Boletín de la Academia Nacional de la Ingeniería y el Hábitat. ISSN 1317-6781
Caracas, Nº 67 Abril-Junio 2025: 63 – 70

Recibido: febrero 2025
Aprobado: junio 2025

ESTUDIO DE PATRONES DE CARGA DE ANÁLISIS NO LINEAL ESTÁTICO INCREMENTAL EN PÓRTICOS DE CONCRETO ARMADO DE ESTRUCTURAS REGULARES DE ALTURA BAJA, MEDIA Y ALTA

Ronald TORRES[1] Ahmad Idrees RUSTOM[2] Javier SÁNCHEZ[3] Eduardo NUÑEZ[4]

RESUMEN

Los códigos de diseño cambian y mejoran en función de disminuir el nivel de vulnerabilidad, esta condición se puede lograr mediante la incorporación de procedimientos no lineales que permitan considerar las propiedades inelásticas de los materiales y además incorporar los efectos que sufren las estructuras durante la acción de un sismo, como pueden ser la degradación de rigidez y/o resistencia, lo que cambia de manera drástica la respuesta de la estructura. De alguna manera estos procedimientos permiten evaluar y determinar posibles modos de falla de estructuras nuevas o existentes, lo que es de gran importancia en el desempeño sísmico que estas edificaciones puedan tener. Por otra parte, la necesidad de desarrollar métodos para predecir el comportamiento no lineal de las estructuras ha sido objetivo de numerosas investigaciones en las últimas décadas, presentando a su vez diferentes procedimientos para su aplicación, además de la variación de los patrones de cargas sísmicas, ya que caracterizar la respuesta de las estructuras depende en gran parte de ello. Es por esto, que el presente trabajo pretende evaluar diferentes procedimientos y patrones de carga sísmica haciendo uso del análisis no lineal estático incremental (Pushover) en pórticos de concreto armado, para así precisar el procedimiento y el patrón que mejor se adapte durante la respuesta. Los resultados encontrados en estructuras regulares de altura baja, media y alta, indican que el patrón de carga lateral y el modelo histerético adoptado influyen en los niveles de ductilidad alcanzados.

ABSTRACT

Study of load patterns of incremental static non-linear analysis in reinforced concrete buildings of regular strutures of low, medium and high height

The design codes change and improve in order to reduce the level of vulnerability, this condition can be achieved through the incorporation of non-linear procedures that allow to consider the inelastic properties of the materials and also incorporate the effects suffered by the structures during the action of an earthquake, such as the degradation of rigidity and/or resistance, which drastically changes the response of the structure. Somehow, these procedures allow to evaluate and determine possible failure modes of new or existing structures, which is of great importance in the seismic performance that these buildings may have. On the other hand, the need of developing methods to predict the non-linear behavior of structures has been the subject of numerous investigations in the last decades, presenting different procedures for their application, as well as the variation of seismic load patterns due to characterize the response of structures depends largely on this. This is why the present work aims to evaluate different seismic loading procedures and patterns by using incremental static nonlinear analysis (Pushover) in reinforced concrete gantries, in order to specify the procedure and the pattern that best suits the response. The results found in regular structures of low, medium and high height, indicate that the lateral load pattern and the hysteretic model adopted influence the levels of ductility achieved.

Palabras Clave: Análisis estructural, análisis no lineal, Pushover, respuesta estructural.
Keywords: Structural analysis, nonlinear analysis, Pushover, structural response.

INTRODUCCIÓN

Como se ha evidenciado en diversas partes del mundo, las estructuras en general están sometidas a diversas amenazas naturales, y como se evidenció en el año 1906 durante el gran terremoto de San Francisco, la amenaza sísmica es una de ellas, y no escapa de la realidad que es una amenaza latente y recurrente lo que obliga a que los diseños se realicen en función de mitigar la vulnerabilidad ante estas acciones.

[1] Instituto de Materiales y Modelos Estructurales (IMME), Universidad Central de Venezuela. Correo.e.: ronald.imme@gmail.com
[2] Facultad de Ingeniería. Universidad de Carabobo. Correo.e.: ahmadidrees90@gmail.com
[3] Estudiante Postgrado en Ingeniería Estructural y Sismoresistente, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela.
[4] Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile

Específicamente Venezuela no escapa de esta realidad, debido a que se encuentra ubicada entre muchas fallas tectónicas activas, siendo las principales las del sistema Boconó-San Sebastián-El Pilar. Siendo la principal una falla transcurrente, debido a la interacción entre la placa tectónica del Caribe y la placa Sudamericana, se generan movimientos relativos importantes entre ellas, que dan origen a sismos de intensidad moderada y alta. Adicionalmente las poblaciones más densas se encuentran ubicadas cercanas a la zona de contacto entre esas dos placas.

