



DETERMINACIÓN DE EFECTOS FLEXO-TORSIONALES AL ANALIZAR PERFILES DE COMPORTAMIENTO DE CENTROS DE MASAS Y ESFUERZOS CORTANTES EN COLUMNAS.

■ Douglas Guillen

email: douglasguillenr@gmail.com

Universidad Católica Andrés Bello

Caracas, Venezuela

RESUMEN

Hoy en día no es posible predecir la posición en que se produce un evento sísmico, por lo tanto, existe un amplio rango de direcciones posibles en que un sismo puede incidir sobre una estructura. Esto representa un problema ya que se generan diferentes respuestas dependiendo de la Línea de Acción de Fuerza (LAF) de la carga sísmica, dejando como incógnita la dirección en que se producen los efectos más adversos en la estructura, tales como, los mayores desplazamientos y esfuerzos posibles en sus elementos. A través de los métodos empleados en este trabajo se puede

Fecha de Recepción: 20 de Mayo 2016
Fecha de Aceptación: 10 de Noviembre 2016

determinar la LAF de una carga sísmica que produce la respuesta flexo-torsional más extrema en relación a los mayores esfuerzos cortantes en columnas, al observar ciertos patrones que ocurren en todos los desplazamientos posibles de los Centros de Masas (CM) de cada nivel.

Esto tiene una gran relevancia hoy en día para la ingeniería estructural ya que es necesario que se profundice más en el tema de la flexo-torsión para realizar análisis estructurales bajo las condiciones más extremas que se puedan producir durante un sismo, y así, prever efectos indeseables en elementos importantes de la estructura como las columnas, de modo que se pueda realizar de una forma más clara y menos compleja un proceso de optimización estructural.

Palabras Clave: Flexo-torsión Perfil de Comportamiento Desplazamientos Optimización -

ABSTRACT

Certainly at present time, it is not possible to predict the position where a seismic event might occur; in consequence, there is a wide range of possible directions in which an earthquake can affect a structure. This represents a problem because different responses are generated depending on the Line of Action of the seismic load (Line of Action of the force, LAF), and the direction which produces the most adverse effects in the structure, such as, the highest possible displacements and the highest possible stresses on its elements, is still not easy to determine. Due to the methods used in this study, the LAF that produces the most unfavorable flexo-torsional response associated to the maximum shear stresses in columns, can be determined by observing certain patterns that occur in all possible displacements of Mass Centers (CM) on each level of a structure.

This has great relevance for structural engineering because a deeper understanding of flexo-torsional effects during structural analysis can determine the most extreme conditions that may occur throughout a seismic event, and thus, foreseeing undesirable effects on important elements such as columns. Accordingly, it could be possible to realize a structural optimization process in a less complex and clearer way.

Keywords: Flexo-torsion Behavioral Profile Displacements Optimization

1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo tiene una influencia notable en contribuir con toda una línea de investigación desarrollada por el ingeniero Mario Paparoni. Dichas investigaciones buscan profundizar en el conocimiento del efecto de flexo-torsión, relacionando tres puntos importantes en el análisis sísmico de estructuras: efectos de desplazamiento, esfuerzos en elementos estructurales y excentricidades entre el CM y el CR; de modo que, al observar ciertos patrones o perfiles de comportamiento estructural se haga evidente cuales son los casos más extremos que posiblemente puedan producirse durante un sismo que pueda incidir en cualquier dirección y por ende se pueda realizar un proceso de análisis de una forma más efectiva, y por supuesto más lógica, ya que las normas se basan en procedimientos estáticos y dinámicos que analizan sólo dos direcciones generalmente con elementos analíticos y/o estadísticos que pueden ser "efectivos", pero que al final no abordan el problema de fondo que es cómo encontrar el punto débil de la estructura en estudio, o en otras palabras la dirección en la cual al aplicar una carga sísmica se produzcan los desplazamientos o esfuerzos más extremos en sus elementos.

Cuando una estructura se encuentra

bajo la incidencia de una carga sísmica, se generan esfuerzos y deformaciones en sus elementos. Si la dirección de esta carga cambia, estas respuestas también lo hacen dependiendo de la configuración del sistema estructural.

Al aplicar múltiples casos de cargas sísmicas con una magnitud constante y direcciones que varían en 360° se obtiene un grupo de respuestas que conforman lo que se define como un **Perfil de Comportamiento**, dicho perfil aporta información precisa acerca de todas las respuestas posibles que pueda tener una estructura debido a una carga sísmica determinada que pueda incidir en cualquier dirección. En esta investigación se utilizan los perfiles de comportamiento que se generan en un grupo de estructuras para estudiar todos los desplazamientos posibles de los centros de masas (CM) en cada nivel y relacionar estos desplazamientos con los esfuerzos cortantes que se producen en las columnas para que de esta manera se pueda establecer un criterio eficiente que sirva para identificar la Línea de Acción de Fuerza (LAF) que produce los efectos más adversos.

Gracias a las herramientas de software que existen hoy en día como SAP, ETABS, y otros, se puede manejar cada vez más información de una manera muy eficiente, es por ello que una de las premisas de este trabajo es la evolución del análisis estructural a través de perfiles de comportamiento ya que estas herramientas lo hacen posible.

2. METODOLOGÍA

Esta investigación se basa en modelar los efectos flexo-torsionales de tres estructuras de múltiples plantas a través del software de análisis estructural ETABS, aplicando una carga sísmica de magnitud constante con direcciones que varían en 360° , además se analizan varios casos al modificar la ubicación de los centros de masas de cada nivel para generar distintos perfiles de comportamiento en estas estructuras.

La intención inicial en este trabajo es analizar de la manera más simple los problemas que se plantean, para que al observarlos en detalle se tenga una visión mucho más amplia de ellos, obteniendo así, mayores avances en el tema. Las investigaciones a posteriori añadirán casos cada vez más complejos que involucren problemas que aquí se excluyen. Es por ello que los modelos utilizados constan de tres estructuras (Figura 1, 2 y 3), donde:

1. Los Centros de Rigidez (CR) se mantienen constantes y coinciden con el centro geométrico de cada planta, de modo que sea mucho más simple variar en distintos casos los centros de masas, para que al aplicar las cargas sísmicas se obtengan los perfiles de comportamiento necesarios.
2. Los materiales se encuentran en su rango elástico lineal, ya que incursionar en la no-linealidad o estado plástico del material involucra toda una serie de problemas que a pesar de ser vitales, están fuera o simplemente, no contribuyen al objetivo inicial de este trabajo en particular.
3. Las columnas están empotradas en su base y no cambian su sección con la altura, para que en primer lugar no se aborde, por ejemplo, un problema de interacción suelo-estructura que implique coeficientes de balasto, etc. En segundo lugar, a pesar que

siempre es recomendable que las columnas disminuyan su sección con la altura ya que en general las cargas que deben ser soportadas van disminuyendo en vertical, en esta investigación se busca que su sección transversal sea constante, y así, se mantenga la rigidez de nivel a nivel para observar de mejor manera las diferencias en el comportamiento entre cada uno de estos niveles.

4. Diafragmas idealmente rígidos, ya que el diafragma flexible es un caso especial que añade más variables de desplazamientos, obstaculizando así la definición de los perfiles de comportamiento.

5. Condiciones de la Cargas Sísmica: En el análisis sólo se tomó en cuenta exclusivamente el efecto horizontal del sismo y

se eliminó cualquier tipo de carga vertical como peso propio, cargas permanentes, cargas variables y otras. Las distintas interacciones que se producen entre las cargas verticales y sus efectos sísmicos son problemas que se deben abordar posteriormente en otra investigación; por ende, no se pudo utilizar los métodos estáticos propuestos por las normas como el Método Estático Equivalente (COVENIN) o el Equivalent Lateral Load Procedure (ASCE) para definir la magnitud y distribución de la carga sísmica ya que estas se basan en el peso del edificio entre otros factores. Sin embargo, la magnitud de la carga sísmica no fue relevante en esta investigación ya que el enfoque principal es determinar la dirección que produce efectos más extremos en la

