

## EVALUACION DE PATRONES DE CARGA DE ANALISIS NO LINEAL ESTATICO INCREMENTAL EN PORTICOS DE CONCRETO ARMADO DE ESTRUCTURAS REGULARES DE BAJA Y MEDIANA ALTURA

Idrees Rustom, Ahmad<sup>1</sup>; Torres, Ronald<sup>2</sup>; Nuñez, Eduardo<sup>3</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

<sup>3</sup> University Austral of Chile

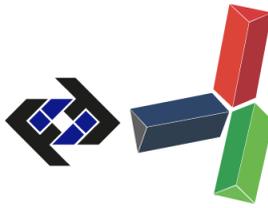
### RESUMEN

Los códigos de diseño cambian y mejoran en función a 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 baja y mediana 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

The design codes change and improve in function 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, in some way 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 and medium height, indicate that the lateral load pattern and the hysteretic model adopted influence the levels of ductility achieved.

*Keywords: Non-linear analysis, Pushover, Earthquake resistance, Structural analysis*

## 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.

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 cuatro edificaciones regulares de 2, 4, 8 y 12 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.

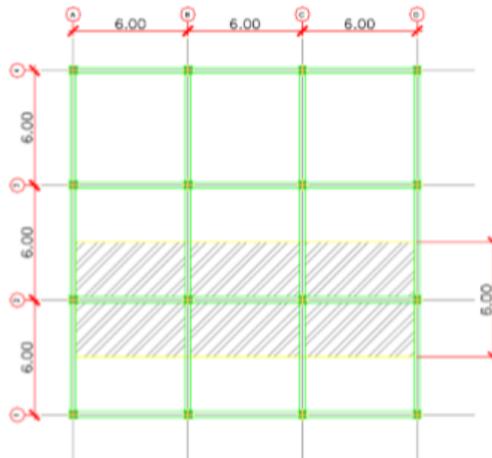


Figura 1. Vista en planta de la edificación y pórtico de diseño.

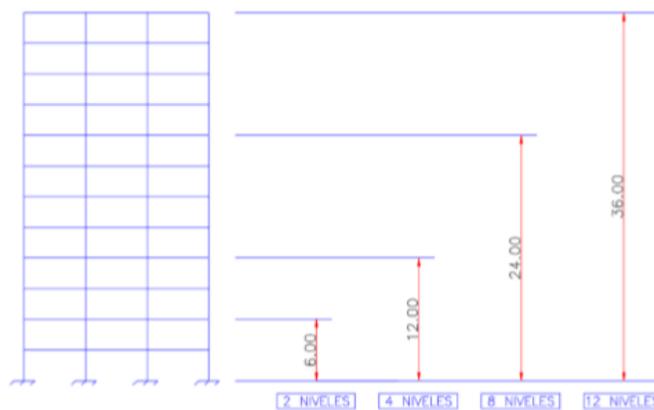


Figura 2. Elevación de pórticos para diferentes alturas.

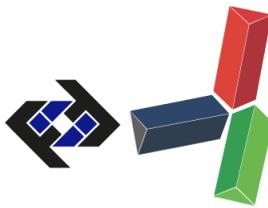


Tabla 1. Dimensiones de elementos estructurales.

EDIFICACIÓN	NIVELES	DIMENSION DE COLUMNA	DIMENSION DE VIGA
2 NIVELES	1 - 2	50 x 50 cm	40 x 60 cm
4 NIVELES	1 - 4	60 x 60 cm	40 x 60 cm
8 NIVELES	5 - 8	70 x 70 cm	40 x 60 cm
	1 - 4	80 x 80 cm	40 x 60 cm
12 NIVELES	9 - 12	70 x 70 cm	40 x 60 cm
	5 - 8	80 x 80 cm	40 x 60 cm
	1 - 4	90 x 90 cm	40 x 60 cm

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 y ASCE 41-13, 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 41-13.

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 históricos 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.

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.