Por otra parte la práctica constructiva Venezolana a lo largo de los años ha demostrado que el sistema estructural más común son los pórticos estructurales resistentes a momento, en concreto armado, ya que dicho sistema es el acostumbrado y en el que mejor se desarrolla parte de la población que se dedica a la construcción en el país, se podría decir que este ha presentado en parte un desempeño aceptable durante la historia sísmica reciente del país, sin embargo no escapa de la realidad que durante estos eventos parte de estas estructuras han sufrido daños significativos, y algunas hasta llegar al punto del colapso.

Esto induce a que sea necesario determinar una respuesta más precisa de las estructuras ante la acción de los movimientos sísmicos, tanto para analizar edificaciones nuevas, así como evaluar edificaciones existentes y determinar métodos de adecuación para mitigar la vulnerabilidad y caracterizando así el desempeño sísmico que estas edificaciones puedan tener. Esto se puede lograr mediante la incorporación de procedimientos no lineales que permitan considerar las propiedades inelásticas de los materiales y además incorporar los efectos que sufren las estructuras durante la acción de un sismo, como pueden ser la degradación de rigidez y/o resistencia, lo que cambia de manera drástica la respuesta de la estructura.

De lo antes expuesto se deriva la necesidad de evaluar diferentes procedimientos y patrones de carga sísmica haciendo uso del análisis no lineal estático incremental (Pushover) en pórticos de concreto armado, para así precisar el procedimiento y el patrón que mejor se adapte durante la respuesta dinámica.

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 siete edificaciones regulares de 2, 4, 8, 12, 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, figuras 1 y 2, tabla 1 con muestra de dimensiones; 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.

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 en función a estos niveles en semejanza al código ASCE 41-2013.

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, modelos histéricos tales como: Isotrópico, Takeda y Cinemático. En lo que respecta a los materiales se tomó en consideración de 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 lo cual permite considerar las propiedades no lineales del mismo, y a su vez considerar efectos que puedan adecuar el comportamiento cíclico como puede ser el efecto Bauschinger.

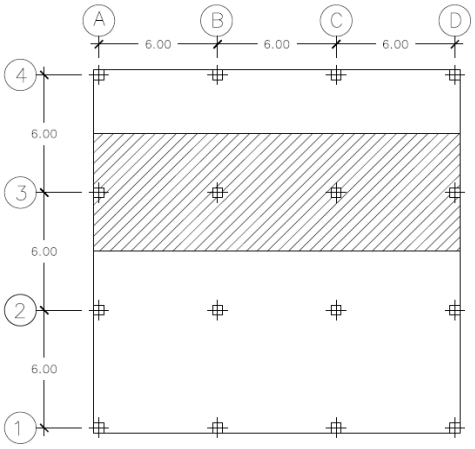


Figura 1. *Vista en planta de la edificación y pórtico de diseño. Fuente: Elaboración propia.*

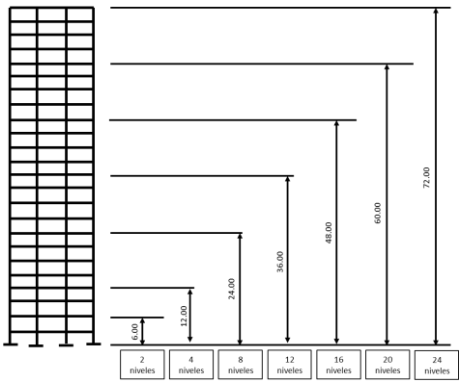


Figura 2. *Elevación de pórticos para diferentes alturas. Fuente: Elaboración propia.*

Tabla 1. *Dimensiones de elementos estructurales.*

EDIFICACION	NIVELES	DIMENSION DE COLUMNA	DIMENSION DE VIGA
2 Niveles	1-2	50x50 cm	40x60 cm
4 Niveles	1-4	60x60 cm	40x60 cm
8 Niveles	5-8	70x70 cm	40x60 cm
	1-4	80x80 cm	
12 Niveles	9-12	70x70 cm	40x60 cm
	5-8	80x80 cm	
	1-4	90x90 cm	
16 Niveles	9-16	Centrales 70x70 cm	40x60 cm
		Esquineras 60x60 cm	
	5-8	Centrales 80x80 cm	
		Esquineras 70x70 cm	
	1-4	Centrales 90x90 cm	
		Esquineras 70x70 cm	

