

Nonlinear seismic analysis of concrete buildings considering different models of plastic hinges

López-López, Andrés¹; Tomás, Antonio²

ABSTRACT

Pushover analysis is one of the most frequently used methods for the seismic analysis of structures. The accurate modelling of the plastic hinges generated during the pushover analysis is crucial. The response curve of plastic hinges can be defined with empirical expressions that obtain the yielding and ultimate states of the cross-sections.

The main objective of this work is to study the influence of different plastic hinge models on the structural nonlinear behaviour. Several pushover analyses have been executed with the software ETABS[®], considering the following plastic hinge models: (i) the model of FEMA-356 included in ETABS[®], and (ii) a model proposed by the authors using empirical expressions calibrated with a database of tests.

The results obtained show that the empirical expressions can be used by structural engineers to model plastic hinges in concrete structures with a theoretical response closer to the real one.

Keywords: nonlinear seismic analysis, concrete buildings, plastic hinge models, calibrated expressions

1. INTRODUCCIÓN

La predicción y simulación del comportamiento sísmico de estructuras mediante modelos numéricos ha sido un campo de investigación de interés en los últimos años, debido a la importancia de conocer de forma precisa los efectos y consecuencias provocados por la acción sísmica en las estructuras.

El análisis sísmico de estructuras se puede realizar siguiendo diferentes procedimientos, dependiendo de la precisión a alcanzar en los resultados. El análisis estático no lineal o *pushover* constituye uno de los métodos empleados con mayor frecuencia por el ingeniero estructural, debido a su relativa simplicidad y a las prescripciones dispuestas en la normativa de diseño para su implementación. Este tipo de análisis proporciona información relevante desde el punto de vista sísmico, como es la capacidad resistente y de deformación de la estructura. El análisis *pushover* se puede implementar siguiendo diferentes estrategias, como el *modal pushover* [1], el *consecutive modal pushover* [2], el *upper bound pushover* [3], el *mass proportional pushover* [4] y el *adaptive pushover* [5]. Concretamente, en este trabajo se ha implementado la estrategia convencional [6].

El adecuado conocimiento del comportamiento seccional de los elementos estructurales en los estados de plastificación y último es necesario para caracterizar las rótulas plásticas que se generan durante el

¹ Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Cartagena (ESPAÑA). atl10@alu.upct.es

² Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Cartagena (ESPAÑA). antonio.tomas@upct.es
(Corresponding author)

análisis no lineal. Así, conceptos como el momento de plastificación M_y , el giro de plastificación ϑ_y y el giro último ϑ_u de la sección se emplean para modelizar las curvas de respuesta momento-giro que definen el comportamiento de las rótulas plásticas durante el análisis.

En el análisis sísmico resulta conveniente el uso de expresiones empíricas capaces de reproducir los estados de plastificación y último de la sección de un elemento estructural [7, 8, 9]. Estas expresiones resultan eficientes desde el punto de vista computacional y presentan una adecuada precisión, debido a su relativa simplicidad y al hecho de estar calibradas con ensayos experimentales.

El principal objetivo de este trabajo es estudiar la influencia del tipo de rótula plástica en el comportamiento no lineal de la estructura. Para ello, se han implementado varios análisis *pushover* de dos estructuras de hormigón armado, considerando los siguientes tipos de rótulas plásticas:

- Rótulas plásticas incluidas en el *software* ETABS® por defecto [10, 11]
- Rótulas plásticas caracterizadas con las expresiones empíricas de Biskinis y Fardis [8, 9]
- Rótulas plásticas propuestas en [12], modelizadas mediante expresiones calibradas con una selección de ensayos

En el análisis *pushover*, resulta importante el estudio de los puntos de plastificación global y de colapso de la estructura, los cuales proporcionan información acerca de su ductilidad. Por tanto, se han obtenido algunos conceptos para dichos puntos, como el desplazamiento del nudo de control de la estructura, el esfuerzo cortante en la base y la aceleración del sistema equivalente de un grado de libertad. Adicionalmente, se han obtenido las curvas de capacidad de la estructura. Finalmente, se han contrastado los resultados obtenidos con los diferentes tipos de rótulas plásticas, estableciéndose ciertas conclusiones acerca de su validez para la realización de análisis *pushover*.

2. EXPRESIONES DE COMPORTAMIENTO SECCIONAL

Existen diversas expresiones empíricas capaces de proporcionar conceptos relativos a los estados de plastificación y último de secciones de hormigón armado a partir de su geometría, configuración de armadura y resistencia de los materiales. Algunos ejemplos los constituyen las expresiones de Panagiotakos y Fardis [7] para obtener el momento de plastificación M_y , el giro de plastificación ϑ_y y el giro último ϑ_u , calibradas con una base de datos de más de 1000 ensayos, compuesta por vigas, pilares y muros de cortante; las expresiones de Biskinis y Fardis [8, 9], calibradas con una base de ensayos correspondientes a elementos de nueva ejecución y rehabilitados; y las expresiones propuestas por el EC-8 [13] para determinar los giros de plastificación y último de la sección.

