

## **EVALUACIÓN DE PATRONES DE CARGA LATERAL UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO INCREMENTAL DE EDIFICACIONES APORTICADAS DE CONCRETO ARMADO REGULARES ALTAS**

Sánchez, Javier<sup>1</sup>; Torres, Ronald<sup>2</sup>; Idrees Rustom, Ahmad<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Carabobo. ahmadidrees90@gmail.com

<sup>2</sup> Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), Universidad Central de Venezuela. ronald.imme@gmail.com

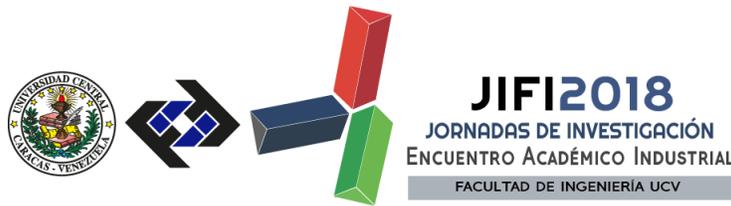
### **RESUMEN**

Sin duda alguna el objetivo de los códigos de diseño de edificaciones ha sido siempre la preservación de la vida, garantizando además el confort de sus usuarios durante la vida útil de las mismas. En los últimos años se ha podido observar una mejora considerable en los criterios utilizados e implementados en diversos códigos a nivel mundial, que se traducen no sólo en un avance tecnológico en sí mismo, sino que a su vez se ve reflejado en la calidad y/o complejidad de las estructuras que hoy en día se están llevando a cabo en diversos países. Este trabajo se concentra en evaluar diferentes procedimientos y patrones de carga sísmica haciendo uso del análisis no lineal estático incremental (Pushover) en pórticos de concreto armado de gran altura, para establecer el procedimiento y el patrón de carga que mejor se adapte durante la respuesta. Luego de haber evaluado los modelos estructurales, con el uso de diversos procedimientos establecidos en varios códigos de diseño y empleando además 28 patrones de cargas laterales propuestos por diversos autores a nivel mundial para el Análisis Estático No Lineal de pórticos de concreto armado de 16, 20 y 24 niveles, los resultados encontrados en estructuras de gran altura, indican que el patrón de carga lateral y el modelo histerético adoptado influyen en los niveles de ductilidad alcanzados.

*Palabras Clave: Análisis estructural, análisis no lineal, Pushover, respuesta estructural*

### **ABSTRACT**

Undoubtedly, the objective of building design codes has always been the preservation of life, also guaranteeing the comfort of its users during their useful life. In recent years, we have seen a considerable improvement in the criteria used and implemented in various codes worldwide, which are translated not only into a technological advance in itself, but at the same time it is reflected in the quality and / or complexity of the structures that are currently being carried out in various countries. This work focuses on evaluating different seismic loading procedures and patterns by using incremental static nonlinear analysis (Pushover) in high-rise reinforced concrete gantries to establish the procedure and load pattern that best suits the response. After having evaluated the structural models, with the use of diverse procedures established in several design



codes and also using 28 patterns of lateral loads proposed by various authors worldwide for the Non-linear Static Analysis of reinforced concrete frames of 16, 20 and 24 levels, the results found in high-rise structures, indicate that the lateral load pattern and the hysteretic model adopted influence the levels of ductility achieved.

*Key Words: Non-linear analysis, Pushover, Structural analysis*

## INTRODUCCIÓN

A nivel mundial muchas edificaciones altas son construidas en zonas de alto riesgo sísmico, como consecuencia se ha podido evidenciar el daño ocasionado en las mismas durante la ocurrencia de sismos severos. Eventos sísmicos como el terremoto de Northridge USA (1994), el terremoto de Kobe Japón (1995) o más recientemente los terremotos ocurridos en Chile (2010) y en Ecuador (2016), ocasionaron gran daño en las edificaciones de cada uno de esos países, dejando a su paso pérdidas millonarias para los gobiernos, y más importante aún, cientos de pérdidas humanas.

