



## ANEXO II

# ANÁLISIS DE COLUMNAS ESBELTAS SOMETIDAS A FLEXOCOMPRESIÓN

### A 2.1 INTRODUCCIÓN

Las columnas se pueden clasificar, de acuerdo a sus dimensiones (sección y altura) y condiciones de borde, en columnas no esbeltas y columnas esbeltas. Una columna no esbelta es aquella en la cual su carga última, para una excentricidad dada, está gobernada solamente por la resistencia de los materiales y las dimensiones de la sección. En otras palabras, el diagrama de interacción M-P obtenido a partir de las dimensiones y del contenido de armadura de la sección transversal es suficiente para determinar la resistencia nominal de la columna en flexo-compresión. Una columna es esbelta cuando la carga última que puede soportar está influenciada además por la esbeltez, la cual produce un momento adicional debido a deformaciones transversales.

### A 2.2 FACTORES QUE AFECTAN EL COMPORTAMIENTO DE LAS COLUMNAS ESBELTAS

Los factores de mayor importancia son:

1. La relación entre la altura libre de la columna y la profundidad de la sección en la dirección posible de pandeo,  $L_u/d$ .
2. Las excentricidades  $e/h$  ( $e=M/P$ ), de extremos de columna y el signo de las mismas.
3. El grado de restricción rotacional en los extremos del pilar. Mientras más rígida la viga de conexión, menor posibilidad de reducción de la capacidad última  $P_u$ .
4. La flexibilidad lateral. Una columna con desplazamientos relativos de sus extremos sufre una reducción de  $P_u$  mayor que aquella en la que sus nudos se mantienen sobre la misma vertical.
5. El contenido de acero y la resistencia de los materiales. Esto afecta la resistencia y por ende la rigidez a flexión de la sección de la columna.





6. La duración de la carga. La deformación diferida del hormigón aumenta las deformaciones de la columna, crece su flexibilidad y disminuye entonces  $P_u$ .

Las consideraciones teóricas que están relacionadas con el comportamiento de columnas esbeltas constituyen un problema bastante complejo. Las disposiciones del ACI-318 que son las que adopta el CIRSOC 201-05 se basan en las consideraciones y ecuaciones antes presentadas. De alguna manera, éstas tienen en cuenta las complejidades asociadas al hecho de que el hormigón no es un material elástico, que la fisuración a tracción modifica las condiciones de rigidez y que bajo carga sostenida en el tiempo, efecto de cargas de larga duración, el flujo plástico aumenta las deflexiones a corto plazo, lo cual provoca variaciones y redistribuciones en los esfuerzos internos. El empleo de hormigones y armaduras de mayor resistencia, acompañado de métodos de diseño y análisis más precisos lleva a la posibilidad de diseñar secciones de hormigón armado más pequeñas y por lo tanto más esbeltas. La necesidad de procedimientos de diseño confiables y racionales para columnas esbeltas se convierte así en una consideración importante en el diseño de columnas. El CIRSOC 201-05 en C.10.10.1 aclara las limitaciones que existen para aplicar los métodos avanzados de diseño y análisis, en las cuales incluso menciona que se debe mostrar evidencia de los resultados de ensayos sobre columnas esbeltas en sistemas planos indesplazables, en sistemas desplazables y en pórticos con columnas de diferentes rigideces. Programas computacionales de amplio uso en el medio como SAP 2000 tienen opciones incluidas para considerar los efectos de segundo orden. La alternativa a los análisis avanzados de segundo orden es el método de amplificación de momentos.

### A 2.3 CRITERIO DEL CIRSOC 201-05 - PÓRTICOS DESPLAZABLES E INDESPLAZABLES

Existe una gran diferencia de comportamiento que poseen las columnas de pórticos desplazables con respecto a indesplazables. Por ello el CIRSOC 201-05 especifica previsiones separadas para pórticos indesplazables a partir de su sección 10.12, y otras para pórticos desplazables a partir de la sección 10.13. No existen en la realidad estructuras extremadamente rígidas o flexibles. Se dan casos intermedios, y lo que el diseñador debe verificar es si, por ejemplo, a través de los muros estructurales dispuestos en todo el edificio, los núcleos rígidos de escaleras y ascensores, o estructuras de rigidización especialmente dispuestas, son suficientes para mantener los desplazamientos por debajo de ciertos límites. La norma aclara que el análisis de primer orden es un análisis elástico que no incluye las variaciones en los esfuerzos internos que se originan por las deformaciones. En la sección 10.4.2 da una alternativa a partir de evaluar lo que llama índice de estabilidad de un piso, designado como  $Q$ , al cual corresponde:

