



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Detección de daño en muros estructurales
aplicando el Método de la Matriz de
Transformación**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Luis Arturo Jiménez Baca

DIRECTOR(A) DE TESIS

Dr. José Alberto Escobar Sánchez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019

Gracias a Dios

Agradecimientos

Dedico este trabajo a mi papá, Alejandro, y a mi hermana, Vanessa, por apoyarme en todo momento y ser mi principal soporte de vida.

Agradezco a mi familia, por los valores que me inculcaron y por siempre apoyarme en mi trayectoria académica.

Gracias a mi novia, Jozabed, por ser el soporte que necesitaba en los tiempos más difíciles y a que siempre me superara.

Especial agradecimiento a mi tutor, el doctor José Alberto Escobar, por su amistad, por el apoyo y su conocimiento que me ha brindado desde que lo conozco.

Agradezco mucho a la Universidad Nacional Autónoma de México, así como a mis profesores, compañeros y amigos que conocí en mis estudios de preparatoria y Licenciatura en la Facultad de Ingeniería, por prepararme como ser humano y como profesional.

Gracias al Instituto de Ingeniería por permitirme ser becario y por haberme dado la oportunidad de desarrollar mi tesis.

Gracias a mis sinodales, por apoyarme durante el proceso de mi titulación y a su accesibilidad como profesores y como buenos amigos que puedo considerar. En especial, agradezco al Ing. Heriberto y al Dr. Armando, quienes fueron mis profesores durante la Licenciatura.

Gracias a Dios por ser mi guía y por todo lo bueno que me ha dado.

Resumen

El Método de la Matriz de Transformación es un algoritmo que permite detectar y cuantificar daño estructural, principalmente, en estructuras a base de marcos rígidos. Esta tesis pretende expandir el algoritmo de detección de daño a otro tipo de estructuras, como aquellas con muros de carga, tanto de concreto reforzado como de mampostería confinada. Esta propuesta pretende que el comportamiento de los muros sea fácil de modelar, para su rápida localización y cuantificación de daño. Además, de promover la detección de daño a estructuras cada vez más complejas.

Abstract

The Transformation Matrix Method is an algorithm that allows to detect and quantify structural damage, mainly on rigid frames structures. This thesis pretends to extend the damage detection algorithm to another kind of structures, like those by load-bearing walls, as much as reinforcement concrete as masonry system. This proposition seeks to make it easy to model the load-bearing wall's behavior, for the fast localization and structural damage quantification. In addition, to promote de damage detection to more complex structures.

Índice

Resumen	I
Abstract.....	II
I.- Introducción	1
1.1 Antecedentes	1
1.1.1 Concepto de rigidez	1
1.1.2 Detección de daño en estructuras	2
1.2 Objetivos	2
1.3 Alcances.....	2
II.- Sistemas con muros	3
2.2 Método de la columna ancha equivalente	7
2.2.1 Modificación de la matriz de rigidez considerando deformación por cortante	8
2.2.2 Matriz de rigidez para vigas con rigidez mayor en sus extremos.....	11
2.2.3 Matriz de rigidez de un muro utilizando el método de la columna ancha equivalente referido a un sistema de coordenadas globales	12
2.3 Método de la diagonal equivalente.....	13
2.4 Método del elemento finito	17
III.- Método de la Matriz de Transformación	18
3.1 Algoritmo del MMT	21
3.1.1 Convergencia del método	22
3.2 Mal comportamiento y propuestas de mejoramiento del MMT	23
3.3 Método de la Matriz de Transformación para estructuras con muros	26
3.3.1 Metodología y formulación	26

IV.- Aplicación del MMT con muros estructurales	29
4.1 Estructura con muro al centro de concreto reforzado	31
4.2 Estructura con dos muros de concreto reforzado, centro y esquina	36
4.3 Estructura con un muro al centro de mampostería confinada	42
4.4 Estructura a base de mampostería confinada y marcos en esquina	47
V.- Conclusiones y recomendaciones	52
VI.- Referencias	54

Capítulo I

Introducción

La palabra “daño”, proveniente del latín *damnum*, y significa mal a causa de algo o de alguien (COLMEX, 2019). Para la ingeniería civil, especialmente en el área estructural, el daño estructural es una de las principales causas de los problemas a resolver para los ingenieros.

En las estructuras y construcciones, el daño pone en riesgo la integridad no sólo de las mismas, sino de los que operan y hacen uso de ellas. Por esta razón, una parte de la ingeniería estructural se ha dedicado, durante mucho tiempo, a poder localizar el daño estructural. Este puede ser provocado por fenómenos naturales. Lo anterior, para determinar el nivel de riesgo en el que se pueda encontrar la estructura, saber cómo repararlo y definir su periodo de vida después del daño.

Usualmente se hacen inspecciones visuales y/o pruebas de resistencia de materiales para conocer qué tan dañado puede estar un elemento o no. Sin embargo, esta práctica tiene varios inconvenientes, principalmente que en la extracción de muestras se vuelve a dañar la estructura, de manera consiente, además que sólo se conoce el daño que puede ser visualizado.

Éstas prácticas dieron inicio a la investigación en el daño estructural a través de métodos y modelos matemáticos, que no pongan en mayor riesgo a la estructura. También, que determinen la existencia del daño en aquellos lugares donde no se pueda apreciar visualmente o no se tenga una percepción correcta del mismo.

Los métodos matemáticos para detección de daño se han formulado, principalmente, mediante el estudio del comportamiento estructural de los edificios ante diversos estados de carga.

Este trabajo presenta una forma de utilizar el Método de la Matriz de Transformación (Escobar et al., 2001) en estructuras con muros estructurales y no estructurales.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Concepto de rigidez

La rigidez k , es la fuerza necesaria F , que se debe aplicar a un elemento estructural para provocar un desplazamiento lineal o angular δ , unitario. Esto es:

$$F = k\delta \quad (1.1.1)$$

1.1.2 Detección de daño en estructuras

La detección cuantitativa de daño en estructuras, es una técnica en continua innovación y evolución al pasar del tiempo. Diversos autores han postulado métodos o procedimientos por los cuales se puede detectar, cuantitativamente, daño estructural y clasificarlo. Sin embargo, al existir diferentes métodos, los resultados finales obtenidos pueden llegar a tener variaciones.

Una manera de homogeneizar los resultados en la detección de daño, fue utilizar los cuatro diferentes niveles de evaluación de daño que estableció Rytter (1993):

- I. Existencia de daño.
- II. Ubicación de daño.
- III. Cuantificación de la gravedad de los daños
- IV. Predicción de la vida útil restante.

En esta tesis, se empleó el Método de la Matriz de Transformación (Escobar et. al., 2001) (MMT), en el que se utilizan los modos y frecuencias de vibrar de la estructura y un modelo analítico base. Con ellos se realiza un proceso iterativo para estimar, de manera cuantitativa, el daño en los elementos estructurales, reflejado en la pérdida de rigidez.

1.2 Objetivos

- Determinar un método analítico para modelar muros.
- Localizar y cuantificar daño, definido como pérdida de rigidez, en muros estructurales de concreto reforzado y mampostería confinada.
- Ampliar el uso del Método de la Matriz de Transformación para detección de daño en estructuras con muros.

1.3 Alcances

Con base en los objetivos planteados, se empleará dos tipos de métodos para modelar muros estructurales:

- a) Método de la columna ancha.
- b) Método de la diagonal equivalente.

Aplicando el MMT, se evaluó con cuál de estos métodos se puede obtener mejores resultados de detección de daño, en estructuras bidimensionales simétricas y asimétricas con muros.

Capítulo II

Sistemas con muros

En este capítulo se estudian tres métodos para modelar sistemas estructurales con muros. Se puede definir que el coeficiente de rigidez k_{ij} , que ocupa el lugar i, j de una matriz de rigideces k_u referida a los grados de libertad u , es la fuerza o momento que se necesita aplicar a la estructura en la dirección del grado de libertad i para que se produzca un desplazamiento unitario en la dirección del grado de libertad j (Bazán y Meli, 2002). De acuerdo con el teorema de Betti-Maxwell, la matriz de rigideces k_u es simétrica, es decir, $k_{ij} = k_{ji}$.

Dado que la matriz de rigideces depende de las características geométricas y mecánicas del elemento, se puede obtener de manera general las propiedades de la matriz, sin importar la orientación de los ejes locales, de la siguiente manera:

Haciendo uso del principio de superposición y si el esfuerzo de una barra cualquiera está representado por la ley de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon \quad \rightarrow \quad P = EA * \varepsilon \quad \text{ec. (2.1.1)}$$

donde:

P es la carga axial aplicada a la barra, A es el área transversal de la barra y
 σ es el esfuerzo normal de la barra, ε es la deformación unitaria.
 E es el módulo de elasticidad,

En forma matricial, se puede expresar como:

$$\begin{Bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ M_3 \\ f_4 \\ f_5 \\ M_6 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \phi_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ \phi_6 \end{Bmatrix}$$

ec. (2.1.2)

En forma reducida:

$$\{f\} = [K_e]\{u\} \quad \text{ec. (2.1.3)}$$

donde:

f es el vector de fuerzas;

K_e es la matriz de rigidez del elemento barra;

u es el vector de deformaciones.

Además, si el elemento barra, referido a un sistema de coordenadas globales (X, Y), presenta una inclinación con ángulo β , se puede obtener la matriz de rigidez del elemento barra mediante una transformación lineal utilizando la matriz $[T_\beta]$, que está en función de β . Esta transformación permite pasar del sistema local del elemento barra al sistema global.

De manera que la matriz de transformación del sistema local al sistema global, referida al ángulo es:

$$[T_\beta] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \theta & \text{sen } \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\text{sen } \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ec. (2.1.4)

Para obtener la matriz de rigidez del elemento barra referido al sistema global se realiza la siguiente operación:

$$[K_g] = [T_\beta]^T [K_e] [T_\beta] \quad \text{ec. (2.1.5)}$$

Por lo tanto, la matriz de rigidez del elemento barra con tres grados de libertad por nodo, en el sistema global, está dada por:

$$K_g = \begin{bmatrix} Mc^2 + Ns^2 & (M-N)cs & -Ps & -Mc^2 - Ns^2 & (N-M)cs & -Ps \\ & Ms^2 + Nc^2 & Pc & (N-M)cs & -Ms^2 - Nc^2 & Pc \\ & & Q & Ps & -Pc & R \\ & & & Mc^2 + Ns^2 & (M-N)cs & Ps \\ & & & & Ms^2 + Nc^2 & -Pc \\ & & & & & Q \end{bmatrix}$$

SIMÉTRICA

ec. (2.1.6)

donde:

$$M = \frac{EA}{L}$$

$$P = \frac{6EI}{L^2}$$

$$R = \frac{2EI}{L}$$

$$N = \frac{12EI}{L^3}$$

$$Q = \frac{4EI}{L}$$

$$c = \cos\theta$$

$$s = \sin\theta$$

I es la inercia del elemento, L es su longitud y θ el ángulo con respecto a los ejes globales.

Para obtener los desplazamientos de un muro en su plano, aceptando las hipótesis del comportamiento elástico lineal, es necesario considerar las magnitudes y distribuciones de cargas actuantes, así como su geometría y el tipo de apoyo. Con estos parámetros, se pueden realizar análisis para calcular los desplazamientos con la teoría de la elasticidad.

Para fines prácticos, se pueden modelar muros aislados con suficiente aproximación empleando un elemento que tome en cuenta tanto desplazamientos por flexión como por cortante (Tena, 2007). Esta afirmación se basa en un estudio realizado por Bazán y Meli (1983a; 1990b; 2002c), donde comparan los desplazamientos obtenidos por el método del elemento finito y la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{Ph^3}{3EI} + \frac{Ph}{GA_c} \quad \text{ec. (2.1.7)}$$

donde:

A_c es el área de la sección transversal efectiva a cortante,

h la altura del muro,

P es una carga lateral y

G es el módulo de cortante del muro.

Para el análisis lineal de muros, Bazán y Meli (1983a; 1990b; 2002c) concluyeron que, la relación (b/h) debe estar entre los intervalos de 0.5 y 2.0 para que los desplazamientos obtenidos sean adecuados. Por otro lado, si la relación (b/h) es menor al intervalo, sólo se considera el primer sumando de la ecuación 2.2.1 y para una relación mayor al intervalo, el segundo término.

2.2 Método de la columna ancha equivalente

El método de la columna ancha idealiza a los muros de una estructura como elementos columna, localizados a lo largo de sus ejes centroidales.

Las columnas anchas deben incluir los desplazamientos por cortante. Además, se debe considerar la porción de las vigas que se encuentran dentro de la mitad del muro como columna ancha. Esta longitud de viga tiene una rigidez mayor en comparación a la viga original.

