

DISEÑO POR CAPACIDAD EN VIGAS CON RÓTULAS UNIDIRECCIONALES: CORTE REQUERIDO Y SOBRERRESISTENCIA

Correa Medina, Pablo J. M.^a, Aráoz, Gabriel F.^b

^a Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – UNT, pjmcorrea@herrera.unt.edu.ar

^b Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología – UNT – Instituto de Estructuras (IE),
garaoz@herrera.unt.edu.ar

Palabras clave: Rótulas unidireccionales, Diseño por capacidad, Sobrerresistencia

RESUMEN

De acuerdo con el reglamento INPRES-CIRSOC 103, la adopción del mecanismo de colapso, o configuración de rótulas plásticas, en pórticos sismorresistentes depende de la predominancia de cargas gravitatorias o sísmicas.

Cuando las acciones gravitatorias predominan sobre las sísmicas, surge una particularidad crítica en los momentos en vigas: la sección de momento máximo positivo se desplaza desde la cara de la columna hacia el tramo de la viga. Este fenómeno induce la formación de rótulas unidireccionales, alterando las hipótesis convencionales del diseño por capacidad para rótulas reversibles.

El presente trabajo analiza la evolución de la posición del momento máximo positivo considerando los estados de fluencia y sobrerresistencia del acero (λ_o). Se desarrolla una metodología para determinar los esfuerzos de corte requeridos y el factor de sobrerresistencia flexional (ϕ_b^o) en vigas, parámetros esenciales para garantizar la jerarquía de diseño en columnas.

ABSTRACT

According to INPRES-CIRSOC 103 code, the collapse mechanism, or plastic hinge configuration for earthquake-resistant frames, depends on predominance of gravity or seismic loads.

When gravity loads predominate over seismic loads, a critical feature emerges in beam moments: the section of maximum positive moment shifts from the face of the column toward the beam span. This phenomenon induces one-way hinges development, challenging conventional capacity design assumptions for reversible hinges.

This paper analyzes the evolution of the maximum positive moment position, accounting for both yielding and steel overstrength (λ_o) stages. A methodology is developed to determine required shear forces and the flexural overstrength factor (ϕ_b^o) in beams, crucial parameters for ensuring column design hierarchy.

1. INTRODUCCIÓN

La normativa argentina para construcciones sismorresistentes de hormigón armado, reglamentos INPRES-CIRSOC 103 Parte I (2018) y Parte II (2021) ^[1] ^[2], contempla la posibilidad de adoptar respuestas estructurales con distintos niveles de ductilidad.

Para el diseño dúctil se considera la filosofía de diseño por capacidad ^[3], que implica la formación controlada de rótulas plásticas en zonas predefinidas a fin de disipar la energía sísmica a través de la deformación inelástica y la sobrerresistencia del acero.

El punto de partida, entonces, consiste en definir la configuración de rótulas plásticas (mecanismo de colapso) para la estructura a diseñar, basándose en la flexión como fuente de disipación de energía.

La ubicación de las zonas de formación potencial de rótulas plásticas (ZFPRP) depende de la predominancia de cargas gravitatorias o sísmicas. En el caso de pórticos de hormigón armado, este análisis se realiza a partir de la evaluación de los diagramas de momentos flectores en vigas.

Cuando predominan las acciones sísmicas, las secciones críticas se ubican en caras de columnas, induciendo la formación de rótulas reversibles en vigas. Este caso se encuentra desarrollado en el “Ejemplo de diseño sísmico de un edificio estructurado con pórticos de hormigón armado” del reglamento INPRES CIRSOC 103 ^[4], y corresponde al mecanismo de “viga débil y columna fuerte”, es decir, rótulas en extremos de vigas y en base de columnas del nivel inferior.

Por otro lado, cuando las acciones gravitatorias son predominantes, la sección de momento máximo positivo se desplaza desde la cara de la columna hacia el tramo de la viga. Este fenómeno induce la formación de rótulas unidireccionales, cuyos requerimientos reglamentarios difieren del caso anterior.

La separación requerida para prevenir el pandeo de las barras que fluyen en tracción y compresión como consecuencia de la reversión de momentos (rótulas reversibles), es menor que para las barras que sólo fluyen en compresión con flexión monótona (rótulas unidireccionales), ya que el efecto Bauschinger causa una reducción del límite de proporcionalidad cuando cambia la dirección del esfuerzo.

