

## **STATE OF THE ART ON EXPERIMENTATION AND MODELING OF HYBRID NODES OF REINFORCED CONCRETE AND STEEL**

**Yordy Mieles<sup>(1)</sup>, Rafael Larrúa<sup>(2)</sup>, Mavel Pardo<sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup>Profesor. Carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Técnica de Manabí [jmieles@utm.edu.ec](mailto:jmieles@utm.edu.ec)

<sup>(2)</sup>Profesor. Centro de Estudio para el Desarrollo y la Conservación de las Construcciones. Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz". Cuba. [rafael.larrua@reduc.edu.cu](mailto:rafael.larrua@reduc.edu.cu)

<sup>(3)</sup>Profesora Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Camagüey "Ignacio Agramonte Loynaz. Cuba. [mavel.pardo@reduc.edu.cu](mailto:mavel.pardo@reduc.edu.cu)

Received: February 2021; Accepted: May 2021 ; Published: May 2021

### **ABSTRACT**

Internationally, a great variety of structural systems are reported where elements of reinforced concrete and steel interact, which gives rise to the need for the use of hybrid nodes which guarantee the connection between the elements and an adequate global behavior of the structure.

An example of the above in the ecuadorian context is the widespread use of construction systems with composite slab of concrete and steel deck in buildings with reinforced concrete frames, with a notable dispersion in the types of hybrid nodes used, those that generally do not have a rigorous foundation.

The foregoing has led to the recent and current development of theoretical and experimental research on the subject, with emphasis on the study of the behavior of hybrid nodes between steel beams and reinforced concrete beams, led by the Technical University of Manabí (UTM); as part of these, this article presents a synthesis of the state of the art on experimentation and modeling of that type of connections, and outlines some results achieved in the current research. It was found that there is no history of specific experimental or numerical investigations in the typology currently evaluated at the UTM.

The role and potential of each type of research tool, experimentation and modeling, as well as their integration, in recent research in the field of hybrid nodes is highlighted, as is usual in the context of structural engineering.

**Keywords:** Hybrid nodes. Experimentation. Structural modeling. Structures with discontinuities.

# ESTADO DEL ARTE SOBRE EXPERIMENTACIÓN Y MODELACIÓN DE NUDOS HÍBRIDOS DE HORMIGÓN ARMADO Y ACERO

## RESUMEN

Internacionalmente se reportan una gran variedad de sistemas estructurales donde interactúan elementos de\* hormigón armado y acero, lo que da lugar a la necesidad de la utilización de nudos, denominados híbridos, que garantizan la unión entre los elementos y un adecuado comportamiento global de la estructura.

Un ejemplo de lo anterior en el contexto ecuatoriano, es la difundida utilización de sistemas constructivos con losas compuestas de hormigón y láminas de acero (*steel deck*) en edificaciones con pórticos de hormigón armado, con una notable dispersión en las tipologías de nudos híbridos utilizados, los que en general no cuentan con una fundamentación rigurosa.

Lo anterior ha conducido al desarrollo reciente y actual de investigaciones teóricas y experimentales sobre el tema, con énfasis en el estudio del comportamiento de nudos híbridos entre vigas de acero y vigas de hormigón armado, lideradas por la Universidad Técnica de Manabí (UTM); como parte de estas, en el presente artículo se expone una síntesis del estado del arte sobre experimentación y modelación de este tipo de conexión, y se esbozan algunos resultados alcanzados en la investigación en curso. Pudo constatarse que no existen antecedentes de investigaciones experimentales o numéricas específicas en la tipología actualmente valorada en la UTM.

Se resalta el rol y potencialidades de cada herramienta de investigación, experimentación y modelación, así como de su integración, en las investigaciones recientes en el ámbito de los nudos híbridos, como es usual en el contexto de la ingeniería estructural.

**Palabras Claves:** Nudos híbridos. Experimentación. Modelación estructural. Estructuras con discontinuidades.

## 1. INTRODUCCIÓN

La investigación experimental ha sido un elemento esencial en el estudio del comportamiento y el desarrollo de los métodos de diseño de múltiples tipologías estructurales. Sin embargo, no es posible cubrir todas las situaciones de diseño posibles por esa vía, debido a lo relativamente costosa que resulta.

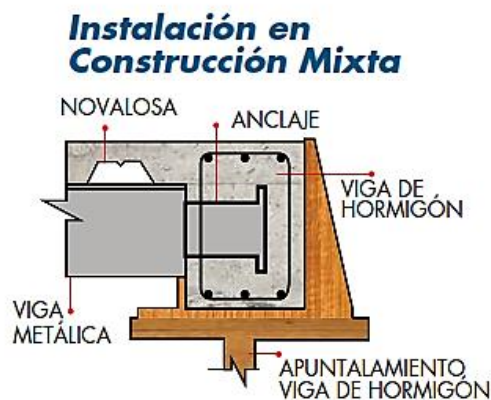
Por tal motivo, se requiere que la experimentación sea complementada con técnicas alternativas, dentro de las cuales sobresale la modelación numérica por medio de las potentes herramientas computacionales actuales, basadas en el método de elementos finitos (MEF), que posibilita simular de manera adecuada los más complejos comportamientos estructurales y permite la realización de estudios

paramétricos que conceden una mayor generalidad y validez a los estudios desarrollados.

La forma en que se conectan los miembros estructurales de una edificación es decisiva en el comportamiento global de la estructura, esa conexión recibe el nombre de nudo (Gómez *et al* 2014). Los nudos se definen como la unión de dos o más elementos estructurales que confluyen en un punto que se desplaza y gira, donde los campos de compresiones o tracciones se intersectan (NSR 2012). A grandes rasgos, en los nudos articulados las barras sólo tienen solicitaciones axiales (tracción o compresión) mientras que los nudos rígidos se encuentran sometidos a fuerzas axiales y cortantes, así como a momentos flectores y torsores (Nieto 2015).

El diseño de los nudos se considera crítico por las fallas atribuidas al deficiente detallado, motivo por el cual en zonas sísmicas se debe diseñar con la filosofía de nudo fuerte – elemento débil y para que transmitan los esfuerzos de los miembros que concurren en la unión (Aguiar 2019; Nilson *et al.* 2010).

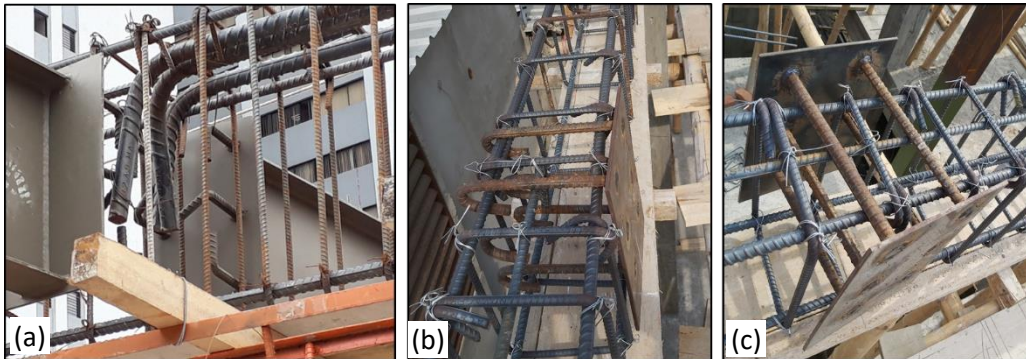
Una fuente esencial de motivación para el desarrollo de la investigación ha sido la introducción en Ecuador del sistema de losa compuesta a partir del año 2000 y el incremento de su presencia en la construcción de edificios; los manuales de los fabricantes lo recomiendan para estructuras de acero y para “entrepisos de sistemas mixtos con una estructura principal de hormigón y vigas secundarias metálicas” (Novacero 2015), como el de la figura 1. Desde la introducción del sistema de losa compuesta hasta la fecha han proliferado diversas variantes de nudos entre la viga de hormigón y la viga de acero, en las que prevalece el empirismo y la falta de fundamentación rigurosa en las soluciones. Algunos ejemplos de nudos utilizados se describen a continuación.



**Figura 1** Esquema para la unión de la viga de hormigón y la viga secundaria de acero (Novacero 2015)

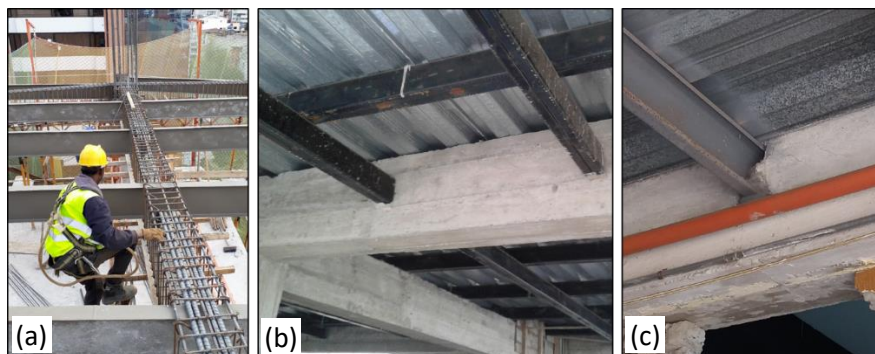
**Nudos de anclajes de barras de acero:** Este sistema consiste en una viga secundaria de acero que tiene una placa metálica en sus extremos con anclajes de barras de acero corrugados que se coloca previa la fundición de la viga de hormigón armado [ver la figura 2 (a)]. Existe una variante donde primero se coloca la plancha metálica con los anclajes de barras de acero en la viga de HA sin fundir, luego de

fraguado el hormigón se sueldan las vigas secundarias [ver la figura 2 (b, c)]. El nudo formado entre la viga de acero secundaria y la viga de hormigón puede considerarse un apoyo articulado.



**Figura 2** (a) Vigas secundarias de acero con plancha metálica y anclajes de barras de acero. (b) Placa individual con anclajes para viga de borde. (c) Doble placa con anclajes para viga medianera.

**Nudo de viga secundaria de acero pasante:** Previa a la fundición de la viga principal de hormigón armado, se inserta una viga secundaria de acero que pasa a la viga de hormigón [ver las figuras 3 (a) (b) (c)] para conformar el emparrillado o malla espacial del piso. El nudo formado entre la viga de acero secundaria y la viga de hormigón puede considerarse un empotramiento.



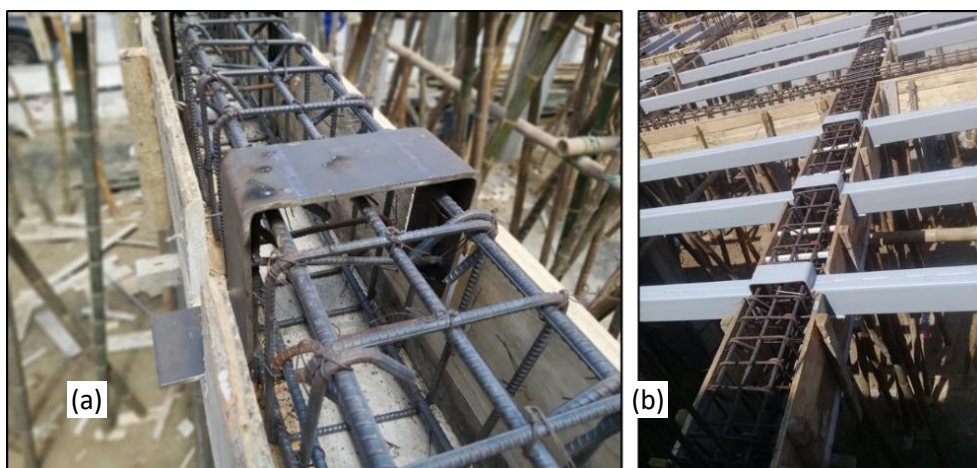
**Figura 3** Nudos de viga secundaria de acero pasante. (a) Viga pasante de sección I. (b) Viga pasante de doble sección G soldada. (c) Viga pasante de sección G.

**Nudo de viga secundaria con apoyo móvil:** La viga secundaria de acero se apoya sin ningún tipo de conexión a la viga de hormigón como se muestra en la figura 4. Esta tipología es muy utilizada aunque tiene la desventaja que desconecta la losa de la estructura de vigas y columnas, perdiendo la ventaja del diafragma rígido que aportan las losas y que contribuye a resistir las cargas sísmicas. Este sistema tiene la variante mostrada en la figura 4(b) con una malla espacial de vigas secundarias de acero en dos direcciones, con un nudo de apoyo móvil en un sentido y nudo de apoyo empotrado en el otro sentido.



**Figura 4** Nudos de viga secundaria con apoyo móvil. (a) Nudo de apoyo móvil. (b) Malla espacial en dos direcciones con apoyo móvil y empotrado.

**Nudo con plancha en forma de U:** Consiste en planchas metálicas en forma de U sin anclar a la viga [ver la figura 5 (a) (b)]. En ese caso la viga metálica sólo transmite fuerza cortante a la viga de hormigón, pero no momento flector, pues no restringe el giro.

