



BÚSQUEDA DE PATRONES GEOMÉTRICOS Y MECÁNICOS EN EDIFICIOS QUE HAN PERDIDO PARTE DE SU SOPORTE

RESUMEN

En el presente trabajo se determinaron patrones geométricos y mecánicos en el comportamiento de edificios aporticados de acero estructural, luego de que han perdido parte de su soporte.

Se definen como patrones geométricos los desplazamientos verticales, y como mecánicos los diagramas de fuerza axial, corte y momento de los miembros de la estructura.

Para encontrar dichos patrones se utilizan los programas: ETABS (Software de Análisis, Diseño y Dibujo de Edificios) y Microsoft Excel.

Son pocos los precedentes a este tipo de investigación, por lo que se escogieron los aspectos considerados por los autores como los más representativos, quedando abierto el camino para trabajos futuros que puedan aprovechar los hallazgos y enfatizar directamente en problemas más específicos.

Se trata de un trabajo novedoso. Porque además de la poca bibliografía accesible, implicó también el desarrollo de una metodología original. En la cual se utilizaron herramientas gráficas o visuales como recurso principal

Para el desarrollo del trabajo fueron escogidos exclusivamente, edificios de 5, 10 y 15 pisos, todos ellos, con la misma planta. Asimismo, fue seleccionada solo la pérdida de soporte en las columnas de: el centro del edificio, el centro de la fachada, y la esquina.

Esto con la finalidad de determinar, cómo afecta la ubicación de la columna que sufre la pérdida de soporte, así como, la influencia de la variación de altura del edificio en los patrones.

■ Frank Herrera

email: frank.herrera.t@gmail.com

Escuela de Ingeniería Civil

Universidad Católica Andrés Bello

■ Aron Pollner

email: abpollner@gmail.com

Escuela de Ingeniería Civil

Universidad Católica Andrés Bello

Fecha de Recepción: 09 de diciembre de 2011

Fecha de Aceptación: 12 de noviembre de 2012

Como resultado se encontró que, la columna que más afecta es la del centro, luego la de fachada y por último la de esquina. Por lo que se deduce que mientras mayor sea el peso que soporta la columna en cuestión, más sensible será a la pérdida de soporte.

Por otro lado, los patrones evidencian que mientras más alto es el edificio más afectado estará por la pérdida de soporte.

Palabras Claves: Pérdida de soporte, Colapso progresivo, Reacción en cadena, Patrones geométricos, Patrones mecánicos, columna afectada, métodos gráficos, superposición de desplazamientos verticales.

FINDING PATTERNS IN GEOMETRIC AND MECHANICAL BUILDINGS THAT HAVE LOST SOME OF ITS SUPPORT

ABSTRACT

The purpose of this work is to find geometrical and mechanical patterns in the behavior of steel-frame buildings subjected to the loss of part of their support.

As geometrical pattern, vertical displacement is used.

As mechanical patterns axial, shear and moment diagrams of the structural members are used.

These patterns are obtained with the help from computer programs: ETABS (software for the analysis, design and drafting of buildings) and Microsoft Excel.

As there are few precedents to this investigation, the authors decided to take into account only the aspects considered by them as the most pertinent to begin with; leaving the door open for future students to get further into other more specific aspects.

This is a novel work not only because there is little accessible bibliographic material, but also because it implied the development of an original methodology that relied mostly on visual or graphical tools as principal resources.

For the development of this work, only buildings of 5, 10 and 15 floors were used – all of them with the same floor plan configuration. In the same manner, only the

central column, the central-of-the-façade column and corner column were chosen.

The objective is to find, how the location of the column subjected to the loss of support and the height of the building, influence the patterns mentioned previously.

As a result it was found that the order of damage by loss of support, starting from the worst, is: First the central column, then the façade column and lastly the corner column. From this it was observed that, the more weight carried by a column, the more dangerous the loss of support.

On the other hand it is also evident that, as the building grows in height, the effect of the loss of support gets stronger.

Keywords: Lost of support, progressive collapse, geometrical patterns, mechanical patterns, damages by lost of support, vertical displacement.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la generalidad de los casos, cuando se diseña un edificio, sólo se toman en cuenta cargas gravitacionales, y dependiendo de la ubicación, se consideran además, el sismo y el viento.

Sin embargo con cierta frecuencia, existen además, casos que pudieran llegar a ser más críticos que los anteriores. Específicamente por ejemplo: el caso en que una parte puntual de la base del edificio fallase por causas diferentes a la acción de las cargas descritas. Este tema no se estudia en el diseño de edificios porque el tener que evaluar todas las posibles fallas, requiere de mucho tiempo y dinero, cosas que sólo edificios de gran importancia pueden tener. Es por esto que, instituciones como las universidades, son las apropiadas para dedicarse a este tipo de estudios por medio de la realización de trabajos de investigación.

Es de especial importancia estudiar las fallas puntuales en las bases del edificio, porque ocasionan movimientos no uniformes con respecto a toda la estructura. Esto da origen a problemas que pueden ir desde grietas en el friso de paredes hasta el colapso del edificio.

En investigaciones anteriores se ha estudiado el asentamiento de columnas de la base pero no el caso de la pérdida total del soporte. Además no se había tomado en cuenta el peso propio de la estructura. Sin embargo, la posibilidad de ocurrencia de este fenómeno es lo que motivó a los autores a realizar este estudio.

2. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

2.1 General

Analizar el comportamiento de una estructura de acero sometida a la pérdida de soporte en la base de una de sus columnas, mediante la observación de patrones geométricos y mecánicos.

2.2 Específicos

- Observar y comparar los diagramas de fuerza axial, corte y momento en los miembros del edificio, antes y después de la pérdida de soporte en distintas columnas.
- Observar y comparar los desplazamientos verticales producidos en un piso cuando se pierde soporte en distintas columnas.

- Utilizar los valores de Demanda/Capacidad para identificar el estado de sollicitación de la estructura, luego de la pérdida de soporte.
- Estudiar la influencia de la altura de un edificio en la pérdida de soporte, comparando edificios de 5, 10 y 15 pisos.
- Aportar métodos gráficos para la comparación de patrones geométricos y mecánicos.
- Formular recomendaciones para configuraciones óptimas de edificaciones que pueden evitar incurrir en mayores gastos de reparación y mantenimiento a futuro.

3. TRABAJOS RELACIONADOS

3.1 Colapso progresivo

El colapso progresivo consiste en la falla local de un miembro principal (viga, columna, muro, etc.) de un edificio, que trae como consecuencia una reacción en cadena que hace que una parte sustancial del edificio colapse. Normalmente esta falla es desproporcional con respecto al evento que le da inicio [3].

La falta de soporte del elemento trae como consecuencia que el edificio adopte una nueva geometría y por lo tanto tenga que buscar rutas alternas de transmisión de las cargas. Por ejemplo en el caso de que una columna deje de aportar soporte al edificio, la estructura tiene que hacer un desvío de las cargas a través de las vigas para mantenerse en pie.

Los aspectos más importantes que debe poseer una estructura para mitigar el colapso progresivo (según [6]) son: Redundancia, Continuidad y Ductilidad entre otros.

La redundancia se puede lograr por ejemplo, aumentando el número de columnas, aunque a veces puede ser mejor menos columnas más robustas que más columnas delgadas porque el evento que inicia la falla puede destruir más fácilmente estas últimas.

