

OPTIMIZATION OF HYBRID NODES IN REINFORCED CONCRETE BEAMS FOR AN EFFICIENT CONSTRUCTION PROCESS

Carlos Jivan Chávez Joza ⁽¹⁾, Yordy Mieles Bravo ⁽²⁾

⁽¹⁾ Maestrante Académico con Trayectoria Profesional en Ingeniería Civil Mención Estructuras, Posgrado de la Universidad Técnica de Manabí,
cchavez4551@utm.edu.ec

⁽²⁾ Profesor, Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Manabí,
yordy.mieles@utm.edu.ec

Received: April 2024; Accepted: May 2024;
Published: June 2024

ABSTRACT

This study develops a proposal for the optimization of hybrid nodes in reinforced concrete beams due to the remarkable increase of mixed concrete and steel constructions around the world, in order to achieve an efficient construction process ensuring that they are resistant to all kinds of stresses that may affect the integrity of a structure, since generally through steel beams are used that completely invade the reinforced concrete beam and generate a great disturbance in it, affecting its behavior. A series of numerical models are elaborated by dimensioning the required steel profiles that form a hybrid node with the reinforced concrete beam using the principles of the Tensor Strut Method, proposing a new hybrid connection in order to reduce the variety of existing constructive dispersions.

Keywords: Hybrid nodes, steel deck, IPE profiles, strut and tie method.

OPTIMIZACIÓN DE NUDOS HÍBRIDOS EN VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO PARA UN EFICIENTE PROCESO CONSTRUCTIVO

RESUMEN

En el presente estudio se desarrolla una propuesta de optimización de nudos híbridos en vigas de hormigón armado debido al notable aumento que han tenido las construcciones mixtas de hormigón y acero en todo el mundo, con el fin de lograr un eficiente proceso constructivo garantizando que sean resistentes ante todo tipo de solicitaciones que puedan afectar la integridad de una estructura, ya que generalmente se utilizan vigas de acero pasantes que invaden totalmente la viga de hormigón armado y que generan una gran perturbación en la misma afectando su comportamiento. Se elabora una serie de modelos numéricos dimensionando perfiles de acero requeridos y que forman un nudo híbrido con la viga de hormigón armado utilizando los principios del Método Puntal Tensor,

proponiendo una nueva conexión híbrida en busca de disminuir la variedad de dispersiones constructivas existentes.

Palabras Claves: Nudos híbridos, steel deck, perfiles IPE, método puntal tensor.

1. INTRODUCCIÓN

Los nudos híbridos en vigas de hormigón armado representan una solución constructiva para entresijos compuestos por losas steel deck que generalmente se apoyan sobre vigas metálicas y estas a su vez van conectadas a las vigas de hormigón armado generándose la unión de dos elementos estructurales diferentes como son el hormigón y el acero.

En los procesos constructivos de dichos sistemas estructurales, usualmente se utilizan secciones con dimensiones constantes de la viga de acero pasante a la viga de hormigón armado, pero además existe la posibilidad de que donde convergen ambas vigas, emplear dimensiones menores a las necesitadas en zonas de luz libre de los vanos, debido a que en el nudo la viga de acero no necesita ser tan grande.



Figura 1. Ejemplos de nudos híbridos en los que la viga pasante de acero invade totalmente la viga de HA

Zhou et al. (2019), realizaron un estudio en el cuál modificaron los nudos híbridos entre columnas de hormigón armado y vigas de acero incluidas en las notas técnicas del ASCE con el fin de fundamentar la reducción del ancho de ala de la viga pasante de cara a disminuir las dificultades en la colocación del hormigón. Para investigar el comportamiento sísmico de la conexión se aplicaron cargas cíclicas y al analizar los resultados se obtuvo que la nueva conexión propuesta tuvo un rendimiento sísmico favorable.

A partir de la introducción del sistema de losa colaborante hasta la fecha, se han desarrollado múltiples variantes de nudos entre la viga de hormigón y la viga de acero, en las que predomina el empirismo y la falta de fundamentación rigurosa en las soluciones constructivas (Mieles, Larrúa, & Pardo, 2021). Las empresas fabricantes de este tipo de losas generalmente detallan en sus manuales formas de realizar dicha conexión, pero no poseen un sustento técnico suficiente para garantizar un correcto funcionamiento.