Los autores han propuesto otras expresiones capaces de determinar M_y , ϑ_y y ϑ_u [12]. Estas expresiones se han obtenido calibrando las ecuaciones de Biskinis y Fardis [8, 9] con una selección de ensayos correspondientes a vigas y pilares de hormigón armado con sección rectangular, realizada a partir de la base de datos disponible en [7]. Para confeccionar la selección se impusieron sobre la base de datos inicial las prescripciones sísmico-constructivas establecidas por los principales códigos de diseño, es decir, la instrucción EHE-08 [14], la norma NCSE-02 [15], los eurocódigos EC-2 [16] y EC-8 [17] y el código ACI-318-08 [18]. Las expresiones calibradas con la selección de ensayos son aplicables, por tanto, a

elementos estructurales empleados en edificios habituales de hormigón armado situados en zonas sísmicas.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS ESTRUCTURAS ANALIZADAS Y PARTICULARIDADES DEL ANÁLISIS PUSHOVER

Los alzados de las estructuras utilizadas en los análisis se muestran en la Fig. 1. Se trata de dos pórticos planos de hormigón armado de 5 y 8 plantas, presentando ambos pórticos tres vanos de 5 m de longitud y una altura de planta de 3 m.

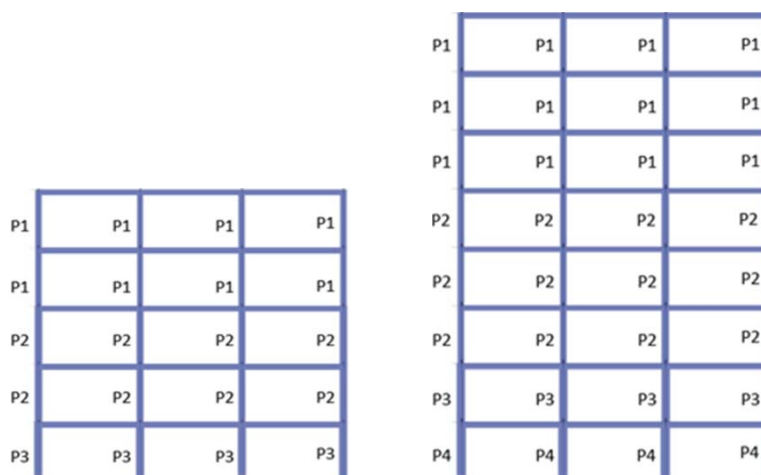


Figura 1. Alzado de los pórticos analizados.

Las Fig. 2 y 3 muestran la geometría y la configuración de armadura de las secciones de las vigas y los pilares de los pórticos mostrados en la Fig. 1. Las vigas son planas y los pilares presentan una sección cuadrada. El hormigón considerado es HA-25 y el acero de las armaduras es B 500 SD.

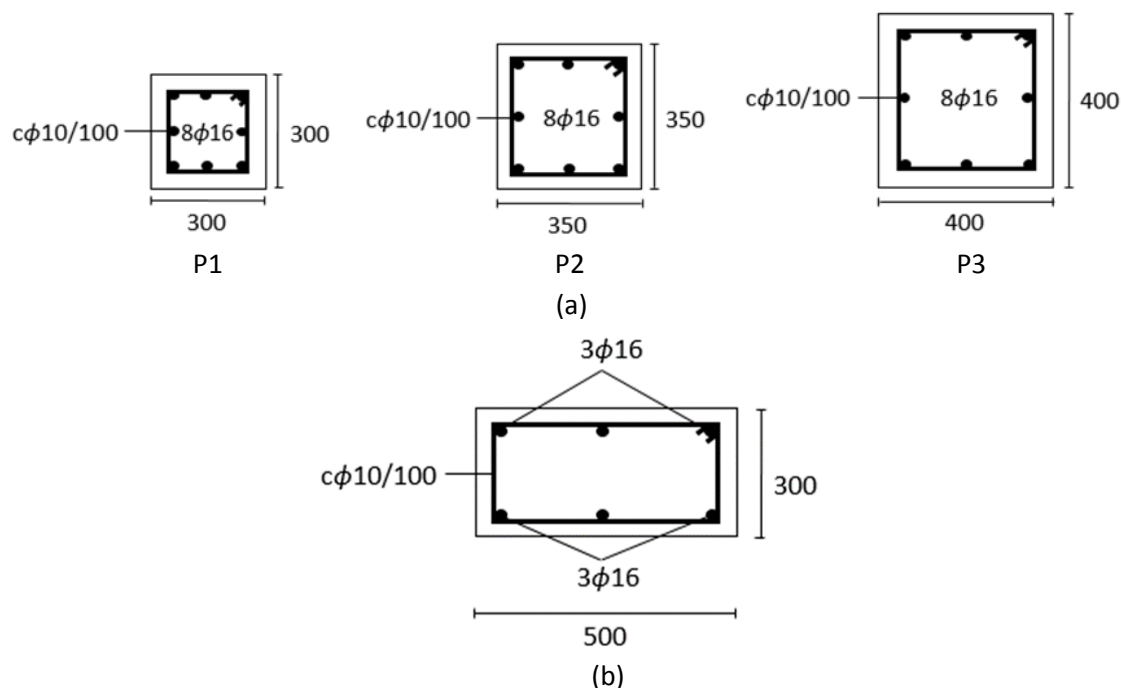


Figura 2. Secciones transversales del pórtico de 5 plantas. (a) Pilares. (b). Vigas.

