

ESTUDIO DE ALTERACIONES EN EL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO CON NUDOS HÍBRIDOS MEDIANTE EL EMPLEO DE GRÁFICOS MOMENTO- CURVATURA

STUDY OF STRUCTURAL CHANGES IN THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE BEAMS WITH HYBRID NODES BY USING MOMENT- CURVATURE GRAPHICS

Yordy Mieles,

Escuela de Ingeniería Civil
Universidad Técnica de Manabí
jmieles@utm.edu.ec

Emilio Castañeda

Facultad de Ingeniería Civil/CECAT.
Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
aechevia@gmail.com

Alberto Caneiro

Facultad de Ingeniería Civil/CECAT.
Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba.
jahcan@civil.cujae.edu.cu

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un estudio preliminar del comportamiento de vigas principales de hormigón armado y sección rectangular atravesadas por vigas secundarias de acero, lo que origina un nudo híbrido. De esta situación constructiva existen al menos cinco edificaciones en la Provincia de Manabí-Ecuador desde el año 2013, con la construcción de losas colaborantes (steel deck), y el empleo de distintos tipos de emparrillados mixtos de hormigón y acero para entrepisos y cubiertas formando nudos híbridos. Por la bibliografía hasta ahora revisada, se reconoce que el análisis estructural de esta tipología constructiva ha venido siendo marcadamente empírica.

En el análisis del comportamiento de la sección transversal, se usa el método momento-curvatura ($M - \phi$), para describir la variación de la ductilidad y el momento resistente. Los resultados muestran que la capacidad de resistencia a momento de la sección transversal aumenta al atravesar una viga metálica la viga principal de hormigón pero se presume que su real comportamiento es una disminución del momento resistente en la sección longitudinal de la viga. El análisis concluye que es necesario un análisis con elementos finitos para inferir el comportamiento total de la viga principal de hormigón.

Palabras Claves: Emparrillado mixto, nudo híbrido, momento curvatura, ductilidad.

ABSTRACT

This paper carries out a preliminary study of the behavior of reinforced concrete beams of rectangular section pierced by secondary steel girders, which it is originated an hybrid nodes. From 2013 at least 5 of this type of construction can be found in Manabi. These constructions are forming hybrid nodes through the use of different types of steel/concrete mixed gridirons, as well as the construction of supporting slabs (steel deck). From the reviewed literature it can be inferred that the structural analysis of this sort of construction is mostly empirical.

During the behavioral analysis of transverse sections, the moment-curvature method is used to describe the ductility variation and resistance moment. Results show that the capacity to resist a moment of transversal section increases when crossing a metal beam to the main concrete beam. It is presumed that its real behavior is the result of a reduction of the resisting moment in the longitudinal section of the beam. From the essay it is concluded that the use of finite elements are necessary to diagnose the overall behavior of the main concrete beam.

Keywords : mixed gridiron, hybrid nodes , moment-curvature, ductility .

1. INTRODUCCIÓN

La construcción mixta o compuestas históricamente se ha desarrollado combinando diferentes materiales como piedra-madera, mampostería-madera, hormigón armado-madera, hormigón armado-acero, entre otros (Ching, Jarzombek, & Prakash, 2011). Actualmente con el desarrollo de nuevos materiales y el extendido uso del hormigón armado y el acero estructural se combinan estos materiales para aprovechar las ventajas de ambos y se proponen nuevas tipologías constructivas que combinan las mejores características de estos materiales tratando de conseguir edificaciones más eficientes y económicas (Aznar, 2013). La construcción de emparrillados mixtos de hormigón y acero para entresijos y cubierta tienen ventajas como la disminución significativa de la madera de encofrado, del tiempo de ejecución de la obra, y de los costos en alrededor de un 20%, además de contribuir significativamente a satisfacer las disposiciones municipales en torno a la limpieza y el orden en las obras (Placencia, Gallegos, & Morales, 2014).

Un nudo se definen como la unión de elementos estructurales que confluyen en un punto que se desplaza y gira, en zonas sísmicas su diseño recibe mucha importancia por lo que el código ACI 318 especifica la filosofía de nudo fuerte viga débil (Aguiar, 2014). Regularmente los nudos estructurales se componen de un solo material, si son de distintos materiales pueden llamarse **nudos híbridos**, que se define como la unión de diferentes materiales (hormigón armado y acero por ejemplo). Varios tipos de nudos híbridos ha sido descrito por diferentes investigadores, entre los que destacan la unión de muros de hormigón con vigas

metálicas (Soto, 2012), columnas de hormigón y vigas metálicas (Gómez, Sánchez, & Juárez, 2014), columnas metálicas a forjados de acero (Aznar, 2013) entre otros.

Para los nudos híbridos es recomendable cumplir con las mismas disposiciones que para vigas de acero o vigas de hormigón, la transferencia entre acero y hormigón debe ser por conectores de corte o mecanismo similar y debe despreciarse el efecto de adherencia entre el hormigón y acero (Herrera, 2013). El código del ACI 318S-14 indica que las cargas por gravedad o accidentales que produzcan transmisión de momentos en los nudos, el cortante que derive de esto debe tenerse en cuenta en el diseño de la conexión. (ACI-318S-14, 2014).

