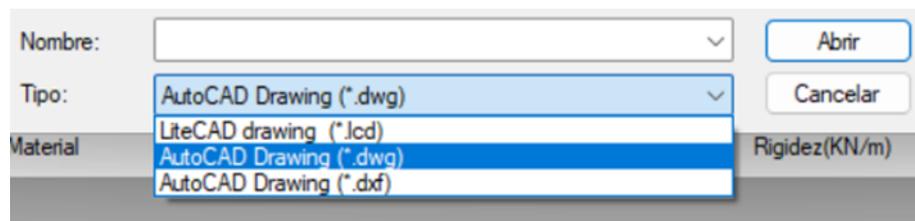
eliminar las plantillas, se pueden ocultar con la opción que se encuentra al lado derecho de la cinta de NIVELES.

3. **ZONA DE TRABAJO:** Área donde se puede dibujar los muros o losas dependiendo del NIVEL donde se encuentre.
4. **BARRA GENERAL:** Muestra todas las características de los elementos dibujados en la zona de trabajo, incluyendo la capa, las coordenadas de ubicación, longitud, etc.
5. **TABLAS MUROS:** presenta los datos de los muros y algunas propiedades de los análisis realizados, tanto en dirección X como en dirección Y.

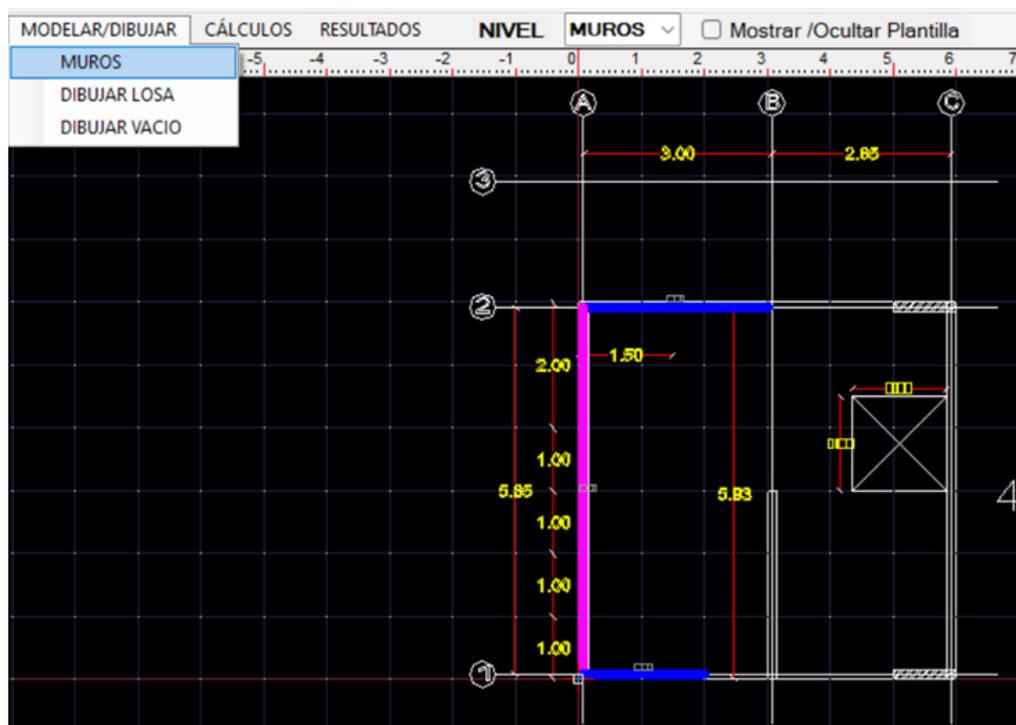
Ejemplo Dibujo De Estructura Del Proyecto



