

**ESTUDIO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE UNA  
ESTRUCTURA EN SISTEMA LOSA-COLUMNA: ANÁLISIS  
MODAL PUSHOVER, ANÁLISIS PUSHOVER E ÍNDICES  
DE FLEXIBILIDAD Y SOBRESFUERZO.**

**JUAN CAMILO MANTILLA URIBE**

**EDWIN ALEXANDER MORANTES RODRÍGUEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL**

**BUCARAMANGA**

**2014**

**ESTUDIO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA EN SISTEMA  
LOSA-COLUMNA: ANÁLISIS MODAL PUSHOVER, ANÁLISIS PUSHOVER E ÍNDICES  
DE FLEXIBILIDAD Y SOBRESFUERZO.**

**JUAN CAMILO MANTILLA URIBE**

**EDWIN ALEXANDER MORANTES RODRÍGUEZ**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial  
Para optar por el Título de Ingeniero Civil

Director:

**GUSTAVO CHIO CHO**

Ingeniero Civil. PhD.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA**

**2014**

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCION .....	14
NOMENCLATURA .....	15
1. MODELO ESTRUCTURAL .....	15
1.1 INTERACCIÓN SUELO ESTRUCTURA .....	15
1.2 SISTEMA DE LOSA .....	16
1.3 RIGIDEZ EFECTIVA DE LOS ELEMENTOS ESTRUCTURALES.....	16
2. INDICES DE FLEXIBILIDAD Y SOBRESFUERZO.....	17
2.1 CRITERIOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VULNERABILIDAD.....	17
2.2 DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CAPACIDAD DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA R'	17
2.3 MÉTODO DE ANÁLISIS DE RESISTENCIA SÍSMICA .....	18
2.4 RESISTENCIA EFECTIVA DE LOS ELEMENTOS: .....	18
2.5 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE SOBRESFUERZO DE LA ESTRUCTURA .....	18
2.6 CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD POR RESISTENCIA: .....	19
2.7 OBTENCIÓN DEL ÍNDICE DE FLEXIBILIDAD PARA LA EDIFICACIÓN .....	19
2.8 CÁLCULO DE LA VULNERABILIDAD POR FLEXIBILIDAD .....	19
2.9 FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE FALLA:.....	20
3. MÉTODO PUSHOVER.....	21
4. ANÁLISIS MODAL PUSHOVER (MPA).....	23
5. RESULTADOS Y COMPARACIONES .....	25
5.1 RESPUESTAS POR METODOLOGÍA INELÁSTICA. ....	25
5.1.1 Dirección X.....	25
5.1.2 Dirección Y.....	27

	pág.
5.2 RESPUESTAS POR METODOLOGÍA ELÁSTICA. ....	28
5.2.1 Dirección X. ....	28
5.2.2 Dirección Y. ....	29
5.3 ESTADO ESTRUCTURAL. ....	30
6 CONCLUSIONES. ....	31
REFERENCIAS. ....	32
BIBLIOGRAFÍA. ....	34

## LISTA DE FIGURAS.

	pág.
Figura 1. Detalle en planta del sistema estructural.....	16
Figura 2. Distribución de columnas en planta Nivel N+6.00m, principales elementos propensos a colapsar en caso de sismo. ....	20
Figura 3. Distribución de columnas en planta Nivel N+6.00m, elementos propensos a colapsar, después de elementos primarios, en caso de sismo. ....	20
Figura 4. Diagrama momento curvatura. ATC 40.....	21
Figura 5. Criterios de aceptabilidad para la deformación de los elementos o componentes. Tomado de FEMA 356.....	22
Figura 6. Curvas de capacidad con su respectivo punto de desempeño o desplazamiento objetivo, según caso. Análisis pushover ATC 40, FEMA 356 distribución uniforme y FEMA 356 distribución SRSS. Dirección X. ....	22
Figura 7. Curvas de capacidad con su respectivo punto de desempeño o desplazamiento objetivo, según caso. Análisis pushover ATC 40, FEMA 356 distribución uniforme y FEMA 356 distribución SRSS. Dirección Y. ....	23
Figura 8. Curvas de capacidad y punto de desempeño. Análisis modal pushover. Modos participantes en dirección X. a) Curva de capacidad modo 2. b) Curva de capacidad modo 5.....	24
Figura 9. Curvas de capacidad y punto de desempeño. Análisis modal pushover. Modos participantes en dirección Y. a) Curva de capacidad modo 1. b) Curva de capacidad modo 3. c) Curva de capacidad modo 4.25	25
Figura 10. a) Desplazamientos máximos y b) derivas máximas en dirección X. Análisis pushover y MPA. ....	26
Figura 11. Cortantes por piso en dirección X. Análisis pushover y MPA.....	26
Figura 12. a) Desplazamientos máximos y b) derivas máximas en dirección Y. Análisis pushover y MPA. ....	27
Figura 13. Cortantes por piso en dirección Y. Análisis pushover y MPA.....	27
Figura 14. a) Desplazamientos máximos y b) derivas máximas en dirección X. Análisis Elástico NSR10. Totalidad de efectos sísmicos aplicados en dirección X. ....	28
Figura 15. Cortantes por piso en dirección X. Análisis Elástico NSR10. Totalidad de efectos sísmicos aplicados en dirección X. ....	28
Figura 16. a) Desplazamientos máximos y b) derivas máximas en dirección Y. Análisis Elástico NSR10. Totalidad de efectos sísmicos aplicados en dirección Y. ....	29
Figura 17. Cortantes por piso en dirección Y. Análisis Elástico NSR10. Totalidad de efectos sísmicos aplicados en dirección Y. ....	29
Figura 18. Estado de las rótulas análisis inelástico en X.....	30

pág.

Figura 19. Estado de las rótulas análisis inelástico en Y.....	30
Figura 20. Figura 20. Cantidad de rótulas a rehabilitar en dirección X.....	30
Figura 21. Cantidad de rótulas a rehabilitar en dirección Y.....	31

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Factores de modificación de rigidez efectiva. Tomada de FEMA 356.....	17
Tabla 2. Índice de sobreesfuerzo de los diferentes elementos con su respectiva acción crítica.....	18
Tabla 3. Valores máximos de desplazamientos y derivas. Análisis elástico NSR 10.....	19

## RESUMEN

**TITULO: ESTUDIO DE VULNERABILIDAD SÍSMICA DE UNA ESTRUCTURA EN SISTEMA LOSA-COLUMNA: ANÁLISIS MODAL PUSHOVER, ANÁLISIS PUSHOVER E ÍNDICES DE FLEXIBILIDAD Y SOBRESFUERZO. \***

**AUTORES:** JUAN CAMILO MANTILLA URIBE \*\*  
EDWIN ALEXANDER MORANTES RODRIGUEZ \*\*

**PALABRAS CLAVES:** Vulnerabilidad sísmica, Índices de flexibilidad, Índices de sobreesfuerzo, Análisis estático no lineal NSP (Pushover), Análisis modal Pushover (MPA).

**DESCRIPCIÓN:** Este proyecto se orientó a realizar el estudio de vulnerabilidad sísmica de una estructura existente en sistema losa-columna aplicando metodologías de análisis elástico e inelástico. La estructura escogida fue la Biblioteca Central de la Universidad Industrial de Santander. En el presente estudio se consideró el análisis elástico presente en el reglamento de construcción sismo resistente Colombiano NSR10, conocido como el método de índices de flexibilidad y sobreesfuerzo. Los parámetros para la aplicación de los métodos de análisis estático inelástico o análisis Pushover fueron tomados de las normas internacionales ATC40 y FEMA356. Reconociendo las limitaciones de las distribuciones de fuerza consideradas en los documentos del ATC40 y del FEMA para aproximar las demandas sísmicas en edificaciones con contribuciones significantes de los modos altos de vibración, los documentos del FEMA permiten el análisis estático no lineal si está implementado junto con un procedimiento dinámico lineal para tener en cuenta la participación de los modos altos en el comportamiento estructural. Por ende, recientemente se desarrolló el método Modal Pushover (MPA) basado en la teoría de la dinámica estructural, que permite incluir los efectos de los modos altos de vibración de la estructura (Chopra, Goel 2002). Actualmente, los procedimientos Pushover que consideran la contribución de modos altos para estimar la demanda sísmica y la redistribución de las fuerzas inerciales a causa de la cedencia estructural se encuentran bajo estudio, y no se ha extendido su aplicación debido a la complejidad conceptual y computacional que requieren. En el presente artículo se presentan los resultados y la comparación de las estimaciones de las demandas sísmicas evaluadas por los métodos utilizados: - Método Elástico, índices de flexibilidad y sobreesfuerzo, NSR10. - Método estático no lineal aplicando criterios del ATC40. - Método estático no lineal aplicando criterios del FEMA356. - Método estático no lineal Modal Pushover Analysis (MPA).