La continuidad se refiere a que los miembros principales estén bien conectados entre sí, de esta forma, se podrá transmitir la carga efectivamente, para lograr que la estructura trabaje como un sistema.

La ductilidad es una propiedad que presenta el acero la cual consiste en tener la capacidad de deformarse sostenidamente bajo la acción de una fuerza. De esta manera se evitan fallas frágiles.

Valdría la pena nombrar un fenómeno interesante que ocurre cuando las deformaciones en las vigas son muy altas. Cuando esto ocurre las vigas pasan de trabajar como elementos que resisten carga vertical a través de la flexión a trabajar como cables o elementos que resisten carga vertical a través de la tracción, esto se conoce como efecto catenaria.

Aunque la causa que inicia la falla no tiene relevancia, las circunstancias que pueden dar inicio a un colapso progresivo son diversas. Según la "U.S. General Services Administration" [1] existen cuatro clases generales de eventos, ellos son:

- Impacto accidental: Muchos casos de colapso progresivo han sido causa de impactos accidentales. Un ejemplo es el de un automóvil que golpea un miembro clave de una estructura (un edificio, puente, etc.).
- Construcción defectuosa: A través de la historia han existido muchos casos de malas prácticas constructivas que han desencadenado un colapso progresivo. Un caso notable, el edificio de apartamentos Skyline Plaza en Fairfax, Virginia. Esta falla fue producto de la prematura remoción de los apuntalamientos, que llevó a que la esquina noroeste colapsara.
- Falla de fundación: La falla de una pequeña porción de la fundación de la estructura puede resultar en la pérdida de soporte primario. Esta falla puede ser el resultado de problemas de erosión, socavación, geología, formación de cráteres por explosión, etc. Si el resto de la estructura no tiene capacidad para redistribuir este cambio de cargas, causado por la pérdida de soporte, el daño extensivo puede ser mayor.
- Cambio violento de la presión del aire: Un cambio extremo en la presión del aire puede ser originado por muchas fuentes, tales como detonaciones causadas por gas o fuertes explosivos. Ejemplos de este tipo hay muchos, entre los más conocidos están:
 - El edificio de 22 pisos Ronan Point en Londres en 1968, que colapsa a causa de una explosión de gas en la cocina de un apartamento en la esquina del piso 18. El estallido acabó con un muro estructural, el cual dejó de soportar los pisos superiores ocasionando su caída, y como resultado de esto, los pisos inferiores también colapsaron.

- El edificio estaba construido con paneles de concreto prefabricados, los cuales son buenos para eludir el colapso progresivo causado por cargas extremas, el problema en el caso del Ronan Point es que no existía continuidad en el refuerzo de los paneles, y por lo tanto no se podía lograr efectivamente que la carga encontrara una ruta alterna una vez iniciada la propagación.
- El edificio federal Alfred P. Murrah en Oklahoma City en 1995 que sufrió colapso progresivo, causado por la detonación de un camión cargado con explosivos, en la base del edificio.
- También está, el muy conocido caso de las torres gemelas de Nueva York el 11 de Septiembre del 2001, causado por el impacto de un avión.

3.2 Bases Teóricas

Es importante señalar aquellos términos y conceptos que serán de gran utilidad para la comprensión del trabajo especial de grado, entre los cuales se destacan los siguientes:

ASENTAMIENTO DIFERENCIAL (Δ): Se define como la diferencia de asentamientos entre columnas adyacentes o separadas.[8]

DISTORSIÓN ANGULAR (ξ): Es un parámetro que se define como el asentamiento diferencial entre columnas adyacentes dividido entre la separación de las mismas. [8]

FLEXIÓN SIMPLE: "Es cuando se presenta flexión en el plano paralelo al de las cargas, y si no hay torcimiento de la sección".[10].

ESTADOS LÍMITE: "Un estado límite es una condición que representa un límite estructural de utilidad. Los estados límite pueden ser dictados por los requisitos funcionales como, por ejemplo, las deflexiones máximas; pueden ser conceptuales, tales como la articulación plástica (Rótula plástica) o la formación de un mecanismo, o pueden representar un colapso real de una parte o de la totalidad de la estructura, tal como una fractura o inestabilidad." [10].

MOMENTO RESISTENTE NOMINAL: Es el momento determinado por uno de los estados límite: pandeo lateral, flexo torsional o local. [2]

VALOR DE DEMANDA/CAPACIDAD: Es el valor de las ecuaciones de interacción aplicadas a perfiles de acero

estructural cuando se encuentran sometidos a fuerzas normales y de flexión simultáneamente.

Casi todos los miembros de una estructura están sometidos a combinaciones de momentos y fuerza axial, por lo tanto, para saber la relación de lo que realmente está actuando con respecto a su capacidad, se procede a utilizar las siguientes ecuaciones de interacción:

Si $Nu/\phi N_n \geq 0.2$; Entonces:

$$\frac{Nu}{\phi N_n} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_{ux}}{\phi b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi b M_{ny}} \right] < 1.0$$

Si $Nu/\phi N_n < 0.2$; Entonces:

$$\frac{Nu}{\phi N_n} + \frac{8}{9} \left[\frac{M_{ux}}{\phi b M_{nx}} + \frac{M_{uy}}{\phi b M_{ny}} \right] < 1.0$$

Si el resultado de las ecuaciones de interacción, es mayor que "1", quiere decir que el perfil falla por capacidad. [10].

COLAPSO DE UNA VIGA: "El colapso de una viga de acero estructural puede corresponder a algunos de los siguientes fenómenos, los cuales podrán presentarse individualmente o combinados:

Por exceso de flexión en el plano de las cargas, con la eventual formación de un mecanismo de falla con articulaciones plásticas.

Por cortante.

Por inestabilidad en el rango elástico, inelástico o aun plástico, caracterizada por pandeo lateral, flexo torsional o local.

Por fatiga.

Por fractura en forma frágil. [10].

SECCIÓN COMPACTA: Aquella sección libre de sufrir pandeo local. [2]

ANÁLISIS ELÁSTICO DE ESTRUCTURAS: Supone que la capacidad resistente de una estructura se agota cuando en cualquier sección de la misma una de sus fibras alcanza su límite elástico. [2].

COMPORTAMIENTO PLÁSTICO DE LAS VIGAS: En la primera etapa, todas las fibras están solicitadas por tensiones menores que el descendencia; es por lo tanto un comportamiento totalmente elástico, el cual terminará justamente cuando se alcance la segunda etapa.

En la segunda etapa, las fibras extremas han llegado a la cedencia; el momento interno resistente es ahora M_y ; las deformaciones unitarias son aún proporcionales a las tensiones.

Al incrementar la carga, las fibras que ya se hallan en cedencia no podrán resistir tensiones mayores, pero hay un componente muy importante de la sección transversal que aún está en régimen elástico, y por lo tanto puede admitir tensiones adicionales. Es conveniente recordar que las fibras extremas, ya en cedencia, no podrán tomar más tensiones, pero sí seguirán resistiendo F_y , para que las fibras internas lleguen a la cedencia, es necesario un momento mayor que M_y . En la última etapa, todas las fibras llegan a la cedencia, alcanzando así, el momento plástico M_p en esa determinada sección, produciéndose la formación de una rótula plástica. [10].

MOMENTO PLÁSTICO (MP): Es el mínimo momento requerido para que en una sección transversal del material, todas sus fibras se encuentren en la cedencia. [10].