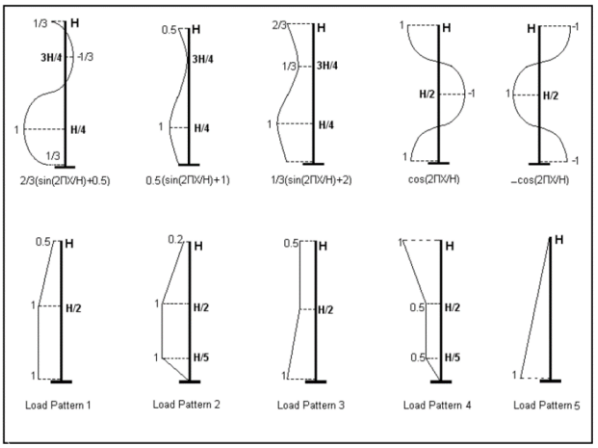


Figura 3. *Propuestas de patrones de carga lateral. Fuente: Elaboración propia.*

Para la implementación de los patrones de carga se utilizaron varios criterios. El código ATC 40 recomienda usar una 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.

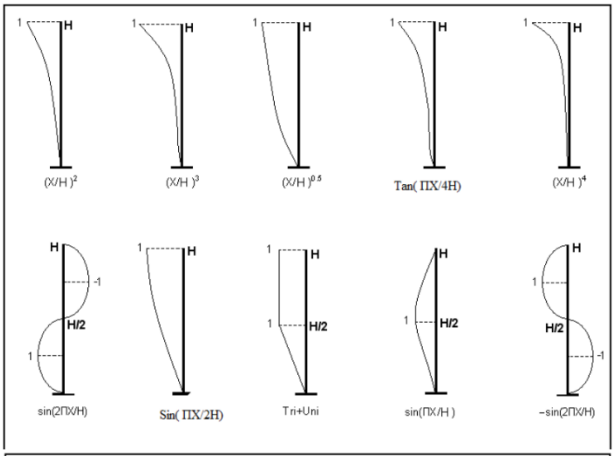


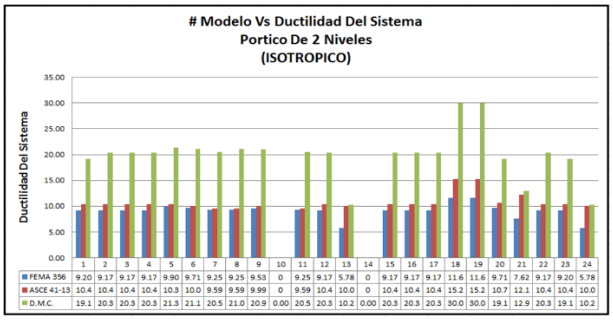
Figura 4. *Propuestas de patrones de carga lateral. Fuente: Elaboración propia.*

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, hiperbólicas, inclusive curvas senoidales, entre otras, se pueden apreciar en las Figuras 3 y 4.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

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.

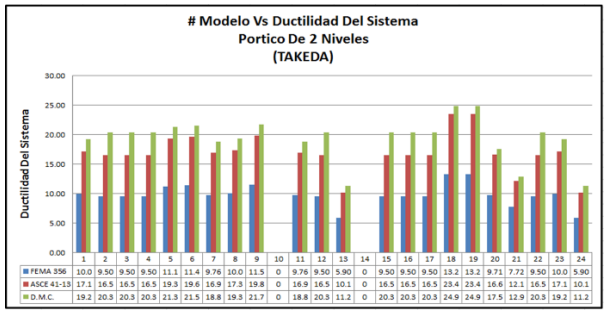
Tomando como ejemplo los resultados en estructuras de dos niveles, se puede apreciar en la Figura 5, 6 y 7, el resultado para cada modelo de rotula plástica empleando diferentes modelos histeréticos en los elementos estructurales, en donde se aprecia que se alcanzaron diferentes niveles de ductilidad para cada patrón de carga estudiado, cabe destacar que algunas distribuciones de carga no arrojaron valores de fuerza, (modelo 10, 14), motivado a que eran distribuciones senoidales que presentaban valores nulos para la altura de la edificación.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
FEMA 356	9.20	9.17	9.17	9.17	9.90	9.71	9.25	9.25	9.53	0	9.25	9.17	5.78	0	9.17	9.17	9.17	11.6	11.6	9.71	7.62	9.17	9.20	5.78
ASCE 41-13	10.4	10.4	10.4	10.4	10.3	10.0	9.59	9.59	9.99	0	9.59	10.4	10.0	0	10.4	10.4	10.4	15.2	15.2	10.7	12.1	10.4	10.4	10.0
D.M.C.	19.1	20.3	20.3	20.3	21.3	21.1	20.5	21.0	20.9	0.00	20.5	20.3	10.2	0.00	20.3	20.3	20.3	30.0	30.0	19.1	12.9	20.3	19.1	10.2

