

## 6.- APLICACIÓN DE FEMA-273 Y ANÁLISIS MODAL PUSHOVER.

*(Application of FEMA-273 and Analysis Modal Pushover)*

### INTRODUCCIÓN.-

A continuación se presenta una comparativa en el **análisis estático no lineal “Pushover”**, con la consideración de cinco métodos para obtener las demandas sísmicas del edificio en estudio.

En éste aplicare los cinco métodos aceptados para este análisis; tres métodos según FEMA-273 (*Federal Emergency Management Agency*), los cuales son: Distribución de fuerzas “Uniforme”, Fuerzas Laterales Equivalentes ELF y Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados SRSS; para el método en estudio MPA considerare solamente “1 modo”; método UMRHA con distribución  $[s_j = \phi_j m_j]$ ; y finalmente la solución “exacta” Análisis No Lineal en Historial de Respuesta (NL-RHA).

Analizare las diversas demandas sísmicas en cuanto a desplazamiento y distorsión de entrepiso que induce cada uno de estos métodos en relación a la respuesta “exacta”, también encontrare el error que cada uno de estos métodos representa en las cantidades de desplazamiento y distorsión de entrepiso, en relación a la respuesta “exacta”.

Por último, obtendré las gráficas de **Cortante Basal – Desplazamiento de Azotea** (Curva “Pushover”), para cada uno de los diferente métodos en estudio según FEMA-273 y MPA; junto con la aparición de las articulaciones plásticas en las estructura.

## 6.1 ANÁLISIS ESTÁTICO PUSHOVER (FEMA-273).

### (Static Pushover Analysis (FEMA-273))

En esta investigación me enfocare a los diferentes métodos para la elaboración del análisis estático no lineal (pushover; FEMA-273). La aplicación de estos métodos nos denota la gráfica **Cortante basal vs. Desplazamiento de azotea**; esto a través de la aplicación de cargas laterales variantes en el desarrollo de la altura del edificio, mediante la aplicación de estas cargas observamos los desplazamientos inducidos en la estructura mediante pequeños intervalos en el incremento de las fuerzas.

En el análisis estático no lineal, a través de la aplicación de cargas laterales para obtener desplazamientos en la estructura, nos es posible calcular y graficar:

- Los desplazamientos de piso.
- Distorsión de piso.
- Rotaciones nodales.
- Desarrollo de las Plastificaciones.
- Etc.

Cada uno de estos cálculos y datos que se pueden obtener de la estructura, representan la demanda inducida sísmicamente en la estructura.

La organización FEMA-273 (*Federal Emergency Management Agency*), estipula diferentes métodos de aplicación de cargas laterales estáticas, para el análisis estático no lineal. Específicamente en FEMA-273, se especifican tres diferentes distribuciones de fuerzas laterales que son: Distribución Uniforme, Fuerzas Laterales Equivalentes (ELF) y Raíz Cuadrada de la Suma de los Cuadrados (SRSS).

## 6.2 DISTRIBUCIÓN UNIFORME.

### (Uniform Distribution)

El método contemplado en FEMA-273 para la distribución uniforme de fuerzas espaciales laterales, se basa en la aplicación de las masas de los pisos de la estructura como fuerzas laterales sísmicas para cada entrepiso de la estructura.

Este método se basa en la diagonal de la matriz de masa del sistema, con una distribución espacial  $s$ , tal y como se representa en la siguiente ecuación.

$$s_j^* = m_j \quad 6.2$$

Donde  $m$  es la matriz de masa y  $j$  es el valor del entrepiso en cuestión ( $j=1,2,\dots,N$ ).

## 6.3 DISTRIBUCIÓN DE FUERZAS LATERALES EQUIVALENTES.

### (Equivalent Lateral Force Distribution (ELF))

El método de fuerzas equivalentes laterales (ELF), se basa en la distribución de fuerzas en función de las masas de entrepiso y en la relación de altura del mismo con relación al suelo. Como se muestra en la siguiente ecuación:

$$s_j^* = m_j h_j^k \quad 6.3$$

Donde  $h_j$  es la altura del piso  $j$  referida al nivel de la base, y el exponente  $k$  toma valores de  $k=1$  para  $T_n < 0.5$  seg y  $k=2$  para  $T_n > 2.50$  seg, y con variación lineal en valores intermedios.