Asimismo, la longitud de la zona de rótula plástica será mayor en el caso de rótulas unidireccionales debido al cambio de ubicación del máximo momento positivo al incursionar en el comportamiento dúctil.

En la figura 1 se muestran esquemáticamente las diferencias en los diagramas de momento y los patrones de fisuración correspondientes a cada caso.

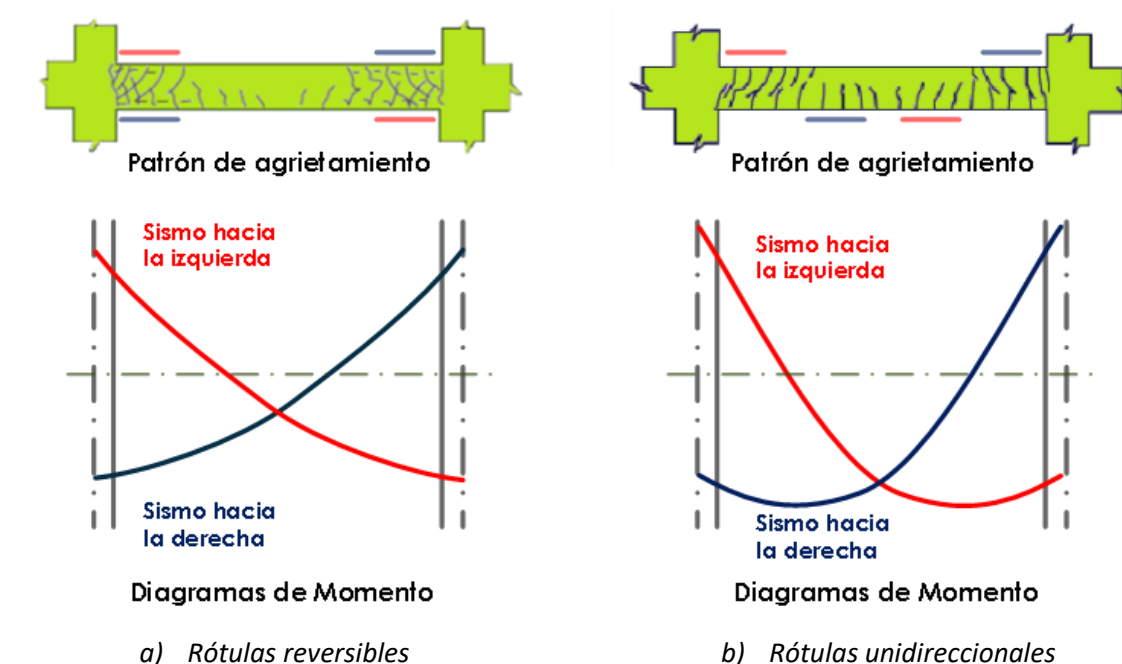


Figura 1. Tipos de rótulas en vigas

En el presente trabajo se estudia la evolución de la posición del momento máximo positivo, considerando los estados de fluencia y la sobrerresistencia del acero.

Finalmente, se desarrolla una metodología para determinar los esfuerzos de corte requeridos y el factor de sobrerresistencia flexional ϕ_b^o en vigas, parámetros que permiten garantizar la jerarquía de diseño entre vigas y columnas.

2. EVOLUCIÓN DE LA SECCIÓN CRÍTICA PARA MOMENTO MÁXIMO POSITIVO

A fin de evaluar el cambio en la posición del momento máximo positivo por efecto de la respuesta inelástica, se considera un tramo de viga continua, esquematizada en la figura 2.a. Partiendo del análisis de los momentos originados por las combinaciones de cargas gravitatorias y acciones sísmicas ($D + f_1 L + f_2 S \pm E_v \pm E_h$), y suponiendo la predominancia de cargas gravitatorias, se observan los valores máximos de momento negativo en un extremo y positivo en el tramo.