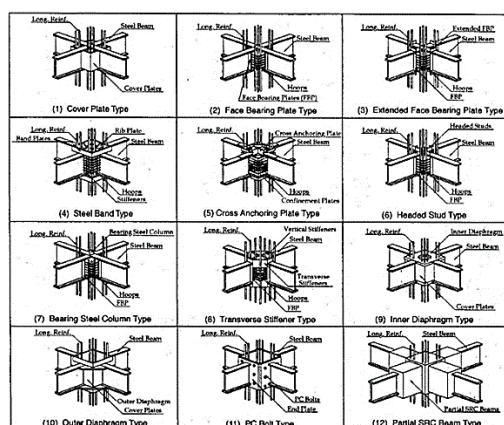


**Figura 5** Nudos de viga secundaria con plancha en U. (a) Instalación de la plancha en forma de U. (b) Viga secundaria soldada a la plancha.

En el presente artículo se abordan las peculiaridades y tendencias de las investigaciones experimentales y la modelación de las estructuras con discontinuidades, con énfasis en los nudos híbridos de hormigón armado y acero. Resulta conveniente aclarar, que se acude a la separación de las investigaciones precedentes en tópicos independientes dedicados a la experimentación y la modelación, con el propósito metodológico de resaltar el rol y potencialidades de cada herramienta de investigación, lo que no implica el desconocimiento de la tendencia a su integración, junto a otras técnicas, en las investigaciones recientes y actuales en el ámbito de los nudos híbridos, como es usual en el contexto de la ingeniería estructural.

## 2. INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES EN NUDOS HÍBRIDOS DE HORMIGÓN ARMADO Y ACERO.

Una amplia investigación desarrollada en los últimos 20 años ha conducido a modelos y criterios mejorados para el diseño sísmo – resistente de estructuras con nudos híbridos. Una importante contribución es el aporte del programa de investigación “*Cooperative Research Program on Composite and Hybrid Structures*” desarrollado de manera conjunta por EE. UU. y Japón, que incluye ensayos y modelos de más de 50 tipos de nudos híbridos entre vigas metálicas y columnas de hormigón armado como los mostrados en la figura 6, con experimentación en laboratorios y simulación de prototipos, que se recogen en notas técnicas del ASCE (ASCE 1994; Deierlein & Noguchi 2004).



**Figura 6** Nudos híbridos entre columna y viga. Notas técnicas del ASCE (ASCE 1994).

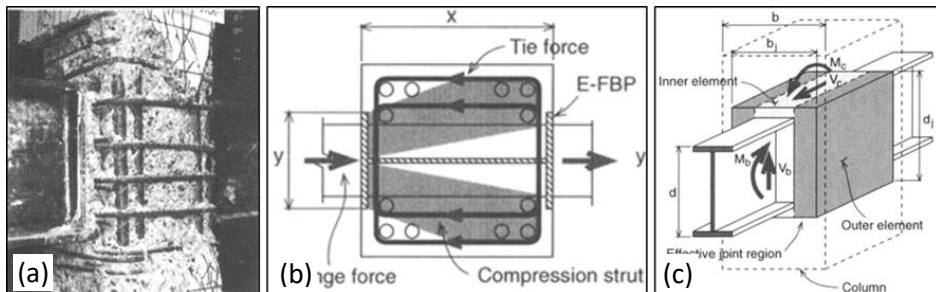
Igualmente, estos países han desarrollado normas de diseño sísmico para sistemas estructurales con nudos híbridos. Estos proyectos, junto con investigaciones previas, demuestran que los nudos híbridos se pueden diseñar con capacidad de deformación sísmica y resistencia comparable a la de los elementos de acero y hormigón armado que enlazan. (Zhou *et al.* 2019).

Elremaily & Azizinamini (2001) realizaron estudios experimentales del comportamiento, modos de fallo y resistencia al cortante de un nudo híbrido entre una columna tubular de acero rellena de hormigón y una viga de acero que pasa a través de la columna (figura 7). Los resultados experimentales fueron la base para el diseño del modelo descrito en (Elremaily & Azizinamini 2001) y se ilustran en la figura 7 (c).



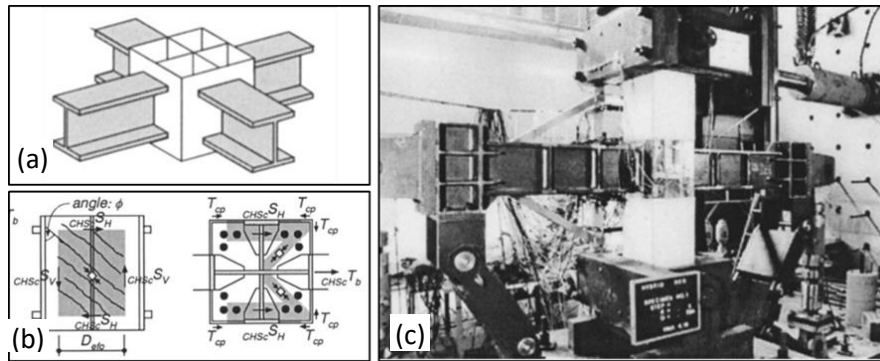
**Figura 7** Nudo híbrido entre columna y viga. (a) Detalle de espécimen. (b) Fallo de cortante (c) Curva carga – deriva. (Elremaily & Azizinamini 2001).

Kanno & Deierlein (2002) propusieron un nuevo nudo híbrido entre una viga de acero y una columna de HA, el cual se ilustra en la figura 8. El nudo propuesto se basa en directrices previamente desarrolladas por el Comité ASCE (ASCE 1994) sobre construcción compuesta, pero emplea modificaciones para mejorar la resistencia a mecanismos de fallos y modos de transferencia de tensiones en las articulaciones. El nudo fue mejorado usando un tensor y comprobado con el enfoque de bielas y tirantes (STM). (Kanno & Deierlein 2002).



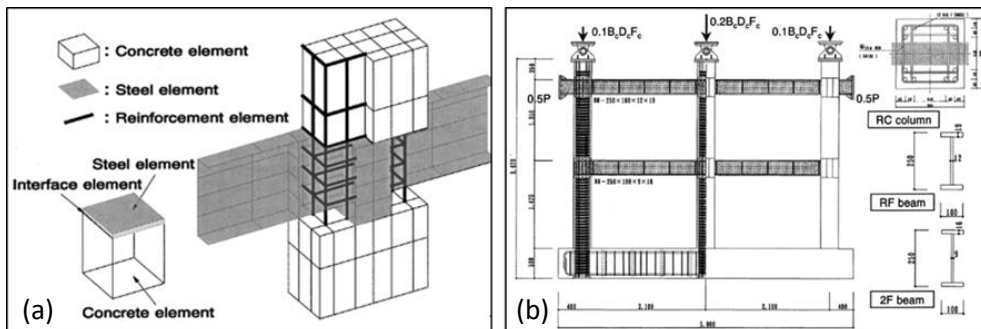
**Figura 8** Nudo híbrido de viga de acero pasante y columna de HA (a) Modo de fallo. (b) Bielas y tirantes. (c) Tamaño efectivo del nudo. (Kanno & Deierlein, 2002).

Kuramoto & Nishiyama (2002) ensayaron un nudo híbrido, que se muestra en la figura 9, entre una columna de HA y una viga de acero; se refuerza el nudo con cubre placas y refuerzos horizontales para mejorar el comportamiento estructural. (Kuramoto & Nishiyama 2004).



**Figura 9** Nudo híbrido en viga de acero y columna de HA (a) Esquema tridimensional del nudo. (b) Detalles del nudo. (c) Vista general del ensayo. (Kuramoto & Nishiyama 2004).

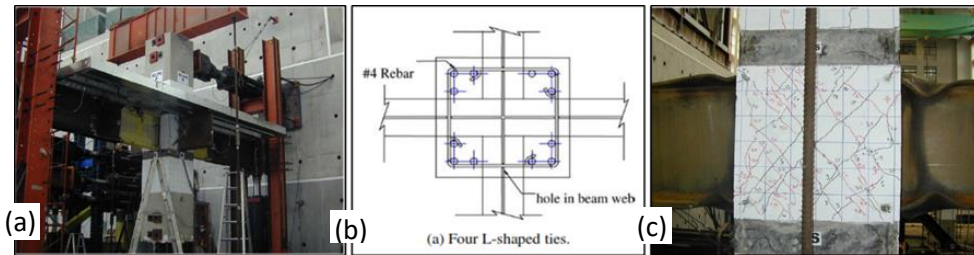
Noguchi & Uchida (2004) estudiaron experimentalmente dos tipos de nudos híbridos en columnas de HA con viga de acero pasante, reforzado con cubre placas (figura 10). En los ensayos se caracterizaron los modos de fallo, los mecanismos de corte y se evidenció un tipo de fallo dúctil en las vigas.



**Figura 10** Nudo de viga de acero pasante y columna de HA (a) Detalle del nudo. (b) Esquema general del ensayo y detalles de secciones transversales. (Noguchi & Uchida 2004).

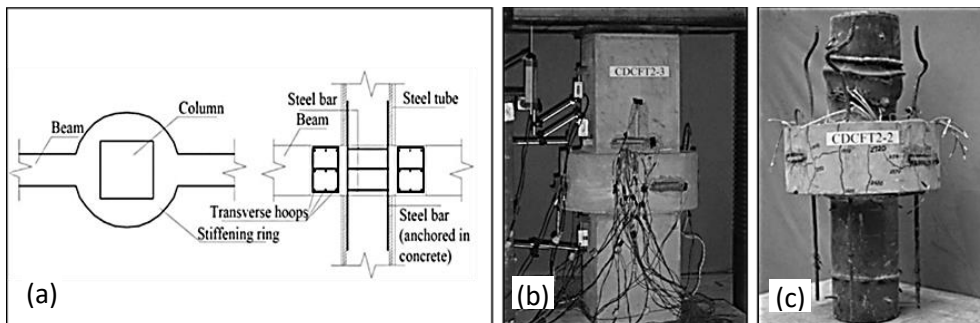
Cheng & Cheng (2004) experimentaron a escala real con nudos híbridos formados por columnas de hormigón armado con vigas de acero pasantes e incluyendo la losa de piso, tal como la mostrada en la figura 11. Los resultados del ensayo mostraron que todos los especímenes fallan de manera dúctil con formación de rótulas plásticas en los extremos de la viga cerca de la cara de la columna. Se encontró que la resistencia última de la viga compuesta con la inclusión de la losa se incrementó, como promedio, en un 27% (Cheng & Chen 2005).





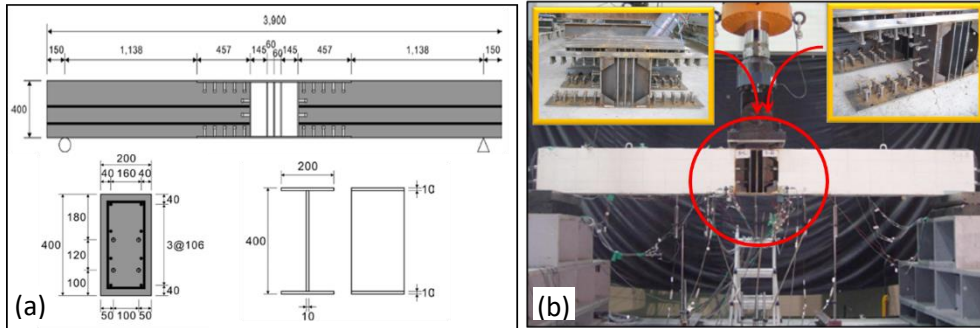
**Figura 11** Nudo entre columna de HA y viga de acero pasante con la inclusión de la losa (a) Espécimen antes del test. (b) Detalle de columna de HA con viga de acero. (c) Daño en las alas de la viga de acero luego del ensayo (Cheng & Chen 2005).

Nie *et al.* (2008) presentaron el estudio experimental de un nudo híbrido, para transferir momentos entre una columna tubular de acero y una viga de HA con refuerzo de barras de acero continuas en la zona del nudo. Se compensa con un anillo de HA el debilitamiento de la capacidad de carga axial, como se muestra en la figura 12. (Nie *et al.* 2008-a).



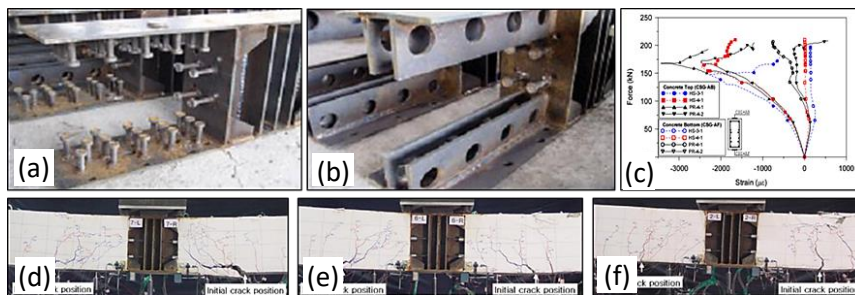
**Figura 12** Nudo de columna tubular de acero y viga de HA (a) Detalle del nudo. (b) Configuración del ensayo. (c) Modo de fallo. (Nie *et al.* 2008-a).