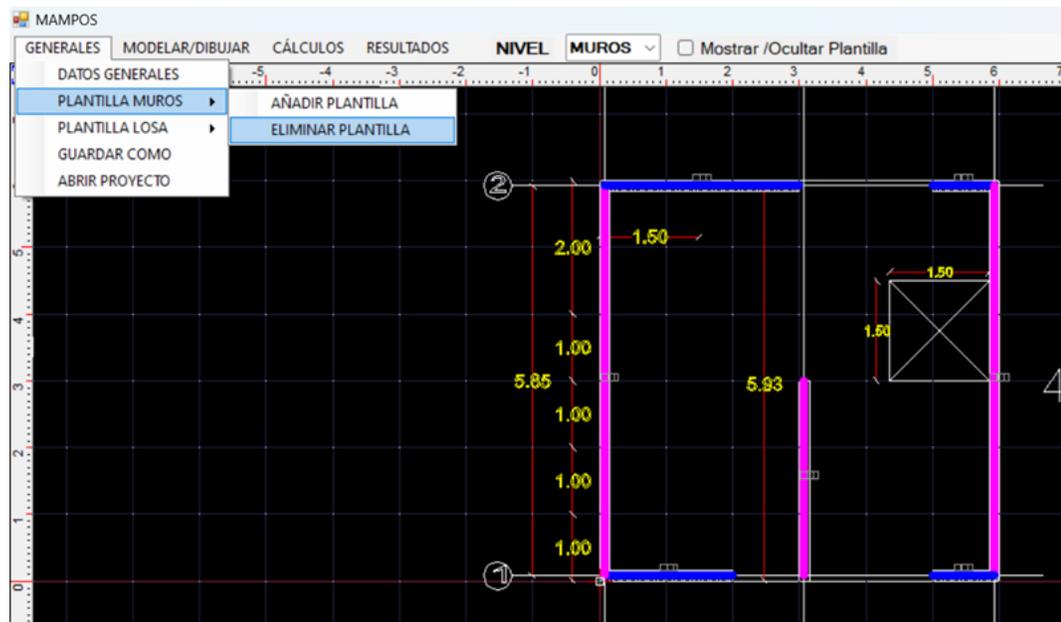
Se obtiene una plantilla para empezar a realizar el trazado de la estructura, iniciando por los muros. Nota: la versión de AutoCAD debe ser 2013 o menor para que MAMPOS lo reconozca.



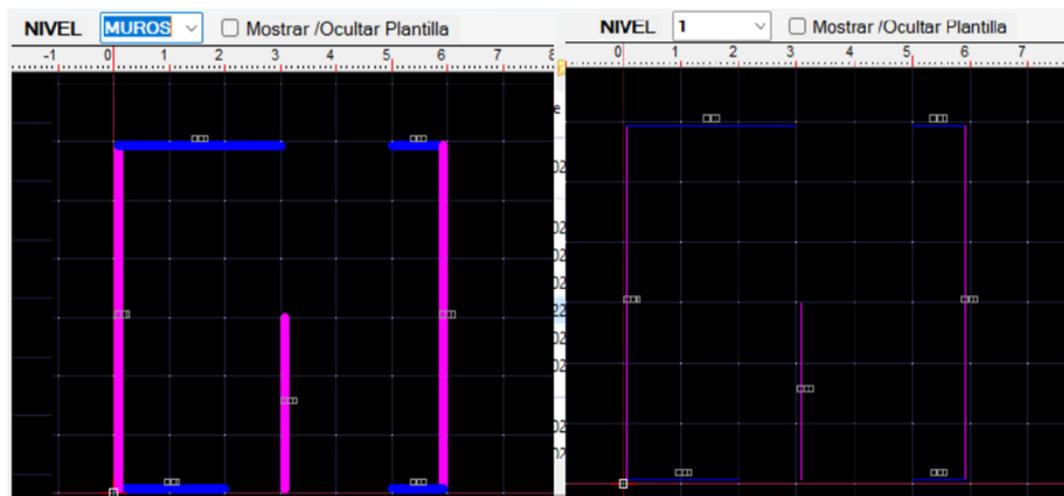
Existen tres tipos de archivos que acepta MAMPOS, archivos creados en LiteCAD, AutoCAD en formato DWG y DXF.