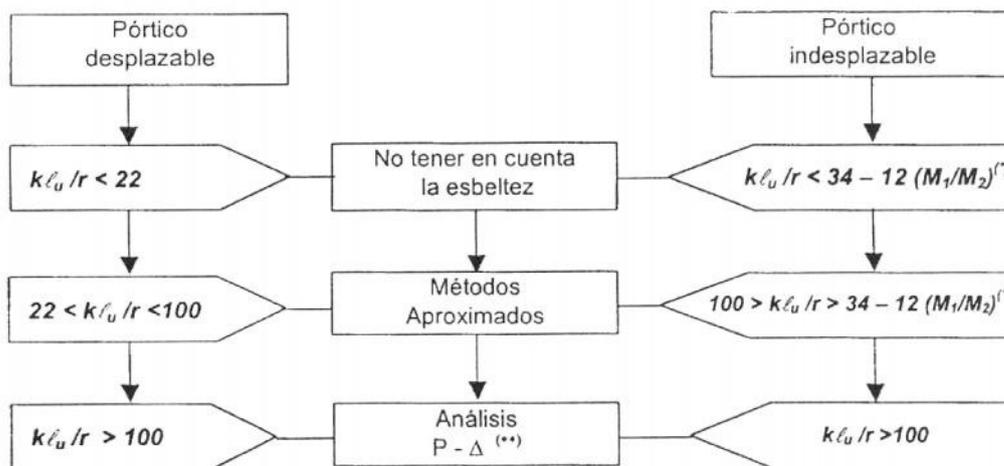
$$Q = \frac{\sum P_u \Delta_u}{V_u l_c}$$



Esta expresión no es aplicable si  $V_u = 0$ . El CIRSOC 201-05 en su comentario C.10.13.6 dice que los valores de  $V_u$  y  $\Delta_0$  utilizados para calcular  $Q$  se pueden obtener a partir de cualquier conjunto real o supuesto arbitrario de cargas horizontales. Obviamente las deflexiones utilizadas deben corresponder a ese corte  $V_u$ . La citada norma establece, sección 10.11, que para obtener las solicitaciones, momentos, axiales, cortes, y cuando sea necesario determinar los desplazamientos de piso, se puede utilizar el análisis de primer orden pero hay que tener en cuenta efectos de fisuración, cargas de larga duración, fluencia lenta o deformación por cargas de larga duración que en forma efectiva reducen el valor del módulo  $E$ . Además, se deben considerar los efectos de las diferentes cuantías de acero que tengan las secciones de hormigón. Como alternativa, la norma da una tabla para afectar las propiedades de las secciones.

#### A 2.4 CRITERIO DEL CIRSOC 201-05 PARA TENER EN CUENTA O IGNORAR LA ESBELTEZ

El CIRSOC 201-05 indica tres situaciones muy claras con relación al grado de esbeltez y que quedan resumidas en la Fig. A.1 obtenida de la sección 10.13.7.



(\*)  $34 - 12 (M_1 / M_2) < 40$

(\*\*) Se permite para cualquier relación de esbeltez

Fig. A.1 Criterio del CIRSOC201-05 para esbeltez.

#### A 2.5 DISEÑO DE COLUMNAS ESBELTAS. CRITERIOS

Como se expresó, en la práctica hay dos formas de abordar el problema del diseño de columnas esbeltas:

1. Utilizando un método "exacto", o bien

2. Usando algún método aproximado.

En el primer caso se debe utilizar un método de análisis que tenga en cuenta:

1. La rigidez real de los elementos estructurales.
2. Los efectos de las deformaciones en el valor de las solicitaciones internas.
3. El efecto de la duración de las cargas.

Este tipo de análisis, por ya incluir los efectos de segundo orden, arrojará las solicitaciones internas finales (momentos, cortes, axiales) con los cuales las secciones pueden ser diseñadas sin necesidad de corrección posterior alguna. Sin embargo este procedimiento es muy complejo (depende por supuesto de la estructura en estudio), requiere un soporte computacional de importancia y su rigurosa aplicación no siempre es necesaria. Como depende de una buena modelación, como siempre, la sofisticación de los métodos de análisis no asegura resultados indiscutibles. Como alternativa, los métodos aproximados se basan en obtener las solicitaciones a través de un análisis estructural convencional de primer orden, y luego las secciones son dimensionadas para resistir acciones modificadas (mayoradas) que tienen en cuenta en forma aproximada el efecto de las deformaciones en las solicitaciones reales de la estructura. El método más comúnmente utilizados son los dados por el código ACI-318.

## A 2.6 PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL CÓDIGO ACI-318-05 y CIRSOC 201-05 EL MÉTODO DE LA MAGNIFICACIÓN DE MOMENTOS

El método parte de las solicitaciones obtenidas por medio de un análisis estructural de primer orden. A posteriori, el momento último de diseño se magnificará con un factor  $\delta$  que tendrá en cuenta los efectos de segundo orden.