Castañeda & Mieles (2017), realizaron modelos computacionales de edificios con nudos híbridos con tres variables independientes y dos niveles: altura del edificio, rectangularidad en planta y tipo de nudo; en todos los casos analizados se encontró que el tipo de nudo influye en la respuesta estructural de las variables dependientes: momento, cortante y deriva de piso.

Por otra parte, Mieles & Larrúa (2019), experimentaron con ensayos de laboratorio en vigas con nudos híbridos, los cuales fueron debidamente caracterizados y calibrados en modelos de elementos finitos, a través de los que se obtuvo la trayectoria de esfuerzos y distribución de tensiones, lo que les permitió desarrollar un modelo con el método puntal tensor para el diseño de nudos híbridos entre vigas de acero pasantes a las vigas de hormigón armado.

En el laboratorio de estructuras de la Universidad Técnica de Manabí se desarrolló un programa experimental relacionado con algunos de los tipos de nudos híbridos más utilizados en el Ecuador, en dos etapas continuas. En la primera etapa los ensayos exploratorios indicaron que el mejor comportamiento de los nudos híbridos es con vigas pasantes. Por consiguiente, la segunda etapa abarcó que todas las vigas, contaran con un único nudo ubicado en la sección central, sitio de aplicación de la carga concentrada y comprendió análisis de variables como la relación momento - cortante en la sección de ubicación del nudo, la relación altura del perfil de acero pasante - altura de la viga de hormigón, y el uso o no de elementos suspensores. Como resultados se observó que es más favorable el comportamiento de los especímenes con nivel bajo de perturbación en el nudo respecto a los que cuentan con nivel alto de perturbación y además que el uso de suspensores ayuda a mejorar el comportamiento (Mieles, Larrúa, & Alcívar, 2020).

En el Ecuador y más específicamente en la provincia de Manabí, se requieren elementos estructurales resistentes, por lo que los nudos híbridos en vigas de hormigón armado deben poseer un adecuado comportamiento ante los esfuerzos o sollicitaciones externas que puedan afectar las estructuras, ya que es una zona con múltiples peligros existentes, pero que además sean óptimos y favorables para llevar adelante un eficiente proceso constructivo.

En virtud de los estudios relacionados al comportamiento de nudos híbridos que existen de manera teórica y de ensayos experimentales, es esencial tener un proceso de optimización en el punto de la conexión que es lo que se pretende abordar con la investigación, cambiando la forma convencional de utilizar nudos híbridos en el que se usa una misma sección constante de viga secundaria de acero pasante a la viga de hormigón de armado, proponiendo una nueva conexión en el nudo con un perfil de acero más pequeño al que necesita la viga secundaria en la luz libre del vano.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES

Para el presente estudio se idealizó el modelo de la conexión híbrida propuesta, en el cual se forma el nudo entre la viga de hormigón armado con el perfil de acero necesario para anclar y transmitir adecuadamente la carga, conectándose de manera soldada a través de placas metálicas y con pernos a la viga secundaria de acero tal como se muestra en la figura 2.