Figura 5. *Resultados por tipo de rotula plástica para el modelo histerético isotropico en estructura de dos niveles.*

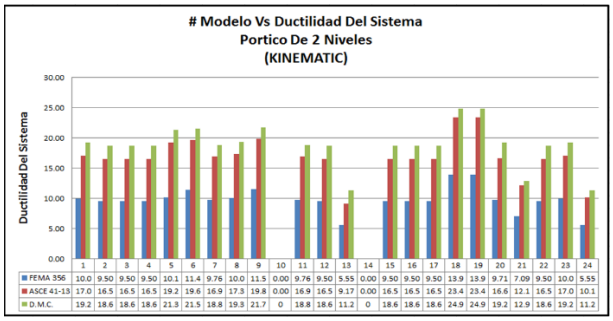
Fuente: Elaboración propia.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
FEMA 356	10.0	9.50	9.50	9.50	11.1	11.4	9.76	10.0	11.5	0	9.76	9.50	5.90	0	9.50	9.50	9.50	13.2	13.2	9.71	7.72	9.50	10.0	5.90
ASCE 41-13	17.1	16.5	16.5	16.5	19.3	19.6	16.9	17.3	19.8	0	16.9	16.5	10.1	0	16.5	16.5	16.5	23.4	23.4	16.6	12.1	16.5	17.1	10.1
D.M.C.	19.2	20.3	20.3	20.3	21.3	21.5	18.8	19.3	21.7	0	18.8	20.3	11.2	0	20.3	20.3	20.3	24.9	24.9	17.5	12.9	20.3	19.2	11.2

Figura 6. *Resultados por tipo de rotula plástica para el modelo histerético Takeda en estructura de dos niveles.*

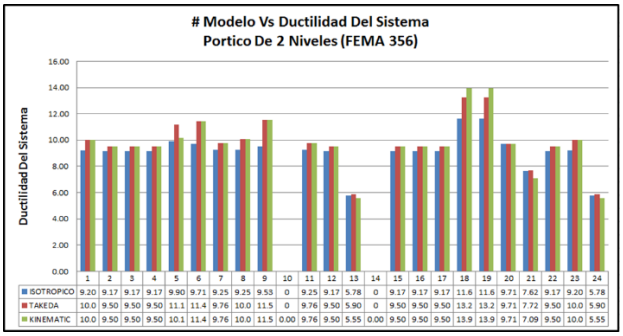
Fuente: Elaboración propia.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
FEMA 356	10.0	9.50	9.50	9.50	10.1	11.4	9.76	10.0	11.5	0.00	9.76	9.50	5.55	0.00	9.50	9.50	9.50	13.9	13.9	9.71	7.09	9.50	10.0	5.55
ASCE 41-13	17.0	16.5	16.5	16.5	19.2	19.6	16.9	17.3	19.8	0.00	16.9	16.5	9.17	0.00	16.5	16.5	16.5	23.4	23.4	16.6	12.1	16.5	17.0	10.1
D.M.C.	19.2	18.6	18.6	18.6	21.3	21.5	18.8	19.3	21.7	0	18.8	18.6	11.2	0	18.6	18.6	18.6	24.9	24.9	19.2	12.9	18.6	19.2	11.2

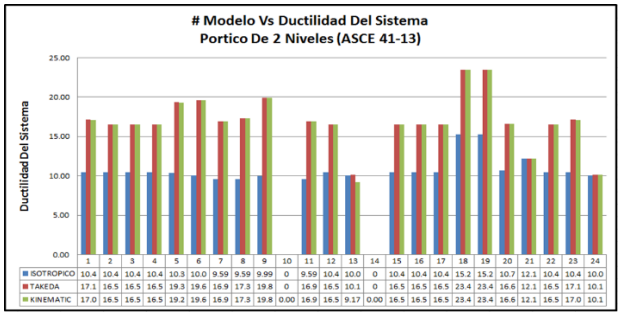
Figura 7. *Resultados por tipo de rotula plástica para el modelo histerético cinemático en estructura de dos niveles.*

Fuente: Elaboración propia.