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 tal como sigue:

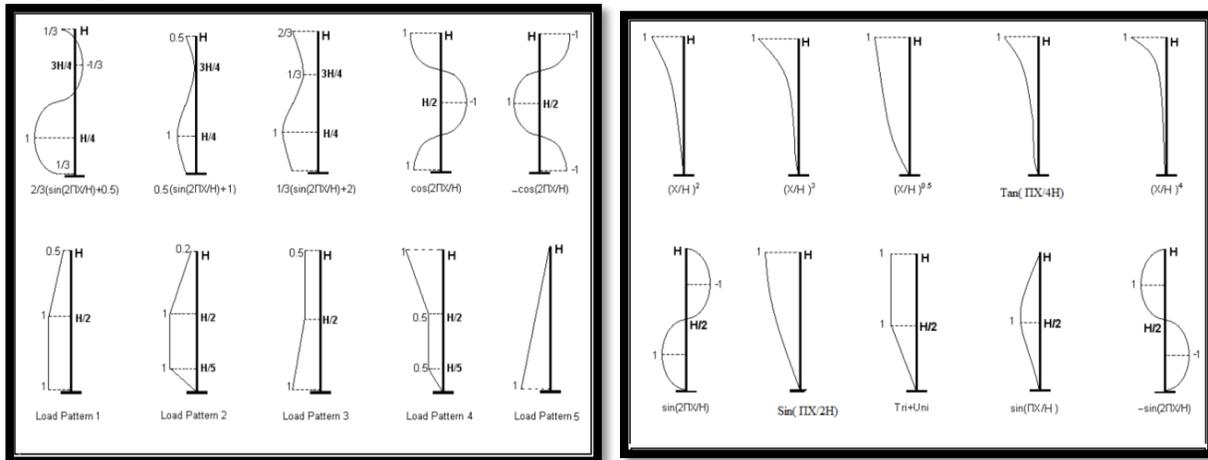


Figura 3. Propuestas de patrones de carga lateral.

## 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 estructural 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 4, 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.

En la figura 5, 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 41-13 y haciendo uso de los diagramas Momento-Curvatura propios de cada elemento estructural.

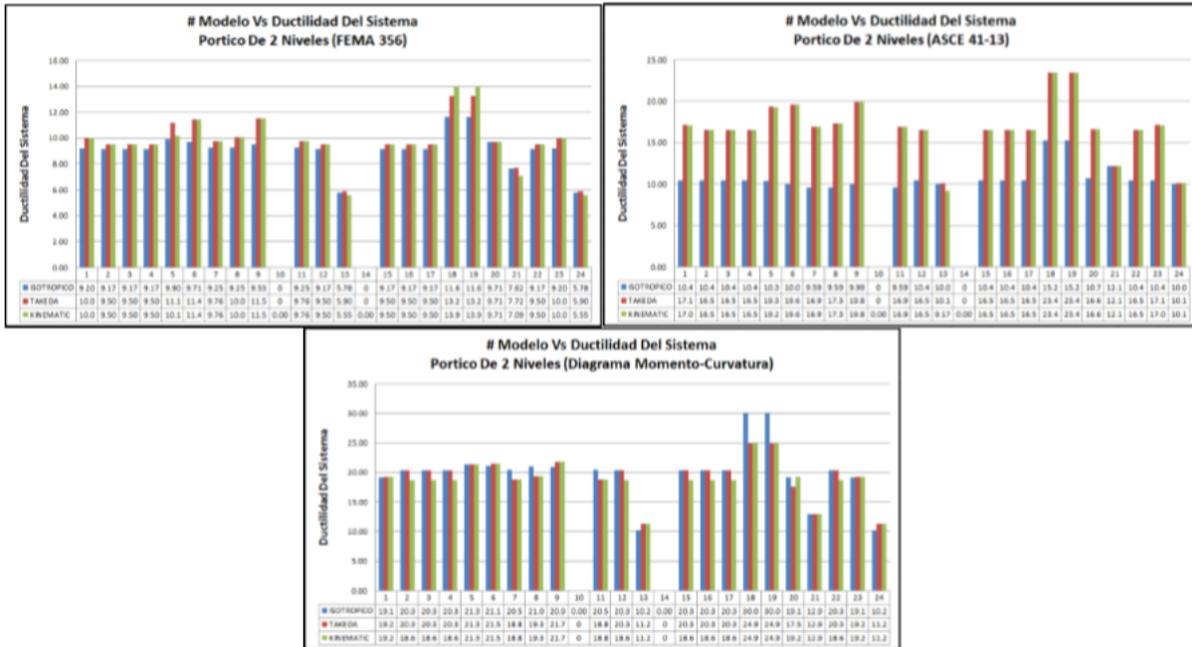
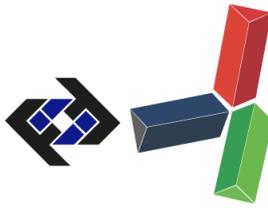


Figura 4. Resultados por tipo de rotula plástica para cada modelo histérico en estructura de dos niveles.