## 6.4 DISTRIBUCIÓN RAÍZ CUADRADA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS.

### (Square Root of the Sum of the Squares Distribution (SRSS))

El método de la distribución de fuerzas SRSS (por sus siglas en inglés), consiste en la distribución de fuerzas en la estructura en función de los cortantes de entrepiso según el análisis de espectro de respuesta para la estructura. Esto bajo la consideración que la estructura está dentro del rango elástico.

## 6.5 EVALUACIÓN COMPARATIVA.

### (Comparative Evaluation)

En esta sección del capítulo, evaluare la demanda sísmica inducida en la estructura, la demanda sísmica será obtenida a través de cinco análisis, los cuales son:

- Análisis Pushover utilizando tres distribuciones de fuerzas según FEMA-273 (“Uniforme”; ELF y SRSS).
- Análisis Modal Pushover utilizando una forma modal (MPA 1 “MODO”).
- Análisis No Lineal en Historial de Respuesta. (NL-RHA).

Para estos análisis se excluirá los efectos de las fuerzas gravitacionales para análisis de segundo orden.

Las tres distribuciones espaciales, para el caso FEMA-273 se presentan en la figura 6.5.1, donde los dos primeros tipos se obtienen de una manera más sencilla y práctica, mientras que para la tercera forma se aplica el análisis modal espectral de la estructura (**anexo b**).

Usando la distribución según FEMA para el análisis pushover, para la obtención del desplazamiento de azotea de 44.729 cm, este valor fue obtenido por la solución exacta NL-RHA para los tres primeros modos de vibración de la estructura para el sismo de San Fernando.

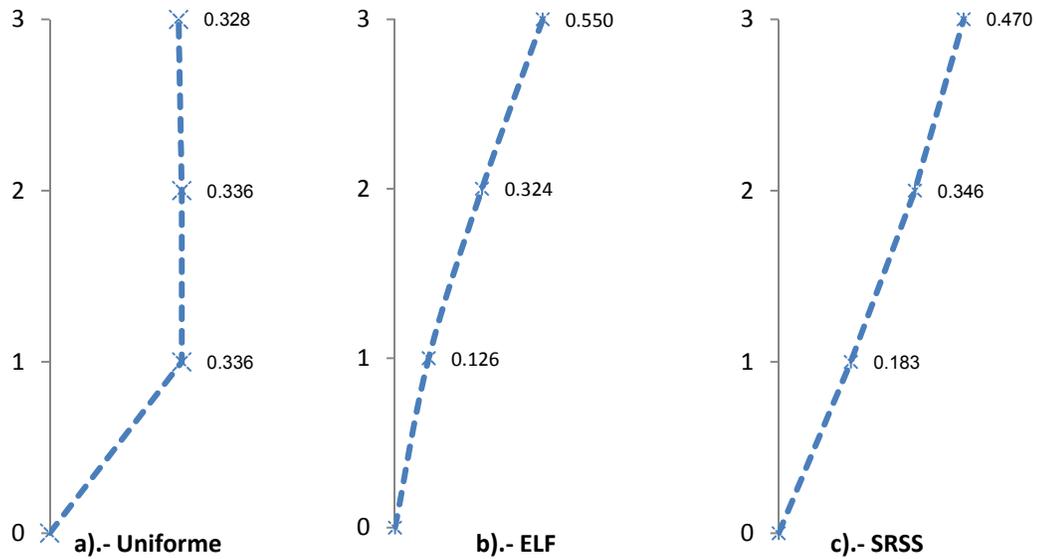


Figura 6.5.1. Distribución de Fuerzas para FEMA-273: a).- Uniforme; b).- ELF; y c).- SRSS.