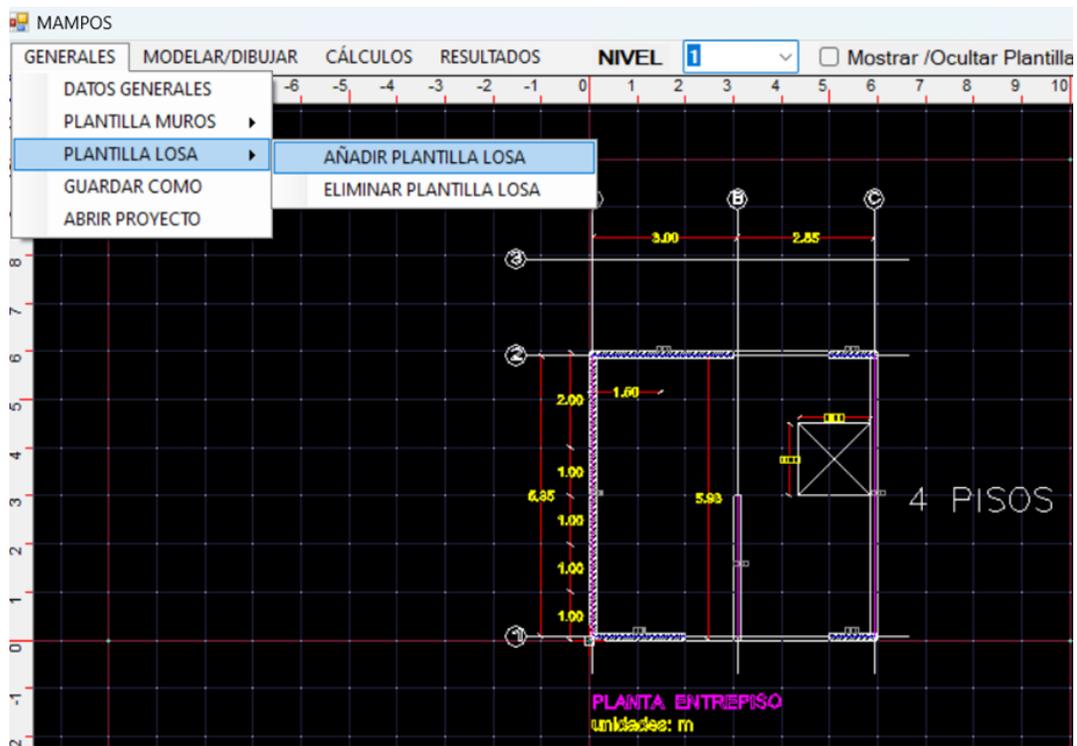
Ya con la plantilla ubicada en la zona de trabajo, en la opción **MODELAR/DIBUJAR** y seleccionando “MUROS” en la sección **NIVEL**, se procede a dibujar los muros, automáticamente se activará el rastreo ortogonal.



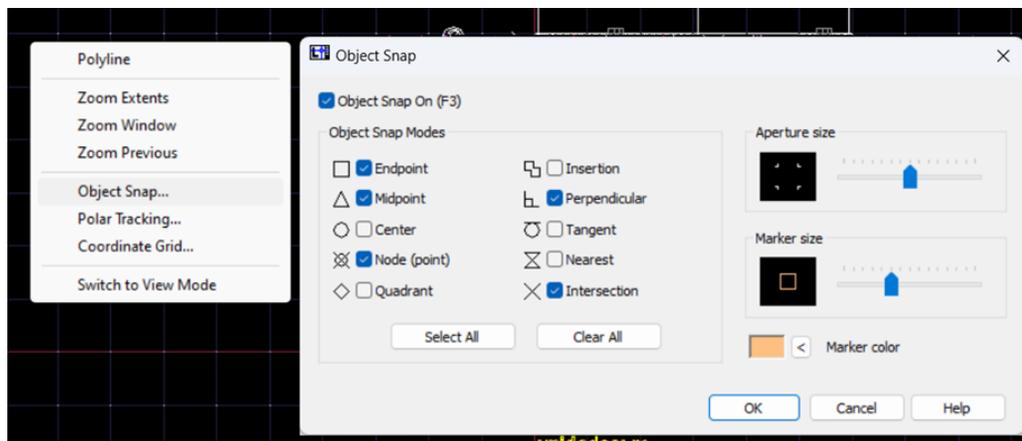
Después de emplear la plantilla, puede ser eliminada para no generar problemas a futuro o también puede ocultarse con la opción Mostrar/Ocultar plantilla. Los muros en la dirección X aparecerán en color azul y los muros en dirección Y aparecerán en color rosado.