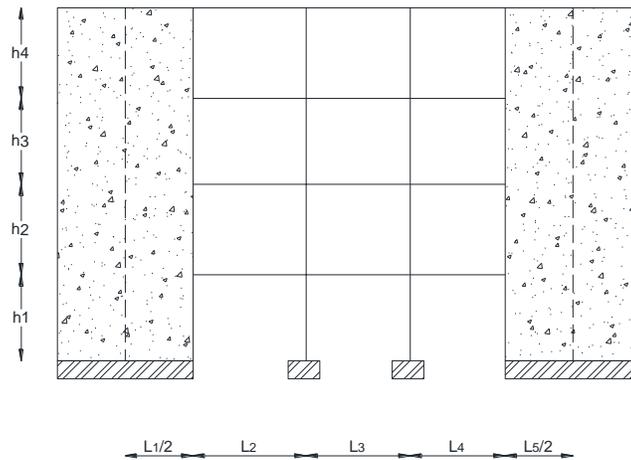


Figura 2.1 Estructura a base de marcos y muros de concreto

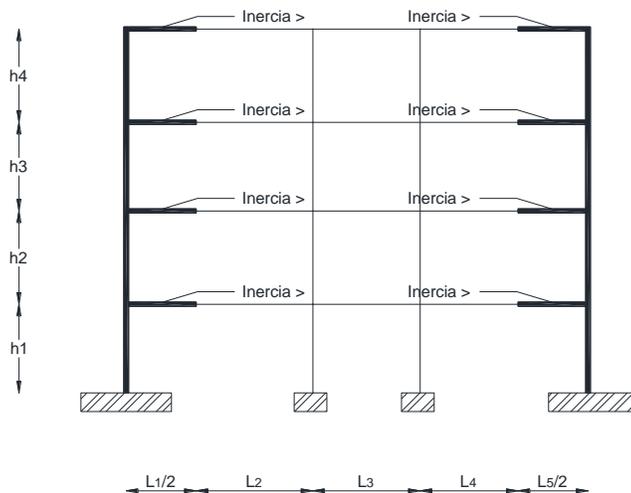


Figura 2.2 Estructura a base de marcos con columnas anchas equivalente y vigas con extremos más rígidos.

Este método permite analizar estructuras con muros, como un conjunto de marcos en cualquiera de sus ejes. Facilita la obtención de la matriz de rigidez global y los desplazamientos provocados por fuerzas laterales.

2.2.1 Modificación de la matriz de rigidez considerando deformación por cortante

Para realizar el análisis de estructuras con muros utilizando el método de la columna ancha, se toman en cuenta los desplazamientos obtenidos por cortante.

Se logra definir que la deflexión lateral de una viga está dada por la ecuación:

$$v = v_f + v_c \quad \text{ec. (2.2.2)}$$

donde:

v_f es la deflexión lateral debida a los desplazamientos por flexión;

v_c es la deflexión adicional debida a los desplazamientos por cortante.

Realizando las derivadas parciales de los desplazamientos por flexión y por cortante con respecto a la longitud del elemento (l), e integrándolas (Przemieniecki, 1985), se obtiene:

$$EI_x v = \frac{F_{1y} l^3}{6} - \frac{M_{1x} l^2}{2} + \left(C_1 - \frac{F_{1y} EI_x}{GA_c} \right) l + C_2 \quad \text{ec. (2.2.3)}$$

donde:

F_{1y} es la fuerza en dirección y ; l es la longitud del elemento;

M_{1x} es el momento torsionante en l_x es la inercia con respecto al plano x ; dirección de x ;

A_c es el área transversal del elemento; C_1 y C_2 son constantes.

Las constantes C_1 y C_2 dependen de las condiciones de frontera, las cuales están en función de los desplazamientos o giros dadas las características del elemento. Calculando las constantes se obtienen las ecuaciones que describen el comportamiento de la deflexión (v) para cualquier longitud (l) del elemento.

Es decir, para los desplazamientos:

$$\frac{dv_c}{dl} = \frac{-F_{1y}}{GA_c} \quad \text{en} \quad l = 0 \text{ y } l = 1 \quad \text{ec. (2.2.4)}$$

$$v = 0 \quad \text{en} \quad l = L \quad \text{ec. (2.2.5)}$$

Con estas dos condiciones se obtiene el valor de las constantes C_1 y C_2 , sustituyendo y reduciendo los términos de la ec. 2.2.3 se llega a:

$$EI_x v = \frac{F_{1y} l^3}{6} - \frac{M_{1x} l^2}{2} - \frac{F_{1y} \Omega l L^2}{12} + (1 + \Omega) \frac{F_{1y} L^3}{12} \quad \text{ec. (2.2.6)}$$

Y para las rotaciones, se realiza de manera similar:

$$v = 0 \quad \text{en} \quad l = 0 \text{ y } l = 1 \quad \text{ec. (2.2.7)}$$

$$\frac{dv_c}{dl} = \frac{-F_{1y}}{GA_c} \quad \text{en} \quad l = L \quad \text{ec. (2.2.8)}$$

Con estas dos condiciones se obtiene el valor de las constantes C_1 y C_2 , sustituyendo y reduciendo los términos de la ec. 2.2.3 se llega a:

$$EI_x v = \left(\frac{M_{1x}}{L(4 + \Omega)} \right) (l^3 - lL^2) + \left(\frac{M_{1x}}{2} \right) (lL - l^2) \quad \text{ec. (2.2.9)}$$

donde:

$$\Omega = \frac{12EI}{GA_c L^2} \quad \text{ec. (2.2.10)}$$

De las ecuaciones 2.2.6 y 2.2.9 se obtiene la matriz de rigidez de un elemento barra, considerando las deformaciones por cortante. Si se aplica $I = 0$ para ambas ecuaciones, de forma matricial, se obtendrá:

$$K_{\text{cort}} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3(1+\Omega)} & \frac{6EI}{L^2(1+\Omega)} & 0 & \frac{-12EI}{L^3(1+\Omega)} & \frac{6EI}{L^2(1+\Omega)} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2(1+\Omega)} & \frac{(4+\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & 0 & \frac{-6EI}{L^2(1+\Omega)} & \frac{(2-\Omega)EI}{L(1+\Omega)} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-12EI}{L^3(1+\Omega)} & \frac{-6EI}{L^2(1+\Omega)} & 0 & \frac{12EI}{L^3(1+\Omega)} & \frac{-6EI}{L^2(1+\Omega)} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2(1+\Omega)} & \frac{(2-\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & 0 & \frac{-6EI}{L^2(1+\Omega)} & \frac{(4+\Omega)EI}{L(1+\Omega)} \end{bmatrix} \quad \text{ec. (2.2.11)}$$

La matriz de rigidez, considerando desplazamientos por cortante, se puede utilizar para determinar la rigidez de un elemento barra. Sin embargo, por la relación de la longitud del elemento barra con respecto a su radio de giro (r) (Tena, 2007):

$$\Omega = \frac{12EI}{GA_c L^2} = 24(1 + \nu) \frac{A}{A_c} \left(\frac{r}{L}\right)^2 \quad \text{ec. (2.2.12)}$$

entonces:

$$\Omega \approx 0 \quad \text{ec. (2.2.13)}$$

Se puede despreciar los desplazamientos por cortante en elementos barra. Sin embargo, para un mejor análisis, considerar los desplazamientos por cortante aporta un mayor acercamiento con la realidad.

2.2.2 Matriz de rigidez para vigas con rigidez mayor en sus extremos

La porción de vigas que se encuentra dentro de la mitad del muro, es añadida a la matriz de rigidez de la viga original que conecta los elementos verticales entre sí.

Se modifica de acuerdo a la relación entre las proporciones de longitud de viga que son más rígidas, con respecto a la porción de la longitud de la viga original:

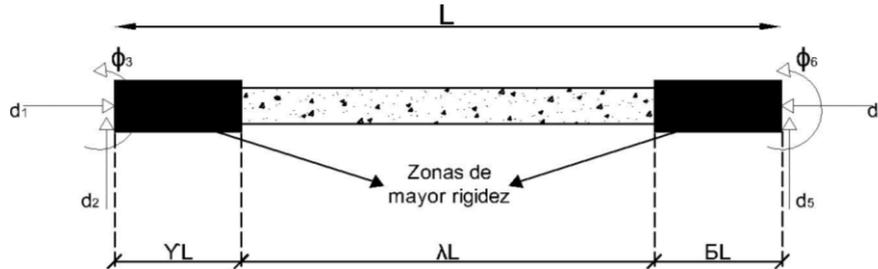


Figura 2.3 Viga con zonas más rígidas a flexión en sus extremos.

De manera que se obtienen las relaciones de longitud:

$$g = \frac{\gamma}{\lambda} \quad y \quad b = \frac{\beta}{\lambda} \quad ec. (2.2.14)$$

Resultando la matriz de rigidez para vigas con rigidez mayor en sus extremos:

$$K_{Vr} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{(\lambda L)^3} & \frac{6EI(1+2g)}{(\lambda L)^2} & 0 & -\frac{12EI}{(\lambda L)^3} & \frac{6EI(1+2b)}{(\lambda L)^2} \\ 0 & \frac{6EI(1+2g)}{(\lambda L)^2} & \frac{(4+\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & 0 & -\frac{6EI(1+2g)}{(\lambda L)^2} & \frac{(2-\Omega)EI}{L(1+\Omega)} \\ -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{(\lambda L)^3} & -\frac{6EI(1+2g)}{(\lambda L)^2} & 0 & \frac{12EI}{(\lambda L)^3} & -\frac{6EI(1+2b)}{(\lambda L)^2} \\ 0 & \frac{6EI(1+2b)}{(\lambda L)^2} & \frac{(2-\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & 0 & -\frac{6EI(1+2b)}{(\lambda L)^2} & \frac{(4+\Omega)EI}{L(1+\Omega)} \end{bmatrix}$$

ec. (2.2.15)

2.2.3 Matriz de rigidez de un muro utilizando el método de la columna ancha equivalente referido a un sistema de coordenadas globales

Para las matrices obtenidas, se pueden referir a un sistema de coordenadas globales dado un ángulo β .

En el método de la columna ancha, el único elemento que gira con respecto un sistema de coordenadas globales es la columna a lo largo del eje centroidal del muro. El ángulo β es de 90° y la matriz de rigidez de la columna ancha referida a un sistema global está dada por:

$$K_{ca} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3(1+\Omega)} & 0 & \frac{-6EI}{L^2(1+\Omega)} & \frac{-12EI}{L^3(1+\Omega)} & 0 & \frac{-6EI}{L^2(1+\Omega)} \\ \frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{-EA}{L} & 0 & 0 \\ \frac{(4+\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & \frac{6EI}{L^2(1+\Omega)} & 0 & \frac{(2-\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & 0 & 0 \\ \frac{12EI}{L^3(1+\Omega)} & 0 & 0 & \frac{6EI}{L^2(1+\Omega)} & \frac{EA}{L} & 0 \\ \frac{(4+\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & \frac{6EI}{L^2(1+\Omega)} & 0 & \frac{(2-\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & 0 & 0 \\ \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 \\ \frac{(4+\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & \frac{6EI}{L^2(1+\Omega)} & 0 & \frac{(2-\Omega)EI}{L(1+\Omega)} & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

SIMÉTRICA

ec (2.2.16)

2.3 Método de la diagonal equivalente

En muros confinados por marcos, los marcos aportan la mayor parte de la rigidez a flexión y el muro confinado, la rigidez a cortante.

Cuando el muro recibe pequeñas cargas laterales, no se comporta de manera homogénea, los marcos y el muro se separan y trabajan diferente. Esto dificulta que se modele como columna ancha.

Dos soluciones para modelar el comportamiento de muros confinados por marcos, es asegurar, que los marcos y el muro se ligen en sus extremos mediante conectores de cortante. El segundo, es idealizar un elemento en diagonal, a través del marco, que aporte la mayor parte de la rigidez axial.

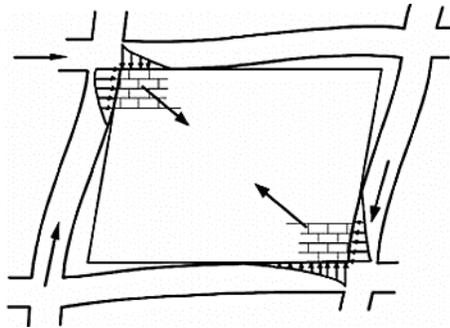


Figura 2.4 Compresión de la mampostería en el sentido de la carga lateral; separación con el marco confinante en los extremos opuestos.

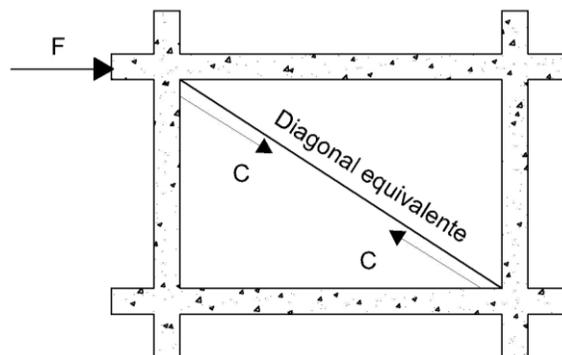


Figura 2.5 Idealización de la diagonal equivalente trabajando a compresión en el sentido de la fuerza lateral.

Del método de la diagonal equivalente se obtiene la matriz de rigidez definida como:

$$K_{deq} = \frac{E_m A_{eq}}{L_{diag}} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} \quad ec. (2.3.1)$$

donde:

E_m es el módulo de elasticidad del muro;

L_{diag} es la longitud que tendrá la diagonal de esquina a esquina del marco confinado;

A_{eq} es el área equivalente del resultado de comparar las propiedades del muro con respecto al marco que lo confina.

El área equivalente A_{eq} se determina con la relación que tiene el muro confinado con respecto al marco. Esta relación es dada por la rigidez relativa de muro y marco (Meli, 2011) o por las longitudes de contacto del muro con el marco (RCCDMX-NTCDCEC, 2017).

De acuerdo con Bazán y Meli (2002), la rigidez relativa es la relación entre módulos del muro con respecto a las columnas:

$$\lambda = \frac{E_{col} A_{col}}{G_m A_m} \quad para \quad 0.9 \leq \lambda \leq 11 \quad ec. (2.3.2)$$

donde:

A_{col} es el área de la sección transversal de las columnas que confinan la muro;

A_m es el área neta de la sección transversal del muro;

E_{col} es el módulo de elasticidad de los elementos de confinamiento del muro;

G_m es el módulo de cortante del muro.

