



Ciencia en su PC

ISSN: 1027-2887

manuela@megacen.ciges.inf.cu

Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago
de Cuba

Cuba

Lahera-García, Yelennys; Frómeta-Salas, Zenaida Paulette; Morgado-Pelegrin, Aliannis
Evaluación del comportamiento dúctil en columnas de hormigón de alta resistencia
Ciencia en su PC, vol. 1, núm. 4, 2018, Octubre-Diciembre 2019, pp. 42-54
Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba
Cuba

Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181358509004>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

UAEM  redalyc.org

Sistema de Información Científica Redalyc
Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal
Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso
abierto

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DÚCTIL EN COLUMNAS DE HORMIGÓN DE ALTA RESISTENCIA

EVALUATION OF THE DUCTILE BEHAVIOR IN COLUMNS HIGH STRENGTH CONCRETE

Autores:

Yelennys Lahera-García, yelennys.lahera@iproyzagr.azcuba.cu¹

Zenaída Paulette Frómeta-Salas, paulette@uo.edu.cu¹

Aliannis Morgado-Pelegrin, aliannis@nauta.cu¹

¹Universidad de Oriente. Santiago de Cuba, Cuba.

RESUMEN

El hormigón de alta resistencia tiene aceptación en la actualidad por sus ventajas sobre el hormigón convencional: mayor resistencia a la compresión, mayor módulo de elasticidad y más economía al permitir reducir las secciones transversales, lo que disminuye la magnitud de la fuerza sísmica; por ello es usado en las columnas de puentes y edificios altos. Sin embargo, este hormigón tiene baja capacidad de deformación, por lo cual es cuestionado en zonas sísmicas. Este trabajo evalúa los requerimientos de confinamiento de columnas de hormigón de alta resistencia para la ductilidad deseada en el diseño sismorresistente. Valora su comportamiento y capacidad de deformación bajo carga axial con flexión, mediante la aplicación de los requerimientos del AC1318-14 y del NZS-3101-06. Se concluye que los factores de mayor influencia en la disminución de la ductilidad son la elevada resistencia del hormigón a la compresión, el incremento del nivel de carga axial y el insuficiente confinamiento del hormigón.

Palabras clave: hormigón de alta resistencia, ductilidad, confinamiento.

ABSTRACT

The high strength concrete has acceptance at the present time, for its advantages on the conventional concrete: bigger resistance to the compression, bigger module of elasticity and more economy when allowing to reduce the traverse sections what diminishes the magnitude of the seismic force, for they are used it in the columns of bridges and high buildings, but this concrete has low capacity of deformation, being questioned in seismic areas. This work evaluates the requirements of confinamiento of columns of concrete of high resistance for the ductility wanted in the design resistant earthquake. It values the behavior and capacity of deformation of columns under it loads axial with flexion applying the requirements of the AC1318-14, and of the NZS-3101-06. You concludes that the factors of more influence in the decrease of the ductility are: the high strength of the concrete to the compression; the increment of the level of axial load, and the insufficient confinamiento of the concrete.

Key words: high strength concrete, ductility, confinement

INTRODUCCIÓN

En los últimos años el hormigón de alta resistencia (resistencia a la compresión mayor de 50 MPa) tiene gran aceptación en la industria de la construcción, por lo que su desarrollo es gradual. Su creciente utilización se debe a las ventajas cuando se compara con el hormigón convencional: su alta resistencia a edades tempranas, dureza y mantenimiento de las propiedades mecánicas e integridad en ambientes severos; es decir, su durabilidad; así como mayor resistencia a la compresión, mayor módulo de elasticidad y menores gastos por la reducción de secciones transversales. De ahí que constituya una opción para disminuir las dimensiones de los elementos en grandes estructuras y que pueda evaluarse como alternativa para reducir las fuerzas de inercia que provoca la acción sísmica. Sin embargo, algunas investigaciones (Legeron & Paultre, 2003), (Kaushik, 2004) apuntan que es un material con baja capacidad de deformación postpico con respecto al hormigón convencional y, por tanto, más frágil; de ahí que exista determinado nivel de desconfianza para su utilización en columnas de edificios altos construidos en zonas de elevada actividad sísmica, pues se le confiere baja capacidad para disipar la energía inducida por el sismo. Lo anterior trae como consecuencia el inadecuado desempeño de la estructura ante la posibilidad de ocurrencia de un sismo de gran intensidad.