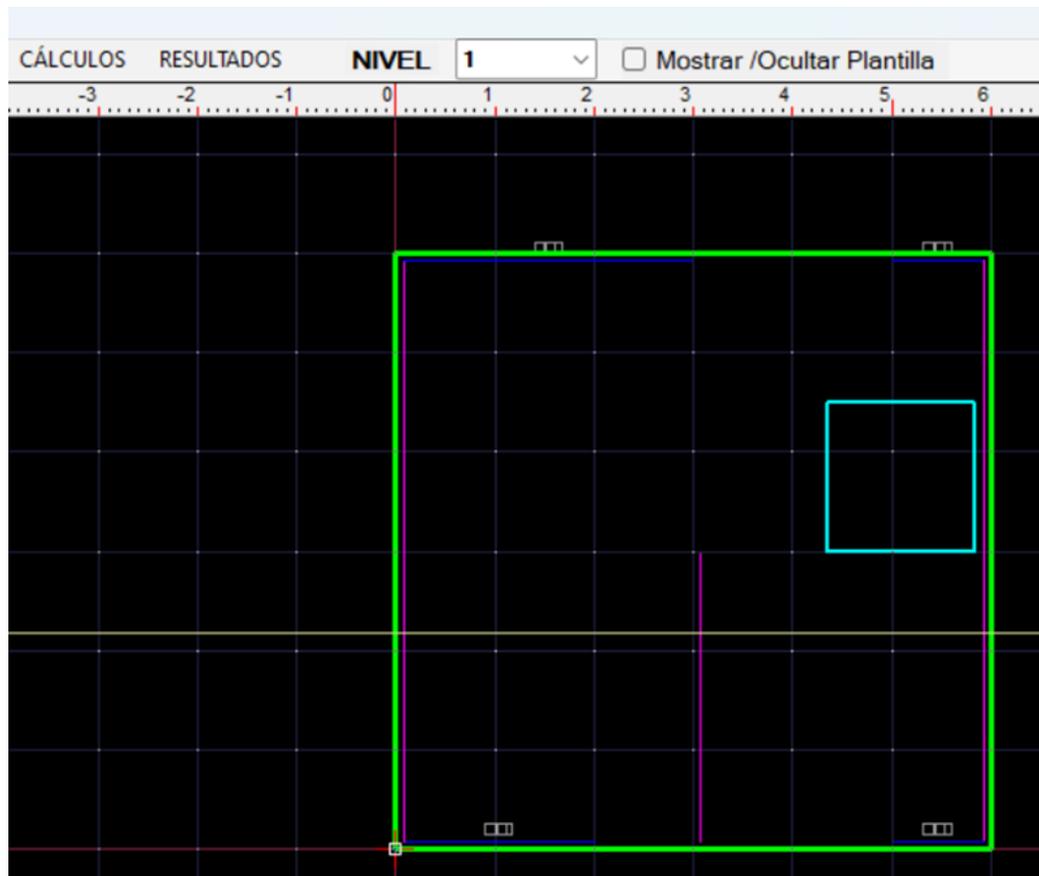
En el Nivel “MUROS” se visualizan los muros con espesor y con un color vivo, mientras que en los niveles de pisos, se observan los muros en color más opaco y con espesor pequeño; además, en los niveles pisos no es posible realizar modificaciones a los muros.



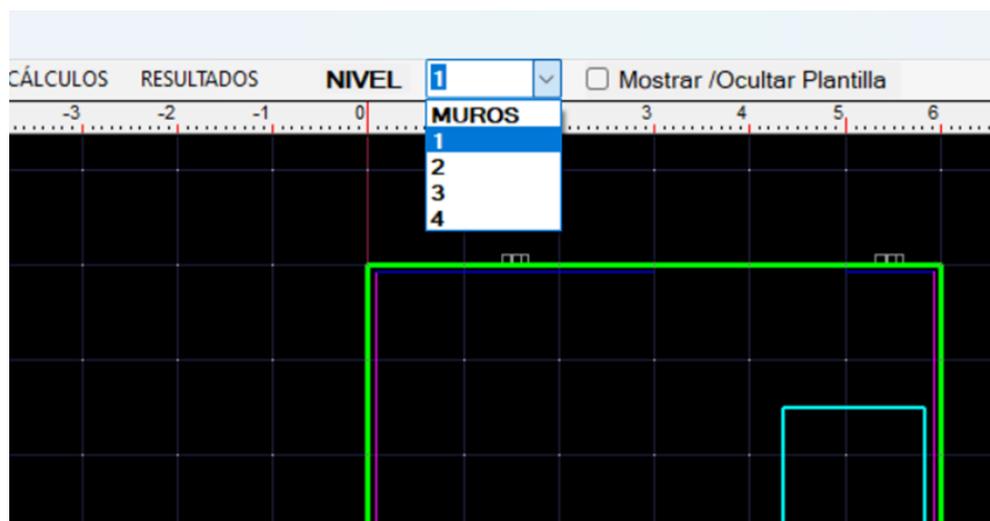
De igual manera, en los niveles de pisos (1,2, 3,...,n) es posible poner la plantilla para copiar el contorno de la losa de pisos y vacíos, se dibujan con las opciones MODELAR/DIBUJAR, junto con las opciones DIBUJAR LOSA y DIBUJAR VACÍOS.



Para activar, las opciones de cursor se da clic derecho y Object Snap y se seleccionan las opciones de puntos que se deseen mostrar.



Se dibujan las losas, las cuales serán color verde y los vacíos presentes en la estructura, que serán de color azul claro, este proceso se debe realizar en cada uno de los pisos.