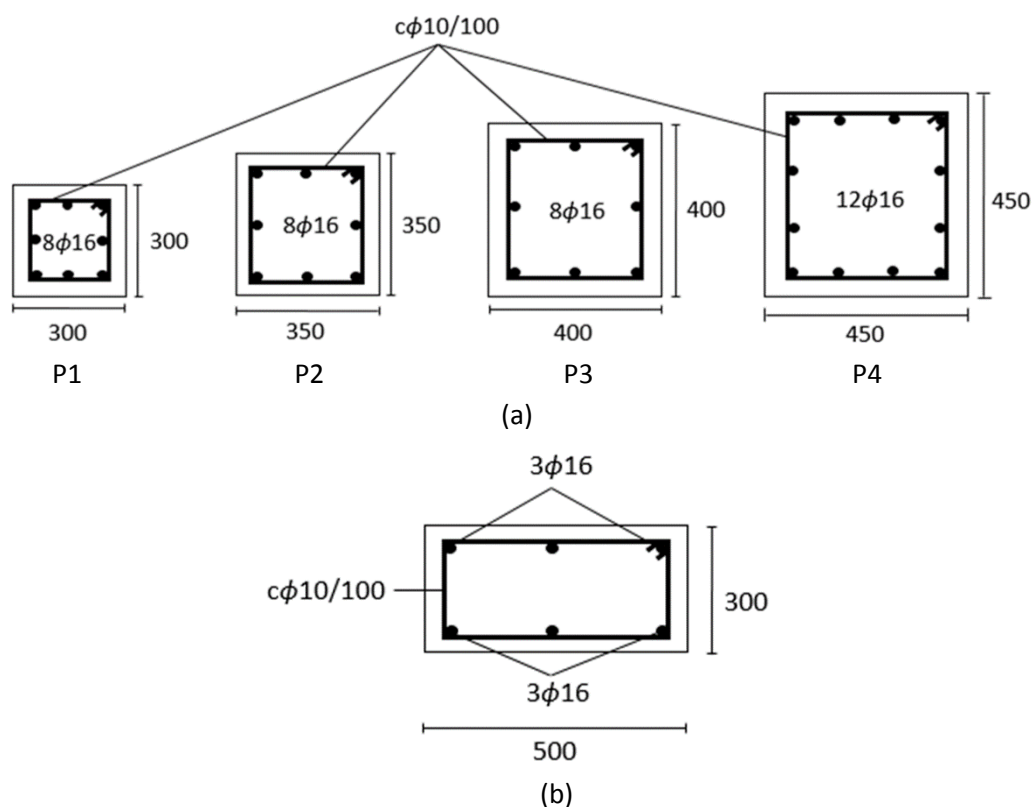


Figura 3. Secciones transversales del pórtico de 8 plantas. (a) Pilares. (b) Vigas.

De acuerdo con lo dispuesto en el EC-8, en todos los análisis realizados se han considerado dos distribuciones de carga lateral: (i) una distribución uniforme, constituida por fuerzas laterales proporcionales a las masas de las plantas con independencia de su altura, y (ii) una distribución modal que considera los desplazamientos horizontales de las plantas de la estructura en el modo fundamental de vibración.

Los análisis *pushover* se han realizado mediante el *software* ETABS® [10]. Se han considerado rótulas plásticas tipo *lumped*, de dimensión nula, cuya localización debe definirse previamente a la realización del análisis. Concretamente, se ha dispuesto que las rótulas se generen únicamente en los extremos de las vigas y los pilares.

Las rótulas plásticas presentan curvas de respuesta momento-giro definidas por control de deformación. Las curvas de respuesta consideradas varían en función del tipo de rótula plástica empleada en el análisis. Así, las rótulas plásticas incluidas en ETABS® por defecto presentan como curva de respuesta la mostrada en la Fig. 4, definida en la FEMA [11], mientras que las curvas de respuesta modeladas mediante las expresiones de Biskinis y Fardis [8, 9] y las expresiones calibradas [12] son de tipo elastoplástico.