La valoración estructural de emparrillados mixtos de hormigón armado y acero con nudos híbridos para entrepisos y cubierta como las de la figura 1, crea una situación de incertidumbre en torno a la afectación que estas vigas metálicas pueden producir sobre la rigidez, la capacidad resistente y la forma de distribución de los momentos. En Placencia (2014) se menciona la necesidad de realizar un estudio de los efectos de las viguetas de acero sobre las vigas principales cuando estas son ubicadas unidireccional y bidireccionalmente, aunque esa descripción no se refiere a un nudo híbrido. (Placencia et al., 2014).

Para el estudio preliminar del comportamiento estructural de las vigas principales de hormigón armado en este tipo de emparrillados con nudos híbridos, se utilizó el método de momento curvatura para evaluar la perturbación en las vigas y se revisan los trabajos de investigación de ductos, o disposiciones del código ACI 318 para embebidos en el concreto, por ser cercanos al caso de estudio, reconociendo que las vigas de hormigón que forman nudos híbridos no se comportan igual que los ductos.



Figura 1. Viga de hormigón con viga de acero pasante.

Estudios efectuados en vigas de hormigón armado interrumpidas por embebidos o ductos demostraron que el hormigón desplazado afecta el comportamiento de la viga, y que para incrementos significativos de las cargas la sección comenzará a fisurarse. Luego concluye que la presencia de un ducto

embebido provoca en todos los casos de estudio, una reducción significativa en el aprovechamiento del elemento estructural, independientemente del lugar donde lo atraviese en la viga (Cabrera, 2011).

Desde este punto de vista es posible esperar, como hipótesis de partida, que el “nudo híbrido” en los emparrillados mixtos tenga un efecto similar sobre el comportamiento estructural de las vigas principales de hormigón armado que el que provocan los ductos o embebidos. Si bien es cierto que un ducto y los nudos híbridos en vigas principales son diferentes, esta aproximación sirve de referencia para ubicar la posición de los nudos híbridos. La evaluación de estas modificaciones, debe ser contrastada, utilizando para ello diferentes alternativas como modelos numéricos, computacionales y experimentales más complejos, sin embargo esta investigación se limita a estudiar el desempeño de la viga de hormigón con nudo híbrido con respecto al comportamiento estructural cuando se tiene vigas macizas y vigas con el nudo mixto mediante el análisis de los gráficos ($M - \phi$).

Cercano al caso de estudio descrito por las normas, se encuentra en el informe del comité ACI 318S-11 donde se reglamenta el uso de embebidos (como ductos, tuberías e insertos) en miembros de hormigón y lo ilustra con la figura 2. El comentario R6.3, del ACI 318 11 menciona: “En 6.3 se dan reglas empíricas para realizar instalaciones seguras en condiciones normales, pero deben hacerse diseños especiales para condiciones no usuales” (ACI-318S-11, 2011). Las indicaciones esquematizadas en la figura 2 han sido quitadas de la versión del ACI 318-14 y solo se hace una generalización de los ductos.

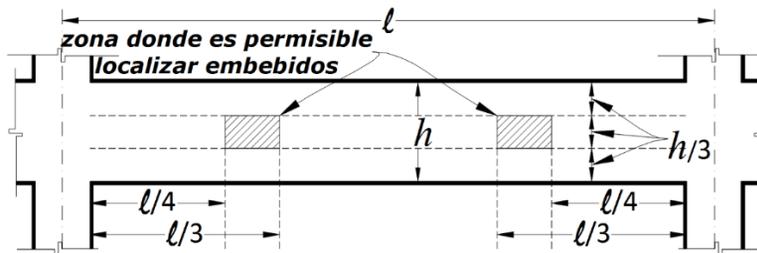


Figura 2. Norma ACI 318S-11 para ubicación de ductos o embebidos.

El código ACI 318S-14 en 20.7 y 26.8 dispone además un conjunto de medidas para embebidos, (por su generalidad se pueden aplicar a los emparrillados mixtos) que se deben considerar en el diseño, pues al tener aceros de diferente calidad G36 y G60 puede provocar dentro del hormigón un par galvánico y provocar e intensificar la corrosión del acero de refuerzo de las vigas de hormigón y de la propia viga de acero (ACI-318S-14, 2014). En 9.4.4 de la NEC - SE - HM se dan instrucciones similares respecto a la corrosión por par galvánico (MIDUVI, 2015).

El ACI 314-11 propone también normas para embebidos o ductos que debe ser distinguido del caso en estudio, pues la viga secundaria al pasar por la viga de hormigón crea una especie de nudo híbrido que puede tener un comportamiento estructural que varía desde un simple apoyo hasta un empotramiento con cierta capacidad de deformación y no se corresponde con el concepto de “ducto” para el

paso de instalaciones que se hace en las referidas normas. Además las vigas secundarias de acero, en su condición de elementos estructurales, quedan doblemente empotradas (total o parcialmente en sus extremos) por lo que los corrimientos y giros de las secciones de las vigas principales de hormigón armado generarían fuerzas interiores en las vigas de acero, que difieren con el comportamiento de un ducto para instalaciones.

El emparrillado y nudos mixtos descritos se lo dividen para su estudio en varias partes. En este trabajo se estudia el nudo híbrido por un medio de gráficas momento curvatura, usado para el análisis no lineal estático o dinámico de estructuras que permite conocer la ductilidad y la capacidad a flexión de un elemento (Aguiar *et al.* 2015).