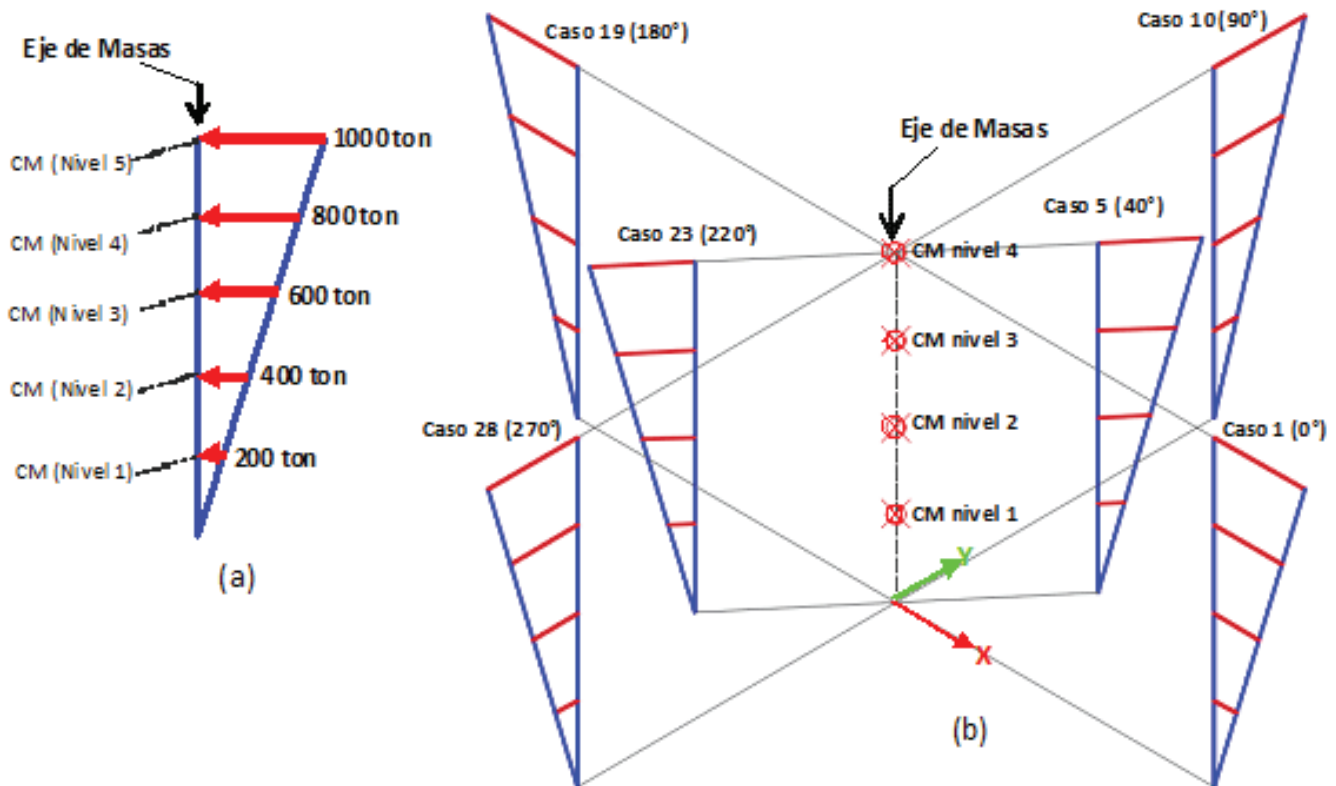


Figura 4. (a) Distribución y magnitud de la Carga Sísmica [1], (b) Casos 1, 5, 10, 19, 23 y 28 de la función de carga de 36 casos en una estructura de cuatro niveles.

estructura.

Para definir la carga sísmica se tomó una magnitud arbitraria y se realizó una simulación de la distribución que resulta de los métodos estáticos equivalentes tradicionales ya mencionados [1]. Esta distribución corresponde a una **Carga Sísmica** triangular (figura 4a). Adicionalmente se realizó otra simplificación haciendo que los CM coincidan en un eje vertical, denominado **Eje de Masas** [1] como se observa en la misma figura.

Los perfiles de comportamiento se determinan a través de una **Función de Carga** [1] (figura 4b), conformada por un eje de masas fijo y 36 casos de la Carga Sísmica ya definida (figura 4a) con direcciones que varían cada 10° , desde 0° (caso 1) hasta 360° (caso 36). En cada uno de los casos se registran las respuestas que se generan en la estructura, específicamente los desplazamientos de los Centros de Masas (CM) de cada nivel y los esfuerzos cortantes que se producen en las columnas.

Todos los modelos son característicos de las investigaciones que anteceden a este trabajo [1],

[2]. Estos presentan cierta irregularidad

horizontal para observar los perfiles de comportamiento que se generan en cada uno. Cabe destacar que el modelo 3, siendo el más simple al tener sólo dos niveles, será utilizado para realizar los análisis más complejos. Las tres estructuras están configuradas como se describe a continuación:

Modelo 1. [1] (figura 1). Estructura de 5 niveles. Altura de cada nivel: 3 m.

Vigas paralelas al eje X de: 0,50 m x 0,40 m.

Vigas paralelas al eje Y de: 0,40 m x 0,30 m.

Sección de columnas: 0,50 m x 0,50 m.

Modelo 2. [1] (figura 2). Estructura de 5 niveles. Altura de cada nivel: 3 m.

Vigas paralelas al eje X de: 0,50 m x 0,40 m.

Vigas paralelas al eje Y de: 0,50 m x 0,40 m.

Sección de columnas: 0,40 m x 0,40 m.

Modelo 3. [1] (figura 3). Estructura de 2 niveles. Altura de cada nivel: 3 m.

Vigas paralelas al eje X de: 0,50 m x 0,40 m.

Vigas paralelas al eje Y de: 0,40 m x 0,30 m.

Sección de columnas: 0,50 m x 0,50 m.

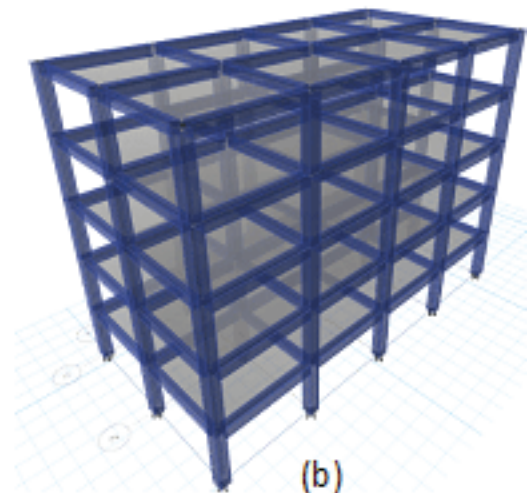
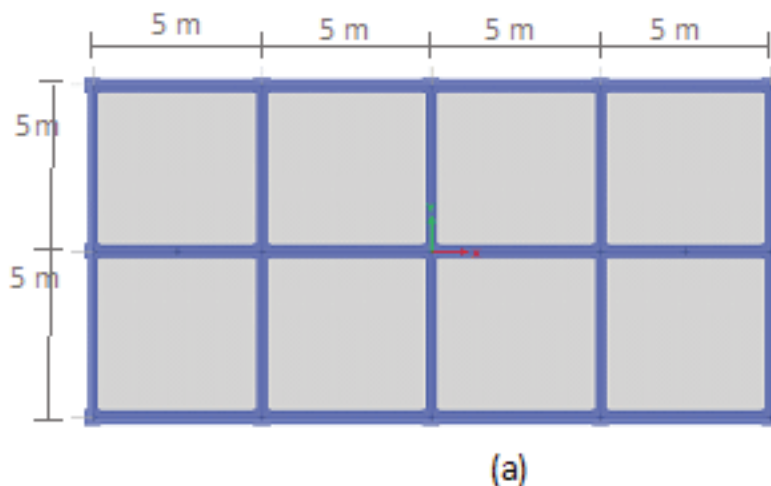


Figura 1. Modelo 1. (a) Vista de Planta, (b) Vista 3D.

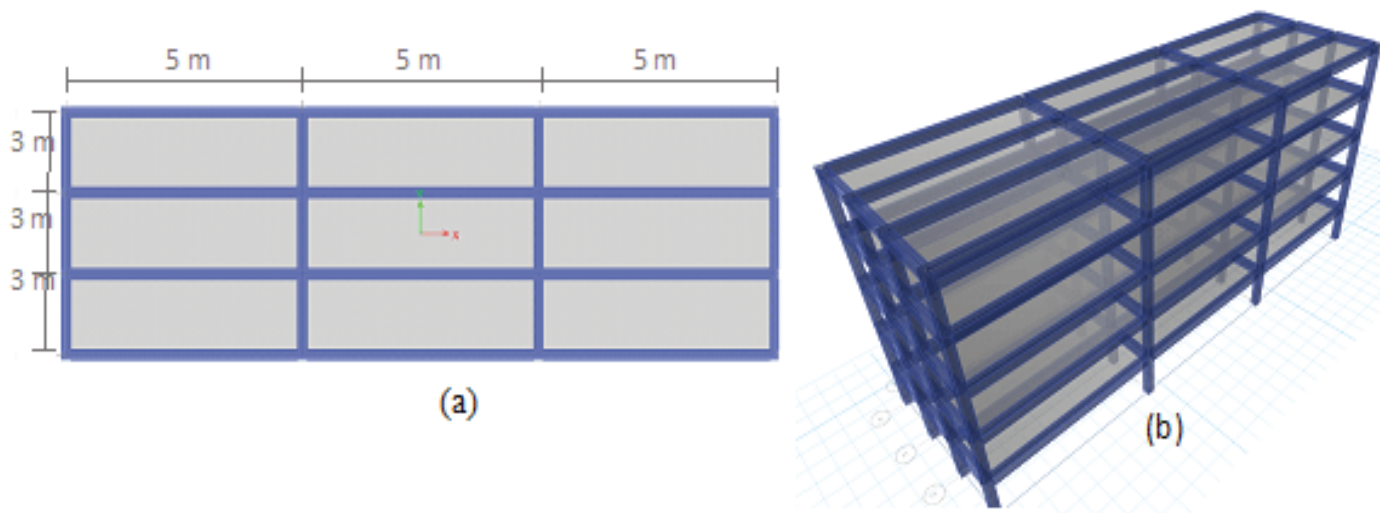


Figura 2. Modelo 2. (a) Vista de Planta, (b) Vista 3D.