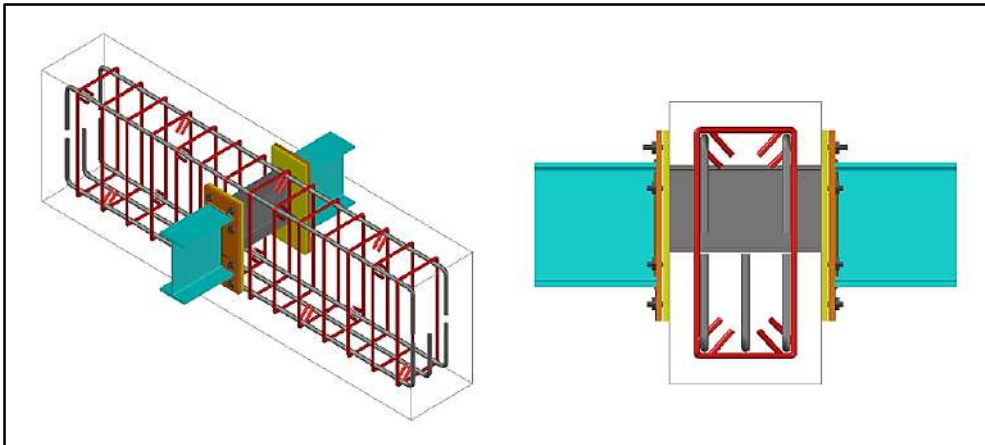


Figura 2. Modelo de Nudo Híbrido Propuesto

En este trabajo se elaboraron una serie de modelos numéricos dimensionando perfiles de acero que formen un nudo híbrido con la viga de hormigón armado en función de la carga que se trasmite al nudo, analizando diferentes situaciones de reparto, secciones de los elementos, luces y áreas cooperantes.

En primer lugar, se analizó los diferentes tipos de cargas que influyen en el comportamiento del nudo, para las cuales se tomaron en consideración la carga muerta, viva y sísmica. Para el cálculo de la carga muerta se hizo uso de los catálogos de las empresas proveedoras de losas steel deck, en los cuales se encuentran los tipos de losas colaborantes más comunes que se utilizan en el medio y estos nos proporcionan los pesos de las placas colaborantes y del hormigón que se ubica sobre estas, como se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Resumen de los tipos de losas, pesos del hormigón y de las placas colaborantes utilizados para el estudio (Novacero, 2019)

| Altura de Onda de la Placa Colaborante (mm) | Espesor de la Placa Colaborante (mm) | Peso de la Placa Colaborante (kN/m ²) | Espesor de la Losa (cm) | Peso de Hormigón (kN/m ²) |
|---|--------------------------------------|---|-------------------------|---------------------------------------|
| 55.00 | 0.76 | 0.073 | 5 | 1.763 |
| | | | 6 | 1.999 |
| | | | 8 | 2.469 |
| | | | 10 | 2.940 |
| | | | 12 | 3.411 |
| | | | 14 | 3.881 |
| | 16 | 4.352 | | |
| | 1.00 | 0.096 | 5 | 1.758 |

| | | | | |
|-------|------|-------|----|-------|
| | | | 6 | 1.994 |
| | | | 8 | 2.464 |
| | | | 10 | 2.935 |
| | | | 12 | 3.406 |
| | | | 14 | 3.877 |
| | | | 16 | 4.347 |
| 76.00 | 0.76 | 0.080 | 5 | 1.961 |
| | | | 6 | 2.197 |
| | | | 8 | 2.667 |
| | | | 10 | 3.138 |
| | | | 12 | 3.609 |
| | | | 14 | 4.080 |
| | | | 16 | 4.550 |
| | 1.00 | 0.105 | 5 | 1.958 |
| | | | 6 | 2.194 |
| | | | 8 | 2.664 |
| | | | 10 | 3.135 |
| | | | 12 | 3.606 |
| | | | 14 | 4.077 |
| | | | 16 | 4.547 |

Además, a la carga muerta se le incluyó el peso del recubrimiento de piso, de paredes, enlucidos e instalaciones, utilizando los pesos unitarios expuestos en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC, 2015) en su apartado de cargas no sísmicas NEC-SE-CG.

La carga viva fue analizada para dos tipos de ocupaciones y usos como son el de residencias y oficinas basándose en la NEC-SE-CG. La carga sísmica se idealizó como un 20% del total de la carga muerta. Para obtener la carga total por metro cuadrado se realizó la combinación y mayoración de cargas a través de la ecuación 1 y para conseguir la carga que llega al nudo se utilizó el total de la carga mayorada por el área cooperante a dicho nudo expresada en la ecuación 2.

$$Carga\ Total = 1.2 * Carga\ Muerta + 1.6 * Carga\ Viva + Carga\ Sísmica \quad (1)$$

$$Carga\ al\ Nudo = Carga\ Total * Área\ Cooperante \quad (2)$$

Para el cálculo del área cooperante al nudo se empleó la disposición de los elementos estructurales tal como se puede observar en la figura 3, utilizando combinaciones y variaciones de diferentes luces de vanos y vigas secundarias con distintas separaciones entre ellas, cuyos valores usados se encuentran descritos en la tabla 2.