El valor de la rigidez relativa (λ) determina el ancho de la diagonal equivalente, representado por:

$$\omega_{deq} = (0.35 + 0.22\lambda)h_m \quad ec. (2.3.3)$$

donde:

ω_{deq} es el ancho de la diagonal equivalente;

h_m es la altura del muro confinado.

Con el valor ω_{deq} se puede obtener el área de la diagonal equivalente A_{eq} como:

$$A_{eq} = t\omega_{deq} \quad ec. (2.3.4)$$

donde:

t representa el espesor del muro.

El Reglamento de Construcciones de la Ciudad de México mediante las Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (2017) indica cómo obtener el área equivalente (A_{eq}) mediante longitudes de contacto:

El ancho de la sección idealizada como diagonal equivalente se determina como:

$$b_d = \frac{1}{2} \sqrt{l_c^2 + l_v^2} \leq \frac{l_d}{4} \quad ec (2.3.5)$$

donde l_c y l_v son las longitudes de contacto del muro con la columna y con la trabe, respectivamente, y l_d es la longitud de la diagonal. Las longitudes l_c , l_v y l_d se determinarán como:

$$l_c = \frac{\pi}{2} \left(\frac{4E_f I_c H}{E_m t \text{sen} 2\theta_d} \right)^{\frac{1}{4}} \quad ec. (2.3.6)$$

$$l_v = \pi \left(\frac{4E_f I_v L}{E_m t \text{sen} 2\theta_d} \right)^{\frac{1}{4}} \quad ec. (2.3.7)$$

$$l_c = (H^2 + L^2)^{\frac{1}{2}} \quad ec. (2.3.8)$$

donde:

E_f, E_m	son los módulos de elasticidad para cargas de corta duración, del material del marco y de la mampostería, respectivamente;
I_c y I_v	son los momentos de inercia de la sección transversal bruta de la columna y de la trabe;
H	es la altura libre del muro;
L	es la longitud del muro;
$\theta_d = \tan^{-1} H/L$ ec. (2.3.9)	es el ángulo que forma la diagonal del muro con la horizontal.

El área equivalente A_{eq} , se define como:

$$A_{eq} = t b_d \quad \text{ec. (2.3.10)}$$

El Reglamento sólo indica utilizar el método de la diagonal equivalente para muros que trabajen como muro diafragma. De acuerdo con los alcances planteados, se descartó modelar muros con estas ecuaciones.

Por último, el método de la diagonal equivalente tiene una restricción entre la relación base y altura dada por:

$$\zeta = \frac{b}{h} \quad \rightarrow 0.75 \leq \zeta \leq 2.5 \quad \text{ec. (2.3.11)}$$

2.4 Método del elemento finito

El método de los elementos finitos (E.F.) es un procedimiento numérico para analizar estructuras y problemas donde exista la continuidad. Se han desarrollado diversos programas capaces de ejecutar la simultaneidad de las ecuaciones (Molina, 1992).

El método consiste en crear subregiones del elemento analizado, con una geometría sencilla. Entre ellas, se conectan mediante nodos con grados de libertad para determinar los desplazamientos y giros internos.

Los E.F. permiten modelar elementos estructurales con diversas geometrías. Se pueden obtener mejores resultados dependiendo de los grados de libertad considerados y el refinamiento de la malla, (Tena 2007).

Los pasos a seguir cuando se emplea el método de E.F. son:

- i. Dividir la estructura en una malla.
- ii. Determinar las propiedades de cada elemento finito.
- iii. Ensamblar los elementos finitos mediante sus nodos, asignándoles los grados de libertad.
- iv. Aplicar el conjunto de cargas que recibirá la estructura modelada con los elementos finitos.
- v. Calcular los desplazamientos del elemento a partir de los grados de libertad nodales y la interpolación de campo del desplazamiento del elemento, para determinar los esfuerzos.

En el caso de estructuras con muros, es recomendable generar una malla de E.F. con geometría muy simple. Esta malla aporta resultados bastante buenos si el espaciado máximo que se considera es de 50 centímetros (Arroyo, et al., 2002).

Para los E.F., se considera tomar sólo dos grados libertad para los elementos que conformen el interior del muro. En la parte de la conectividad se debe tomar en cuenta el tercer grado de libertad.

Capítulo III

Método de la Matriz de Transformación

El Método de la Matriz de Transformación (MMT) utiliza los modos y frecuencias de vibrar de la estructura y un modelo analítico base. Con ellos se realiza un proceso iterativo para estimar cuantitativamente el daño, como la pérdida de rigidez de los elementos.

Este método cumple hasta el tercer nivel de evaluación de daño según lo descrito por Rytter (1993) y se puede ejemplificar aceptando la siguiente hipótesis (Escobar et. al., 2001).

La matriz de rigidez global de una estructura que presenta daño se representa como el ensamble de las matrices de rigidez local de cada uno de los elementos multiplicado por un factor de reducción de rigidez,

$$[K_d] = \sum_{i=1}^{n_s} (1 - dk_i)[K_x]_i \quad \text{ec. (3.1.1)}$$

donde n_s es el número de elementos estructurales totales que comprenden al modelo estructural; $[K_x]_i$ es la matriz de rigidez global de cada elemento estructural i ; dk_i es un parámetro adimensional que representa la pérdida de rigidez de cada elemento i y comprende los valores entre 0 y 1 y $[K_d]$ es la matriz de rigidez global de la estructura referida a una pérdida de rigidez de cada elemento.

Esto permite comparar un estado de la estructura dañado contra un estado no dañado. El estado no dañado de la estructura se determina con base a las propiedades geométricas y mecánicas de manera analítica.

La matriz de rigidez global de la estructura referida a una pérdida de rigidez $[K_d]$, se obtiene mediante los modos y frecuencias de vibrar de la estructura medidos en campo.

De la segunda ley de Newton se puede explicar el comportamiento estructural ante aceleraciones del suelo, la relación de masas y la rigidez de los elementos:

$$\{F\} = [M]\{\ddot{v}\} + [K]\{v\} \quad \text{ec. (3.1.2)}$$

donde $[M]$ y $[K]$ son las matrices de masas y rigidez respectivamente y $\{F\}$, $\{\ddot{v}\}$ y $\{v\}$ son los vectores de fuerzas, aceleraciones y desplazamientos respectivamente. Una de las soluciones a la ecuación diferencial ec. 3.1.2 es:

$$(K - \omega^2 M)\varphi = 0 \quad \text{ec. (3.1.3)}$$

donde ω y φ son los valores y vectores característicos que representan las frecuencias de vibrar y las formas nodales de la estructura, respectivamente, en un estado sin daño.

De la ec. 3.1.3, la matriz $[M]$ es constante en todo momento y los valores y vectores característicos ω y φ sufren cambios dinámicos. Esto modifica la matriz de rigidez referida a un estado de daño.

Midiendo en campo los parámetros dinámicos de la estructura se puede obtener la matriz de rigidez del estado actual de daño $[K_d]$. Relacionando las matrices de rigideces para los dos estados de la estructura, se obtiene:

$$[K_d] = \sum_{i=1}^n [K_x]_i - \sum_{i=1}^n d_{ki} [K_x]_i \quad \text{ec. (3.1.4)}$$

Si se conoce de la ec. 3.1.4 que:

$$\sum_{i=1}^n [K_x]_i = [K] \quad \text{ec. (3.1.5)}$$

Entonces la ecuación 3.1.4 se puede reescribir como:

$$[K] - [K_d] = \sum_{i=1}^n d_{ki} [K_x]_i \quad \text{ec. (3.1.6)}$$

La solución lineal se basa en el número de grados de libertad (GL) de las matrices $[K]$ y $[K_d]$, para determinar su dimensión se realiza:

$$D = \frac{GL(GL + 1)}{2} \quad ec. (3.1.7)$$

De esta forma se puede transcribir la ec. 3.1.6 en un sistema de ecuaciones lineales tomando sólo los términos independientes como:

$$\{k\} - \{k_d\} = [S_k]\{d_x\} \quad ec. (3.1.8)$$

donde $\{k\}$ y $\{k_d\}$ son los vectores de dimensión $D \times 1$ que incluyen los términos independientes de cada una de sus respectivas matrices. La matriz $[S_k]$ es de dimensión $D \times N$, la cual contiene los términos independientes de cada una de las matrices de los elementos que conforman a la estructura. Y el vector $\{d_x\}$, de dimensión $N \times 1$, son los factores de daño correspondientes a cada uno de los elementos estructurales.

3.1 Algoritmo del MMT

Para detectar daño estructural, se establecen las condiciones iniciales que incluyan la eliminación de ecuaciones y de incógnitas, así como el intervalo de daño y seguir esta serie de pasos (Escobar et. al., 2001):

1. Obtener, por medio de instrumentación y medición en campo, la matriz $[K_d]$ y la matriz condensada $[\bar{k}_d]$ (véase, algoritmo, Baruch y Bar Itzhack, 1978).
2. Se obtiene la matriz de transformación $[T]$ para las matrices de rigideces del estado no dañado de la siguiente manera:

$$[T] = \begin{bmatrix} [I] \\ -[K_{22}] & [K_{21}] \end{bmatrix} \quad \text{ec. (3.1.9).}$$

3. Se condensan las matrices $[K]$ y $[K_d]$ para obtener las matrices condensadas:

$$[\bar{K}] = [T]^T [K] [T] \quad \text{ec. (3.1.10) y}$$

$$[\bar{K}_d] = [T]^T [K_d] [T] \quad \text{ec. (3.1.11).}$$

4. De las matrices condensadas $[\bar{K}]$ y $[\bar{K}_d]$ se obtiene los vectores de términos independientes $\{\bar{k}_d\}$ y $\{\bar{k}\}$ y se formula la matriz $\{S_k\}$.
5. Se resuelve el sistema de ecuaciones lineales, mencionado en la ec. 3.1.8, condensado:

$$\{\bar{k}\} - \{\bar{k}_d\} = [S_k] \{\bar{d}_x\} \quad \text{ec. (3.1.12)}$$

donde $\{\bar{k}_d\}$ es el vector de daño condensado, obtenido en campo por medio de instrumentación y medición.

6. Con el vector resultante $\{\bar{d}_x\}$ se obtiene una nueva matriz de rigidez $[K_{da}]$ referida a un estado de daño inmediato y su matriz de transformación $[T_{da}]$.
7. Se condensa la matriz de rigidez $[K_{da}]$ para obtener el vector $\{\bar{k}_{da}\}$.
8. Si la diferencia entre $\{\bar{k}\} - \{\bar{k}_{da}\}$ es menor que la tolerancia permitida el proceso termina; en caso contrario se regresa al paso 3 utilizando la matriz de transformación $[T_{da}]$ obtenida del paso anterior.

3.1.1 Convergencia del método

Para determinar si entre cada iteración del algoritmo el método converge se hace uso de la siguiente ecuación:

$$e = \min \|\overline{k_d} - \overline{k_{da}}\| \quad \text{ec. (3.1.13).}$$

Al inicio del algoritmo se supone que la estructura no presenta daño y se calcula la matriz de transformación correspondiente al estado sin daño (paso 2). El algoritmo converge, durante el proceso iterativo, al estado dañado actual de la estructura, el cual se define por el vector $\{\overline{k_d}\}$.

Esto se logra si la matriz de transformación, utilizada en el paso 3, en la iteración $n+1$ se calcula por una fracción de la suma de los estados de daño obtenidos en las iteraciones anteriores n y $n-1$:

$$dk_{n+1} = \beta dk_n + (1 + \beta) dk_{n-1} \quad \text{ec. (3.1.14).}$$

Los diferentes valores del factor β pueden ser utilizados en cada iteración. El algoritmo encuentra el factor óptimo en términos del error mínimo haciendo uso de las ecuaciones 3.1.13 y 3.1.14. De esta manera, la matriz de transformación muestra un cambio gradual que permite la localización de elementos dañados por aproximaciones sucesivas.

Otra manera de terminar el proceso iterativo del algoritmo es definiendo una tolerancia de un valor máximo obtenido de la comparación que se realiza en el paso 8.

3.2 Mal comportamiento y propuestas de mejoramiento del MMT

Se ha identificado que el MMT presenta un mal comportamiento, en la convergencia del algoritmo, para estructuras con igual o mayor número de crujiás que de niveles. Los porcentajes de daño detectados tienden a tener grandes índices de error en comparación de estructuras esbeltas (Salmerón y Escobar, 2017).

Este problema se refleja en la dimensión “ $d \times n$ ” de la matriz $\{S_{kj}\}$. Ya que depende del acomodo estructural de los elementos y de la condensación estática lateral de la matriz de rigidez $[K]$.

En otras palabras, el algoritmo del MMT no puede ser resuelto cuando la matriz $\{S_{kj}\}$ sea subdeterminada; es decir:

$$d = \frac{gl(gl + 1)}{2} < n \quad \text{ec. (3.2.1)}$$

donde gl son los grados de libertad de la estructura condensada.

Otro mal comportamiento es dado por cantidad de memoria que necesitan las programaciones de computadora, cuando la cantidad de elementos de la estructura es más de setenta.

Una de las propuestas para mejorar el MMT es condensar de las matrices de rigidez $[K]$ y $[K_d]$, a los grados de libertad por entrepiso e igual al número de crujiás que tenga la estructura (Salmerón, 2018).