En Venezuela la mayor parte de la población se encuentra ubicada en la zona Norte-costera del país, que es precisamente la zona donde se ha registrado la mayor actividad sísmica debido al contacto entre las placas tectónicas Suramericana y la placa del Caribe, dando origen al sistema de fallas San Sebastián, Boconó y El Pilar. Es por este motivo, que se hace de vital importancia el uso de métodos de análisis y diseño que permitan estimar de manera más precisa, el comportamiento que pueden tener las estructuras ante posibles eventos sísmicos.

En los últimos años la construcción de edificaciones nuevas se ha visto reducida, y la rehabilitación, reforzamiento o adecuación de estructuras existente ha tenido un mayor auge. Para llevar a cabo un proceso de rehabilitación estructural es importante tomar en cuenta varios aspectos: En primer lugar la experiencia del profesional que realizará la evaluación y el proyecto de rehabilitación o reforzamiento estructural; la caracterización de la estructura y los daños presentes en la misma, finalmente un modelado estructural que permita determinar en función de las características de los materiales el comportamiento global de la estructura.

Enfocándonos en éste último punto es importante mencionar que existen muchos métodos que pueden ser empleados para analizar una estructura, uno de los más utilizados durante los últimos años para rehabilitación de estructuras es el Método de Análisis No Lineal Estático Incremental, el cual como su nombre lo indica, considera el comportamiento no lineal de los materiales representado en la curva de tensión-deformación (para el acero y el concreto) y permite estimar la capacidad de la estructura de absorber y/o disipar energía en un rango de deformación aceptables tomando en cuenta los efectos de degradación de resistencia y rigidez a la cual puede estar sometida durante un evento sísmico (desempeño estructural).

El procedimiento de aplicación del método de Análisis No Lineal Estático Incremental se encuentra establecido en varios códigos como el ATC 40, FEMA 356 o ASCE 41, en los mismos se proponen patrones o estado de cargas laterales que representan las fuerzas inerciales debido al

### SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.

Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053

Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

sismo, los cuales permiten predecir el comportamiento real de la estructura ante un posible evento de éste tipo. Sin embargo, a nivel mundial diversos autores proponen patrones de carga lateral que difieren de los establecidos en las normas antes mencionadas, razón por la cual se hace necesario evaluar cuáles son los patrones de carga lateral que mejor precisan el comportamiento real y que deben ser empleados en el Análisis No Lineal Estático Incremental (Pushover) en edificaciones de concreto armado aporricadas regulares altas.

## METODOLOGÍA

Las edificaciones seleccionadas para la investigación, se basan en estructuras regulares en su totalidad acorde a la práctica constructiva actual en Venezuela. Se tomaron tres edificaciones regulares de 16, 20 y 24 niveles que presentan cambios en sus secciones transversales, geometría y diseños acorde a la práctica constructiva actual y a la normativa de diseño vigente, lo que permitirá caracterizar de forma más precisa mediante un análisis comparativo, la respuesta ante las acciones de un sismo severo, para cada patrón de carga respectivamente.