Para corregir el efecto de la falta de ductilidad en columnas, especialmente en las zonas críticas de estas, los códigos especifican unas cuantías mínimas de refuerzo transversal en esas zonas, basadas en criterios experimentales y de resistencia. Cuando se trata de columnas construidas con hormigón tradicional estas cuantías de refuerzo aseguran una ductilidad suficiente en las mismas, pero estos criterios son de dudosa aplicación a la hora de proyectar columnas construidas con hormigones de alta resistencia, en los cuales hay que tener en cuenta que para conseguir una buena resistencia frente a los sismos se requieren estructuras que puedan disipar una gran cantidad de energía, especialmente mediante deformación inelástica; sin embargo, el hormigón de alta resistencia carece de esta deformación.

Lo anterior es la razón por lo que algunas normativas de diseño estructural, como el código americano ACI 318.2014 y la norma neozelandesa NZS: 3101.2006, establecen requisitos especiales para el acero de refuerzo transversal. Sin embargo, estudios experimentales (Kaushik, 2004) demuestran que esas especificaciones no dan la misma ductilidad a columnas hechas con hormigón de alta resistencia que a columnas de hormigón convencional, sin lograr el requerido confinamiento del material que demanda la baja capacidad de deformación postpico de los hormigones de alta resistencia (HAR).

El problema de la investigación se centra en las incertidumbres acerca del comportamiento dúctil en columnas de hormigón de alta resistencia para su empleo en zonas sísmicas, lo cual puede provocar un fallo frágil y con ello el colapso de la estructura con sus consecuentes pérdidas de vidas humanas y materiales ante la acción de un sismo de gran intensidad. Esta situación polémica debe ser atendida, pues actualmente tanto a nivel nacional como internacional la aplicación de HAR es amplia en obras de infraestructuras importantes.

METODOLOGÍA

Características de las secciones analizadas

A partir del programa computacional XTRAC se analizó la capacidad de deformación (ductilidad) de columnas de alta resistencia y se valoró la influencia en la ductilidad por curvatura de varios factores, teniendo en cuenta los requisitos sísmicos del código de Estados Unidos ACI 318:2014 y Nueva Zelanda NZS 310: 2006. Para ello se seleccionó la sección transversal cuadrada de una columna de hormigón armado.

En el análisis las variables utilizadas fueron:

- 1- Resistencia a compresión del hormigón (MPa): 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 y 80. Para un total de 11 valores.
- 2- Niveles de carga axial considerados por la norma $P/A_g f'_c$: 0.15; 0.25; 0.3; 0.4, 0.5.

Se consideraron constantes los siguientes parámetros de la sección

- a) dimensiones de la sección transversal: 400x400mm
- b) el recubrimiento de las barras del acero longitudinal: 40 mm
- c) refuerzo longitudinal: 12 barras de 16mm de diámetro, ubicadas perimetralmente
- d) acero para el refuerzo longitudinal y también el del transversal con tensión de fluencia $f_y = 300\text{MPa}$

Para evaluar la influencia del confinamiento del hormigón se analizaron tres tipos de refuerzo: bajo, medio y alto con el uso de estibos rectangulares, grapas y ganchos sísmicos (Figura 1).

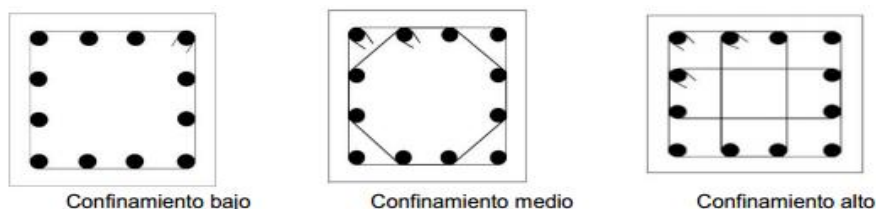


Figura 1. Tipos de confinamientos del hormigón analizados

Se tuvo en cuenta el acero de refuerzo para el confinamiento lateral para las 11 resistencias del hormigón (30-80 MPa) y 5 niveles de carga axial (0.15-0.5), para cada uno de los 3 confinamientos, resultando una combinación de 165 variantes de cada norma, para un total de 330 variantes que se diseñaron estrictamente según los códigos de ACI y NZS.

Se calculó por los requisitos de cada norma y para cada tipo de confinamiento el área de acero de refuerzo transversal y su espaciamiento (Tabla 1).

