

EVALUACION DE LA DUCTILIDAD EN MARCOS DE CONCRETO REFORZADO

Mario Rodríguez*

RESUMEN

Se desarrollan expresiones paramétricas que relacionan ductilidades de curvatura de elementos estructurales en marcos de concreto reforzado con la ductilidad global de desplazamiento en la estructura. Con estas expresiones es posible además evaluar la influencia de diversos parámetros en la mencionada ductilidad.

INTRODUCCION

El criterio comúnmente empleado en investigación para analizar el comportamiento sísmico de estructuras es el efectuar análisis del tipo dinámico no lineal de marcos en el plano, empleando registros sísmicos específicos. Este criterio requiere emplear hipótesis que en algunos casos no representan adecuadamente el comportamiento sísmico de la estructura; así mismo, es evidente que los resultados de este tipo de análisis son aplicables solo para el registro sísmico empleado. Por otro lado, debido a lo laborioso de este procedimiento, en la práctica los estructuristas siguen el criterio estipulado por diversos reglamentos de construcción en zonas sísmicas, lo cual permite reducir las fuerzas sísmicas de diseño correspondientes a un comportamiento elástico, por un factor asociado a la capacidad de ductilidad de desplazamiento de la estructura. Estos factores son propuestos por los reglamentos de construcción en base a diversas características de la estructura y debido a lo complejo del problema no existen aún bases analíticas suficientes que justifiquen los valores de estos factores (ref 1).

Por los motivos anteriores resulta atractivo el emplear criterios analíticos sencillos que de manera racional y empleando hipótesis básicas, permitan evaluar la ductilidad global en estructuras a base de marcos. Ejemplo de este criterio es el propuesto por Park y Paulay (ref 2), el cual se emplea en este trabajo y se basa en el estudio de dos mecanismos básicos de colapso, el de columnas y el de vigas. Este criterio es de aplicación sencilla y permite también evaluar la influencia de diversos parámetros en la respuesta sísmica de marcos de concreto reforzado. En este trabajo se desarrollan expresiones paramétricas que relacionan ductilidades locales en miembros estructurales, en la forma de ductilidades de curvatura, con la ductilidad global de desplazamiento de la estructura.

* Investigador, Instituto de Ingeniería, UNAM

MECANISMO DE COLAPSO DE COLUMNAS.

Si se considera un marco de n niveles, con altura a ejes de entrepiso, l_c , el desplazamiento relativo a la base de el extremo superior del piso r en la condición de primera fluencia, δ_y , puede encontrarse siguiendo la metodología de la ref 2, con lo que se obtiene:

$$\delta_y = l_c^2 / 6 \left| \phi_{c1}(2.25r-1/2) + \phi_{c2}(r-2/3) + \phi_{c3} + \phi_{c4} + \phi_{c5} + \dots + \phi_{cr} \right| \quad (\text{ec } 1)$$

En la expresión anterior ϕ_{ci} es la curvatura en el extremo inferior de la columna del nivel i. A diferencia del desarrollo propuesto en la ref 2, la ec 1 se basa en la hipótesis de puntos de inflexión en columnas a 0.8 l_c para el primer nivel, 0.6 l_c para el segundo nivel, y 0.5 l_c para los niveles restantes. Estos valores intentan representar resultados encontrados en el análisis de algunos marcos de concreto reforzado diseñados de acuerdo a reglamentos de construcción para el DF. Puede demostrarse que si se considera el criterio de puntos de inflexión a mitad de altura de entrepiso, llevaría a demandas de ductilidad algo mayores que con el criterio anteriormente mencionado.

La expresión para la ductilidad de curvatura en el caso del mecanismo de colapso de columnas en el entrepiso i se encuentra siguiendo el procedimiento propuesto en la ref 2, con lo que se obtiene:

$$\phi_{uc} / \phi_{yci} = 1 + (\mu - 1) \frac{\delta_y}{\phi_{yci} l_{pc}^2 \left| l_c / l_{pc} - 1 \right|} \quad (\text{ec } 2)$$

En esta expresión ϕ_{uc} y ϕ_{yci} son las curvaturas última y de fluencia en la articulación plástica de las columnas del entrepiso i. l_{pc} es la longitud de articulación plástica en la columna, y μ es el factor de ductilidad global de desplazamientos. Combinando las ecs (1) y (2) y considerando de manera simplista que la fluencia empieza en las columnas y que éstas en todos los niveles llegan simultáneamente a la fluencia con una curvatura ϕ_{yc} se obtiene:

$$\phi_{uc} / \phi_{yc} = 1 + \left| (\mu - 1) / 6 \right| (4.25r - 19/6) \frac{(l_c / l_{pc})^2}{(l_c / l_{pc} - 1)} \quad (\text{ec } 3)$$

Mecanismo de colapso de vigas.