Won *et al.* (2008) llevaron a cabo un programa de investigación experimental acerca del comportamiento de nudos híbridos en vigas como el mostrado en la figura 13 (a). El nudo híbrido tiene la función de conectar varias vigas de puentes de HA en paralelo por medio de una viga de acero que cumple la función de diafragma del puente. El sistema fue ensayado bajo un esquema consistente en una carga aplicada en el centro de la luz (Won *et al.* 2008).



**Figura 13** Nudo híbrido entre viga de HA y viga de acero. (a) Dimensiones y detalles de los especímenes. (b) Configuración del ensayo. (Won *et al.* 2008)

Kim *et al.* (2011) dieron continuidad a las investigaciones de Won *et al.* (2008) y propusieron tres tipos de nudos híbridos para vigas de puentes consistentes en vigas de acero en el centro de la luz y vigas de hormigón pretensado (HP) en los soportes, tal como se muestra en la figura 14, con el objetivo de determinar la mejor solución estructural. Dos tipos de nudos contaron con conectores del tipo perno con cabeza (*stud*) utilizados ampliamente en la construcción compuesta acero-hormigón, pero diferentes en la cantidad de barras de refuerzo tal como se muestra en la figura 14 (a). El tercer tipo de nudo estuvo compuesto por múltiples conectores de nervios perforados unidos en paralelo y ubicados entre la viga de acero y la viga pretensada. [ver figura 14 (b)] (Kim *et al.* 2011a).



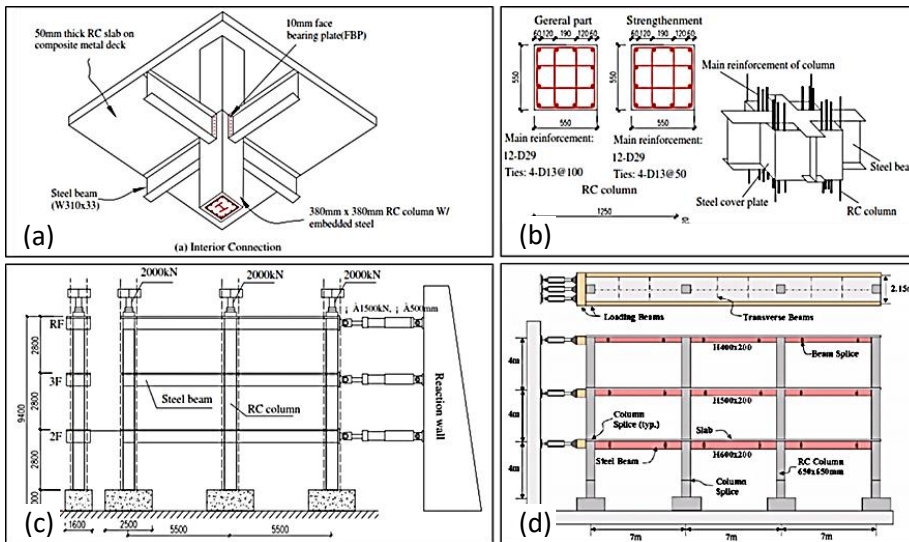
**Figura 14** Nudo híbrido entre viga de HP y viga de acero. (a) y (b) propuestas de nudos. (c) curva carga deformación. (d), (e) y (f) algunos de los especímenes ensayados (Kim *et al.* 2011a)

En otra etapa de la investigación, los mismos autores (Kim *et al.* 2011) realizaron una prueba a escala real de una viga de 40 m de longitud con nudo híbrido de hormigón pretensado, tal como se muestra en la figura 15; recomendaron el nuevo nudo como una solución segura y económica para puentes de tramo medio. (Kim *et al.* 2011b).



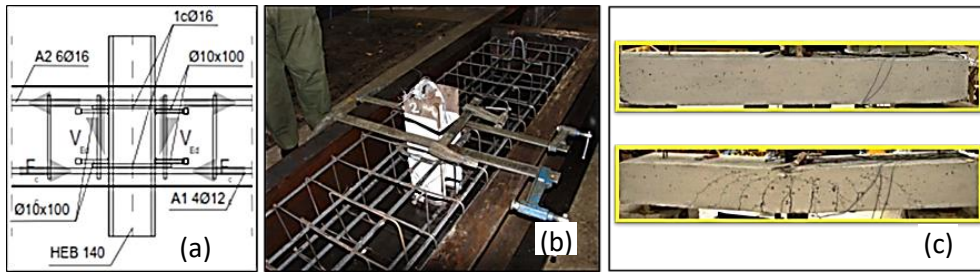
**Figura 15** Nudo híbrido a escala real para puentes de hormigón pretensado. (a), (b) tipos de nudos propuestos. (c) Ensayo de viga a escala real (Kim *et al.* 2011b).

Li *et al.* (2011) presentaron una importante contribución por medio de la investigación experimental de un nudo híbrido entre una columna de HA y una viga de acero denominado “*steel-SRC hybrid structure system*”, diseñado para resistir cargas de gravedad y laterales. A diferencia de otros programas experimentales enfocados en el ensayo del nudo, en este caso fueron ensayados pórticos completos bajo cargas cuasiestáticas y pseudodinámicas, como puede apreciarse en la figura 16 (Li *et al.* 2011).



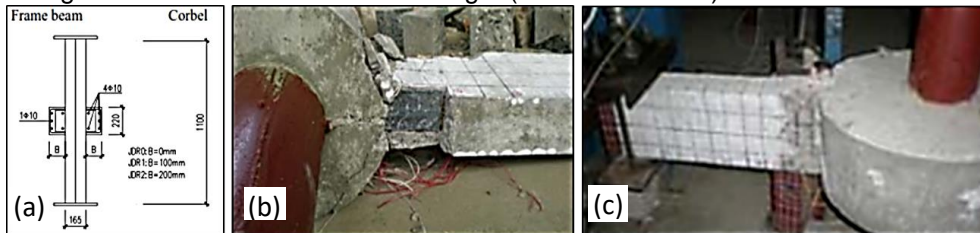
**Figura 16** Ensayo de pórtico con columnas de HA y vigas de acero (a) Nudo híbrido interior. (b) Detalles del nudo híbrido y secciones transversales. (c) Configuración de actuadores. (d) Esquema del pórtico ensayo. (Li *et al.* 2011).

Aznar *et al.* (2013) realizaron un programa experimental de especímenes de nudos formados por una columna de acero acoplada a una viga de HA mediante conectores de cortante (figura 17), en los que se probaron diferentes condiciones de detallado de acero y conectores para mejorar el nudo. En los ensayos se elaboró un protocolo, dado que no existían ensayos normalizados para este tipo de uniones (Aznar 2013; Aznar *et al.* 2008; Aznar *et al.* 2011).



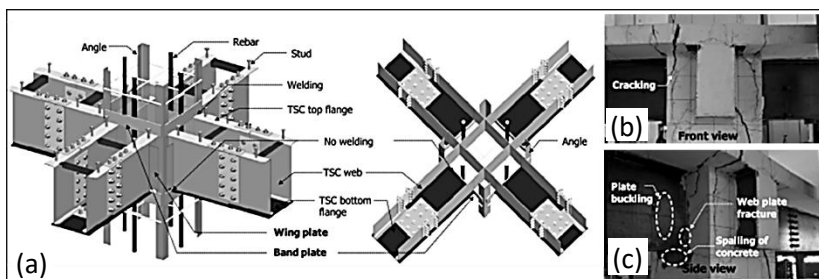
**Figura 17** Nudo de columna de acero y viga de HA (a) Detalle del nudo. (b) Fabricación de un espécimen de ensayo. (c) Modos de fallo. (Aznar *et al.* 2008).

Zhao *et al.* (2014) realizaron ensayos para estudiar el comportamiento sísmico de nudos entre vigas de hormigón armado y columnas tubulares de acero rellenas de hormigón, como las mostradas en la figura 18. Se estudiaron los desplazamientos, tensiones, patrones de fallo y capacidades de disipación de energía de la sección del anillo de la viga. (Zhao *et al.* 2014).



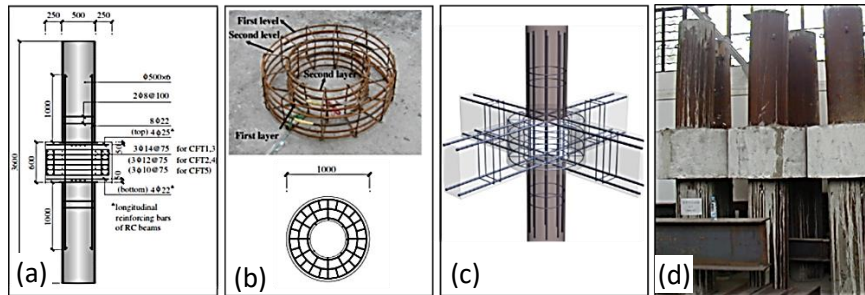
**Figura 18** Nudo híbrido entre columna tubular de acero y viga de HA. (a) Detalle del nudo. (b) (c) Especimen ensayado. (Zhao, Xu, & Liu, 2014).

Hwang *et al.* (2015) desarrollaron un nudo híbrido prefabricado para vigas de acero y columnas de HA, donde se combinan uniones soldadas, atornilladas y conexiones acero - hormigón por medio pernos con cabeza (*stud*), tal como se ilustra en la figura 19. La prefabricación conduce a la disminución de los costos, a lo que se añade su eficiencia y facilidad constructiva. Los parámetros de ductilidad, deformación y disipación de energía del nudo satisfacen los requerimientos del ASCE (ASCE 1994; Hwang *et al.* 2015).



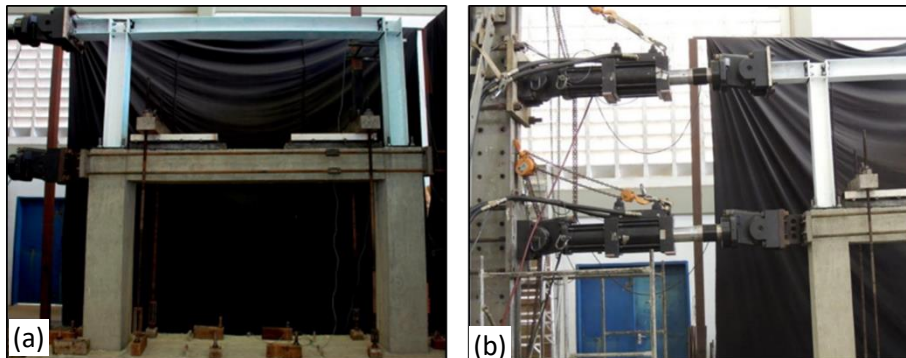
**Figura 19** Nudo entre columna de HA y viga de acero. (a) Detalles del nudo. (b) (c) Modos de fallo. (Hwang *et al.* 2015).

Chen *et al.* (2015) estudiaron experimentalmente un nudo híbrido, a los efectos de evaluar su comportamiento y proponer una formulación para predecir la máxima resistencia a la compresión axial del nudo. La columna de acero reduce la sección de la viga de HA en la zona del nudo, por lo que se concibió un anillo de confinamiento junto a las barras de refuerzo de acero longitudinales para dar continuidad a la viga en la zona del nudo. La figura 20 presenta información gráfica acerca del nudo y el ensayo realizado. (Chen, Cai, Bradford, Liu, & Wu, 2015).



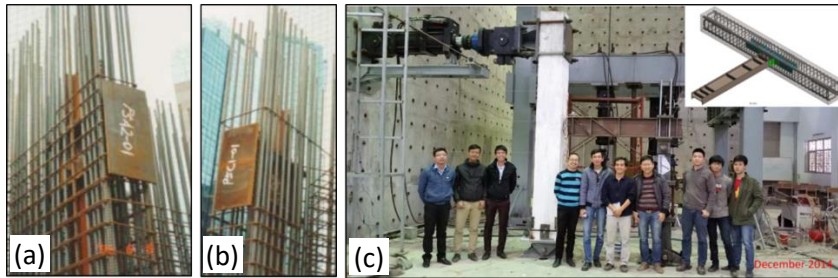
**Figura 20** Ensayos para evaluar el comportamiento a compresión axial de un nudo híbrido con anillo de confinamiento (a) Esquema general. (b) Anillo de confinamiento (c) Dimensiones y detalles de armado (d) Especímenes antes del ensayo. (Chen *et al.* 2015).