ARTICULACIÓN PLÁSTICA: "El comportamiento de una sección completamente plastificada es análogo al de una articulación real, con la diferencia de que en la segunda el momento es nulo en todo instante, mientras que en la primera se mantiene igual a M_p . Con base en esta analogía, la sección donde se ha presentado la plastificación completa se llama articulación plástica." [10].

4. METODOLOGÍA

4.1 Configuración de los edificios:

En ETABS, se simulan edificios aporricados de acero estructural, es decir, edificios con vigas y columnas con perfiles de acero y sistema de piso de losa acanalada.

Los edificios son: De planta cuadrada, con 5 pórticos en ambas direcciones, 3 m de altura de entrepiso, luces de 6m y sistema de losa acanalada. Como se muestra en la figura 1,2 y 3.

El edificio se diseña para carga gravitacional con los casos de carga 1.4CP y 1.2CP + 1.6CV. Para evaluar los asentamientos se utiliza el caso de carga CP + CV. [3]

Se toman unas cargas adicionales al peso propio de la estructura de: 400kg/m² de CP y 250kg/m² de CV. La razón de haber escogido estos valores es porque son cargas que se consideran típicas en edificios, si bien, las magnitudes no son relevantes para lo que se estudia en este trabajo.

Los perfiles que se obtienen por diseño son entonces:

- Columnas: W12x96, que es un perfil casi cuadrado.

- Vigas: W18x50 cuya altura es mayor que su anchura de alas.
- Correas: W12x14, habiendo 3 de ellas por paño, separadas a 1.5 metros.

Cabe destacar que, como lo que se estudia son sólo comportamientos, lo importante son las relaciones entre los valores de cada caso simulado y no las magnitudes, por lo tanto, las propiedades de todos los materiales del edificio y las dimensiones de la losa utilizados, son los que vienen por defecto en el ETABS v9.7.

Estos son:

- F_y : 3.515 kgf/cm²
- F_u : 4.570 kgf/cm²
- Módulo de elasticidad: $2,04 \times 10^6$ kgf/cm²
- Peso por unidad de volumen: 7.833 kgf/m³

Las bases del edificio se tomaron empotradas, y todas las conexiones entre vigas y columnas son conexiones rígidas o a momento.

Procedimiento para la simulación:

Para simular la pérdida de soporte, a una columna de planta baja se le quitan todas las restricciones, en su parte inferior. Es decir que, de estar empotrada - lo cual significa estar restringida a trasladarse y rotar en las direcciones X, Y, Z - pasó a estar libre para realizar cualquier movimiento en ese extremo.

A continuación se muestran las imágenes de los edificios:

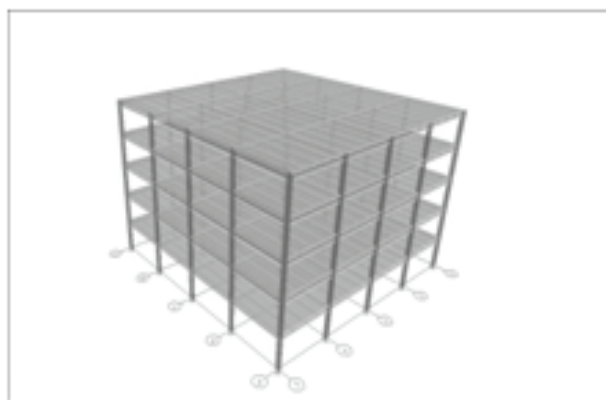


Figura 1. Modelo del edificio de 5 pisos. Fuente: Autores conETABS.

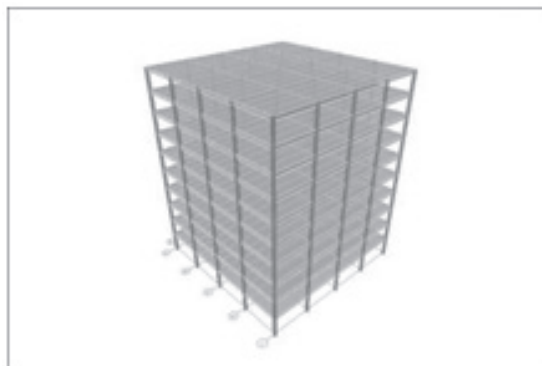


Figura 2. Modelo del edificio de 10 pisos. Fuente: Autores conETABS.



Figura 3. Modelo del edificio de 15 pisos. Fuente: Autores conETABS.

Se elige entonces analizar los siguientes casos:

- **Caso (0):** Edificio sin alterar.
- **Caso (C):** Edificio sometido a la pérdida de soporte en la columna del **Centro** del mismo (columna C13 en la figura 4).
- **Caso (F ⊥):** Edificio sometido a la pérdida de soporte en la columna central de la **Fachada perpendicular** a las correas (columna C3 en la figura 4).
- **Caso (F //):** Edificio sometido a la pérdida de soporte en la columna central de la **Fachada paralela** a las correas (columna C11 en la figura 4).
- **Caso (E):** Edificio sometido a la pérdida de soporte en la columna de **Esquina** (columna C1 en la figura 4).

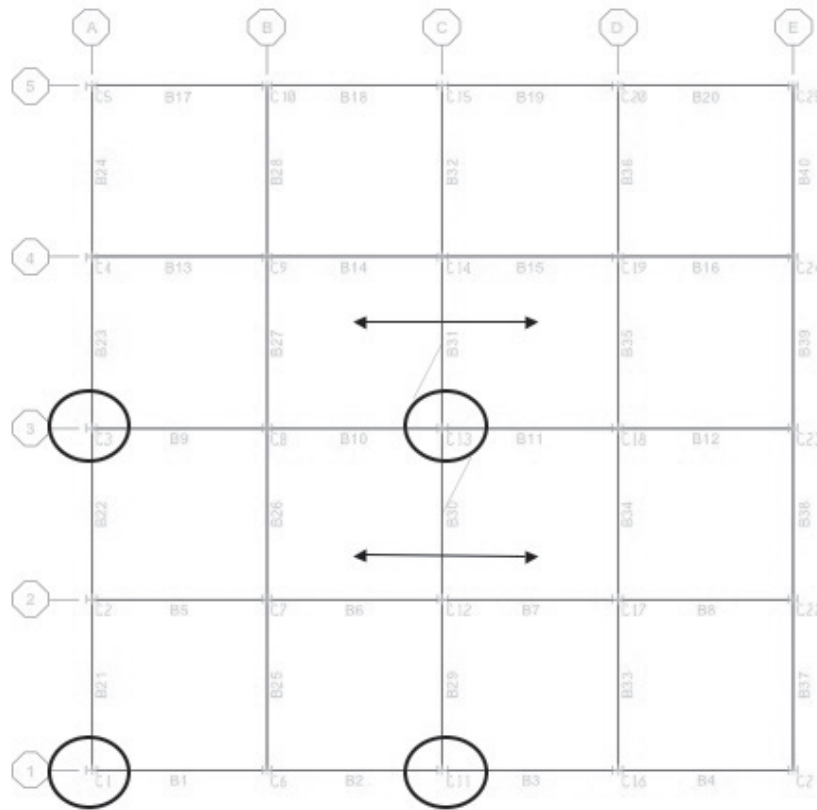


Figura 4. Identificación en planta de las columnas a estudiar. Dirección de las correas Este-Oeste (ver flecha “↔”).

5. RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados del estudio. A manera de facilitar la lectura sólo se colocan los esenciales para la discusión.