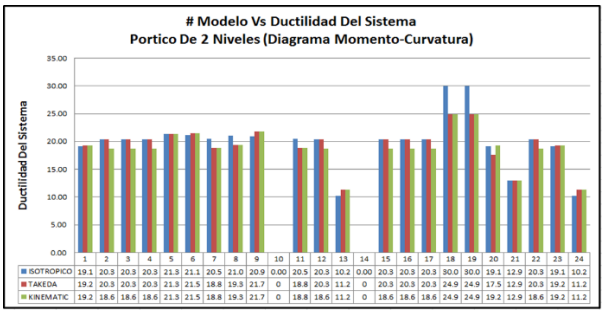
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ISOTROPICO	9.20	9.17	9.17	9.17	9.90	9.71	9.25	9.25	9.53	0	9.25	9.17	5.78	0	9.17	9.17	9.17	11.6	11.6	9.71	7.62	9.17	9.20	5.78
TAKEDA	10.0	9.50	9.50	9.50	11.1	11.4	9.76	10.0	11.5	0	9.76	9.50	5.90	0	9.50	9.50	9.50	13.2	13.2	9.71	7.72	9.50	10.0	5.90
KINEMATIC	10.0	9.50	9.50	9.50	10.1	11.4	9.76	10.0	11.5	0.00	9.76	9.50	5.55	0.00	9.50	9.50	9.50	13.9	13.9	9.71	7.09	9.50	10.0	5.55

Figura 8. *Análisis comparativo por rotula plástica del FEMA 356, para cada procedimiento empleado en estructura de dos niveles. Fuente: Elaboración propia.*



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ISOTROPICO	10.4	10.4	10.4	10.4	10.3	10.0	9.59	9.59	9.99	0	9.59	10.4	10.0	0	10.4	10.4	10.4	15.2	15.2	10.7	12.1	10.4	10.4	10.0
TAKEDA	17.1	16.5	16.5	16.5	19.3	19.6	16.9	17.3	19.8	0	16.9	16.5	10.1	0	16.5	16.5	16.5	23.4	23.4	16.6	12.1	16.5	17.1	10.1
KINEMATIC	17.0	16.5	16.5	16.5	19.2	19.6	16.9	17.3	19.8	0.00	16.9	16.5	9.17	0.00	16.5	16.5	16.5	23.4	23.4	16.6	12.1	16.5	17.0	10.1

Figura 9. *Análisis comparativo por rotula plástica del ASCE 41-13, para cada procedimiento empleado en estructura de dos niveles. Fuente: Elaboración propia.*



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ISOTROPICO	19.1	20.3	20.3	20.3	21.3	21.1	20.5	21.0	20.9	0.00	20.5	20.3	10.2	0.00	20.3	20.3	20.3	30.0	30.0	19.1	12.9	20.3	19.1	10.2
TAKEDA	19.2	20.3	20.3	20.3	21.3	21.5	18.8	19.3	21.7	0	18.8	20.3	11.2	0	20.3	20.3	20.3	24.9	24.9	17.5	12.9	20.3	19.2	11.2
KINEMATIC	19.2	18.6	18.6	18.6	21.3	21.5	18.8	19.3	21.7	0	18.8	18.6	11.2	0	18.6	18.6	18.6	24.9	24.9	19.2	12.9	18.6	19.2	11.2

Figura 10. *Análisis comparativo por rotula plástica basada en los Diagramas Momento-Curvatura de la sección, para cada procedimiento empleado en estructura de dos niveles. Fuente: Elaboración propia.*

En la Figuras 8, 9 y 10, se puede apreciar un análisis comparativo por procedimiento empleado, considerando cada modelo de histéresis en estructuras regulares de 2 niveles, en donde se observan que los niveles de ductilidad alcanzados difieren en cada procedimiento, FEMA 356, ASCE 41-2013 y haciendo uso de los diagramas Momento-Curvatura propios de cada elemento estructural.