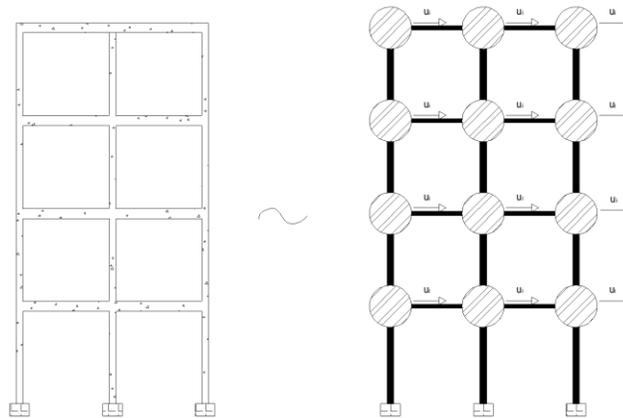


Figura 3.1. Edificio modelado como oscilador de una masa y grado de libertad por nodo.

Así, la matriz subdeterminada $[S_k]$, se resuelve si se consideran modelos dinámicos como osciladores con mayores grados de libertad por cada entrepiso. De forma que, la dimensión “ $d \times n$ ” de la matriz $[S_k]$, propicia que sea un sistema sobredeterminado:

$$d = \frac{gl(gl + 1)}{2} > n \quad \text{ec. (3.2.2)}$$

Esta ecuación lleva inmediatamente a que la solución, dentro del rango de la matriz $\{S_k\}$, garantice la solución única (Salmerón, 2018). Además, esta suposición, al no tener la misma finalidad que un análisis estructural, se puede afirmar que no perjudica en el resultado buscado.

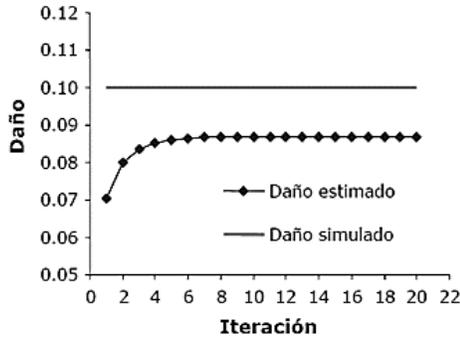
Otra mejora al MMT es la optimización durante el proceso de iteración del algoritmo, simplificando, principalmente, la matriz $[S_k]$. Por ejemplo, si se sabe *a priori* que existen elementos estructurales que no presentan daño, éstos pueden ser eliminados inicialmente en las columnas de la matriz para simplificar las incógnitas de la solución de ecuaciones. De la misma manera eliminar aquellas columnas de la matriz $[S_k]$ en la que los elementos convergen a un valor de daño 0.

También se puede optimizar el algoritmo, si después de la primera iteración de la ecuación 3.1.11 se sustituye el extremo izquierdo de la igualdad por la diferencia del vector $\{\bar{k}\} - \{\bar{k}_{da}\}$ (Guerrero, 2007),

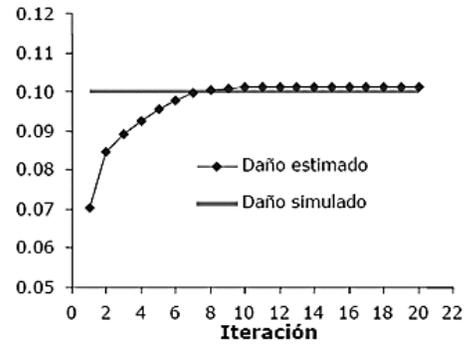
$$\{\bar{k}\} - \{\bar{k}_{da}\} = [S_k]\{\bar{d}_{xa}\} \quad \text{ec. (3.2.3)}$$

donde $\{\bar{d}_{xa}\}$ es la aproximación al vector de daño en cada iteración,

esto genera que la convergencia del algoritmo sea mayor y el número de iteraciones que pueda realizar hasta converger sean menores, como se muestra en la gráfica siguiente:



a) MMT tradicional



b) MMT con propuesta Guerrero (2007)

Gráfica 3.1. Daño estimado en cada iteración del MMT obtenida de: Héctor Guerrero (2007), Localización y cuantificación de daño estructural aplicado a elementos finitos, tesis de maestría

Con estas propuestas, no es necesario que la estructura sea simétrica para detectar daño con el MMT. La cantidad de estructuras que se puede detectar con el método aumentan, sin importar su configuración estructural.

A pesar de lo mucho que se ha avanzado con el MMT, no se contemplan estructuras con muros o elementos no prismáticos o de sección variable, entre otros.

3.3 Método de la Matriz de Transformación para estructuras con muros

Se buscó que el MMT se extienda a estructuras con muros. Para lograrlo se modelaron los muros como marcos rígidos sin perder sus propiedades mecánicas ni la aportación de rigidez a la estructura.

3.3.1 Metodología y formulación

El desarrollo para determinar el daño provocado en estructuras con muros estructurales, se determinó mediante un proceso completamente analítico.

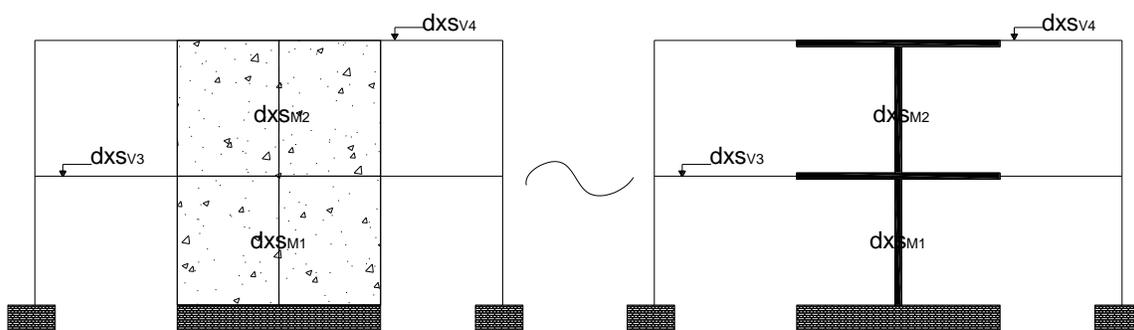
Se modeló una estructura a base de marcos rígidos y de muros como un modelo estructurado únicamente por marcos. Donde los muros de concreto se idealizaron como columnas anchas, y las vigas acopladas al muro, como vigas con una mayor rigidez en el extremo colindante del muro. Por otro lado, los muros de mampostería confinada, como diagonales equivalentes confinadas por columnas y trabes.

Al algoritmo se le asoció una matriz de rigidez global de daño $\{K_d\}$ del estado actual de la estructura, proponiendo el vector de daño $\{d_{x,s}\}$. Con este vector se reconstruyó la matriz de rigidez y se obtuvo la matriz de rigidez de daño analítico, del estado “actual” $\{K_{ds}\}$.

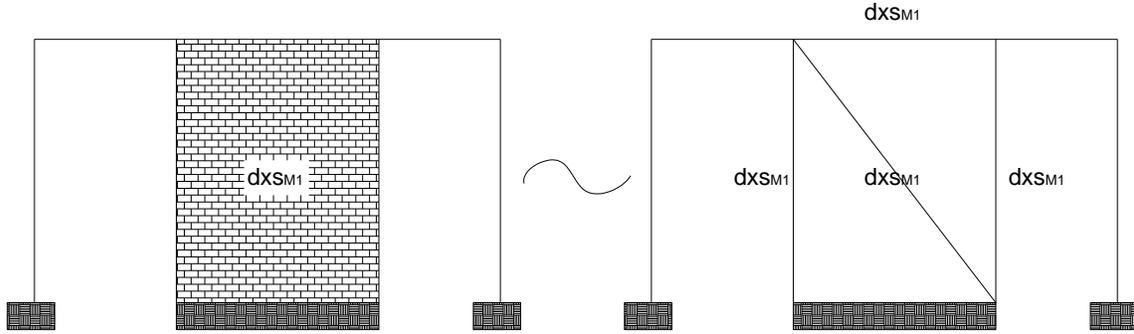
El daño propuesto asociado a los muros, se asignaron de la siguiente manera:

- Para muros como columnas anchas y vigas con sus extremos con mayor rigidez, el porcentaje de daño propuesto al muro se le asignó a la columna ancha y las vigas con extremos de mayor rigidez se les deja el daño que se propuso para las vigas inicialmente.
- Para muros confinados como diagonal equivalente, se asigna el mismo porcentaje de daño tanto a la diagonal equivalente como a los elementos confinadores.

En la figura 3.4 se ejemplifica mejor el modelamiento asociado con el daño de cada uno de los elementos estructurales modelados.



a) Daño asociado al modelado de muros de concreto como columnas anchas.



b) Daño asociado al modelado de muros de mampostería confinada a diagonal equivalente confinada por columnas y traves

Figura 3.2. Daño propuesto asociado a los muros estructurales, modelado por marcos rígidos.

Para los muros de concreto armado, la rigidez por cortante, se refleja en la matriz de rigidez de la columna ancha equivalente (Tena, 2007). Para la diagonal equivalente se refleja en el comportamiento del confinamiento de la mampostería con relación a los elementos confinadores (Bazán y Meli, 1983a; 1990b; 2002c).

Una vez definido el vector de daño $\{d_{xS}\}$, se reconstruyó la matriz de rigidez del estado actual $\{K_{das}\}$ y se definió la matriz de un estado no dañado $\{K\}$.

Después se obtuvo la matriz de masas $[M]$, la cual se definirá como una matriz de masa concentrada (Chopra, 2001). Esta matriz tiene la característica que sólo tiene valores en la diagonal principal conforme a cada entrepiso separados por claros:

$$[M]_i = \begin{bmatrix} m_1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & m_i \end{bmatrix} \quad ec. (3.3.1)$$

donde:

i representa la matriz de masas concentradas en el orden propuesto para el modelo masa-resorte.

Definidas las condiciones iniciales de la estructura y del modelo, se procedió a ejecutar el MMT con las propuestas de mejoramiento del algoritmo, Salmerón (2018) y Guerrero (2007). Se buscó que el método converja a la siguiente ecuación que es referida a un análisis puramente analítico:

$$\{\bar{k}\} - \{\bar{k}_{das}\} = [S_k]\{\bar{d}_{xa}\} \quad ec. (3.3.2)$$

donde el subíndice “S” representa los valores propuestos para un análisis de detección de daño no medido en campo o puramente analítico.

Por último, se determinó el error obtenido entre el estado de daño actual y el obtenido con el MMT, sin considerar el error instrumental que pueden tener las mediciones en campo:

$$E(\%) = \frac{\|d_{xa} - d_{xS}\|}{\|d_{xa}\|} \quad ec. (3.3.3)$$

Capítulo IV

Aplicación del MMT con muros estructurales

En éste capítulo se muestra una serie de ejercicios, en el que se analizaron diferentes estructuras con muros en dos dimensiones. Se buscó detectar daño con el MMT utilizando la metodología descrita.

Para todos los ejercicios se propusieron estructuras de concreto reforzado clase I (RCDF-NTC-Concreto-2017), el cual presenta las siguientes características:

$$f'c = 250 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad ec. (4.1.1)$$

$$E = 14000 * \sqrt{f'c} = 221359.44 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad ec. (4.1.2)$$

$$peso\ volumétrico\ \gamma = 2.2 \left(\frac{t}{m^3} \right) \quad ec. (4.1.3)$$

$$v = 0.2 \quad ec. (4.1.4)$$

donde “ v ” representa la relación de Poisson para el concreto.

$$G = \frac{E}{2(1+v)} = 92233.10 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad ec. (4.1.5)$$

Para el caso específico de los muros de concreto reforzado se considerará el área de la sección transversal efectiva a cortante como:

$$A_c = \frac{A_{mc}}{1.2} \quad ec. (4.1.6)$$

donde:

A_c es el área de la sección transversal efectiva a cortante y

A_{mc} es el área neta de la sección transversal del muro de concreto reforzado.

Por último, se definieron las propiedades de la mampostería confinada de tabique rojo recocido utilizando los valores del Reglamento de Construcciones del Distrito Federal en las Normas Técnica Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería (RCDF-NTC-Mampostería-2017):

$$f'm = 15 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad ec. (4.1.7)$$

donde $f'm$ es la resistencia a compresión de la mampostería,

$$E_m = 600 * f'm = 9000 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad ec. (4.1.8)$$

$$peso\ volumétrico\ \gamma = 1.3 \left(\frac{t}{m^3} \right) \quad ec. (4.1.9)$$

$$G_m = 0.2E_m = 1800 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad ec. (4.1.10)$$

Para los elementos confinadores:

$$f'c = 200 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad ec. (4.1.11)$$

$$E = 14000 * \sqrt{f'c} = 197989.8987 \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad ec. (4.1.12)$$

4.1 Estructura con muro al centro de concreto reforzado

Estructura de un marco plano de 5 niveles con 2 crujiás y un muro al centro de concreto reforzado. Se propuso un daño inicial mostrado en la figura 4.1 y se replanteó el modelo con el método de la columna ancha con su correspondiente factor de daño.

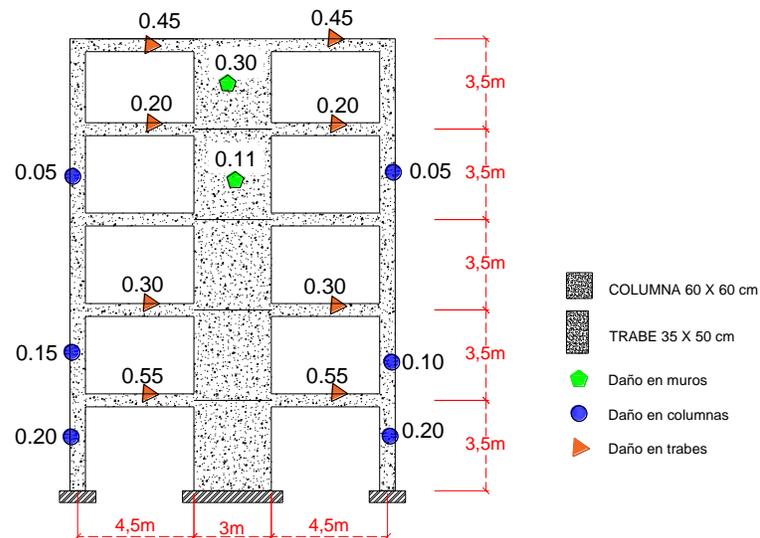


Figura 4.1 Marco plano de 5 niveles con 2 crujiás, asociado a un daño estructural del estado "actual".