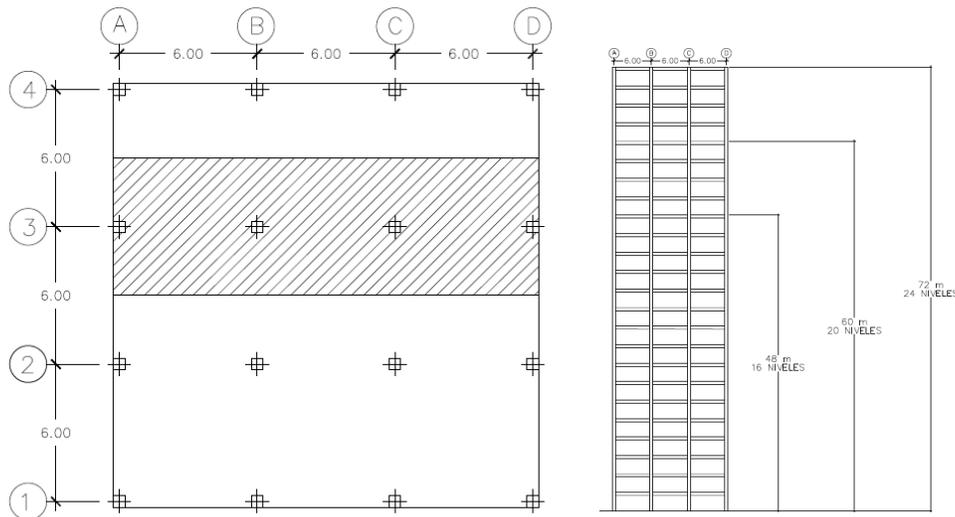


Figura 1. Vista en planta de la edificación y pórtico de diseño.

Entre los modelos de rotulas plásticas empleados, fueron consideradas las definidas para elementos sometidos a flexión y flexo-compresión que sugieren los códigos FEMA 356, ASCE 41-13 y ASCE 41-17, así como también se definieron modelos de rotulas plásticas adaptadas a los diagramas Momento-Curvatura propio de cada elemento estructural, permitiendo considerar los niveles de rotación que pueda desarrollar cada elemento, así como calibrar los criterios de aceptación.

Como técnicas de refinación que permitan de alguna manera considerar las propiedades no lineales de los materiales y/o elementos estructurales se hizo uso de modelos de histéresis para observar la variación del comportamiento y de los niveles de ductilidad que se pueden alcanzar, se implementaron los modelos histéricos Isotrópico, Takeda y Cinemático. Para los materiales se tomó en consideración un modelo constitutivo de Mander para concreto confinado en el área

interior o núcleo y un modelo No Confinado para el área exterior, y en lo que respecta al acero de refuerzo se consideró en su totalidad la curva tensión-deformación del acero de refuerzo;

Para la implementación de los patrones de carga se utilizaron 28 criterios. El primero corresponde al código ATC 40, distribución vertical proporcional a la forma del modo fundamental en la dirección considerada. El uso de esta distribución se permite solo cuando más del 75% de la masa participa en este modo, y consiste en aplicar fuerzas laterales a cada nivel producto de la masa de los niveles y la forma del primer modo del modelo lineal de la estructura. En lo que respecta al código FEMA 356, presenta dos propuestas, en donde, se sugieren de manera inicial tres distribuciones, una primera distribución proporcional a un factor de distribución vertical, una segunda distribución vertical proporcional a la forma del modo fundamental en la dirección considerada, siempre y cuando participe más del 75% de la masa, y una tercera distribución vertical proporcional a la distribución del cortante en los pisos calculado por la combinación modal, como respuesta de un análisis con espectro de respuesta de la estructura, incluyendo suficientes modos para capturar más del 90% de la masa. En una segunda propuesta se sugieren dos distribuciones, una distribución uniforme que consiste en aplicar fuerzas laterales a cada piso proporcional a la masa de cada nivel, y una segunda distribución de carga adaptativa que cambia en función de cómo la estructura es desplazada, el código recomienda seleccionar al menos 2 patrones, uno de cada propuesta, por lo cual se consideró la distribución que toma el factor de distribución vertical y la distribución uniforme.

También se incorporaron propuestas de diversos autores, que sugieren distribuciones de cargas diferentes a las referidas anteriormente por los códigos, una de ellas es la “Propuesta de patrones de carga lateral para análisis Pushover de edificaciones de concreto armado” (F. Khoshnoudian, S. Mestri, F. Abedinik, 2011), en la cual se presentan 20 diferentes propuestas, distribuciones lineales, parabólicas, inclusive curvas senoidales, entre otras, se pueden apreciar en la Figura 2.