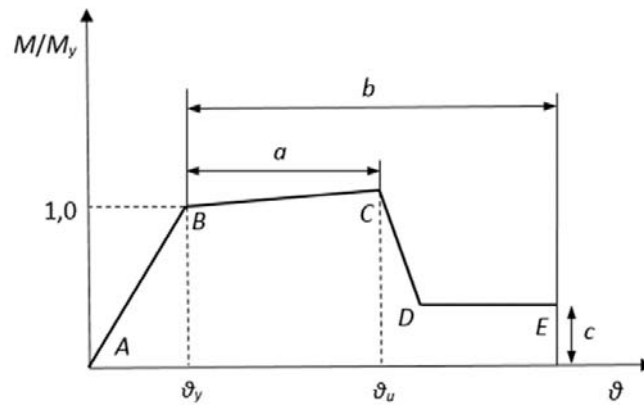


Figura 4. Curva de respuesta momento-giro para rótulas plásticas de hormigón armado, FEMA [11].

4. CURVAS DE RESPUESTA Y DE PLASTIFICACIÓN

Las Fig. 5 y 6 muestran las curvas de respuesta obtenidas mediante diferentes métodos para las vigas y los pilares de los pórticos analizados. La expresión calibrada [12] ofrece unos valores de momento de plastificación M_y superiores a los obtenidos con la expresión de Biskinis y Fardis [8] y lo que ETABS® proporciona por defecto [11]. Las curvas de respuesta modelizadas con la expresión calibrada [12] ofrecen una capacidad de deformación intermedia a las proporcionadas por los otros dos métodos.

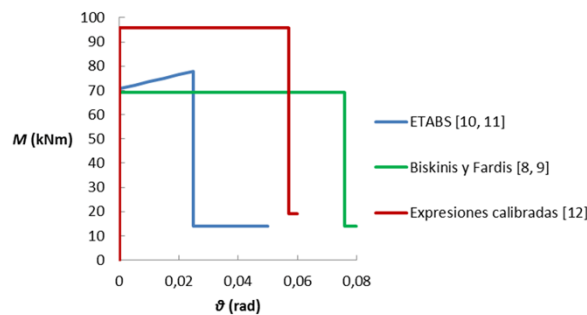
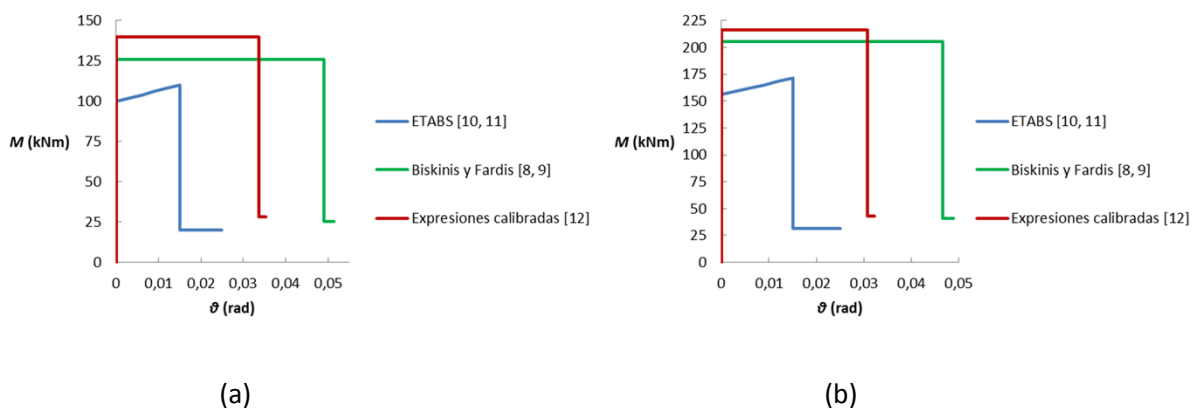


Figura 5. Curvas de respuesta momento-giro de las rótulas plásticas generadas en las vigas.



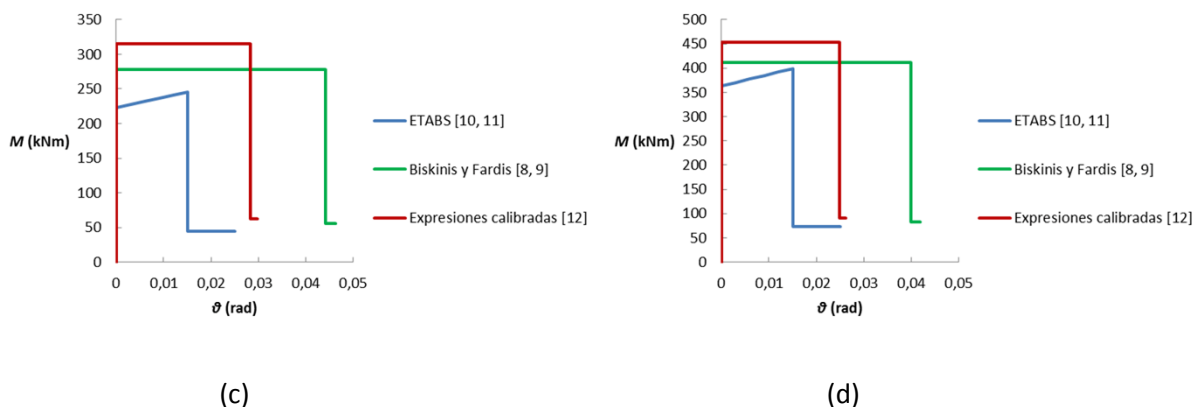


Figura 6. Curvas de respuesta momento-giro de las rótulas plásticas generadas en los pilares. (a) P1. (b) P2. (c) P3. (d) P4.