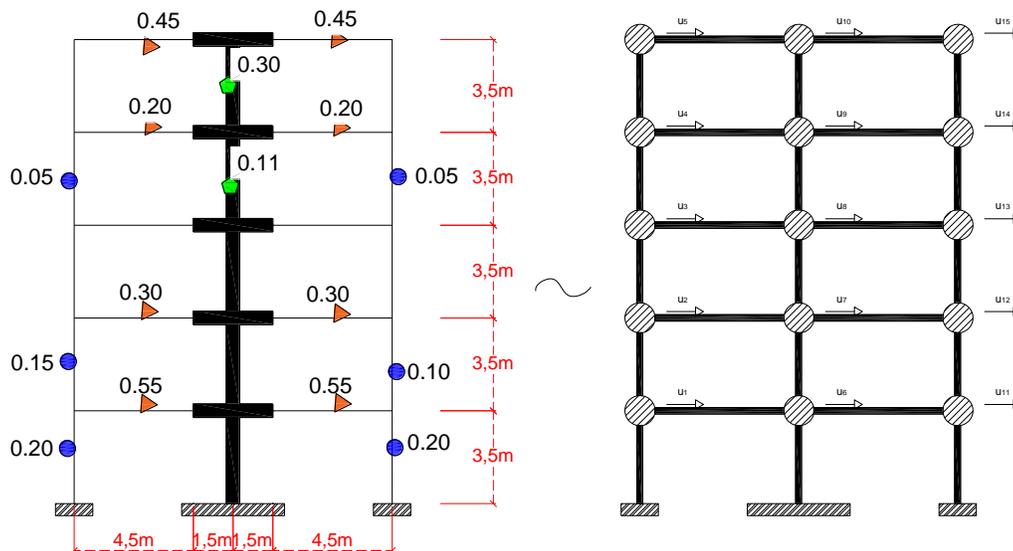


Figura 4.2 Modelo estructural analizada con columna ancha en lugar del muro, referenciando el modelo dinámico de oscilador con 15 masas y 15 grados de libertad condensados.

Las propiedades geométricas del muro se describen a continuación:

- Muro como columna ancha.

$$e_m = 35 \text{ cm} \quad \text{ec. (4.1.13)}$$

donde e_m es el espesor del muro.

Se definió el parámetro de rigidez a cortante asociado a un sistema de coordenadas globales. Para el primer nivel se muestra el análisis empleado:

$$\Omega = \frac{12EI}{GA_c L^2} = \frac{12 * 2213594.4 \left(\frac{t}{m^2}\right) * 0.7875(m^4)}{922331 \left(\frac{t}{m^2}\right) * 0.875(m^2) * (3.5(m))^2} \quad \text{ec. (4.1.14)}$$

$$\Omega = 2.1159 \quad \text{ec. (4.1.15)}$$

$$K_{ca6} = \begin{array}{c} \begin{array}{|cccccc|} \hline 156581.21 & 0.00 & -274017.12 & -156581.21 & 0.00 & -274017.12 \\ \hline & 664078.32 & 0.00 & 0.00 & -664078.32 & 0.00 \\ \hline & & 977588.70 & 274017.12 & 0.00 & -18528.78 \\ \hline & & & 156581.21 & 0.00 & 274017.12 \\ \hline & & & & 664078.32 & 0.00 \\ \hline & & & & & 977588.70 \\ \hline \end{array} \\ \text{SIMÉTRICA} \end{array} \quad \text{ec. (4.1.16)}$$

Del mismo modo se realizó para los demás elementos de la estructura.

- Viga con extremos de mayor rigidez.

Se definió la proporción de la distancia total del claro para determinar qué longitud aporta la rigidez inicial de la trabe y cuál, aporta una mayor rigidez de extremo a centro de trabe. A continuación, se presentan los valores de la trabe del primer nivel del lado izquierdo de la estructura:

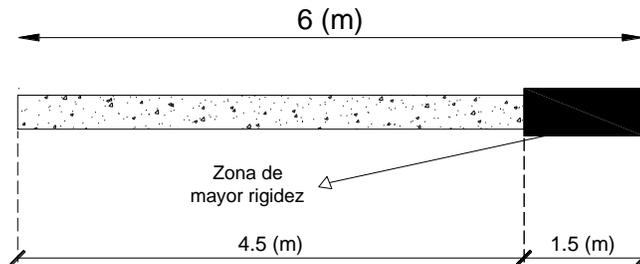


Figura 4.3 Trabe que indica las longitudes con diferente rigidez.

De manera que se obtuvieron los valores λ , Y y B :

$$Y = 0, \quad B = 0.25 \quad y \quad \lambda = 0.75 \quad ec. (4.1.17)$$

$$g = \frac{Y}{\lambda} = \frac{0}{0.75} = 0 \quad y \quad b = \frac{B}{\lambda} = \frac{0.25}{0.75} = 0.333 \quad ec. (4.1.18)$$

Con estos parámetros se obtuvo la matriz de rigidez de la trabe, referida a un sistema global:

$$K_{Vr16} = \begin{bmatrix} 86084.23 & 0.00 & 0.00 & -86084.23 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 1062.77 & 2391.23 & 0.00 & -1062.77 & 3985.38 \\ 0.00 & 2391.23 & 0.89 & 0.00 & -2391.23 & 7173.69 \\ -86084.23 & 0.00 & 0.00 & 86084.23 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & -1062.77 & -2391.23 & 0.00 & 1062.77 & -3985.38 \\ 0.00 & 3985.38 & 7173.69 & 0.00 & -3985.38 & 0.89 \end{bmatrix} \dots ec. (4.1.19)$$

De la misma forma se determinó la rigidez de cada uno de los elementos trabe.

Una vez obtenidas todas las matrices de rigidez locales $[k]$; se determinó la matriz de rigidez global de la estructura $[K]$. Se obtuvo la matriz condensada $[\bar{K}]$ y se recuperaron las formas modales de la estructura:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 99503 & -9589 & 3631 & -846 & 140 & 186 & -51 & -157 & 70 & -11 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 99495 & -9619 & 3475 & -570 & -51 & 368 & -109 & -102 & 22 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ & & 99360 & -8922 & 2339 & -157 & -109 & 422 & -248 & 24 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ & & & 96470 & -4256 & 70 & -102 & -248 & 808 & -505 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ & & & & 88456 & -12 & 22 & 24 & -505 & 466 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & & & & & 823774 & -223103 & 92051 & -22880 & 3814 & 186 & -51 & -157 & 70 & -12 \\ & & & & & & 815726 & -221318 & 86015 & -14328 & -51 & 368 & -109 & -102 & 22 \\ & & & & & & & 810233 & -198945 & 53937 & -157 & -109 & 422 & -248 & 24 \\ & & & & & & & & 725629 & -78150 & 70 & -102 & -248 & 808 & -505 \\ & & & & & & & & & 552036 & -11 & 22 & 24 & -505 & 466 \\ & & & & & & & & & & 99503 & -9589 & 3631 & -846 & 140 \\ & & & & & & & & & & & 99495 & -9619 & 3475 & -570 \\ & & & & & & & & & & & & 99360 & -8922 & 2339 \\ & & & & & & & & & & & & & 96470 & -4256 \\ & & & & & & & & & & & & & & 88456 \end{bmatrix}$$

SIMÉTRICA

ec. (4.1.20)

N° MASAS	Masas (tonf*s ² /m)	FORMAS MODALES			Frecuencias Naturales
		1	2	3	
1	0.3592	-0.000879	0.020465	0.024061	408.87
2	0.3592	0.001839	0.018291	-0.008923	250.56
3	0.3592	-0.003662	-0.010517	-0.016093	278.12
4	0.3592	0.004777	-0.022929	0.021518	241.23
5	0.2179	-0.047202	-0.001933	0.004336	326.36
6	1.0011	0	0	0	960.61
7	1.0011	0	0	0	585.56
8	1.0011	0	0	0	774.52
9	1.0011	0	0	0	523.32
10	0.5889	0	0	0	1265.29
11	0.3592	0.000879	-0.020465	-0.024061	408.86
12	0.3592	-0.001839	-0.018291	0.008923	250.55
13	0.3592	0.003662	0.010517	0.016093	278.1
14	0.3592	-0.004777	0.022929	-0.021518	241.23
15	0.2179	0.047202	0.001933	-0.004336	326.36

Tabla 4.1 Características dinámicas del modelo masa-resorte del ejercicio 1

Se aplicó el MMT para detectar el daño propuesto en el marco, obteniendo los siguientes resultados, mostrados en la figura 4.4:

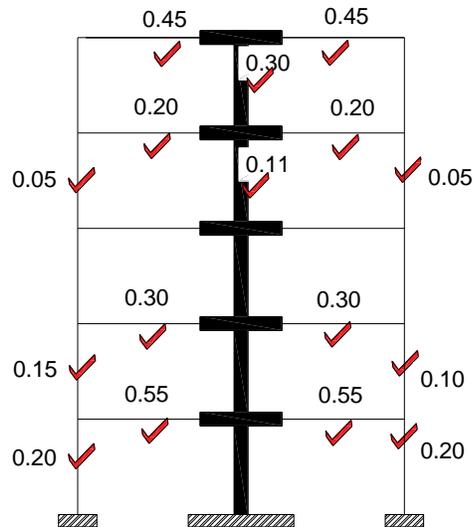


Figura 4.4 Daño estructural estimado con 3 iteraciones usando el MMT.

Como se puede observar, el Método de la Matriz de Transformación detectó el daño correctamente en todos los elementos estructurales, incluyendo el método de la columna ancha, con sólo tres iteraciones en el modelo. El error, utilizando la ec. 3.3.3, se obtuvo:

$$E(\%) = \frac{\|d_{xa} - d_{xs}\|}{\|d_{xa}\|} = 0.00\% \quad \text{ec. (4.1.21)}$$

4.2 Estructura con dos muros de concreto reforzado, centro y esquina

Estructura de un marco plano de 6 niveles con 4 crujiás, con dos muros de concreto reforzado al extremo izquierdo y al centro de la estructura. Se propuso un daño inicial mostrado en la figura 4.5 y se replanteó el modelo con el método de la columna ancha con su correspondiente factor de daño.

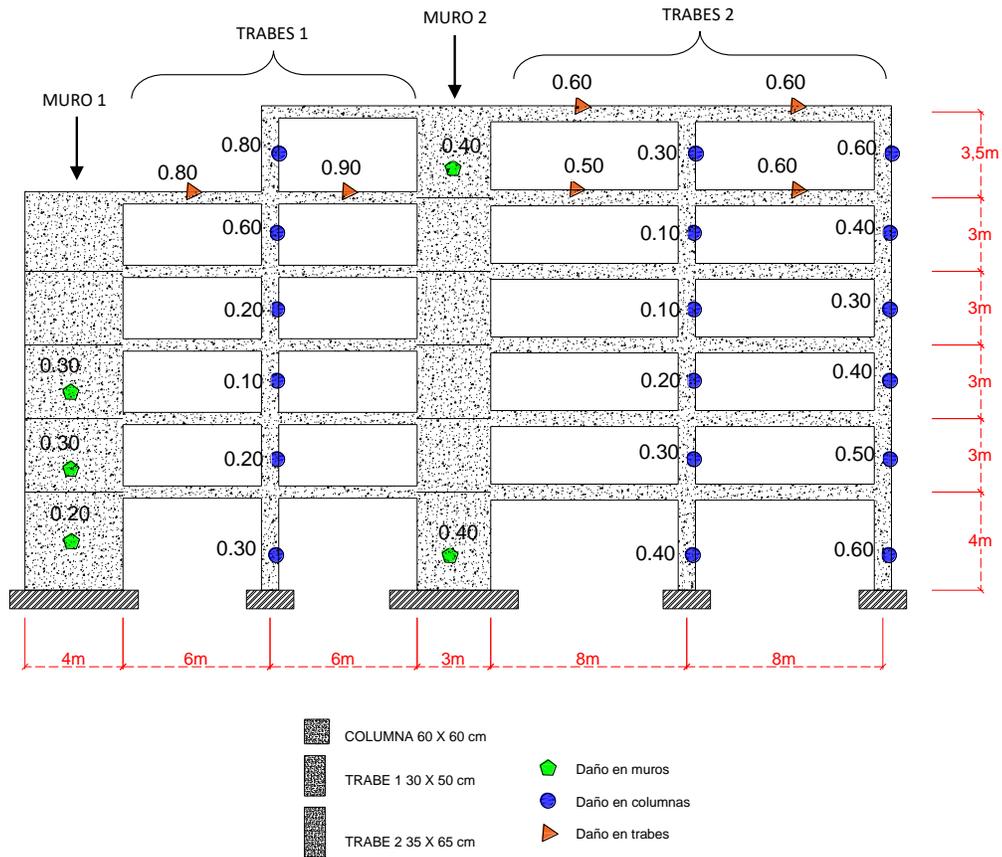


Figura 4.5 Marco plano de 6 niveles con 4 crujiás, asociado a un daño estructural del estado "actual".

