

El efecto P-delta y su influencia sobre la ductilidad de las estructuras metálicas del Ecuador

Juan C. Vielma P.¹, Manuel A. Cando L.²

¹ Departamento de Ingeniería Estructural, Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado Barquisimeto, Venezuela.

² Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador.

Autores para correspondencia: jcvielma@ucla.edu.ve, jcvielma@espe.edu.ec

Fecha de recepción: 21 de septiembre de 2014 - Fecha de aceptación: 20 de octubre de 2014

RESUMEN

El diseño sismorresistente usual propone valores de factores de reducción de respuesta genéricos, independientes de las características geométricas y configuracionales de las edificaciones que se diseñan. Es bien sabido que los valores de estos factores de reducción de respuesta recogen el comportamiento esperado de las estructuras cuando son sometidas a acciones sísmicas fuertes, siendo el comportamiento frecuentemente evaluado mediante la ductilidad y el factor de reserva de resistencia. En este trabajo se presentan los resultados de los valores de ductilidad calculados a edificios con pórticos especiales resistentes a momentos con diferentes longitudes de vanos, proyectados conforme a la Norma Ecuatoriana de la Construcción. Los resultados muestran que la ductilidad de los edificios está fuertemente influenciada por la longitud de vanos, pudiendo llegar a alcanzar valores inadecuados al producirse el efecto de segundo orden $P - \Delta$.

Palabras clave: Ductilidad, longitud de vano, análisis no lineal, efecto $P - \Delta$.

ABSTRACT

Current earthquake-resistant procedures prescribe generic values for the response reduction factors, regardless of the configurational and geometric characteristics of the designed buildings. It is well known that those response reduction factors values reflect the expected behaviour of the structures when they are under strong ground motions, being this seismic behaviour usually evaluated through ductility and over strength. In this work, calculated values of the ductility of special moment-resisting steel frames with different span lengths and designed according the Ecuadorian Construction Code, are presented. Results show that the ductility of the buildings is strongly influenced by the spans length and they would reach inadequate values if the second-order effect $P - \Delta$ occurs.

Keywords: Ductility, span length, non-linear analysis, $P - \Delta$ effect.

1. INTRODUCCION

La evaluación de la respuesta sismorresistente de las estructuras se suele llevar a cabo mediante la comparación de coeficientes que indican si la respuesta es o no adecuada, Vielma *et al.* (2011a) y Vielma *et al.* (2011b). Quizá el más importante de los coeficientes sea la ductilidad μ , que se determina a partir del análisis con empuje incremental no lineal, aplicando la expresión siguiente Vielma *et al.* (2011c).

$$\mu = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

En la expresión anterior Δ_u es el desplazamiento último y Δ_y es el desplazamiento de plastificación. En los últimos años se han presentado numerosos estudios en los que la ductilidad ha sido objeto de especial atención Vielma *et al.* (2009) y Vielma *et al.* (2010). En la metodología del FEMA P695 (2009) se contempla igualmente su evaluación. En esta publicación se ha introducido una variante en la determinación de la ductilidad, la cual se denomina ductilidad con base en el periodo μ_T y que se obtiene de:

$$\mu_T = \frac{\delta_u}{\delta_{y,eff}} \quad (2)$$

En esta expresión δ_u es el desplazamiento ultimo correspondiente al punto de la curva de fuerza cortante en la base vs. el desplazamiento del nivel de cubierta, en el cual la estructura ha perdido el 10% de la resistencia lateral y $\delta_{y,eff}$ es el desplazamiento de plastificación efectiva, que más adelante se detalla.

Sin embargo, existen diferentes criterios para determinar los desplazamientos que permiten calcular la ductilidad, razón por la que es necesario contar con un procedimiento que permita su evaluación de manera objetiva, ya que la ductilidad es un componente que no solo permite la evaluación de la respuesta sismorresistente, sino que también es un componente importante del factor de reducción de respuesta aplicado en el diseño usual de estructuras, ATC 19 (1995).

En el caso particular de las estructuras metálicas, dada su flexibilidad, se llega a presentar el efecto $P - \Delta$, que usualmente causa dificultades en la determinación del desplazamiento último, produciendo inclusive valores de ductilidad que penalizan de manera severa a dichas estructuras y que no reflejan objetivamente su capacidad sismorresistente. El efecto $P - \Delta$ se presenta en las estructuras metálicas con vanos de longitud intermedia (longitud mayor a 4,5m).

En este trabajo se presentan los resultados del estudio de estructuras diseñadas conforme a la Norma Ecuatoriana de la Construcción (2013), sobre arquetipos que representan diversas variantes de diseño, tipos de perfiles empleados, alturas y longitudes de vanos. Esta última variable ha requerido la propuesta de una nueva metodología para determinar el desplazamiento último para el cálculo de la ductilidad. Los resultados muestran que los valores de la ductilidad no subestiman la capacidad sismorresistente de los arquetipos con vanos de longitud intermedia afectados por el efecto $P - \Delta$. Cabe indicar que los edificios estudiados forman parte de una investigación más extensa sobre la valoración de las construcciones metálicas diseñadas conforme a la Norma Ecuatoriana de la Construcción, que ha ameritado la definición de arquetipos, por tanto se han considerado sólo luces cortas e intermedias de vanos (3 y 6 m) y alturas de edificios de 2, 4 y 6 niveles. Otras configuraciones quedan fuera de los alcances del presente estudio.