Primero se muestran en las figuras 5, 6 y 7 los diagramas de momento, corte y fuerza axial del Caso (0), rellenados en negro, sobre el Caso (C), sin relleno, ambos del edificio de 5 pisos, para explicar la variación de comportamiento de estos patrones cuando la estructura es sometida por la pérdida de soporte.

En la figura 8 se muestra una representación gráfica de los desplazamientos verticales del piso 5, visto en planta, para el edificio de 5 pisos, después que ha sufrido la pérdida de soporte. Se muestran unas curvas de contorno en dicha figura, las cuales representan un rango de desplazamientos verticales. Cada rango está definido por un tono gris distinto. Además, sobre esta figura se encuentra superpuesto la imagen de los diagramas de

momento para ver la relación entre esta sollicitación y los desplazamientos verticales.

En la figura 9, se muestra una superposición de los desplazamientos verticales de los cuatro casos de pérdida de soporte estudiados. La finalidad de esta figura es encontrar el orden de sensibilidad de los casos, es decir, cuál es más peligroso.

En las figuras 10 a 15 se grafican los valores de fuerza axial, corte y momento con respecto a la altura en los tres edificios analizados, para estudiar la influencia de la altura del edificio ante la pérdida de soporte. También se puede estudiar la propagación de la magnitud de las sollicitaciones a medida que se asciende de piso.

Finalmente en las figuras 16 y 17 se presentan los valores de DEMANDA/CAPACIDAD antes y después de la pérdida de soporte, en el caso C en los miembros del pórtico C. Los cuales sirven para entender el cambio de estado de las sollicitaciones combinadas.

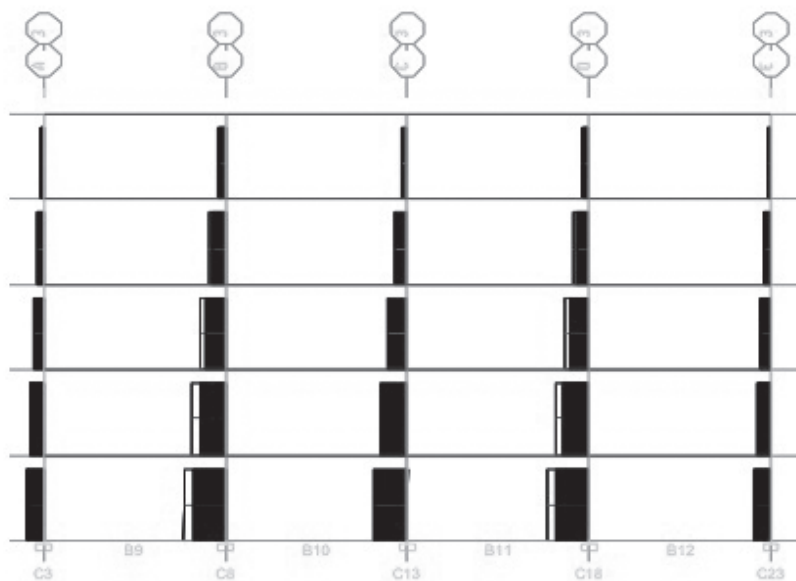


Figura 5. Diagramas de fuerza axial en kgf, del pórtico 3 para el edificio de 5 pisos. Caso (C) y Caso (0) superpuestos. Fuente: Autores con ETABS.

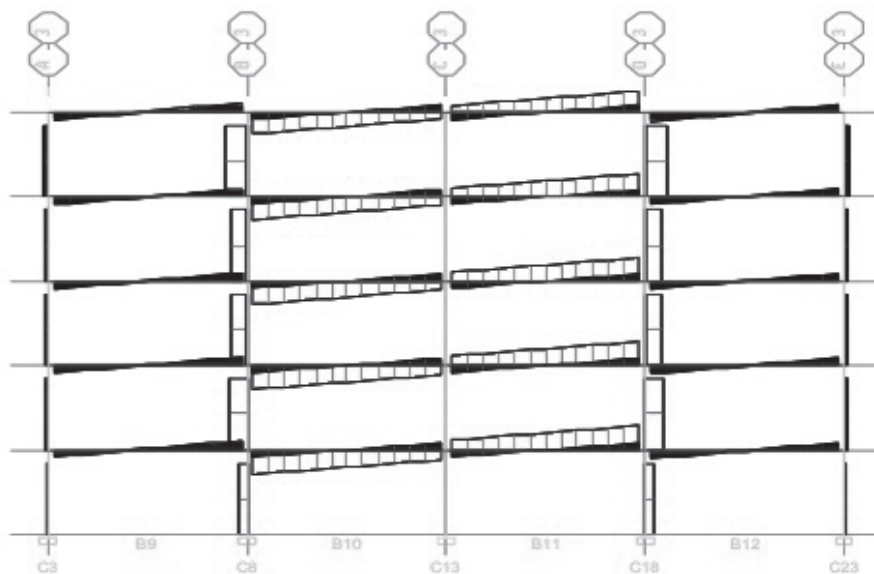


Figura 6. Diagramas de corte en kgf, del pórtico 3 para el edificio de 5 pisos. Caso (C) y Caso (0) superpuestos. Fuente: Autores con ETABS.

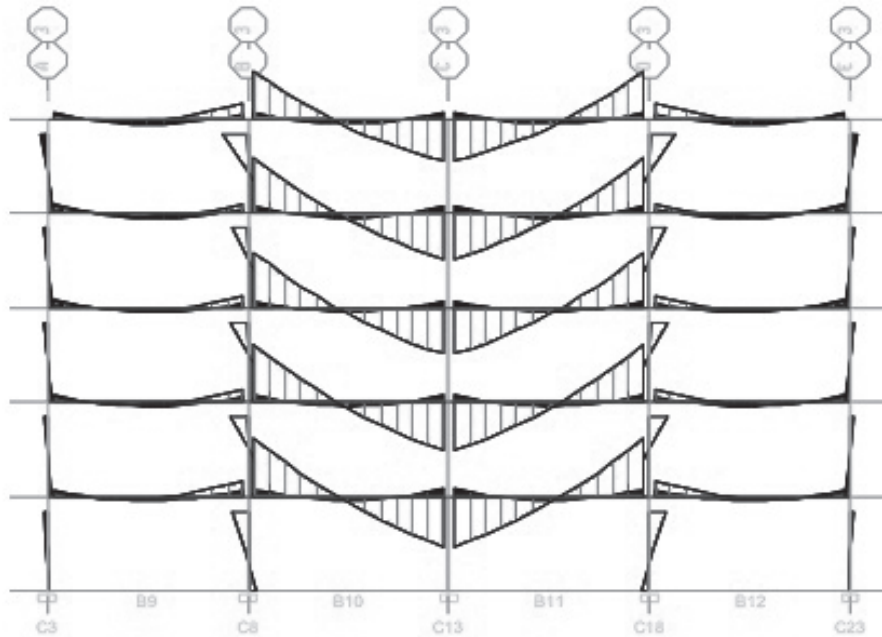
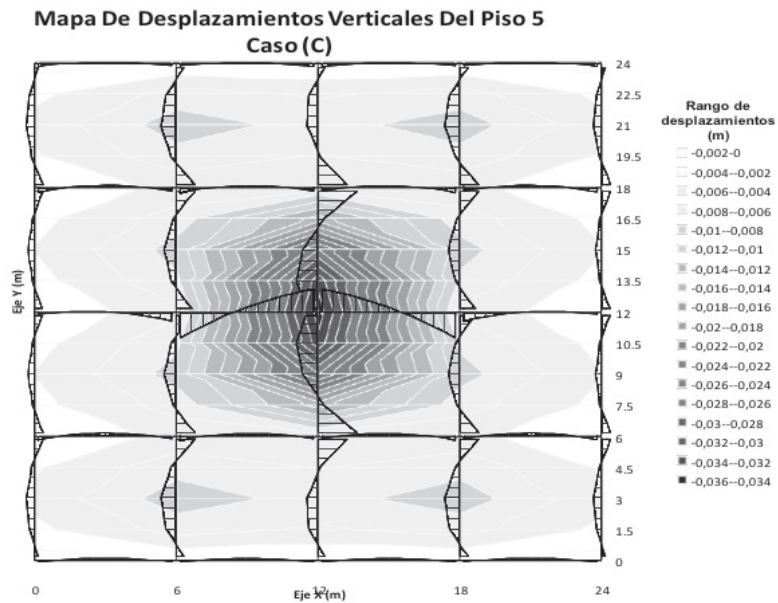