La ductilidad de desplazamientos, μ , en el extremo superior del entrepiso r está dado por (ref 2):

$$\mu = 1 + r l_c \frac{l_b}{l} \frac{\theta_{pb}}{\delta_y} \quad (\text{ec } 4)$$

l y l_b son las longitudes de la viga medidas a ejes de columnas y entre las articulaciones negativa (lecho inferior en compresión) y positiva respectivamente. La rotación plástica en la viga, θ_{pb} , se define como

$$\theta_{pb} = (\phi_{ub} - \phi_{yb}) l_{pb} \quad (\text{ec } 5)$$

ϕ_{ub} y ϕ_{yb} son respectivamente las curvaturas últimas y de fluencia en la articulación plástica, generalmente asociada a la condición de momento negativo (lecho inferior en compresión). l_{pb} es la longitud de articulación plástica en la viga. La expresión para la ductilidad de curvatura en vigas en la condición del mecanismo de falla de estas se obtiene combinando las ecs (1), (4) y (5) y considerando de manera simplista que los extremos de las columnas tienen la misma curvatura ϕ_{cr} en la condición de fluencia de la estructura:

$$\phi_{ub} / \phi_{yb} = 1 + \frac{\alpha}{6r} (\mu-1) (4.25r-19/6) \frac{l}{l_b} \frac{l_c}{l_{pb}} \quad (\text{ec } 6)$$

en la expresión anterior α relaciona la curvatura de fluencia en la viga con la curvatura de la columna para esta condición, lo que se expresa mediante :

$$\alpha = \phi_{cr} / \phi_{yb} \quad (\text{ec } 7)$$

La expresión para la ductilidad de curvatura en las articulaciones en las bases de columnas en planta baja, para el mecanismo de colapso de vigas se encuentra con un procedimiento análogo al desarrollo anterior, pero empleando la rotación plástica en columnas, θ_{pc} , en vez de θ_{pb} , con lo que se obtiene:

$$\phi_{uc1} / \phi_{yc1} = 1 + \frac{(\mu-1)}{6r} \frac{l_c}{l_{pc}} (4.25r-19/6) \Omega \quad (\text{ec } 8)$$

En esta expresión ϕ_{uc1} y ϕ_{yc1} son las curvaturas últimas y de fluencia en las bases de columnas de planta baja. Ω se define como:

$$\Omega = \phi_{cr} / \phi_{yc1} \quad (\text{ec } 9)$$

APLICACION DE LAS EXPRESIONES OBTENIDAS PARA EVALUAR LA DEMANDA DE DUCTILIDAD EN MARCOS DE CONCRETO REFORZADO

La aplicación de las expresiones anteriores requiere emplear valores para los diversos parámetros involucrados. En base a información existente en la literatura, como en algunas características geométricas típicas de marcos de concreto reforzado construidos en la Ciudad de México, a continuación se comenta los valores que se sugieren para estos parámetros.

La ductilidad global de desplazamientos, μ , requerida se define a mitad de altura del marco (ref 2), lo que se logra mediante la expresión

$$r = 0.5 n \quad (\text{ec } 10)$$

l_{pc} se considera igual a $0.5 h_c$ (ref 3), h_c es el peralte de la

columna. Para l_c se consideraron representativos los valores $5h_c$ y $3h_c$, con lo que la relación l_c/l_{pc} tomo los valores 10 y 6 respectivamente.

Para aplicar la ec (6) se consideró $l_b/l = 3/4$. Como una aproximación razonable a los resultados de la ref 4, la longitud de articulación plástica en trabes se consideró igual a $2/3 h_b$, h_b es el peralte de la trabe. Para esta dimensión se consideró representativo el valor h_c , con lo que la relación l_c/l_{pb} tomó los valores 7.5 y 4.5 respectivamente. Los valores de α y Ω se consideraron de manera simplista igual a 1.