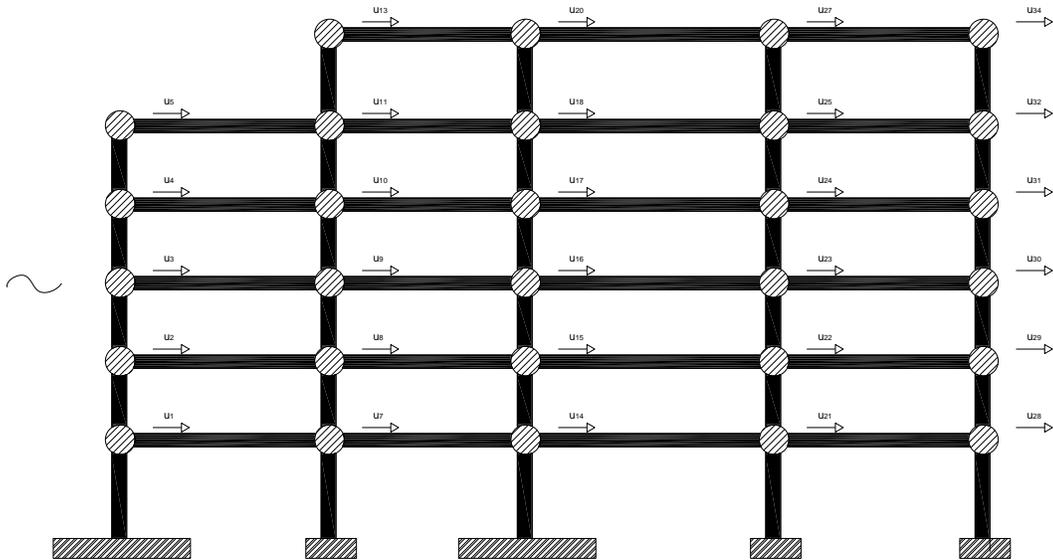
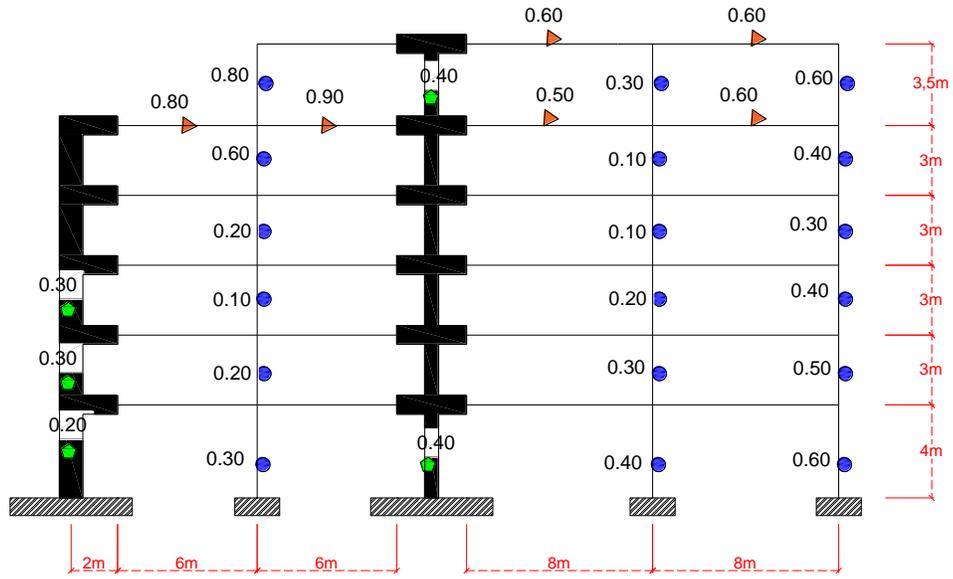


Figura 4.6 Modelo estructural analizada con columna ancha en lugar del muro, referenciando el modelo dinámico de oscilador con 29 masas y 29 grados de libertad condensados.

Las propiedades geométricas de los muros se describen a continuación:

- Muros como columna ancha.

$$e_{m1} = 40 \text{ cm} \quad y \quad e_{m2} = 30 \text{ cm} \quad \text{ec. (4.2.1)}$$

Se definió el parámetro de rigidez a cortante asociado a un sistema de coordenadas globales. Para el primer nivel se muestra el análisis empleado:

$$\Omega_1 = 2.88 \quad y \quad \Omega_2 = 1.62 \quad \text{ec. (4.2.3)}$$

$$K_{ca1} = \begin{array}{cccccc} 228205.61 & 0.00 & -456411.22 & -228205.61 & 0.00 & -456411.22 \\ & 885437.76 & 0.00 & 0.00 & -885437.76 & 0.00 \\ & & 2093406.11 & 456411.22 & 0.00 & -267761.25 \\ & & & 228205.61 & 0.00 & 456411.22 \\ & \text{SIMÉTRICA} & & & 885437.76 & 0.00 \\ & & & & & 2093406.11 \end{array} \quad \text{ec. (4.2.4)}$$

$$K_{ca14} = \begin{array}{cccccc} 106930.55 & 0.00 & -213861.10 & -106930.55 & 0.00 & -213861.10 \\ & 498058.74 & 0.00 & 0.00 & -498058.74 & 0.00 \\ & & 801266.26 & 213861.10 & 0.00 & 54178.15 \\ & & & 106930.55 & 0.00 & 213861.10 \\ & \text{SIMÉTRICA} & & & 498058.74 & 0.00 \\ & & & & & 801266.26 \end{array} \quad \text{ec. (4.2.5)}$$

Del mismo modo se realizó para los demás elementos.

- Viga con extremos de mayor rigidez.

Se definió la proporción de la distancia total del claro para determinar qué longitud aporta la rigidez inicial de la trabe y cuál, aporta una mayor rigidez de extremo a centro de trabe. A continuación, se presentan los valores de la trabe del primer nivel del tercer claro de la estructura:

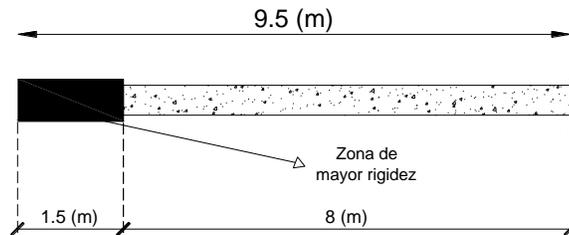


Figura 4.7 Trabe que indica las longitudes con diferente rigidez.

De manera que se obtuvieron los valores λ , Υ y B :

$$\Upsilon = 0.1579, \quad \text{B} = 0 \quad y \quad \lambda = 0.8421 \quad \text{ec. (4.2.6)}$$

$$g = \frac{\Upsilon}{\lambda} = \frac{0}{0.75} = 0.1875 \quad y \quad b = \frac{\text{B}}{\lambda} = \frac{0.25}{0.75} = 0 \quad \text{ec. (4.2.7)}$$

Con estos parámetros se obtuvo la matriz de rigidez de la trabe, referida a un sistema global:

$$K_{Vr48} = \begin{bmatrix} 55339.86 & 0.00 & 0.00 & -55339.86 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & 384.30 & 1921.52 & 0.00 & -384.30 & 1152.91 \\ 0.00 & 1921.52 & 6149.54 & 0.00 & -1921.52 & 4611.66 \\ -55339.86 & 0.00 & 0.00 & 55339.86 & 0.00 & 0.00 \\ 0.00 & -384.30 & -1921.52 & 0.00 & 384.30 & -1152.91 \\ 0.00 & 1152.91 & 4611.66 & 0.00 & -1152.91 & 6149.54 \end{bmatrix} \quad \text{ec. (4.2.8)}$$

De la misma forma se determinó la rigidez de cada uno de los elementos trabe.

Se aplicó el MMT para detectar el daño propuesto en el marco, obteniendo los siguientes resultados, mostrados en la figura 4.8:

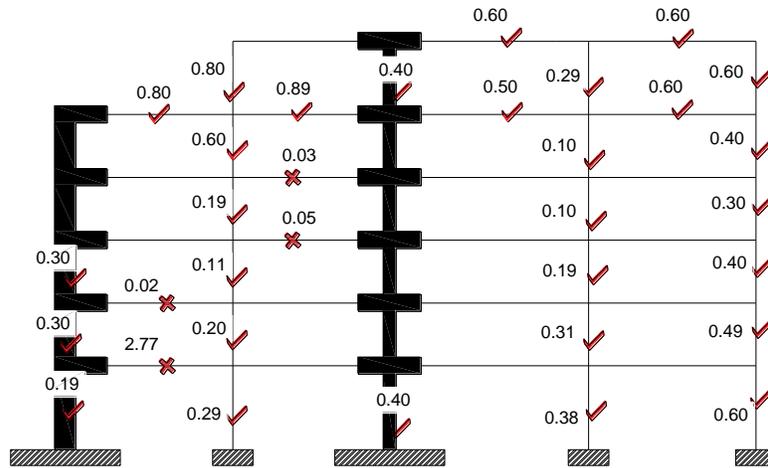


Figura 4.8 Daño estructural estimado con 10 iteraciones usando el MMT.

El MMT detectó el daño correctamente en la mayoría de los elementos ; en tres de ellos, indicó pérdida de rigidez en traveses acoplados a los muros con error de ± 0.03 aproximadamente. En una trabe indico una pérdida total la rigidez, cuando no se había indicado en esa sección.

Obteniendo el error porcentual, considerando todos los elementos se tiene que:

$$E(\%) = \frac{\|d_{xa} - d_{xs}\|}{\|d_{xa}\|} = 110.38\% \quad \text{ec. (4.2.10)}$$

Sin embargo, al descartar el elemento trabe con una pérdida total de rigidez, se obtiene un error de:

$$E(\%) = \frac{\|d_{xa} - d_{xs}\|}{\|d_{xa}\|} = 3.30\% \quad \text{ec. (4.2.11)}$$

4.3 Estructura con un muro al centro de mampostería confinada

Estructura de un marco plano de 5 niveles con 3 crujeías, con un muro al centro de mampostería confinada de tabique rojo recocido. Se propuso un daño inicial mostrado en la figura 4.9 y se replanteó el modelo con el método de la diagonal equivalente con su correspondiente factor de daño.

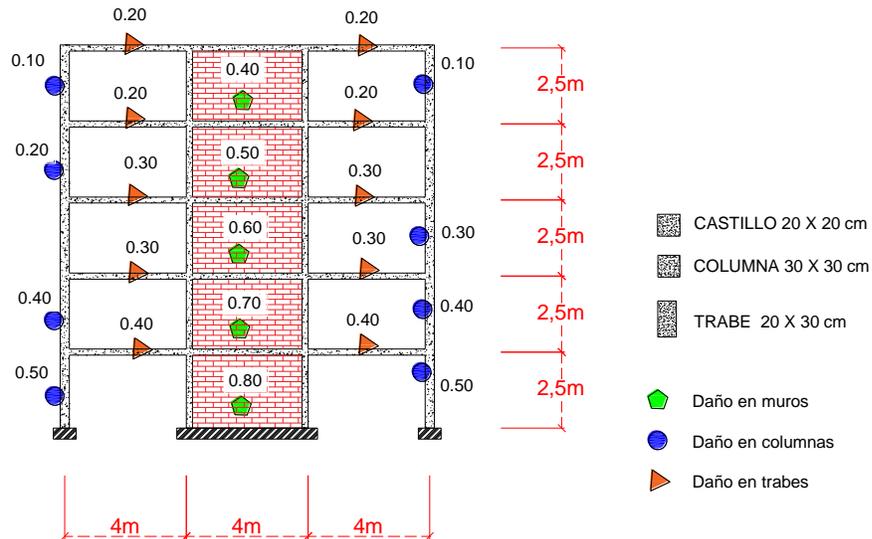


Figura 4.9 Marco plano de 5 niveles con 3 crujeías, asociado a un daño estructural del estado "actual".

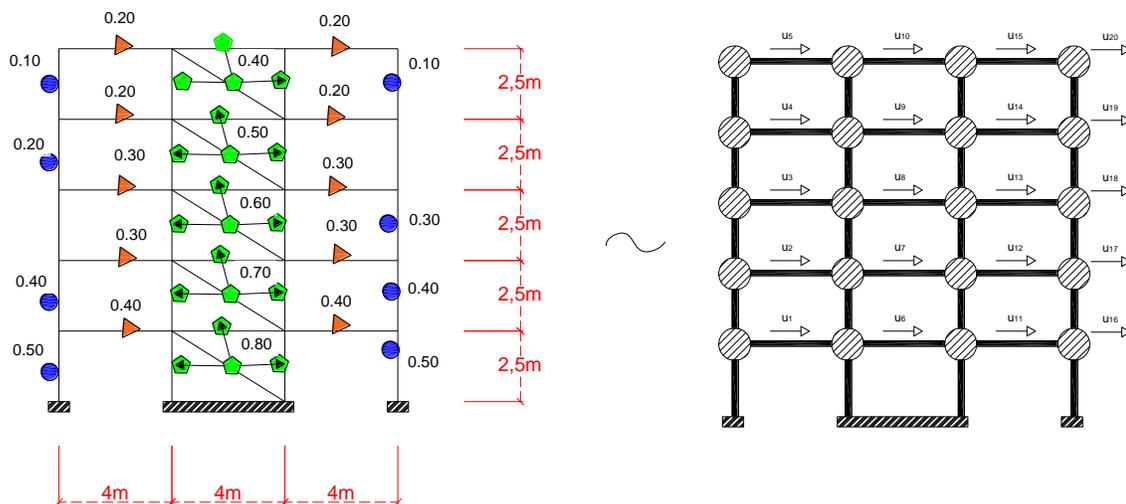


Figura 4.10 Modelo estructural analizada con diagonal equivalente, referenciando el modelo dinámico de oscilador con 20 masas y 20 grados de libertad condensados.