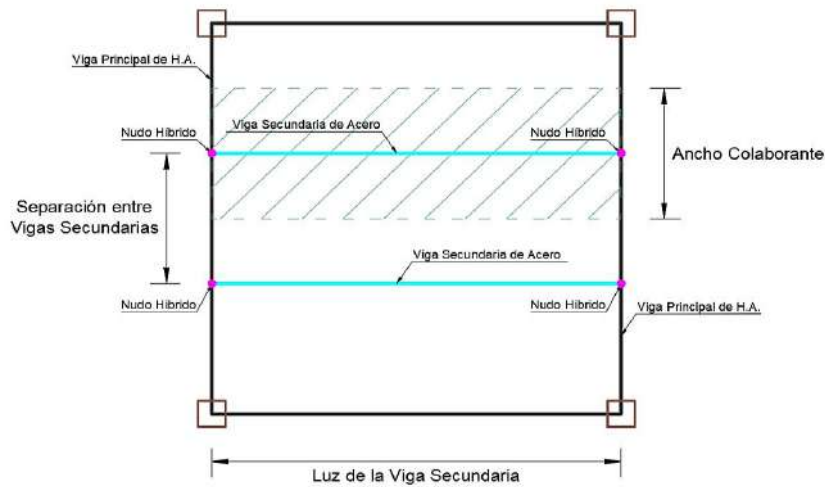


Figura 3. Disposición de elementos estructurales

Para elaborar las combinaciones y variaciones de las diferentes situaciones de reparto, se estableció luces de vigas secundarias que van desde los 3 m hasta los 8 m variando cada 50 cm, con separaciones entre vigas secundarias desde 1 m hasta 4 m variando cada 20 cm; por consiguiente, para cada luz de las vigas secundarias especificadas fueron analizadas todas las separaciones entre dichas vigas, como se encuentra descrito en la tabla 2.

Tabla 2. Luces de vigas secundarias y separaciones utilizadas para elaborar las diferentes combinaciones y variaciones de las situaciones de reparto

| Luz de la Viga Secundaria (m) | | Separación entre Vigas Secundarias (m) | | |
|-------------------------------|------|--|------|------|
| 3.00 | 6.00 | 1.00 | 2.20 | 3.40 |
| 3.50 | 6.50 | 1.20 | 2.40 | 3.60 |
| 4.00 | 7.00 | 1.40 | 2.60 | 3.80 |
| 4.50 | 7.50 | 1.60 | 2.80 | 4.00 |
| 5.00 | 8.00 | 1.80 | 3.00 | |
| 5.50 | | 2.00 | 3.20 | |

3. MODELO PUNTAL TENSOR PARA NUDOS HÍBRIDOS

Los nudos híbridos generalmente tienen una zona perturbada debido a la discontinuidad geométrica presente, la misma que no cumple con una distribución lineal de deformaciones, por lo que no es factible diseñar un nudo híbrido con la teoría de la flexión. El ACI 318-19 no trata de manera específica este tipo de nudos, pero el Método Puntal Tensor (MPT) es una excelente alternativa para diseñar regiones con discontinuidad (Reineck, 2002).

El MPT consiste en reemplazar la zona del elemento en análisis donde se encuentra la discontinuidad que genera una concentración de esfuerzos tensionales

por una armadura hipotética de barras articuladas planas o espaciales como una cercha, denominadas puntales si se encuentran en compresión, tensores si están en tracción y nudos a los puntos de concurrencia de los puntales y tensores, los mismos que deben estar en equilibrio con las solicitaciones externas y los esfuerzos de continuidad de la región (Darwin, Dolan, & Nilson, 2016; Schlaich et al., 1987).