Cuando se realiza el análisis de una estructura, existen dos tipos de cargas que se aplican de forma diferenciada. La primera consiste en aplicar las cargas de gravedad (combinación de cargas muertas y cargas vivias) mientras que el segundo tipo de cargas incluye las cargas laterales (viento o sismo).

Los métodos de análisis pueden ser de cuatro tipos:

- Análisis de primer orden elástico
- Análisis de segundo orden elástico
- Análisis de primer orden elasto-plástico
- Análisis de segundo orden elasto-plástico

Al efectuar la aplicación diferenciada de los tipos de cargas, se puede resolver el análisis considerando o no el efecto de segundo orden. En la Fig. 1 se puede apreciar un esquema que resume las variantes que se tienen considerando o no el efecto de segundo orden (que equivale al efecto $P - \Delta$) en el análisis de las estructuras Li & Li (2007).

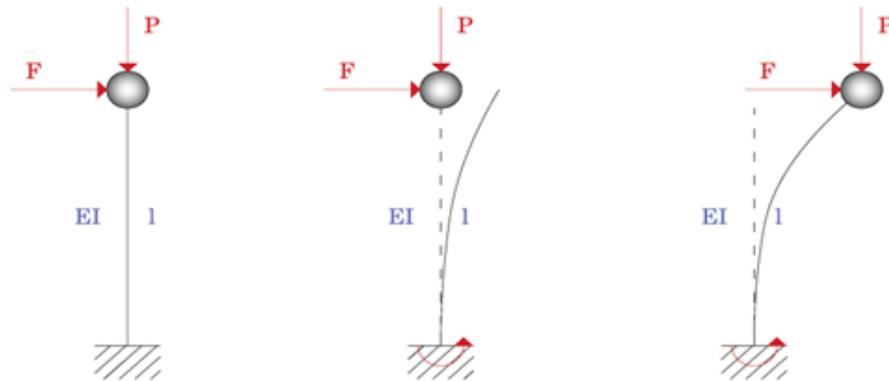


Figura 1. Efecto $P - \Delta$ sobre un sistema de un grado de libertad.

Crisafulli (2012) considera que la respuesta de las estructuras que se obtiene al considerar el efecto de segundo orden puede conducir a resultados completamente diferentes, ya que luego de que se alcanza el punto de cortante máximo, se produce una disminución progresiva del cortante que conduce a resultados que pueden considerarse como desfavorables desde el punto de vista de la ductilidad global. Diversos autores han llegado a similares conclusiones al estudiar la respuesta de edificios aporticados de acero Black (2011), Aksoylar (2011), Sato & Uang (2013), Adam & Jaeger (2012).

En la Fig. 2 se puede apreciar claramente la influencia de la longitud de los vanos sobre la curva de fuerza cortante en la base vs. el desplazamiento del nivel de cubierta obtenida al aplicar el análisis no lineal con empuje incremental.

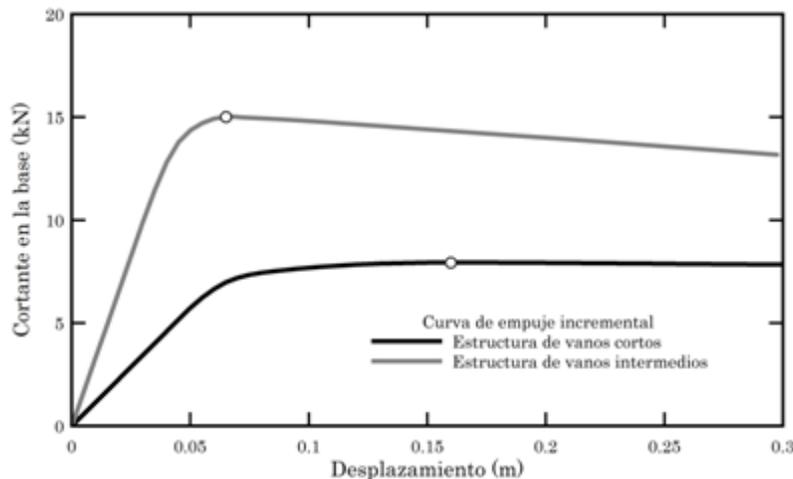


Figura 2. Efecto de la longitud de los vanos sobre la respuesta no lineal.

2. METODOLOGIA

En la literatura es posible encontrar diversos criterios que permiten determinar el desplazamiento último de una estructura sometida a fuerzas laterales. En la Fig. 3 pueden apreciarse los criterios contemplados por Elnashai & Di Sarno (2008).