Figura7. Diagramas de momento en kgf, del pórtico 3 para el edificio de 5 pisos. Caso (C) y Caso (0) superpuestos.
Fuente: Autores con ETABS.



Fuente: Autores con ETABS

Figura 8. Fuente: Autores con Microsoft Office Excel.

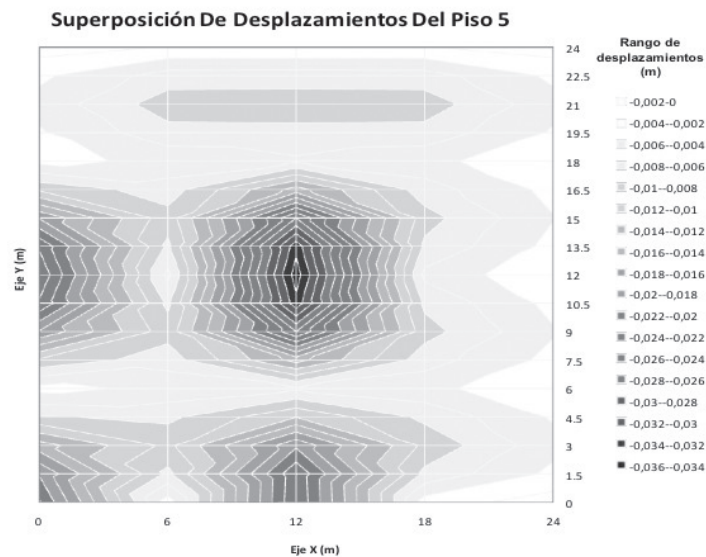


Figura 9. Fuente: Autores con Microsoft Office Excel.

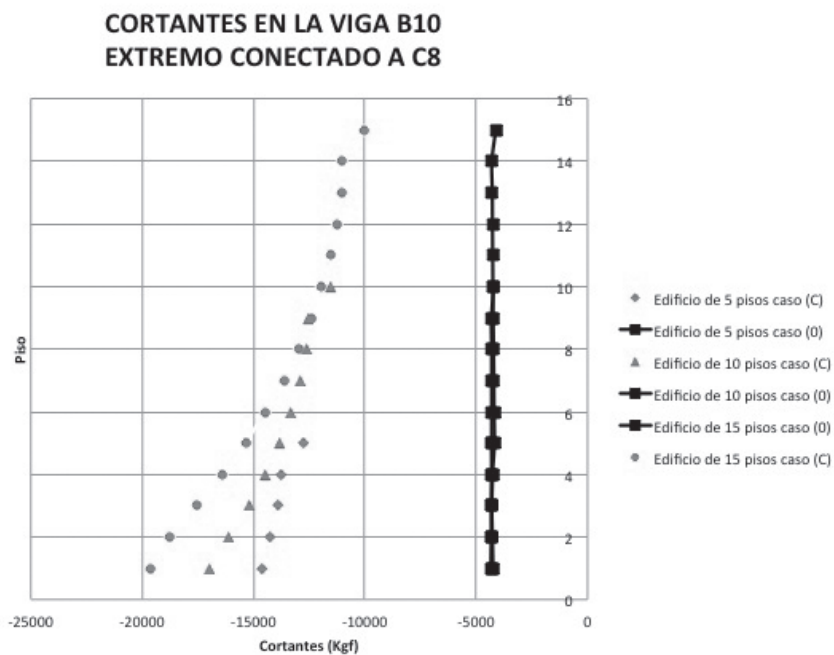


Figura 10. Fuente: Autores con Microsoft Office Excel.