Mieles (2021), desarrolló mediante un estudio tenso-deformacional y la observación de la fisuración experimental, un modelo con el Método Puntal Tensor generalizado para nudos híbridos con vigas pasantes basándose en los principios expuestos en el capítulo 23 del ACI 318-19.

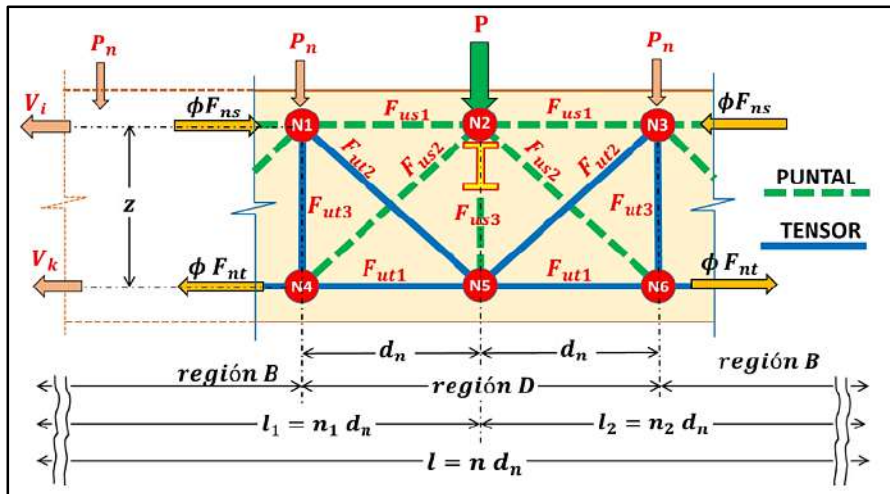


Figura 4. Modelo Puntal Tensor para Nudos Híbridos (Mieles, 2021)

Este modelo es parte fundamental para el estudio realizado, pues se empleó como base el análisis en las zonas nodales, partiendo de que los anchos de dichas zonas deben resistir los esfuerzos de los puntales, tensores y cargas que convergen a ese nudo, para lo cual se debe cumplir que $\phi F_{nn} \geq F_{un}$, siendo F_{nn} la resistencia nominal de una zona nodal, F_{un} la fuerza de diseño en ese nudo y ϕ es el factor de reducción de la resistencia igual a 0,75.

La resistencia nominal a la compresión de una zona nodal es $F_{nn} = f_{ce} * A_{nz}$, donde f_{ce} es la resistencia efectiva a la compresión del hormigón en un puntal o zona del nudo; A_{nz} es el área de la cara nodal o de una sección a través de la zona nodal y $f_{ce} = 0,85 * \beta_c * \beta_n * f'_c$. El valor de β_c corresponde a un coeficiente de confinamiento y el de β_n a un coeficiente para las zonas nodales, encontrados en las tablas 23.4.3(b) y 23.9.2 del ACI 318-19 respectivamente.

Al analizar el nudo 2 (N2) y su correspondiente zona nodal en el modelo puntal tensor para nudos híbridos de la figura 4, el ancho del ala b_f del perfil de acero realiza la función de una placa de apoyo ante la acción de la carga P , dicho nudo requiere desarrollar una resistencia del hormigón igual o mayor a la fuerza de compresión de la carga P y satisfacer que $\phi F_{nn} \geq F_{us}$ asegurando la resistencia de esa zona nodal; se puede indicar que $F_{us} = P$, entonces $P \leq \phi * f_{ce} * A_{nz}$, donde A_{nz} será en este caso el área de contacto del perfil pasante de acero con la viga de

hormigón, siendo $A_{nz} = b_{H.A.} * b_f$, por ende $P \leq \phi * f_{ce} * b_{H.A.} * b_f$, y despejando b_f se obtiene la ecuación 3, que representa el ancho mínimo necesario del ala del perfil de acero pasante para un nudo híbrido.

$$b_f \geq \frac{P}{\phi * f_{ce} * b_{H.A.}} \quad (3)$$

En lo que respecta a la altura necesaria del perfil de acero pasante se estimó que debe ser menor o igual al 50% de la altura de la viga de hormigón armado con la que se forma el nudo híbrido, tomando en consideración la investigación existente mediante ensayos experimentales realizada por Mieles, Larrúa, & Alcívar (2020), la que demuestra que existe una gran perturbación en el nudo y en su comportamiento al utilizar vigas de acero pasante con altura mayor a la de la mitad de la viga de hormigón armado.