Ugel (2015) propuso un método para evaluar la vulnerabilidad y el daño sísmico en estructuras con nudos híbridos, utilizadas en ampliaciones de edificios, cuando se necesita conectar una estructura de HA antigua con una estructura de acero nueva, tal como se ilustra en la figura 21. Además, desarrolló una metodología de diseño de nudos híbridos resistentes a momento y cortante, para este tipo de solución. Fueron ensayados pórticos como los que muestra la figura 16 (a), lo que permitió demostrar que el fallo se produce por agotamiento de la resistencia a cortante y tracción de las columnas de hormigón armado, mientras que los miembros de acero estructural incrementan su capacidad ante el aumento de la demanda. (Ugel, 2015).



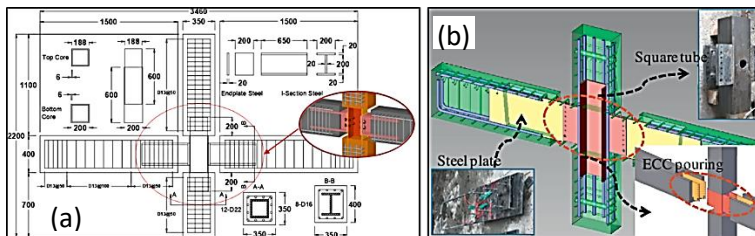
**Figura 21** Nudo híbrido apropiado para ampliaciones de edificaciones de HA con estructuras de acero. (a) Pórtico ensayado. (b) Aplicación de cargas durante el ensayo. (Ugel, 2015).

Nguyen *et al.* (2015) estudiaron experimentalmente un nudo híbrido de una viga de acero embebida en una columna de HA, tal como se muestra en la figura 22, solución estructural utilizada por los propios autores en la construcción del edificio *Hong Kong International Finance Center*. En el ensayo se apreció que la fluencia se origina en el ala a tracción de la viga de acero embebida y fueron registradas evidencias de formación de bielas y tirantes en la zona aledaña de HA. (Nguyen *et al.* 2015).



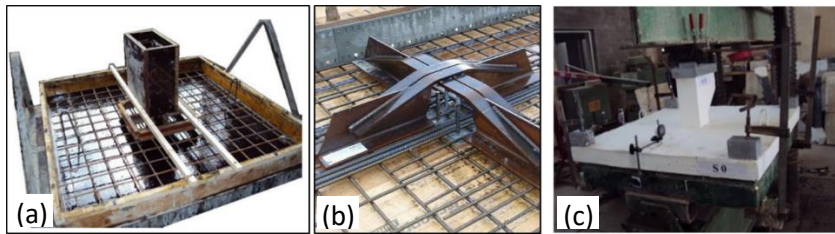
**Figura 22** Investigación experimental de nudo híbrido de columna de HA y viga de acero. (a) y (b) Columnas del edificio en construcción con la placa para el nudo (c) Espécimen listo para el ensayo. (Nguyen, Hjjaj, Nguyen, & Nguyen, 2015)

Javanmardi *et al.* (2018) propusieron un nudo híbrido viga –columna, empotrado y prefabricado de HA, por medio de uniones atornilladas (ver figura 23). Se realizaron ensayos cuasiestáticos que mostraron que el nudo híbrido resultó ligeramente más resistente que el nudo monolítico de HA, en tanto la ductilidad fue similar, bajo el concepto de columna fuerte y viga débil (Javanmardi, Ibrahim, & Ghaedi, 2018).



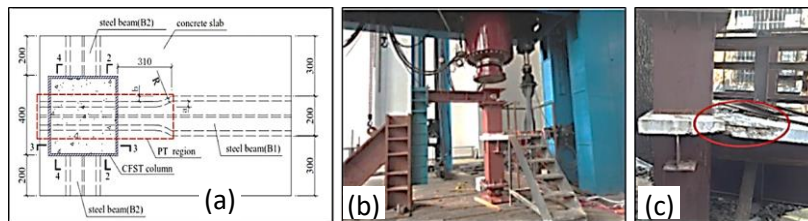
**Figura 23** Nudo híbrido empotrado prefabricado de HA viga – columna. (a) y (b) Detalles del nudo.((Javanmardi et al., 2018)

Al-Hamd *et al.* (2019) realizaron una investigación experimental de nudos híbridos entre una losa de HA y una columna de acero, como el mostrado en la figura 24, a los efectos de evaluar la utilización de dispositivos metálicos embebidos en el hormigón para mejorar la resistencia al punzonamiento en losas planas. Según el reporte de los autores, los prototipos ensayados mostraron claramente la mejora esperada. (Al-Hamd, Gillie, Cunningham, Warren, & Albostami, 2019).



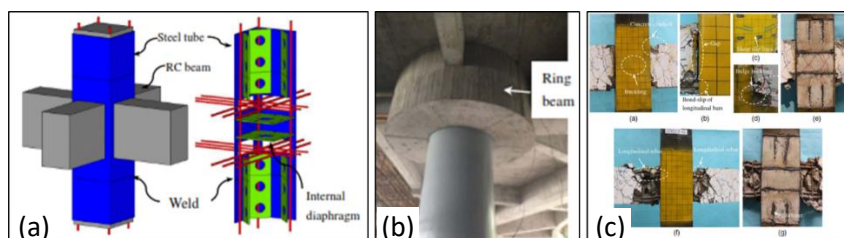
**Figura 24** Nudo híbrido entre columnas de acero y losas de HA. (a) Espécimen del nudo en fabricación. (b) Dispositivo para mejorar la resistencia al punzonamiento. (c) Vista general del ensayo. (Al-Hamd *et al.*, 2019).

Zhou *et al.* (2019) modificaron los nudos híbridos entre columnas de HA y vigas de acero incluidas en las notas técnicas del ASCE (ASCE, 1994), a los efectos de fundamentar la reducción del ancho de ala de la viga pasante de cara a la disminución de las dificultades en la colocación del hormigón. La losa de HA mostrada en la figura 25 fue reforzada para compensar la pérdida de resistencia por la reducción de las alas. Para investigar el comportamiento sísmico de la conexión se aplicaron cargas cíclicas; los resultados indicaron que la nueva conexión propuesta tiene un rendimiento sísmico favorable (Zhou *et al.*, 2019).



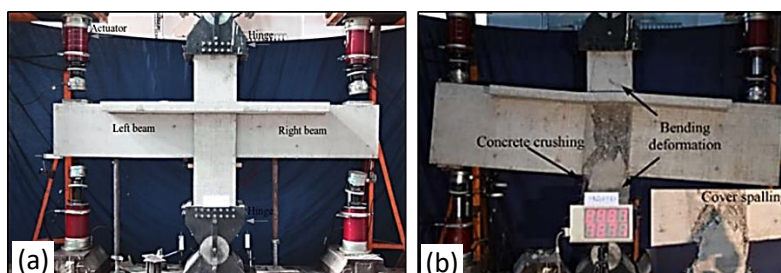
**Figura 25** Nudo híbrido con reducción del ancho del ala de la viga de acero pasante. (a) detalles del espécimen. (b) Especimen durante el ensayo. (c) Modo de fallo. (Zhou *et al.*, 2019)

Gan *et al.* (2019) estudiaron experimentalmente un nudo híbrido que conecta una columna tubular de acero relleno de hormigón a vigas de HA como el mostrado en la figura 26, con el propósito de fundamentar la eliminación del anillo de confinamiento propuesto por Chen *et al.* (2015), que antes fue mostrado en la figura 20. Se incorporaron refuerzos diagonales en los lados adyacentes del tubo de acero con el fin de retrasar el pandeo local de la columna tubular de acero y mejorar el efecto de confinamiento en el hormigón. Como resultado, los modos de fallo fueron dúctiles y las articulaciones mostraron buen comportamiento bajo carga cíclica (Gan, Zhou, Zhou, & Hai Tan, 2019).



**Figura 26** Propuesta de nudo híbrido entre columna tubular de acero y viga de HA sin anillo de confinamiento (a) Esquema tridimensional del nudo propuesto. (b) Modos de fallo. (Gan et al., 2019)

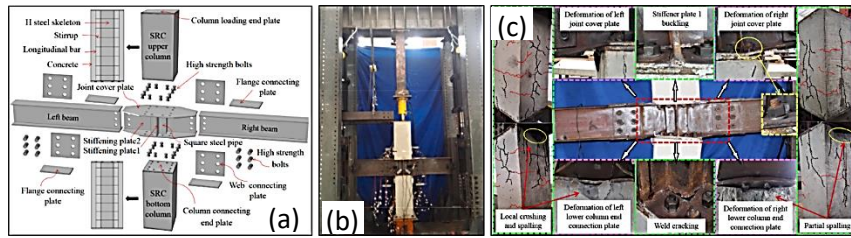
Ma *et al.* (2019) presentaron una investigación experimental acerca del comportamiento sísmico de nudos híbridos entre una viga de hormigón armado y una columna tubular de acero revestida de barras de acero y hormigón. Se ensayaron especímenes bajo carga axial vertical, como los mostrados en la figura 27, con el propósito de estudiar el confinamiento en el nudo debido a la inclusión de un tubo interior (Ma, Han, & Zhao, 2019).



**Figura 27** Nudo híbrido entre viga de HA y columna tubular de acero revestida de hormigón (a) Configuración del ensayo. (b) Modos de fallo. (Ma et al., 2019)

Con el propósito de fomentar la industrialización en la construcción de edificios, Wu *et al.* (2020) propusieron un nudo híbrido prefabricado, que se muestra en la figura 28, consistente en columnas de acero de sección H revestidas con hormigón, vigas de acero y un elemento de conexión de acero. En los ensayos realizados se apreció buen comportamiento sísmico, a partir de la valoración de las curvas de histéresis, la ductilidad, la disipación de energía, y la degradación de la resistencia y la rigidez. (Wu, Liu, Tan, & Wang, 2020).

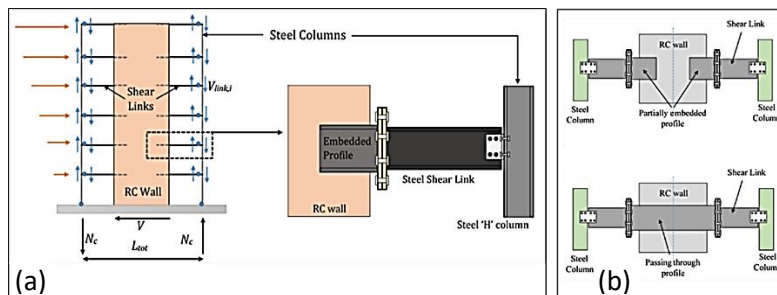




**Figura 28** Nudo híbrido prefabricado entre columna de acero revestida de hormigón y viga de acero. (a) Esquema del nudo prefabricado y sus partes componentes. (b) Configuración de ensayo. (c) Modos de fallo. (Wu et al., 2020)

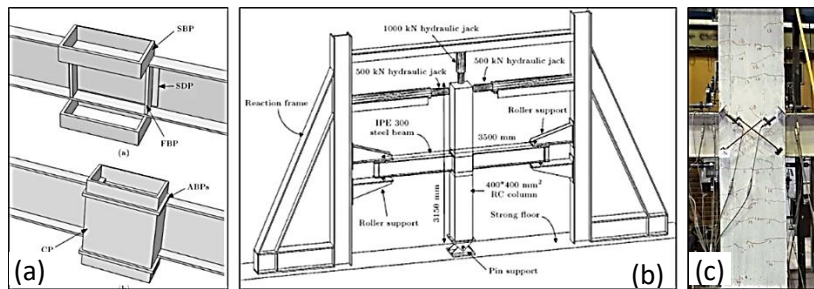
Das *et al.* (2020) propusieron un nudo híbrido entre un muro de HA y una viga de acero, para ser utilizado en un sistema estructural denominado *Hybrid Coupled Wall (HCW)*, es decir Muro Híbrido Acoplado, que consiste en un muro de cortante de HA acoplado a las columnas a través de vigas de acero como elementos de disipación de enlace como se muestra en la figura 29.

Las vigas de acero de enlace están atornilladas a un nudo de acero parcialmente embebido o pasando completamente a través del muro de HA. La zona del nudo híbrido está diseñada de tal forma que el daño siempre ocurre en las vigas de enlaces (fusibles y reemplazables) antes de fallar el muro de HA o el nudo híbrido. El sistema *HCW* es reportado como eficiente para diseñar estructuras sismo-resistentes seguras y fácilmente reparables. La adecuada longitud de empotramiento del nudo en el hormigón permite la concentración del daño sísmico en las vigas de acero de enlace (reemplazables). En el trabajo se presentan dos configuraciones de este tipo de nudo, a partir de un enfoque basado en el desempeño, que pueden ser claramente apreciadas en las figuras 24 (b) y (c). (Das, Steensels, Dragan, Vandoren, & Degée, 2020).