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Gustavo Chio Cho, Ingeniero Civil, PhD.

## ABSTRACT

**TITLE: SEISMIC VULNERABILITY STUDY OF A STRUCTURE IN SLAB-COLUMN SYSTEM: MODAL PUSHOVER ANALYSIS, PUSHOVER ANALYSIS, FLEXIBILITY AND OVERSTRESS INDEX.\***

**AUTHORS:** JUAN CAMILO MANTILLA URIBE \*\*  
EDWIN ALEXANDER MORANTES RODRIGUEZ \*\*

**KEYWORDS:** Seismic vulnerability, Flexibility index, Overstress index, Nonlinear static analysis NSP (Pushover), Modal pushover analysis (MPA).

**DESCRIPTION:** This project was aimed at the study of seismic vulnerability of an existing structure in slab - column system applying elastic and inelastic analysis methodologies. The building selected for this study was the Library of the Industrial University of Santander. The present study considers the elastic analysis presented in the Colombian building code NSR10 known as the method of overstress and flexibility index. The parameters for the application of nonlinear static analysis or pushover analysis were taken from international codes such as FEMA356 and ATC40. Recognizing limitations in the force distributions considered in ATC40 and FEMA documents to approximate seismic demands of buildings with significant higher vibration modes participation, documents like FEMA allow nonlinear static analysis if implemented along with linear dynamic procedure to consider the involvement of higher modes in the structural behavior. Thus, recently the Modal Pushover (MPA) method based on the theory of structural dynamics, which allows to include the effects of higher modes of vibration of the structure was developed (Chopra, Goel 2002). Currently the pushover procedures that consider the contribution of higher modes to estimate the seismic demand and the redistribution of the inertial forces due to structural yielding are under study and have not extended its application due to the conceptual and computational complexity required. This article presents the results and comparisons of the estimates of seismic demands evaluated by the following methods: - Elastic Method, overstress and flexibility index, NSR10. - Nonlinear static method applying ATC40 criteria. - Nonlinear static method applying FEMA356 criteria. - Nonlinear Modal Pushover Analysis (MPA).

---

\* Bachelor Thesis.

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Gustavo Chio Cho, Ingeniero Civil, PhD.

## INTRODUCCION

La vulnerabilidad sísmica es una propiedad intrínseca de la estructura, una característica de su propio comportamiento ante la ocurrencia de un sismo y descrito a través de una ley causa-efecto, donde la causa es el sismo y el efecto es el daño (Sandi, 1986). El concepto de vulnerabilidad puede utilizarse no sólo para describir aspectos estructurales, sino también aspectos no estructurales, funcionales y operativos, entre otros. Por lo tanto, estimar la vulnerabilidad de una estructura se ha convertido en uno de los frentes de investigación de mayor interés para la ingeniería sísmica. Existen varios métodos para analizar el comportamiento de las estructuras, tanto elásticos como inelásticos. Los métodos elásticos disponibles, incluyen los procedimientos de la fuerza horizontal estática, la fuerza horizontal dinámica así como procedimientos lineales usando relaciones de capacidad y demanda establecidas en los códigos. Por otra parte, el principal método de análisis inelástico es el análisis dinámico no lineal de estructuras también llamado análisis de respuesta en el tiempo, no obstante, para efectos prácticos y de diseño, resulta demasiado complejo y por lo tanto impráctico. De esta forma, surgen los métodos de análisis estático no lineal o análisis Pushover, los cuales permiten comprender el comportamiento de las estructuras cuando se ven sometidas a movimientos sísmicos severos. Hasta hace poco, los códigos de diseño no consideraban necesario diseñar para niveles de servicio bajo cargas sísmicas. El uso explícito de múltiples objetivos de desempeño se introdujo en los años 90, en documentos tales como, FEMA 273 (FEMA, 1997), ATC40 (ATC, 1996), Visión 2000 (SEAOC, 1995), FIB (2003).

En el análisis Pushover las fuerzas inerciales están representadas por distribuciones invariantes de fuerza lateral que empujan la estructura hasta alcanzar un estado límite de deformación. Teniendo en cuenta que el comportamiento estructural depende de la forma de la fuerza lateral aplicada, documentos como el FEMA 356 exigen que al aplicar un análisis Pushover la estructura deberá ser sometida mínimo a dos distribuciones invariantes de fuerza lateral de esta manera se cubre el rango de acciones para diseño que pueden ocurrir durante la respuesta dinámica real. La simplicidad del método Pushover al representar las fuerzas laterales como una distribución invariante introduce enormes limitaciones al método, especialmente en estructuras con un gran número de pisos y con un alto grado de irregularidad. Por esta razón, recientemente ha sido objeto de estudio el análisis modal Pushover, el cual busca superar ésta limitación del análisis Pushover estándar al implementarlo junto con un análisis dinámico lineal que permita capturar la contribución de otros modos diferente al fundamental. En el presente artículo se aplicarán metodologías de análisis elástico e inelástico para la estimación de la demanda sísmica en una estructura seleccionada. El análisis elástico estará representado en el método de índices de flexibilidad y sobreesfuerzo contemplado en la NSR-10 y el análisis inelástico será aplicado según los parámetros presentados en los documentos FEMA 356, ATC40 y finalizando con el procedimiento Pushover Modal. La edificación bajo estudio fue la Biblioteca Central de la Universidad Industrial de Santander construida en el año 1976, cuyo diseño y construcción se llevó a cabo bajo el reglamento ACI 318 de 1963. La edificación posee un sistema estructural losa-columna.

## NOMENCLATURA

ISE	Interacción Suelo-Estructura.
$\Delta$	Deriva de piso [M];
$\phi_c$	Coefficiente de reducción de resistencia por calidad del diseño y construcción de la estructura;
$\phi_e$	Coefficiente de reducción de resistencia por estado de la estructura;
$R'$	Coefficiente de capacidad de disipación de energía que se le asigna a la edificación existente;
$N_{ef}$	Resistencia efectiva [KN];
$N_{ex}$	Resistente existente [KN];
$F_s$	Fuerzas sísmicas equivalentes [KN];
$E$	Fuerzas sísmicas reducidas para revisión de la estructura existente y diseño de la ampliación [KN]
MPA	Análisis Modal Pushover;
NSP	Procedimiento estático no-lineal;
$\phi_i$	Desplazamientos modales del modo i;
$\phi_{rn}$	Desplazamiento modal del modo “n” a nivel de cubierta;

## 1. MODELO ESTRUCTURAL

### 1.1 Interacción Suelo Estructura

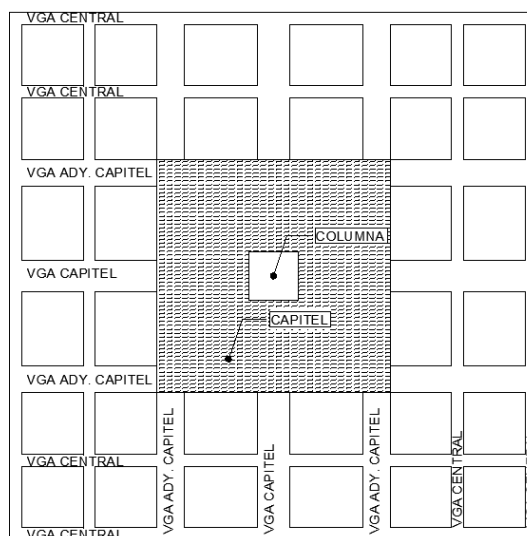
El sistema de cimentación que presenta la edificación corresponde a un sistema superficial de zapatas aisladas sin vigas de amarre. Por lo tanto, existe la posibilidad de que se presenten asentamientos diferenciales y/o movimientos relativos entre zapatas en el caso de sismos.

El método de modelamiento seleccionado es basado en el módulo de reacción o de subrasante, el cual considera que la distribución de presiones que ejerce el suelo sobre la zapata es proporcional al asentamiento; donde el factor de proporcionalidad es el coeficiente de balasto. A pesar de que las simplificaciones del método inducen a errores por asumir el módulo de reacción como constante en toda la cimentación y despreñar el efecto de medio continuo del suelo, puede aceptarse su aplicación en el caso en que exista una suficiente separación de los elementos de cimentación para poder ignorar la interacción entre ellos, situación que se presenta en sistemas de cimentación con zapatas aisladas [1].

## 1.2 Sistema de losa

El sistema de losa de entrepiso es armado y aligerado en las dos direcciones. Dicho sistema está conformado por viguetas centrales, que soportan esencialmente cargas gravitacionales, y vigas capitel y adyacentes al capitel las cuales enlazan ejes de columnas.

En la zona cercana a los puntos de apoyo de la losa la edificación cuenta con un capitel, el cual suministra una sección maciza en el perímetro próximo de la sección de la columna que ayuda a controlar el punzonamiento, ver detalle en la figura 1.