Tabla 1. Relación del área de confinamiento de la sección para los diferentes tipos de confinamiento

confinamiento bajo														
f'c (MPa)	ACI 318		NZS 3101						ACI 318					
	$\frac{P}{f'c * Ag}$		$\frac{P}{f'c * Ag}$						$\frac{P}{f'c * Ag}$					
	0.15, 0.3, 0.5		0.15		0.30		0.50		0.15		0.30		0.50	
	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)
30	10	89.6	10	137.0	10	68.5	10	41.1	10	30.63	10	89.6	10	-
35	10	76.8	10	-	10	-	10	-	10	24.52	10	76.8	10	-
40	10	67.2	10	102.8	10	51.4	10	30.8	10	20.14	10	67.2	10	-
45	10	59.7	10	-	10	-	10	-	10	16.6	10	59.7	10	-
50	10	53.8	10	82.2	10	41.1	10	24.7	10	14.16	10	53.8	10	-
55	10	48.9	10	-	10	-	10	-	10	12.26	10	48.9	10	-
60	10	44.8	10	68.5	10	34.3	10	20.6	10	-	10	35.83	10	25.800
65	10	41.3	10	-	10	-	10	-	10	-	10	33.08	10	23.815
70	10	38.4	10	58.7	10	29.4	10	17.6	10	-	10	30.71	10	22.114
75	10	35.8	10	-	10	-	10	-	10	-	10	27.87	10	20.067
80	10	33.6	10	51.4	10	25.7	10	15.4	10	-	10	25.42	10	18.304
confinamiento medio														
f'c (MPa)	ACI 318		NZS 3101						ACI 318					
	$\frac{P}{f'c * Ag}$		$\frac{P}{f'c * Ag}$						$\frac{P}{f'c * Ag}$					
	0.15, 0.3, 0.5		0.15		0.30		0.50		0.15		0.30		0.50	
	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)
30	10	179.2	10	137.0	10	68.5	10	41.1	10	98.6	10	98.6	10	-
35	10	153.6	10	-	10	-	10	-	10	84.5	10	84.5	10	-
40	10	134.4	10	102.8	10	51.4	10	30.8	10	74.0	10	74.0	10	-
45	10	119.4	10	-	10	-	10	-	10	65.7	10	65.7	10	-
50	10	107.5	10	82.2	10	41.1	10	24.7	10	59.2	10	59.2	10	-
55	10	97.7	10	-	10	-	10	-	10	53.8	10	53.8	10	-
60	10	89.6	10	68.5	10	34.3	10	20.6	10	-	10	86.000	10	51.6
65	10	82.7	10	-	10	-	10	-	10	-	10	79.385	10	47.631
70	10	76.8	10	58.7	10	29.4	10	17.6	10	-	10	73.714	10	44.229
75	10	35.8	10	-	10	-	10	-	10	-	10	66.889	10	40.133
80	10	33.6	10	51.4	10	25.7	10	15.4	10	-	10	50.845	10	36.608
confinamiento alto														
f'c (MPa)	ACI 318		NZS 3101						ACI 318					
	$\frac{P}{f'c * Ag}$		$\frac{P}{f'c * Ag}$						$\frac{P}{f'c * Ag}$					
	0.15, 0.3, 0.5		0.15		0.30		0.50		0.15		0.30		0.50	
	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)	d(mm)	S(mm)
30	10	268.8	10	137.0	10	68.5	10	41.1	10	147.9	10	147.9	10	-
35	10	230.4	10	-	10	-	10	-	10	126.8	10	126.8	10	-
40	10	201.6	10	102.8	10	51.4	10	30.8	10	110.9	10	110.9	10	-
45	10	179.2	10	-	10	-	10	-	10	98.6	10	98.6	10	-
50	10	101.3	10	82.2	10	41.1	10	24.7	10	88.8	10	88.8	10	-
55	10	146.6	10	-	10	-	10	-	10	80.7	10	80.7	10	-
60	10	134.4	10	68.5	10	34.3	10	20.6	10	-	10	71.00	10	42.6
65	10	124.0	10	-	10	-	10	-	10	-	10	65.54	10	39.323
70	10	115.2	10	58.7	10	29.4	10	17.6	10	-	10	60.86	10	36.514
75	10	107.5	10	-	10	-	10	-	10	-	10	55.22	10	33.133
80	10	100.8	10	51.4	10	25.7	10	15.4	10	-	10	50.37	10	30.223

La Tabla 1 compara los requisitos del confinamiento de los dos códigos, mostrando la variación de A_{sh} normalizada para (s) espaciamiento de los estribos y (c) la dimensión del núcleo con la resistencia del hormigón para diferentes niveles

de carga axial. Los requisitos de área de confinamiento de los códigos ACI 318:11 y del ACI318:06 eran casi los mismos; con el último que necesita ligeramente más área para todas resistencias del hormigón. Para el nivel de carga de 0.15 el código de NZS proporcionó área del refuerzo transversal, que siempre fue menor que los demás códigos del estudio.