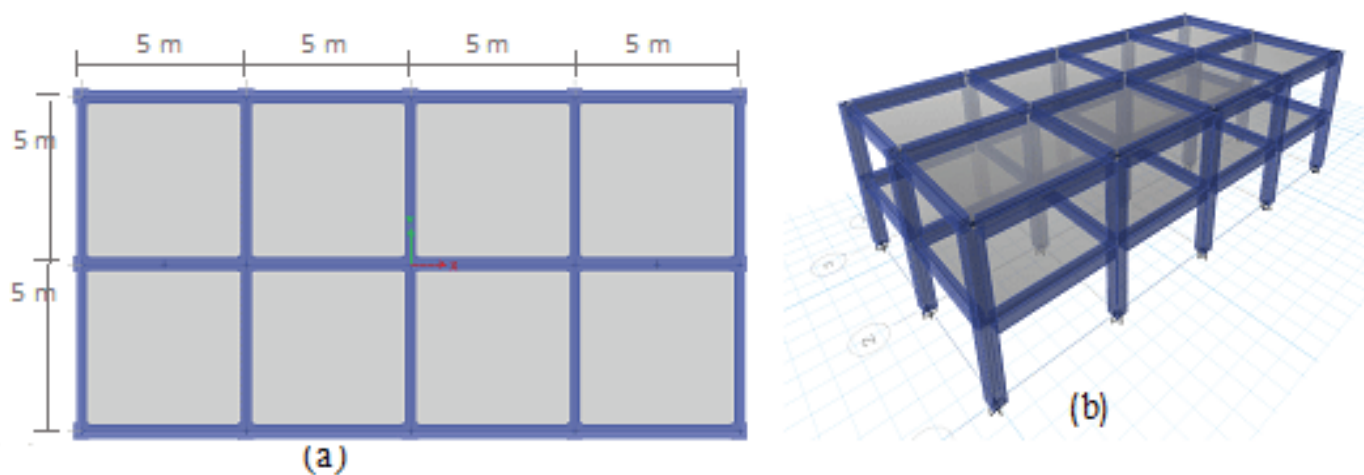


Figura 3. Modelo 3. (a) Vista de Planta, (b) Vista 3D.

3. APLICACIÓN DE FUNCIONES DE CARGA

En los **Modelos 1 y 2**, se aplicaron dos Funciones de Carga ubicadas en puntos distintos de la estructura, es decir, una función de carga con un Eje de Masas que coincide con los Centros de Rigidez de cada planta (Caso 1, figura 5 y 6) y la otra con un Eje de Masas excéntrico a los CR (caso 2, figura 7 y 8).

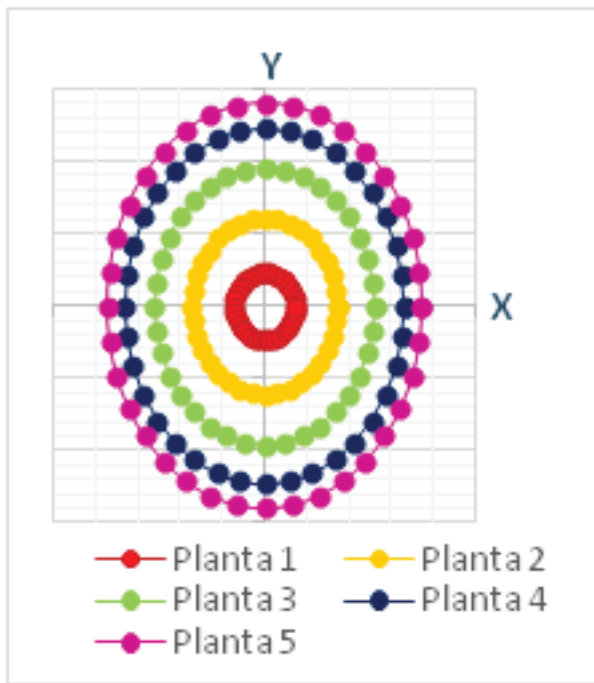


Figura 5. Modelo 1, Caso 1. Desplazamientos de los centros de masas de cada nivel al aplicar una función de carga. El Eje de Masas coincide con los CR. [1]

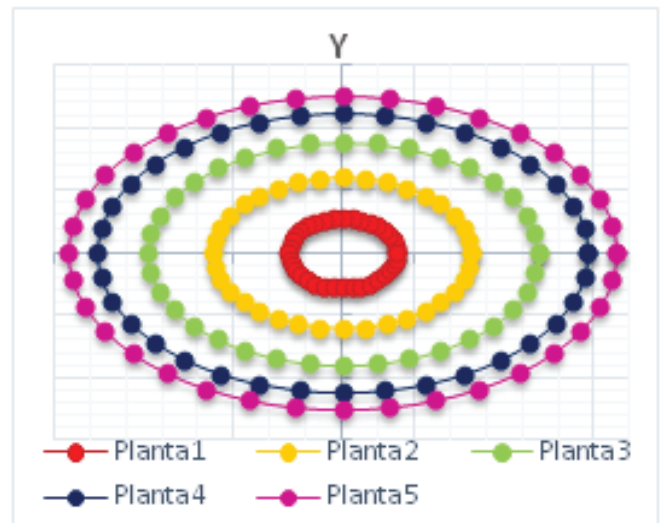
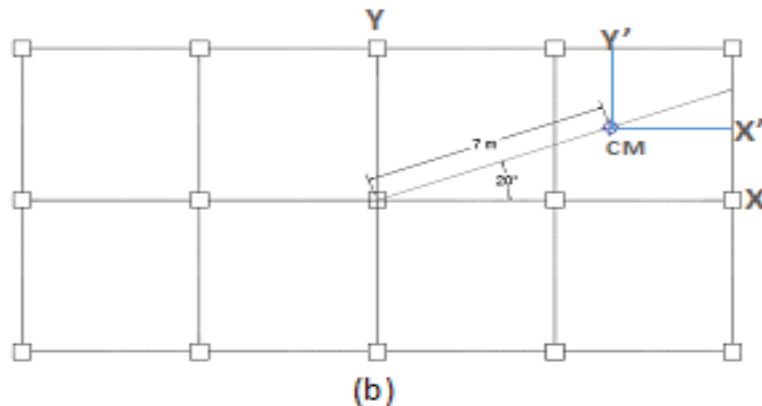
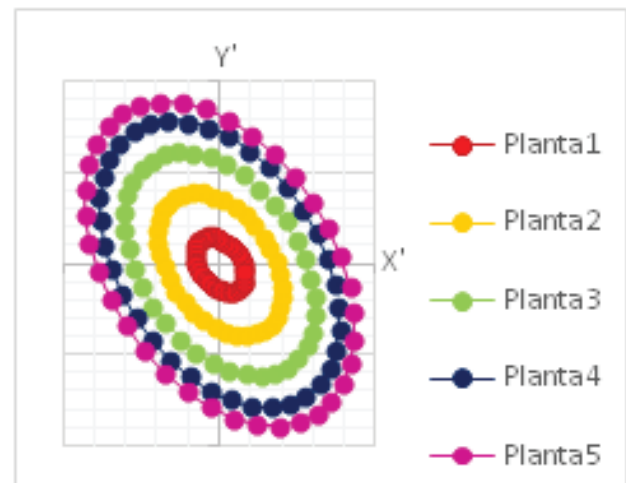


Figura 6. Caso 1, Modelo 2. Desplazamientos de los centros de masas de cada nivel al aplicar una función de carga. El eje de masas coincide con los CR [1].



Se observó en las figuras 5, 6, 7 y 8 que los desplazamientos posibles de los centros de masas en todos los niveles se inscriben en una elipse, independientemente que exista excentricidad o no entre el Eje de masas y los CR de cada nivel. Este fenómeno se denomina como **Elipses de Desplazamientos**.

Las elipses que se forman en los casos 1 y 2 de cada modelo son diferentes tanto en tamaño como en inclinación [2], esto es lógico ya que todos los vectores posibles de desplazamientos del CM en el **caso 1** (figuras 5 y 6) tienen sólo componentes flexionales, es decir; que los CM sólo experimentan una traslación pura (figura 9b). Mientras que los vectores de desplazamiento del CM en el **caso 2** (figuras 7 y 8) están conformados por componentes torsionales (figura 9a, vector azul) y traslacionales (figura 9a, vector amarillo) debido a la excentricidad entre el CM y el CR.