2. LEYES CONSTITUTIVAS PARA EL HORMIGÓN Y EL ACERO

El análisis de la sección de viga con nudo híbrido será mejor descrito si el modelo de hormigón representa de forma aproximada las vigas con nudos híbridos, las cuales se las refuerza con estribos. Normativas como el ACI, usan el modelo de Whitney porque es simple fijar la magnitud y posición de la resultante de la fuerza de compresión del hormigón en una viga de hormigón; sin embargo, es una propuesta realmente conservadora, pues reemplaza la distribución real de esfuerzos por un rectángulo equivalente que define la intensidad de la compresión mediante el valor ($\alpha_1 f'_c$), y en la profundidad ($\beta_1 c$), sin tomar en cuenta el aporte del confinamiento proporcionado por los estribos. (Nilson, 2010) (Whitney, 1942).

Un modelo de hormigón confinado representa de forma aproximada el comportamiento del material de la viga con nudos híbridos. El confinamiento del hormigón mediante el refuerzo transversal mejora su desempeño, permiten mayor resistencia y como consecuencia mayores deformaciones, a la vez que incrementa la ductilidad de un elemento de hormigón, (Chung *et al.* 2002). Diferentes relaciones esfuerzo-deformación para el hormigón confinado han sido propuestas (Park *et al.* 1982), (Mander *et al.* 1988).

La figura 3 ilustra el modelo de comportamiento para el hormigón confinado propuesto por Mander (1988), el cual calcula el esfuerzo de compresión y la deformación última como una función del confinamiento o reforzamiento transversal de acero, (Computers and Structures, 2014), ley que se utilizó en el análisis de este trabajo. La ley contiene una primera rama parabólica que considera el efecto favorable del confinamiento y lo hace mediante un incremento de la resistencia a compresión y la deformación del hormigón. La falla se inicia cuando colapsa el refuerzo transversal y ya no es capaz de confinar al núcleo de hormigón, originándose deformaciones mayores que las admitidas por otros modelos (Mander *et al.*, 1988). Dicha propuesta es muy aceptada en la actualidad y lo es tanto que forma parte de las rutinas de varios software, incluyendo el SAP 2000 y ETABS (CSI, 2014) software utilizados en la modelación numérico-computacional de la sección transversal con nudo híbrido.

La rama curva del comportamiento se aproxima a la siguiente ecuación (1):

$$f_c = \frac{xrf'_{cc}}{r - 1 + x^r} \quad (1)$$

Donde $f'_{cc} = \lambda f'_c$ es el esfuerzo a compresión del hormigón confinado, λ es el factor de esfuerzo confinado $x = \epsilon_c / \epsilon_{cc}$, siendo ϵ_c deformación unitaria del hormigón (variable independiente de la función f_c), ϵ_{cc} deformación unitaria del hormigón asociada al esfuerzo máximo f'_{cc} . Además $\epsilon_{cc} = \epsilon_{co}[1 + 5(f'_{cc}/f'_{co} - 1)]$ y f'_{co} resistencia máxima del hormigón no confinado, $\epsilon_{co} = 0,002$ deformación asociada a f'_{co} , $r = E_c / (E_c + E_{sec})$, $E_c = 5000\sqrt{f'_{co}}$ en (MPa) es el módulo de elasticidad del hormigón, $E_{sec} = f'_{cc} / \epsilon_{cc}$ el módulo secante del hormigón asociado al esfuerzo máximo f'_{cc} .

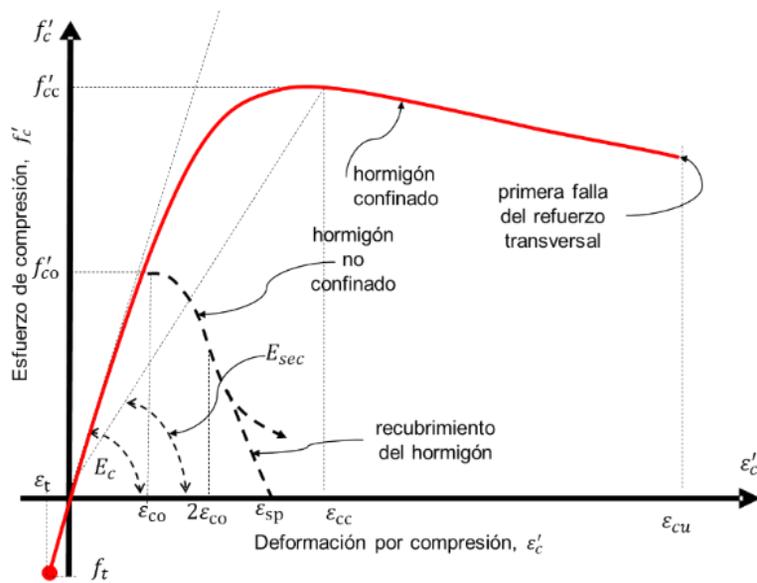


Figura 3. Modelos para hormigón confinado según Mander (1988).

Para el comportamiento del acero se utiliza una aproximación trilineal (curva completa) mostrado en la figura 4 propuesto por Park y Paulay (1975). La curva tiene tres regiones, una primera región elástica, seguida de una perfectamente plástica y finalmente una región de endurecimiento por deformación (Park & Paulay, 1975). Las ecuaciones que generan la curva en el software SAP 2000 utilizado en este trabajo se muestran en la figura 4. (Computers and Structures, 2014).