Las propiedades geométricas y los parámetros de relación del muro de mampostería confinada, se describen a continuación:

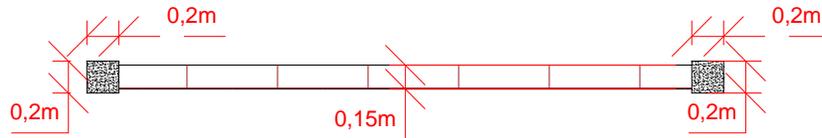


Figura 4.11 Corte mostrando la geometría del muro de mampostería con sus elementos laterales de confinamiento

Se revisó la relación, ancho entre altura, del muro confinado:

$$\zeta = \frac{b}{h} = \frac{4(m)}{2.5(m)} = 1.75 \quad \therefore \text{cumple} \quad \text{ec. (4.3.1)}$$

Se determinó el ancho ω y el área A_{eq} de la diagonal equivalente

$$h_m = 2.5(m) - 0.3(m) = 2.2(m) \quad \text{ec. (4.3.2)}$$

$$A_m = [4(m) - (2 * 0.2(m))][0.15] = 0.54(m^2) \quad \text{ec. (4.3.3)}$$

$$\lambda = \frac{197989.9 \left(\frac{kg}{cm^2}\right) * 0.2^2(m^2)}{1800 \left(\frac{kg}{cm^2}\right) * 0.54(m^2)} = 8.15 \quad \therefore \text{cumple} \quad \text{ec. (4.3.4)}$$

$$\omega_{deq} = (0.35 + 0.22 * 9.11) * 2.2(m) = 5.179(m) \quad \text{ec. (4.3.5)}$$

$$A_{eq} = 0.15(m) * 5.179(m) = 0.7769(m^2) \quad \text{ec. (4.3.6)}$$

Por último, se obtuvo la longitud de la diagonal para determinar la matriz de rigidez local referida a un sistema global:

$$L_{diag} = \sqrt{(3.6)^2 + (2.2)^2} = 4.23 \text{ (m)} \quad \text{ec. (4.3.7)}$$

$$K_{deq26} = \begin{bmatrix} 928.62 & 1485.79 & 0.00 & -928.62 & -1485.79 & 0.00 \\ 1485.79 & 2377.26 & 0.00 & -1485.79 & -2377.26 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ -928.62 & -1485.79 & 0.00 & 928.62 & 1485.79 & 0.00 \\ -1485.79 & -2377.26 & 0.00 & 1485.79 & 2377.26 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad \text{ec. (4.3.8)}$$

Se determinó la rigidez de las demás diagonales equivalentes, así como, las matrices de rigideces de los demás elementos $[k]_i$.

Se obtuvo la matriz condensada $[\bar{K}]$ y se recuperaron las formas modales de la estructura:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 35100 & -1143 & 378 & -81 & 13 & -33186 & 9 & -6 & 10 & -1 & -12 & -7 & -4 & -1 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ & 34756 & -1064 & 349 & -55 & -2 & -33177 & 5 & -3 & 3 & -2 & -13 & -7 & 2 & -1 & 0 & 2 & -1 & -1 & 0 \\ & & 34727 & -1006 & 249 & -14 & -8 & -33178 & -1 & -6 & 7 & 1 & -10 & 2 & 1 & -1 & -1 & 3 & -2 & 0 \\ & & & 34481 & -556 & 7 & -4 & 2 & -33145 & -23 & -8 & -8 & -19 & -7 & 4 & 1 & -1 & -2 & 5 & -3 \\ & & & & 33555 & -11 & -16 & -35 & -67 & -33177 & 19 & 28 & 45 & 4 & -4 & 0 & 0 & 0 & -3 & 3 \\ & & & & & 73418 & -602 & -300 & -289 & -1 & -29297 & 325 & 283 & 0 & 4 & -3 & -1 & 2 & -1 & 1 \\ & & & & & & 72671 & -1208 & -868 & 0 & -9415 & -28684 & 893 & -5 & 6 & 4 & -6 & -1 & 6 & -10 \\ & & & & & & & 72103 & -1806 & 27 & 1001 & -8848 & -28087 & -2 & 5 & 11 & 5 & -8 & 10 & -21 \\ & & & & & & & & 71395 & -165 & 888 & 1598 & -8146 & -29692 & 6 & 6 & 12 & 4 & 7 & -32 \\ & & & & & & & & & 63055 & -1 & -4 & -12 & -6 & -29690 & 0 & -1 & 1 & 4 & -4 \\ & & & & & & & & & & 72700 & -1206 & -863 & -2 & -6 & -33194 & 2 & -11 & 0 & 9 \\ & & & & & & & & & & & 72108 & -1801 & 25 & -10 & -9 & -33184 & 0 & -20 & 24 \\ & & & & & & & & & & & & 71408 & -196 & 10 & -19 & -14 & -33180 & -21 & 30 \\ & & & & & & & & & & & & & 63253 & -173 & 4 & -11 & -7 & -33166 & -23 \\ & & & & & & & & & & & & & & 63055 & -1 & 3 & -6 & -23 & -33177 \\ & & & & & & & & & & & & & & & 35100 & -1143 & 378 & -81 & 13 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & 34756 & -1064 & 349 & -55 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & 34727 & -1006 & 249 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & 34481 & -556 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & & & 33555 \end{bmatrix}$$

SIMETRICA

ec. (4.3.9)

N° MASAS	Masas (tonf*s ² /m)	FORMAS MODALES			Frecuencias Naturales
		1	2	3	
1	0.0754	0.004274	0.007206	0.021043	1.07
2	0.0754	0.010927	0.015906	0.02921	4.69
3	0.0754	0.017409	0.02079	0.003686	18.88
4	0.0754	0.023811	0.016119	-0.025243	53.2
5	0.0501	0.038436	-0.038825	0.008036	214.8
6	0.1474	0.004288	0.007176	0.020441	299.37
7	0.173	0.010897	0.015801	0.028216	649.32
8	0.173	0.017429	0.020327	0.003817	681.2
9	0.173	0.023603	0.016773	-0.025181	635.18
10	0.1121	0.038492	-0.039146	0.008368	718.47
11	0.1474	0.005546	0.00934	0.025332	964.19
12	0.173	0.012076	0.017251	0.026275	221.67
13	0.173	0.018402	0.020143	-0.002186	228.47
14	0.173	0.024054	0.016146	-0.028141	88.91
15	0.1121	0.03849	-0.039156	0.008353	245.48
16	0.0754	0.005497	0.009324	0.025862	1198.2
17	0.0754	0.012122	0.017378	0.027275	803.92
18	0.0754	0.018378	0.020617	-0.00251	819.74
19	0.0754	0.024267	0.015495	-0.028375	824.41
20	0.0501	0.038431	-0.038848	0.008009	918.03

Tabla 4.3 Características dinámicas del modelo masa-resorte del ejercicio 3

Se aplicó el MMT para detectar el daño propuesto en el marco, obteniendo los siguientes resultados, mostrados en la figura 4.12:

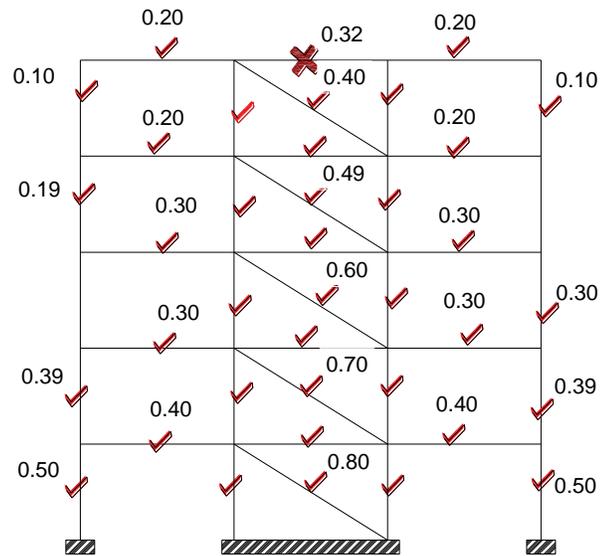


Figura 4.12 Daño estructural estimado con 3 iteraciones usando el MMT.

El MMT detectó el daño correctamente en la mayoría de los elementos estructurales, incluyendo la diagonal equivalente. Sin embargo, en los elementos confinadores, se presentó un error de $\pm 0.01\%$:

$$E(\%) = \frac{\|d_{xa} - d_{xs}\|}{d_{xa}} = 2.46\% \quad \text{ec. (4.3.10)}$$

4.4 Estructura a base de mampostería confinada y marcos en esquina

Estructura de un marco plano de 3 niveles con 4 crujeías, con muros de mampostería confinada de tabique rojo recocido. Se propuso un daño inicial mostrado en la figura 4.13 y se replanteó el modelo con el método de la diagonal equivalente con su correspondiente factor de daño.

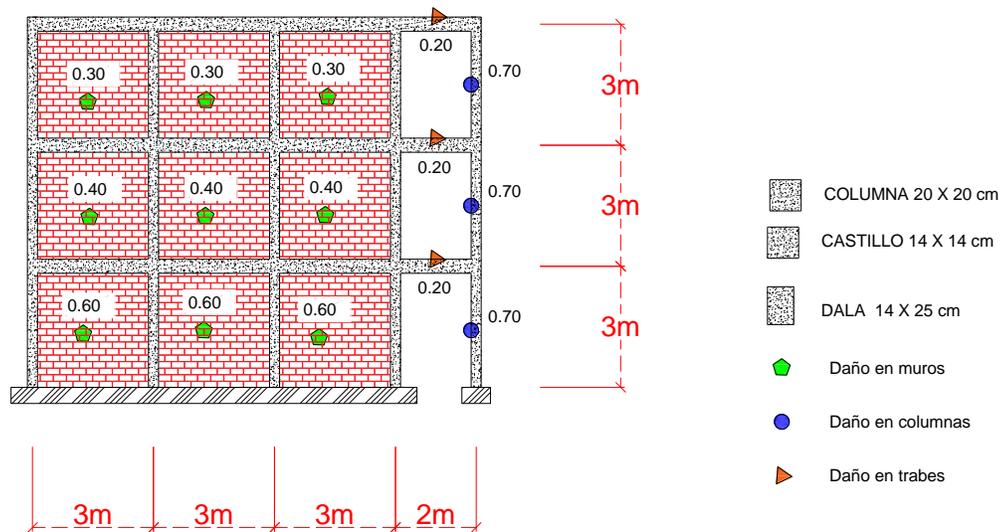


Figura 4.13 Marco plano de 3 niveles con 4 crujeías, asociado a un daño estructural del estado "actual".

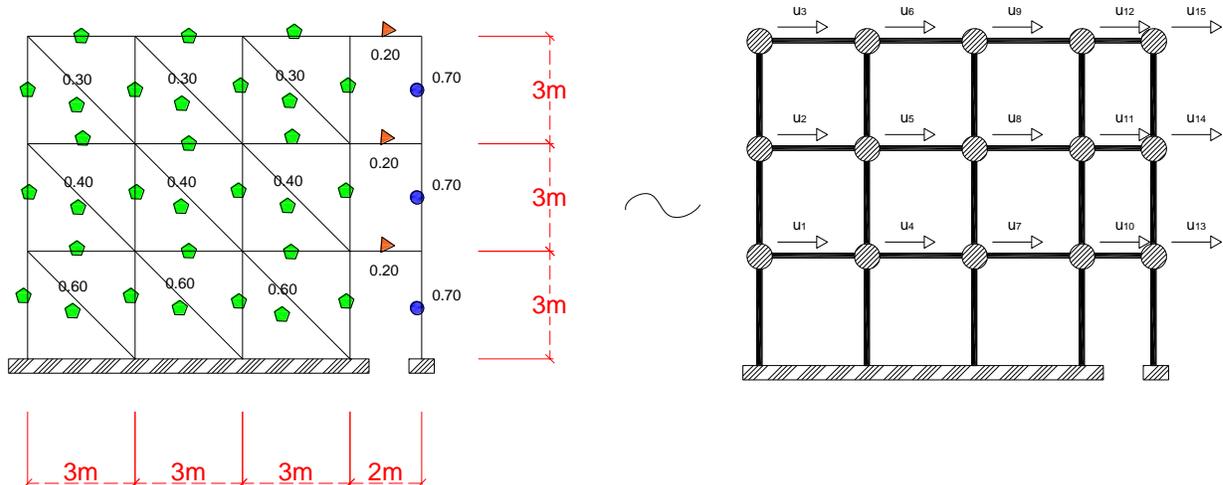


Figura 4.14 Modelo estructural analizada con diagonal equivalente, referenciando el modelo dinámico de oscilador con 15 masas y 15 grados de libertad condensados.