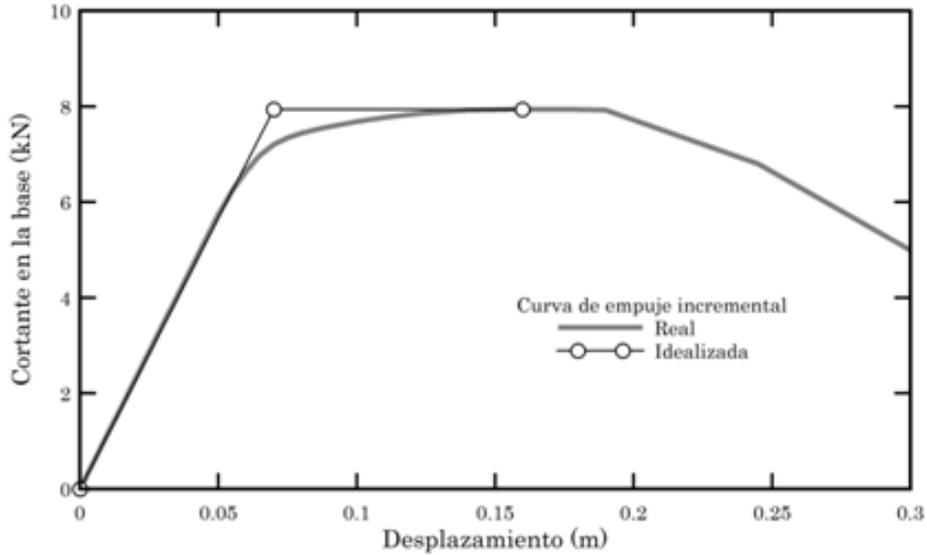


Figura 3. Criterios para determinar el punto de plastificación y último.

En la Fig. 4 se puede apreciar el trazado de la idealización de la curva de empuje incremental (curva Pushover), en la cual se ha representado la fuerza cortante en la base vs. el desplazamiento del centro de gravedad del nivel de cubierta. Obsérvese que para su trazado es necesario determinar el punto de cortante máximo, denominado cortante último, al que le corresponde el desplazamiento último Δ_u . Seguidamente se determina la rigidez secante, tomando un punto sobre la curva para el cual se alcanza el 75% del cortante último; se traza la línea que une a este punto con el origen y luego se interseca con una línea horizontal trazada desde el punto de cortante último. Esta intersección representa el punto de plastificación global de la estructura, con un desplazamiento de plastificación Δ_y .

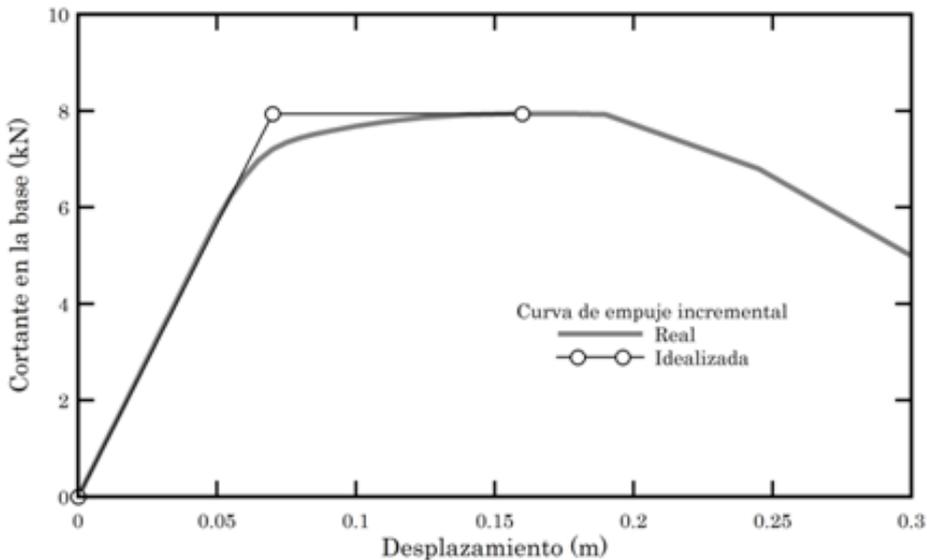


Figura 4. Curva de empuje incremental real e idealizada.

En la metodología empleada en el FEMA P695, los criterios varían con respecto a los anteriores. En la metodología se establece que el desplazamiento último ocurre en el punto de la curva para el cual se ha alcanzado una disminución del 10% de la resistencia lateral del edificio y que el desplazamiento de plastificación efectiva $\delta_{y,eff}$ se determina al aplicar:

$$\delta_{y,eff} = C_0 \frac{V_{max}}{W} \left[\frac{g}{4\pi^2} \right] (\max(T, T_1))^2 \quad (3)$$

En la expresión anterior C_0 es un coeficiente que correlaciona el desplazamiento del nivel de cubierta de un sistema de un grado de libertad, V_{max} la relación es el cortante máximo W normalizado con respecto del peso sísmico, g es la aceleración de la gravedad, T es el período fundamental y T_1 es el periodo del primer modo obtenido de un análisis de auto-valores.

Sin embargo vale indicar que el procedimiento anterior tiene una dificultad asociada con el hecho de que la mayoría de las estructuras analizadas no presentan esta disminución tan acentuada de la resistencia lateral, razón por la cual ha sido necesario buscar una forma alterna de determinar el desplazamiento último, sin producir una penalización excesiva de la ductilidad de los edificios afectados por el efecto $P - \Delta$. Para ello se ha recurrido a la serie de umbrales de daño propuestos en el trabajo de Liu (2005), del cual se aplica el umbral del estado límite de daños mayores a los arquetipos estudiados, considerando que los mismos alcanzan un desplazamiento último cuando se alcanza una deriva de entrepiso que sobrepasa el valor especificado en la Tabla 1.