Aplicando los criterios anteriores y las ecs (3), (6) y (8), se evaluaron las demandas de ductilidad de curvatura para los mecanismos de colapso de columnas y vigas asociados a valores para f de 2 y 4. Los resultados se muestran en las figuras 1 a 6, las que indican claramente que las demandas de ductilidad de curvatura en vigas y en bases de columnas para el mecanismo de colapso de vigas (Figs 3 a 6) son bastante menores que las demandas de ductilidad de curvatura correspondientes al mecanismo de colapso de columnas (Figs 1 y 2). Esto apoya el criterio comúnmente empleado en reglamentos de construcción en zonas sísmicas de evitar este último tipo de mecanismo.

También estos resultados indican que para lograr una misma ductilidad global de desplazamientos en estructuras con las mismas características pero con diferentes relaciones de esbeltez en columnas, las demandas de ductilidad local en los elementos estructurales son aproximadamente proporcionales a estas relaciones de esbeltez, lo que indica características indeseables en marcos con columnas esbeltas.

La relación entre ductilidad y capacidad de disipación de energía histerética merece un comentario especial. Puede demostrarse empleando la definición básica del término ductilidad, para la condición de cargas monótonas crecientes, que a igualdad de resistencia y ductilidad las estructuras flexibles tienen mayor capacidad de disipación de energía histerética respecto a la de las estructuras rígidas (Paulay y Park, ref 5, para demostrar lo anterior han desarrollado expresiones que relacionan la ductilidad de desplazamiento de estructuras elastoplásticas de un grado de libertad con la energía histerética correspondiente). Esto indica que para lograr la misma disipación de energía histerética en estructuras con la misma resistencia, las demandas de ductilidad en estructuras flexibles son menores que las de las estructuras rígidas. Lo anterior muestra que la ductilidad no es un parámetro suficiente para definir la respuesta sísmica de la estructura, lo cual debe tomarse en cuenta en el empleo de este parámetro. Por otro lado, una característica indeseable de las estructuras flexibles se demuestra con el siguiente argumento. A igualdad de resistencia y ductilidad de una estructura rígida y una flexible, en esta última estructura se requieren deformaciones mayores que en la primera y por consiguiente los daños en esta estructura serían mayores, como se observó en un número importante de casos durante el terremoto de Septiembre de 1985 en México. En opinión del autor esto debe llevar a limitar el empleo de estructuras flexibles.

CONCLUSIONES

En este trabajo se aplican procedimientos simplificados propuestos en la literatura y se desarrollan expresiones paramétricas que relacionan ductilidades de curvatura de elementos estructurales en marcos de concreto reforzado con la ductilidad global de desplazamiento en la estructura. Así mismo, con el propósito de aplicar estas expresiones paramétricas se sugieren valores típicos para algunos de estos parámetros. Mediante el empleo de estas expresiones es posible evaluar no solo la ductilidad global de desplazamiento en la estructura, sino también evaluar la influencia de diversos parámetros en la mencionada ductilidad.

AGRADECIMIENTOS

Parte de este artículo fue desarrollado por el autor durante su año sabático transcurrido en el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Canterbury, Nueva Zelandia, por lo que agradece a esta Universidad el apoyo proporcionado.

REFERENCIAS

- 1) Bertero, V.V., "Lessons Learned from Recent Earthquakes and Research and Implications for Earthquake-Resistant Design of Buildings Structures in the United States", Earthquake Spectra Journal, Vol 2 (4), 1986.
- 2) Park R. y Paulay T., "Reinforced Concrete Structures", J.Wiley & Sons, 1974.
- 3) Priestley M.J.N. y Park R., "Strength and Ductility of Concrete Bridge Columns Under Seismic Loading", ACI Structural Journal, Enero-Febrero 1987, pp61-76.
- 4) Corley G., "Rotational Capacity of Reinforced Concrete Beams", Journal of the Structural Division, ASCE, Octubre 1966, pp 121-146
- 5) Paulay T. y Park R., "Joints in Reinforced Concrete Frames Designed for Earthquake Resistance", Report 84-9, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, Nueva Zelandia, Junio 1984.