Las curvas pushover está localizada en la figura 6.5.2, para cada distribución de fuerzas según FEMA-273. La demanda para el desplazamiento de piso se encuentra en la figura 6.5.3a y los resultados en la tabla 6.5.1, para los resultados de la distorsión de piso se aprecian en la figura 6.5.3b y los resultados en la tabla 6.5.2.

También incluyo en esta sección los resultados para el Análisis Modal Pushover donde incluyo el primer modo (MPA 1 “Modo”) y la demanda exacta para el Análisis No Lineal en Historial de Respuesta (NL-RHA).

El error en el método FEMA-273 para la distribución de fuerzas y el método MPA para la primera forma modal en la estimación de la demanda sísmica, relativa a la solución “exacta” son presentadas en la figura 6.5.4, en la tabla 6.5.1 y 6.5.2.

Las figuras 6.5.3a, 6.5.4a y tabla 6.5.1 está demostrado que la demanda de desplazamiento esta sobre estimada para el método de distribución “uniforme” de fuerzas, por aproximadamente 12-75% para el primer nivel de edificio. El método SRSS y ELF también sobre-estiman la demanda sísmica, en este caso por 5.06-54% aproximadamente. Para el método de distribución de fuerzas “MPA 1 Modo” también sobre-estima la demanda sísmica, esto por el hecho de considerar solamente una

forma modal, puesto que ya se demostró que al considerar más formas modales más “exacta” es la solución, para este caso tengo 8-53% aproximadamente. Finalmente, para la distribución UMRHA se tienen resultados más aproximado al “exacto”, esto por el orden de 2-4.5% aproximadamente.

La figura 6.5.3b, 6.5.4b y tabla 6.5.2 demuestra que la demanda de distorsión de piso para el caso de la distribución de fuerzas según FEMA está sobre estimada; para el caso de MPA también se sobre-estima la demanda sísmica, esto por el bajo número de formas modales que se consideran. Para el caso “Uniforme”, ELF y SRSS se tiene un error en relación a la solución “exacta” de 51-73%, 23-41% y 33-54% respectivamente. Para la distribución de MPA “1 modo” se tienen error de 33-53% aproximadamente. En el caso de UMRHA en contraste se presentan errores de 1-4.5% aproximadamente.

Es importante destacar que los resultados de los métodos FEMA para la estimación de la demanda sísmica son menos aproximados que para la distribución MPA, esto en la medida que formas modales consideres para la distribución de cargas para el MPA; en mi caso solo considere una forma modal, por esto que tenemos resultados más parecidos entre FEMA y MPA.

La localización de las plastificaciones para el análisis estático no lineal, se encuentra en la Figura 6.5.4. En dichas figura se presentan las plastificaciones por cinco métodos de análisis: MPA considerando un “modo”; Tres análisis según FEMA y Análisis No Lineal en Historial de Respuesta (NL-RHA) [“exacto”].

La localización de las plastificaciones se presentan en los puntos rojos, donde los elementos han alcanzado los esfuerzos de fluencia: La falla para la distribución “Uniforme” se da en todos los elementos del primer nivel, específicamente en todas las columnas, lo cual es una falla menos racional; La falla para la distribución ELF se presenta en las columnas y trabes, principalmente en la parte central del edificio, en este caso las plastificaciones se desarrollan en forma similar a SRSS y MPA “1 modo”, pero para ELF se presenta un grado más alto de daño en estos puntos; para el caso de falla de los métodos SRSS y MPA “1 modo” se presentan en forma similar las

articulaciones plásticas por demanda sísmica, las cuales se presentan en una forma distribuida por la parte central del edificio.