Tabla 1. Estados de daño con los umbrales de derivas de entrepiso que los definen.

| Nivel | Estado de daño | Descripción FEMA 1992 | Rango de derivas de entrepiso (%) |
|-------|----------------|--|-----------------------------------|
| I | Sin daños | No existen daños | $\Delta < 0,3$ |
| II | Leves | Daños menores localizados y limitados, no requieren reparación | $0,3 < \Delta \leq 0,75$ |
| III | Ligeros | Daños significativos localizados en algunos componente que no requieren reparación | $0,75 < \Delta \leq 1,05$ |
| IV | Moderados | Daños significativos en varios elementos que requieren reparación | $1,05 < \Delta \leq 2,54$ |
| V | Fuertes | Daños extensivos que requieren reparaciones importantes | $2,54 < \Delta \leq 4,42$ |
| VI | Mayores | Daños mayores distribuidos, la estructura deberá ser demolida | $4,42 < \Delta \leq 9,10$ |
| VII | Destrucción | Total destrucción de la estructura | $\Delta > 9,10$ |

Para aplicar la metodología anteriormente descrita, es útil asignar colores a cada estado de daño, los cuales pueden apreciarse en la Tabla 2.

Tabla 2. Estados de daño con sus respectivos colores asignados.

| Nivel | Estado de daño | Color |
|-------|----------------|--|
| I | Sin daños | |
| II | Leves |  |
| III | Ligeros |  |
| IV | Moderados |  |
| V | Fuertes |  |
| VI | Mayores |  |
| VII | Destrucción |  |

En la Fig. 5 puede observarse el modelo de un arquetipo que ha sido sometido a la acción de las fuerzas laterales de empuje incremental. Nótese que las columnas de planta baja han alcanzado el estado de daños mayores, por tanto para ese paso de carga se ha alcanzado el desplazamiento último.

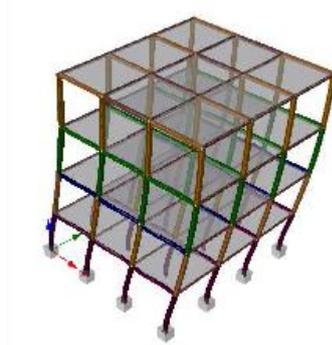


Figura 5. Deformada con el nivel de daño alcanzado.

Este procedimiento ha sido aplicado a todos los arquetipos que en la siguiente sección se describen, de manera que se determina el desplazamiento último mediante un criterio unificado y objetivo.

2.1. Arquetipos estudiados

La metodología del FEMA P695 requiere para su aplicación que se defina una serie de arquetipos representativos de las variantes más empleadas dentro de la tipología estructural a ser estudiada. Esto ha requerido que se defina una serie de arquetipos en los que se ha tomado en consideración las siguientes variables:

- *Número de niveles.* En este estudio los arquetipos se han diseñado para tres elevaciones diferentes: 2, 4 y 6 niveles.
- *Método de diseño.* La Norma Ecuatoriana de la Construcción contempla dos métodos de diseño: el método basado en aceleraciones (ba) y el método basado en desplazamientos (bd). Adicionalmente se ha aplicado un método alternativo de diseño (al).
- *Longitud de vanos.* Los arquetipos han contemplado dos longitudes de vanos diferentes: 3 y 6 metros.
- *Tipos de perfiles empleados en el diseño.* Se han utilizado perfiles laminados en caliente (pl) y perfiles de secciones armadas (ps).

La combinación de todas las variables ha dado origen a los arquetipos que se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3. Arquetipos estudiados.

| N° de niveles | Diseño | Luces vanos(m) | Tipo de perfiles | N° de arquetipo |
|---------------|--------|----------------|------------------|-----------------|
| 2 | ba | 3 | pl | 2131 |
| | | | ps | 2132 |
| | | 6 | pl | 2161 |
| | | | ps | 2162 |
| | bd | 3 | pl | 2231 |
| | | | ps | 2232 |
| | | 6 | pl | 2261 |
| | | | ps | 2262 |
| | al | 3 | pl | 2331 |
| | | | ps | 2332 |
| | | 6 | pl | 2361 |
| | | | ps | 2362 |
| 4 | ba | 3 | pl | 4131 |
| | | | ps | 4132 |
| | | 6 | pl | 4161 |
| | | | ps | 4162 |

| N° de niveles | Diseño | Luces vanos(m) | Tipo de perfiles | N° de arquetipo |
|---------------|--------|----------------|------------------|-----------------|
| 4 | bd | 3 | pl | 4231 |
| | | | ps | 4232 |
| | | 6 | pl | 4261 |
| | | | ps | 4262 |
| | al | 3 | pl | 4331 |
| | | | ps | 4332 |
| | | 6 | pl | 4361 |
| | | | ps | 4362 |
| 6 | ba | 3 | pl | 6131 |
| | | | ps | 6132 |
| | | 6 | pl | 6161 |
| | | | ps | 6162 |
| | bd | 3 | pl | 6231 |
| | | | ps | 6232 |
| | | 6 | pl | 6261 |
| | | | ps | 6262 |
| | al | 3 | pl | 6331 |
| | | | ps | 6332 |
| | | 6 | pl | 6361 |
| | | | ps | 6362 |