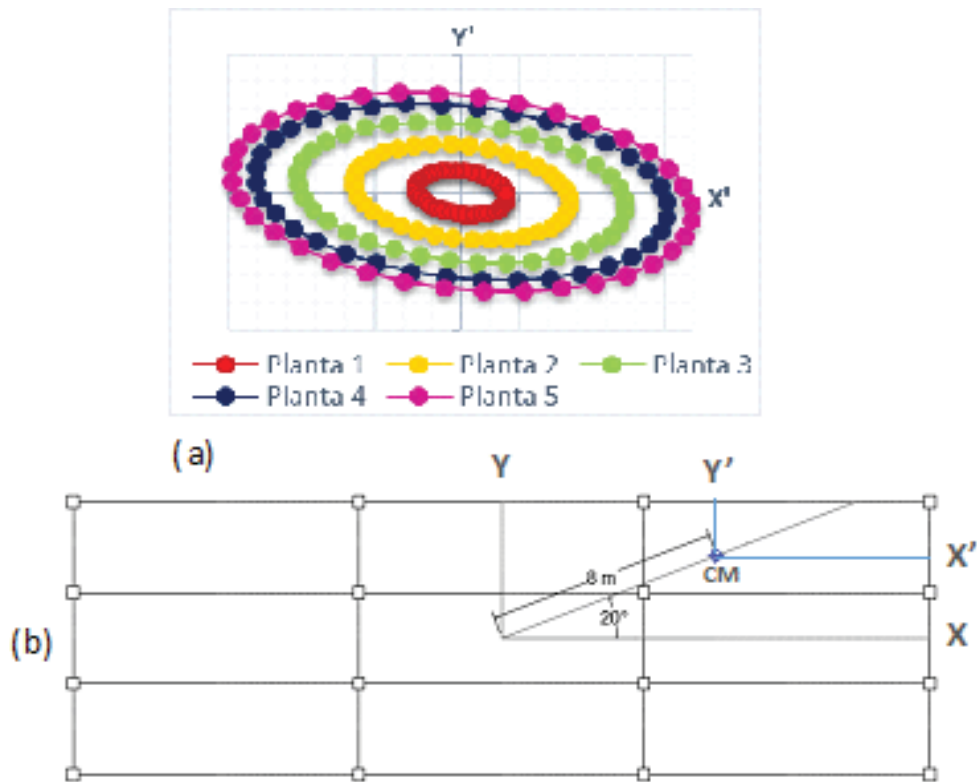


Figura 8. Caso 2, Modelo 2. (a) Desplazamientos de los centros de masas de cada nivel al aplicar una función de carga excéntrica a al CR. (b) Ubicación del eje de masas. [1]

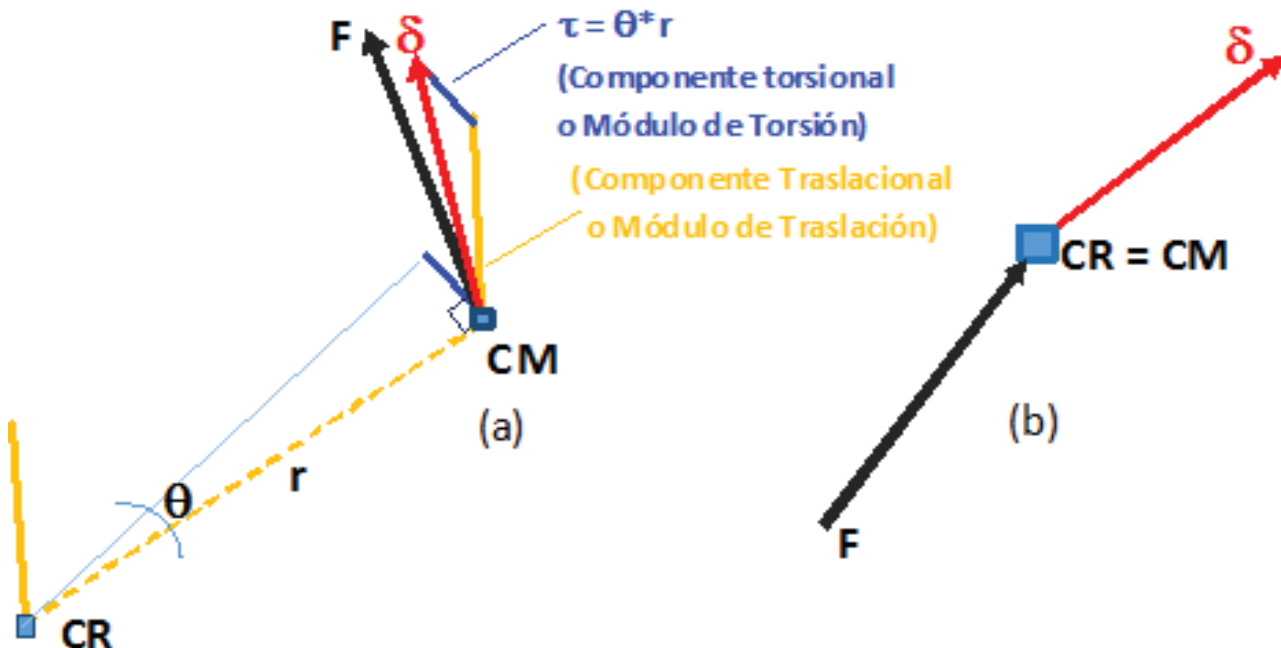


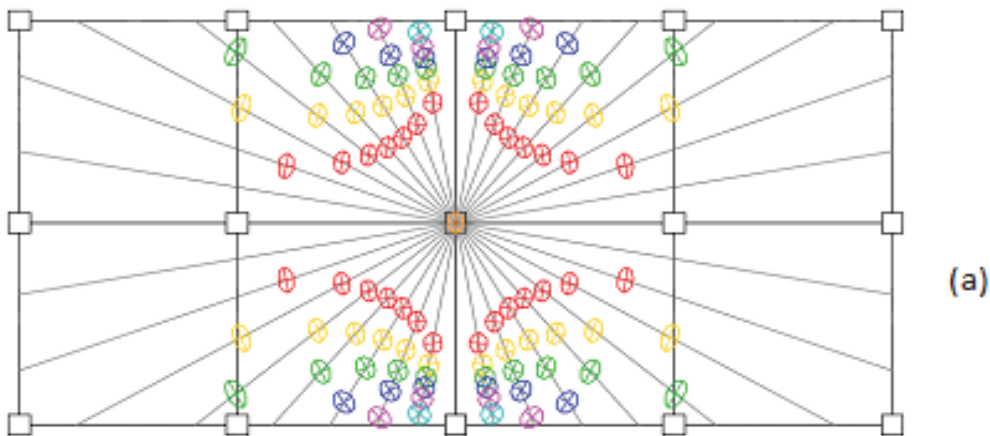
Figura 9. (a) Desplazamiento total “ ” del CM debido a una carga sísmica “F”. El CM no coincide con el CR; (b) Desplazamiento “ ” del CM debido a una carga sísmica “F”, el CM coincide con el CR. [2]

modelo las Elipses de Desplazamientos del CM generadas debido a las distintas posiciones de la Función de Carga [1].

En la figura 11, se muestra en detalle algunas elipses de desplazamientos que corresponden al modelo de la figura 10a entre las radiales de 0° a 90° . En cada elipse se muestra el desplazamiento menor y mayor de todo el perfil de comportamiento, los cuales corresponden a sus ejes principales. Adicionalmente se muestran los valores de los módulos de torsión en cada uno de ellos.

4. PERFILES DE COMPORTAMIENTO

Para estudiar con más detalle el cambio de los perfiles de comportamiento de los CM a medida que el Eje de Masas tiene posiciones cada vez más excéntricas respecto a los CR de la estructura, se dividió cada planta en radiales con inclinaciones que varían cada 10° . Posteriormente, en cada radial se generaron distintos casos de posiciones de Ejes de Masas [2]. En la figura 10 se muestra en un nivel de cada



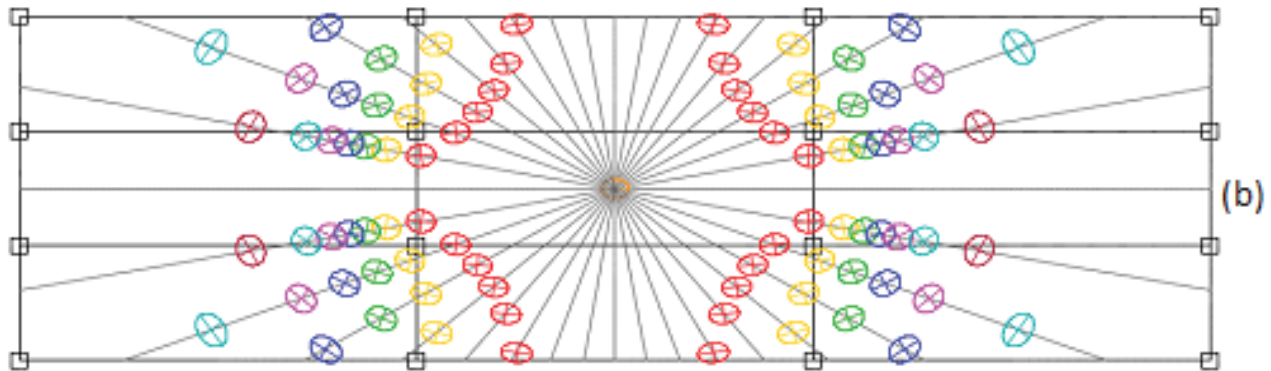


Figura 10. Perfiles de comportamiento del CM en distintas posiciones. (a) Modelo 1, nivel 1 y (b) Modelo 2, nivel 1. (Sin escala) [1]