La ubicación de la sección crítica para el momento positivo L_x , medida desde el extremo derecho, se puede determinar a partir del diagrama de cuerpo libre del sector derecho, en el cual se aplican los momentos máximos en extremos y la carga distribuida q que considera sólo las cargas verticales ($D + f_1 L + f_2 S \pm E_v$). Esto se representa esquemáticamente en la figura 2.b. El corte $V_{u,t}$ en coincidencia con el momento positivo $M_{u,t}^{(+)}$ será nulo por la condición de máximo momento.

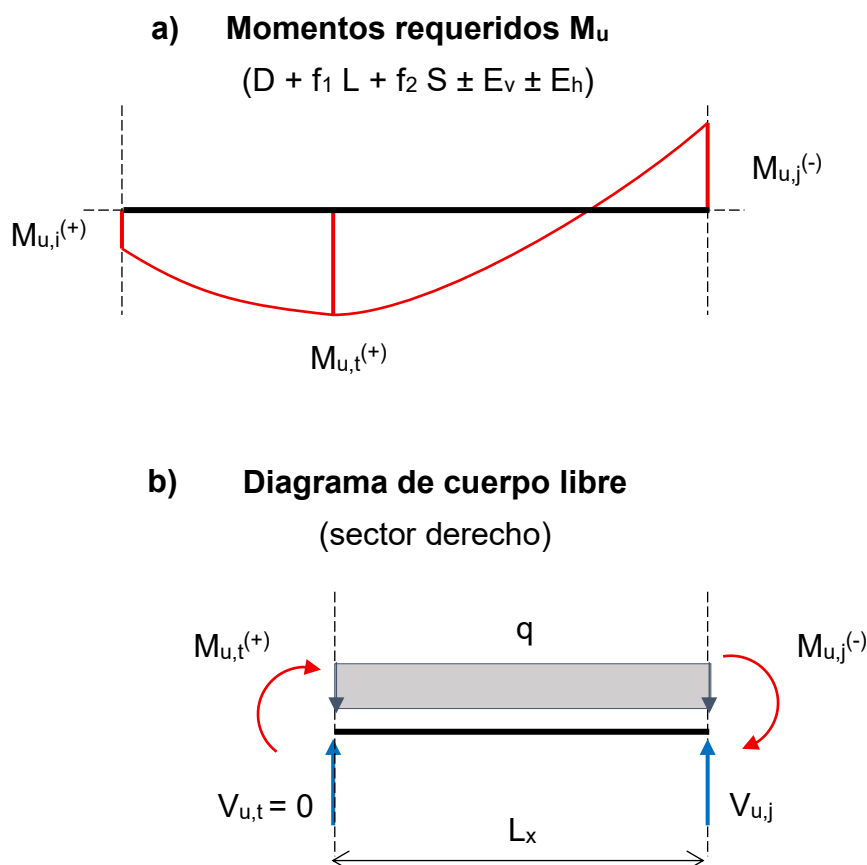


Figura 2. Momentos requeridos en viga y diagrama de cuerpo libre

La longitud L_x se puede determinar a partir del equilibrio de momentos en el extremo derecho, esto es:

$$M_{u,t}^{(+)} - q \frac{(L_x)^2}{2} - M_{u,j}^{(-)} = 0 \quad \rightarrow \quad L_x = \sqrt{\frac{2}{q} (M_{u,t}^{(+)} - M_{u,j}^{(-)})} \quad (1)$$

El diseño de armaduras longitudinales se realiza a fin de cubrir los momentos máximos en apoyos (momento negativo $M_u^{(-)}$) y en tramo (momentos positivos $M_u^{(+)}$), de tal manera que, en cada caso, el momento de diseño M_d sea superior, y lo más cercanos posible, al momento requerido M_u , esto es:

$$M_d = \phi M_n \geq M_u \quad \rightarrow \quad M_n \approx M_u / \phi \quad (2)$$

Se debe evitar el sobredimensionado de estas armaduras, ya que implica mayores esfuerzos por sobrerresistencia que deberán contemplarse para prevenir los modos de falla no deseados y garantizar el comportamiento elástico fuera de las zonas de rótulas plásticas.

Al considerar capacidad flexional con sobrerresistencia en ambas secciones, multiplicando los momentos nominales por el factor de sobrerresistencia $\lambda_0 = 1,40$, la ubicación de la sección de máximo momento positivo se desplazará una distancia $\Delta_{RT} = L_{x0} - L_{xn}$. Esto se representa esquemáticamente en la figura 3.