Las propiedades geométricas y los parámetros de relación del muro de mampostería confinada, se describen a continuación:

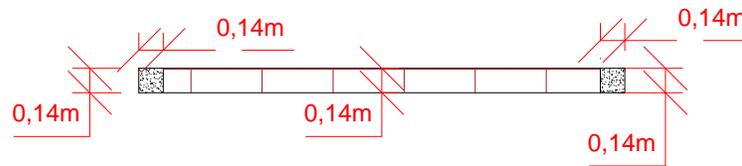


Figura 4.15 Corte mostrando la geometría del muro de mampostería con sus elementos laterales de confinamiento

Se revisó la relación, ancho entre altura, del muro confinado.

$$\zeta = \frac{b}{h} = \frac{3(m)}{3(m)} = 1 \quad \therefore \text{cumple} \quad \text{ec. (4.4.1)}$$

Se determinó el ancho ω y el área A_{eq} de la diagonal equivalente.

$$h_m = 3(m) - 0.25(m) = 2.75 (m) \quad \text{ec. (4.4.2)}$$

$$A_m = [3(m) - 0.14(m)][0.14] = 0.4004 (m^2) \quad \text{ec. (4.4.3)}$$

$$\lambda = \frac{197989.8987 \left(\frac{kg}{cm^2}\right) * 0.14^2(m^2)}{1800 \left(\frac{kg}{cm^2}\right) * 0.4004 (m^2)} = 5.38 \quad \therefore \text{cumple} \quad \text{ec. (4.4.4)}$$

$$\omega_{deq} = (0.35 + 0.22 * 5.38) * 2.75(m) = 4.2174(m) \quad \text{ec. (4.4.5)}$$

$$A_{eq} = 0.14(m) * 4.2174(m) = 0.5904 (m^2) \quad \text{ec. (4.4.6)}$$

Por último, se obtuvo la longitud de la diagonal para determinar la matriz de rigidez local referida a un sistema global:

$$L_{diag} = \sqrt{(2.86)^2 + (2.75)^2} = 3.97 \text{ (m)} \quad \text{ec. (4.4.7)}$$

$$K_{deq16} = \begin{bmatrix} 1338.52 & 1338.52 & 0.00 & -1338.52 & -1338.52 & 0.00 \\ 1338.52 & 1338.52 & 0.00 & -1338.52 & -1338.52 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \\ -1338.52 & -1338.52 & 0.00 & 1338.52 & 1338.52 & 0.00 \\ -1338.52 & -1338.52 & 0.00 & 1338.52 & 1338.52 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 & 0.00 \end{bmatrix} \quad \text{ec. (4.4.8)}$$

Se determinó la rigidez de las demás diagonales equivalentes, así como, las matrices de rigideces de los demás elementos $[k]_j$.

Se obtuvo la matriz condensada $[\bar{K}]$ y se recuperaron las formas modales de la estructura:

$$\bar{K} = \begin{bmatrix} 27776 & -784 & -474 & -22624 & 243 & -145 & 145 & 79 & -35 & 67 & 35 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ & 26803 & -1325 & -2931 & -21758 & 23 & -12 & -5 & 10 & -17 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 25951 & 1410 & -2159 & -22710 & -401 & -190 & 108 & -192 & -112 & -1 & 1 & 1 & -3 \\ & & & 53293 & -2103 & -398 & -22710 & 202 & -107 & 197 & 108 & 1 & -1 & 0 & 3 \\ & & & & 51600 & -1588 & -2659 & -21648 & -67 & 109 & 72 & -1 & -1 & 0 & 2 \\ & & & & & 49094 & 1372 & -2236 & -22790 & -633 & -300 & -5 & 3 & 1 & -8 \\ & & & & & & 53336 & -2029 & -320 & -22476 & 320 & 4 & -4 & -5 & 10 \\ & & & & & & & 51591 & -1582 & -3113 & -21549 & 6 & 1 & -7 & -1 \\ & & & & & & & & 48884 & 1240 & -2656 & -23099 & 14 & 19 & -37 \\ & & & & & & & & & 65641 & -1271 & 0 & -38740 & 5 & 9 \\ & & & & & & & & & & 64539 & -26 & -14 & -38753 & 34 \\ & & & & & & & & & & & 61862 & -1 & -2 & -38735 \\ & & & & & & & & & & & & 38972 & -130 & 23 \\ & & & & & & & & & & & & & 38937 & -95 \\ & & & & & & & & & & & & & & 38812 \end{bmatrix}$$

SIMÉTRICA

ec. (4.4.9)

N° MASAS	Masas (tonf*s ² /m)	FORMAS MODALES			Frecuencias Naturales
		1	2	3	
1	0.1079	0.010907	-0.025849	-0.043966	3.72
2	0.1079	0.023964	0.021675	0.026983	67.37
3	0.0596	0.033688	-0.013027	0.018301	140.86
4	0.2027	0.01192	-0.023542	-0.025528	539.69
5	0.2027	0.025043	0.024332	0.018294	322.87
6	0.1126	0.034355	-0.017066	0.00989	2571.34
7	0.2027	0.013117	-0.020544	0.01185	195.88
8	0.2027	0.026266	0.028024	-0.009592	112.76
9	0.1126	0.035236	-0.023096	-0.003224	309.55
10	0.1152	0.01476	-0.018107	0.037064	797.19
11	0.1152	0.027137	0.032681	-0.036446	30.33
12	0.0669	0.035726	-0.030727	-0.007461	444.43
13	0.034	0.014786	-0.018962	0.041839	1538.36
14	0.034	0.027221	0.034426	-0.041231	461.85
15	0.0205	0.035794	-0.031743	-0.008155	1549.76

Tabla 4.4 Características dinámicas del modelo masa-resorte del ejercicio 4

Se aplicó el MMT para detectar el daño propuesto en el marco, obteniendo los siguientes resultados, mostrados en la figura 4.16:

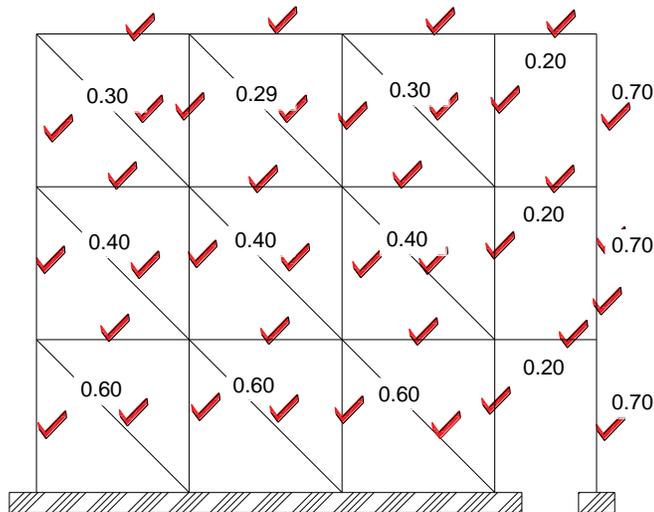


Figura 4.16 Daño estructural estimado con 3 iteraciones usando el MMT.

El MMT detectó el daño correctamente en la mayoría de los elementos, incluyendo la diagonal equivalente. Sin embargo, los elementos confinadores, presentaron un error muy pequeño de alrededor de $\pm 0.01\%$, con sólo tres iteraciones en el modelo.

$$E(\%) = \frac{\|d_{xa} - d_{xs}\|}{\|d_{xa}\|} = 0.02\% \quad ec. (4.4.10)$$

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Con ayuda de las propuestas y mejoras, se ha podido utilizar el Método de la Matriz de Transformación para otro tipo de estructuras, como aquellas con muros, los cuales son muy utilizados en el diseño y construcción alrededor del mundo.

Los métodos utilizados para modelar los diferentes tipos de muros, de acuerdo a su comportamiento estructural, cumplen con la finalidad de modelar una estructura como marcos rígidos, de manera que el MMT localice y cuantifique el daño propuesto.

De los ejemplos de aplicación, se puede observar el comportamiento que tiene el MMT con diferentes tipos de estructuraciones y configuraciones de edificios. Se destaca que el error porcentual fue pequeño, por lo que las suposiciones de donde definir el daño en un muro fue asertiva.

A pesar de las bondades del MMT, existen algunas inconveniencias con el método. Una de ellas es la capacidad que puede tener un software al programar el MMT, dado que se necesita una gran capacidad de memoria para operar las variables de la matriz $[S_k]$ mientras se desarrollan las iteraciones.

El ejemplo 2 propuesto hace notar las inconveniencias para la programación método; dado que se cuenta con un mayor número de elementos estructurales, la matriz $[S_k]$ necesita una programación con una gran capacidad de memoria. Se sugiere trabajar en una programación que optimice la capacidad de procesar datos.

Se apreció el comportamiento del MMT con los elementos que no son totalmente verticales ni horizontales, como las diagonales equivalentes. En los ejercicios 3 y 4 se notó que la dirección de la diagonal afecta a los elementos confinadores, pues presenta una pequeña variación de entre 0.01 y 0.02 de error de éstos elementos.

Los ejemplos propuestos se determinaron a partir de condiciones ideales en la recopilación de información de campo, como información modal completa y buena instrumentación sin ruido. Se recomienda utilizar los diferentes tipos de estructuras con muros instrumentadas en campo, donde se pueda comparar los resultados medidos con el MMT para detectar daño.

El comportamiento la diagonal equivalente, toma importancia cuando se quiere determinar cómo pierde rigidez el muro. Si se sabe que las fallas en muros de mampostería ocasionadas por fuerzas sísmicas son en diagonal, se propone trabajar con el MMT de manera local al elemento estructural. Se puede modelar el muro de mampostería, con diferentes secciones asociadas a esfuerzos y aplicar el MMT de manera local, de tal forma que se localice y se cuantifique una pérdida de rigidez del muro por seccionamiento.

Los cuatro diferentes niveles de evaluación de daño propuestos por Rytter (1993) es una tarea difícil, sin embargo, el MMT ha estado evolucionando para poder cumplir con todo ellos. Aun cuando hace falta optimizar más el método, se sabe que una buena ruta a seguir es recopilar todo lo realizado en esta tesis, investigaciones y trabajos previos acerca del MMT. De manera que la detección de daño pueda aplicarse a estructuras como domos, tanques, tuberías, entre muchos otros.

Lograr detectar daño en cualquier estructura con el MMT tiene que ser de trabajo continuo, con análisis más complejos como el seccionamiento de estructuras utilizando el método de elementos finitos, de forma que se pueda llegar a una predicción de vida útil o una restauración de la estructura.

Capítulo VI

Referencias

1. Arroyo, R., Magallanes, N., Miranda, Z., y Julio C. (2002), "Comportamiento Estructural de Edificios con Distribución Asimétrica de Muros Mampostería Confinados por Marcos de Concreto, Ubicados en la Ciudad de Chilpancingo, GRO". XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puebla, México.
2. Bazán, E., y Meli, R. (1983). "Manual de Diseño Sísmico de Edificios de acuerdo al Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal", Series del Instituto de Ingeniería D-18, Instituto de Ingeniería UNAM, México.
3. Bazán, E., y Meli R. (1990). "Manual de Diseño Sísmico de Edificios", Limusa, México, pp. 236.
4. Bazán, Enrique y Meli Roberto (2002). *Diseño Sísmico de Edificios*. Limusa, México, pp. 317.
5. Camba C., Chacón G., y Pérez A. (1982). "Apuntes de Análisis Estructural I". Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México, pp. 133.
6. Casarrubia, Y. (2016). "Evaluación de la rigidez efectiva de muros de concreto reforzado", (Tesis de Master), UNAM, México.
7. Colegio de México (2019). "Diccionario del español de México". Recuperado de: dem.colmex.mx.
8. Escobar, J., Sosa, J., y Gómez, R (2001), "Damage detection in framed building structures", Canadian Journal of Civil Engineering, Canadá.
9. Galiote, M. (2010). "Detección de daño en estructuras a partir de su instrumentación sísmica". Ciencia, Tecnología e Innovación para el Desarrollo de México, publicación de Tesis de Master: A7-0006-DF-2007-MT, recuperado de: pcti.mx
10. Guerrero, Héctor (2007). "Localización y cuantificación de daño estructural aplicado a elementos finitos." (Tesis de Master), UNAM, México.
11. Lourenco, P. (1996), "Computational Strategies for Masonry Structures". Delft University Press, Thesis Delft University of Technology, Netherlands, pp. 210.
12. McCormac, J. (2010). "Structural Analysis: Using Classical and Matrix Methods", Alfaomega, México.

13. Meli, R. (2011). "Diseño Estructural", Limusa, México, pp. 596.
14. Molina S., Salgado, R., Zamora, S., y Lagunes, E. (2012). "Detección de Daño en Puentes Mediante un Modelo Experimental, XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, SMIE, Acapulco, Guerrero, México.
15. Molina, J. (1992). "Análisis Estructural con Elementos Finitos", (Tesis de Master), UANL, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México.
16. RCDF-NTCDCEC (2017), "Reglamento de Construcción del Distrito Federal y las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto de septiembre del 2017", Diario Oficial de Federación, México.
17. RCDF-NTCDCEM (2017), "Reglamento de Construcción del Distrito Federal y las Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras de Mampostería de diciembre del 2017", Diario Oficial de Federación, México.
18. Restrepo, J., Rodríguez, M., y Torres, M. (2015), "Evaluación de la Rigidez Lateral Efectiva de Columnas de Concreto Reforzado", Series del Instituto de Ingeniería, UNAM, Publicación Arbitrada SID 697, pp. 143.
19. Rytter, A. (1993). "Vibration based inspection of civil engineering structures" Ph.D. Dissertation, Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University, Denmark.
20. Salmerón, M (2018), "Evolución del método de la matriz de transformación para detección de daño estructural: marcos planos asimétricos", Tesis de licenciatura, UNAM, México.
21. Tomazevic, M. (1999), "Earthquake – Resistant Design of Masonry Buildings". Imperial College Press, London, Vol. I, pp. 268.
22. Trujillo, Ricardo (2004), "Modelo de Muros Diafragma para Análisis Dinámico". (Tesis de Master), UNAM, México.
23. Villareal, C (2009), "Análisis Estructural", Lima, Perú, pp. 327.