Para el caso del análisis estático no lineal (pushover) a través de la aplicación de los tres métodos de FEMA-273, MPA “1 modo” y NL-RHA “exacto”, se puede apreciar que los métodos para el caso de FEMA ofrecen resultados no con una aproximación excepcional al resultado “exacto”, mientras que la aplicación del MPA “1 modo” nos corrobora que es un método con mayor exactitud a la solución “exacta”, en la medida que se consideren más formas modales, basta considerar las tres primeras formas modales de los edificios para tener resultados extraordinarios al “exacto” (NL-RHA) [Chopra, sección 22.4].

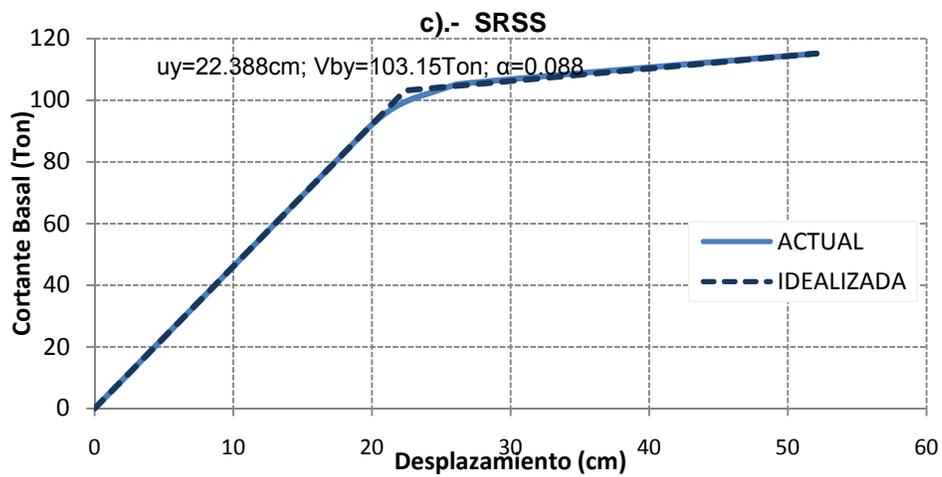
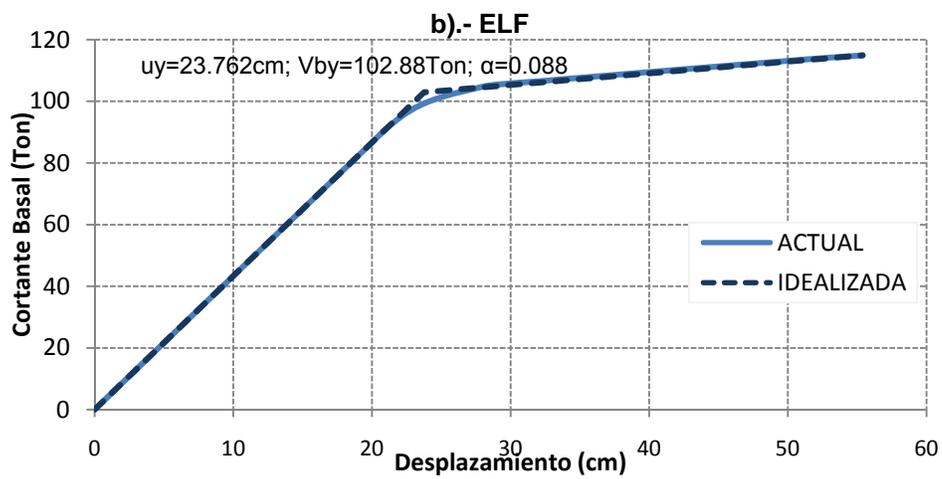
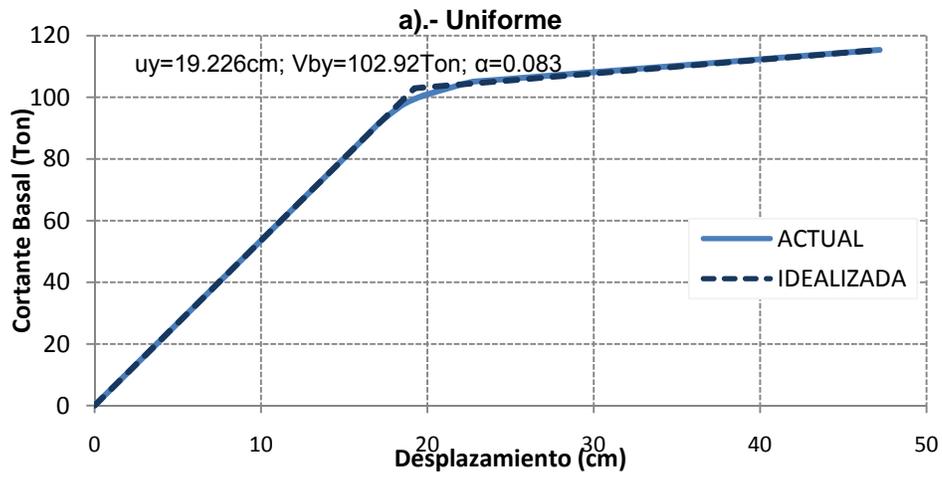