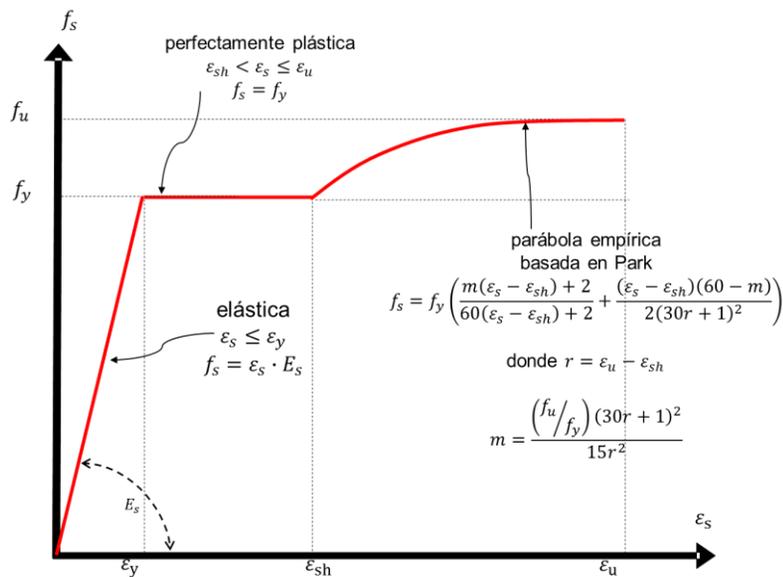


Figura 4. Ley constitutiva para el acero.

3. ANÁLISIS DE LA SECCIÓN MEDIANTE GRÁFICOS $M - \phi$.

La relación $M - \phi$ es uno de los recursos más utilizados en el análisis de los elementos de hormigón armado, especialmente para estudiar la ductilidad del elemento que se analiza y comprender mejor la formación y desarrollo de rótulas plásticas, encargadas de facilitar la ventajosa redistribución de momentos que puede ser aprovechada en estructuras continuas antes de sobrevenir el colapso. Se puede visualizar además el comportamiento de la sección de la viga ante la acción de un sismo severo mediante la ductilidad por curvatura, proceso que conlleva al cálculo de la curva $M - \phi$ (Aguiar, 2003).

Existen varios procedimientos para el trazado del diagrama $M - \phi$, definiéndose como curvatura (ϕ) a la relación entre la deformación a nivel de la fibra más comprimida de la sección, y la distancia hasta el eje neutro (Vargas & González, 2005). Todos estos procedimientos se fundamentan en la compatibilidad de las deformaciones dentro de la matriz del hormigón armado, el equilibrio de esfuerzos interiores (fuerza y momento) y las ecuaciones constitutivas que se adopten para el hormigón y su refuerzo, esquematizados en la figura 5 (Aguiar *et al.*, 2012). El proceso se lo puede describir de la forma aproximada siguiente:

- a) Fijar una deformación ε'_{ci} a nivel de la fibra más comprimida del hormigón, dentro del rango admitido por la ecuación constitutiva con el diagrama equivalente transformado para este material, y determinando luego el valor de los coeficientes α_{1i} y β_{1i} para la deformación fijada.

b) Posteriormente, sobre la base de la compatibilidad de las deformaciones entre los materiales que componen la sección transversal de los elementos, se puede calcular la posición de la línea neutra c_i para la deformación ε'_{ci} que se haya fijado. Debido a la ecuación constitutiva del acero f_s vs. ε_s , no es continua en todo el dominio de deformación, se debe encontrar en qué estado deformacional se encuentra el acero para el correcto cálculo de c . Por el principio de compatibilidad de las deformaciones:

$$\frac{\varepsilon'_c}{c} = \frac{\varepsilon'_s}{c - d'} \quad \varepsilon'_s = \frac{c - d'}{c} \cdot \varepsilon'_c \quad (2) \quad \text{y} \quad \frac{\varepsilon'_c}{c} = \frac{\varepsilon_s}{d - c} \Rightarrow \varepsilon_s = \frac{d - c}{c} \cdot \varepsilon'_c \quad (3)$$

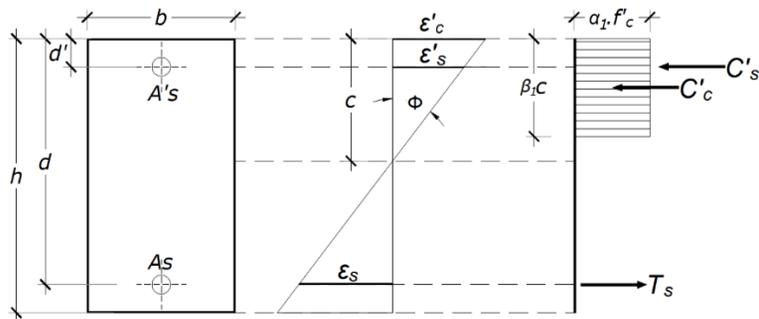


Figura 5. Esquema de equilibrio de fuerzas y compatibilidad de deformaciones.

Haciendo sumatoria de fuerzas

$$\sum F = 0 \Rightarrow C'_c + C'_s - T_s = 0 \Rightarrow (\alpha_1 \cdot f'_c)(\beta_1 \cdot c_i)b + A'_s \cdot f'_s - A_s \cdot f_s = 0 \quad (4)$$

c) Evaluado c_i se verifica que la suma de fuerzas en la dirección longitudinal del elemento sea igual a cero. Luego se encuentra el momento flector M_i resultante en la sección transversal mediante la ecuación de equilibrio que corresponde. Observando la figura 5 se comprende el siguiente planteamiento de la ecuación (5).

$$\sum M_i = 0 \Rightarrow M_i = C'_c(c - 0.5 \cdot \beta_1 \cdot c) + C'_s(c - d') - T_s(d - c) \quad (5)$$

d) Por último, se puede evaluar el giro de la sección ϕ_i como la relación entre la deformación ε'_{ci} y el valor de c_i y después graficar estos resultados, de forma similar a como se muestra en la Figura 7.