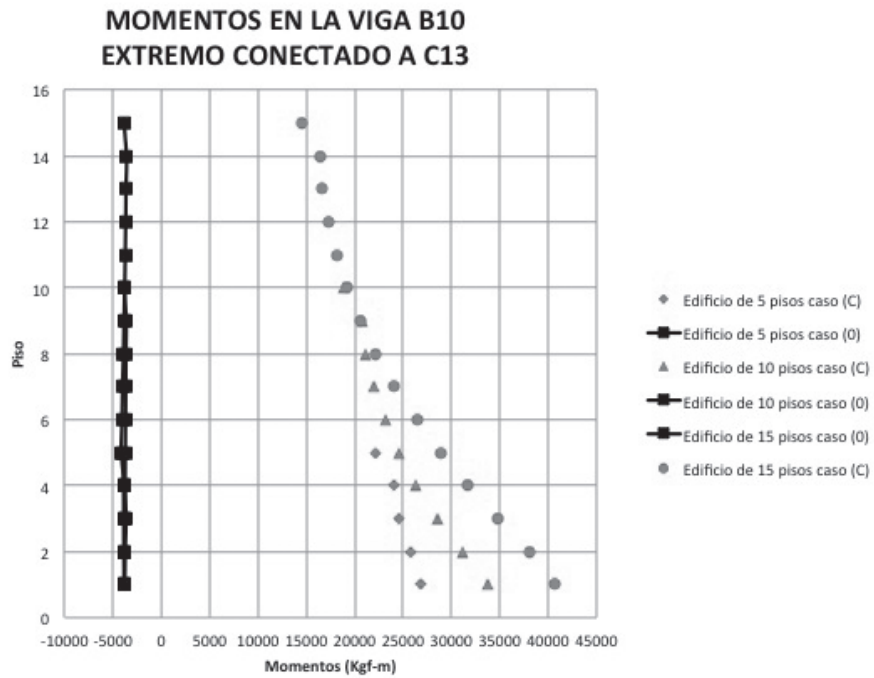


Figura 11. Fuente: Autores c

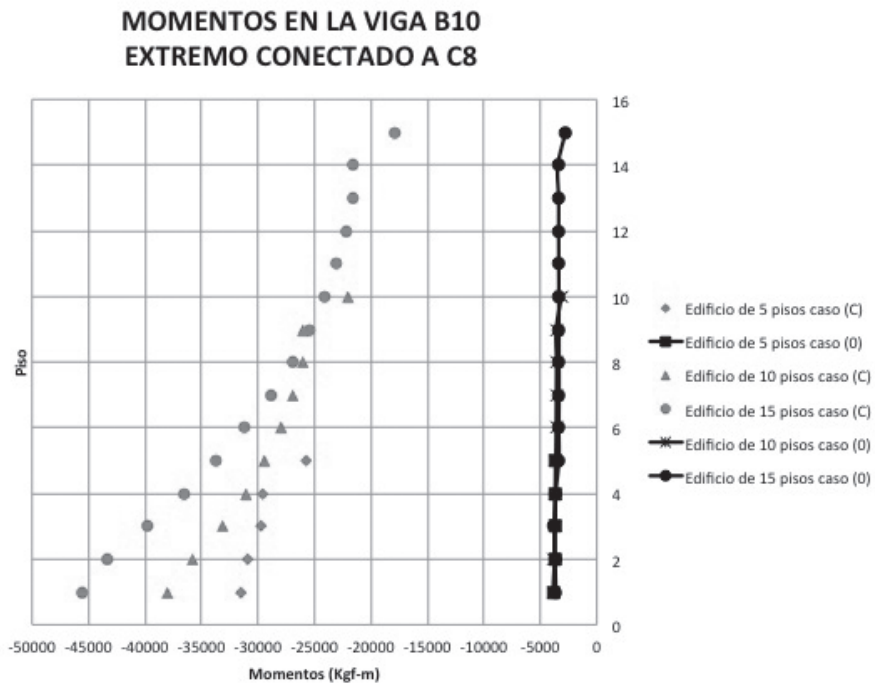


Figura 12. Fuente: Autores con Microsoft Office Excel.

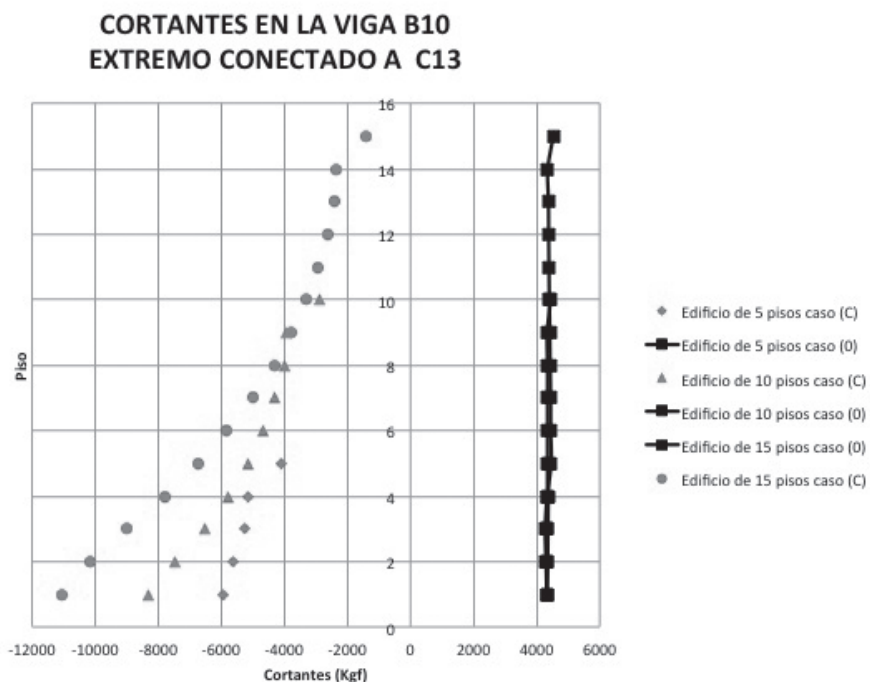


Figura 13. Fuente: Autores con Microsoft Office Excel.

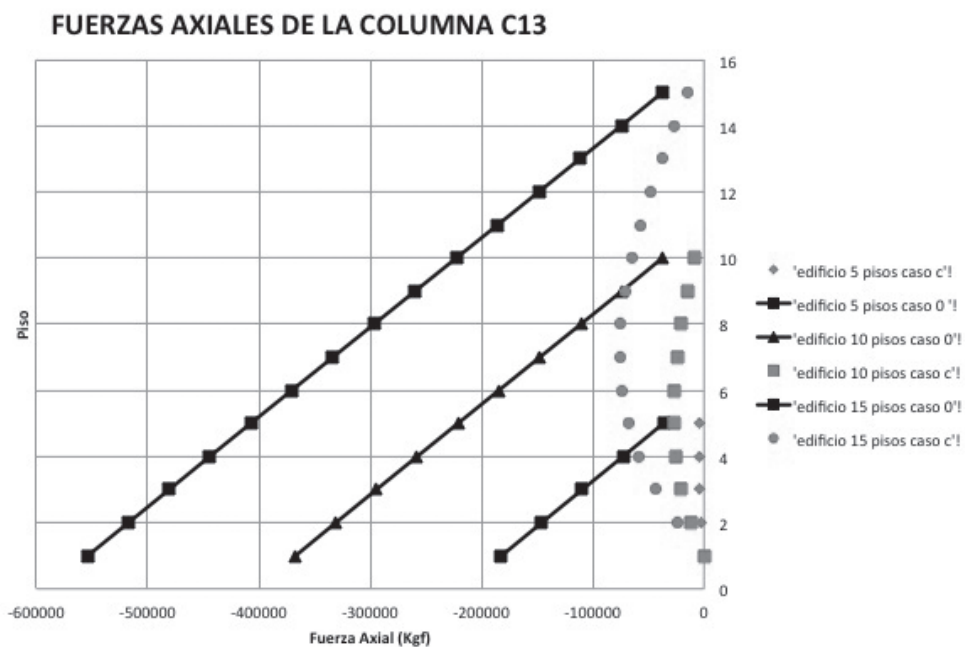


Figura 14. Fuente: Autores con Microsoft Office Excel.

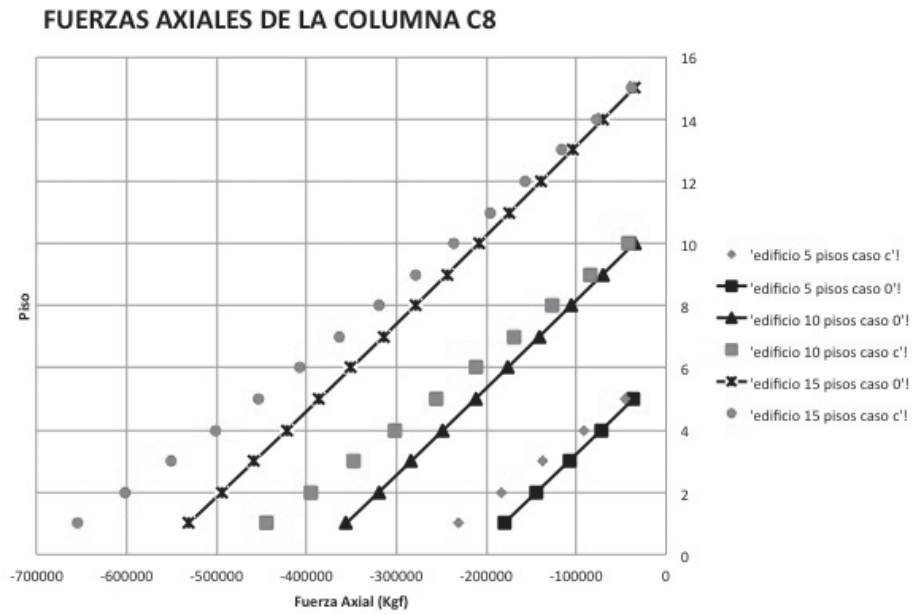


Figura 15. Fuente: Autores con Microsoft Office Excel.