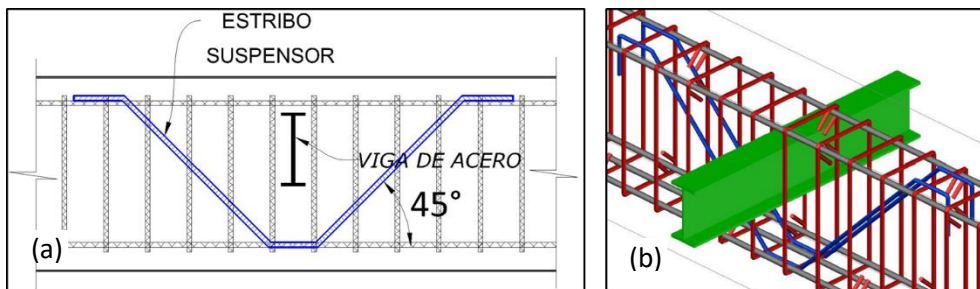
**Figura 29** Nudos híbridos entre muro de HA y vigas de acero. (a) Esquema general del sistema. (b) Nudo con perfil parcialmente embebido (c) Nudo con perfil pasante (Das et al., 2020)

Attari *et al.* (2020) presentaron un estudio experimental de nudos híbridos entre columna de HA y viga de acero, que se muestra en la figura 30; los detalles prácticos incluidos (placa de cubierta, placa de apoyo y estribos de unión) mejoraron el desempeño del nudo al aumentar la rigidez. (Attari, Azadvar, & Alizadeh, 2020).



**Figura 30** Nudo híbrido de viga de acero y columna de HA. (a) Esquemas tridimensionales de los nudos propuestos. (b) Configuración del ensayo. (c) Nudo ensayado. (Attari et al., 2020).

Mieles *et al.* (2020) desarrollaron un programa experimental relacionado con algunas de las tipologías de nudos utilizadas en Ecuador, descritas en la introducción del presente artículo, en dos etapas sucesivas realizadas en el Laboratorio de la Vivienda de la Escuela Politécnica Nacional del Ecuador (EPN) y en el marco de reacción construido en la Universidad Técnica de Manabí (UTM). Los ensayos exploratorios en la EPN demostraron el mejor comportamiento de los nudos híbridos con vigas pasantes en comparación con los nudos de anclajes con barras de acero, lo que dio pie a que los ensayos realizados en la UTM, se enfocaran al caso más ventajoso, incorporando la valoración de la utilización de elementos denominados suspensores que se ilustran en la figura 31.



**Figura 31** Suspensores en nudos híbridos. (a) Esquema del nudo con suspensor. (b) Isométrico de nudo con suspensor.

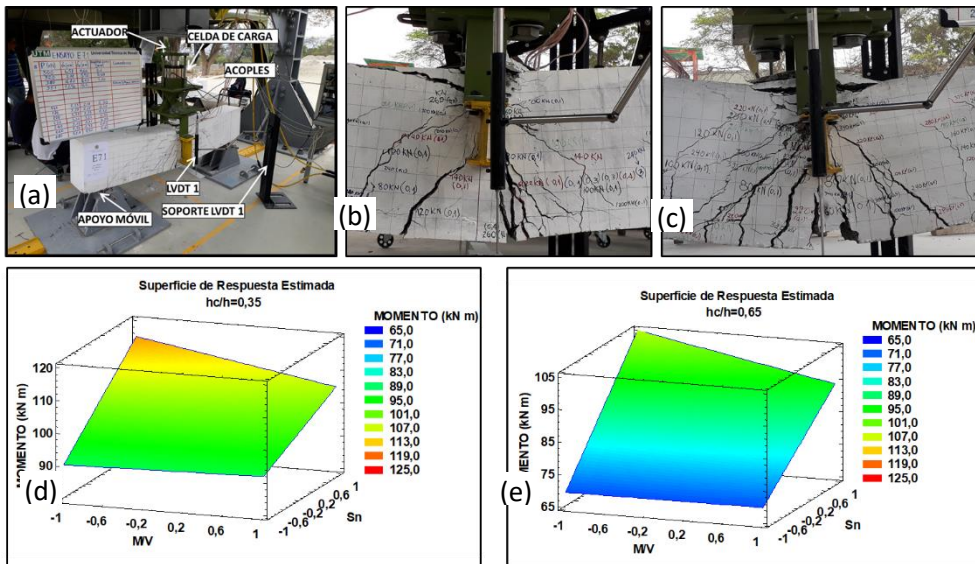
En consecuencia, para la segunda etapa se concibió un diseño estadístico del experimento del tipo factorial de tres variables y dos niveles, con una réplica y la inclusión de 4 especímenes de control (vigas de HA sin nudos), para un total de 20 especímenes ensayados. Como variables independientes se seleccionaron la relación momento – cortante en la sección de ubicación del nudo ( $M / V$ ), con dos niveles seleccionados de 0,85 m y 1,70 m; la relación altura del perfil de acero pasante - altura de la viga de hormigón ( $h_c / h$ ), con dos niveles seleccionados de 0,35 y 1,70, y la utilización o no de elementos suspensores.

Resulta conveniente esclarecer que por medio de la variable independiente  $M / V$  se representan diferentes posiciones del nudo híbrido en la luz de la viga de H.A; es así que una relación  $M / V = 0,85$  m (vigas de HA de 1,7 m de luz) es

representativa de nudos ubicados en la cercanía de los apoyos de la viga de HA, donde prevalece el esfuerzo cortante, en tanto una relación  $M / V = 1,70$  m (vigas de HA de 3,40 m de luz) es representativa de nudos cercanos a la sección central de la viga de HA, donde prevalecen los esfuerzos normales de flexión.

La concepción del experimento incluyó que todas las vigas, con sección transversal de 0,25 x 0,40 m, contarán con un único nudo situado en su sección central, lugar de aplicación de la carga concentrada [ver figura 32 (a)]. Se evaluó la significación de los factores considerados en las respuestas, tales como la resistencia a momento flector, la resistencia a cortante y a la acción combinada de momento flector y cortante, la deflexión máxima y el agrietamiento, entre otras. (Mieles *et al.* 2020)

Luego de la valoración y procesamiento estadístico preliminar de los resultados, se hace notar la marcada significación del uso de elementos suspensores y la magnitud de la perturbación, representada por la variable independiente ( $h_c / h$ ), lo que se ilustra en la figura 32.



**Figura 32.** Ensayos en el marco de reacción de la UTM. (a) Vista general del ensayo e instrumentación externa. (b) Patrón de daño en espécimen sin suspensor en el fallo por fluencia del acero. (c) Patrón de daño en espécimen con suspensor en el fallo por fluencia del acero. (d) Superficie de respuesta de la resistencia a momento flector para  $h_c / h = 0,35$ . (e) Superficie de respuesta de la resistencia a momento flector en función de  $M / V$  para  $h_c / h = 0,65$ .

Puede notarse que es más favorable el comportamiento de los especímenes con nivel bajo de perturbación ( $h_c / h = 0,35$ ) respecto a los que cuentan con nivel alto de perturbación ( $h_c / h = 0,65$ ) y que la presencia de elementos suspensores contribuye a la mejora del comportamiento, sobre todo en los elementos con niveles altos de perturbación ( $h_c / h = 0,65$ ). [ver figura 32 (b) (c)]

(d) (e)]. La investigación, aún en desarrollo, no sólo ofrecerá aportes al conocimiento, sino también recomendaciones prácticas para el diseño. Actualmente los resultados experimentales, se complementan con el desarrollo de modelos numéricos tridimensionales, a partir de los cual se realizan estudios paramétricos de cara a una mayor comprensión del comportamiento de los nudos estudiados, lo que será esbozado en el tópico 3.

### **3. MODELACIÓN DE NUDOS. NUDOS HÍBRIDOS.**

Diversos investigadores han trabajado de manera creativa en la modelación de los nudos, con el objetivo de profundizar en el estudio de su comportamiento y resistencia. En este campo, principalmente han sido utilizados métodos tales como el de los componentes, el de elementos finitos (MEF) y el modelo puntal tensor (*STM*, por sus siglas en inglés). A continuación se describen los fundamentos de estos métodos y diversas aplicaciones en la modelación de nudos, con énfasis en los nudos híbridos.

#### **3.1. EL MÉTODO DE LOS COMPONENTES.**

El método de los componentes utiliza una serie de grados de libertad para definir las acciones generadas por elementos externos sobre el nudo, para lo que sucesivamente se identifican los componentes relevantes para el comportamiento global, se caracteriza cada componente, se plantean leyes constitutivas que permiten definir el comportamiento de cada parte analizada y finalmente se ensambla el nudo en su conjunto a partir de los componentes analizados.

Una derivación simplificada del método de los componentes, es el método de los resortes que surgió con el fin de desarrollar modelos rápidos y abreviados de análisis, sin desconocer los fundamentos del método de los componentes, tales como los mostrados en la figura 32 (Altoontash, 2004). Seguidamente, se describen algunas aplicaciones, tanto del método de los componentes, como de algunas variantes simplificadas.

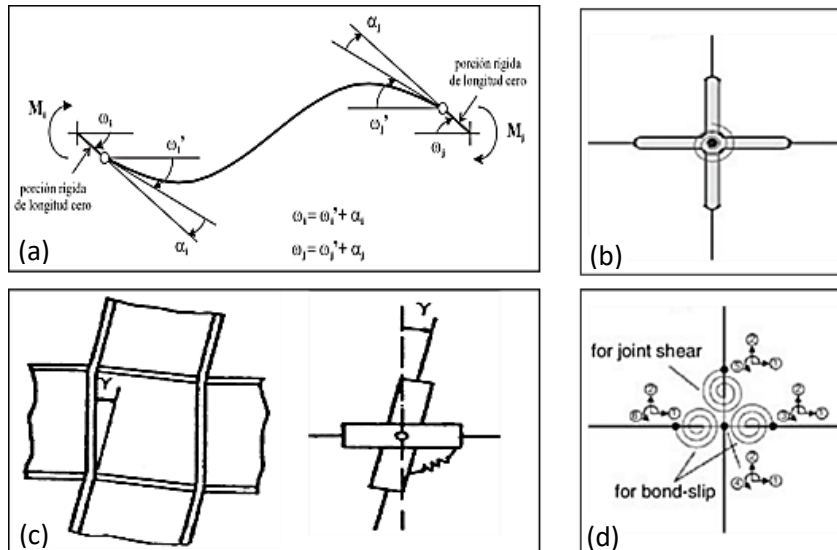
Giberson (1969) propuso un modelo de viga simple que consiste en un elemento elástico perfecto y dos resortes de rotación no lineales unidos en los extremos del elemento elástico, tal como se muestra en la figura 33 (a) (Giberson, 1969). Posteriormente el modelo desarrollado por Giberson fue ensayado experimentalmente por Raffaella (1992), con resultados aproximados a los descritos en las ecuaciones de Giberson (Raffaella, 1992).

Krawinkler & Mohasseb (1987) presentaron un modelo para nudo de acero, mostrado en la figura 33 (b) donde los elementos de acero consisten en dos miembros rígidos conectados por una articulación, así como un resorte de rotación no lineal que representa la fuerza de corte. El momento flector en el resorte se considera aproximadamente como el transferido desde las vigas a la cara de la columna (Krawinkler & Mohasseb, 1987).

Posteriormente, Krawinkler (2000) desarrolló un modelo en el cual la fuerza de corte versus la deformación de cortante se define como una curva tri-lineal, con una meseta después de alcanzar la resistencia al cortante de las articulaciones; el autor utilizó ecuaciones simples para determinar la fluencia y puntos de resistencia última del material (Krawinkler, 2000).

Para nudos de hormigón armado, Alath y Kunnath (1995) presentaron un modelo utilizando resortes rotacionales con histéresis degradante como el mostrado en la figura 33 (c). Los momentos son calculados a partir de los momentos resistentes de las secciones transversales de la columna y la viga, bajo el supuesto de que el núcleo del nudo está bajo cortante, mientras que la respuesta cíclica se calcula a partir del comportamiento histérico experimental (Alath & Kunnath, 1995).

Bidah & Ghobarah (1999) modificaron el modelo de Alath & Kunnath (1995) mediante el empleo de dos resortes no lineales rotacionales en serie, según la figura 33 (d), uno para las deformaciones de cortante del nudo y otro para las rotaciones debido a las barras de acero de refuerzo de la viga, cercanas a la región del nudo, en tanto la relación esfuerzo-deformación de la articulación se modeló utilizando una idealización tri-lineal (Biddah & Ghobarah, 1999).