En este trabajo además se idealizó el momento curvatura con un modelo bilineal elasto plástico perfecto representado en la figura 6, para estimar la capacidad de momento plástico de la sección transversal, definido como el momento en que la sección transversal ha llegado a su límite de elasticidad y el acero más alejado de la zona en tracción entra en fluencia. La parte elástica de la curva debe pasar por el punto que marca la fluencia del acero. El modelo bilineal se lo obtiene mediante el equilibrio de áreas entre la curva real y el modelo bilineal idealizado. (Caltrans, 2010).

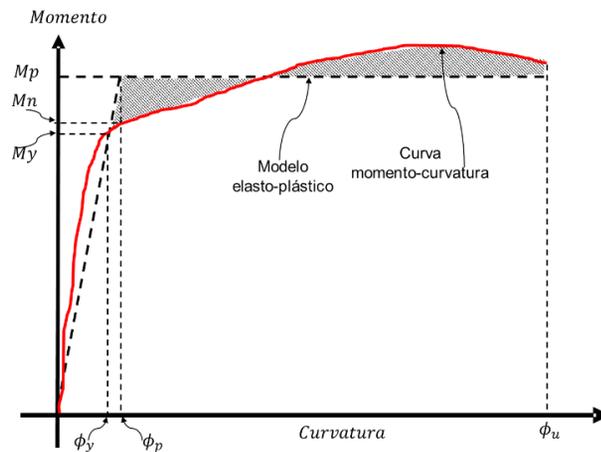


Figura 6. Curva $M - \phi$ y modelo elasto-plástico (Caltrans 2010).

4. CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA MOMENTO VS. CURVATURA

Mediante un ejemplo de vigas principales de hormigón armado para un emparillado mixto con nudos híbridos, se caracteriza el comportamiento de la sección transversal de las vigas en análisis con la relación $M - \phi$. Para ello en este trabajo se supone que la falla de las vigas se produce a flexión y se desprecia por el momento los posibles fallos de corte y de torsión que pueden introducir las vigas secundarias en los “nudos híbridos”. Una viga puede tener una gran capacidad a flexión y una baja capacidad de corte, luego se produce primero la falla al corte y probablemente la viga no alcanza a llegar su punto de fluencia o la deformación última (Aguiar, 2003). Si una viga tiene una cantidad grande de acero longitudinal, pero poco refuerzo transversal se produce lo antes anotado, por lo que varios programas consideran la interacción del efecto de corte con la carga axial o con las tracciones o compresiones provocadas por el momento flector en la sección transversal (Aguiar et al., 2012).

La sección de la viga de hormigón armado se mantiene constante (0,30 m de base y 0,50 m de altura) para todos los casos y coincide con la que se muestra en la figura 7; el aporte del acero en compresión será tomado en cuenta, el refuerzo a tracción de la sección se define con un porcentaje de acero aproximado $\rho = 0.0076$ ubicado en la parte inferior de la viga, cuantía elegida por ser aproximadamente una media entre la cuantía máxima y mínima recomendada por el ACI. Otros datos son: resistencia a la fluencia del acero $f_y = 420\text{MPa}$, resistencia a la compresión del hormigón $f'_c = 21\text{MPa}$, refuerzo transversal son barras No. 10 @ 100mm, refuerzo longitudinal a tracción 5 barras No. 16 en la cara de tracciones, refuerzo longitudinal a compresión 3 No. 16 en la cara de compresiones.

A la sección transversal de viga de hormigón armado con nudos híbridos se le da tres tratamientos distintos para el análisis $M - \phi$ esquematizado en la figura 7,

conservando siempre la misma dimensión de base por altura y el armado para los casos siguientes:

1. Una viga con sección maciza de 300 mm de base por 500 mm de altura, (figura 7a)
2. La viga de hormigón de 300 mm de base por 500 mm de altura con una oquedad de 75 mm de altura y 300 mm de ancho, variando la ubicación en la altura de la oquedad desde el centro geométrico de la sección de la viga hasta el límite de los aceros a compresión (figura 7b).
3. Una viga de hormigón armado de 300 mm de base por 500 mm de altura con nudo híbrido formado por la perturbación de una viga metálica. La viga de acero pasante A36 de 3 mm de espesor, del mismo tamaño que el hueco del segundo caso (75mm de alto, 300 mm de ancho), variando la ubicación de la viga desde el centro geométrico de la sección de la viga hasta el límite de los aceros a compresión (figura 7c).

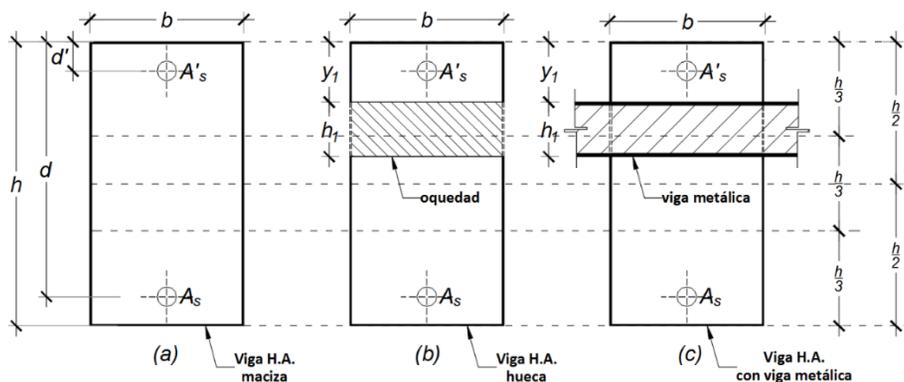


Figura 7. Modelos de vigas en análisis.