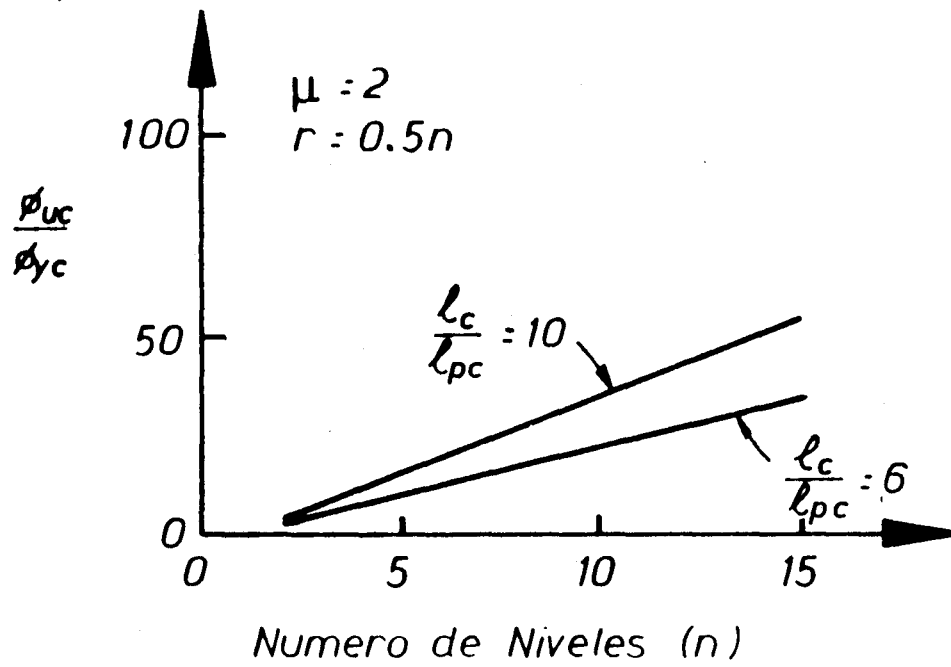


Fig 1 Demandas de ductilidad de curvatura para el mecanismo de colapso de columnas ($\mu=2$)

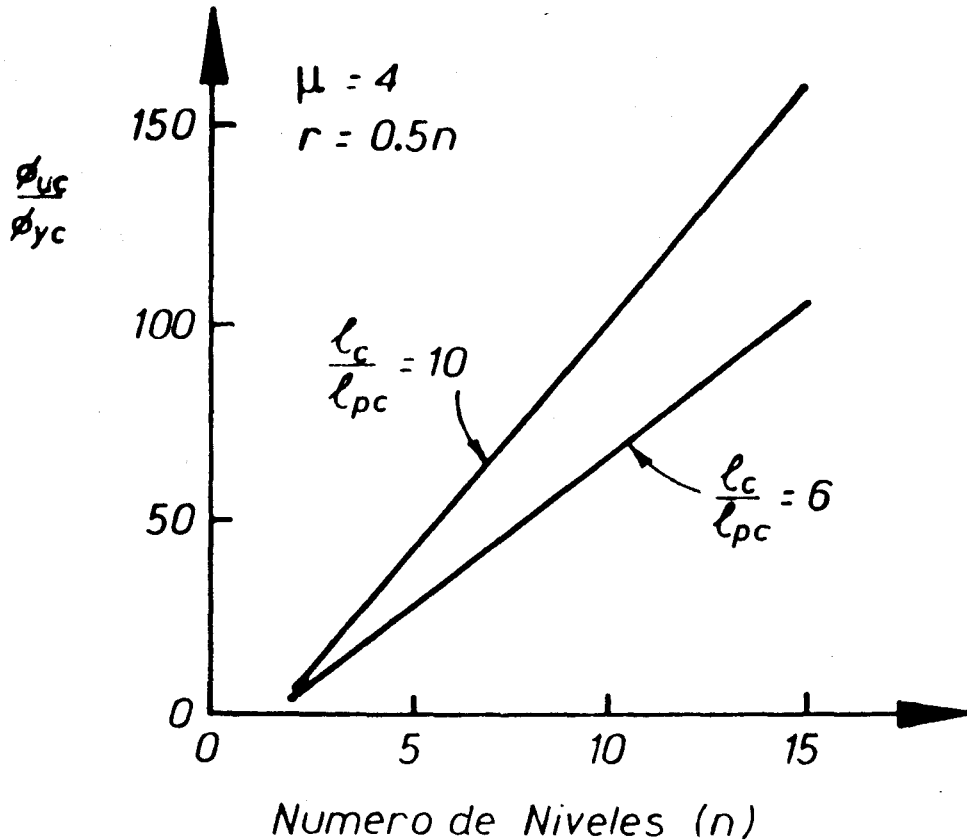


Fig 2 Demandas de ductilidad de curvatura para el mecanismo de colapso de columnas ($\mu=4$)