A diferencia de otros estudios como el especificado en [19], en este trabajo se han definido curvas de plastificación esfuerzo axil-momento de plastificación para considerar la influencia del esfuerzo axil N en la obtención del momento de plastificación de la sección de los pilares a lo largo del análisis *pushover*.

La Fig. 7 muestra las curvas de plastificación de los pilares de los pórticos analizados, obtenidas mediante diferentes métodos. Las curvas obtenidas con la expresión calibrada [12] presentan los máximos valores de M_y . Resulta necesario destacar que las curvas obtenidas con la expresión de Biskinis y Fardis [8] presentan valores superiores de M_y a partir de ciertos valores de esfuerzo axil.

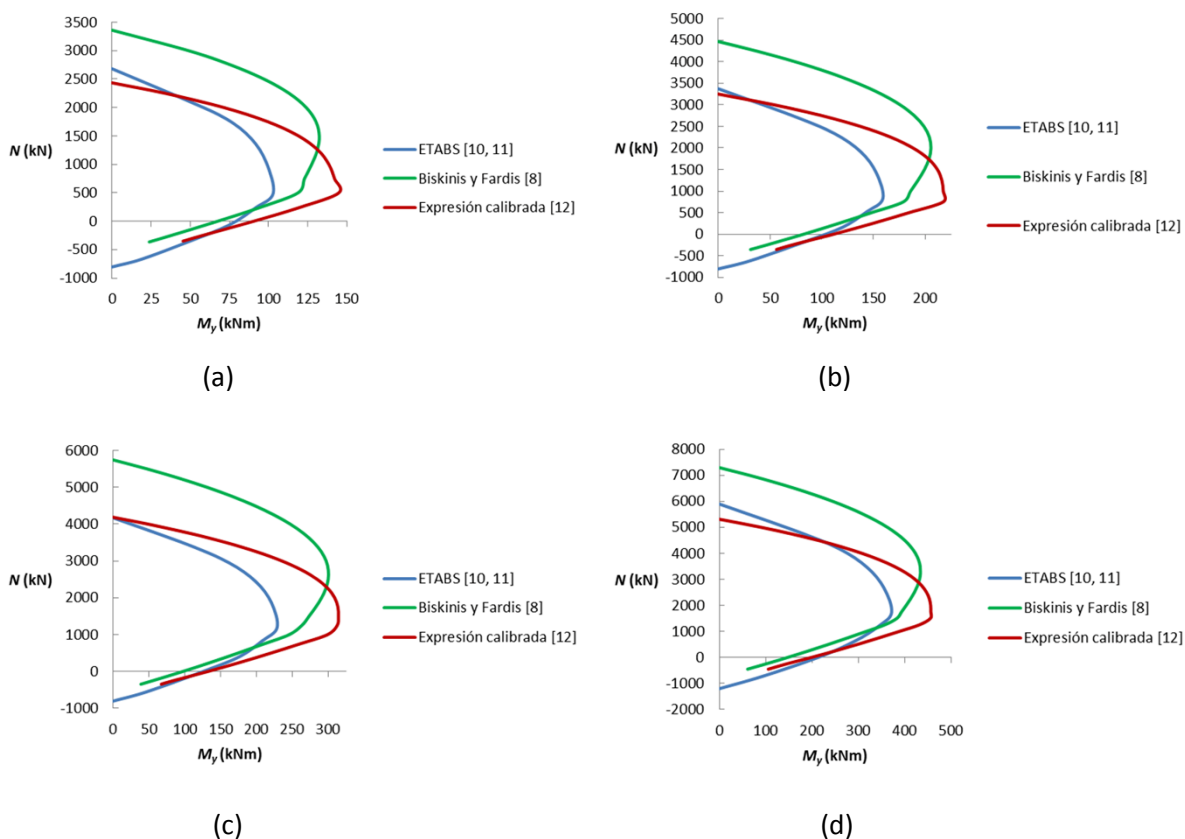


Figura 7. Curvas de plastificación en los pilares. (a) P1. (b) P2. (c) P3. (d) P4.

5. CURVAS DE CAPACIDAD DE LA ESTRUCTURA

Las Fig. 8 y 9 muestran las curvas de capacidad de los pórticos analizados empleando rótulas plásticas modelizadas mediante diferentes métodos para los casos de carga lateral uniforme y modal. En todos los casos analizados se deduce que las rótulas plásticas empleadas en ETABS® por defecto [11] y las modelizadas con las expresiones de Biskinis y Fardis [8, 9] proporcionan valores similares del esfuerzo cortante en la base F_b para desplazamientos del nudo de control δ de hasta 250 mm.