Entre los mecanismos de falla observados, se tienen mecanismos formados principalmente en vigas, mecanismos formados en columnas, así como mecanismos de falla mixta. Los resultados para cada patrón de carga estudiado en estructuras de 2 niveles se pueden apreciar en la tabla 2 y los mecanismos de falla en las Figuras 11, 12 y 13.

Tabla 2. *Mecanismos de falla para cada patrón de carga evaluado en estructuras de 2 niveles.*

# Modelo	Mecanismo de Falla	Periodo Prom. (S)	Demanda Ductilidad	# Modelo	Mecanismo de Falla	Periodo Prom. (S)	Demanda Ductilidad
1	Vigas	0.28	1.566	13	Columnas	0.22	1
2	Vigas	0.26	1.442	14	Patrón Nulo	0	0
3	Vigas	0.26	1.442	15	Vigas	0.26	1.442
4	Vigas	0.26	1.442	16	Vigas	0.26	1.442
5	Vigas	0.31	2.2	17	Vigas	0.26	1.442
6	Vigas	0.32	2.432	18	Mixto	0.11	1
7	Vigas	0.27	1.565	19	Mixto	0.11	1
8	Vigas	0.29	1.889	20	Vigas	0.25	1.244
9	Vigas	0.33	2.44	21	Mixto	0.23	1.072
10	Patrón Nulo	0	0	22	Vigas	0.26	1.415
11	Vigas	0.27	1.565	23	Vigas	0.28	1.566
12	Vigas	0.26	1.442	24	Columnas	0.22	1



Figura 11. *Mecanismos de Falla en vigas*

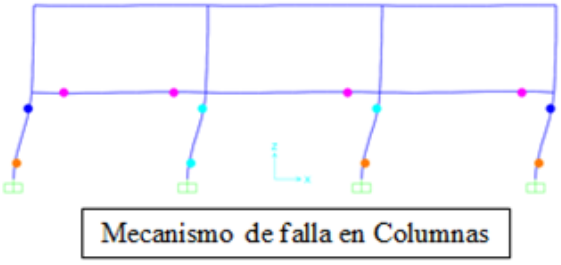


Figura 12. *Mecanismos de Falla de Columna.*

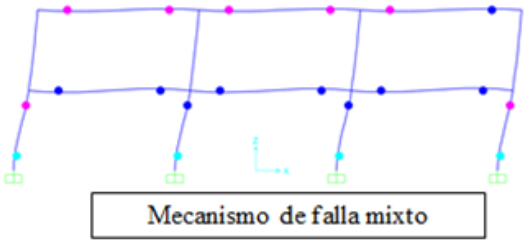


Figura 13. *Mecanismos de Falla Mixto.*

Para el caso de Edificios Altos, se toman como ejemplo los resultados en estructuras de dieciséis niveles, se puede apreciar en la Figura 14, 15 y 16, 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.

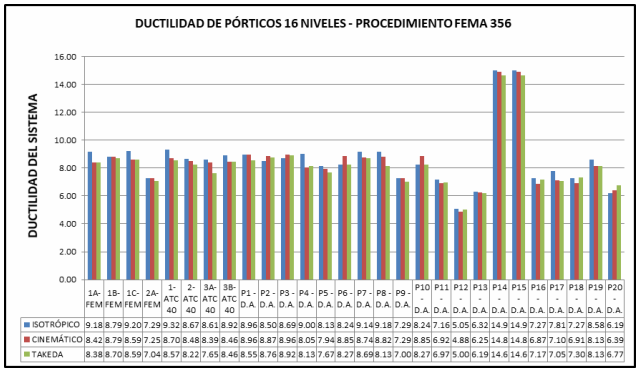


Figura 14. *Resultados por tipo de rotula plástica para cada modelo histerético en estructura de 16 niveles, procedimiento FEMA 356. Fuente: Elaboración propia.*