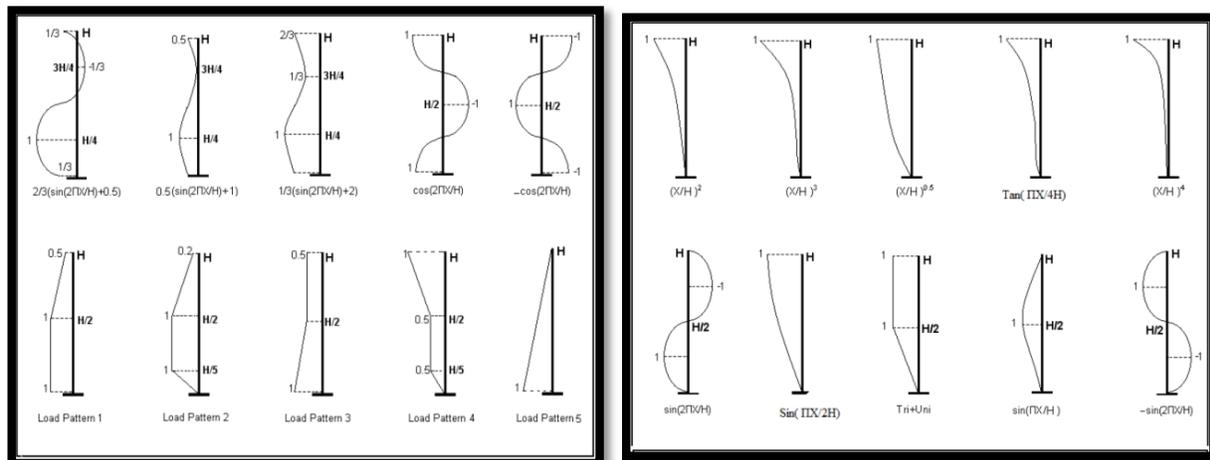


Figura 2. Propuestas de patrones de carga lateral.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.  
 Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053  
 Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>

Una vez desarrollados los modelos matemáticos se procede a la determinación de resultados, entre ellos, la curva de capacidad, punto de desempeño para el nivel de demanda modificado, y patrón de daños, lo cual permite caracterizar la respuesta estructura describiendo el comportamiento así como los niveles de ductilidad que pueden ser alcanzados.

Tomando como ejemplo los resultados en estructuras de 16 niveles, se puede apreciar en las figuras 3, 4 y 5, el resultado para cada modelo de rotula plástica empleando diferentes modelos histeréticos en los elementos estructurales, en donde se aprecia que se alcanzaron diferentes niveles de ductilidad para cada patrón de carga estudiado.

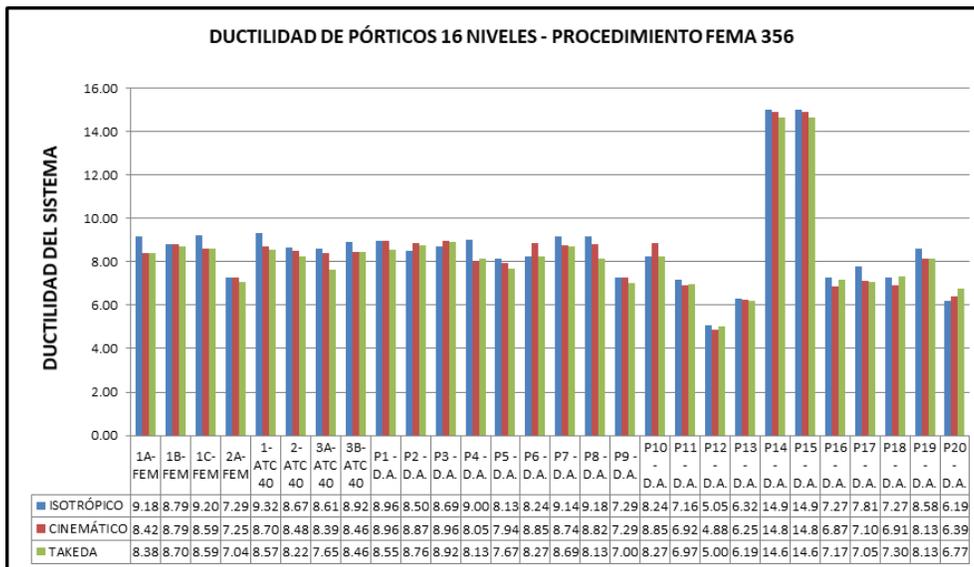


Figura 3. Resultados por tipo de rotula plástica para cada modelo histerético en estructura de 16 niveles, procedimiento FEMA 356.