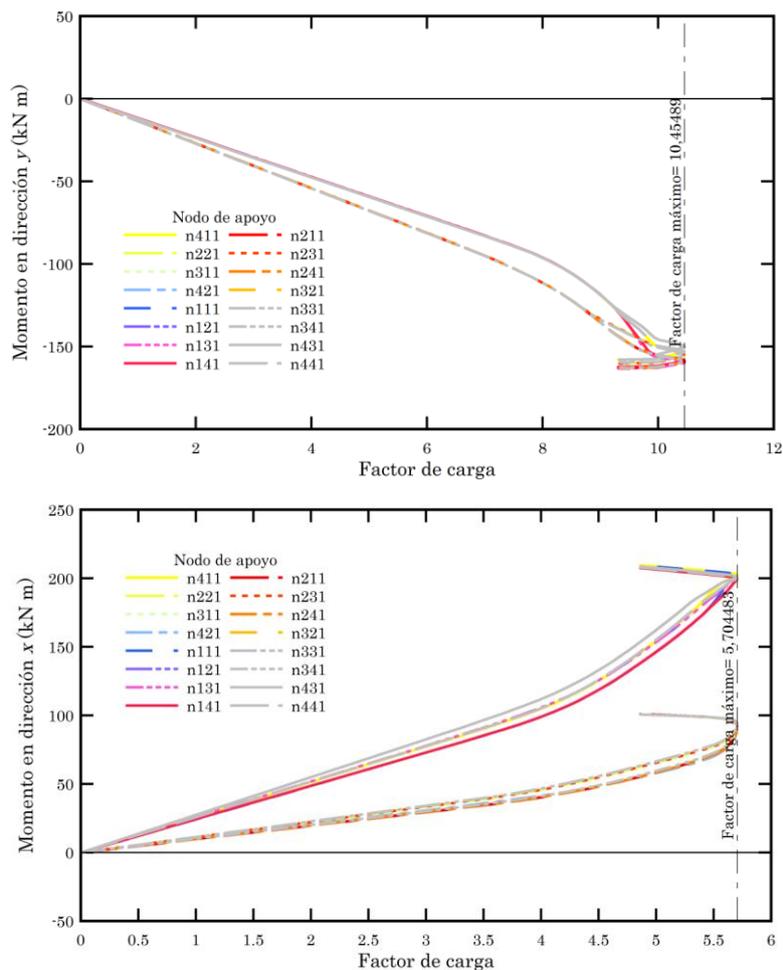


Figura 6. Evolución de momentos arquetipo 4131 en dirección x e y.

Los arquetipos han sido dimensionados y diseñados conforme a las prescripciones normativas vigentes. De esta manera ha sido posible obtener las secciones para los diferentes miembros estructurales. Junto a estas secciones, el resto de características geométricas y mecánicas correspondientes a cada arquetipo, serán los datos de entrada para efectuar el análisis no lineal con empuje incremental.

El análisis no lineal se han llevado a cabo utilizando el programa SeismoStruct (2014). Dicho programa permite realizar el análisis no lineal tanto estático como dinámico, considerando grandes deformaciones. Una vez efectuados los análisis, se obtienen las curvas de fuerza cortante en la base vs. el desplazamiento del nivel de cubierta. De estas curvas se obtienen los valores necesarios para el cálculo de la ductilidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Fig. 6 se puede apreciar la evolución de los momentos en los apoyos empotrados del arquetipo 4131, al ser sometido a la acción de empuje incremental en dirección x e y . Los valores de los momentos de una forma más o menos lineal se incrementan a medida que crece el factor de carga. Nótese que una vez alcanzado un determinado valor de factor de carga máximo, los momentos continúan creciendo pero con fuerzas laterales cada vez más pequeñas, lo que indica que los momentos producidos por el efecto $P - \Delta$ son cada vez mayores, llegando a ser determinantes de cara al fallo de la estructura.