**Figura 1.** Detalle en planta del sistema estructural

Para simular el comportamiento de la estructura ante las solicitaciones impuestas, se aplicó uno de los métodos de modelamiento reconocidos por el FEMA 356 para representar la acción de la losa como un diafragma que interconecta los elementos verticales, donde los elementos que componen la losa son representados por elementos tipo línea que están rígidamente interconectados en la unión losa columna.

El comportamiento del capitel también se representó por un elemento tipo línea y el efecto inducido sobre los elementos contiguos (viga capitel y vigas adyacente a capitel) se modeló mediante un elemento rígido, que carece de masa, cuyo objetivo principal es uniformizar las deformaciones de las tres (3) vigas que se conectan al capitel.

La rigidez del sistema de losa y su configuración geométrica permiten que se modele como diafragma rígido; ya que carece de irregularidades en planta que afecten su funcionamiento como unidad. Los efectos torsionales tampoco exigen considerar un diafragma flexible, dichos efectos fueron evaluados mediante un análisis lineal dinámico de respuesta espectral que evidenció que ninguna deflexión horizontal es más de dos (2) veces el promedio de las deflexiones horizontales, razón suficiente para asumir un diafragma rígido según la NSR-10.

## 1.3 Rigidez efectiva de los elementos estructurales

Las diversas patologías que exhiben las estructuras de concreto tienen influencia negativa en la rigidez efectiva del elemento para soportar cargas. Las patologías pueden ser provenientes de acciones como: cambios volumétricos en el componente por retracción y temperatura, niveles de deformación inducidos por diversos estados de carga acompañados de agrietamiento del concreto, entre otras causas.

En la tabla 1 se muestra la rigidez efectiva de cada tipo de elemento según la acción a considerar.

Valores de rigidez efectiva			
Componente	Flexión	Cortante	Axial
Vigas/Losas-No pretensadas	$0.5E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	-
Columnas con compresión debida a cargas gravitacionales de diseño $\geq 0.5Agf_c$	$0.7E_c I_g$	$0.4E_c A_w$	$E_c A_g$

**Tabla 1.** Factores de modificación de rigidez efectiva. Tomada de FEMA 356.

Estos valores de rigidez efectiva a pesar de que no son requisito explícito para evaluar la vulnerabilidad sísmica de la estructura por el método elástico propuesto por la NSR-10 (Índices de flexibilidad y sobreesfuerzo) sí son requeridos para los métodos inelásticos Pushover y Pushover modal. Se enfatiza que los factores de rigidez efectiva no son explícitamente exigidos en la NSR-10 ya que indirectamente se pretende que sean tenidos en cuenta con los coeficientes  $\phi_c$  y  $\phi_e$ ; los cuales se les asignan valores obtenidos de una evaluación cualitativa de los diseños y la construcción.

## 2. INDICES DE FLEXIBILIDAD Y SOBRESFUERZO

### 2.1 Criterios para la determinación de la vulnerabilidad

Los criterios presentados en el capítulo A.10 del reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR10 [2] se utilizaron para evaluar la vulnerabilidad sísmica de la edificación considerada.

El análisis de vulnerabilidad sísmica de una edificación existente consiste en los siguientes aspectos:

- (a) Determinación de los índices de sobreesfuerzo individual de todos los elementos estructurales de la edificación, considerando las relaciones entre la demanda sísmica de esfuerzos y la capacidad de resistirlos,
- (b) Formulación de una hipótesis de secuencia de falla de la edificación, identificando la incidencia de la falla progresiva de los elementos, iniciando con aquellos con un mayor índice de sobreesfuerzo,
- (c) Definición de un índice de sobreesfuerzo general de la edificación.
- (d) Obtención de un índice de flexibilidad general de la edificación, definido con base en el procedimiento definido en A.10.4.3.5.

### 2.2 Determinación del coeficiente de capacidad de disipación de energía $R'$

De acuerdo con los requisitos expuestos en el reglamento sismo resistente NSR10 en A.10.4.2.4 y teniendo en cuenta el tipo de sistema estructural, la distribución del refuerzo en los elementos, el sistema de cimentación de la estructura y la importancia de la edificación en cuanto a patrimonio y vidas humanas que la ocupan, se eligió para realizar el análisis sísmico un coeficiente de capacidad de disipación de energía  $R'$  igual a 1. Que causa que las fuerzas sísmicas reducidas de diseño con las cuales se analizaron los elementos a las diferentes sollicitaciones, sean iguales a las fuerzas sísmicas.

$$E = F_s$$

### 2.3 Método de análisis de resistencia sísmica

Se utilizó el método de la fuerza horizontal equivalente descrito en el capítulo A.4 del reglamento NSR10. Se consideraron los efectos ortogonales de acuerdo con A.3.6.3. Y la torsión accidental de acuerdo con A.3.6.7. Las cargas se combinaron de acuerdo con el título B del reglamento.

### 2.4 Resistencia efectiva de los elementos:

Los valores de la resistencia existente  $N_{ex}$ , del elemento fueron modificados por dos factores de reducción de resistencia  $\Phi_c$  y  $\Phi_e$  que dependen de la calidad y el diseño de la estructura original y del estado de la estructura actual.

Tenido en cuenta el año en que se diseñó y construyó la edificación, que existe documentación en donde se presentan los criterios adoptados para el diseño y que la estructura no presenta daños visibles en los elementos que puedan poner en peligro la estabilidad estructural, se clasificó la calidad del diseño y la construcción o del estado de la edificación como “Buena” de acuerdo con la tabla A.10.4-1 del reglamento NSR10, por lo cual,

$$\Phi_c = \Phi_e = 1$$

Con estos coeficientes de reducción de resistencia se obtuvo la resistencia efectiva  $N_{ef}$ , del elemento como,

$$N_{ef} = \Phi_c * \Phi_e * N_{ex}$$

Lo que resultó en que,

$$N_{ef} = N_{ex}$$

Las resistencias efectivas del elemento y de todos los elementos que se analizaron por el método de índices de flexibilidad y sobre esfuerzo, son iguales a las resistencias existentes en los elementos.

### 2.5 Determinación del índice de sobreesfuerzo de la estructura

A partir de la demanda sísmica y las combinaciones de cargas aplicadas de acuerdo con los requisitos de la norma NSR10 se analizaron los diferentes efectos a los que están sometidos los elementos estructurales. Se calculó la razón entre las solicitaciones y las resistencias de los elementos a los diferentes efectos.

En la tabla 2 se muestra el índice de sobreesfuerzo obtenido de los diferentes elementos,

Elementos	Índice de Sobreesfuerzo	Efecto Crítico
Columnas	31.4357	Flexión
Vigas	7.8945	Cortante y Torsión
Losa de Entrepiso	3.40296	Punzonamiento
Zapatas	3.5945	Punzonamiento

**Tabla 2.** Índice de sobreesfuerzo de los diferentes elementos con su respectiva acción crítica.

El índice de sobreesfuerzo de la estructura corresponde al mayor índice de sobreesfuerzo de los elementos,

$$\text{Índice sobreesfuerzo estructura} = 31.4357$$

## 2.6 Cálculo de la Vulnerabilidad por Resistencia:

La vulnerabilidad sísmica se expresa como el inverso del índice de sobreesfuerzo de la estructura,

$$Vulnerabilidad\ por\ resistencia = 0.03181$$

El inverso del índice de sobreesfuerzo general expresa la vulnerabilidad de la edificación como una fracción de la resistencia que tendría una edificación nueva construida de acuerdo con los requisitos del reglamento de construcción sismo resistente NSR10. En otras palabras si se compara la edificación actual, con una edificación idéntica construida siguiendo los criterios del reglamento NSR10, la edificación actual tendría aproximadamente un 3.181% de la resistencia que tendría la edificación nueva supuesta.

## 2.7 Obtención del índice de flexibilidad para la edificación

Los desplazamientos máximos por piso y las derivas máximas por nivel que se obtuvieron para la demanda sísmica impuesta se muestran en la tabla 3.