El ACI 318:11 no incluye el efecto de los niveles de carga axial en sus requisitos de acero transversal de confinamiento lateral en las regiones críticas de las articulaciones de columnas. Por consiguiente, ellas requirieron la misma área de acero de confinamiento para diferentes niveles de carga axial. Por cuanto las recomendaciones de confinamiento del NZS 3101:03 y el ACI: 318:11 incluyen la influencia del nivel de carga axial; por consiguiente, se necesitan diferentes áreas del refuerzo transversal de confinamiento lateral para los diferentes niveles de carga axial. Luego de obtener las áreas de confinamiento, mediante el uso del programa XTRAC, se logran las relaciones teóricas momento curvatura para todos los casos de columnas anteriormente mencionados, para diferentes resistencias del hormigón a la compresión, los niveles de carga axiales definidos y los tres tipos de confinamiento.

Influencia del nivel de carga axial en la ductilidad por curvatura en columnas

Para evaluar la influencia del nivel de carga axial en la ductilidad por curvatura en columnas se utilizó un programa de análisis no lineal, XTRAC, que permite la construcción de los gráficos momento curvatura y diagrama interacción para secciones transversales de hormigón armado con un diagrama no lineal del hormigón no confinado, que corresponde al recubrimiento; el hormigón confinado, que empieza a actuar una vez que el hormigón pierde el recubrimiento. Estos dos son modelos de Mander y un diagrama no lineal; de todos los que brinda el programa se escogió el bilineal, pues representa más detalladamente las tres etapas de trabajo del rango comportamiento.

Efecto del confinamiento del acero de refuerzo

En el diseño de columnas la ductilidad es normalmente provista por las rótulas plásticas. El efecto de la compresión axial en estos miembros es iniciar el desprendimiento del recubrimiento en lugar de pequeños desplazamientos plásticos. A menos que se proporcione un correcto y apropiado refuerzo transversal para confinar el hormigón comprimido dentro del núcleo y para prevenir el pandeo del refuerzo longitudinal, la falla probablemente ocurrirá. En conjunto con el refuerzo longitudinal el refuerzo transversal poco espaciado, que restringe la expansión lateral del hormigón que acompaña al comienzo del aplastamiento, mantiene la integridad del núcleo, permite esfuerzos de compresión más altos y, lo más importante, la zona a compresión soportará mayores deformaciones por compresión antes de que ocurra la falla. El espaciamiento del acero transversal es un punto que se debe tomar en cuenta, pues mientras menor sea este el confinamiento será más efectivo.

RESULTADOS

Después de analizadas todas las corridas en XTRACT se introducen los datos en un Excel para observar con mayor claridad los resultados obtenidos. Estos gráficos se realizaron para los tres tipos de confinamiento, diferentes resistencias, diferentes niveles de carga axial y en este caso para una sola norma ACI 318: 2014.