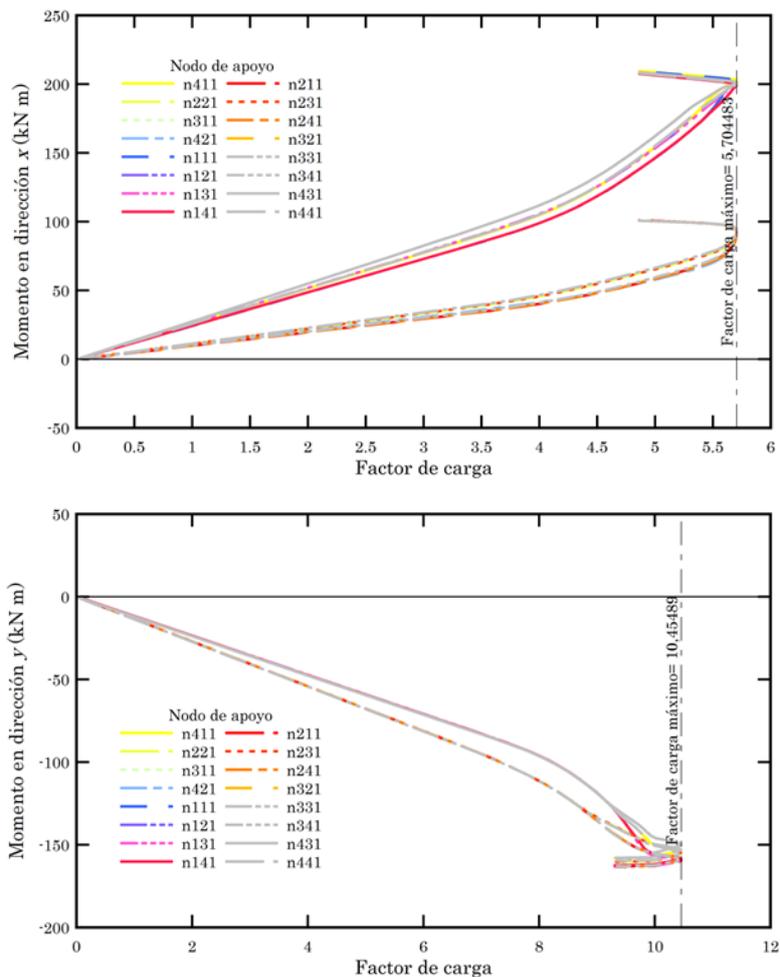


Figura 7. Evolución de momentos arquetipo 4161 en dirección x e y .

En la Fig. 7 se puede apreciar la evolución de los momentos de reacción que aparecen en los apoyos, tanto para la dirección x como la y . Nótese que igualmente se produce el efecto de reducción del factor de carga cuando el efecto $P - \Delta$ comienza a ser dominante.

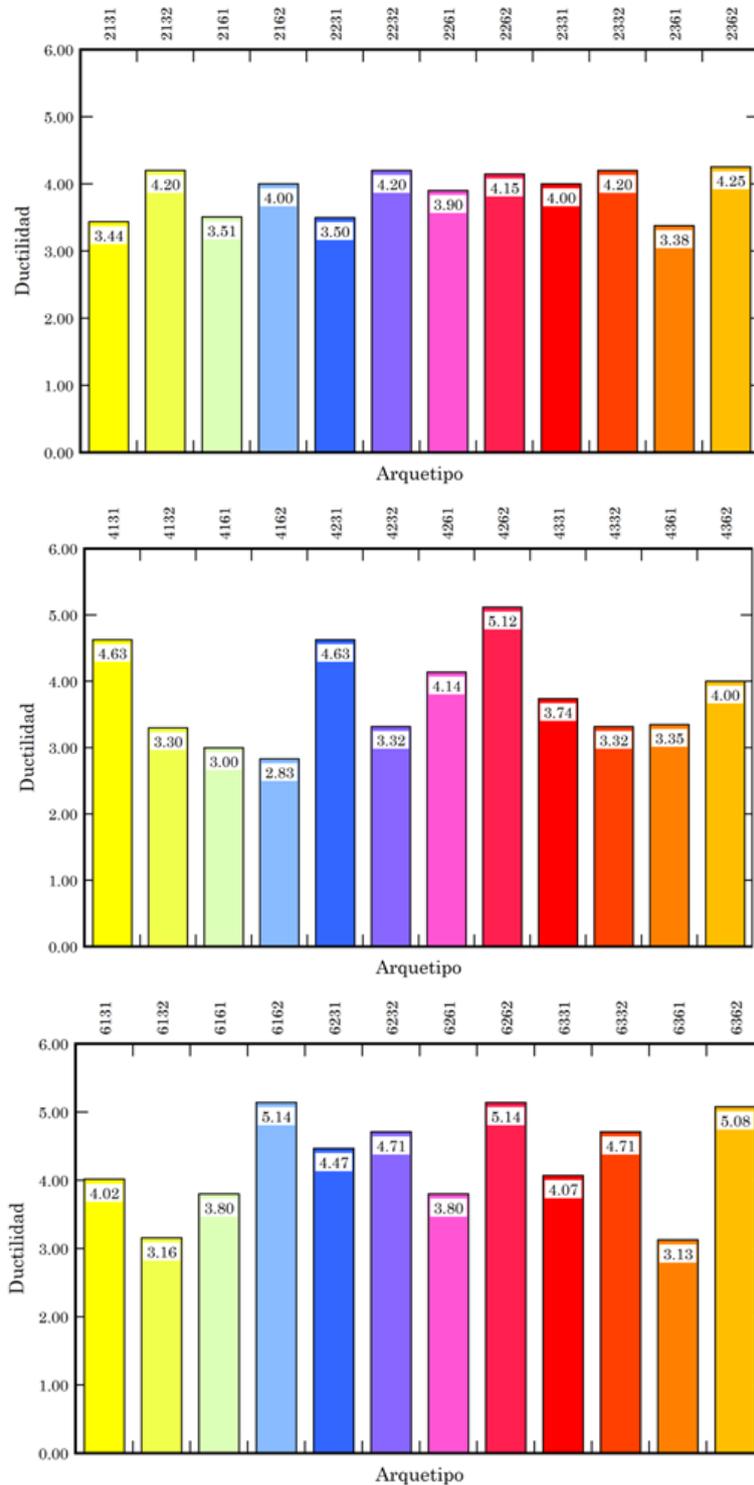


Figura 8. Ductilidad de los arquetipos en dirección x para 2, 4 y 6 niveles.