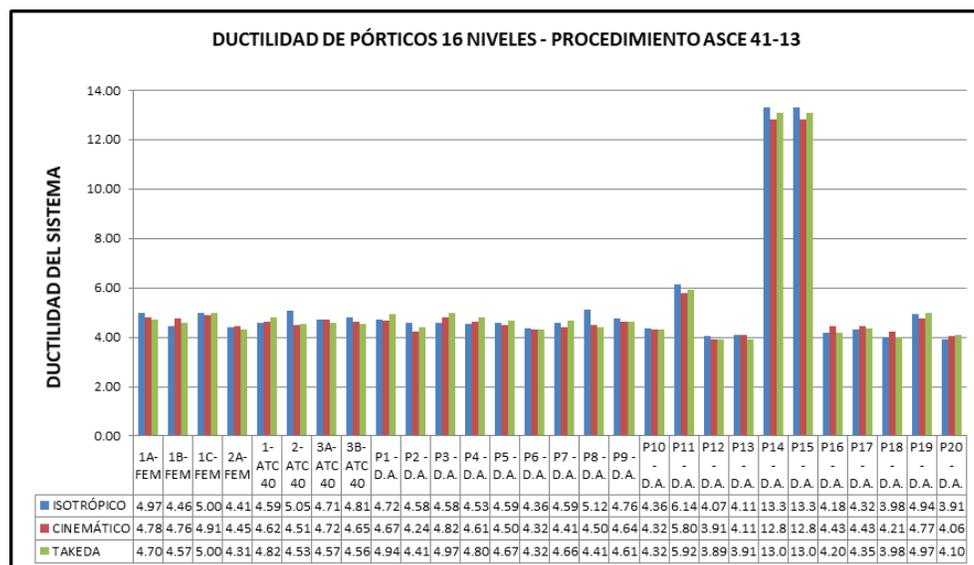


Figura 4. Resultados por tipo de rotula plástica para cada modelo hysterético en estructura de 16 niveles, procedimiento ASCE 41-13.

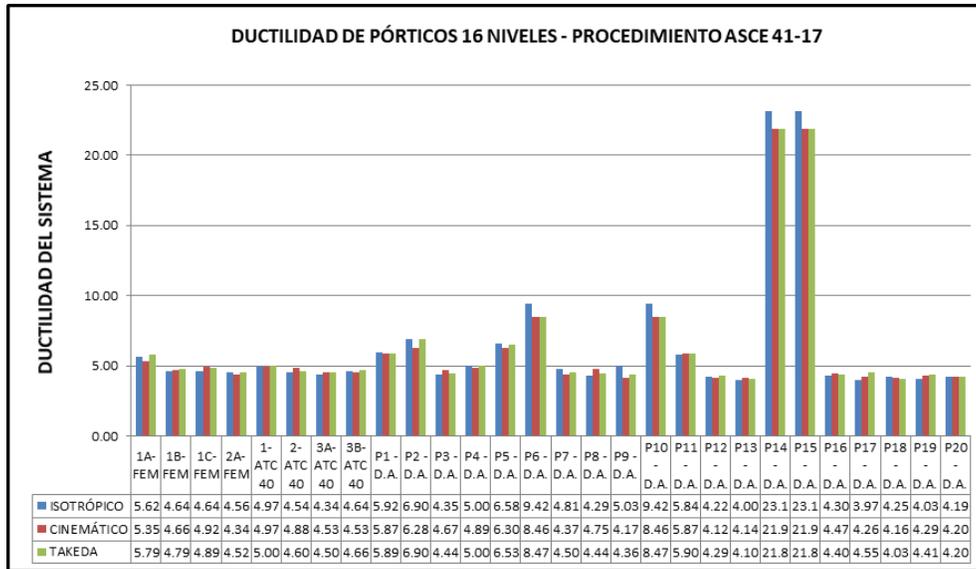
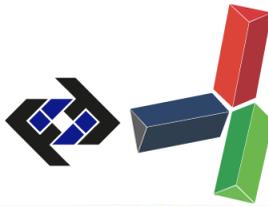


Figura 5. Resultados por tipo de rotula plástica para cada modelo hysterético en estructura de 16 niveles, procedimiento ASCE 41-17.