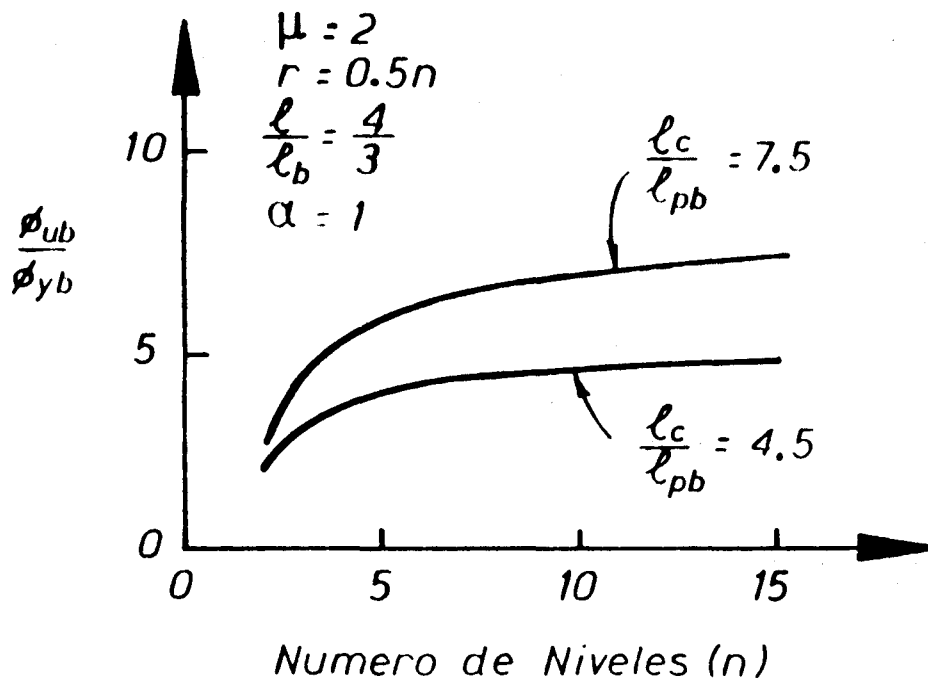


Fig 3 Demandas de ductilidad de curvatura en vigas para el mecanismo de colapso de vigas ($\mu=2$)

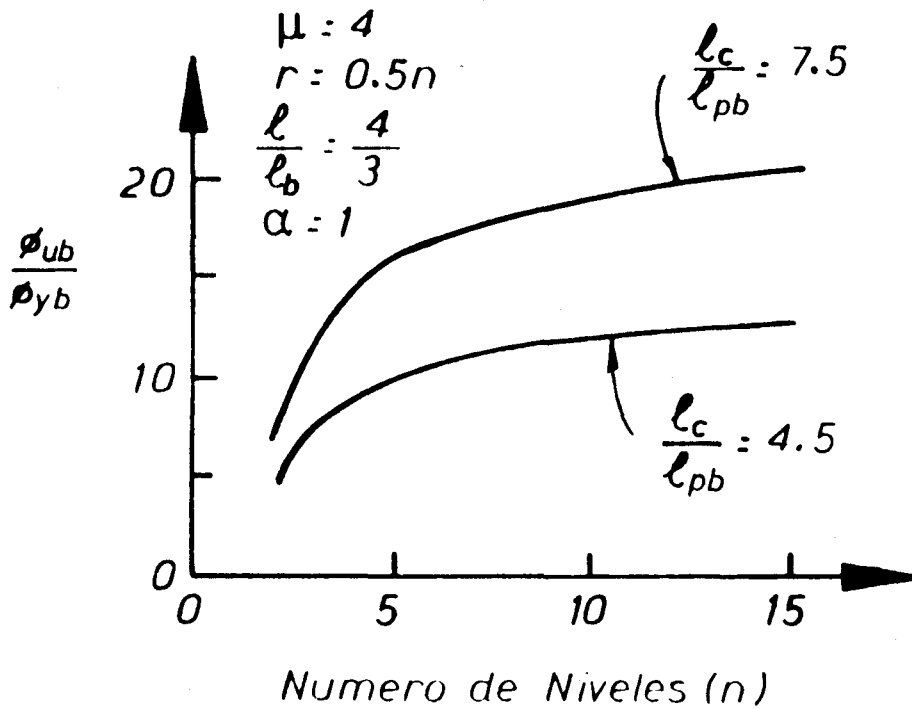


Fig 4 Demandas de ductilidad de curvatura en vigas para el mecanismo de colapso de vigas ($\mu=4$)