Nivel [m]	Máx Desplazamiento [cm]	$\Delta$ Máx [cm]
N+0.00	1.496872072	0
N+3.00	7.669284729	6.555372124
N+6.00	13.85975447	9.941858445
N+9.00	25.54566364	11.68590917
N+12.00	34.34760108	8.801937437
N+15.00	37.84155863	5.360964697

**Tabla 3.** Valores máximos de desplazamientos y derivas. Análisis elástico NSR 10.

La máxima deriva de piso en la estructura fue,

$$\Delta máx\ demanda = 11.68590917 [cm]$$

El reglamento NSR10 exige como límite máximo de deriva admisible el uno por ciento de la altura de piso, tal como se define en A.6.4. Para el caso de estudio,

$$\Delta máx\ permitida = 1\% * h_{pi} = 3 [cm]$$

El índice de flexibilidad de la estructura se define como el cociente entre la deriva máxima obtenida del análisis sísmico de la estructura, y la permitida por el reglamento,

$$Indice\ de\ flexibilidad = 3.895303$$

## 2.8 Cálculo de la vulnerabilidad por Flexibilidad

La vulnerabilidad sísmica se expresa como el inverso del índice de flexibilidad,

$$Vulnerabilidad\ por\ flexibilidad = 0.2567124$$

Este valor representa la fracción de la rigidez que tendría la edificación nueva construida de acuerdo con los requisitos del reglamento Colombiano de construcción sismo resistente NSR10. En otros términos la

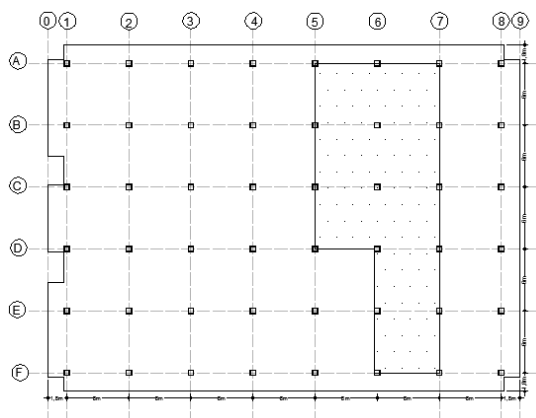
estructura tiene aproximadamente un 25,67% de la rigidez de la misma estructura si fuese construida basándose en los requisitos presentes en el reglamento NSR10.

### 2.9 Formulación de hipótesis de falla:

Del análisis de la estructura se observó que el comportamiento estructural frente a las fuerzas laterales es crítico en los elementos presentes y cercanos a los ejes 5, 6 y 7. En particular se observó que las columnas que se cimientan al nivel +3.00m presentaban una alta demanda a cortante y a momento bidireccional respecto a las demás columnas.

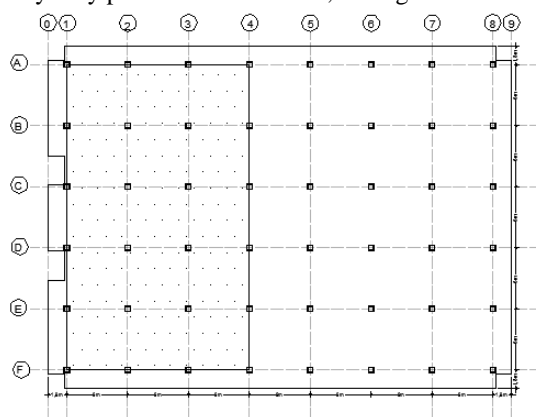
Esto se debe principalmente a que al ser más cortas las columnas, éstas y los pórticos formados por éstas presentan mayor rigidez en comparación con los demás elementos, por tanto se hacen más idóneos los elementos para captar una mayor cantidad de demanda de la demanda total impuesta a la estructura, sin embargo, esta misma capacidad incrementa las solicitaciones haciéndolos más propensos a la falla.

Por lo anterior se puede predecir que la estructura podría iniciar su proceso de colapso debido a la falla de los elementos verticales y horizontales presentes en la zona de los ejes 5, 6 y 7, ver figura 2.



**Figura 2.** Distribución de columnas en planta Nivel N+6.00m, principales elementos propensos a colapsar en caso de sismo.

Después de la posible falla de estos elementos la estructura perdería rigidez y se redistribuiría la demanda sísmica aplicada a los elementos con menor rigidez, ocasionando que estos últimos también se vean sometidos a altas solicitaciones y muy probablemente fallen, ver figura 3.

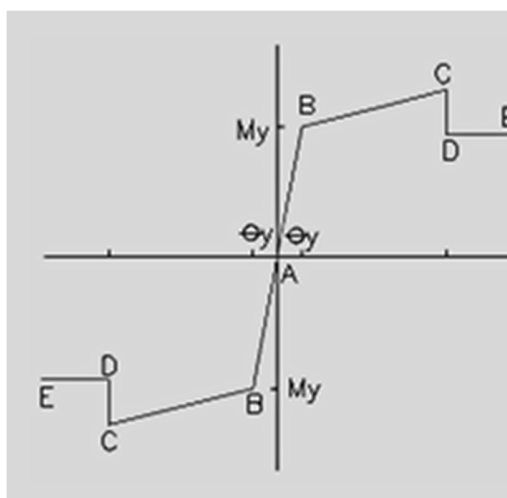


**Figura 3.** Distribución de columnas en planta Nivel N+6.00m, elementos propensos a colapsar, después de elementos primarios, en caso de sismo

### 3. MÉTODO PUSHOVER

Implementar el procedimiento estático no lineal descrito en documentos como el FEMA 356 [3], FEMA 273 y ATC 40 [4], requiere llevar a cabo el siguiente procedimiento: (1) construir una curva de capacidad de la estructura, (2) estimar el desplazamiento objetivo o punto de desempeño, y (3) comprobar que la respuesta de la estructura cumpla los criterios de aceptación.

Para aplicar el procedimiento estático no-lineal la estructura modelada debe incorporar la relación carga-deformación de todos los componentes, teniendo en cuenta la degradación de la fuerza y la fuerza residual, si existe.



**Figura 4.** Diagrama momento curvatura. ATC 40.

La curva Pushover es desarrollada aplicando inicialmente las cargas gravitacionales, seguido de los incrementos monotónicos de un patrón de fuerza lateral que representa las fuerzas inerciales.

De esta manera se obtienen los datos para graficar el cortante basal contra el desplazamiento lateral de un nodo de control, definido como el centro de masa al nivel de cubierta.

La forma de la distribución de las fuerzas laterales influye directamente en la determinación de la curva de capacidad, razón por la cual documentos como el FEMA-356 exigen construir dicha curva de capacidad para dos patrones de carga, los cuales son seleccionados de acuerdo a propiedades dinámicas de cada estructura. Para el caso bajo estudio, la curva de capacidad se construyó para los siguientes patrones de carga:

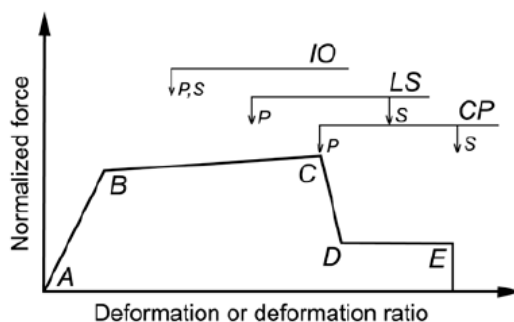
- 1) Una distribución de fuerzas horizontales proporcional al cortante de piso calculado de un análisis dinámico lineal de respuesta espectral que incluyó los modos necesarios para capturar más del 90% de la participación de masa.
- 2) Una distribución uniforme que consiste en fuerzas laterales a cada nivel proporcionales a la masa total de cada nivel.

El documento ATC 40 permite construir la curva de capacidad a partir de una distribución de fuerzas laterales en altura que permitan a la estructura adoptar la forma del modo fundamental en la dirección bajo estudio.

El desplazamiento objetivo busca representar el máximo desplazamiento probable a ser experimentado durante el sismo de diseño, es decir, la demanda sísmica. En el presente estudio se usó el método de los

coeficientes para su determinación, descrito en el documento del FEMA 356 y el método de la capacidad espectral definido en el documento ATC40.

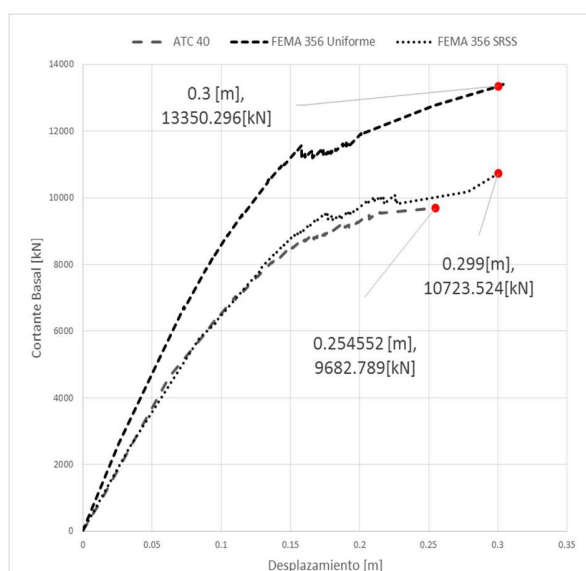
Finalmente los criterios de aceptación (ver figura 5) son chequeados para el punto de desempeño de la estructura, definiendo si el comportamiento de la estructura es apto o no para la demanda impuesta. Los criterios de aceptación varían dependiendo de la importancia del componente para resistir cargas horizontales y de la acción a evaluar. El mecanismo de rotulas plásticas asignadas al modelo matemático del sistema losa-columna estudiado, representa la relación momento-curvatura (ver figura 4) de los elementos en las secciones donde probablemente ocurran rotaciones inelásticas.