Entre los mecanismos de falla observados, se tienen mecanismos formados principalmente en vigas, columnas, así como mecanismos de falla mixta. Los resultados para cada patrón de carga estudiado en estructuras de 16 niveles se pueden apreciar en la tabla 1.

Tabla 1. Mecanismos de falla para cada patrón de carga evaluado en estructuras de 16 niveles



PATRÓN DE CARGA	CURVA DE CAPACIDAD						PUNTO DE DESEMPEÑO		
	$\Delta y$ (cm)	$Vy$ (kg)	$\Delta u$ (cm)	$Vu$ (kg)	$\mu$ (Sistema)	Mecanismo de Falla	T (s)	$\mu$ (Demanda)	Observaciones
1A-FEMA (Triangular)	18.63	147910	105.20	180707	5.65	Mixto	2.92	2.21	-
1B-FEMA (1er Modo)	16.67	154984	88.43	189710	5.30	Mixto	2.82	2.24	-
1C-FEMA (Corte Piso)	18.99	163987	91.42	197749	4.81	Mixto	2.70	2.06	-
2A-FEMA (Uniforme)	15.93	192122	62.76	224277	3.94	Columnas	2.39	1.96	-
1-ATC40 (Masa)	19.91	156752	87.92	191318	4.42	Mixto	2.79	2.21	-
2-ATC40 (1er Modo)	16.42	155981	87.04	189743	5.30	Mixto	2.81	2.23	-
3A-ATC40 (Modos Sup)	15.69	170418	70.30	205788	4.48	Columnas	2.58	2.06	-
3B-ATC40 (Modos Sup)	16.67	159968	82.25	194533	4.93	Mixto	2.73	2.14	-
Patrón 1 - Div. Autores	17.94	143408	113.06	178135	6.30	Mixto	2.98	2.30	-
Patrón 2 - Div. Autores	18.38	137620	132.96	172990	7.23	Mixto	2.98	2.02	-
Patrón 3 - Div. Autores	15.93	167202	76.65	203376	4.81	Mixto	2.62	2.04	-
Patrón 4 - Div. Autores	17.79	158199	100.25	189068	5.64	Mixto	2.78	2.04	-
Patrón 5 - Div. Autores	19.82	133762	155.97	171061	7.87	Mixto	3.01	2.01	-
Patrón 6 - Div. Autores	14.31	368200000	111.86	487100000	7.82	Mixto	0.04	1.00	Corte Alto
Patrón 7 - Div. Autores	16.91	160772	82.57	194534	4.88	Mixto	2.71	2.06	-
Patrón 8 - Div. Autores	15.93	163183	76.54	197749	4.80	Mixto	2.67	2.09	-
Patrón 9 - Div. Autores	13.24	175241	59.19	215434	4.47	Columnas	2.50	2.19	-
Patrón 10 - Div. Autores	14.31	368200000	111.86	487100000	7.82	Mixto	0.04	1.00	Similar P6-DA
Patrón 11 - Div. Autores	5.33	255949	29.41	304823	5.52	Columnas	1.82	3.03	-
Patrón 12 - Div. Autores	10.29	224180	44.16	270997	4.29	Columnas	2.09	2.17	-
Patrón 13 - Div. Autores	14.22	211254	48.93	246945	3.44	Columnas	2.23	1.97	-
Patrón 14 - Div. Autores	2.21	24566	55.19	29711	24.97	Mixto	2.65	1.00	Corte Bajo
Patrón 15 - Div. Autores	2.21	24566	55.19	29711	24.97	Mixto	2.65	1.00	Similar P14-DA
Patrón 16 - Div. Autores	13.97	196945	55.70	234727	3.99	Columnas	2.32	2.04	-
Patrón 17 - Div. Autores	13.48	188907	53.90	227492	4.00	Columnas	2.40	2.13	-
Patrón 18 - Div. Autores	14.71	208360	54.19	245981	3.68	Columnas	2.24	1.97	-
Patrón 19 - Div. Autores	16.67	168810	80.27	203376	4.82	Mixto	2.62	2.04	-
Patrón 20 - Div. Autores	11.03	223794	41.28	271061	3.74	Columnas	2.08	2.13	-