Parte de los resultados del $M - \phi$ se presentan en la tabla 1, y de forma gráfica en la figura 8.

Tabla 1. Relación $M - \phi$ en viga maciza y con hueco.

Tipo de viga	M_y	ϕ_y	M_p	M_u	ϕ_u
	kN-m	rad/m	kN-m	kN-m	rad/m
maciza	155,41	0,00667	221,70	240,39	0,25930
hueco $y=0$	154,49	0,00667	221,46	240,35	0,25720
hueco $y=5$	157,54	0,00670	222,25	240,50	0,26400
hueco $y=10$	151,14	0,00668	220,58	240,16	0,24950
hueco $y=15$	155,81	0,00722	196,15	218,83	0,18870
híbrida $y=0$	179,59	0,00721	249,56	267,05	0,19400
híbrida $y=5$	156,92	0,00690	235,02	254,55	0,21120
híbrida $y=10$	149,65	0,00670	225,38	246,74	0,19150
híbrida $y=15$	146,87	0,00668	216,40	238,35	0,23160

En la figura 8 se muestra el análisis de $M - \phi$. El nudo mixto y la oquedad se la hace variar en la altura de la viga de hormigón, empezando desde el centro geométrico de la viga maciza, hasta donde lo permite el límite, es decir cuando la viga metálica se topa con los aceros longitudinales de la cara de compresión.

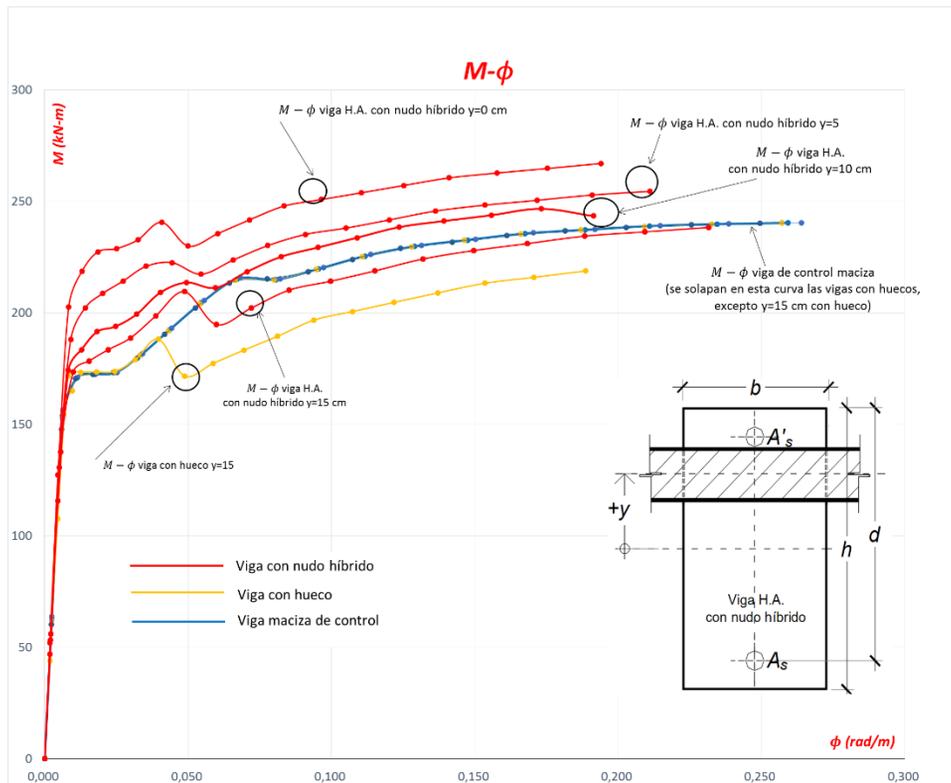


Figura 8. $M - \phi$ para una sección maciza y con hueco

La relación $M - \phi$ se mantiene igual en todos los tipos de vigas (maciza, hueca o nudo híbrido) hasta la fluencia del acero, luego de lo cual varía cuando el nudo o el hueco ingresa sobre la zona comprimida. La altura desde el eje neutro a la fibra más alejada en compresión " c " cuando el acero a tracción alcanza la fluencia está entre 8 a 11 cm aproximadamente en todos los casos, entonces el nudo híbrido solo logra interrumpir alrededor de 4 cm del bloque parabólico de esfuerzos de compresión y lo hace en la parte menos comprimida, es decir la parte del bloque de compresiones con menos esfuerzos. Además se evidencia que cuando la viga con hueco llega a la zona de compresiones el momento resistente de la sección baja 9% con respecto a una maciza.