Resulta necesario destacar la relación existente entre F_b y el momento de plastificación M_y de las rótulas plásticas, aumentando el valor de F_b con los valores de M_y . Este aspecto justifica que los máximos valores de F_b se alcancen al considerar las rótulas plásticas modelizadas mediante las expresiones calibradas [12], pues, de acuerdo con las Fig. 5 y 6, éstas presentan los mayores valores de M_y . Otro aspecto relevante lo constituye el hecho de que las curvas de capacidad obtenidas al aplicar las expresiones calibradas [12] y las ecuaciones de Biskinis y Fardis [8, 9] se cruzan para un cierto valor de δ , ya que, de acuerdo con la Fig. 7, dichas expresiones pueden adoptar el mismo valor de M_y y, en consecuencia, de F_b .

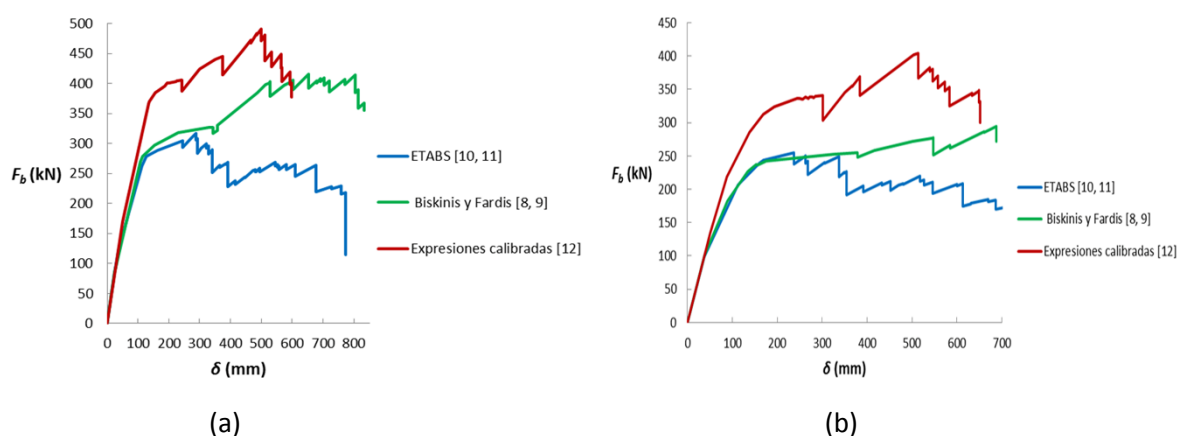


Figura 8. Curvas de capacidad del pórtico de 5 plantas. (a) Carga lateral uniforme. (b) Carga lateral modal.

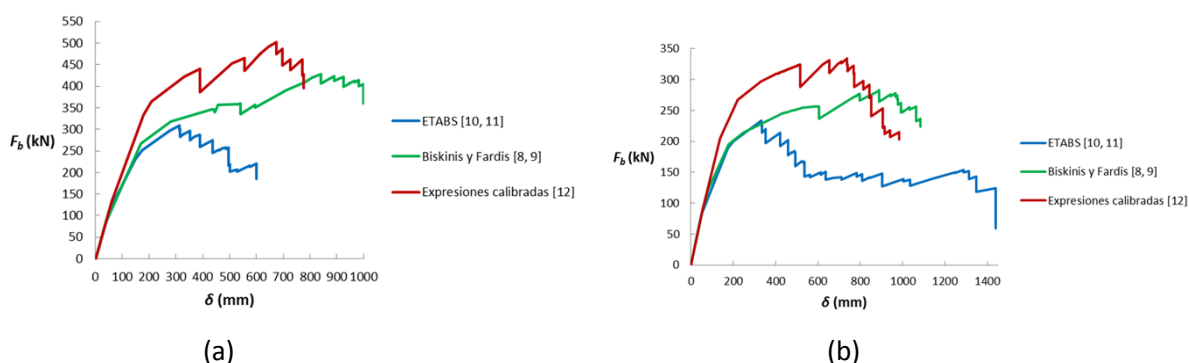


Figura 9. Curvas de capacidad del pórtico de 8 plantas. (a) Carga lateral uniforme. (b) Carga lateral modal.

6. RESULTADOS EN EL PUNTO DE PLASTIFICACIÓN Y COLAPSO DE LA ESTRUCTURA

Algunos autores definen la plastificación global de la estructura como el punto de la curva de capacidad en el que la estructura deja de comportarse de forma elástica y lineal [19]. Las *Tablas 1 y 2* muestran los valores obtenidos para el desplazamiento del nudo de control δ , el esfuerzo cortante en la base F_b y la aceleración S_a/g del sistema equivalente de un grado de libertad en el punto de plastificación global de las estructuras analizadas. Para obtener el valor de S_a/g , resulta necesario transformar la curva de capacidad $F_b - \delta$ en el espectro de capacidad en formato aceleración-desplazamiento ($S_a - S_d'$) para el sistema equivalente de un grado de libertad, aplicándose las ecuaciones propuestas en [20].