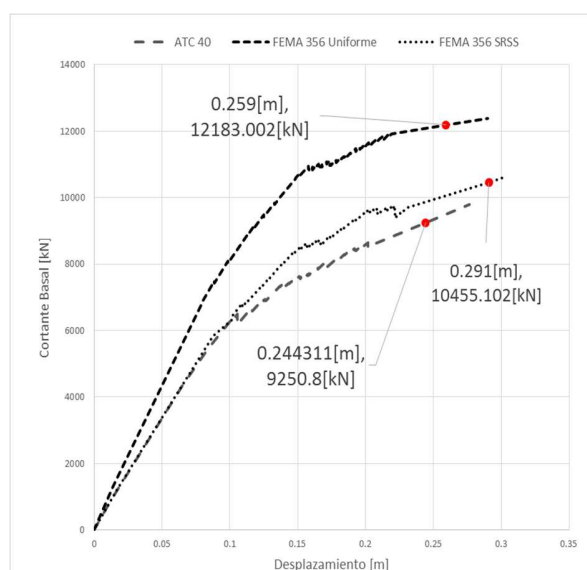
**Figura 5.** Criterios de aceptabilidad para la deformación de los elementos o componentes. Tomado de FEMA 356.

Según el análisis realizado por la metodología descrita anteriormente, la estructura debe ser rehabilitada, ya que los niveles de deformaciones inelásticas exceden los criterios de aceptación LS (Life Safety) exigidos por la NSR-10 para la edificación.

En la figura 6, se presentan las curvas de capacidad calculadas por cada metodología estática no lineal junto con el punto de desplazamiento (ATC 40) o desplazamiento objetivo (FEMA 356) para el análisis en dirección X. Las curvas de capacidad obtenidas del análisis en dirección Y, se presentan en la figura 7.



**Figura 6.** Curvas de capacidad con su respectivo punto de desempeño o desplazamiento objetivo, según caso. Análisis Pushover ATC 40, FEMA 356 distribución uniforme y FEMA 356 distribución SRSS. Dirección X.



**Figura 7.** Curvas de capacidad con su respectivo punto de desempeño o desplazamiento objetivo, según caso. Análisis Pushover ATC 40, FEMA 356 distribución uniforme y FEMA 356 distribución SRSS. Dirección Y.

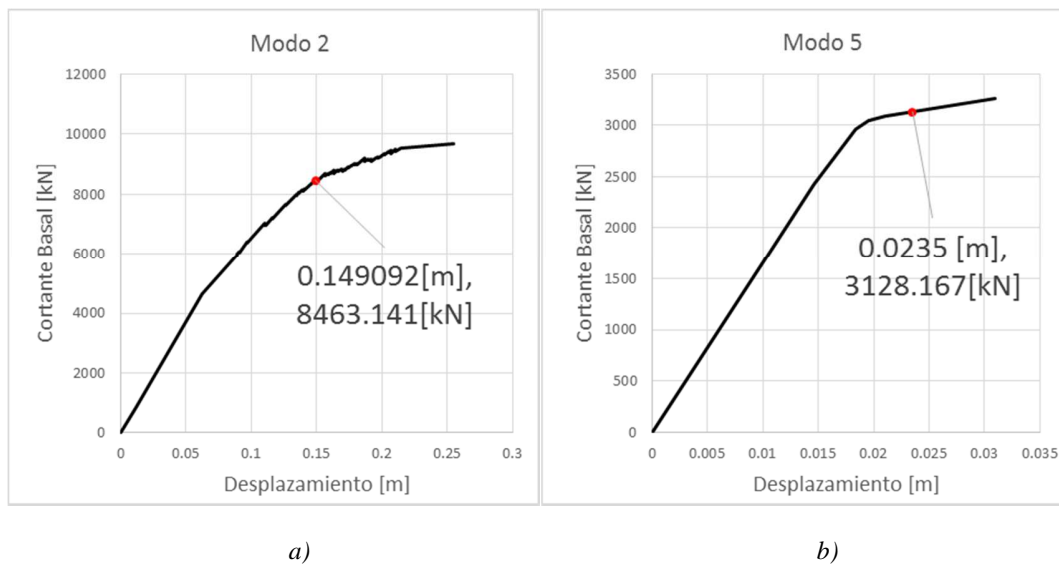
#### 4. ANÁLISIS MODAL PUSHOVER (MPA).

El análisis modal pushover (MPA) basado en la teoría de la dinámica estructural, conserva la simplicidad conceptual de los procedimientos estáticos no lineales actuales con una distribución de fuerza invariante. En el procedimiento MPA la demanda sísmica debida a los términos individuales de la expansión modal de las fuerzas sísmicas efectivas es determinada por un análisis estático no lineal usando una distribución de fuerzas inerciales para cada modo. Esas demandas modales debidas a los primeros términos de la expansión modal son luego combinadas por medio del método SRSS para obtener un estimado del total de la demanda sísmica para el sistema inelástico en consideración. Cuando se analizan sistemas elásticos el método MPA es equivalente al análisis de respuesta espectral [5].

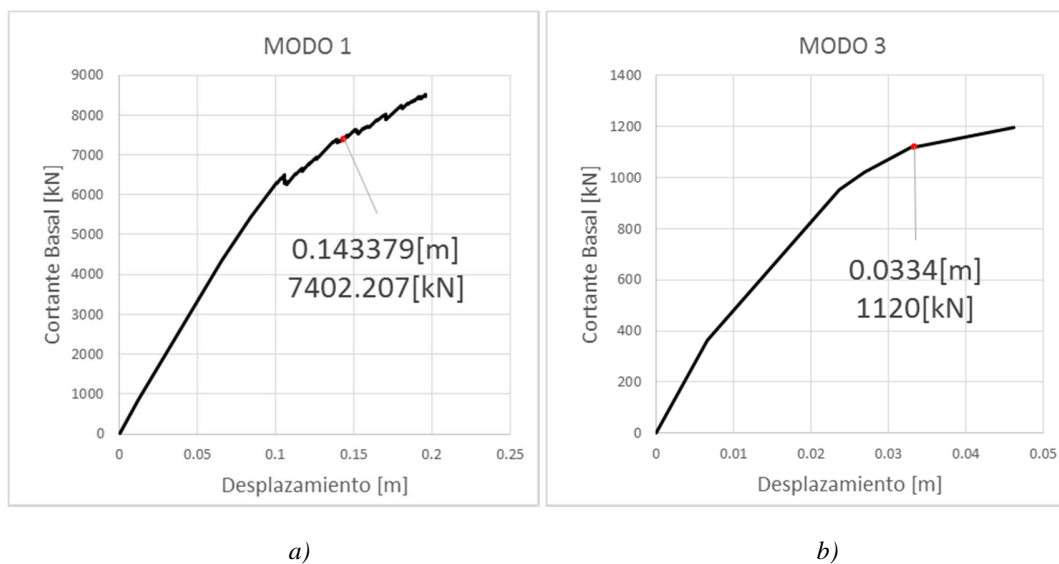
Está demostrado que con el incremento del número de modos incluidos para estimar la demanda, la distribución en altura de derivas y las rotaciones plásticas obtenidas por el método MPA son generalmente similares a las tendencias de los efectos observados en el análisis de respuesta en el tiempo RHA [6]. El procedimiento [7] que se aplica para evaluar la estructura por medio del método MPA es el siguiente:

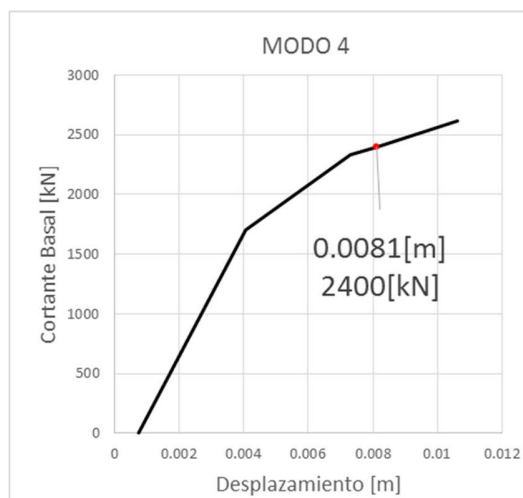
- 1) Calcular las frecuencias naturales,  $w_n$  y los modos  $\phi_n$ , para la vibración elástica del sistema.
- 2) Para el  $i$ -ésimo modo de vibración, elaborar la gráfica de cortante en la base contra desplazamiento en el último piso, también conocida como curva de capacidad del sistema, con una distribución de fuerzas que deforme la estructura proporcionalmente a la forma del modo de vibración, el efecto de la carga gravitacional es tenido en cuenta solamente para el modo fundamental en la dirección en consideración.
- 3) Idealizar la curva de capacidad como una curva bilineal.
- 4) Convertir la curva de capacidad a coordenadas espectrales.
- 5) Determinar la deformación pico del sistema de un grado de libertad del espectro de respuesta inelástico [8]. Determinar los valores picos de desplazamiento del último piso  $u_{rno}$ , con la ecuación  $u_{rno} = \Gamma_n \Phi_{rn} D_{no}$ . Para cada modo de vibración.
- 6) Extraer de la base de datos de la curva de capacidad los valores de la respuesta sísmica.
- 7) Calcular la respuesta total combinando las respuestas por modo utilizando el método SRSS.