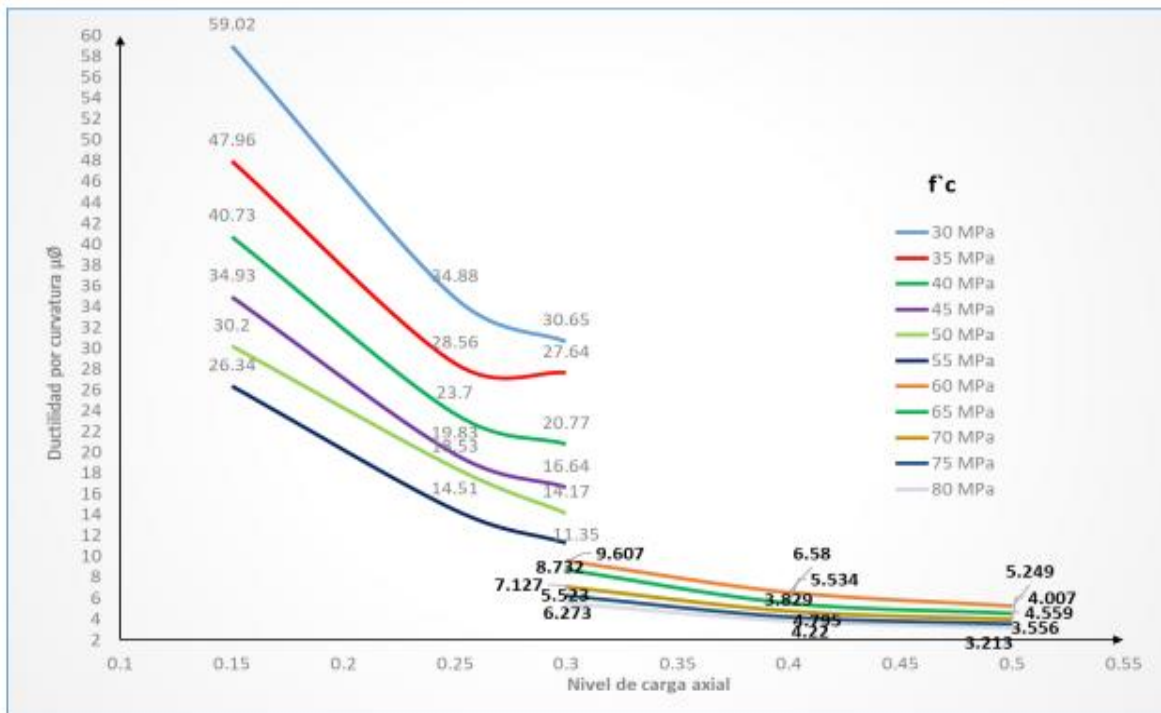


Figura 2 : Influencia del nivel de carga axial en la ductilidad por curvatura en columnas confinamiento alto

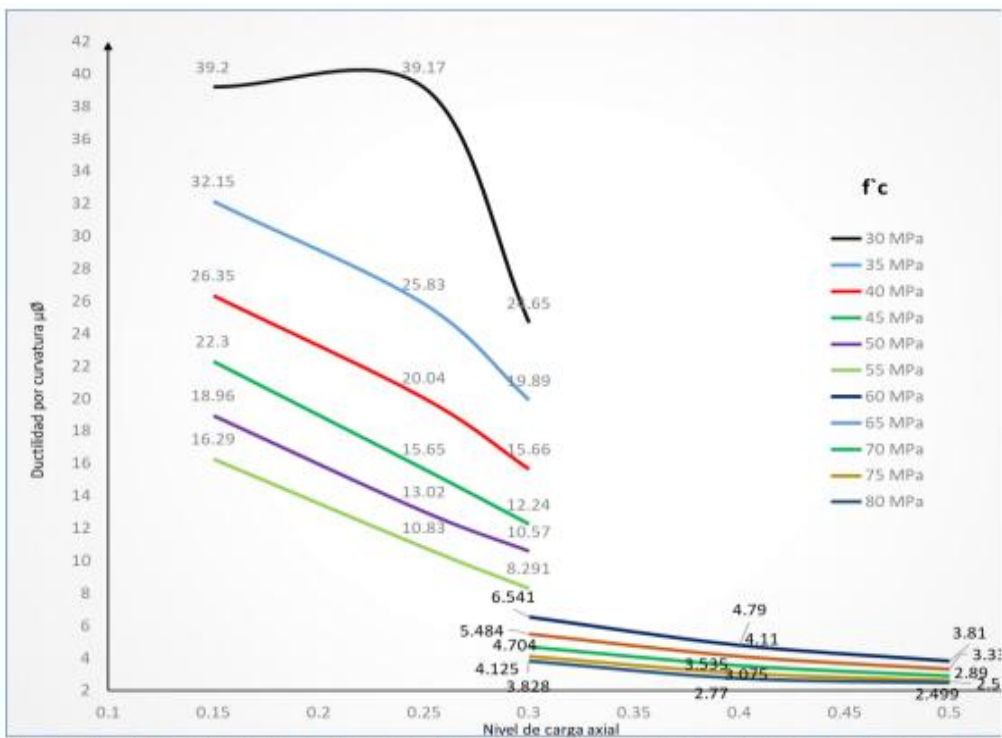


Figura 3 : Influencia del nivel de carga axial en la ductilidad por curvatura en columnas confinamiento medio.