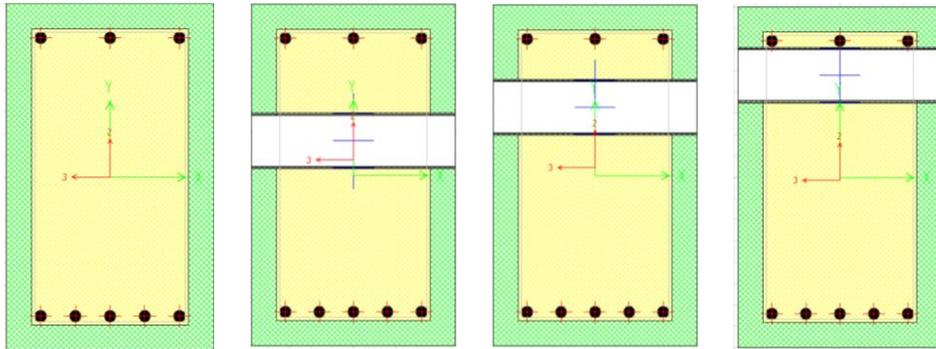


Figura 9. Viga de hormigón maciza y con nudo híbrido.

Para viga maciza y con hueco la resistencia a momento se mantiene prácticamente igual, sus curvas $M - \phi$ se superponen a excepción de la viga con hueco $y=15$ cm medidos desde el centro geométrico de la sección de hormigón maciza al centro geométrico de la sección hueca, lo que es evidente en las figuras 8 y 10. En todos los casos la deformación máxima del concreto llegó hasta aproximadamente $\epsilon'_c = 0,03$ valor que era de esperarse por el modelo de comportamiento adoptado para el hormigón. Se observa también en las curvas $M - \phi$ una disminución de la ductilidad cuando se usa vigas con nudos híbridos.

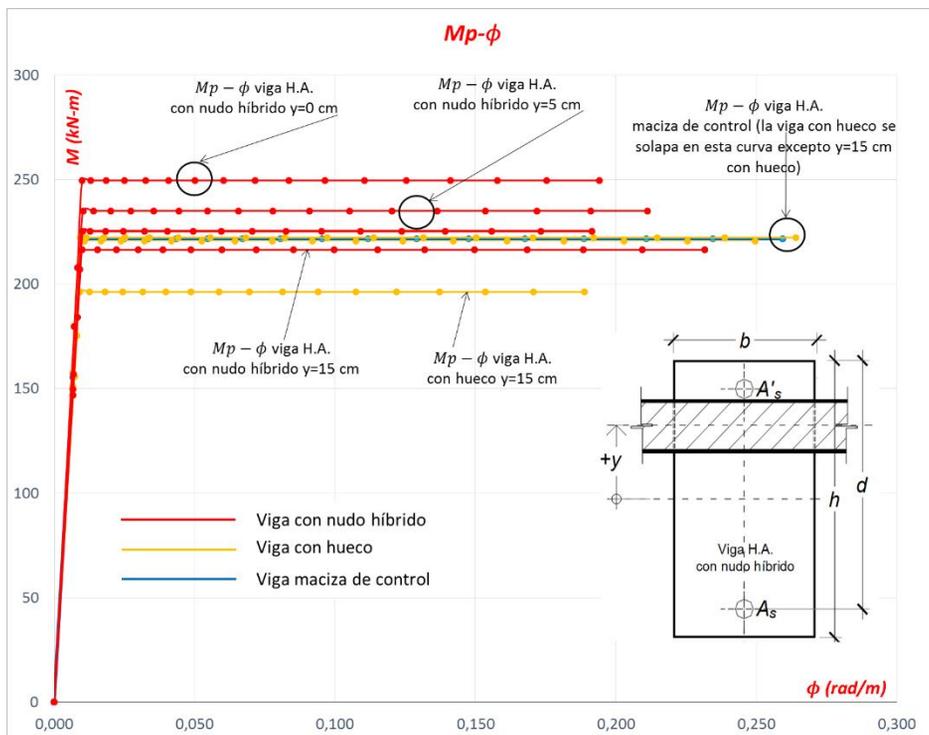


Figura 10. $M_p - \phi$ para una sección maciza y con hueco

5. CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos en esta comparación realizada entre secciones transversales de vigas con nudos híbrido sometidas a diferentes condicionales de variación de hueco y nudo por el método de los gráficos $M - \phi$, sin considerar todas las acciones en término de fuerzas y momentos que las vigas secundarias metálicas introducen en esa zona de la viga principal de hormigón armado que es, en fin de cuentas, la razón estructural fundamental por la que surge el nudo híbrido, y que es de esperarse que en estudios posteriores demuestre que tiene una influencia significativa sobre los resultados, pueden destacarse las conclusiones siguientes:

- En la medida en que la viga metálica se desplaza en la altura desde el centro geométrico de la viga de hormigón armado hasta las fibras comprimidas ($y=15$ cm) la ductilidad de la sección transversal disminuye hasta aproximadamente 11% con respecto a la viga maciza. Al introducir una oquedad o viga metálica a una viga maciza, esto no le afecta hasta que el hueco invade el bloque de compresiones. El momento plástico del modelo idealizado de curva $M_p - \phi$ disminuye 2,4% cuando la viga metálica está a $y=15$ cm invadiendo el bloque comprimido, y 11,5% para la viga con hueco.
- Se confirman en este caso que las indicaciones dadas en 6.3 por el código del ACI 318S-11 son aplicables a una sección con hueco y con una viga metálica atravesando, siempre y cuando las fuerzas y momentos que transmita la viga metálica secundaria a la principal en el nudo híbrido no sean significativas, pues mientras se mantenga la abertura y su tamaño dentro de los límites normativos, esta no afectará el desempeño de la sección.
- El perfil de acero usado como viga secundaria incrementa notablemente la capacidad de momento en la sección transversal infinitesimal dx , si se garantiza que la superficie de la viga metálica tenga adherencia perfecta con el hormigón o conectores de cortante, según se aprecia con ayuda de la figura 10. Probablemente esto no se cumple a nivel de sección longitudinal, dado que el perfil de acero no es continuo al igual que las varillas de acero. Además la adherencia no será perfecta entre el perfil de acero y el hormigón, pues su longitud y superficie no son suficientes y no se han usado conectores de contante en este análisis.
- La conclusión anterior sugiere que para validar las hipótesis de compatibilidad de las deformaciones, de la planeidad de la sección aplicadas a la tipología estructural de vigas descrita en este trabajo, se debe recurrir a otros modelos y métodos más complejos para la representación del problema en el estudio, entre los que se puede considerar el método de los elementos finitos, que consideren la interacción entre materiales e involucrar a toda la sección longitudinal y ser comprobados experimentalmente.