**Figura 33** Modelos de nudos: (a) Giberson (1969); (b) Krawinkler & Mohasseb (1987); (c) Alath & Kunnath (1995); (d) Bidah & Ghobarah (1999)

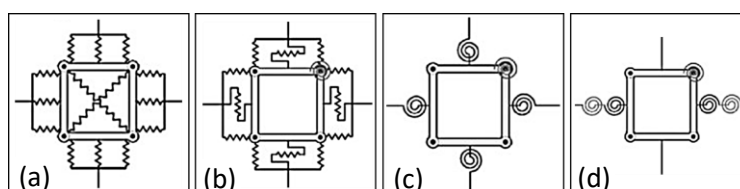
Youssef & Ghobarah (2001) propusieron un modelo más refinado que simula el comportamiento de la conexión a cortante, así como el deslizamiento cerca de la región del nudo, lo que se representa en la figura 34. El cortante en la unión se representa por cuatro elementos rígidos que encierran el núcleo del nudo y dos resortes axiales no lineales que conectan las diagonales de la articulación. (Youssef & Ghobarah 2001). En este modelo no se abordan aspectos relevantes como el

comportamiento histerético del hormigón armado o la degradación de la resistencia y la rigidez.

Lowes & Altoontash (2003) propusieron un modelo de nudo de 4 nodos y 12 grados de libertad, según la figura 34 (b) que representa explícitamente tres tipos de mecanismos inelásticos de unión viga-columna bajo carga cíclica reversible. Ocho resortes traslacionales de longitud cero simulan la respuesta adherencia-deslizamiento del refuerzo longitudinal de la viga y la columna; un componente de zona de panel con un resorte giratorio de longitud cero simula la deformación de cortante de la junta (Lowes & Altoontash 2003).

Posteriormente, Altoontash (2004) simplificó el modelo de nudo propuesto por Lowes & Altoontash (2003) al introducir un modelo que consta de cuatro resortes giratorios de longitud cero ubicados en las interfaces de viga y columna, que simulan las rotaciones de los extremos de los miembros debido al comportamiento de deslizamiento del nudo, mientras que la componente de la zona del panel con un resorte giratorio permanece para simular la deformación de corte de la junta [ver Figura 33 (c)] (Altoontash 2004).

Shin & LaFave (2004) modelaron un nudo con elementos rígidos ubicados en los bordes del nudo y resortes de rotación, empotrados en las rótulas enlazando los elementos rígidos adyacentes. [ver la figura 34 (d)] (Shin & LaFave 2004). Por su parte, Aristizabal (2009) y Timoshenko & Gere (2009) propusieron un método basado en las funciones de estabilidad “modificadas” para la viga - columna de Timoshenko, donde los efectos de las conexiones son incorporados en las ecuaciones pendiente - deflexión para cargas axiales de tracción o de compresión sin introducir grados de libertad y ecuaciones adicionales (Aristizabal 2009).



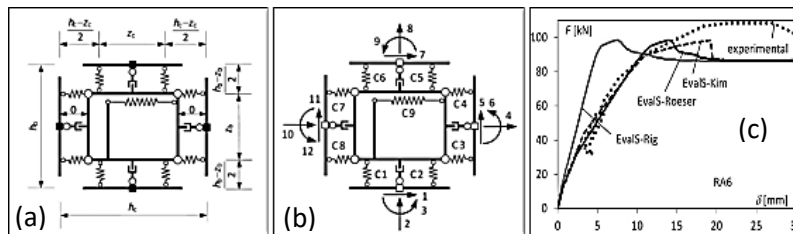
**Figura 34** Modelos diversos de nudos. (a) Youssef & Ghobarah (2001); (b) Lowes & Altoontash (2003); (c) Altoontash (2004); (d) Shin & LaFave (2004).

### 3.2 MODELACIÓN NUMÉRICA

El vasto desarrollo alcanzado por la informática en las últimas décadas ha propiciado la amplia utilización por los investigadores de programas computacionales, comerciales o de desarrollo propio, para el estudio del comportamiento de las estructuras por medio de la modelación numérica, sustentada, sobre todo, en el método de los elementos finitos (MEF), como complemento e integrada debidamente con las técnicas experimentales. El MEF es una herramienta muy potente para el análisis de elementos estructurales de

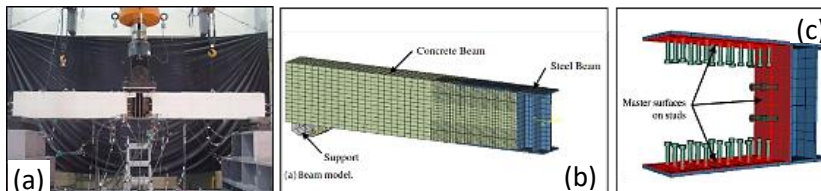
diversos materiales, que ya cuenta con tradición en la ingeniería civil a nivel internacional. El caso de los nudos, y dentro de estos los nudos híbridos, no está exento de esa tendencia. A continuación se indican los que más se aproximan al objeto de estudio.

Costa *et al.* (2017) implementaron un programa de análisis de elementos finitos propio para nudos, que usa como algoritmo el método de los componentes, y que es mostrado en la figura 35. Se hizo una validación experimental del programa con resultados satisfactorios (Costa *et al.* 2017).



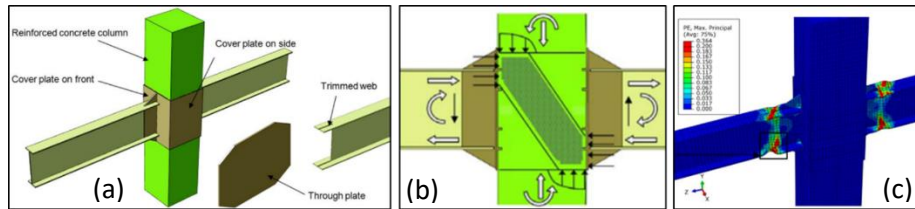
**Figura 35** Modelos de nudos con el método de los componentes (a) Arreglo de los componentes y geometría (b) Número de grados de libertad de los componentes. (c) Validación experimental y numérica (Costa *et al.* 2017)

Kim & Nguyen (2010, 2012) y Park (2016) presentaron un modelo de elementos finitos tridimensional no lineal, por medio del software ABAQUS (ABAQUS 2007) para investigar el comportamiento de un nudo híbrido entre viga de hormigón y viga de acero, a partir de los ensayos de Won *et al.* (2010) y de Kim *et al.* (2011), como se muestra en la figura 36; los resultados numéricos fueron contrastados con los resultados experimentales e incluyeron un estudio paramétrico para valorar la inclusión de una serie de barras transversales y el pretensado de tendones (Kim & Nguyen 2010).



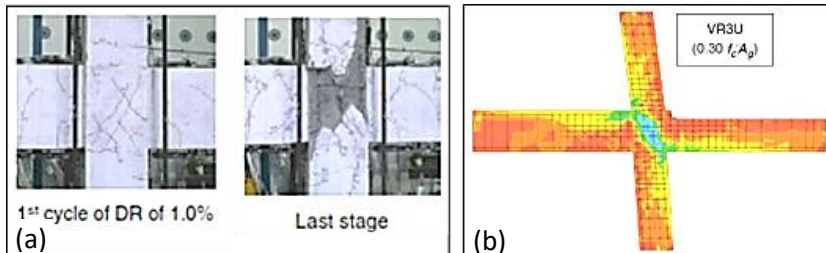
**Figura 36** Nudo híbrido entre viga de hormigón y viga de acero (a) Vista general del ensayo de Park (2016). (b) Imagen del modelo numérico general. (c) Elementos de conexión en el modelo (Kim & Nguyen 2010).

Rasoul & Bakhshayesh (2013) presentaron un modelo computacional en ABAQUS (ABAQUS 2007) con un estudio paramétrico para un nudo híbrido entre columna de HA y viga de acero que transmite momentos, reforzado con cubre placas y barras conectoras de cortante entre el acero y el hormigón (ver la figura 37). En la calibración y validación del modelo se tomó en cuenta el trabajo de Cheng *et al.* (2004). La investigación mostró el desempeño estructural y el mecanismo de transferencia de esfuerzos del nudo propuesto (Rasoul & Bakhshayesh 2013).



**Figura 37** Nudo entre columna de HA y viga de acero. (a) Propuesta de nudo híbrido resistente a momento (b) Biela en nudo (c) Concentración de tensiones vistas en modelo en ABAQUS (Rasoul & Bakhshayesh 2013)

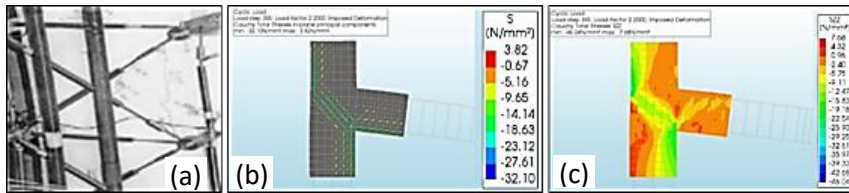
Meas *et al.* (2014) presentaron los resultados de la modelación de seis nudos viga-columna de HA, mediante el software DIANA, (DIANA 2014) en correspondencia con un estudio experimental de los mismos autores que proporcionó información sobre el comportamiento del nudo ante cargas, ciclos de histéresis, patrón de grietas y tensión de corte, mostrados en la figura 38. Los modelos numéricos fueron calibrados y validados respecto a resultados experimentales de los propios autores y se realizaron estudios para investigar la influencia de diversos parámetros en el comportamiento. (Meas *et al.* 2014).



**Figura 38** Modelos de nudos vigas – columnas de HA. (a) Nudos ensayados (b) Estado tensional en el modelo del programa DIANA. (Meas *et al.*, 2014).

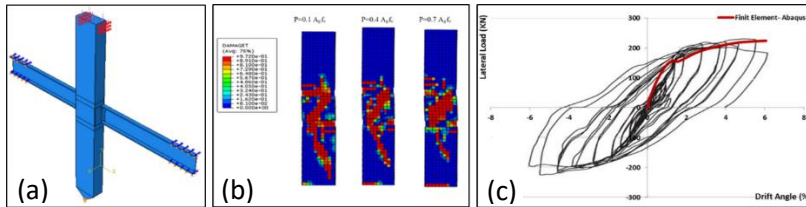
Tipán (2019) presentó un estudio de dos configuraciones diferentes de nudos en estructuras de hormigón armado y su respuesta al ser sometidos a carga cíclica, mediante simulación computacional, como se muestra en la figura 39. Los resultados de los modelos tridimensionales de elementos finitos implementados en el software DIANA FEA (DIANA 2014) fueron comparados con resultados experimentales y con valores derivados de la aplicación de la normativa del Eurocódigo (Tipán 2019).





**Figura 39** Modelación de nudo en elementos de hormigón armado. (a) Prototipo experimental (b) Tensiones principales. (c) Tensiones en el eje z-z. (Tipán, 2019).

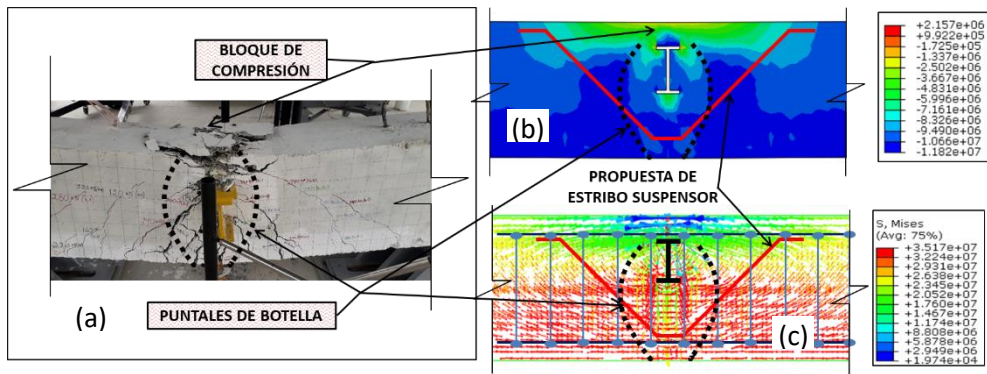
Naserifard y Vetr (2019) desarrollaron modelos numéricos en ABAQUS (ABAQUS, 2007) de un nudo híbrido entre una columna de hormigón y viga de acero, tal como se muestra en la figura 40. El hormigón de la columna fue modelado con elementos C3D8R y por medio de un modelo de daño plástico; las barras de acero de refuerzo con elementos T3D2. Se verificó el comportamiento sísmico del nudo híbrido luego de la calibración con resultados experimentales con carga axial en el centro de columna, carga excéntrica, resistencia a compresión del hormigón, resistencia del acero y la altura de la placa de cubierta de acero. Por medio de un estudio paramétrico se valoró la influencia de la excentricidad de la carga, la resistencia a la compresión del hormigón, la resistencia del acero y los efectos de la altura de la placa de cubierta de acero (Naserifard & Vetr 2019).



**Figura 40** Nudo híbrido entre columna de hormigón y viga de acero. (a) Modelo en elementos finitos. (b) Patrón de daño. (c) Comparación entre los resultados numéricos y el experimento.

