“Conexiones para elementos compuestos”

Por Ricardo Herrera M., Ph.D.[1]

Resumen

La construcción mixta en que se combinan elementos de acero y hormigón armado ofrece innegables ventajas desde el punto de vista del diseño y de la construcción. Para lograr el trabajo conjunto de un sistema estructural mixto, es necesario que las conexiones entre elementos sean pensadas y diseñadas de acuerdo a los posibles modos de falla que se generan al tener elementos mixtos, por lo que, en general, no es posible utilizar directamente las uniones comunes en construcción convencional en acero o en hormigón armado. Este artículo presenta una muestra de conexiones propuestas o utilizadas en construcción mixta previamente, con énfasis en los aspectos que pueden controlar su diseño.

Introducción

Las indiscutibles ventajas de la construcción mixta usando acero y hormigón en conjunto, que incluyen la rapidez de construcción, resistencia, capacidad de cubrir grandes luces y baja relación peso/resistencia (aportadas por el acero), y la rigidez, amortiguamiento y economía (aportadas por el hormigón), han hecho que este tipo de construcción esté ganando terreno. Al utilizar las mejores características de cada material, su combinación resulta en estructuras más eficientes y económicas.

Independientemente de si se trata de sistemas estructurales convencionales conformados por elementos estructurales mixtos, sistemas estructurales convencionales que combinan elementos de hormigón, acero y elementos mixtos, o sistemas donde la principal resistencia y rigidez del sistema está dada por elementos mixtos, las conexiones entre elementos estructurales representan un desafío para el diseñador. Históricamente, la forma de detallar y diseñar uniones es diferente si se trata de elementos de hormigón armado o elementos de acero estructural. El diseño de uniones para construcción mixta requiere que el ingeniero esté bien preparado en ambas “escuelas” de detallamiento, de manera de poder hacer un diseño seguro, considerando todos los posibles modos de falla asociados al acero, al hormigón armado y los que puedan aparecer por la interacción de los dos materiales de construcción

[1] Profesor Asistente, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile. Blanco Encalada 2002, Santiago, Chile. Email: riherrer@ing.uchile.cl

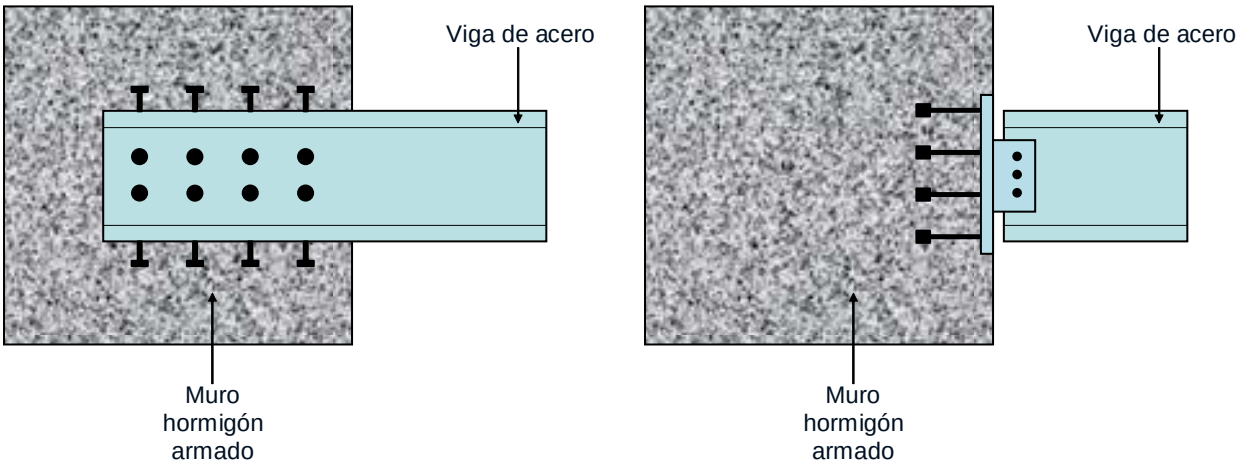
Este artículo presenta algunas uniones que se utilizan comúnmente o que han sido propuestas por investigadores para conectar elementos estructurales de diferente materialidad. Para mayor claridad, las conexiones han sido separadas de acuerdo al tipo de elementos estructurales que conectan.