4. DIMENSIONADO DE NUDOS HÍBRIDOS ÓPTIMOS

Para este trabajo se utilizaron todos los diferentes tipos de losas expuestos en la tabla 1, creando múltiples variaciones y diferentes situaciones de reparto para cada una de ellas, de tal forma que se emplearon longitudes de vanos y luces de la viga secundaria que van desde los 3 m hasta los 8 m variando cada 50 cm, separaciones entre vigas secundarias desde 1 m hasta 4 m variando cada 20 cm, como se encuentra establecido en la tabla 2; secciones mínimas de la viga principal de hormigón armado con un ancho de 25 cm y una altura de 30 cm en adelante y la resistencia mínima del hormigón a compresión de 21 Mpa, obteniendo para cada escenario en análisis la respectiva carga que se transmite al nudo y dimensionando el perfil de acero pasante necesario haciendo uso de la metodología expuesta en la sección 3, resultados que se presentan agrupados a continuación en la figura 5.

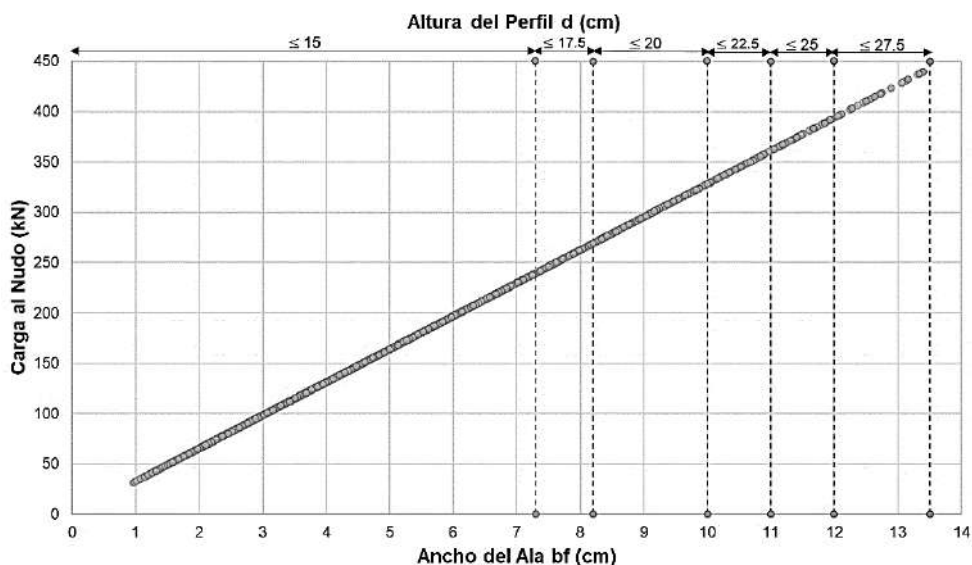


Figura 5. Representación de los resultados de carga al nudo, ancho y altura del perfil de acero

Gracias a la elaboración de la figura 5, se obtuvo un instrumento con el que se puede fácilmente dimensionar de forma óptima y eficiente un nudo híbrido conformado por una viga de hormigón armado y un perfil de acero pasante, para cualquier carga que sea transmitida a dicho nudo.