Las curvas de capacidad obtenidas por el método MPA para las direcciones ortogonales junto con el punto de desempeño calculado se presentan en las figuras 8.a, 8.b, 9.a, 9.b y 9.c.



**Figura 8.** Curvas de capacidad y punto de desempeño. Análisis modal Pushover. Modos participantes en dirección X. a) Curva de capacidad modo 2. b) Curva de capacidad modo 5.





c)

**Figura 9.** Curvas de capacidad y punto de desempeño. Análisis modal Pushover. Modos participantes en dirección Y. a) Curva de capacidad modo 1. b) Curva de capacidad modo 3. c) Curva de capacidad modo 4.

## 5. RESULTADOS Y COMPARACIONES

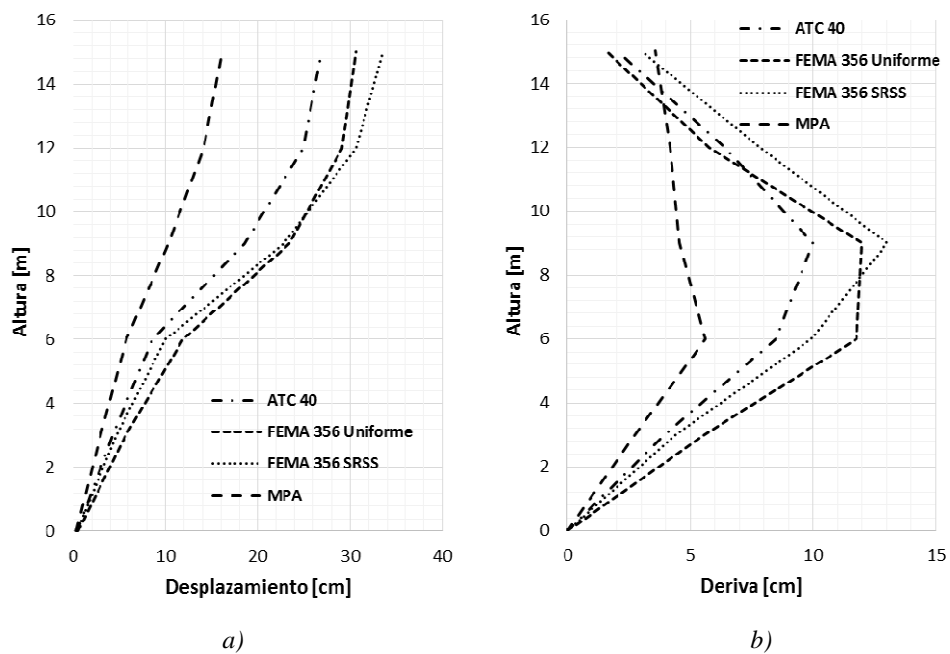
Para comparar en cada dirección ortogonal el método elástico de índices de flexibilidad y sobre esfuerzo con los métodos inelásticos se escogieron los casos de carga en donde la totalidad del sismo se asume aplicado en las direcciones ortogonales, caso contrario a la estimación de la demanda sísmica de los elementos por el método elástico, donde se consideraron los efectos ortogonales de acuerdo con A.3.6.3. Y la torsión accidental de acuerdo con A.3.6.7 según la norma NSR10.

En un principio se muestra la comparación de los métodos inelásticos excluyendo los resultados del método elástico ya que la comparación directa puede llevar a impresiones erróneas. Debido a que el método de índices de flexibilidad y resistencia no exige una afectación de la rigidez en el modelamiento estructural, como si se exige para los métodos inelásticos, las respuestas finales como desplazamientos y derivas son menores que en los análisis no lineales, sin embargo los cortantes por piso son mucho mayores en el método elástico respecto a los demás métodos utilizados en este estudio.

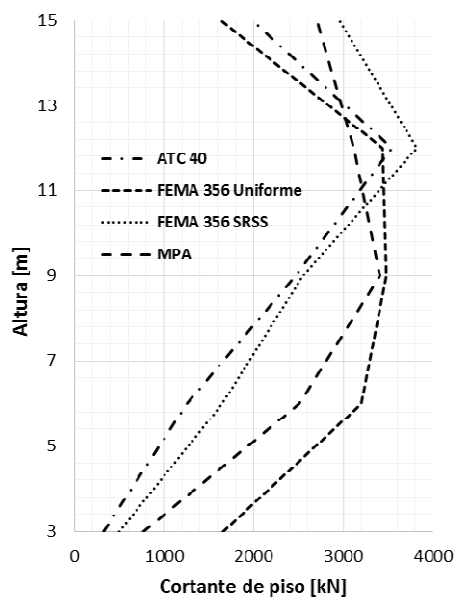
### 5.1 Respuestas por metodología inelástica.

#### 5.1.1 Dirección X.

En las figuras 10.a, 10.b y figura 11 se muestran las respuestas obtenidas en la dirección X, de los diferentes métodos inelásticos aplicados,



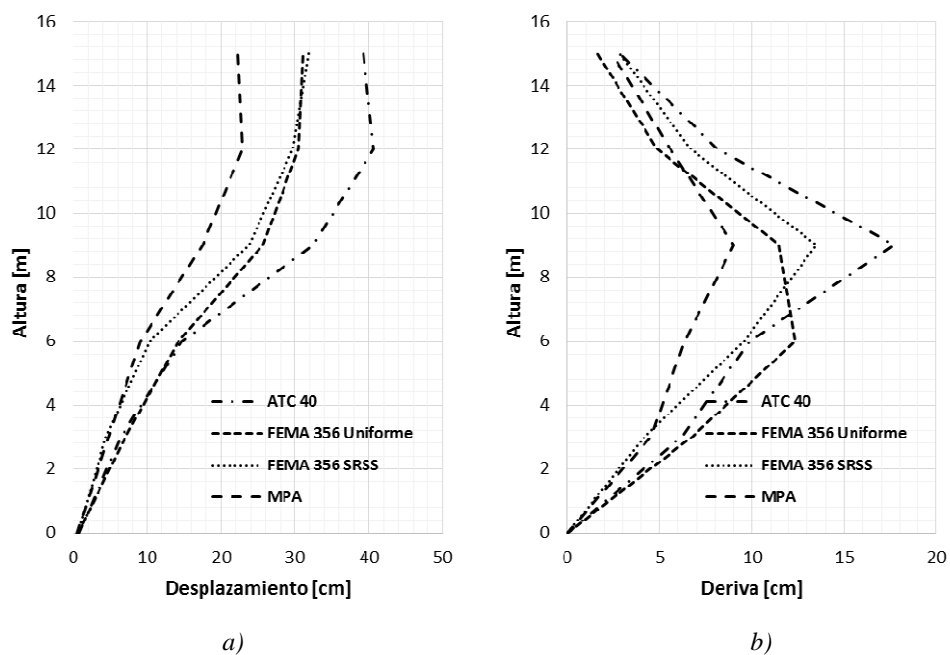
**Figura 10.** a) Desplazamientos máximos y b) derivas máximas en dirección X. Análisis Pushover y MPA.



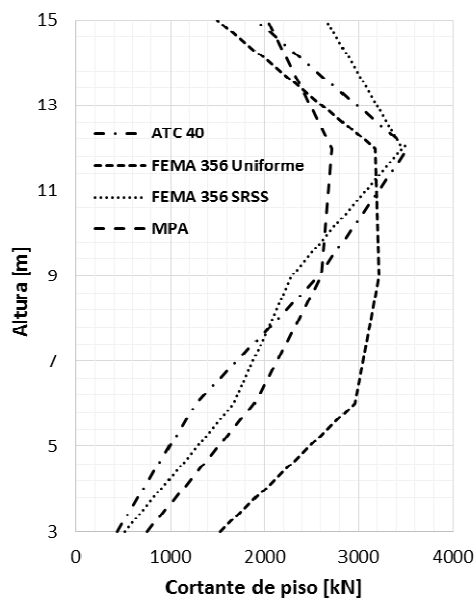
**Figura 11.** Cortantes por piso en dirección X. Análisis Pushover y MPA.