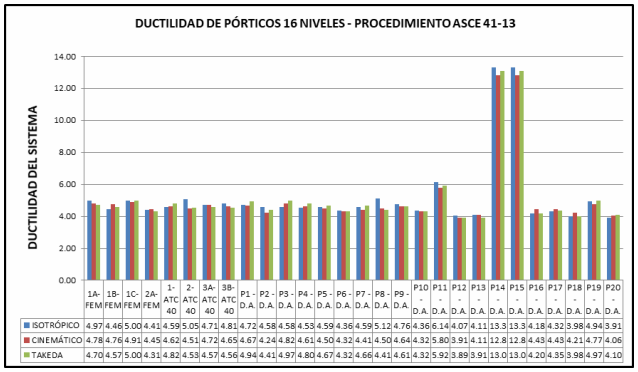


Figura 15. *Resultados por tipo de rotula plástica para cada modelo histerético en estructura de 16 niveles, procedimiento ASCE 41-13. Fuente: Elaboración propia.*

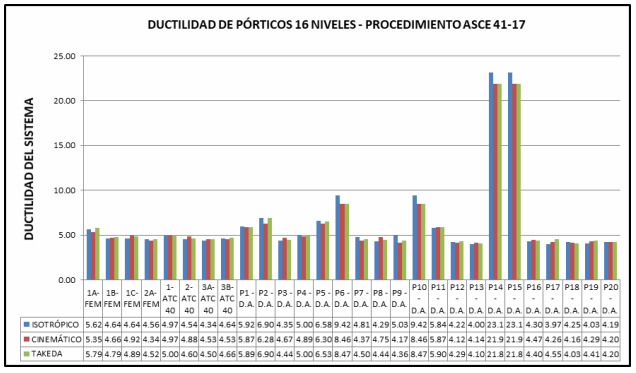


Figura 16. *Resultados por tipo de rotula plástica para cada modelo histerético en estructura de 16 niveles, procedimiento ASCE 41-17. Fuente: Elaboración propia.*

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 3.

En la Figura 17 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.

Tabla 3. *Mecanismos de falla para cada patrón de carga evaluado en estructuras de 16 niveles.*

PATRÓN DE CARGA	CURVA DE CAPACIDAD						PUNTO DE DESEMPEÑO		
	Δy (cm)	Vy (kg)	Δu (cm)	Vu (kg)	μ (Sistema)	Mecanismo de Falla	T (s)	μ (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	-

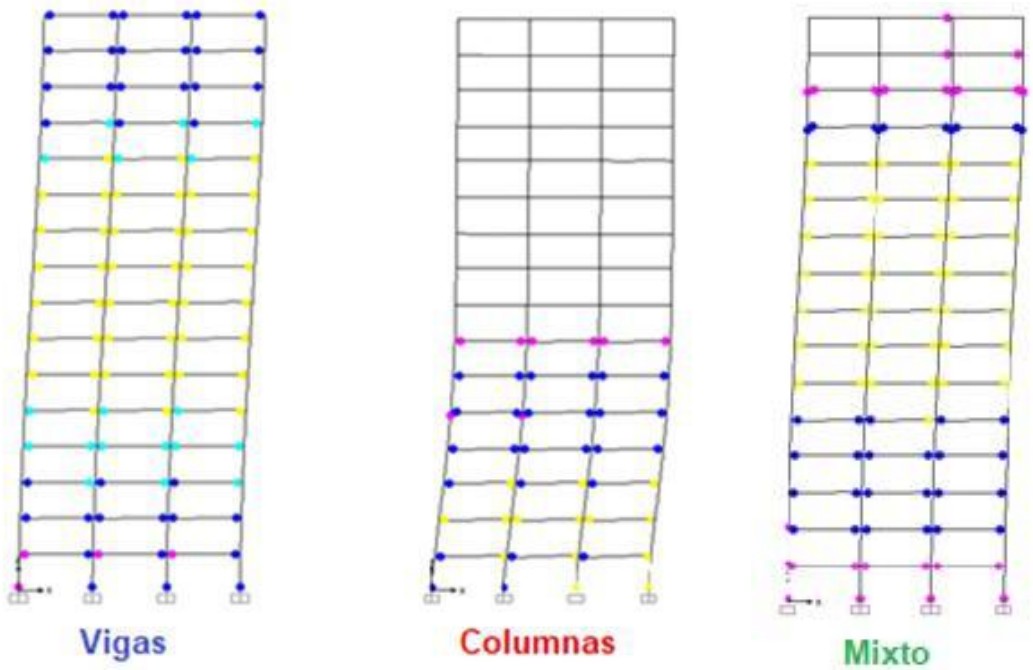


Figura 17. *Resultados mecanismo de fallo de rotula plástica para estructura de 16 niveles, procedimiento ASCE 41-13. Fuente: Elaboración propia.*

CONCLUSIONES

De un total de 1620 modelos se determinó que la respuesta estructural en estructuras regulares de altura baja, media y alta, en general para el procedimiento que hace uso de los diagramas Momento- Curvatura propios de cada elemento estructural considerando los tres ciclos de histéresis evaluados indica que se obtienen resultados similares, es decir, no es una variable influyente el ciclo de histéresis que se utilice en elementos que puedan realizar incursiones significativas y estables dentro del rango inelástico al hacer uso de este procedimiento.