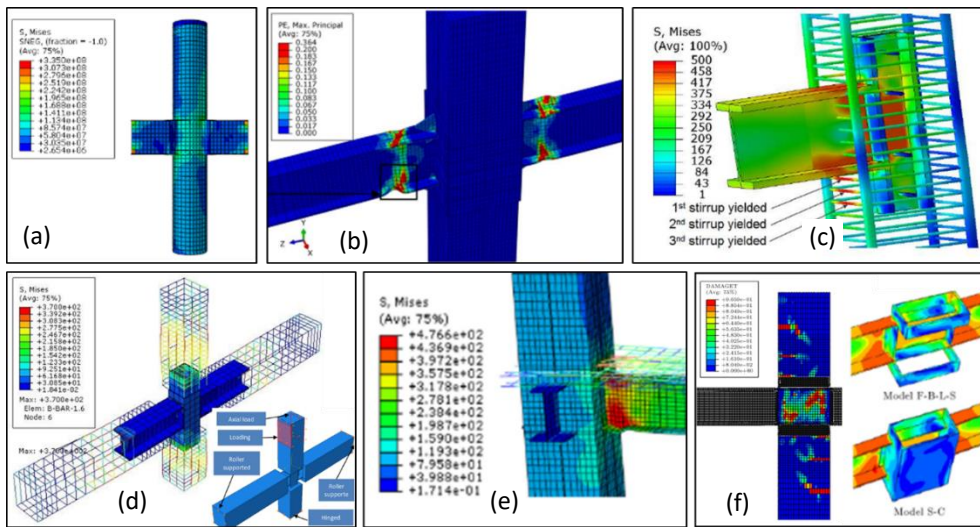
Como antes se comentó en 2 (figura 31) han sido desarrollados modelos numéricos tridimensionales implementados en ABAQUS (ABAQUS 2007), calibrados frente a los resultados de los ensayos realizados en el marco de reacción de la UTM, a los efectos de complementación y profundización del estudio del comportamiento experimental observado. Como rasgos generales de los modelos puede señalarse la utilización de elementos finitos cúbicos C3D8 de 8 nodos, aproximación lineal e integración reducida. La integración reducida por lo general proporciona resultados más precisos y reduce significativamente el tiempo de corrida. Las barras de acero se modelan con elementos finitos de desplazamiento lineal de 2 nodos llamados T3D2 ecuación física de hormigón basada en el modelo de daño plástico, ecuación física del acero bilineal entre otros. Ha podido apreciarse una alta correspondencia entre los resultados numéricos y experimentales.

A los efectos de ilustrar las potencialidades de la modelación numérica como eficaz herramienta de complementación, profundización y generalización, se presenta la figura 41, que ofrece elementos acerca de la correspondencia entre el progreso del daño observado en los experimentos y su reproducción por medio de los modelos. De los resultados experimentales se evidencia que el hormigón forma una biela (puntal) en forma de botella desde el ala superior de la viga de acero pasante (que se comporta como placa de apoyo) al borde inferior de la viga de hormigón (ver figura 41 (a)). El ala de la viga secundaria pasante ayuda a formar un puntal de botella tal como lo indican los gráficos de Mises obtenidos de las modelaciones realizadas [ver la figura 41 (b)(c)], lo que corrobora que es ventajoso utilizar vigas pasantes que no invadan más del 50% del peralte de la viga de hormigón. Igualmente se confirma la contribución del suspensor a la mejora de la resistencia de la viga de hormigón y al retardo de la fisuración; este elemento atraviesa la grieta que se forma en los bordes de la biela y transmite la carga a la parte superior de la viga, lo cual se ilustra con líneas rojas en la figura 41 (c).



**Figura 41** Correspondencia entre resultados experimentales y modelos numéricos. (a) Patrón de daño en espécimen (UTM). (b) Diagrama de Mises de tensiones en el hormigón. (c) Diagrama de Mises de la concentración de tensiones en el refuerzo.

A los ejemplos anteriores, pueden añadirse todos aquellos casos de modelos relacionados con investigaciones experimentales descritas en 2, desarrollados para complementar, profundizar y generalizar los resultados de los ensayos, lo que es clara evidencia de la utilidad y las bondades de esta herramienta en los procesos investigativos del comportamiento estructural. La figura 42 muestra un compendio de imágenes de modelos numéricos asociados a diferentes investigaciones experimentales descritas en 2.



**Figura 42** Compendio de imágenes de modelos numéricos asociados a investigaciones experimentales descritas en 2. (a) Zhao *et al.* (2014). (b) Rasoul & Bakhshayesh (2013) (c) Nguyen *et al.* (2015) (d) Javanmardi *et al.* (2018) (e) Zhou *et al.* (2019) (f) Attari *et al.* (2020)

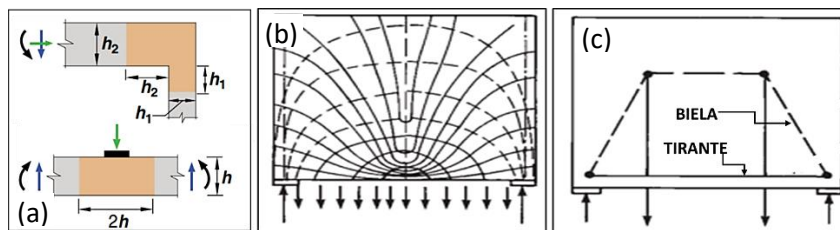
### 3.3 ASPECTOS CONCEPTUALES GENERALES DEL MÉTODO DE BIELAS Y TIRANTES (STM).

Los antecedentes del Método de Bielas y Tirantes (STM) se inician al mismo tiempo que las primeras obras de referencia del HA a finales del siglo XIX. Las primeras descripciones aparecieron para caracterizar el cortante en un artículo de Wilhelm Ritter en 1899 titulado “*Die Bauweise Hennbique*”, donde se propuso un modelo de armadura para representar vigas agrietadas y explicar la resistencia al cortante de vigas con barras de acero longitudinal y estribos, formulando la primera ecuación de diseño. La obra de Emil Morsch en 1902 titulada “*Der Eisenbetonbau*” confirma las ideas de Ritter con el apoyo de evidencia experimental y plantea el modelo clásico de armadura en  $45^\circ$  para vigas. Ese modelo con ciertas modificaciones es la base actual del diseño al cortante de vigas de HA en la generalidad de los códigos. Sin embargo la teoría actual aparece por primera vez en 1987 en el artículo “*Toward a Consistent Desing of Structural Concrete*” de los autores Schlaich y Jennewein (Borja *et al.* 2012).

La técnica consiste en sustituir la discontinuidad o zonas de la estructura donde se genera concentración de esfuerzos tensionales, por una armadura hipotética de barras articuladas planas o espaciales que se llaman bielas si están comprimidas, tirantes si están traccionadas y nudos a los puntos de convergencia de las bielas y tirantes, que deben equilibrarse con las solicitaciones externas y los esfuerzos de continuidad de la región (Darwin *et al.* 2016; Schlaich *et al.* 1987). El método *STM* ofrece una interpretación adecuada del comportamiento de los nudos

y regiones de discontinuidad, denominadas D, resulta una herramienta de gran valor para el diseño de uniones no tratadas en los códigos y una alternativa para diseñar regiones sin discontinuidad denominadas B. (Dewobroto & Reineck 2002).

Un nudo es una zona perturbada y no cumple con la distribución lineal de deformaciones de una región B, pues la discontinuidad geométrica tiene trayectoria de tensiones turbulentas. Según el principio de St. Venant y análisis elásticos, la discontinuidad o región D indicados en la figura 43 (a), se extiende hasta una distancia aproximada de una profundidad del elemento a partir de la carga o discontinuidad, límite a partir del cual los esfuerzos se aproximan a una distribución lineal o región B. (ACI-318S-19 2019; Schlaich et al. 1987).



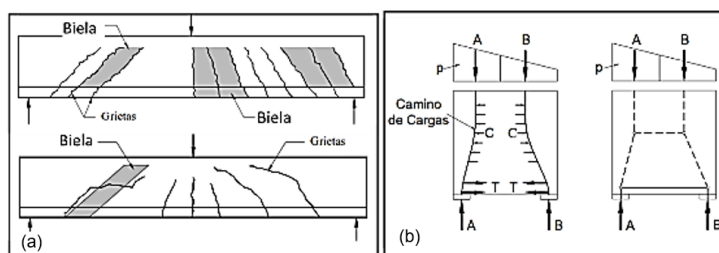
**Figura 43** Aspectos generales del *STM*. (a) Ejemplos de discontinuidad geométrica y de carga (Schlaich et al., 1987) (b) Trayectoria de esfuerzos. (c) Modelo de armadura. (Wight & MacGregor, 2012)

Cuando es conocida la distribución de esfuerzos en la región D, puede aplicarse el método *STM* e integrar el diseño de regiones B y D aledañas. En la frontera de la región B y D, se deben equilibrar los esfuerzos exteriores existentes, las cargas y las reacciones, y verificar los diferentes estados límites para distintas combinaciones de cargas. (Cook & Mitchell, 1988; Novak, 2010; Wight & Parra, 2003). La trayectoria de los esfuerzos sirve para definir la ubicación de las bielas y tirantes, como se ilustra en la figura 43 (b) (Wight & MacGregor, 2012).

El planteamiento del modelo de una región D se simplifica mucho si se conocen las tensiones elásticas y las direcciones de tensión principales, lo que se facilita por la existencia, desde décadas recientes, de una amplia variedad de programas de análisis estructural basados en el MEF, que ofrecen visualizaciones muy útiles a esos efectos (Schlaich, Schäfer, & Jennewein, 1987). De esta manera, las bielas pueden ser alineadas a  $\pm 15^\circ$  de las fuerzas de compresión resultantes de dicho análisis, y los tirantes a  $\pm 15^\circ$  de las fuerzas de tracción resultantes (Wight & MacGregor, 2012). Los tirantes y el refuerzo pueden colocarse según consideraciones prácticas y la estructura se adapta por sí misma al sistema estructural interior supuesto. Orientar la geometría del modelo a la distribución de tensiones elásticas favorece su eficacia. (Morales, 2007).

Otra forma de encontrar la ubicación y orientación de las bielas y tirantes es tomar como referencia el patrón de agrietamiento en estructuras o en ensayos de laboratorio de elementos similares al analizado, y ubicar las bielas y tirantes dentro de la estructura de manera que las bielas se ubiquen entre las fisuras como se

muestra en la figura 44 (a). Si las bielas atraviesan las fisuras se recomienda considerar una reducción en su resistencia. (Wight & Parra 2003).



**Figura 44** Ubicación de las bielas (a) Según las fisuras (ACI-318, 2002). (b) Según los caminos de carga (Schlaich et al., 1987)

Si las alternativas anteriores no están disponibles, se puede desarrollar un modelo de bielas y tirantes en base al llamado “camino de cargas” mostrado en la figura 44 (b). En este procedimiento se debe satisfacer el equilibrio externo de la región D determinando todas las cargas y reacciones. La región B transfiere las cargas a la región D en la frontera entre ellas y el diagrama de esfuerzos se subdivide de manera que las cargas en un lado de la estructura encuentran su contraparte en el otro lado. El camino de carga empieza y termina en el centro de gravedad de los diagramas de tensión y tiene la dirección de las cargas aplicadas o reacciones. Las bielas y tirantes tienden a tomar el camino más corto posible entre ellas (Schlaich et al., 1987).

#### 4. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En este artículo se confirma la existencia de una gran variedad de sistemas de sistemas estructurales donde interactúan elementos de hormigón armado y acero, en los cuales es esencial el diseño riguroso de los nudos híbridos entre elementos. En tal sentido, ha sido constatada la existencia de una valiosa y abarcadora documentación científico – técnica relacionada con las investigaciones experimentales y numéricas desarrolladas por investigadores de varios países.

Como rasgos generales de las investigaciones experimentales valoradas puede señalarse el uso de diferentes escalas en los ensayos, desde elementos aislados sencillos hasta estructuras complejas a escala real; el énfasis en el estudio del comportamiento sismo – resistente; la presencia de ideas innovadoras orientadas a la prefabricación y la industrialización de la construcción; el avance progresivo en la mejora de las soluciones por medio de investigaciones sucesivas y la inestimable contribución de la amplia investigación experimental realizada al desarrollo de los métodos de diseño, implementados en numerosos casos en las principales normativas internacionales.

Como limitación fundamental de los programas experimentales valorados se identifica la escasa utilización del diseño estadístico de experimentos y, en consecuencia, el desaprovechamiento de las potencialidades de las técnicas estadísticas en la concepción de los experimentos y en la valoración de sus resultados.

Por otra parte, la modelación, con énfasis en la modelación numérica, ha sido ampliamente utilizada como complemento de la experimentación; el uso integrado de ambas herramientas ha permitido profundizar en el estudio del comportamiento de múltiples tipologías de nudos híbridos.