Para cambiar de piso, se debe llevar el cursor hasta la flecha y desplegar el menú de pisos, posteriormente se debe seleccionar el piso deseado.

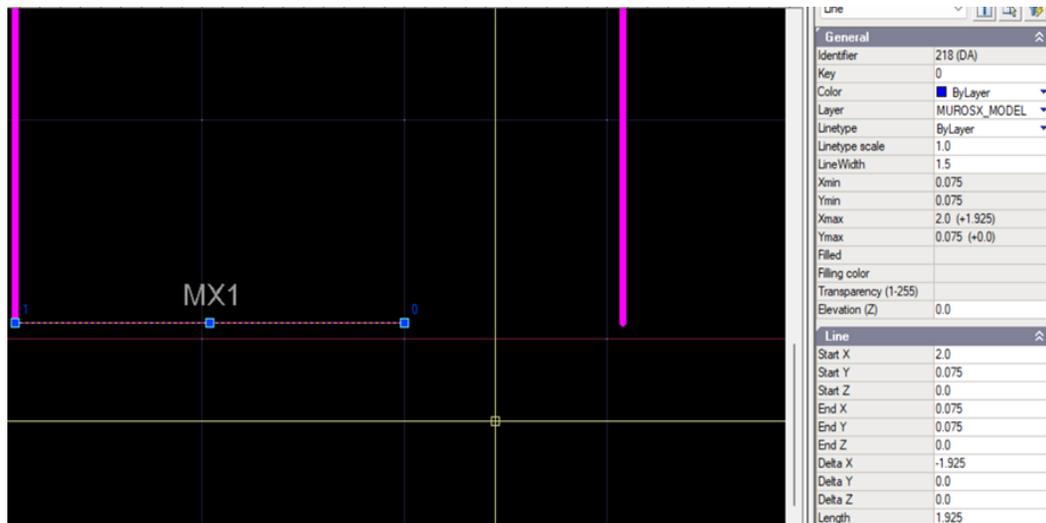


Después de realizar el dibujo correspondiente a las losas y vacíos, se puede realizar la lectura de geometría de éstos elementos.

Al seleccionar la opción LEER GEOMETRÍA, en la parte inferior de la ventana aparecerá una tabla con las características de los muros.

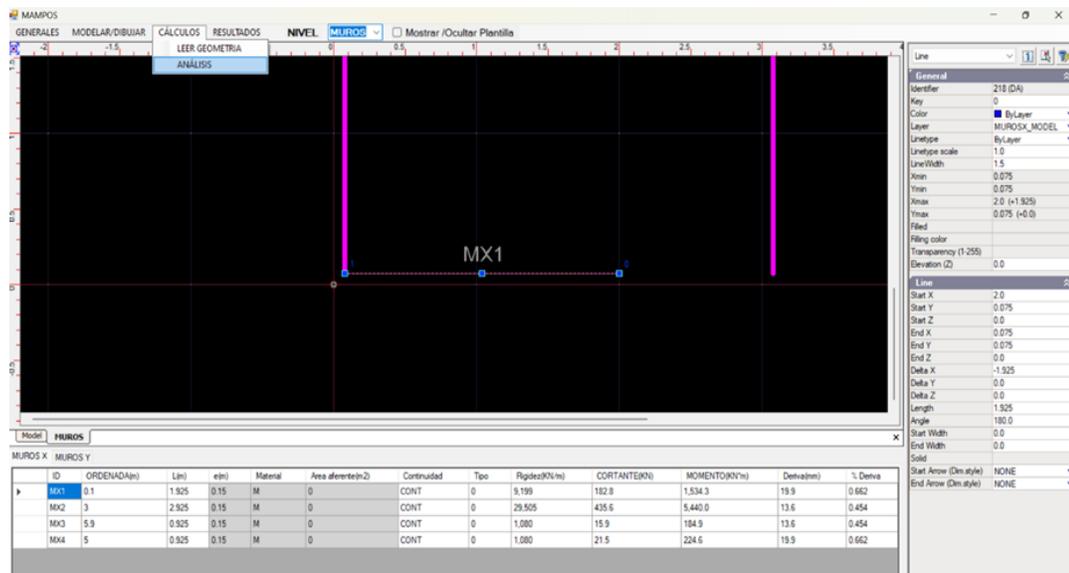
Model		PISO4				
MUROS X	MUROS Y					
	ID	ORDENADA(m)	L(m)	e(m)	Material	Area aferente(m2)
▶	MX1	0.1	1.925	0.15	M	0
	MX2	3	2.925	0.15	M	0
	MX3	5.9	0.925	0.15	M	0
	MX4	5	0.925	0.15	M	0

Además, se indica la identificación de cada muro, la ordenada donde está ubicado, su longitud, ID, espesor y material. **NOTA:** En esta parte se puede modificar el espesor y el material, “M” para mampostería y “C” para concreto.