Las rótulas plásticas modelizadas con las expresiones calibradas [12] proporcionan los mayores valores de δ , F_b y S_a/g para todos los casos analizados, debido a que dichas expresiones ofrecen los mayores valores de M_y . Las diferencias están comprendidas entre el 7 y el 25 % para δ y el 10 y el 45 % para F_b , obteniéndose valores superiores hasta un 58 % en S_a/g . Al analizar las diferencias en δ respecto a lo obtenido con otros métodos, las expresiones calibradas [12] proporcionan mayores diferencias al aumentar la altura de la estructura analizada y al considerar el patrón de cargas laterales modales.

Tabla 1. Resultados en el punto de plastificación global del pórtico de 5 plantas

Tipo de rótula plástica	Cargas uniformes			Cargas modales		
	δ (mm)	F_b (kN)	S_a/g	δ (mm)	F_b (kN)	S_a/g
ETABS® [10, 11]	128	278	0,197	169	243	0,189
Biskinis y Fardis [8, 9]	116	279	0,204	176	243	0,186
Expresiones calibradas [12]	138	370	0,282	194	324	0,250

Tabla 2. Resultados en el punto de plastificación global del pórtico de 8 plantas

Tipo de rótula plástica	Cargas uniformes			Cargas modales		
	δ (mm)	F_b (kN)	S_a/g	δ (mm)	F_b (kN)	S_a/g
ETABS® [10, 11]	175	251	0,109	175	189	0,093
Biskinis y Fardis [8, 9]	169	267	0,118	179	195	0,108
Expresiones calibradas [12]	210	364	0,172	220	267	0,127

Resulta de interés la obtención de ciertos parámetros en el punto de colapso de la estructura. El concepto de colapso resulta subjetivo, siendo en ocasiones un aspecto a considerar en función del nivel de seguridad que se quiera adoptar para la estructura. Así, algunos autores suponen el colapso de la estructura al producirse en la curva de capacidad una disminución del 20 % en F_b [19]. Otros consideran que se produce la rotura de la sección transversal de un elemento al registrarse una reducción del 15 % en la carga lateral aplicada en el ensayo [7]. En este estudio se ha considerado que se produce el colapso de las estructuras al tener lugar el primer descenso mayor o igual del 15 % en F_b .

Las *Tablas 3 y 4* muestran los resultados obtenidos en el punto de colapso de los pórticos analizados. Si se analiza la influencia de la altura de la estructura, la mayor flexibilidad de los pórticos de ocho plantas propicia generalmente la obtención de valores superiores de δ e inferiores para F_b y S_a/g . Las

expresiones de Biskinis y Fardis [8, 9] obtienen los mayores valores de δ , llegando a proporcionar el doble de lo obtenido por ETABS® [10, 11]. Estas expresiones presentan además los menores porcentajes de disminución de F_b para el punto de colapso, habiéndose considerado como excepción valores inferiores al 15 %. Las expresiones calibradas propuestas [12] proporcionan los mayores valores de F_b , obteniéndose diferencias de hasta el 79 % respecto a lo ofrecido por otros métodos. En lo que respecta a S_a/g , las expresiones calibradas propuestas obtienen valores superiores hasta un 95 % a los ofrecidos por otros métodos.

Tabla 3. Resultados en el punto de colapso del pórtico de 5 plantas

Tipo de rótula plástica	Cargas uniformes				Cargas modales			
	δ	F_b	S_a/g	Disminución	δ	F_b	S_a/g	Disminución
	(mm)	(kN)		de F_b	(mm)	(kN)		de F_b
ETABS® [10, 11]	391	269	0,217	15	354	226	0,153	15
Biskinis y Fardis [8, 9]	805	414	0,308	15	547	277	0,212	10
Expresiones calibradas [12]	565	449	0,345	16	545	380	0,299	15

Tabla 4. Resultados en el punto de colapso del pórtico de 8 plantas

Tipo de rótula plástica	Cargas uniformes				Cargas modales			
	δ	F_b	S_a/g	Disminución	δ	F_b	S_a/g	Disminución
	(mm)	(kN)		de F_b	(mm)	(kN)		de F_b
ETABS® [10, 11]	496	258	0,125	22	537	167	0,074	14
Biskinis y Fardis [8, 9]	998	405	0,216	13	967	278	0,144	11
Expresiones calibradas [12]	773	462	0,242	15	843	291	0,138	15

7. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha estudiado la influencia del tipo de rótula plástica en el comportamiento no lineal de dos pórticos planos de hormigón armado. Para ello se ha realizado una serie de análisis *pushover* empleando rótulas plásticas modelizadas mediante diferentes procedimientos, entre los que se incluye la utilización de diversas expresiones empíricas de comportamiento seccional, capaces de ofrecer conceptos relativos a los estados de plastificación y último de la sección.

La mayor capacidad resistente y de deformación de la sección ofrecida por las expresiones calibradas propuestas [12] respecto a lo modelizado en ETABS® [10, 11] justifica la obtención de valores superiores en F_b y δ , aspecto que implica una mayor resistencia y capacidad de deformación a nivel estructural. Sin embargo, los valores superiores obtenidos para S_a/g implican la introducción de esfuerzos superiores en la estructura.