REFERENCIAS

1. ACI-318S-11. (2011). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*: American Concrete Institute.
2. ACI-318S-14. (2014). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*: American Concrete Institute.
3. Aguiar, R. (2003). Análisis sísmico por desempeño. *Centro de Investigaciones Científicas. Escuela Politécnica del Ejército*, 342.
4. Aguiar, R. (2014). *Análisis Matricial de Estructuras* (Cuarta ed.). Ecuador: Departamento de Ciencias de la Tierra y la Construcción-Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
5. Aguiar, R., Mora, D., & Rodríguez, M. (2015). Diagrama momento-curvatura y momento-rotación para elementos de hormigón armado y acero con ASCE/SEI 41 y sistema de computación CEINCI-LAB *Revista Ciencia*, 17(2), 191-228.
6. Aguiar, R., Vallejo, S., Salazar, G., Toscano, R., Chiluzza, C., & Rodríguez, G. (2012). *Vulnerabilidad sísmica de un edificio de 16 pisos: relación momento curvatura*. Paper presented at the II Congreso de Ciencia y Tecnología. <http://www.espe.edu.ec/portal/files/congreso/articulo8.pdf>
7. Aznar, A. (2013). *Propuesta de Configuración y de Método de Inspección de Uniones Mixtas Mediante Pernos Conectores*. (Doctoral), Universidad Politécnica de Madrid. Retrieved from <http://oa.upm.es/16616/>
8. Cabrera, F. (2011). *Influencia de las aberturas transversales, en la resistencia a corte y flexión en vigas de concreto reforzado*. (Master en Estructuras), Universidad Nacional de Colombia.
9. Caltrans, S. (2010). Caltrans seismic design criteria version 1.6. *California Department of Transportation, Sacramento*.
10. Computers and Structures, I. (2014). *Material Stress-Strain Curves, Technical Notes*.
11. CSI. (2014). *Integrated Building Design Software (ETABS 15.0.0 ed.)*: Copyright © 1978-2014 by Computers and Structures, Inc.
12. Ching, F., Jarzombek, M., & Prakash, V. (2011). *Una historia universal de la arquitectura. Un análisis cronológico comparado a través de las culturas* (Vol. 1 y 2). Barcelona
13. Chung, H.-S., Yang, K.-H., Lee, Y.-H., & Eun, H.-C. (2002). Stress-strain curve of laterally confined concrete. *Engineering structures*, 24(9), 1153-1163.
14. Gómez, A., Sánchez, R., & Juárez, H. (2014). *Diseño de edificios compuestos estructurados con columnas de concreto y vigas de acero*. Paper presented at the XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, Jalisco. <https://scholar.google.com.ec/scholar?hl=es&q=DISE%C3%91O+DE+>

- EDIFICIOS+COMPUESTOS+ESTRUCTURADOS+CON+COLUMNAS+DE+CONCRETO+Y++VIGAS+DE+ACERO&btnG=&lr=
15. Herrera, R. (2013). Diseño sísmico de estructuras mixtas. *Construcción Metálica en América Latina*. <http://www.construccionenacero.com/Material%20Tecnico/Construccion%20Mixta/DisenoSismEstrMixtas%20Final.pdf>
 16. Mander, J. B., Priestley, M. J., & Park, R. (1988). Theoretical stress-strain model for confined concrete. *Journal of structural engineering*, 114(8), 1804-1826.
 17. MIDUVI. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción- NEC - SE - HM*. Quito.
 18. Nilson, A. (2010). Design of reinforcement at joints. In McGraw-Hill (Ed.), *Design of concrete structures*.
 19. Park, R., & Paulay, T. (1975). *Reinforced Concrete Structures*.
 20. Park, R., Priestley, M., & Gill, W. D. (1982). Ductility of square-confined concrete columns. *Journal of the structural division*, 108(4), 929-950.
 21. Placencia, P., Gallegos, A., & Morales, M. (2014). *Análisis estructural de losas con luces de 6, 10, 12 metros utilizando dos sistemas constructivos*. Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
 22. Soto, J. (2012). *Proyecto de conexiones de vigas de acero a muros de concreto en estructuras mixtas*. Universidad Católica Andrés Bello.
 23. Vargas, G., & González, J. (2005). Procedimiento para obtener gráficas momento-curvatura en vigas de concreto reforzado. *Ingeniería*, 9(1), 37-47.
 24. Whitney, C. S. (1942). Plastic theory of reinforced concrete design. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 107(1), 251-282.