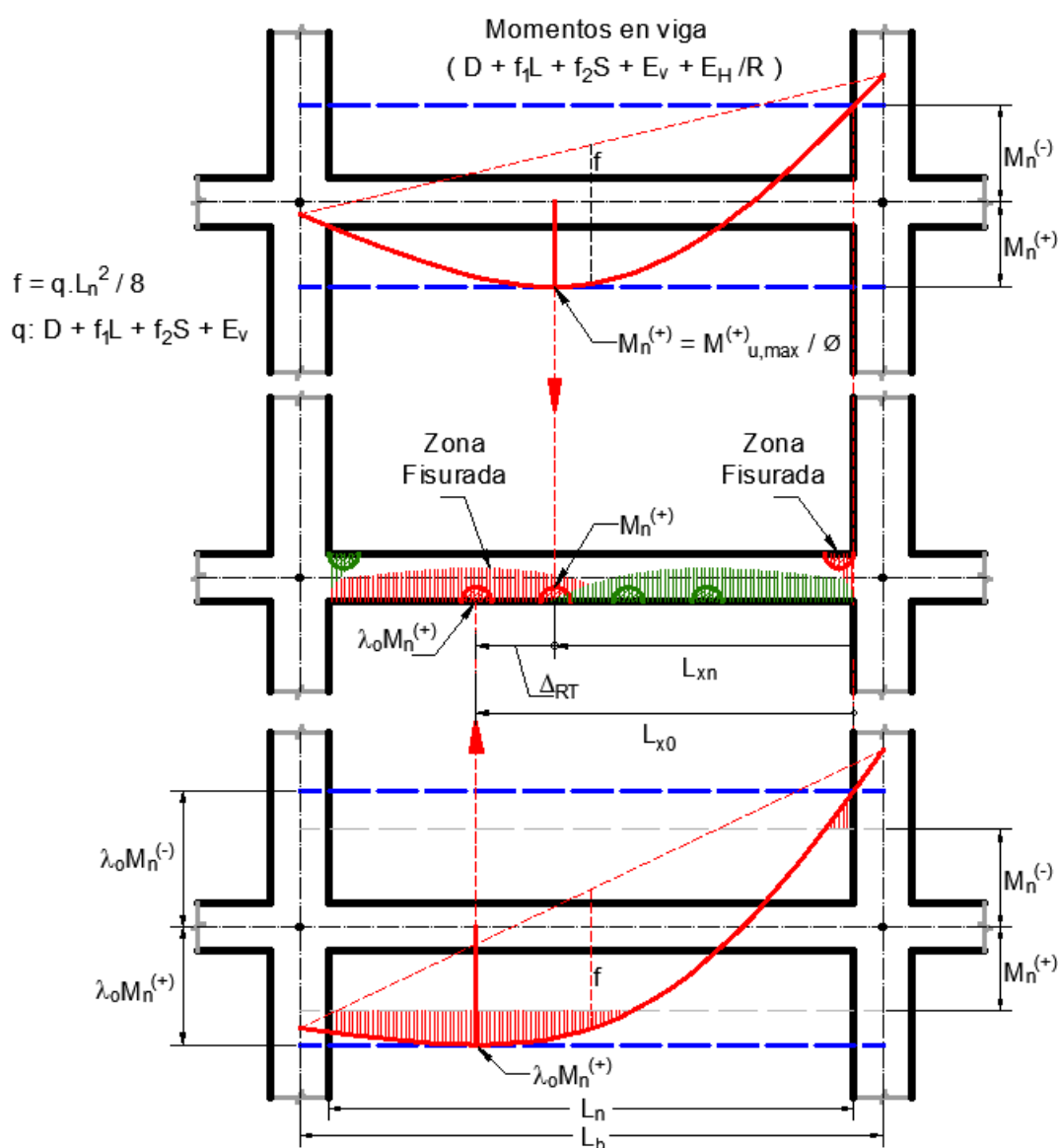


Figura 3. Evolución de sección crítica para momento máximo positivo

Las ubicaciones de las secciones críticas, de acuerdo con la ecuación (1), para las condiciones de momentos nominales L_{xn} y momentos con sobrerresistencia L_{x0} , respectivamente, serán:

$$L_{xn} = \sqrt{\frac{2}{q} \left(M_{n,t}^{(+)} - M_{n,j}^{(-)} \right)} \quad (3)$$

$$L_{x0} = \sqrt{\frac{2}{q} \lambda_0 \left(M_{n,t}^{(+)} - M_{n,j}^{(-)} \right)} = \sqrt{\lambda_0} L_{xn} \cong 1,183 L_{xn} \quad (4)$$

Por lo tanto, el incremento en la longitud L_{xn} será de 18,3% aproximadamente, para cualquier valor de q .