Se pudo observar que a partir de ciertas excentricidades del Eje de Masas [1], se generan perfiles de comportamiento desfavorables para la estructura ya que los mayores módulos de torsión se encuentran en el eje principal de mayor desplazamiento de la elipse (**Figura 11, caso B**), es decir; que en ese caso hay una combinación de altos efectos traslacionales y torsionales en algunas direcciones de la Elipse de Desplazamientos. Sin embargo, con menores excentricidades este efecto no ocurre debido a que las Elipses de Desplazamientos en estos casos tienen módulos de torsión muy bajos y adicionalmente los mayores módulos de torsión afectan al eje principal de menor desplazamiento (**figura 11, caso A**) haciendo que la estructura no se vea tan amenazada ya que hay combinación de bajos efectos torsionales y traslacionales en comparación al caso anterior.

A través de procesos iterativos utilizando el programa ETABS, se determinó en todas las radiales de cada nivel, la excentricidad máxima entre CR y el Eje de Masas para que no se produzca un Caso B de perfil de comportamiento. Al unir cada uno de estos puntos de máxima excentricidad se

forma en cada nivel un área de seguridad donde se generan Casos A cuando una carga sísmica incide sobre un Eje de Masas que se ubica dentro de dicha área. Todas las plantas de la estructura de los modelos 1 y 2 presentaron la misma forma geométrica con distintos tamaños (**figura 12**), la cual es matemáticamente notable y corresponde a una **Lemniscata de Bernoulli** [1].

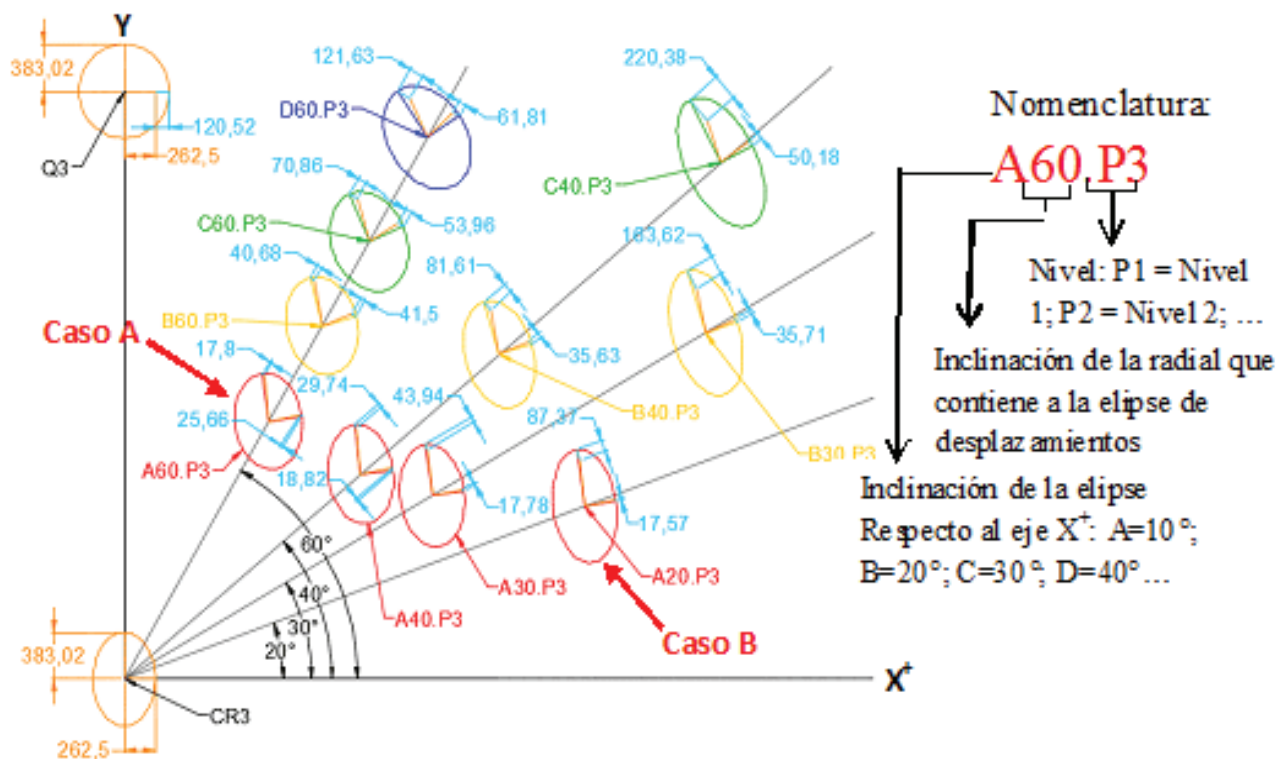


Figura 11. Elipses de desplazamientos generadas en distintas posiciones del CM Nivel 3 – Modelo 1. (Sin Escala) [1]

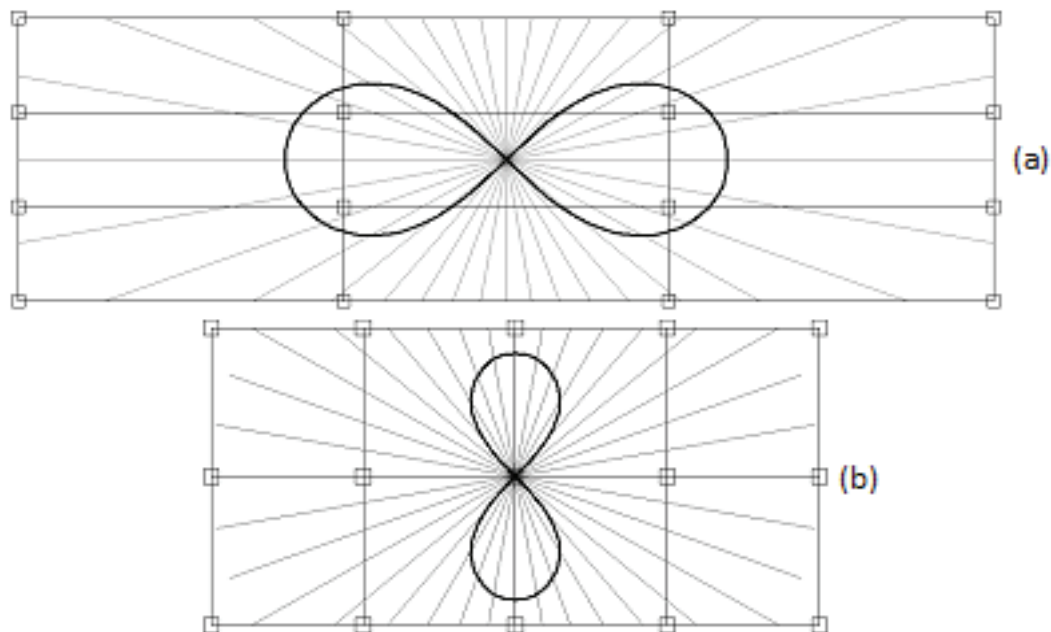


Figura 12. Lemniscata de Bernoulli – (a) Modelo 2, Nivel 2; (b) Modelo 1, Nivel 1. (Sin Escala) [1]

5. FACTORES DE AMPLIFICACIÓN TORSIONAL

Para mitigar efectos flexo-torsionales desfavorables que se generan debido a la acción de una carga sísmica se necesita cuantificar la torsión, ya que esta puede aumentar sus efectos en función de la excentricidad entre la LAF y los CR de cada planta. Mientras que la flexión, es un efecto que se mantiene constante “per-se” independientemente de la excentricidad de la carga sísmica (siempre y cuando la carga conserve la misma magnitud y dirección). Por ello, las investigaciones que anteceden a este trabajo [2], [3], [4] se han enfocado en cuantificar el aumento en los efectos debido a la torsión en función de la excentricidad de la carga sísmica y los efectos de flexión pura, a través de un **FAT** o **Factor de Amplificación Torsional**.

Un FAT se define como el cociente entre las respuestas que se generan en un elemento estructural debido a la flexotorsión y las respuestas que se generan debido a la flexión pura. Estas respuestas pueden ser deformaciones, esfuerzos cortantes, u otros.