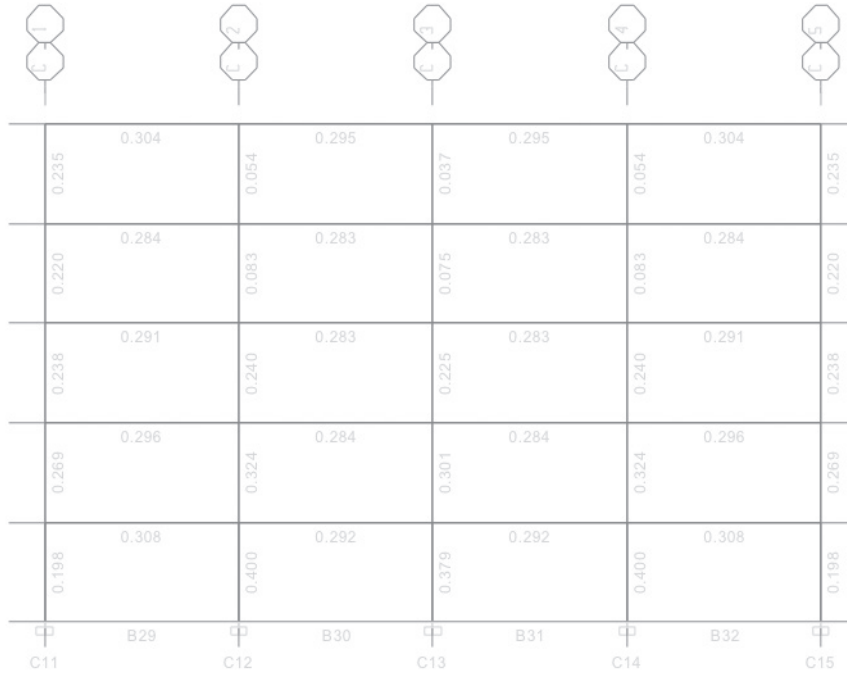


Figura 16. Valores de DEMANDA/CAPACIDAD, edificio de 5 pisos, caso 0, pórtico C. Fuente: Autores con ETABS.

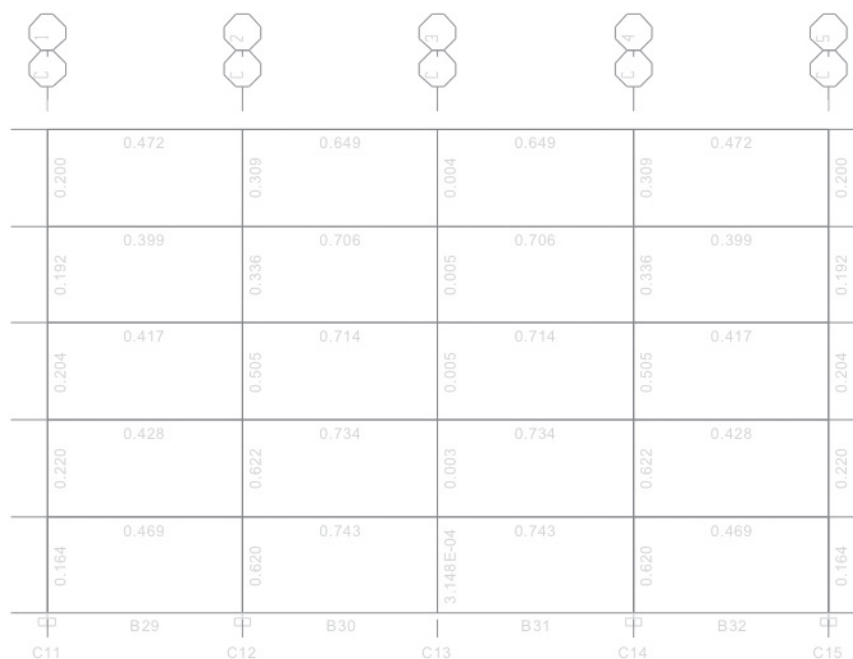


Figura 17. Valores de DEMANDA/CAPACIDAD, edificio de 5 pisos, caso C, pórtico C. Fuente: Autores con ETABS.

6. DISCUSIÓN

Bajo condiciones normales, las cargas gravitacionales en un edificio aporricado, se transmiten, de losa a las vigas, de las vigas a las columnas, y de las columnas al suelo. Esta transferencia está acompañada por la generación de diferentes esfuerzos en los miembros. En las vigas, principalmente se generan cortantes y momentos. Luego, esos cortantes pasan a las columnas como axiales, que se acumulan de piso en piso. Y, finalmente, las axiales se transfieren al suelo.

Cuando una columna pierde soporte, se corta el último paso del proceso. De manera que la carga tiene que buscar una ruta alterna:

La viga que intenta transmitir carga a las dos columnas de sus extremos, encuentra que una no puede resistir casi, por no tener forma de descargar al suelo.

Ahora las columnas adyacentes reciben casi toda la carga. Por lo tanto la mayor parte de las reacciones en la viga se concentran en un solo extremo. De aquí se entiende entonces, que los esfuerzos serán diferentes.

El hecho que la reacción se concentre en un extremo hace que los esfuerzos cortantes aumenten ahí.

Por otro lado, una mayor concentración de fuerza hace que, se genere un mayor momento en uno de los extremos y disminuya en el otro. Por lo tanto tienen que aparecer unos nuevos momentos en los extremos que equilibren esta situación.

Finalmente los cortantes generados en las vigas pasan como axiales a las columnas, y se acumulan de piso en piso.

Esta acumulación de axiales se traduce también en una acumulación de cortantes y momentos.

Sabiendo esto podemos explicar el orden de sensibilidad de los casos estudiados.

Si el peso aguantado por la columna que pierde el soporte pasa a las adyacentes. Entonces el peor caso será, aquel que tenga más peso y menos miembros a los cuales repartir. Es decir aquel con la mayor relación entre número de paños y número de columnas que se le conectan.

Para este análisis se realiza la siguiente tabla:

Caso	Número de paños vinculados	Número de columnas adyacentes	Relación	Orden de peligrosidad
(C)	4	4	1	1
(F _⊥)	2	3	0.67	2
(F//)				
(E)	1	2	0.5	3

El más peligroso es el 1 y el menos el 3. Nótese que este análisis no distingue entre fachadas.

Por otro lado, también se puede usar la distorsión angular como medio de comparación entre casos. Para obtener este valor se divide la diferencia de desplazamientos verticales en los extremos de la viga entre la luz que los separa.

En la siguiente tabla se muestran estos valores:

Caso	S1(cm)	S2(cm)	Longitud(cm)	Distorsión angular $\Delta S/L$
(C)	-3.51	-0.55	600	1/203
(F _⊥)	-2.56	-0.33		1/269
(F//)	-2.39	-0.3		1/287
(E)	-2.22	-0.21		1/299

Con esta tabla se puede diferenciar la gravedad de todos los casos. Mientras menor sea el denominador en la distorsión angular, más grave será el caso.

Cabe destacar que los valores de distorsión angular expuestos anteriormente son del quinto piso del edificio de 5 pisos. Se tomó arbitrariamente ese piso porque, como se menciona anteriormente, lo que se estudia son las relaciones entre los casos y no la magnitud.

Por último, al comparar los pisos en común de los edificios de 5, 10 y 15 pisos, notamos que mientras más alto es, más afectado se ve por la pérdida de soporte. Se dice esto porque, teniendo un mismo perfil de viga, se observa que los valores de corte y momento son mayores mientras más alto es el edificio.