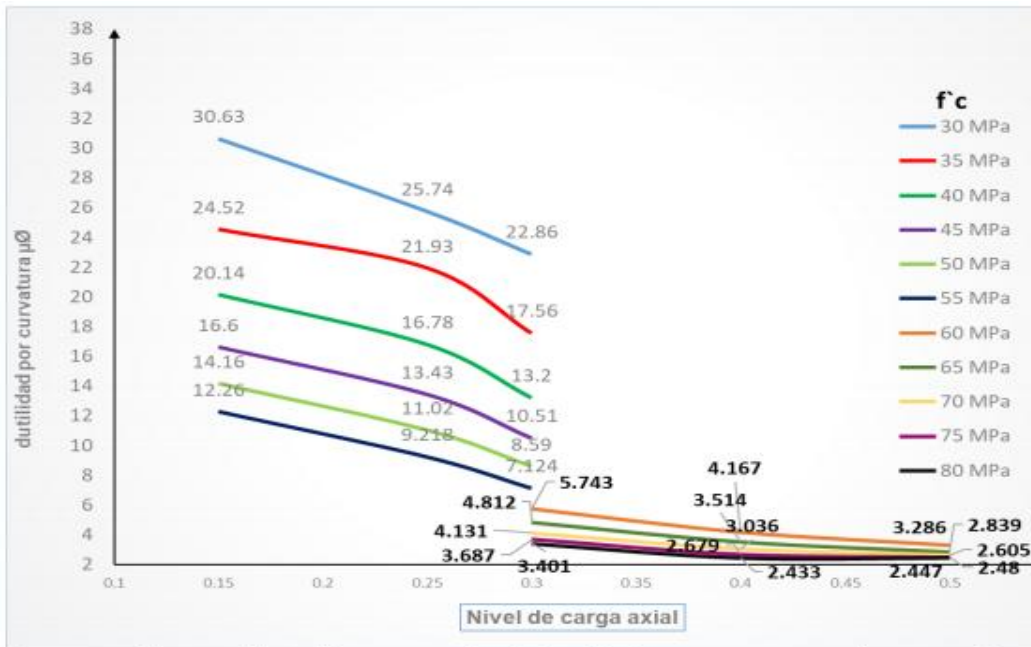


Figura 4 : Influencia del nivel de carga axial en la ductilidad por curvatura en columnas confinamiento bajo.

Los resultados obtenidos demuestran que en la medida que aumenta el nivel de carga axial hay una disminución de la ductilidad. Por cuanto, para el nivel de carga axial de 0.5 los requisitos de acero de confinamiento lateral del código de ACI fueron considerablemente mayores que los códigos NZS para todas las resistencias del hormigón, con el margen de diferencia mayor para hormigones con resistencias superiores. El código de ACI requirió casi dos veces y medio el acero del encierro necesitado por los códigos NZS para 80 MPa para el nivel de carga axial de 0.5. Para el nivel de carga axial de 0.3 las recomendaciones del NZS necesitaron menor área del estribo que el código ACI para resistencia por encima de 50 MPa y ligeramente mayor para superiores resistencias del hormigón.

Influencia de la resistencia en la ductilidad de la sección

Evidentemente con el incremento del uso de los HAR resulta importante verificar el criterio que existe de resultados experimentales de que a medida que los hormigones alcanzan más resistencia a la compresión hay una tendencia a disminuir la ductilidad. Se requiere conocer si realmente con diferentes confinamientos, en este caso con estos tres escogidos, según las especificaciones

de confinamiento que da la norma ACI 318:2014 y NZS 3101:2006, se garantiza el nivel de ductilidad por curvatura deseado para lograr una ductilidad desplazamiento de 18.

Los datos fueron introducidos en un Excel para obtener mayor claridad en los resultados. En este caso se evaluaron dos normas ACI 318:2014 y NZS 3101:2006, diferentes resistencias y tres niveles de carga axial 0.15, 0.3 y 0.5 y se realizaron para el confinamiento alto, pues si para este confinamiento, que es el más exigente, garantiza ductilidad, para los otros se garantiza también.

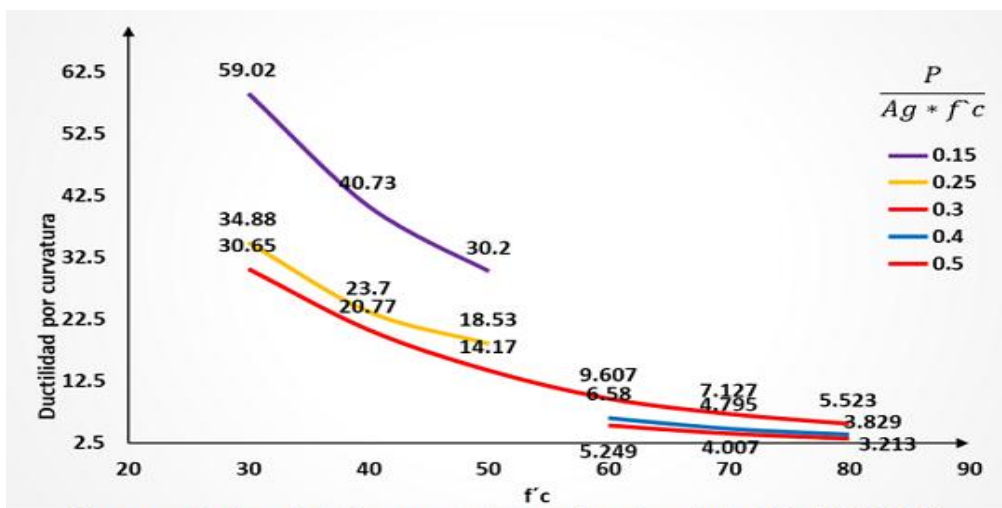


Figura 5 : Influencia del incremento de la resistencia en la ductilidad ACI 318:14