Figura 6.5.2. Curvas Pushover utilizando tres distribuciones de fuerzas para FEMA-273: a).- Uniforme; b).- ELF; y c).- SRSS.

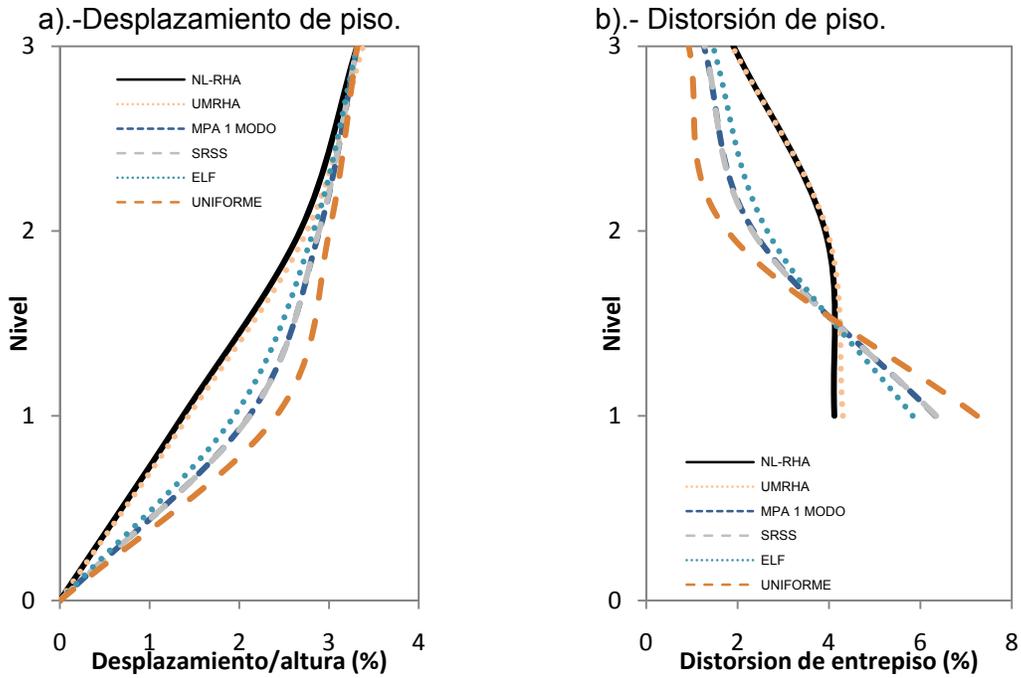


Figura 6.5.3 Variación del desplazamiento y distorsión de entrepiso estimado con la distribución de FEMA-273, MPA incluyendo un “modo” y NL-RHA (exacto).