Corresponde en tal caso, verificar que la nueva ubicación de la sección crítica esté comprendida dentro de la longitud de zonas de rótulas plásticas ($2 \times 2 h_b$) contemplada en el capítulo 2.2.4 del reglamento INPRES-CIRSOC 103 Parte II (2021) ^[2] según la figura 2.4 (ver figura 4).

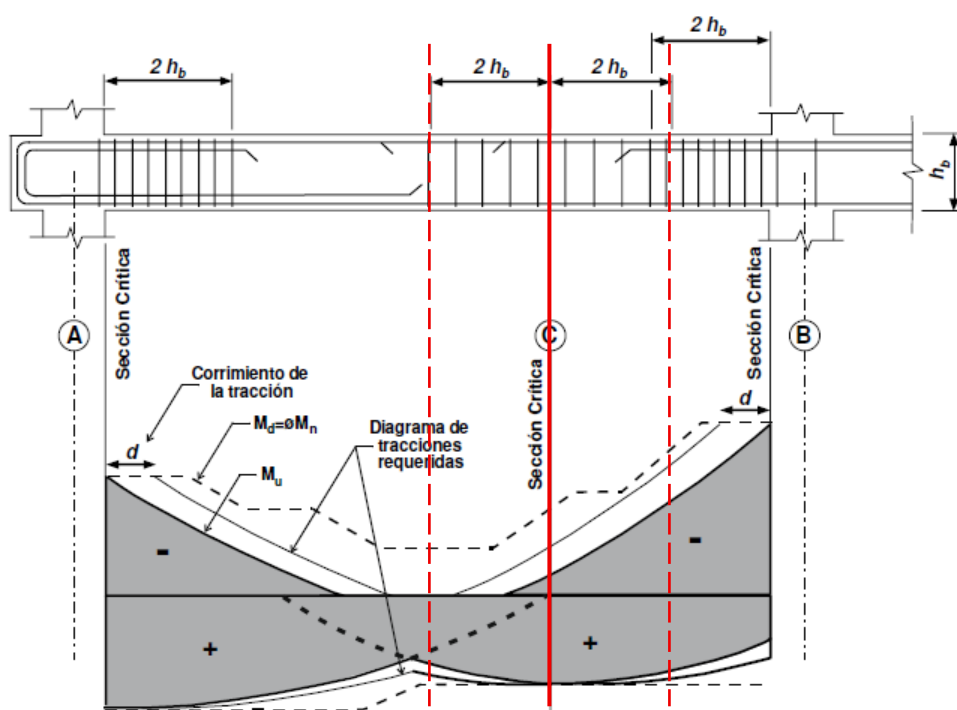


Figura 4. Longitud de zonas de formación de rótulas plásticas
(Figura 2.4; INPRES CIRSOC 103 Parte II. 2021) ^[2]

Por lo tanto, si no se desea incrementar la longitud de la zona de rótula plástica, se deberá verificar que:

$$\Delta_{RT} = (\sqrt{\lambda_0} - 1)L_{xn} \leq 2h_b \quad (5)$$

Entonces, la altura de la viga deberá cumplir con la condición siguiente:

$$h_b \geq \frac{1}{2}(\sqrt{\lambda_0} - 1)L_{xn} \cong \frac{1}{11} L_{xn} \quad (6)$$

Si se tienen en cuenta las limitaciones dimensionales para vigas dadas por el capítulo 2.2.1 del INPRES CIRSOC 103 Parte II (2021) [2], en las ecuaciones 2.2-1 y 2.2-2, se puede expresar que la altura máxima de la viga será:

$$h_b \leq \frac{4}{25} L_n \cong \frac{1}{6} L_n \quad (7)$$

Finalmente, considerando que la longitud L_{xn} será siempre menor o igual a la luz libre L_n , se tendrá entonces que la altura de la viga deberá estar entre los siguientes límites:

$$\frac{L_n}{11} \leq h_b \leq \frac{L_n}{6} \quad (8)$$

Además de este requerimiento en relación a la altura de la viga, y dada la variabilidad en la posición de la sección crítica para momentos máximos positivos, así como la reversibilidad de la acción sísmica, se recomienda que la armadura longitudinal inferior sea continua en toda la viga, es decir, sin interrupciones.