### 5.1.2 Dirección Y.

En las figuras 12.a 12.b y figura 13 se muestran las respuestas obtenidas en la dirección Y, de los diferentes métodos inelásticos aplicados,



**Figura 12.** a) Desplazamientos máximos y b) derivas máximas en dirección Y. Análisis Pushover y MPA.

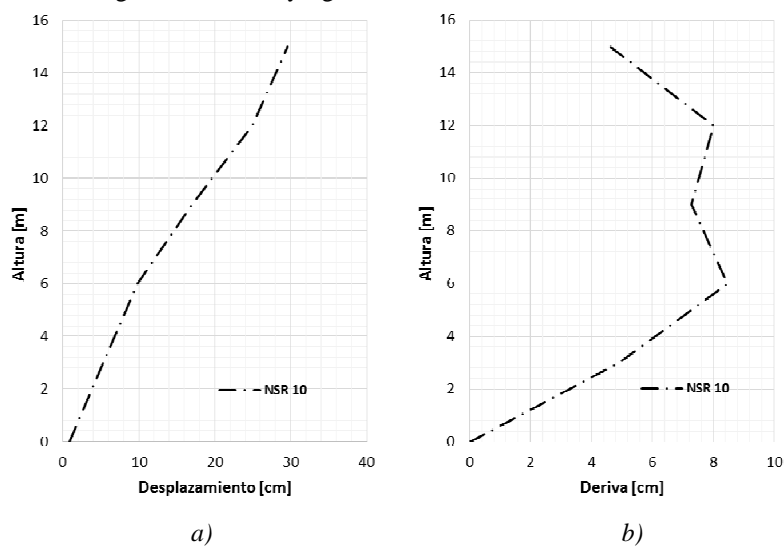


**Figura 13.** Cortantes por piso en dirección Y. Análisis Pushover y MPA

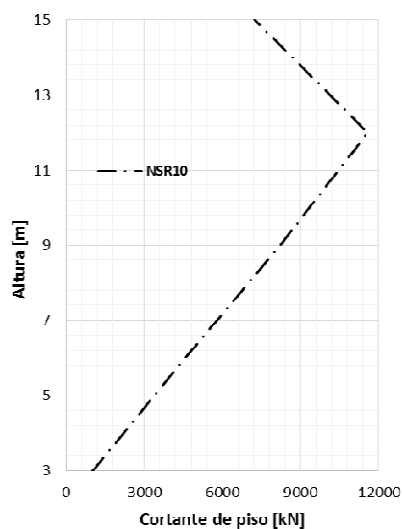
## 5.2 Respuestas por metodología elástica.

### 5.2.1 Dirección X.

Las respuestas obtenidas en la dirección X por medio del análisis elástico documentado en el reglamento NSR10 se muestran en las figuras 14.a, 14.b y figura 15.



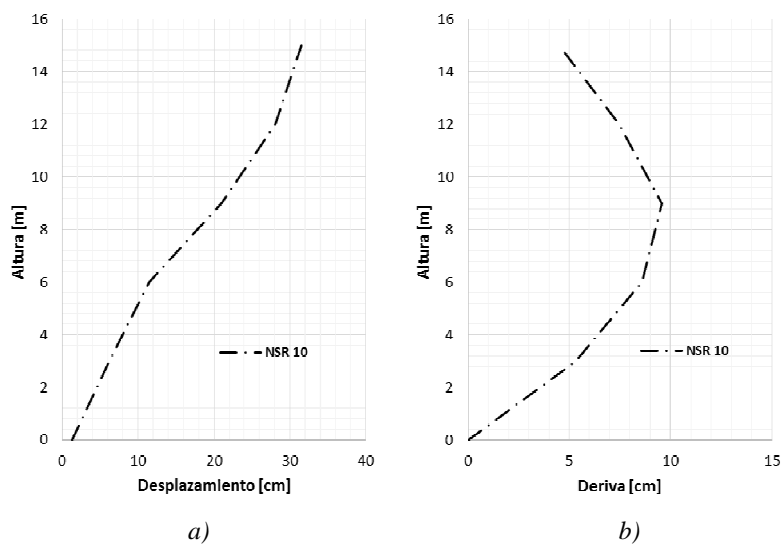
**Figura 14.** a) Desplazamientos máximos y b) derivas máximas en dirección X. Análisis Elástico NSR10. Totalidad de efectos sísmicos aplicados en dirección X



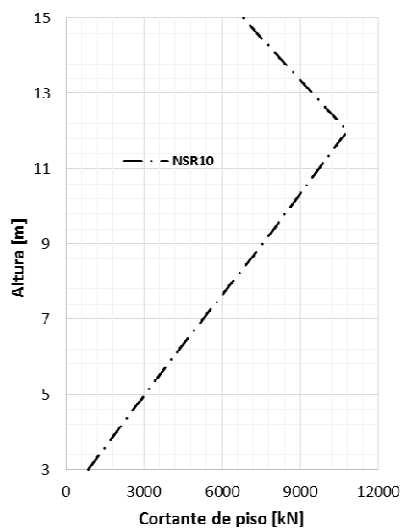
**Figura 15.** Cortantes por piso en dirección X. Análisis Elástico NSR10. Totalidad de efectos sísmicos aplicados en dirección X.

### 5.2.2 Dirección Y.

Las figuras 16.a, 16.b y figura 17 muestran las respuestas obtenidas en la dirección Y,



**Figura 16.** a) Desplazamientos máximos y b) derivas máximas en dirección Y. Análisis Elástico NSR10. Totalidad de efectos sísmicos aplicados en dirección Y.



**Figura 17.** Cortantes por piso en dirección Y. Análisis Elástico NSR10. Totalidad de efectos sísmicos aplicados en dirección Y.

### 5.3 Estado estructural.

La estructura sometida a la demanda dada en el reglamento NSR10 y evaluada la resistencia de los elementos de acuerdo con el método de índices de flexibilidad y sobreesfuerzo arroja resultados bastantes críticos. Todos los puntos de la estructura deberían ser rehabilitados ya que ninguno de ellos cumple las condiciones de resistencia requeridas para satisfacer la demanda impuesta.

Para el análisis no lineal de la estructura en dirección X se modelaron en total 1354 puntos de articulación estratégicos en los elementos en donde la plastificación fuese crítica. En dirección Y se modelaron 1292 de estos puntos.

En las figuras 18 y 19 se presentan las rótulas obtenidas en el análisis inelástico de la estructura con su respectivo nivel de desempeño para el análisis en dirección X y Y, respectivamente.

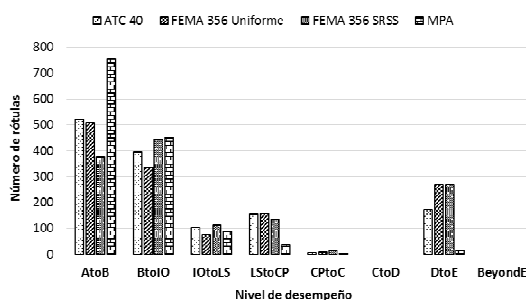


Figura 18. Estado de las rótulas análisis inelástico en X.

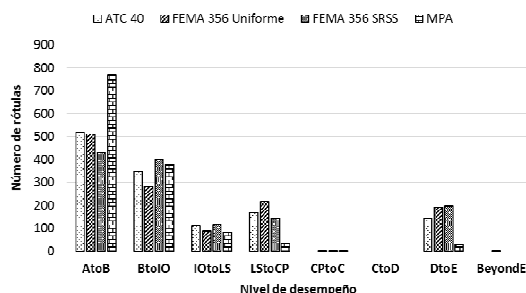


Figura 19. Estado de las rótulas análisis inelástico en Y.

Se encontró que una considerable cantidad de rótulas se encuentra más allá del nivel de seguridad de la vida (LS), por lo que se obtuvo un alto número de elementos a rehabilitar, ver figuras 20 y 21,

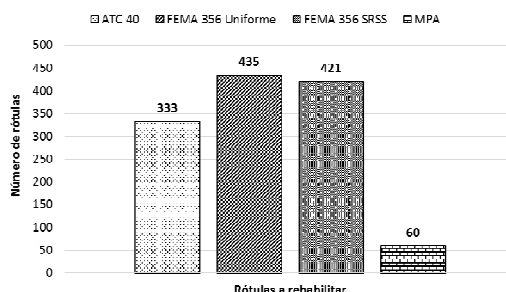
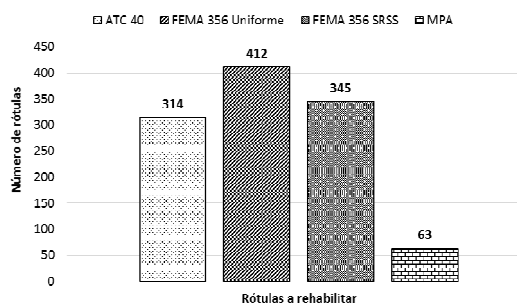


Figura 20. Cantidad de rótulas a rehabilitar en dirección X.