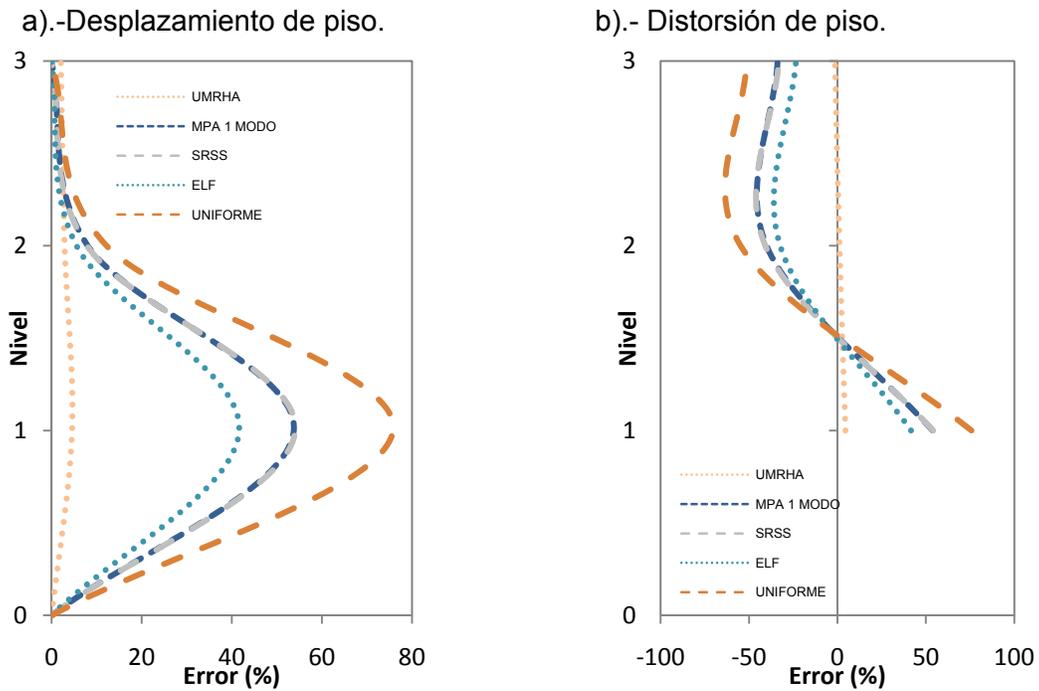


Figura 6.5.4 Variación del desplazamiento y distorsión de entrepiso estimado con la distribución de FEMA-273, MPA incluyendo un “modo” y NL-RHA (exacto).

Tabla 6.5.1 Máximos resultados de desplazamientos de entrepiso, para la distribución de FEMA y MPA para 1.00x San Fernando.

Nivel	DESPLAZAMIENTO/ALTURA (%)						ERROR (%)				
	FEMA			MPA	UMRHA	NL-RHA	FEMA			MPA	UMRHA
	Uniforme	ELF	SRSS				Uniforme	ELF	SRSS		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	2.412	1.944	2.115	2.110	1.435	1.372	75.796	41.632	54.089	53.759	4.545
2	3.004	2.826	2.888	2.892	2.754	2.677	12.191	5.557	7.859	8.031	2.877
3	3.313	3.313	3.313	3.313	3.381	3.313	0	0	0	0	2.051

Tabla 6.5.2 Máximos resultados de distorsión de entrepiso, para la distribución de FEMA y MPA para 1.00x San Fernando.

Nivel	DESPLAZAMIENTO/ALTURA (%)						ERROR (%)				
	FEMA			MPA	UMRHA	NL-RHA	FEMA			MPA	UMRHA
	Uniforme	ELF	SRSS				Uniforme	ELF	SRSS		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	7.237	5.831	6.344	6.330	4.304	4.117	75.796	41.632	54.089	53.759	4.545
2	1.773	2.647	2.319	2.346	3.958	3.915	-54.702	-32.384	-40.763	-40.061	1.122
3	0.929	1.462	1.277	1.263	1.881	1.908	-51.309	-23.387	-33.075	-33.802	-1.426