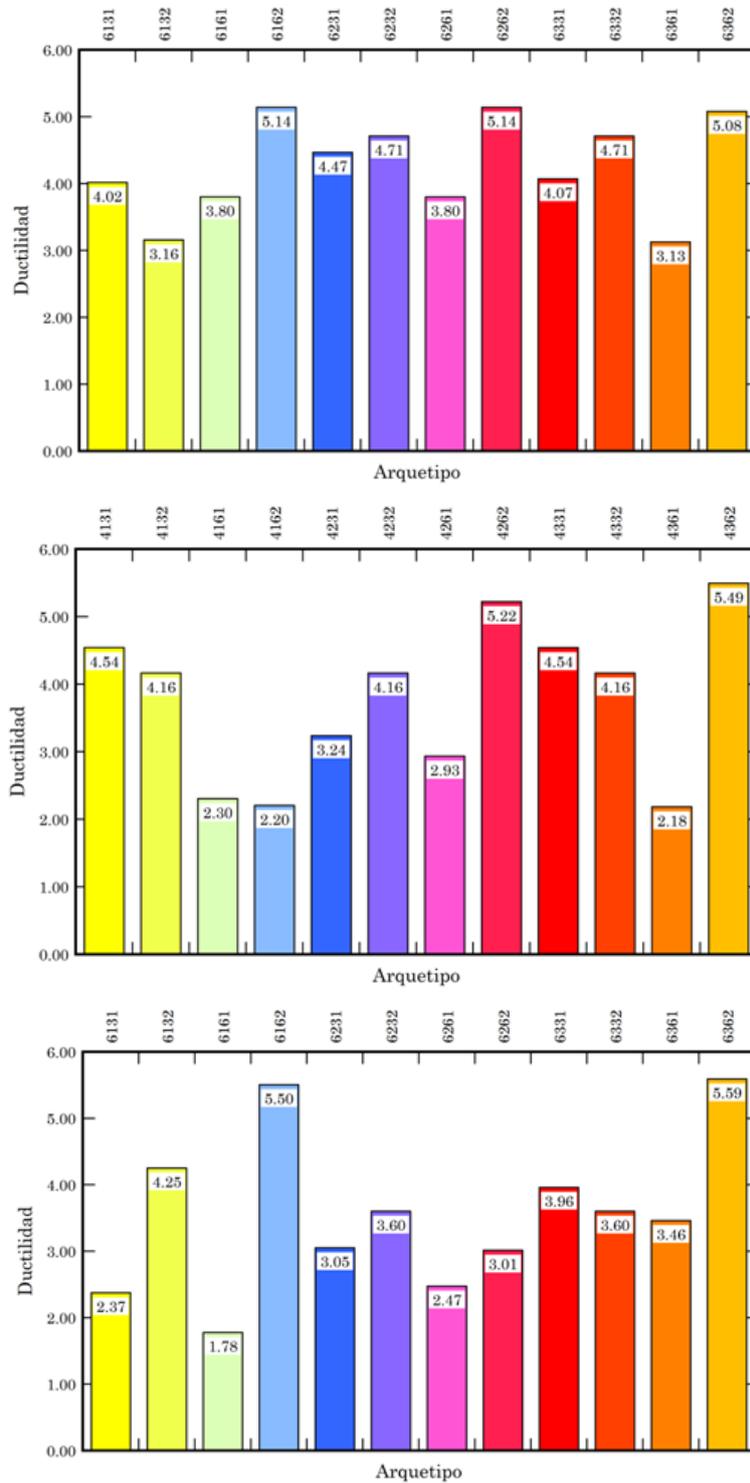


Figura 9. Ductilidad de los arquetipos en dirección y para 2, 4 y 6 niveles.

Los resultados anteriores muestran que la aparición del efecto $P - \Delta$ modifica claramente la respuesta estructural frente a cargas sísmicas. Lo que justifica el tomar en consideración el criterio del umbral de estado de daño con la finalidad de determinar el valor objetivo del desplazamiento último.

Otro aspecto importante que se ha podido evaluar de los resultados es el correspondiente a la rigidez inicial. Como ya se ha apuntado anteriormente, el FEMA P695 propone una forma

aproximada de calcularlo, con base en el periodo. Sin embargo se ha podido comprobar que el desplazamiento $\delta_{y,eff}$ resulta mucho más pequeño que el que se determina por el procedimiento propuesto por Elnashai y Di Sarno, conduciendo a rigidez inicial y a su vez produciendo valores de ductilidad muchos mayores.

Por este motivo se ha tomado la decisión de no seguir la recomendación del FEMA P695 y mantener el procedimiento de estimación de la rigidez secante, tal como lo proponen Elnashai y Di Sarno. De esta manera se determina el desplazamiento de plastificación, con el cual se aplica la Ecuación (1). Los valores calculados para todos los arquetipos índice se muestran en la Fig. 8, para la dirección x de los arquetipos, y en la Fig. 9, para la dirección y de los arquetipos.

Nótese en primer término que en ninguno de los casos los arquetipos alcanzan valores de ductilidad iguales al factor de reducción de respuesta aplicado en el diseño (en este caso $R = 6$). Esto no representa ningún inconveniente, dado que aún falta por incorporar la contribución que realiza el factor de reserva de resistencia R_R , el cual se desarrollará en un trabajo posterior. En todo caso, los valores calculados muestran una semejanza con los obtenidos en estructuras similares de acero recientemente estudiados Ugel *et al.* (2012).