Para calcular el FAT es necesario realizar dos fases, en la primera se debe aplicar una carga sísmica en la estructura, donde se genera una **Respuesta de Flexotorsión** si el Eje de Masas es excéntrico a los CR. Posteriormente, en la segunda fase se aplica la misma magnitud y dirección de la carga sísmica pero esta vez el Eje de Masas coincide con los CR de la estructura, produciéndose una **Respuesta de Flexión Pura**. **Lógicamente** un FAT = 1 indica que en la primera fase el CM o la LAF coincide con los CR de la estructura y por lo tanto hay ausencia de efectos torsionales.

$$FAT = \frac{\text{Respuesta Flexotorsión}}{\text{Respuesta Flexión Pura}} \quad (Ec. 1)$$

6. ELIPSE DE CULMANN

La **Elipse de Culmann** se define como una cónica que representa la elasticidad global de una estructura de un solo nivel con un diafragma idealmente rígido a través de sus rigideces torsionales y traslacionales.

Los trabajos de investigación más recientes [2], [4] han demostrado que la Elipse de Culmann tiene implícito un FAT igual a dos. En la figura 13 se puede apreciar un ejemplo que explica en forma gráfica a través de deformaciones como una LAF tangente a la Elipse de Culmann genera un FAT igual a dos en el punto de tangencia.

No es muy útil determinar las LAF que generan FAT igual a dos sólo en los puntos de tangencia de la Elipse de Culmann, ya que se ha demostrado que los pórticos de la periferia en una estructura formada por diafragmas rígidos son los más solicitados ante el efecto de flexo-torsión [3] y por ende se necesita determinar las LAF que afectan en mayor medida ciertos puntos importantes de la periferia como las columnas. Gracias a las propiedades geométricas de una cónica se puede determinar tangentes desde puntos externos e internos a ella, lo que hace posible que desde un punto fuera de la elipse como por ejemplo desde la columna C8 mostrada en la figura 14, se pueda definir una tangente a la elipse; es decir, la LAF que genera un FAT igual a dos en dicha columna.

Específicamente las columnas de la periferia de las esquinas, son las que experimentan los mayores FAT [1]. Si se determinan las LAF que producen los FAT iguales a dos en cada una de estas columnas

a través de la Elipse de Culmann, se obtiene un núcleo llamado **Núcleo Central de Torsión** o **NCT** (figura 15) que se forma al intersectar cada una de las LAF determinadas.

Este núcleo indica la excentricidad máxima que debe tener una LAF para que no se produzca un FAT mayor que dos en C1, C3, C13, C15 (figura 15). Adicionalmente, se puede interpolar linealmente la excentricidad de cada una de las LAF que conforman al NCT para definir cualquier otro núcleo con un FAT distinto a dos como se aprecia en la misma figura.

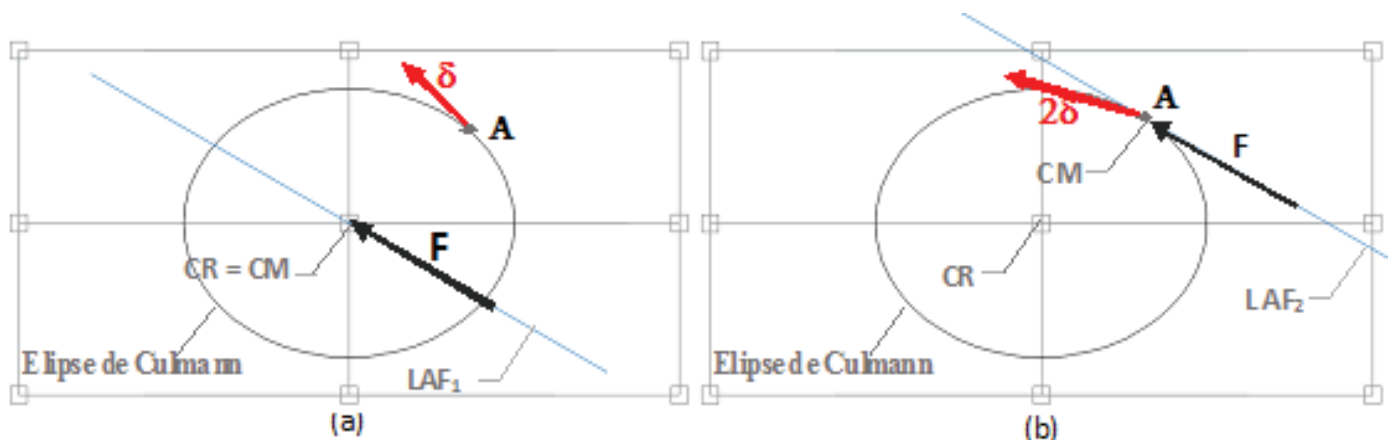


Figura 13. Vista de planta de una estructura de un solo nivel, (a) desplazamiento del punto "A" cuando la LAF coincide con el CR (flexión pura). (b) desplazamiento del punto "A" cuando la misma LAF es tangente a la elipse de Culmann (flexo-torsión).

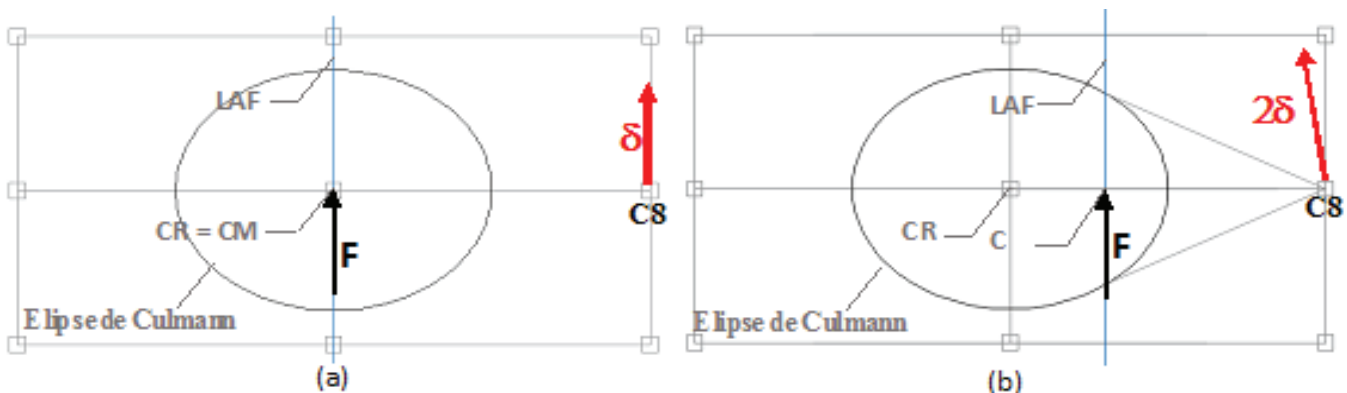


Figura 14. (a) desplazamiento de la columna C8 cuando el CM coincide con el CR. (b) desplazamiento de C8 cuando la misma LAF se ubica en una tangente a la Elipse de Culmann trazada desde esa columna.