Si selecciona ya sea un muro, una losa o un vacío, en la ventana del lado derecho se podrán ver sus características e incluso modificarlas.

Después de realizar la lectura de la geometría, se puede iniciar con el análisis estructural.



En la parte inferior, después de la tabla de la geometría, aparecerán los resultados más relevantes del análisis en el piso seleccionado.

Finalmente, en la parte de RESULTADOS pueden visualizarse los diferentes resultados a detalle de los análisis internos del programa.

The screenshot shows a software interface with a menu bar containing 'CÁLCULOS', 'RESULTADOS', 'NIVEL', and 'MUROS'. The 'ANÁLISIS MODAL' option is selected, opening a dropdown menu with options: 'RESULTADOS FUERZAS Y DERIVAS', 'CORRECCIÓN CORTANTE DINÁMICO', 'RIGIDEZ DE PISO', 'ESPECTRO', and 'PESO PROPIO MUROS'. A window titled 'RESULT_MODAL: Bloc de notas' is open, displaying the following information:

PROPIEDADES DE LA ESTRUCTURA DIR X.

PISO	ALTURA	MASA	RIGIDEZ
1	3	33.7	40865
2	3	33.7	15938
3	3	33.7	9466
4	3	33.7	4989

RESULTADOS DEL ANALISIS MODAL

LA ESTRUCTURA TIENE 4 MODOS DE VIBRACION

VALORES FRECUENCIALES Y DE PERIODOS EN CADA MODO SON:

MODO DE VIBRACION	FRECUENCIA rad/seg	PERIODO seg

Al seleccionar la opción de ANÁLISIS MODAL, se abrirá un bloc de notas que contiene toda la información del análisis realizado.

The screenshot shows the same software interface, but with the 'RESULTADOS FUERZAS Y DERIVAS' option selected in the dropdown menu. The 'RESULT_MODAL: Bloc de notas' window is open, displaying the same information as the previous image:

PROPIEDADES DE LA ESTRUCTURA DIR X.