En función de los patrones sugeridos por el código ATC 40 y FEMA 356, que los patrones que representan adecuadamente el comportamiento de estructuras regulares de baja altura son los siguientes: (X/H)2, (X/H)3, (X/H)0.5, Tan(πX/4H), (X/H)4, Sin(πX/2H), una combinación de patrón triangular y uniforme, ascendente en ese orden, mientras que para estructuras de mediana altura los patrones que representan adecuadamente son los siguientes: (X/H)0.5, Tan(πX/4H), Sin(πX/2H), combinación de patrón triangular y uniforme. En líneas generales, patrones que siguen una tendencia triangular ascendente. Destacando que en estructuras de mediana altura al hacer uso del modelo histerético de Takeda o Cinemático, los valores de ductilidad superan hasta en 35% la tendencia.

Los mecanismos de falla en estructuras regulares de baja y mediana altura, la tendencia indicó que el mecanismo es generado en vigas principalmente para la mayor cantidad de patrones evaluados, y que el punto de desempeño en estructuras de 2 niveles indicó que la estructura se encuentra holgada con una baja demanda de ductilidad, mientras que, para el resto las estructuras se encontraron medianamente ajustadas, con una demanda de ductilidad moderada.

En estructuras regulares de baja altura, sin importar el patrón de carga lateral, para un modelo histerético isotrópico los niveles de ductilidad alcanzados al hacer uso del procedimiento con los diagramas Momento-Curvatura propios de cada elemento estructural son mayores, pero al cambiar el modelo histerético el procedimiento ASCE alcanza niveles de ductilidad similares, por lo que se podría inferir que los niveles de rotación que plantea FEMA 356 para las rotulas plásticas de los elementos estructurales están por debajo de los niveles de rotación que puede desarrollar un elemento de gran ductilidad.

En estructuras regulares de mediana altura, sin importar el patrón de carga lateral, para todos los procedimientos los niveles de ductilidad alcanzados son ligeramente similares, pero al cambiar el modelo histerético (Takeda o Cinemático) en el procedimiento ASCE se alcanzan niveles de ductilidad mayores, superando incluso al procedimiento que hace uso de los diagramas Momento-Curvatura propios de cada elemento estructural, lo cual evaluando lo sucedido en edificaciones de baja altura, se puede concluir que el procedimiento ASCE para edificaciones de mediana altura sugiere niveles de rotaciones que quizás no puedan llegar a desarrollarse debido a que la respuesta de la edificación y el desarrollo del mecanismo de falla no permite una redistribución del daño que permita generar grandes niveles de ductilidad, por lo que se considera que el procedimiento que hace uso de los diagramas Momento-Curvatura propios de cada elemento estructural es el procedimiento más ajustado en todos los casos.

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 comportamiento 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, Tan(πX/4H), Sen(πX/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

ASCE 41-13. 2014. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.

ASCE 41-17. 2017. Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia, USA.

ATC 40. 1996. The Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings. *Applied Technology Council. California, USA.*

FEMA 273. 1997. *NEHRP Guidelines For The Seismic Rehabilitation Of Buildings*. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C. USA.

FEMA 356. 2000. *Pre-Standard And Commentary For The Seismic Rehabilitation Of Buildings*. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C. USA.

FEMA 440. 2005. *Improvement Of Nonlinear Static Seismic Analysis Procedures*. Federal Emergency Management Agency. Washington D.C. USA.

Hui Wu. 2007. *Constitutive Model Of Concrete Confined By Advanced Fiber Composite Materials And Applications In Seismic Retrofitting*. Doctoral Thesis, University Of Southern California. California, USA.

Khoshnoudian, Mestri & Abedinik. 2011. *Proposal Of Lateral Load Pattern For Pushover Analysis Of RC Buildings*. Comp. Meth. Civil Eng., Vol. 2, 2. 169-183.