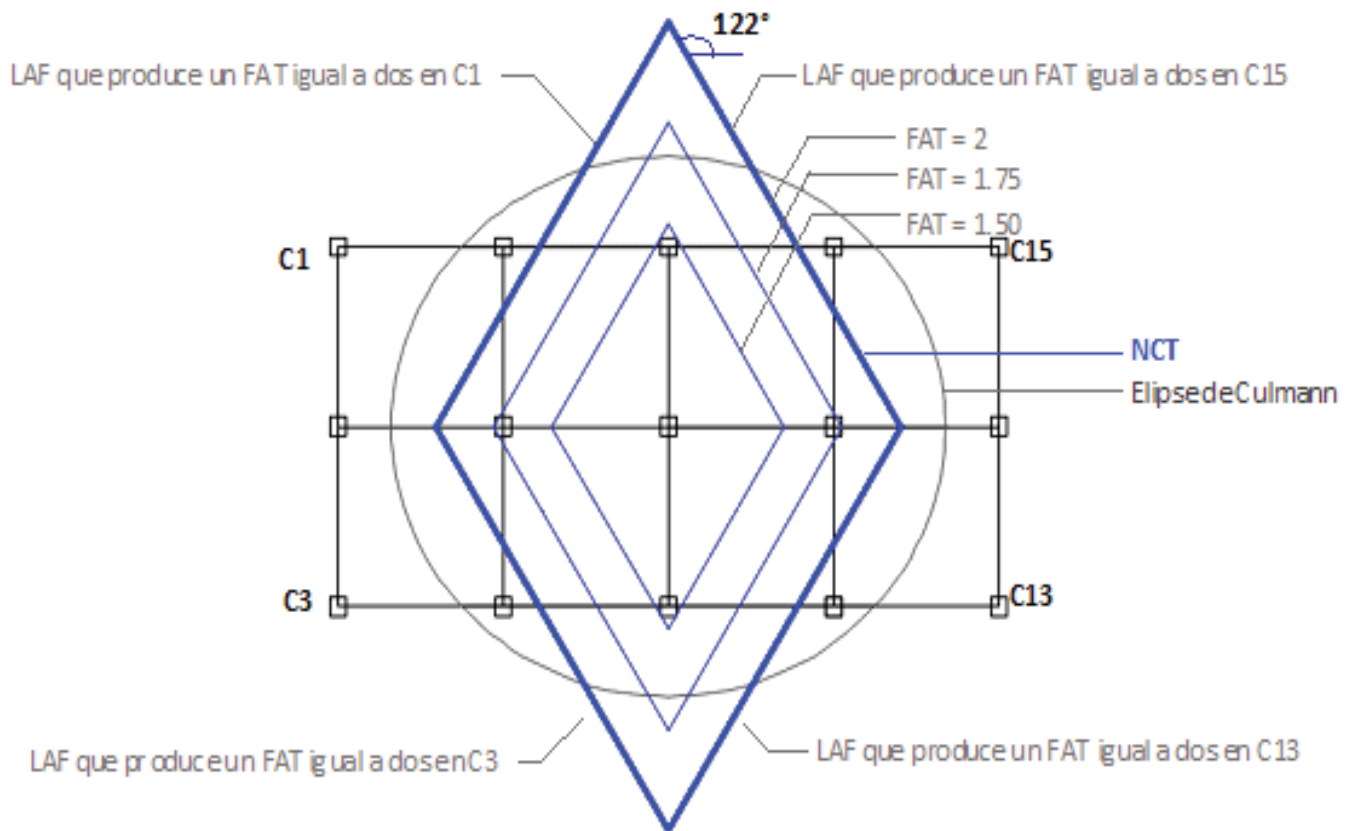


Figura 15. NCT y Elipse de Culmann Modelo 3, nivel 1. (Sin Escala)

Para determinar una Elipse de Culmann, se necesita seguir una serie de pasos [4]:

1. **Determinación de Elipse de Desplazamientos Global.** La elipse en este caso se refiere a la elipse de desplazamientos del CM cuando este coincide con el CR de la planta (figura 16a).

2. **Determinación de la Elipse de Rigideces.** Esta elipse se determina a través de la elipse de desplazamientos anterior utilizando sus ejes principales, los cuales corresponden al desplazamiento mayor y al menor de todo el perfil (figura 16a; 11 y 22). Los cortantes del nivel (“V11 y V22”) que se generan debido a las cargas sísmicas de la Función de Carga paralelas a las direcciones 11 y 22, se dividen entre la magnitud de estos

desplazamientos y se obtienen las rigideces principales “K11” y “K22” (ver figura 16 b).

$$K_{11} = \frac{V_{11}}{\delta_{11}}; \quad K_{22} = \frac{V_{22}}{\delta_{22}} \quad (Ec. 2)$$

3. **Determinación Rigidez Torsional.** En este caso se aplica un momento torsor en el CR de la planta para que se genere una rotación pura, posteriormente se divide la magnitud del momento torsor entre la rotación que se produce.

$$K_z = \frac{M}{\theta} \quad (Ec. 3)$$

4. **Elipse de Culmann:** Se obtiene determinando sus ejes principales de la siguiente manera:

$$\rho'_{11} = \sqrt{\frac{K_z}{K_{22}}} ; \rho'_{22} = \sqrt{\frac{K_z}{K_{11}}} \quad (\text{Ec. 4})$$

multi-plantares, se debe aplicar momentos torsores en todos los niveles simultáneamente, es decir una función de momentos [1].

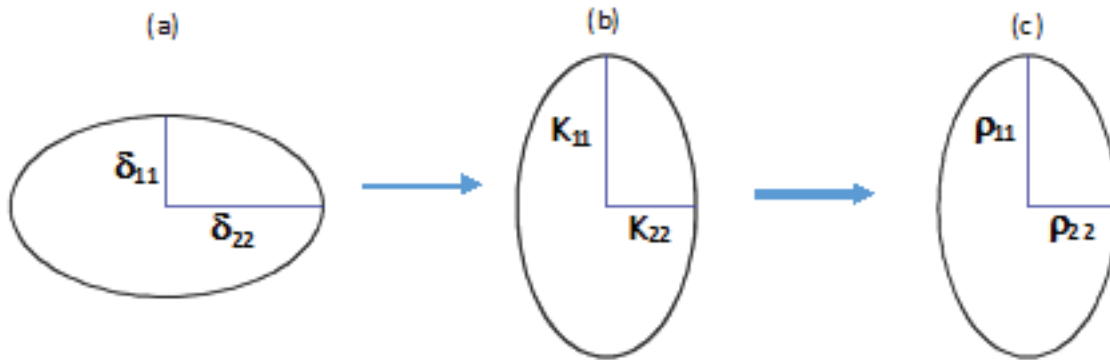
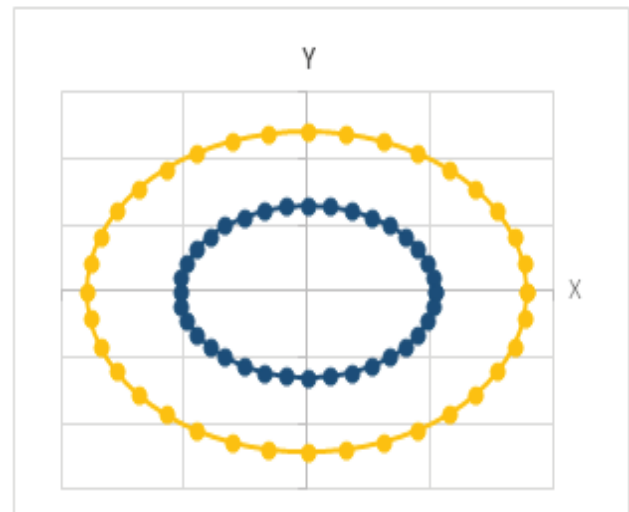


Figura 16. (a) Elipse de desplazamientos, (b) Elipse de Rigidez, (c) Elipse de Culmann

Todos los procedimientos utilizados para determinar la Elipse de Culmann solo sirven para estructuras de una sola planta como se señaló anteriormente. En esta investigación [1] se buscó la manera de determinar Elipses de Culmann en estructuras de varios niveles. La respuesta se encontró al comprobar que todas las derivas posibles del CM en cada nivel, también forman una elipse, llamada **Elipse Propia** o **Elipse de Derivas**. Se puede observar en la figura 17, las derivas obtenidas en el CM del nivel 2 del Modelo 1, producto de una función de carga.

La elipse de derivas en cada nivel de la estructura representa en este caso a la Elipse de Desplazamientos Global de ese nivel, lo que permite seguir los pasos ya explicados para la obtención de la Elipse de Culmann de todos los niveles. Adicionalmente para determinar la rigidez torsional en estructuras



—●— Desplazamientos del CM
—●— Derivas del CM

Figura 17. Elipse de Derivas del CM cuando coincide con el CR. Nivel 2, Modelo 1. (Sin escala) [1]

7. DIRECCIÓN DE MAYOR VULNERABILIDAD

Se puede percibir la ocurrencia de ciertos patrones al observar las elipses de desplazamientos de los CM y los esfuerzos cortantes que se producen en las columnas cuando se aplican Funciones de Carga en distintas posiciones. Para la identificación de estos patrones, es necesario en primer lugar tomar en cuenta los hallazgos de las investigaciones anteriores [1], [3], [4], las cuales han concluido que los ejes principales de la elipse de desplazamientos tienen la propiedad de ser paralelas a la dirección de la carga sísmica que los generan, lo cual es muy importante, ya que al observar los resultados (tablas** 1 y 2; figura 18), se muestra como la LAF paralela al eje principal mayor de la elipse

produce los mayores esfuerzos cortantes en las columnas, es decir, que estos esfuerzos máximos en columnas se producen junto con los mayores desplazamientos posibles del CM.

En la figura 18 se muestran las elipses de desplazamientos del CM que se generan en tres posiciones distintas de una Función de Carga en el Modelo 3, donde dos de ellas (CM-c, CM-b) se encuentran sobre el NCT con FAT igual a dos (figura 15).

Nótese que cuando se produce flexo-torsión (figura 18, CM-b y CM-c; tablas 1 y 2) los mayores esfuerzos cortantes se generan en las columnas centrales de la periferia. Adicionalmente, puede verse que las columnas de las esquinas presentan los mayores FAT, mientras que cuando se produce un efecto de flexión pura (figura 18, CM-a; tablas 3 y 4) los mayores esfuerzos cortantes se generan en las columnas centrales.

En la tabla 2, se producen FAT mayores que dos ya que la LAF de 90° se encuentra fuera del NCT cuya dirección tiene 122° (ver figuras 15 y 18).