Esto es porque, como se mencionó anteriormente, existe una acumulación de esfuerzos a medida que se desciende verticalmente. Entonces, mientras más pisos, más carga se acumula.

Tomando en cuenta que los edificios se diseñaron mediante un análisis estático lineal, se asume que los miembros que conforman cada una de las estructuras, no exceden su capacidad bajo las demandas producidas por el fenómeno de pérdida de soporte. Dicho estudio aplica para los tres edificios.

Aunque puedan haber algunos miembros cuyo valor de DEMANDA/CAPACIDAD sean solo un poco mayor a 1. Esto no afectaría para el análisis lineal porque se sabe que detrás de los valores de DEMANDA/CAPACIDAD, hay muchos factores de seguridad y reducción como por ejemplo: $\phi_b = 0,90$. Además hay que considerar que el edificio sólo fue diseñado para resistir cargas gravitacionales, por lo tanto si se hubiese diseñado para sismo, sus miembros serían más grandes y los valores de DEMANDA/CAPACIDAD disminuirían.

Aún así, aunque algunos miembros de la estructura sobrepasaran su capacidad, la estructura todavía permanecería en pie mientras no se genere un mecanismo.

Para que se genere un mecanismo de colapso, tiene que fallar cierta cantidad de miembros claves, dando inestabilidad a la estructura. El mecanismo puede ser formado por pandeo, fatiga ó suficientes articulaciones plásticas en el sistema, entre otros.

Debido a la configuración de los edificios estudiados, el tipo de mecanismo más probable a ocurrir es el de articulaciones plásticas. Para que se formen estas articulaciones, se debe someter al miembro a unas cargas anormales que hagan vencer su resistencia a la flexión haciéndolo llegar a la zona de plastificación en una determinada sección de este.

Sin embargo, para poder entrar al concepto de plastificación en miembros, que generalmente se hablan de vigas en este caso, se debe aclarar que para una viga llegar a la plastificación, esta debe tener su momento nominal resistente a la flexión igual al momento plástico (M_p). Es decir que no sufre ningún tipo de pandeo antes de que se le forme la primera articulación plástica.

Para estudiar la plastificación en miembros y poder analizar un posible mecanismo de falla en la estructura, vendría mejor hacer un análisis estático no lineal.

7. CONCLUSIONES

El orden de sensibilidad está relacionado con el peso soportado por la columna afectada, y el número de miembros a los que está conectada.

El grado de alteración de los esfuerzos en los miembros aumenta a medida que se aproximan a la columna crítica. Visto tanto en planta como en perfil.

El caso más grave es (C), luego (F_⊥), después (F//), y por último (E).

Mientras más alto, más afectado es el edificio por la pérdida de soporte.

Los pisos más afectados en todos los edificios que están sometidos por la pérdida de soporte son los primeros.

Luego de la pérdida de soporte, la carga anteriormente aguantada por la columna en cuestión, pasa mayoritariamente, a las columnas adyacentes a través de las vigas.

Los desplazamientos verticales en un piso están relacionados con los momentos de este.

Los valores de DEMANDA/CAPACIDAD ayudan a determinar las potenciales localizaciones donde las fallas podrían ocurrir.

Los métodos gráficos son herramientas útiles y muy prácticas para entender la gravedad del daño que se ocasiona en una estructura cuando se encuentra sometida por este tipo de fenómenos.

La influencia de la pérdida de soporte en una estructura es tan importante como la afectación por otros fenómenos.

8. RECOMENDACIONES

Existe un gran número de variables que no se estudiaron, o tomaron en cuenta en esta tesis, ya que sería muy complejo a realizar en un solo trabajo, pero se sugiere que se consideren en trabajos posteriores, uno a uno, cada uno de los siguientes efectos:

Irregularidad del edificio.

- Estudiar el caso en donde ocurra la pérdida de soporte en una columna central pero no simétrica.
- Estudiar el efecto de la fuerza sísmica aunque se considera baja la probabilidad de que ocurran simultáneamente los dos efectos.

En vista que los momentos y cortantes aumentan significativamente en las vigas de los pisos inferiores luego de la pérdida de soporte, se recomienda estudiar el efecto de la utilización de vigas más grandes en los primeros pisos u otra solución podría ser, colocar arriostamientos diagonales en los pisos inferiores.

Se recomienda hacer el estudio considerando el aporte de las vigas de riostra en la solución del sistema estructural.

Se sugiere estudiar la pérdida de soporte en un edificio de concreto. Principalmente debido a que el concreto no resiste casi a tracción, y como se observó en esta investigación, la pérdida de soporte conlleva la inversión de signos de los momentos en algunas partes

de la estructura. Esto podría causar mayores consecuencias en edificios de concreto si no están debidamente reforzados con acero en esos puntos.

Estudiar el comportamiento plástico de una estructura cuando por pérdida de soporte, la capacidad resistente de sus miembros sea menor que la carga que reciben. Esto incluye la disminución de grados de hiperelasticidad por medio de formación de rótulas plásticas y la evaluación de mecanismos de colapso.

Estudiar cómo afecta el hecho de que el edificio este diseñado sísmicamente, a la pérdida de soporte.

En sitios propensos a fallas de fundación, utilizar pilotes en vez de fundaciones superficiales, ya que es muy difícil que se ocasione la pérdida de soporte debido a la profundidad a la cual se entierra el pilote.

9. REFERENCIAS

- [1] Alcina, O. (1998) "*Búsqueda de parámetros adimensionales para predecir los efectos de asentamientos diferenciales en pórticos*". Trabajo Especial de Grado no publicado. Universidad Católica Andrés Bello.
- [2] Bendito, A. "*Introducción al comportamiento y al diseño de estructuras de acero. Método de los Estados Límite*". Universidad de Los Andes. Consultado Septiembre 2011. Disponible en: <http://webdelprofesor.ula.ve/nucleotrujillo/americanb/>.
- [3] FONDORAMA 1753 (2006). "*Proyecto y construcción de obras en concreto estructural*".
- [4] Marchand, K y Alfawakhiri, F. (2005). *Facts for Steel Buildings Number 2 - Blast and Progressive Collapse*. American Institute of Steel Construction, Inc.
- [5] Palencia, E. (2011). "*Método de refuerzo de la estructura de una edificación aporricada virtual, para mitigar los efectos producidos por asentamientos diferenciales, mediante el uso del programa ETABS*". Trabajo Especial de Grado no publicado.
- [6] Pérez Marrero, J. y Santos Simoza E. (1999). "*Búsqueda de parámetros adimensionales en la determinación de efectos de asentamientos en porticos de acero y concreto*". Trabajo Especial de Grado no publicado. UNEFA.
- [7] R.Shankar Nair, Marzo 2004, "Progressive Collapse Basics". Revista Modern Steel Construction.

- [8] Rojas, S. "*Material de apoyo de Fundaciones parte II Teoría de Elasticidad para Estimación de Asentamientos y Esfuerzos*". Universidad de Los Andes. Consultado Septiembre 2011. Disponible en: http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/silviorojas/fundaciones/CapIII_AsentElasticos/CapIII_104-115.pdf.
- [9] U.S General Services Administration Progressive (*Disproportionate*) Collapse Definitions. Consultado en Septiembre del 2011. Disponible en: <http://www.gsa.gov/portal/content/103202>.
- [10] Valencia, G. (2004). "Estructuras de acero. Diseño con factores de cargas y de resistencia." 2da edición. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería, pp (75, 162, 166, 198, 200, 202, 442).