PISO	ALTURA	MASA	RIGIDEZ
1	3	33.7	40865
2	3	33.7	15938
3	3	33.7	9466
4	3	33.7	4989

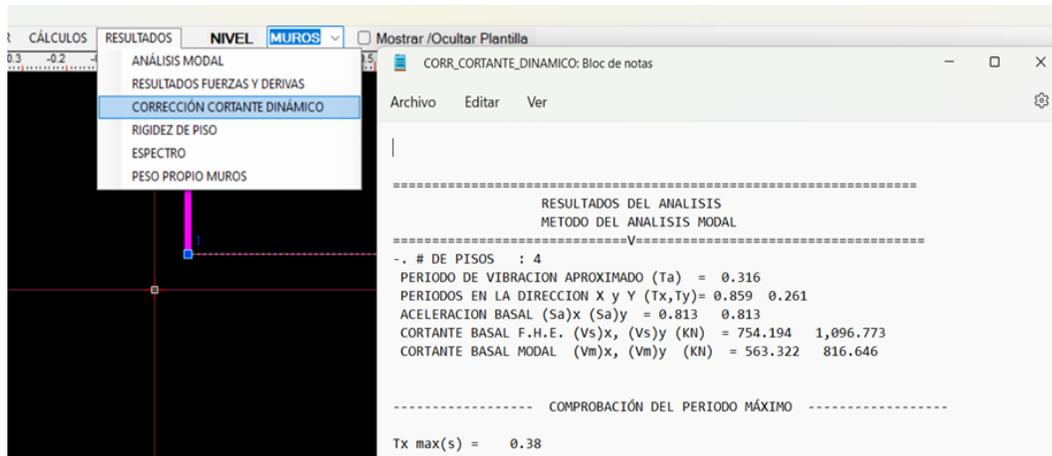
RESULTADOS DEL ANALISIS MODAL

LA ESTRUCTURA TIENE 4 MODOS DE VIBRACION

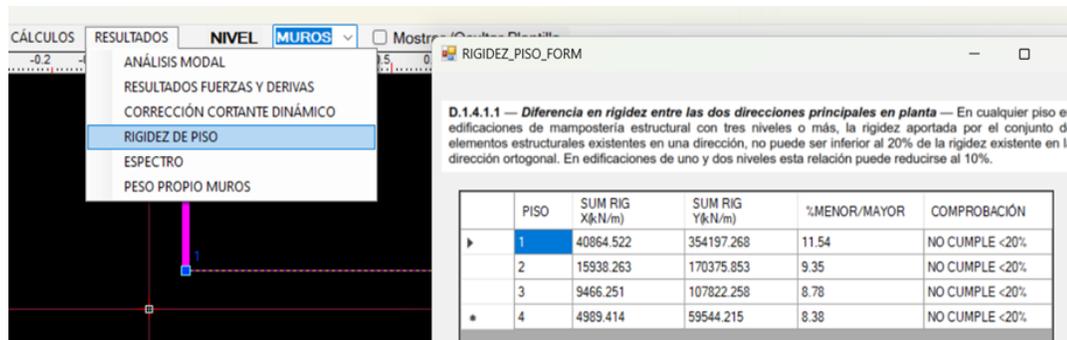
VALORES FRECUENCIALES Y DE PERIODOS EN CADA MODO SON:

MODO DE VIBRACION	FRECUENCIA rad/seg	PERIODO seg

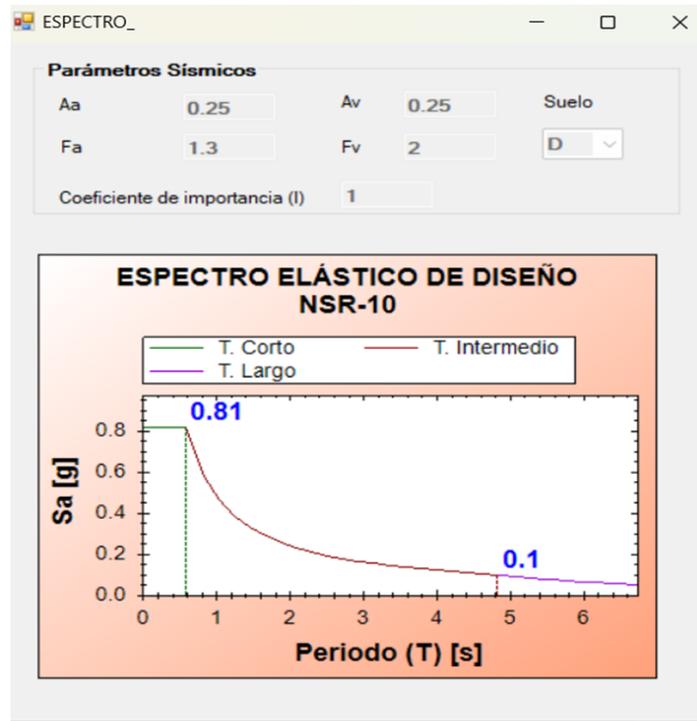
De igual manera, los resultados del análisis estructural en los que se muestran derivas y fuerzas, se encuentran a detalle en un bloc de notas.



También, puede obtenerse un documento con la corrección de cortante si en el menú DATOS GENERALES se seleccionó la opción NO CORREGIR CORTANTE BASAL.



Al seleccionar la opción RIGIDEZ se abre una ventana propia del programa y muestra las rigideces por piso y si cumple con el numeral D1.4.1.1 de la NSR-10.



También se puede ver el espectro de diseño con todas sus características al seleccionar la opción ESPECTRO y, finalmente, se puede obtener los pesos propios de los muros seleccionando la opción PESO PROPIO MUROS, siempre y cuando se considere el peso propio de los muros en el menú DATOS GENERALES.

PESO PROPIO MUROS ESTRUCTURALES

	NIVEL	AREA MUROS X(m2)	AREA MUROS y(m2)	PESO MURO (kN)	PESO MURO EN LA LOSA (kN)	W (kN/m2)
▶	BASE	1	2.19	172.7	0	0
	LOSA PI...	1	2.19	172.7	172.7	5.12
	LOSA PI...	1	2.19	172.7	172.7	5.12
	LOSA PI...	1	2.19	172.7	172.7	5.12
	LOSA PI...	0	0	0	86.4	2.56