En la Figura 6 se presenta el mecanismo de fallo para algunos patrones de carga, para estructura de 16 niveles, procedimiento ASCE 41-13, como se indicó anteriormente, el mecanismo de fallo depende y es cónsono con el patrón de carga aplicado.

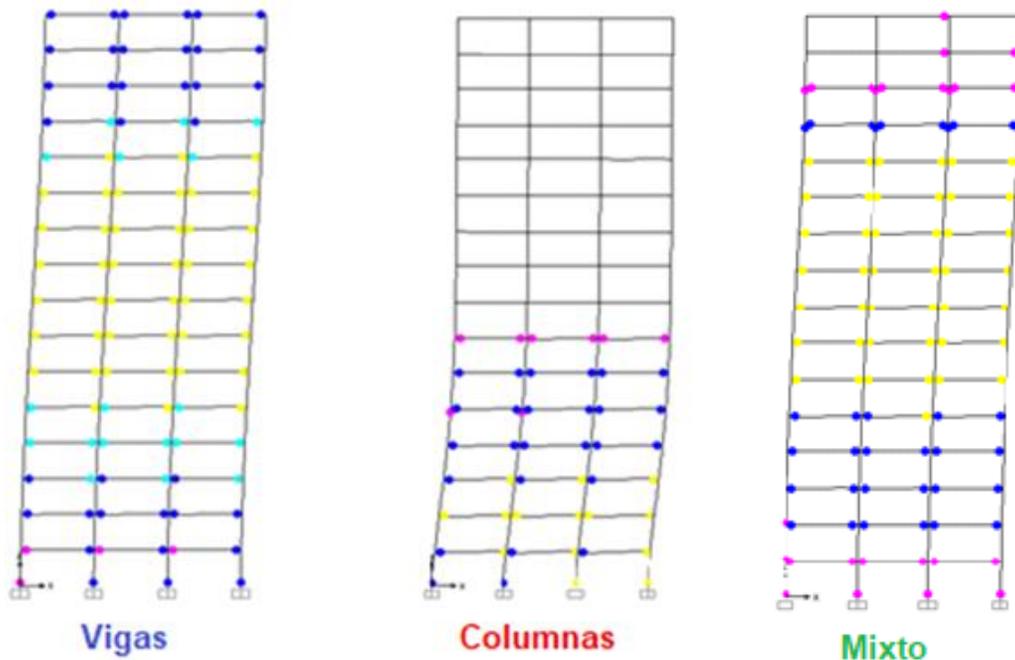


Figura 6. Resultados mecanismo de fallo de rotula plástica para estructura de 16 niveles, procedimiento ASCE 41-13.

## CONCLUSIONES

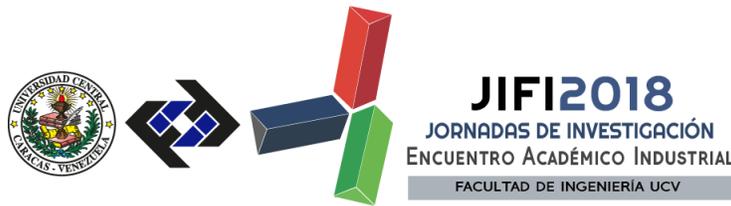
Para las edificaciones altas analizadas según todos los procedimientos, los valores de ductilidades obtenidos utilizando los tres modelos de histéresis (Isotrópico, Cinemático y Takeda) arrojan resultados similares entre ellos para todos los patrones de carga empleados, por lo que se puede concluir que el modelo de histéresis no representa una variable influyente en la respuesta de pórticos de concreto armado de gran altura, cuando los elementos que componen los mismos están diseñados para realizar incursiones significativas y estables dentro del rango inelástico siguiendo los criterios normativos del ACI 318-14.