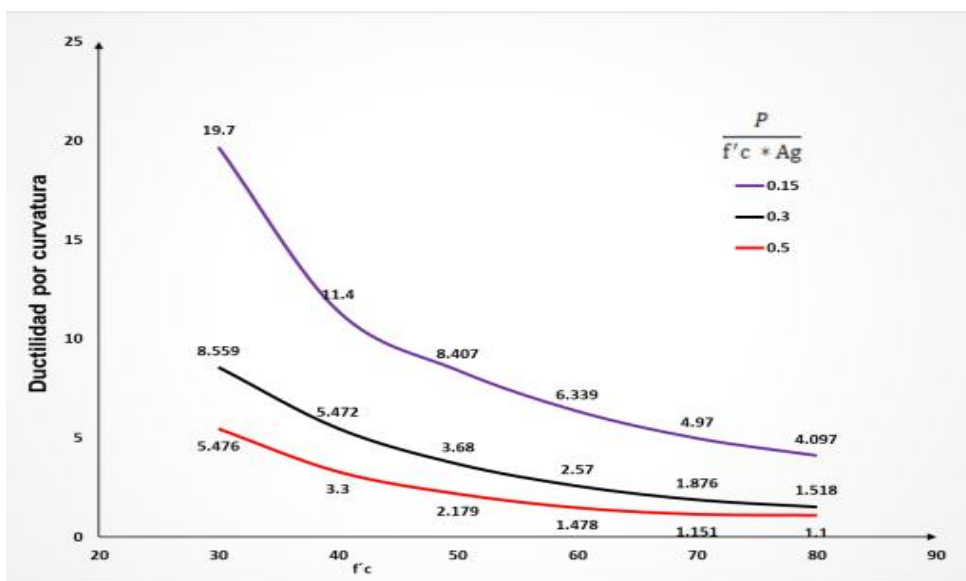


Figura : 6 Influencia del incremento de la resistencia en la ductilidad NZS 3101:2006

En los gráficos se observa que a medida que aumenta la resistencia a la compresión va disminuyendo la ductilidad. La norma de NZS 3101:2006 asume que para estos niveles de carga axial los hormigones convencionales (HC) y los HAR poseen iguales recomendaciones; en cambio, el ACI 318.2014 no lo contempla así y separa estas recomendaciones con las diferentes maneras de cálculo del espaciamiento, que no son las mismas para HC que para HAR. Se nota también que las ductilidades son bajas, lo que se gana en resistencia para disminuir las secciones no garantiza una ductilidad; por tanto, se debe pensar en algunas recomendaciones, como por ejemplo el uso de fibras. Para la misma condición de resistencia, confinamiento y nivel de carga axial se puede concluir que la norma de ACI 318: 2014 garantiza mayor ductilidad, como se evidencia en los gráficos. Esto muestra que las disposiciones de confinamiento del ACI 318: 2014 son mucho mayores que las requeridas para los hormigones convencionales y simplemente suficientes para las resistencias altas del hormigón para nivel de carga axial de 0.3.

Para la resistencia de 70 MPa, confinamiento alto y 0.3 de nivel de carga axial, la ductilidad varía en un 17.76 %, garantizando mayor ductilidad la norma del AC318:2014, por lo que se recomienda cerrar más los recubrimientos, atendiendo a lo que plantea esta norma.

Influencia del confinamiento en la ductilidad

El objetivo del confinamiento es incrementar la resistencia a la compresión y la deformación última del concreto. Se han desarrollado muchas relaciones esfuerzo-deformación para el concreto confinado y la mayoría de ellas son aplicables a un rango restringido de condiciones; por ejemplo: para secciones circulares o rectangulares. El modelo de Mander se publicó en 1988 y es aplicable para todas las formas de secciones y todos los niveles de confinamiento.

En este caso se evaluaron dos normas ACI 318:2014 y NZS 3101:2006, diferentes resistencias y los tres tipos de confinamiento para evaluar su influencia en la ductilidad, como se muestra en el grafico 7.