De forma general, puede afirmarse que los valores de la ductilidad son satisfactorios para casi todos los arquetipos, excepto para los arquetipos 4161 y 4162 en direcciones x e y , para el arquetipo 4361 en dirección x y y para los arquetipos 6131, 6161 y 6261 también en dirección y . Todo esto demuestra que, con la excepción del arquetipo 6131 en dirección y , todos los arquetipos que alcanzan valores bajos de ductilidad (menores que 3) son arquetipos con longitudes de vanos intermedias (6,00m) sobre los cuales el efecto $P - \Delta$ es más acentuado.

4. CONCLUSIONES

Se ha presentado en este trabajo un resumen sucinto de la determinación de los desplazamientos último y de plastificación para determinar el valor de la ductilidad.

Los procedimientos especificados en el FEMA P695 tienden a sobreestimar la rigidez inicial y por tanto conducen a determinación de valores de ductilidad por encima de los valores esperados. Por otro lado, es bastante difícil determinar el desplazamiento último a partir del punto de reducción del 10 % de la resistencia lateral, debido a que los resultados del análisis no lineal con empuje incremental no logran converger hasta este punto.

Se ha demostrado que los edificios con pórticos especiales resistentes a momento con longitudes de vanos intermedias se ven afectados por el efecto $P - \Delta$ lo cual coinduce a subestimar los valores de la ductilidad si se aplican procedimientos convencionales.

Lo anterior ha llevado a proponer un nuevo procedimiento para determinar el valor del desplazamiento último sobre la base de alcanzar un estado de daños mayores. Este procedimiento permite calcular valores objetivos y unificados de ductilidad, independientemente de la influencia del efecto $P - \Delta$.

Finalmente, y con solo una excepción, los arquetipos que presentan los menores valores de ductilidad son precisamente los que tienen vanos de longitud intermedia. Se sugiere ampliar este estudio a edificios con pórticos con luces de vanos mayores.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor desea extresar su agradecimiento al Programa Becas Prometeo de la Senescyt del Ecuador, bajo cuyo financiamiento se desarrolla este trabajo. De igual manera desea agradecer al CDCHT de la UCLA (Venezuela) y al Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción de la ESPE (Ecuador).

REFERENCIAS

- Adam, C., C. Jaeger, 2012. Simplified collapse capacity assessment of earthquake excited regular frame structures vulnerable. *Engineering Structures*, 44(1),159-173.
- Aksoylar, N., A.S. Elnashai, H. Mahmoud, 2011. The design and seismic performance of low-rise long-span frames with semi-rigid connections. *Journal of Constructional Steel Research*,. 67(1), 114-126.
- ATC 19, 1995. *Structural response modification factors*. Redwood City, Estados Unidos de América.
- Black, E., 2011. Use of stability coefficients for evaluating the P-Δ effect in regular steel moment resisting frames. *Engineering Structures*, 33(1), 1205-1216.
- Crisafulli, F.J., 2012. *Diseño sismorresistente de estructuras de acero*. Alacero. Santiago de Chile, Chile.
- Elnashai, A., L. Di Sarno, 2008. *Fundamentals of earthquake engineering*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Reino Unido.
- FEMA P695, 2009. *Quantification of building seismic performance factors*. John Wiley & Sons Ltd., Washington, Estados Unidos de América.
- Li, G., J. Li, 2007. *Advanced analysis and design of steel frames*. John Wiley & Sons Ltd., Chichester, Reino Unido.
- Liu, M., 2005. Seismic design of steel moment-resisting frame structures using multiobjective optimization. *Earthquake Spectra*, 21(2), 389-414.
- Norma Ecuatoriana de la Construcción, 2013. *Peligro sísmico y requisitos de diseño sismo resistente*. Quito, Ecuador.
- Sato, A., Ch. Uang, 2013. A FEMA P695 study for the proposed seismic performance factors for cold-formed steel special bolted moment frames. *Earthquake Spectra*, 29(1), 259-282.
- Seismo Struct, 2014. *Users manual for version 6*. Pavia, Italia.
- Ugel, R., J.C. Vielma, R. Herrera, S. Pérez, A.H. Barbat, 2012. Seismic response of high rise steel framed buildings with chevron-braced designed according to Venezuelan codes. *Natural Science, Earthquake Special Issue*,.4, 694-698.
- Vielma, J., A.H. Barbat, S. Oller, 2009. *Seismic performance of waffled-slab floor buildings*. Proc. of the Institution of Civil Engineering: Structures and Buildings, 162, 169-182.
- Vielma, J., A.H. Barbat, S. Oller, 2010. Seismic safety of limited ductility buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 8, 135-155.
- Vielma, J., A.H. Barbat, S. Oller, 2011a. *Dimensionado sísmico de estructuras porticadas de hormigón armado con base en la respuesta no lineal*. 4to Congreso Español de Ingeniería Sísmica, Granada, España.
- Vielma, J., A.H. Barbat, S. Oller, 2011b. Dimensionado sísmico de edificios de hormigón armado mediante factores de amplificación de desplazamientos con base en el balance de energía, *Hormigón y Acero*, 63(263), 83-96.
- Vielma, J., A.H. Barbat, S. Oller, 2011c. Seismic safety of RC framed buildings designed according modern codes. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 5, 567-575.