MODELO PARA EL PESO PROPIO DE MUROS

IV. Conclusiones

- Se comprobó el método numérico para hallar valores y vectores propios, para esto, se comparó con MATLAB y no se obtuvieron diferencias (cercasas al 0%).
- Se corrobora el análisis modal con sus variables como: período, modos de vibración con ETABS y MATLAB.
- Se realizó el análisis estático usando el método de la fuerza horizontal equivalente cómo lo indica el capítulo A.4 de la NSR-10. En cuanto a las fuerzas sísmicas estáticas calculadas con los períodos de vibración de la estructura para sismo en X y en Y, no se aprecia una diferencia significativa entre los resultados obtenidos con MAMPOS original y MAMPOS actualizado.
- Se realizó el análisis dinámico usando el método de análisis modal cómo lo indica el capítulo A.5 de la NSR-10, junto con sus respectivas comprobaciones y la corrección de cortante basal. Además, sus resultados fueron comparados con los obtenidos en ETABS, se observa que los resultados son similares a pesar de la diferencia en los métodos para cálculo de fuerzas internas que usa cada programa.
- Se adaptó satisfactoriamente el código de MAMPOS original para que pueda ser usado por computadores con sistemas operativos modernos, además se actualizó el programa que estaba con la norma NSR-98 a NSR-10.
- Se implementó una interfaz intuitiva, junto con el ingreso de datos y presentación de resultados, permitiendo una mejor interacción entre el usuario y el programa.
- Se calcularon las derivas tanto para el método estático como para el método dinámico, éstas fueron comparadas tanto en MAMPOS original como MAMPOS antiguo y se obtuvieron resultados similares.

V. Trabajos futuros

- Implementar un módulo para el diseño por resistencia en distintos sistemas de muros de mampostería.
- Implementar una gráfica deformada para los modos de vibración y desplazamientos.
- Incluir el análisis para muros inclinados en planta.
- Programar el cálculo de los muros con elementos finitos.
- Desarrollar cálculo de la fuerza axial en los muros debido a la carga gravitacional, mediante una distribución de áreas aferentes o losas con elementos finitos.
- Mostrar diagramas de cortante y momento en los muros.

Bibliografía

- Abanto Castillo, T. F. (2018). *Análisis y Diseño de Edificaciones de Albañilería*. Editorial San Marcos E I R LTDA.
- Bedian Ríos, L. A. (2010, Agosto). *Determinación Experimental de los Parámetros Modales (Frecuencias Naturales) de una Viga en Condición Empotrada - Libre [Tesis de Maestría, Universidad Veracruzana]*.
- Bermúdez Mejía, C. A. (n.d.). Unidad 7. Método de la fuerza horizontal equivalente. *Análisis Estructural Avanzado*. Universidad Nacional de Colombia.
- Carranza Ramos, L. Y., & Contreras Jimenez, M. A. (2020). *Guía Para Diseño Estructural de un Edificio en Mampostería Parcialmente Reforzada [Tesis de Pregrado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]*.
- Garcés, F., Genatios, C., Lafuente, M., & Mebarki, A.. (2002). REAJUSTE DE MATRICES DE RIGIDEZ Y FLEXIBILIDAD PARA SISTEMAS APORTICADOS. *Boletín Técnico* , 40(3), 19-26. Recuperado en 27 de noviembre de 2021, de

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0376-723X2002000300002&lng=es&tlng=es.

- García Reyes, L. E. (1998). *Dinámica Estructural Aplicada al Diseño Sísmico*. Universidad de Los Andes.
- He, J., & Fu, Z.-F. (2001). *Modal Analysis*. Elsevier Science.
- Hibbeler, R. C., & Murrieta Murrieta, J. E. (2010). *Ingeniería mecánica: estática* (J. E. Murrieta Murrieta & F. d. J. Hidalgo Cavazos, Trans.). Pearson Educación.
- Microsoft. (2019). *Documentación de Visual Studio*. Revisado en Mayo 1, 2021, recuperado de <https://docs.microsoft.com/es-es/visualstudio/windows/?view=vs-2019>
- Microsoft. (1990). *Microsoft QuickBASIC. Learning to use Microsoft QuickBASIC*.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Título A - Requisitos generales de diseño y construcción sismo resistente. In *NSR-10*.
- Palacios, F. (2008). Tema 5: Valores y vectores propios. E.T.S. Minas: Métodos Matemáticos. Resumen y ejemplos (p. 19). Universidad Politécnica de Cataluña.
- Rochel Awad, R. (2012). *Análisis y diseño sísmico de edificios*. Universidad EAFIT.
- Rodríguez Súnico, M. (2005). *Análisis Modal Operacional: Teoría y Práctica*. Escuela Superior de Ingenieros, Sevilla. (Suárez, 2014, #)
- Tutoriales Estructuras y Construcción. (2016, Diciembre 2). *COMO HACER UN ANÁLISIS SÍSMICO dinámico espectral | construir el espectro NSR10*.

Revisado en Mayo 10, 2021, recuperado de

<https://www.youtube.com/watch?v=zTWUK1xJv1c>.