Además, ha sido expuesta la presencia en Ecuador de diversos tipos de soluciones con losas compuestas de hormigón y láminas de acero (*steel deck*) en edificaciones con pórticos de hormigón armado, con una notable dispersión en las características de los nudos híbridos utilizados, sin un fundamento riguroso de estos. En el caso de esta tipología específica, pudo constatarse que no existen antecedentes de investigaciones internacionales, experimentales o numéricas, para el estudio de su comportamiento estructural.

Por lo anterior, los resultados que se derivan de las investigaciones en ejecución bajo el liderazgo de la UTM, con fundamento experimental y numérico, son relevantes y pertinentes no sólo en el contexto ecuatoriano. Sobresale la identificación de los factores de mayor impacto en la respuesta estructural de las vigas de HA con vigas de acero pasantes, tales como el efecto benéfico del uso de elementos suspensores y el grado de perturbación introducido en la región del nudo híbrido. Los resultados definitivos de la investigación serán objeto de futuras comunicaciones detalladas.

## 5. REFERENCIAS

- Abaqus Analysis User's Manual, IV Elements Cong. Rec. (2007).
- ACI-318. (2002). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*: American Concrete Institute.
- ACI-318S-19. (2019). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. Farmington Hills: American Concrete Institute.
- Aguiar, R. (2020). *Análisis Matricial de Estructuras con CEINCI-LAB* (Quinta ed.). Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.
- Al-Hamd, R. K. S., Gillie, M., Cunningham, L. S., Warren, H., & Albostami, A. S. (2019). Novel shearhead reinforcement for slab-column connections subject to eccentric load and fire. *Archives of civil and mechanical engineering*, 19(2), 503-524.
- Alath, S., & Kunnath, S. K. (1995). Modeling inelastic shear deformation in RC beam-column joints. Paper presented at the Engineering Mechanics.
- Altoontash, A. (2004). *Simulation and damage models for performance assessment of reinforced concrete beam-column joints*. Stanford University Stanford, California.
- Aristizabal, D. (2009). Estabilidad y análisis de segundo orden de estructuras de vigas y columnas de Timoshenko con conexiones semirrígidas: método pendiente-deflexión. *DYNA*, 76(159), 7-21.
- ASCE. (1994). Guidelines for desing of joints between steel beams an reinforced concrete columns. *Journal of structural engineering*, 120 (8). doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1994\)120:8\(2330\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1994)120:8(2330))
- Attari, N., Azadvar, N., & Alizadeh, S. (2020). Numerical investigation of cover plate in RCS connections. *Scientiairanica*, 27(1), 10-24.

- Aznar, A. (2013). *Propuesta de Configuración y de Método de Inspección de Uniones Mixtas Mediante Pernos Conectores*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. Disponible en: Retrieved from <http://oa.upm.es/16616/>
- Aznar, A., García, H., Ignacio, J., Herrera, J. O., & Cervera, J. (2008). *Conexión de forjados de hormigón a soportes metálicos*. Paper presented at the IV CONGRESO ACHE. Congreso Internacional de Estructuras, Valencia.
- Aznar, A., Ortiz, J., Cervera, J., & Hernándo, J. (2011). Investigación analítica y experimental de uniones mixtas en edificación mediante pernos conectores. *Congreso Internacional de Estructuras, Barcelona*.
- Biddah, A., & Ghobarah, A. (1999). Modelling of shear deformation and bond slip in reinforced concrete joints. *Structural Engineering and Mechanics*, 7(4), 413-432.
- Borja, F., López, A., & Bañón, L. (2012). Apuntes de Hormigón Armado. Adaptados a la Instrucción EHE-08. *Obras de Hormigón*.
- Cook, W., & Mitchell, D. (1988). Studies of disturbed regions near discontinuities in reinforced concrete members. *ACI Structural Journal*, 85(2), 206-216.
- Costa, R., Providência, P., & Dias, A. (2017). Component-based reinforced concrete beam-column joint model. *Structural Concrete*, 18(1), 164-176.
- COVENIN (2018) Estructuras de acero para edificaciones. Método de los estados límites..
- Chen, Q., Cai, J., Bradford, M. A., Liu, X., & Wu, Y. (2015). Axial Compressive Behavior of Through-Beam Connections between Concrete-Filled Steel Tubular Columns and Reinforced Concrete Beams. *Journal of structural engineering*, 141(10), doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001249](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001249).
- Cheng, C.T., & Chen, C.C. (2005). Seismic behavior of steel beam and reinforced concrete column connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 61(5), 587-606.
- Darwin, D., Dolan, C. W., & Nilson, A. H. (2016). *Design of concrete structures*: McGraw-Hill Education.
- Das, R., Steensels, R., Dragan, D., Vandoren, B., & Degée, H. (2020). Characterization and optimization of a steel beam to RC wall connection for use in innovative hybrid coupled wall systems. Paper presented at the Structures Conferece.
- Deierlein, G. G., & Noguchi, H. (2004). Overview of US-Japan research on the seismic design of composite reinforced concrete and steel moment frame structures. *Journal of structural engineering*, 130(2), 361-367.
- Dewobroto, W., & Reineck, K.H. (2002). Viga con cargas y apoyos indirectos *Diseño de Vigas de Hormigón usando Bielas y Tirantes*.
- DIANA, F. (2014). DIANA FEM-software release 9.4.4: DIANA FEA BV, Delft, The Netherlands. Disponible en: <https://dianafea.com>.
- Elremaily, A., & Azizinamini, A. (2001). Experimental behavior of steel beam to CFT column connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 57(10), 1099-1119.
- Gan, D., Zhou, Z., Zhou, X., & Hai Tan, K. (2019). Seismic Behavior Tests of Square Reinforced Concrete-Filled Steel Tube Columns Connected to RC Beam Joints. *Journal of structural engineering*, 145(3), pag. 135-150.
- Giberson, M. (1969). Two nonlinear beams with definitions of ductility. *Journal of the Structural Division - ASCE* 95, 137-157.

- Gómez, A., Sánchez, R., & Juárez, H. (2014). *Diseño de edificios compuestos estructurados con columnas de concreto y vigas de acero*. XIX Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Puerto Vallarta, México.
- Hwang, H.-J., Eom, T.-S., Park, H.-G., Lee, S.-H., & Kim, H.-S. (2015). Cyclic loading test for beam-column connections of concrete-filled U-shaped steel beams and concrete-encased steel angle columns. *Journal of structural engineering*, 141(11), 35-65.
- Javanmardi, A., Ibrahim, Z., & Ghaedi, K. (2018). *Development of a new hybrid precast beam-to-column connection*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Kanno, R., & Deierlein, G. G. (2002). Design model of joints for RCS frames *Composite construction in steel and concrete*. IV, , 947 - 958.
- Kim, Lee, Kim & Won. (2011a). Experimental study on joint of spliced steel-PSC hybrid girder, Part I: Proposed parallel-perfobond-rib-type joint. *Engineering structures*, 33(8), 2382-2397.
- Kim, Lee, Kim, & Won. (2011b). Experimental study on joint of spliced steel-PSC hybrid girder, part II: Full-scale test of spliced hybrid I-girder. *Engineering structures*, 33(9), 2668-2682.
- Kim & Nguyen. (2010). Finite element modeling and analysis of a hybrid steel-PSC beam connection. *Engineering structures*, 32(9), 2557-2569.
- Krawinkler, H. (2000). *State of the art report on systems performance of steel moment frames subject to earthquake ground shaking*. FEMA-355C.
- Krawinkler, H., & Mohasseb, S. (1987). Effects of panel zone deformations on seismic response. *Journal of Constructional Steel Research*, Volumen 8, nun. 3, pag. 233 - 250. doi: 10.1016/0143-974X(87)90060-5
- Kuramoto, H., & Nishiyama, I. (2004). Seismic performance and stress transferring mechanism of through-column-type joints for composite reinforced concrete and steel frames. *Journal of structural engineering*, 130(2), 352-360. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2004\)130:2\(352\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2004)130:2(352))
- Li, W., Li, Q., Jiang, W., & Jiang, L. (2011). Seismic performance of composite reinforced concrete and steel moment frame structures—state-of-the-art. *Composites Part B: Engineering*, 42(2), 190-206.
- Lowes, L. N. & Altoontash, A. (2003). Modeling reinforced-concrete beam-column joints subjected to cyclic loading. *Journal of structural engineering*, 129(12), 1686-1697.
- Ma, D.Y., Han, L.H. & Zhao, X.L. (2019). Seismic performance of the concrete-encased CFST column to RC beam joint: experiment. *Journal of Constructional Steel Research*, Voumne 12, Número 2, pag. 134-148.
- Meas, K., Li, B., & Pham, T. P. (2014). Experimental and numerical studies on the seismic performance of RC interior beam-column joints. *Advances in Structural Engineering*, 17(2), 233-247.
- Mieles Y., Larrúa R., Alcivar S. (2020). Diseño de experimento para vigas con nudos híbridos. *Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia*. Volumen Especial, No. 2, 50-55.
- Morales, M. (2007). Diseño de discontinuidades en vigas de hormigón estructural con modelos puntal-tensor. Tesis de Maestría U Chile.
- Naserifard, M. & Vetr, M. G. (2019). Parametric Study on Behavior of Steel Beam to Reinforced Concrete Column Connections in Moment Frames. *International Journal of Steel Structures*, 19(5), 1511-1520.
- Nguyen, Q.H., Hjiáj, M., Nguyen, X. & Nguyen, H. (2015). Finite Element analysis of a hybrid RCS beamcolumn connection. 3rd International Conference CIGOS.



- Nie, J., Bai, Y. & Cai, C. (2008-a). New connection system for confined concrete columns and beams. I: Experimental study. *Journal of structural engineering*, 134(12), 1787-1799. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2008\)134:12\(1787\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2008)134:12(1787)).
- Nieto, E. (2015). *El cálculo de emparrillados y estructuras especiales*. Disponible en: [http://ocwus.us.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/calculo-de-estructuras-1/apartados/apartado2\\_4.html#1](http://ocwus.us.es/mecanica-de-medios-continuos-y-teoria-de-estructuras/calculo-de-estructuras-1/apartados/apartado2_4.html#1)
- Noguchi, H., & Uchida, K. (2004). Finite element method analysis of hybrid structural frames with reinforced concrete columns and steel beams. *Journal of structural engineering*, 130(2), 328-335.
- Novacero (2015) Documento recuperado de <http://www.novacero.com/phocadownload/catalogo/Catalogo%20NOVALO SA.pdf>
- Norma Sismo Resistente de Colombia-Título C Concreto Estructural (2012).
- Raffaelle, G. (1992). R/C eccentric beam-column connections subjected to earthquake-type loading. Disponible en : <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0143974X87900605>.
- Rasoul, S., & Bakhshayesh, N. (2013). *Analytical investigation of a new Through-Column-Type Joint for composite reinforced concrete and steel frames*. World Congress on Advances in Structural Engineering and Mechanics, Jeju, Korea.
- 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>.
- Shin, M. & LaFave, J. (2004). Modelling of cyclic joint shear contribution in RC beam-column connections to overall frame behavior. *Structural Engineering and Mechanics*, 18(5), 403-412.
- Soto, J. (2012). *Proyecto de conexiones de vigas de acero a muros de concreto en estructuras mixtas*. Universidad Católica Andrés Bello.
- Tipán, C. (2019). *Modelización del comportamiento cíclico de uniones viga-columna de hormigón armado*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Ugel, R. (2015). *Vulnerabilidad sísmica en edificaciones porticadas compuestas de acero y hormigón armado*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- UNE-EN 1992 -1 -1 (2011). *Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón*: AENOR.
- Wight, J., & MacGregor, J. (2012). *Reinforced concrete. Mechanics and Design*. P. Education. 6ta Edición.
- Wight, J. & Parra, G. (2003). Strut-and-tie model for deep beam design. *Concrete international*, 25(5), 63-70.
- Won, J., Yoon, J., Wu, J., Kim, S., Lee, C. & Kim, S. (2008). *Suggestions for advanced joints in hybrid steel-PSC beam—experimental study*. Korean Society of Civil Engineers (KSCE) Conference.
- Wu, C., Liu, J., Tan, W., & Wang, P. (2020). *Seismic behavior of composite interior joints of prefabricated H-shaped steel reinforced concrete column-steel beam*. Paper presented at the Structures Conference.
- Youssef, M., & Ghobarah, A. (2001). Modelling of RC beam-column joints and structural walls. *Journal of Earthquake Engineering*, 5(01), 93-111.
- Zhao, Y., Xu, L., & Liu, B. (2014). Seismic Behavior of Reinforced Concrete Beam to Concrete-Filled Steel Tubular Column Connections with Ring-Beam.

*International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering*. PARECE REVISTA..SI ES PONER VOLUMEN (NUMERO), 489-496.

Zhou, Q., Fu, H., Ding, F., Liu, X., Yu, Y., Wang, L., Luo, 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.