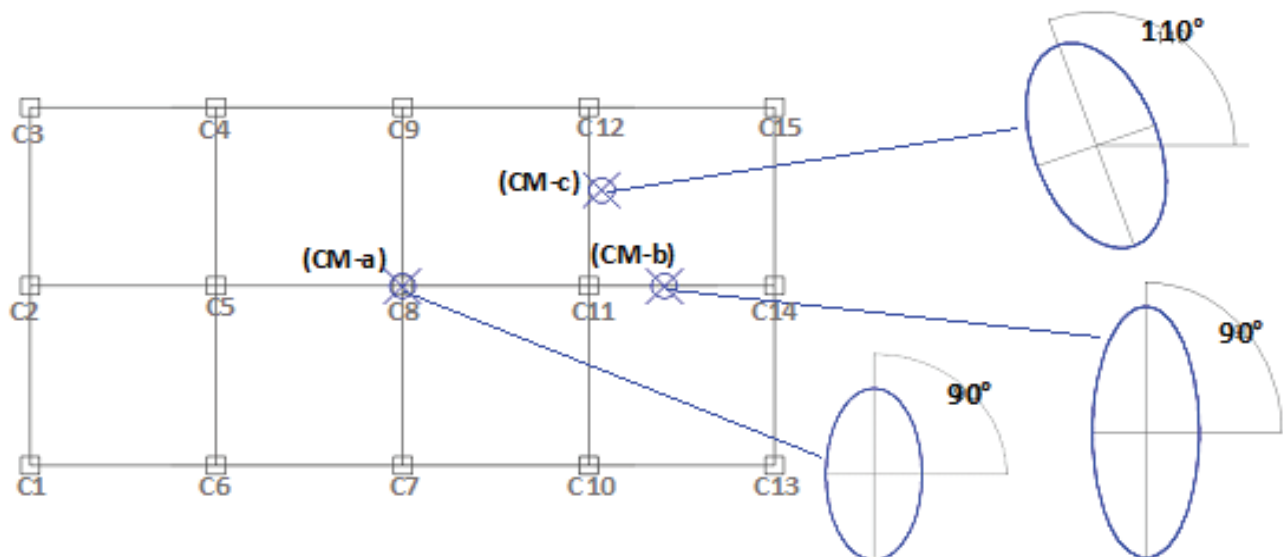


Figura 18. Elipses de desplazamientos del CM en el nivel 1 generadas en tres posiciones distintas. Modelo 3 (sin escala)

Columna	V (tonf)	FAT
C1	6,39	0,18
C2	12,93	0,31
C3	29,62	0,83
C4	41,58	1,07
C5	29,03	0,61
C6	21,08	0,54
C7	36,80	0,95
C8	47,32	1,00
C9	51,06	1,32
C10	52,88	1,36
C11	66,78	1,41
C12	64,02	1,64
C13	63,77	1,79
C14	77,62	1,85
C15	69,47	1,98

TABLA 1. Esfuerzo cortante en las columnas debido a una carga sísmica con dirección de 110°, (ver figura 18 caso CM-c). Modelo 3, nivel 1.

Columna	V (tonf)	FAT
C1	20,95	0,59
C2	0,90	0,02
C3	20,95	0,59
C4	32,36	0,84
C5	23,62	0,50
C6	32,36	0,84
C7	46,34	1,21
C8	47,74	1,00
C9	46,34	1,21
C10	63,61	1,66
C11	71,79	1,50
C12	63,61	1,66
C13	74,19	2,10
C14	86,27	2,02
C15	74,19	2,10

TABLA 2. Esfuerzo cortante en las columnas debido a una carga sísmica con dirección de 90°, (ver figura 18 caso CM-b). Modelo 3, nivel 1.

Columna	V tonf
C1	35,35
C2	42,69
C3	35,35
C4	38,35
C5	47,70
C6	38,35
C7	38,36
C8	47,74
C9	38,36
C10	38,35
C11	47,70
C12	38,35
C13	35,35
C14	42,69
C15	35,35

TABLA 3. Esfuerzos cortantes en las columnas debido a una carga sísmica con dirección de 90°, (ver figura 18, caso CM-a). Modelo 3, nivel 1.

Columna	V tonf
C1	35,00
C2	41,99
C3	35,55
C4	38,82
C5	47,37
C6	38,94
C7	38,81
C8	47,32
C9	38,81
C10	38,82
C11	47,37
C12	38,94
C13	35,55
C14	41,99
C15	35,00

TABLA 4. Esfuerzos cortantes en las columnas debido a una carga sísmica con dirección de 110°, (ver figura 18, caso CM-a). Modelo 3, nivel 1.

**En las tablas 1, 2 se muestran los mayores esfuerzos cortantes de las Funciones de Carga de los casos CM-b y CM-c en el primer

nivel (ver figura 18), indicando la dirección de las Cargas Sísmicas que les corresponden

8. CONCLUSIONES

Se observó en el Modelo 3 que bajo un efecto flexo-torsional los mayores FAT se generaron en las columnas de las esquinas de la periferia, mientras que los mayores esfuerzos cortantes se producen en las columnas centrales de la periferia.

Se demostró en los modelos estudiados que la elipse de desplazamientos del CM tiene una gran utilidad, no sólo porque es muy fácil de determinar [1], también porque muestra como la dirección más desfavorable de una carga sísmica es la que genera el mayor desplazamiento posible (eje mayor), ya que este desplazamiento se relaciona con los esfuerzos cortantes más extremos en columnas.

La Lemniscata de Bernoulli es una herramienta que puede servir para la patología de estructuras con problemas de rigideces similares a los presentes en los Modelos 1 y 2, ya que se puede determinar si los CM de una estructura se encuentran bajo esa zona de seguridad que indica un comportamiento más favorable ante un evento sísmico.

El NCT particularmente en este trabajo, es mucho más restrictivo que en las investigaciones que lo anteceden, ya que los límites de este núcleo son definidos desde las columnas de las esquinas, lo cual es lógico ya que son las que presentan las mayores variaciones de esfuerzos a medida que hay mayor excentricidad entre el CM y el CR, por el contrario, los trabajos anteriores han propuesto un núcleo definido desde las columnas centrales de la periferia, lo cual, a pesar de ser algo muy razonable en cierto sentido, ya que son en estas columnas donde se producen los mayores esfuerzos cortantes, no se está limitando la excentricidad del CM para que en ninguna columna se produzcan

FAT mayor al establecido, produciéndose así FAT mayores al esperado en las columnas de las esquinas. Por ende, se puede decir que la propuesta del NCT de este trabajo es más representativa bajo las condiciones planteadas.

9. RECOMENDACIONES

Se debe tomar en cuenta los efectos que se producen en las columnas que conforman la periferia a medida que hay mayor efecto de la torsión, ya que, en los modelos estudiados, son estas columnas las que experimentan los esfuerzos más extremos y además las mayores variaciones de esfuerzos. Por lo tanto, prever como se distribuyen las cargas verticales en cada nivel es un punto importante para predecir el comportamiento que la estructura tendrá bajo flexo-torsión, ya que la excentricidad del CM con respecto al CR es un factor determinante en el efecto torsional “per-se”.

Tomar medidas correctas en el diseño de las columnas que conforman la periferia de la estructura ya que estas serán las más afectadas ante la flexo-torsión.

Promover y justificar en los proyectos en estudio la importancia que tiene el diseño de estructuras con rigideces constantes en cualquier dirección, de modo que no existan LAF de la carga sísmica en donde los elementos estructurales se vean vulnerados. Una buena forma de determinar si hay uniformidad en la rigidez de la estructura es al verificar que la forma de la Elipse de Desplazamientos sea una circunferencia. Esto no implica necesariamente modificar la distribución de los elementos en la estructura cambiando de manera abrupta la arquitectura de la misma [4], sino el dimensionar de una mejor manera los elementos que sean

necesarios para que se obtenga un mejor comportamiento [4].

Incluir los efectos verticales que se producen en la estructura de modo que se pueda apreciar de una forma más completa la dirección más desfavorable de una carga sísmica, ya que en este caso habrá una interacción entre los efectos horizontales y verticales del sismo y las cargas soportadas por la estructura (peso propio, cargas variables, entre otros).

Ingeniería Civil. Universidad Metropolitana.

[6] **Gonzales, M. y Paredes, F.** (2013). Análisis y comparación del comportamiento estructural, bajo acciones sísmicas multidireccionales, mediante el uso de formas cónicas asociadas. Trabajo Especial de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Católica Andrés Bello.

[7] **Paparoni, M.** (1991). Dimensionamiento de edificios altos de concreto armado. SIDETUR, Caracas.

REFERENCIAS

[1] **Guillén, D. y Manaure, I.** (2016). Identificación de vulnerabilidades en estructuras bajo efectos flexotorsionales mediante estudios de desplazamientos. Elipses multiplantares. Trabajo Especial de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Católica Andrés Bello.

[2] **Parodi, S. y Reyes, M.** (2012). Descripción de las propiedades de las estructuras antes fuerzas horizontales excéntricas mediante elipses plantares. Estudio de desplazamientos. Trabajo Especial de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Católica Andrés Bello.

[3] **Carmona, A. y Acosta, E.** (2009). Estrategias para la optimización en estructura irregulares en plantas. Trabajo Especial de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Católica Andrés Bello.

[4] **Paz, O. y Peña, O.** (2011). Configuraciones estructurales extremas. Una búsqueda de variables sistémicas definitorias; las elipses plantares. Trabajo Especial de Grado, Ingeniería Civil. Universidad Católica Andrés Bello.

[5] **Goncalves, E.** (2008). Flexo-torsión en edificios monoplantares y sus elipses de elasticidad. Trabajo Especial de Grado,