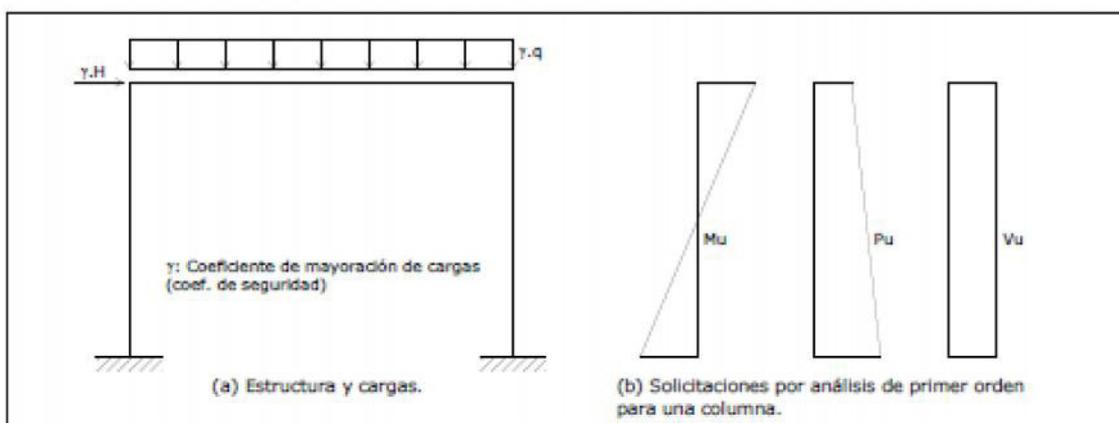
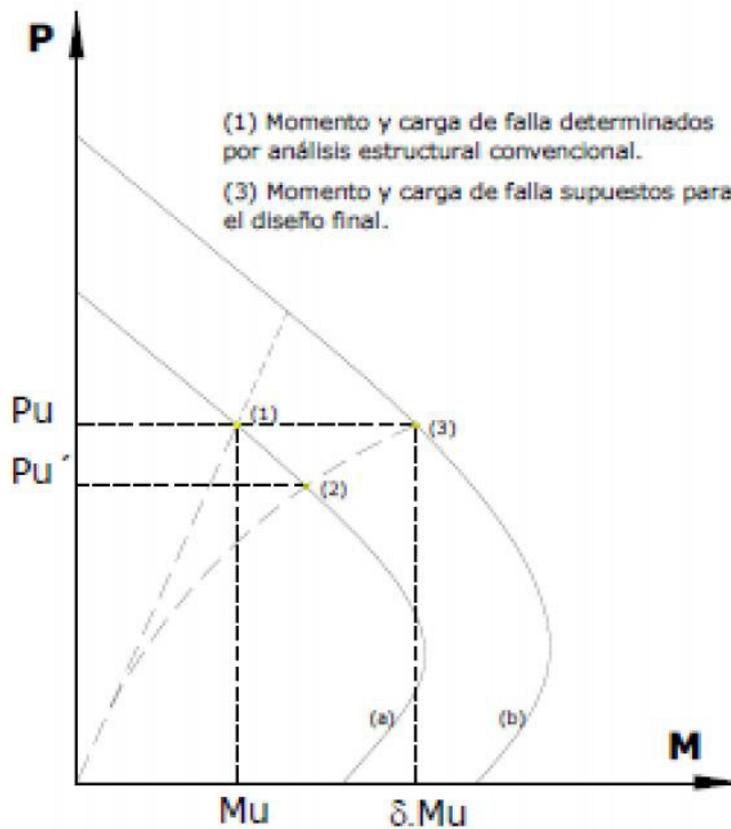


Fig. A.2



Supongamos la estructura simple de la Fig. A 2.2. La columna de la derecha, por ejemplo, tendrá como solicitaciones últimas de primer orden el axial  $P_u$  y el momento  $M_u = P_u \cdot e$ . Los fundamentos en los que se apoya el método de magnificación de momento del ACI-318 quedan ilustrados en la figura Fig. A 2.3. Se supone que la columna es esbelta y por tanto que el método es de aplicación.



El método consiste en encontrar un factor  $\delta$  de magnificación del momento  $M_u$  para que  $\delta M_u$  y  $P_u$  sean el par de solicitaciones últimas para el diseño del pilar. Esto implicará que será necesario utilizar una sección de hormigón armado tal que le corresponda el mismo valor  $P_u$  como capacidad axial de columna y un momento último  $\delta M_u$ , donde  $\delta > 1,0$ . En otras palabras, una sección de hormigón armado a la que le corresponda un diagrama de interacción  $M-P$  como el (b) de Fig. A 2.3, donde la rotura de la columna se alcance en correspondencia con el punto (3) del citado diagrama  $M-P$  que es el que finalmente se usará en la verificación del diseño de la pieza.



---

El método en su aplicación es bastante simple e involucra tres pasos:

1. obtención de las solicitaciones últimas  $M_u$  y  $P_u$ , usando teoría de primer orden.
2. calcular  $\delta$ , coeficiente de mayoración de  $M_u$ .
3. diseñar para las solicitaciones  $P_u$  y  $\delta M_u$ .

Donde el factor de magnificación de momento  $\delta$  se designa como  $\delta_{ns}$  para el caso de pórticos indesplazables y  $\delta_s$  para pórticos desplazables, ya que el método es válido para ambos casos, y el CIRSOC 201-05 los trata en forma separada.