La respuesta estructural de edificaciones altas siguiendo el procedimiento del FEMA 356 indica que todos los patrones que siguen una tendencia triangular ascendente según lo establecido en los códigos FEMA 356 y ATC-40 arrojan resultados de ductilidad similares. Adicionalmente, el mecanismo de falla predominante observado es el mecanismo de falla en vigas.

La respuesta estructural de edificaciones altas siguiendo el procedimiento del ASCE 41-13 indica que todos los patrones que siguen una tendencia triangular ascendente según lo establecido en los códigos FEMA 356 y ATC-40 arrojan resultados de ductilidad similares. Adicionalmente el mecanismo de falla predominante observado es el mecanismo de falla mixto, debido a que los niveles de rotación permitidos en columnas son menores a los establecidos por el FEMA 356.

En general la respuesta estructural de edificaciones altas siguiendo el procedimiento del ASCE 41-17 indican que todos los patrones que siguen una tendencia triangular ascendente según lo establecido en los códigos FEMA 356 y ATC-40 arrojan resultados de ductilidad similares. Adicionalmente el mecanismo de falla predominante observado es el mecanismo de falla mixto, debido a que los niveles de rotación permitidos en columnas son menores a los establecidos por el FEMA 356. Atención particular debe tenerse con el patrón de carga uniforme establecido por los códigos (2A-FEMA) y el patrón de carga propuesto por Freeman et al. (1998) (3A-ATC40) que considera los modos altos de vibración, pues arrojan valores de ductilidad menores y producen un mecanismo de falla en columnas. Comprobaciones adicionales a través de un análisis Tiempo-Historia son necesarios.

Los patrones que representan adecuadamente el comportamientos de estructuras regulares altas haciendo uso del procedimiento del ASCE 41-17 y tomando como referencia los patrones de carga lateral establecidos en los códigos FEMA 356 y ATC-40 son los siguientes:  $(X/H)^{1/2}$ ,  $\text{Tan}(\pi X/4H)$ ,  $\text{Sen}(\pi X/2H)$ , una combinación de triangular más uniforme y el patrón triangular más uniforme mas trapecial. Los patrones de carga lateral  $(X/H)^2$ ,  $(X/H)^3$ ,  $(X/H)^4$  a pesar que producen un mecanismo de falla similar a los establecidos en los códigos FEMA 356 y ACT-40, arrojan valores de ductilidad entre un 25% a un 40% mayores debido a que concentran gran parte de la carga en los niveles superiores, permitiendo alcanzar grandes deformaciones antes del colapso.



Finalmente los patrones de carga lateral que siguen una tendencia triangular ascendente según lo establecido en los códigos FEMA 356 y ATC-40 son los que mejor precisan el comportamiento de estructuras regulares de concreto armado altas.

## REFERENCIAS

- [1] ATC 40. (1996). The Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. Applied Technology Council. California, USA.
- [2] FEMA 273. (1997). NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C. USA.
- [3] FEMA 356. (2000). Pre-Standard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C. USA.
- [4] FEMA 440. (2005). Improvement Of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C. USA.
- [5] Khoshnoudian, Mestri & Abedinik. (2011). Proposal Of Lateral Load Pattern For Pushover Analysis Of RC Buildings. Comp. Meth. Civil Eng., Vol. 2, 2. 169-183.

### SECRETARÍA DE LAS JORNADAS.

Coordinación de Investigación .Edif. Física Aplicada. Piso 2. Facultad de Ingeniería.  
Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria de Caracas. 1053  
Telf.: +58 212-605 1644 | <http://www.ing.ucv.ve>