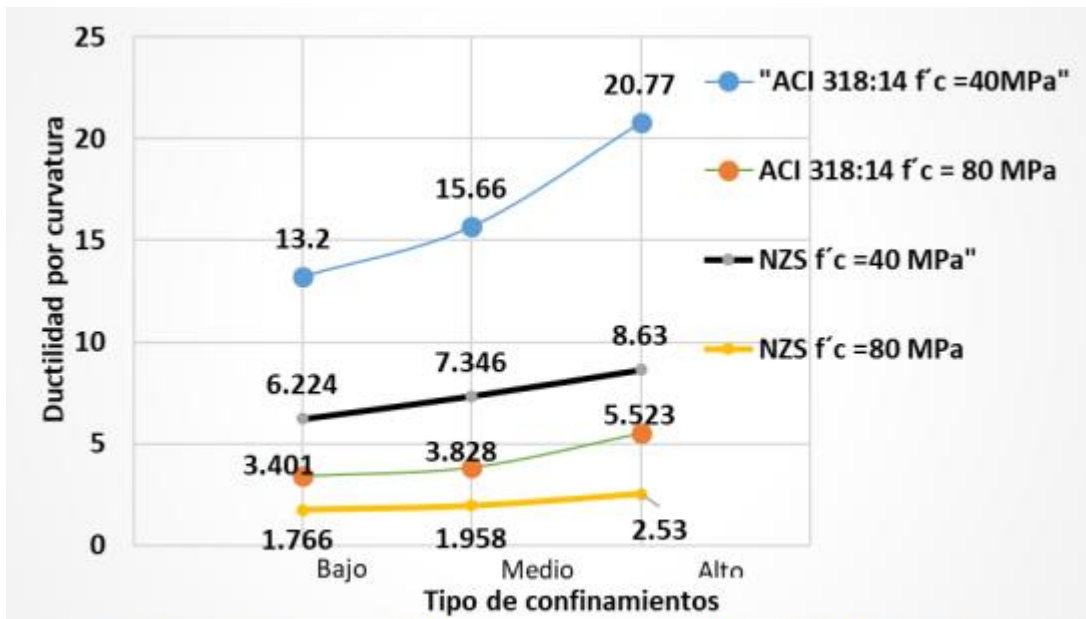


Figura 7 : Influencia del confinamiento en la ductilidad $P/(f'_c \cdot A_g) = 0.3$.

Las secciones de la columna con confinamientos laterales, diseñados según el código de NZS, mostraron menor ductilidad para este nivel de carga axial para todas las resistencias del hormigón. En este caso los factores de ductilidad para secciones de columna de alta resistencia fueron mayores que el mínimo deseado. Esto indica que las recomendaciones de NZS 3101 proporcionan un acero de confinamiento ligeramente menor que el requerido para resistencias bajas para bajos niveles de carga axiales con respecto a la de la ACI.

CONCLUSIONES

En el caso de las columnas el efecto de resistencia del hormigón a la compresión depende de la carga axial. Para estudiar el efecto de la resistencia a compresión del hormigón, la ductilidad por curvatura es representada para diferentes resistencias de hormigón de $f'_c = (30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75) \text{ MPa}$ contra el nivel de carga axial (0.15, 0.25, 0.3, 0.4).

Se observó que en la medida que $P/A_g f'_c$ se incrementa la ductilidad por curvatura μ_ϕ disminuye, para un por ciento de decrecimiento gradual. También puede observarse que para el mismo nivel de carga axial $P/A_g f'_c$ el factor de ductilidad

es más bajo para un hormigón de alta resistencia. Esto es debido a la gradual reducción en la ductilidad del material con el incremento de la resistencia.

En el estudio se observó que en todos los casos la disposición del confinamiento a través del refuerzo transversal representa un medio para mejorar la ductilidad por curvatura de columnas solicitadas a cargas sísmicas. Sin embargo, la efectividad de proporcionar confinamientos generalmente es más alta para hormigones de más baja resistencia (50 y 60 MPa) o para más bajo nivel de carga axial $P/A_g f'_c < 3$. Cuando la resistencia del hormigón y el nivel de carga axial son relativamente altos $f'_c > 60$ MPa y $P/A_g f'_c > 3$ en cuyos casos la ductilidad por curvatura tiende a ser baja, la efectividad del confinamiento estipulado por las normativas es muy bajo. De esta forma es necesario una cantidad de confinamiento mayor para el mejoramiento de la ductilidad. De lo anterior se concluye que los factores que más afectan la ductilidad por curvatura de columnas son la resistencia a compresión del hormigón, el nivel de carga axial y el confinamiento. Sin embargo, sus efectos dependen del modo de fallo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI (American Concrete Institute) Committee 318. (2014). *Building Code Requirements or Structural Concrete (ACI 318-14) and Commentary (ACI 318R-14)*. Farmington Hills, MI.

Kaushik, S. *et al.* (agosto, 2004). Towards the design of ductile reinforced high strength concrete columns. In *29th Conference on our world in concrete & structures*. Singapore.

Legeron, F., & Paultre, P. (2003). Uniaxial Confinement Model for Normal and High Strength Concrete Columns. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 29(2), 241-252.

NZS 3101: Part 1: (2006). *Standards New Zealand, Concrete Structures Standard. and Concrete Structures Standard–Commentary (NZS 3101: Part 2:2006)*. Wellington, New Zealand, 2006.

Recibido: mayo de 2018

Aprobado: septiembre de 2018