3. CORTE REQUERIDO

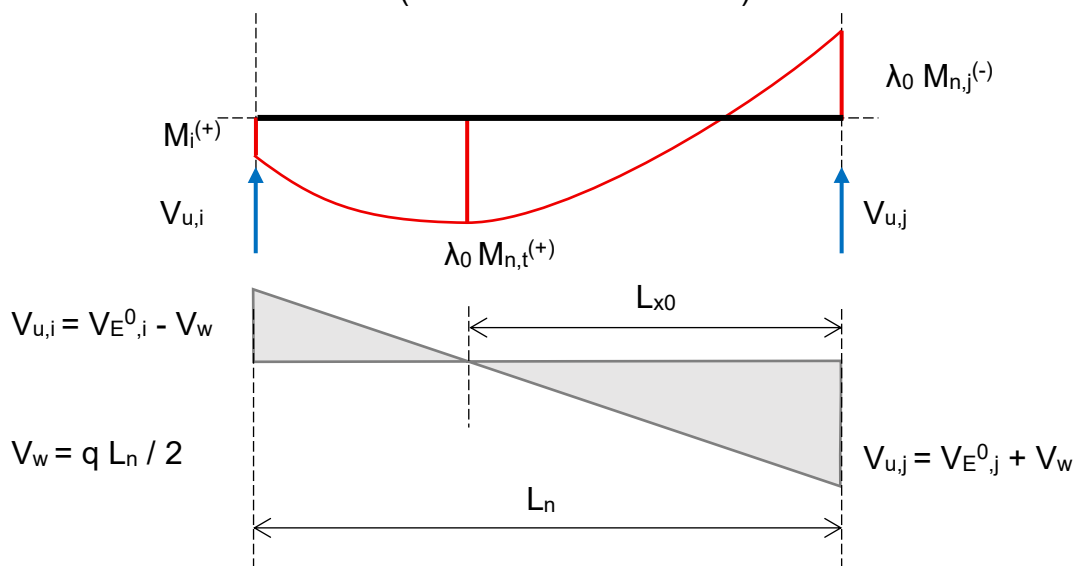
A fin de evaluar el esfuerzo de corte requerido para el diseño de la armadura transversal en zonas de rótulas plásticas es necesario considerar la capacidad flexional con sobrerresistencia.

En la figura 5 se muestran los momentos con sobrerresistencia en la viga y los cortes en las secciones críticas (extremos y tramo). La determinación del corte requerido en cada sección será la suma del corte por sobrerresistencia V_E^0 más el corte originado por las cargas gravitatorias o verticales V_w , es decir, por la carga distribuida q , por lo tanto:

$$V_u = V_w + V_E^0 \quad (9)$$

a) Momentos y cortes en viga

$(D + f_1 L + f_2 S \pm E_v \pm E_h)$



b) Diagramas de cuerpo libre

(sectores izquierdo y derecho)