**Figura 21.** Cantidad de rótulas a rehabilitar en dirección Y.

Es visible que en el análisis MPA la gran mayoría de rótulas no sobrepasa el nivel de desempeño estructural de seguridad de la vida (LS), sin embargo sigue existiendo una cantidad de puntos a rehabilitar. No obstante, es claro que la cantidad de puntos a rehabilitar es bajo en comparación con los demás métodos utilizados y que la mayor cantidad de puntos sometidos a plastificación cumple con los criterios de aceptabilidad exigidos en las normativas.

Es claramente perceptible que la vulnerabilidad de la estructura es dependiente del método de análisis utilizado. El método elástico castiga de sobremanera la estructura, la metodología estática no lineal evalúa de manera mucho más real a la edificación ya que incluye los efectos de plastificación que se presentan y permite obtener un estimativo de la respuesta estructural más cercano a la realidad por lo que los puntos a rehabilitar son menos que en el método elástico y por último la metodología MPA teniendo en cuenta la participación de los modos superiores y una reducción del espectro elástico de diseño que depende exclusivamente de la ductilidad [9] permite obtener una menor demanda sobre la estructura y un comportamiento mucho menos crítico.

## 6 CONCLUSIONES.

De acuerdo con el análisis elástico realizado se obtuvieron derivas del 3.9% de la altura de piso, más de tres veces la deriva máxima permitida por la NSR-10 que es del 1% de la altura de piso lo que demuestra una alta deficiencia en la rigidez estructural.

Se presentaron altos índices de sobreesfuerzo en los elementos debido a la aplicación de carga lateral que simula el sismo. Ningún elemento analizado por el método elástico cumplió con los requerimientos de resistencia a la demanda impuesta. Los mayores índices de sobreesfuerzo se presentaron en las columnas. Lo anterior expone la inadecuada resistencia de la estructura ante fuerzas laterales.

Al comparar la hipótesis de falla propuesta en el análisis de vulnerabilidad por el método elástico con el mecanismo de rotulación del análisis estático no lineal se evidencia una fuerte coincidencia en la ubicación de los puntos críticos que afectarían la estabilidad estructural, mas el análisis elástico sobreestima la demanda que rige el reforzamiento de los componentes estructurales, en comparación con los demás métodos presentados.

En las curvas pushover se evidencia escasa capacidad de la estructura para incursionar en el rango inelástico de respuesta, el estado de rotulación plástica de muchos de los elementos para el punto de comportamiento no cumple con los criterios de aceptación para el nivel de seguridad de la vida (Life Safety).

Con base en lo anterior, se concluye que la estructura necesita una intervención que rehabilite el sistema estructural a nivel global para que en caso eventual de ocurrencia de un sismo se pueda proteger la propiedad y las vidas humanas que ocupan la edificación.

Una de las principales ventajas del método MPA es que permite incluir la participación de los modos altos de vibración en el comportamiento estructural. El procedimiento es sencillo ya que permite la utilización de invariantes de carga lateral para la construcción de la curva de capacidad y espectros inelásticos de diseño de ductilidad constante que representan la demanda.

La precisión de los métodos pushover y modal pushover en el presente estudio se vio afectada por el hecho de que las distribuciones invariantes de carga a la que se somete la estructura están basadas en estados de deformación de la estructura en el rango elástico.

El análisis pushover modal incluye el efecto de los modos altos de vibración, pero el método para combinar las respuestas del sistema es el usado para sistemas lineales, lo cual puede inducir a errores significativos.

La norma NSR-10 no contempla los lineamientos para aplicar un análisis estático no lineal. Se hace necesaria la inclusión de un capítulo que contemple con profundidad, limitando y describiendo, la metodología a aplicar según el caso de estudio. Gran cantidad de edificaciones fueron construidas años atrás de la implementación de códigos Colombianos para el diseño y la construcción y una gran parte se encuentran sobre zonas de amenaza sísmica alta, por tanto están sometidas a un alto riesgo sísmico. La divulgación de estas metodologías puede centrar la actividad de profesionales y estudiantes en la evaluación e investigación de la vulnerabilidad y en la rehabilitación de estructuras, usando metodologías más precisas que conserven la simplicidad de los métodos convencionales.

## REFERENCIAS.

[1] Garza Vásquez Luis. Diseño de estructuras de cimentación de acuerdo a NSR-10. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2012.

[2] Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10”, Bogotá, Colombia, 2010.

[3] Prestandard and commentary for the Seismic rehabilitation of buildings – FEMA 356; American Society of Civil Engineers – ASCE, Federal Emergency Management Agency – FEMA; Noviembre 2000.

[4] Applied Technology Council. ATC 40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. 1996.

[5] Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel, “A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings.” Earthquake Engineering and Structural Dynamics. UC Berkeley, California Polytechnic State University, U.S.A. 2004.

- [6] Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel. "Evaluation of Modal and FEMA Pushover Analysis: SAC Buildings". University of California, Berkeley. California Polytechnic State University, San Luis Obispo.
- [7] Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel. "A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation". University of California, Berkeley. California Polytechnic State University, San Luis Obispo. 2001.
- [8] Chopra, A. K., "Dynamics of structures: Theory and applications to Earthquake Engineering", Prentice Hall, New Jersey 1995.
- [9] Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel, "Capacity-Demand-Diagram Methods based on inelastic design spectrum", Earthquake Spectra, 1999.
- [10] American Society of Civil Engineers, ASCE, "Seismic rehabilitation of existing buildings", ASCE/SEI 41-06, U.S.A 2007.
- [11] Erol Kalkan, Sashi K. Kunnath, "Method of modal combinations for pushover analysis of buildings" 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Canada 2004.
- [12] Reyes J. C, "Usos y abusos de los análisis de Pushover", Universidad de los Andes, Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Bucaramanga, Colombia 2013.
- [13] Mora M. A., Villalba J.D., "Análisis sísmico inelástico y cálculo de índices de daño en una edificación de mediana altura utilizando diferentes metodologías", Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia, 2005.
- [14] Florentino Regalado Tesoro. "Cortante y Punzonamiento: Teoría y Práctica (Propuestas alternativas a la EHE)". Biblioteca Técnica de CYPE Ingenieros. 2002.



## BIBLIOGRAFÍA

American Society of Civil Engineers, ASCE, “Seismic rehabilitation of existing buildings”, ASCE/SEI 41-06, U.S.A 2007.

Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel. “A Modal Pushover Analysis Procedure to Estimate Seismic Demands for Buildings: Theory and Preliminary Evaluation”. University of California, Berkeley. California Polytechnic State University, San Luis Obispo. 2001.

Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel, “A modal pushover analysis procedure to estimate seismic demands for unsymmetric-plan buildings.” Earthquake Engineering and Structural Dynamics. UC Berkeley, California Polytechnic State University, U.S.A. 2004.

Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel, “Capacity-Demand-Diagram Methods based on inelastic design spectrum”, Earthquake Spectra, 1999.

Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel. “Evaluation of Modal and FEMA Pushover Analysis: SAC Buildings”. University of California, Berkeley. California Polytechnic State University, San Luis Obispo.

Applied Technology Council. ATC 40, Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. 1996.

Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (AIS), “Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10”, Bogotá, Colombia, 2010.

Chopra, A. K., “Dynamics of structures: Theory and applications to Earthquake Engineering”, Prentice Hall, New Jersey 1995.

Erol Kalkan, Sashi K. Kunnath, “Method of modal combinations for pushover analysis of buildings” 13<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, Canada 2004.

Florentino Regalado Tesoro. “Cortante y Punzonamiento: Teoría y Práctica (Propuestas alternativas a la EHE)”. Biblioteca Técnica de CYPE Ingenieros. 2002.

Garza Vásquez Luis. Diseño de estructuras de cimentación de acuerdo a NSR-10. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, 2012.



Mora M. A., Villalba J.D., “Análisis sísmico inelástico y cálculo de índices de daño en una edificación de mediana altura utilizando diferentes metodologías”, Universidad Industrial de Santander (UIS), Bucaramanga, Colombia, 2005.

Prestandard and commentary for the Seismic rehabilitation of buildings – FEMA 356; American Society of Civil Engineers – ASCE, Federal Emergency Management Agency – FEMA; Noviembre 2000.

Reyes J. C., “Usos y abusos de los análisis de Pushover”, Universidad de los Andes, Memorias del VI Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Bucaramanga, Colombia 2013.