En concordancia con todos los resultados obtenidos y mostrados en la figura 5, se elaboró la tabla 3, la misma que ofrece el calibrado de nudos híbridos pasantes generalizados en función de la máxima carga que se puede resistir en aquellos nudos, empleando perfiles IPE comerciales. Para conseguir la carga máxima que pueden resistir los nudos híbridos dispuestos en la tabla 3, se despejó P de la ecuación 3 y se obtuvo:

$$P \leq \phi * f_{ce} * b_{H.A.} * b_f \quad (4)$$

Para ejemplificar la ecuación 4 aplicada a un perfil comercial IPE 80, se reemplazan las variables utilizando el ancho b_f del perfil el cual es de 4.6 cm, una viga de hormigón armado de mínimo 25 cm de base y la resistencia efectiva mínima a la compresión del hormigón en la zona nodal de 17.505 Mpa (1.7505 kN/cm²), de la siguiente forma:

$$P \leq 0.75 * 1.7505 \frac{kN}{cm^2} * 25 \text{ cm} * 4.6 \text{ cm}$$

$$P \leq 150.98 \text{ kN}$$

Tabla 3. Nudos Híbridos pasantes generalizados y normalizados utilizando perfiles IPE comerciales

| Perfil de Acero | | | Carga Máxima al Nudo (kN) | Dimensiones Mínimas de la Viga Principal de Hormigón Armado | |
|-----------------|------------------|-----------------|---------------------------|---|-----------------|
| IPE | Ancho b_f (cm) | Altura d (cm) | | Base b (cm) | Altura h (cm) |
| IPE 80 | 4.60 | 8.00 | 150.98 | 25.00 | 30.00 |
| IPE 100 | 5.50 | 10.00 | 180.52 | 25.00 | 30.00 |
| IPE 120 | 6.40 | 12.00 | 210.06 | 25.00 | 30.00 |
| IPE 140 | 7.30 | 14.00 | 239.60 | 25.00 | 30.00 |
| IPE 160 | 8.20 | 16.00 | 269.14 | 25.00 | 35.00 |
| IPE 180 | 9.10 | 18.00 | 298.68 | 25.00 | 40.00 |
| IPE 200 | 10.00 | 20.00 | 328.22 | 25.00 | 40.00 |
| IPE 220 | 11.00 | 22.00 | 361.04 | 25.00 | 45.00 |
| IPE 240 | 12.00 | 24.00 | 393.86 | 25.00 | 50.00 |
| IPE 270 | 13.50 | 27.00 | 443.09 | 25.00 | 55.00 |

A través de la tabla 3 se logra establecer nudos híbridos normalizados a los estándares comerciales que se tienen comúnmente en el ámbito de la construcción y ajustados a los requerimientos necesarios para cualquier situación que pueda presentarse al utilizar sistemas constructivos steel deck, generalizando nudos pasantes prefabricados a los que se conecta la viga secundaria de acero de forma soldada a través de placas metálicas y con pernos como se detalla a continuación en la figura 6.

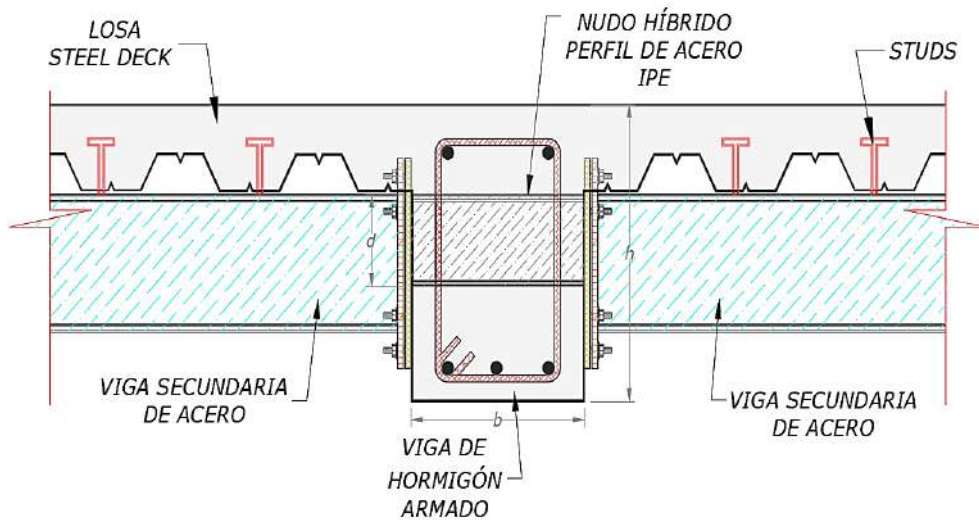


Figura 6. Detalle de Nudo Híbrido pasante normalizado y optimizado utilizando perfiles IPE

5. CONCLUSIONES

Es necesario optimizar los nudos híbridos que se emplean de forma convencional con el propósito de conseguir un eficiente proceso constructivo, impulsando gracias a la propuesta de esta investigación la utilización de nudos pasantes prefabricados para las vigas de hormigón armado con facilidad de transporte, construcción y montaje en obra.