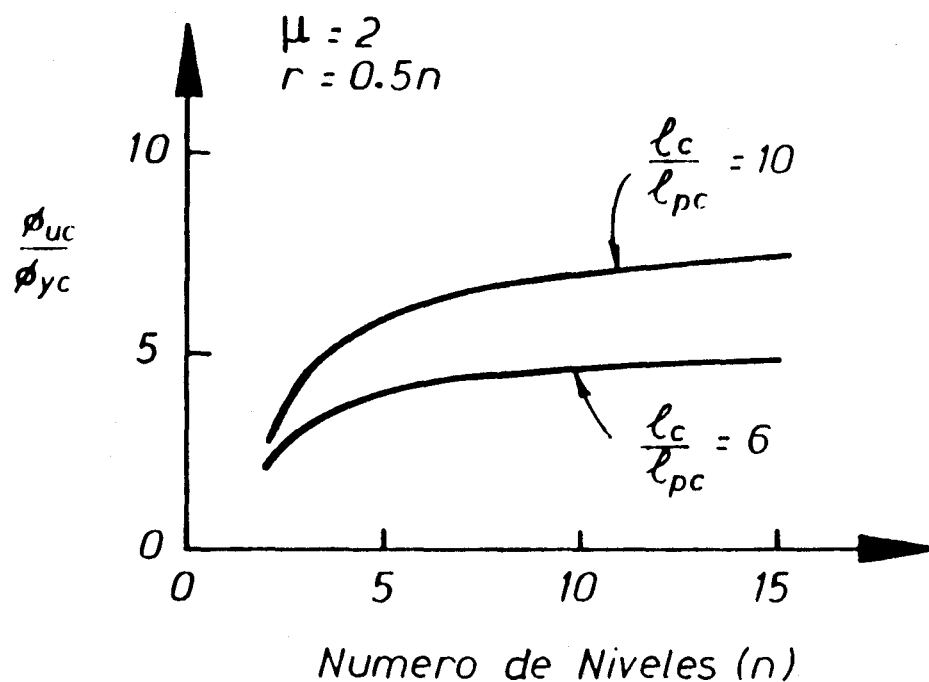


Fig 5 Demandas de ductilidad de curvatura en base de columnas para el mecanismo de colapso de vigas ($\mu=2$)

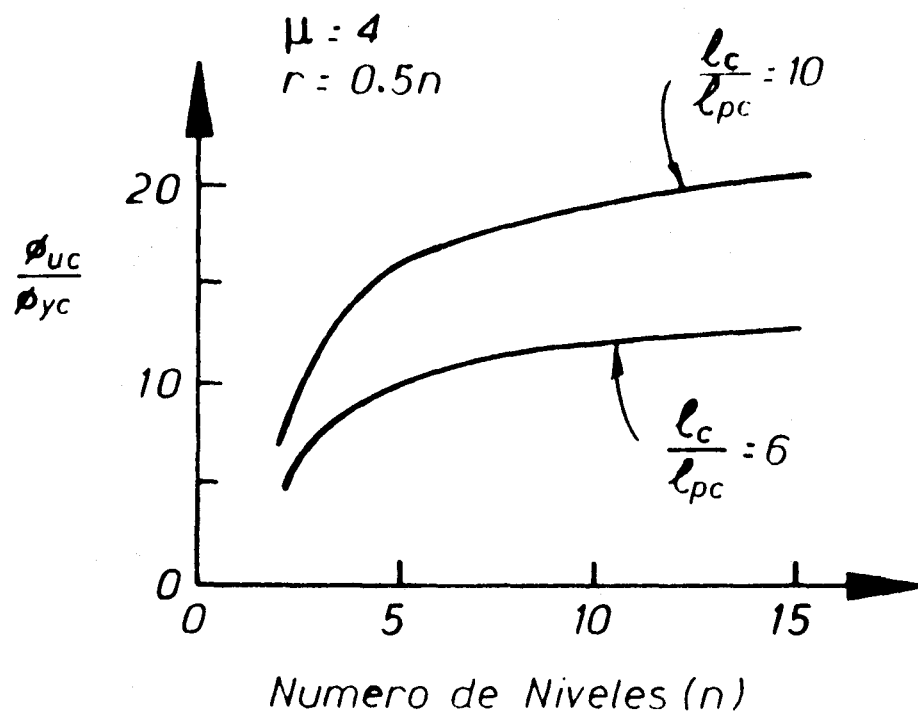


Fig 6 Demandas de ductilidad de curvatura en base de columnas para el mecanismo de colapso de viga ($\mu=4$)