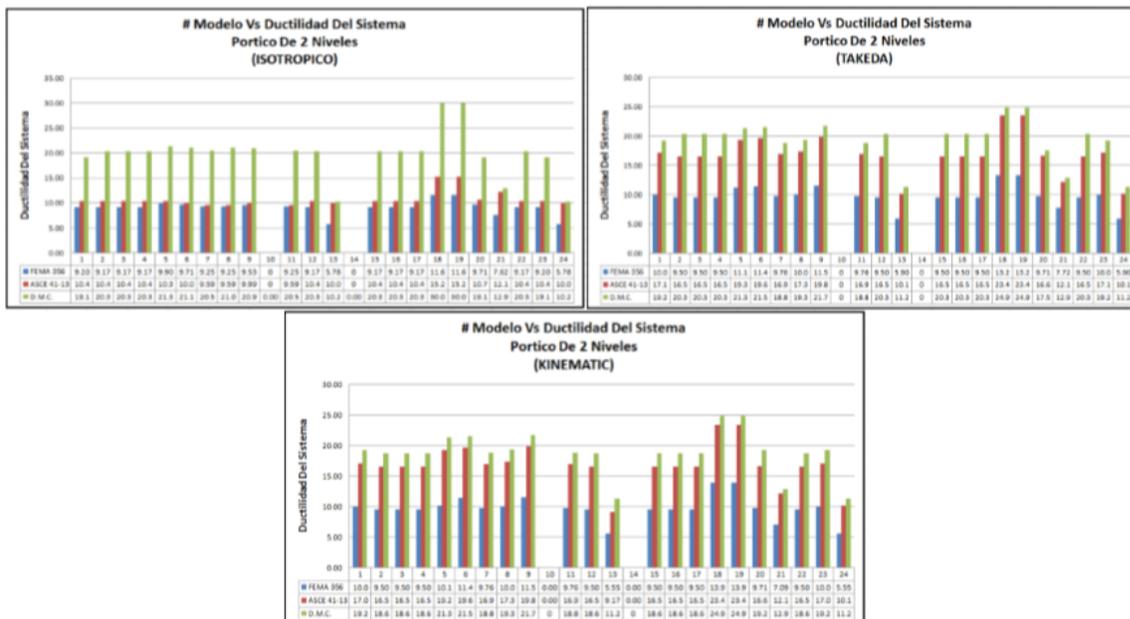


Figura 5. Análisis comparativo por tipo de rotula plástica para cada modelo histérico en estructura de dos niveles.

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.

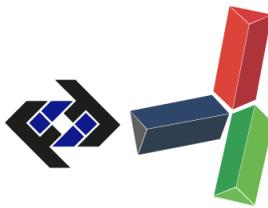


Tabla 2. Mecanismos de falla para cada patrón de carga evaluado en estructuras de 2 niveles

# 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

## CONCLUSIONES

De un total de 864 modelos se determinó que la respuesta estructural en estructuras regulares de baja y mediana altura 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:  $(X/H)_2$ ,  $(X/H)_3$ ,  $(X/H)_{0.5}$ ,  $\tan(\pi X/4H)$ ,  $(X/H)_4$ ,  $\sin(\pi X/2H)$ , 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:  $(X/H)_{0.5}$ ,  $\tan(\pi X/4H)$ ,  $\sin(\pi X/2H)$ , 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.

## 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] 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.
- [6] Khoshnoudian, Mestri & Abedinik. (2011). Proposal Of Lateral Load Pattern For Pushover Analysis Of RC Buildings. Comp. Meth. Civil Eng., Vol. 2, 2. 169-183.