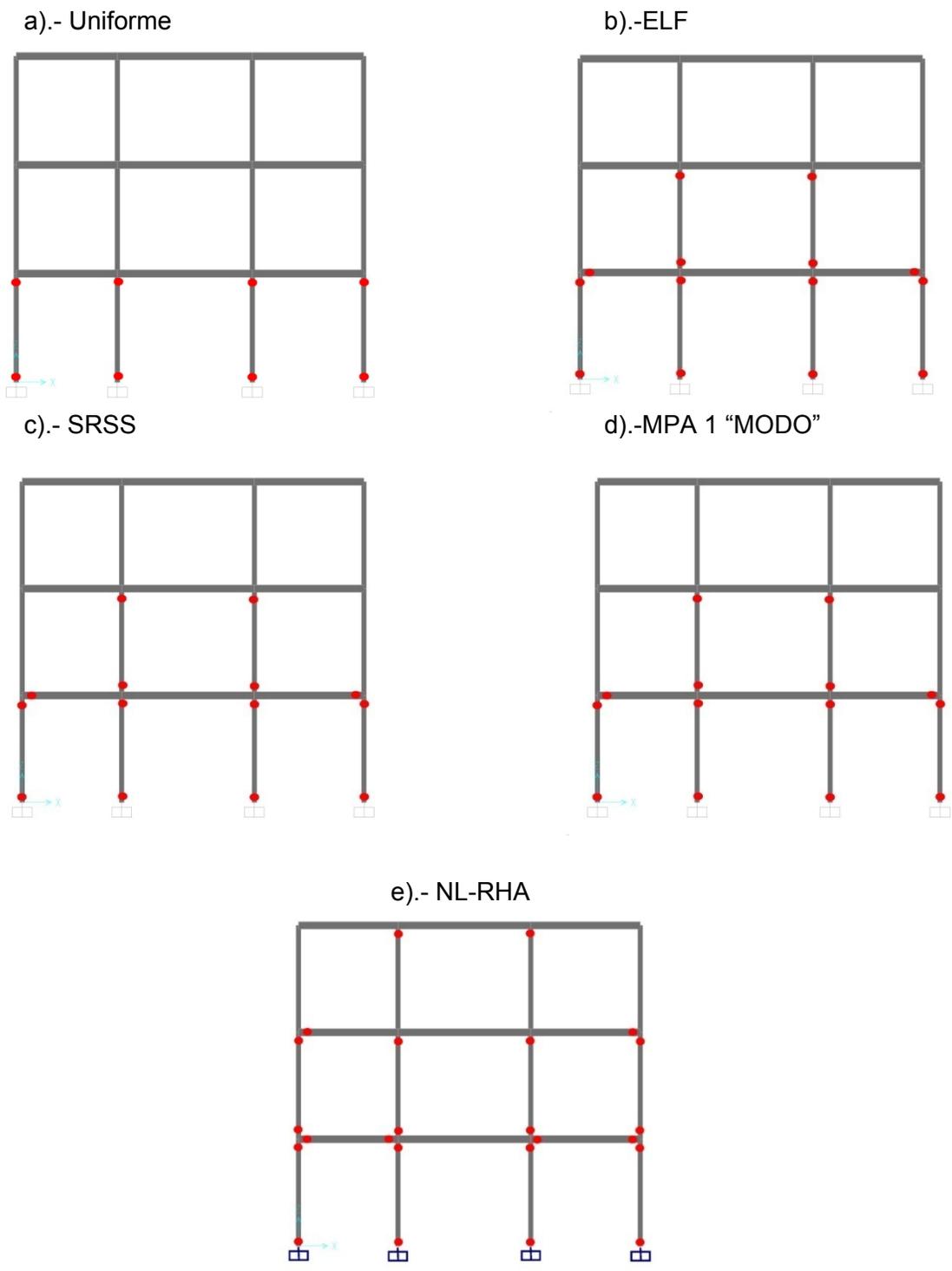


Figura 6.5.4 Localización de articulaciones estimado con la distribución de FEMA-273, MPA incluyendo un "modo" y NL-RHA (exacto).