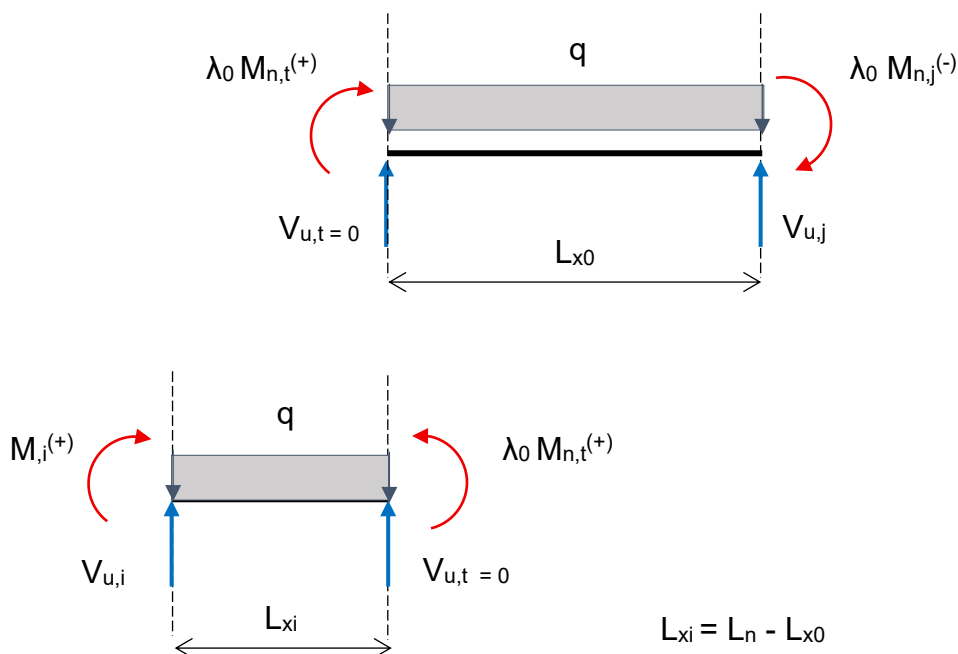


Figura 5. Cortes requeridos en viga y diagramas de cuerpo libre

Si se considera el equilibrio de momentos en el extremo izquierdo, y teniendo en cuenta que $V_{u,t}$ es nulo por la condición de máximo momento, el momento flector M_i en el extremo izquierdo será:

$$M_i^{(+)} = \lambda_0 M_{n,t}^{(+)} - q \frac{(L_{xi})^2}{2} \quad (10)$$

Si se analiza la viga en su conjunto, el corte debido a los momentos en extremos será:

$$V_{E,i}^0 = V_{E,j}^0 = \frac{M_i^{(+)} - \lambda_0 M_{n,j}^{(-)}}{L_n} \quad (11)$$

Finalmente, el corte requerido se obtiene del diagrama de la figura 5.a, delimitando las ZFPRP previstas en el mecanismo de colapso adoptado.

4. FACTOR DE SOBRERRESISTENCIA FLEXIONAL DE VIGA

El factor de sobrerresistencia flexional en viga ϕ_b^0 permite determinar los momentos en columnas, a partir de los momentos con sobrerresistencia en vigas M_b^0 y los momentos M_{bE} originados por la componente horizontal de la acción sísmica (E_H), con la siguiente expresión:

$$\phi_b^0 = \frac{\sum M_b^0}{\sum M_{bE}} \quad (12)$$

La evaluación de este factor se realiza cumpliendo con las condiciones de equilibrio en el nudo (intersección de ejes de viga y columna) para cada apoyo o nudo a lo largo de la viga.

El promedio de los factores obtenidos para toda la viga deberá ser mayor o igual a 1,56 a fin de garantizar que la resistencia suministrada por las armaduras longitudinales es suficiente para cubrir la demanda sísmica.

En el caso de rótulas reversibles, los momentos máximos tanto de vigas como de columnas se producen en el nudo analizado. En el caso de rótulas unidireccionales, como fue descrito anteriormente, el momento máximo positivo ocurre en una sección ubicada hacia el tramo de la viga. En la figura 6 se representan esquemáticamente los momentos en nudo para rótulas unidireccionales.