Los nudos híbridos generalizados y normalizados presentados en este estudio permiten lograr obtener menos dispersiones constructivas en el medio, brindando seguridad, comodidad de diseño y un sustento técnico apropiado para garantizar el adecuado funcionamiento de los sistemas estructurales steel deck, lo que representa un progreso importante para la construcción de estructuras mixtas de hormigón y acero.

Es más beneficioso y favorable invadir menos la viga de hormigón armado al utilizar las secciones necesarias del perfil de acero pasante para lograr anclar, transmitir y soportar las cargas y sollicitaciones que puedan afectar el nudo híbrido. El Método Puntal Tensor permite dimensionar nudos híbridos pasantes en vigas de hormigón armado de forma óptima, eficiente y segura, a partir de las cargas que puedan influir en su comportamiento y de la disposición de los elementos estructurales.

REFERENCIAS

- ACI-318-19. (2019). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Castañeda, E., & Mieles, Y. (2017). Una mirada al comportamiento estructural de columnas, vigas, entresijos y edificaciones durante el sismo de Ecuador 2016. *Revista Ingeniería de la Construcción*, 32(3), 157-172. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000300157>
- Darwin, D., Dolan, C. W., & Nilson, A. H. (2016). *Design of Concrete Structures*. New York: McGraw-Hill Education.
- Mieles, Y. (2021). *Contribución a la evaluación de la influencia de los nudos híbridos en la capacidad resistente de vigas de hormigón armado en emparrillados mixtos con vigas secundarias de acero pasantes bajo cargas perpendiculares a su plano*. [Tesis de Doctorado]. Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría", La Habana.
- Mieles, Y., & Larrúa, R. (2019). Modelo puntal tensor para un nudo híbrido viga de hormigón y viga de acero bajo cargas gravitatorias. *Revista Ingeniería de Construcción*, 34(3), 330 - 343. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732019000300330>
- Mieles, Y., Larrúa, R., & Alcívar, S. (2020). Diseño de experimento para vigas con nudos híbridos. *Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería. Universidad del Zulia*, 43(2), 50-55. doi:<https://doi.org/10.22209/rt.ve202020n2a07>
- Mieles, Y., Larrúa, R., & Pardo, M. (2021). Estado del arte sobre experimentación y modelación de nudos híbridos de hormigón armado y acero. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26(2), 330-363. doi:<https://doi.org/10.24133/riie.v26i2.2047>
- NEC. (2015). Norma Ecuatoriana de la Construcción (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda). Quito-Ecuador.
- Novacero. (2019). *Catálogo de Estructuras Metálicas y Mixtas. Novalosa. Edición No. 3*. Recuperado el 26 de Agosto de 2023, de <https://www.novacero.com/wp-content/uploads/2021/12/Novalosa-Catalogo-Digital.pdf>
- Reineck, K. (2002). Ejemplos para el Diseño de Hormigón Estructural usando Modelos de Bielas y Tirantes. *ACI Structural Journal*.
- Schlaich, J., Schäfer, K., & Jennewein, M. (1987). Toward a Consistent Design of Structural Concrete. *PCI Journal*, 32(3), 74-150. doi:<https://doi.org/10.15554/pcij.05011987.74.150>
- Zhou, Q.-s., Fu, H.-w., Ding, F.-x., Liu, X.-m., Yu, Y.-j., Wang, L.-p., & Lou, L. (2019). Seismic behavior of a new through-core connection between concrete-filled

steel tubular column and composite beam. *Journal of Constructional Steel Research*, 155(3), 107-120. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2018.12.002>