Estas circunstancias pueden hacer plantearse al ingeniero estructural el método de modelización de rótulas plásticas a introducir en un código comercial de cálculo para la realización de análisis *pushover*, pudiendo comprobarse si lo que el código considera por defecto conduce a resultados excesivamente conservadores. Dicha comprobación resulta tanto más interesante cuanto mayor es la altura de la estructura, aspecto que incrementa las diferencias obtenidas entre los distintos métodos de modelización de rótulas.

El hecho de que las expresiones propuestas en [12] estén calibradas con una selección de ensayos que cumple las prescripciones sísmico-constructivas de los principales códigos nacionales e internacionales, hace que las rótulas modelizadas con dichas expresiones tengan un mayor campo de aplicación que las rótulas ofrecidas en un código comercial de cálculo por defecto, las cuales pueden estar caracterizadas mediante valores correspondientes a elementos de hormigón armado empleados en un país determinado, o grupo de países que emplean una normativa concreta.

Por otro lado, la mayor homogeneidad de la selección de ensayos con la que se calibraron las expresiones propuestas en [12] respecto a la base de datos con la que se calibraron las ecuaciones de Biskinis y Fardis [8, 9], hace que dichas expresiones resulten más apropiadas para la modelización de rótulas plásticas en estructuras convencionales.

8. REFERENCIAS

- [1] Chopra, A.K., Goel, R.K. (2002). A modal pushover analysis procedure for estimating seismic demands for buildings. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(3), 561-582.
- [2] Poursha, M., Khoshnoudian, F., & Moghadam, A.S. (2009). A consecutive modal pushover procedure for estimating the seismic demands of tall buildings. *Engineering Structures*, 31(2), 591-599.
- [3] Jan, T.S., Liu, M.W., & Kao, Y.C. (2004). An upper-bound pushover analysis procedure for estimating seismic demands of high-rise buildings. *Engineering Structures*, 26(1), 117-128.
- [4] Kim, S.P., Kurama, Y.C. (2008). An alternative pushover analysis procedure to estimate seismic displacement demands. *Engineering Structures*, 30(12), 3793-3807.
- [5] Aydinoglu, M.N. (2003). An incremental response spectrum analysis procedure based on inelastic spectral displacements for multi-mode seismic performance evaluation. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1, 3-36.
- [6] Taghavipour, S., Majid, T.A. & Liang, L.T. (2013). Effect of different lateral load distribution on pushover analysis. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 7(4), 133-142.
- [7] Panagiotakos, T.B., Fardis, M.N. (2001). Deformations of reinforced concrete members at yielding and ultimate. *ACI Structural Journal*, 98(2), 135-148.
- [8] Biskinis, D., Fardis, M.N. (2010). Deformations at flexural yielding of members with continuous or lap-spliced bars. *Structural Concrete*, 11(3), 127-138.
- [9] Biskinis, D., Fardis, M.N. (2010). Flexure-controlled ultimate deformations of members with continuous or lap-spliced bars. *Structural Concrete*, 11(2), 93-108.
- [10] ETABS. (2013). [Software]. Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems. Berkeley: Computers & Structures, Inc.
- [11] Federal Emergency Management Agency. [FEMA]. (2000). Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. FEMA-356. Washington, D.C., USA: FEMA.
- [12] López-López, A.T, Tomás, A., & Sánchez-Olivares, G. (2015). Estimación del comportamiento de secciones de hormigón armado mediante calibración con ensayos experimentales. *Dyna*, 90(2), 210-218.
- [13] Comité Européen de Normalisation. [CEN]. (2005). EN 1998-3, Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 3: assessment and retrofitting of buildings. Brussels, Belgium: CEN.
- [14] Comisión Permanente del Hormigón. [CPH]. (2008). Instrucción de hormigón estructural: EHE-08. Madrid, España: Ministerio de Fomento.

- [15] Comisión Permanente de Normas Sismorresistentes. [CPNS]. (2002). Norma de construcción sismorresistente: NCSE-02. Parte general y edificación. Madrid, España: Ministerio de Fomento.
- [16] Comité Européen de Normalisation. [CEN]. (2004). EN 1992-1-1, Eurocode 2: design of concrete structures. Part 1-1: general rules and rules for buildings. Brussels, Belgium: CEN.
- [17] Comité Européen de Normalisation. [CEN]. (2004). EN 1998-1, Eurocode 8: design of structures for earthquake resistance. Part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. Brussels, Belgium: CEN.
- [18] ACI Committee 318 [ACI]. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary (318R-08). USA: ACI.
- [19] Inel, M., Ozmen, H.B. (2006). Effects of plastic hinge properties in nonlinear analysis of reinforced concrete buildings. *Engineering Structures*, 28(11), 1494-1502.
- [20] Applied Technology Council [ATC]. (1996). Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings. ATC-40. California, USA: ATC.