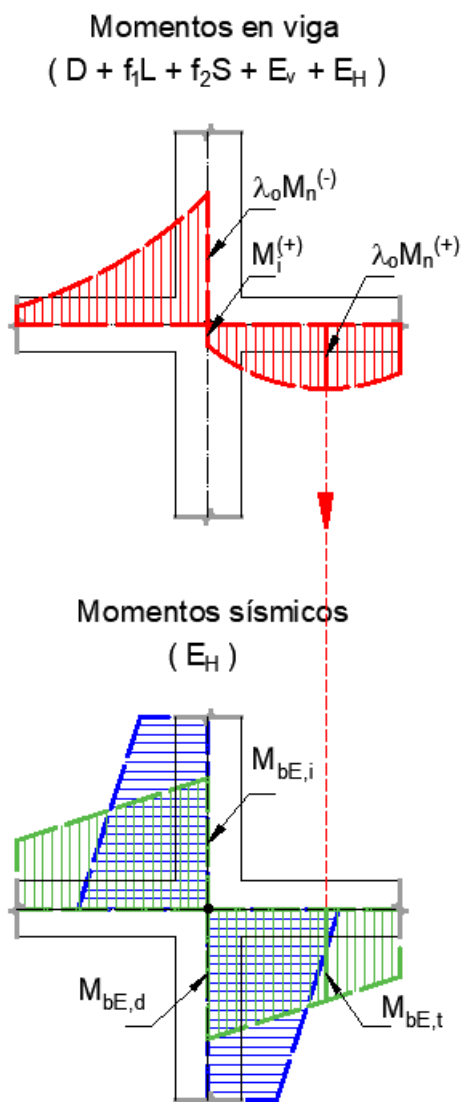


Figura 6. Momentos en nudo (caso de rótula unidireccional)

La ubicación del momento máximo positivo en el tramo de la viga de la derecha dependerá de la magnitud de la carga q que incluye cargas permanentes (D), sobrecargas (L y S) y la componente vertical de la acción sísmica (E_v). A medida que se reduce q , por ejemplo, para E_v actuando hacia arriba, el momento máximo se acercará a la cara de la columna, aproximándose al caso de rótula reversible.

De acuerdo con la ecuación 12 y la figura 6, el factor de sobrerresistencia flexional para rótula unidireccional tendría la siguiente expresión:

$$\phi_b^0 = \frac{\lambda_0 M_n^{(-)} + M_i^{(+)}}{M_{bE,i} + M_{bE,d}} \quad (13)$$

Como puede observarse en la figura 6, el momento en el extremo de la viga M_i es menor al momento máximo de tramo $\lambda_0 M_n^{(+)}$, por lo tanto, para garantizar la adecuada prevención de los modos de falla frágiles, y la formación de rótulas no deseadas en columnas, se sugiere determinar el factor de sobrerresistencia flexional a partir del momento en el tramo, esto es:

$$\phi_b^0 = \frac{\lambda_0 M_n^{(-)} + \lambda_0 M_n^{(+)}}{M_{bE,i} + M_{bE,d}} \quad (14)$$

Alternativamente, podría evaluarse este factor considerando la combinación con un valor de carga q mínimo: $q = 0,9 D - E_v$ o menor.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La elección del mecanismo de colapso para pórticos sismorresistentes de hormigón armado surge del análisis flexional en vigas. En el caso de predominio de cargas gravitatorias, el mecanismo convencionalmente adoptado de rótulas en extremos de vigas alterna a un mecanismo con rótulas alejadas de las columnas hacia el tramo.

Al considerar la sobrerresistencia flexional debido a la ductilidad del acero, la ubicación del momento máximo positivo presenta un desplazamiento o corrimiento que debe ser verificado en relación con la longitud de zona de rótula plástica definida por reglamento. En este sentido, se sugiere adoptar una altura de viga de 1/10 de la longitud libre.

Por otro lado, para determinar el corte requerido, se deberá tener en cuenta esta particularidad sobre la posición del momento máximo en el tramo, y a partir de esto, delimitar la zona de rótula plástica y el esfuerzo de corte obtenido en cada sección como la suma del corte por sobrerresistencia más el corte originado por las cargas gravitatorias.

Finalmente, para la evaluación del factor de sobrerresistencia flexional, parámetro necesario en la evaluación de momentos requeridos en columnas, se sugiere considerar el momento máximo en el tramo a fin de garantizar la prevención de modos de falla no deseados.

REFERENCIAS

- [1] INPRES CIRSOC 103. *“Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes”*, Parte I *“Construcciones en general”*, 2018.
- [2] INPRES CIRSOC 103. *“Reglamento Argentino para Construcciones Sismorresistentes”*, Parte II *“Construcciones de hormigón armado”*, 2021.
- [3] Paulay, T., y Priestley, M. J. *“Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings”*, 1992.
- [4] Armado J.A. INPRES CIRSOC 103. *“Ejemplo de diseño sísmico de un edificio estructurado con pórticos de hormigón armado”* (2da. Edición). 2013.