Conexiones entre elementos estructurales de acero y de hormigón armado

Dentro de esta categoría se encuentran las uniones entre columnas de hormigón armado y vigas de acero, y muros de hormigón armado y vigas de acero. Eventualmente se podría considerar uniones entre columnas de acero y vigas de hormigón armado, sin embargo no se cubrirá ese caso en este artículo, debido a que es una aplicación poco común.

Conexión entre viga de acero y muro de hormigón armado

La Figura 1 muestra dos tipos de uniones que se pueden tener entre un muro de hormigón armado y una viga de acero. En la Figura 1(a), se muestra una unión de momento típica, donde la viga de acero queda embebida en el hormigón, de manera de poder transferir el momento al muro. En la Figura 1(b) se muestra una unión de cortante, donde una plancha queda embebida en el muro, sujeta con conectores de corte, y la viga se conecta a la plancha a través de soldadura o, en este caso, pernos de alta resistencia. Por supuesto, el hormigón debe tener armadura adecuada para poder lograr la transferencia de esfuerzos, pero esta armadura se ha omitido, para mejor claridad de la figura.

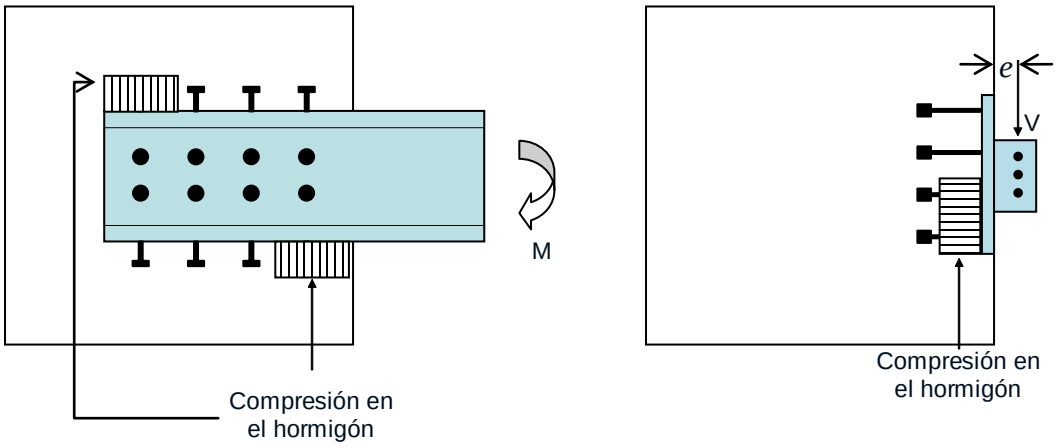


(a) Unión de momento **(b) Unión de cortante**

Figura 1: Conexiones entre elementos convencionales

La Figura 2 muestra el diagrama de cuerpo libre de ambas conexiones. En la conexión de momento (Figura 2(a)), la flexión en la viga es resistida por compresión del hormigón por encima y por debajo de ésta. Conociendo entonces la capacidad a compresión del hormigón es posible determinar

el largo embebido de viga necesario para poder transferir las fuerzas de flexión al muro. Con respecto a los conectores de corte, todo el esfuerzo cortante debe ser completamente transferido en la longitud embebida de la viga. Por lo tanto, si podemos determinar la resistencia disponible de cada conector de corte (usando, por ejemplo, las disposiciones de la AISC 2005) es posible determinar el número de conectores de corte requeridos y verificar si hay espacio suficiente para ponerlos todos.



(a) Unión de momento **(b) Unión de cortante**

Figura 2: Diagrama de cuerpo libre para diseño de la conexión

En la conexión de corte (Figura 2(b)), también se genera una compresión en el hormigón, debido a la pequeña excentricidad *e* entre la conexión de la viga y el borde del muro. Los conectores de corte cumplen una doble función en este caso: por un lado, transfieren el cortante V; y por otro, en la parte traccionada de la placa, se encargan de generar "conos de falla", es decir, transfieren la tracción como compresión en el hormigón, a través del contacto de la cabeza del conector, la que luego es tomada por la armadura transversal del muro. Este tipo de conexión puede ser usada también, como conexión de momento para el caso de momentos flectores pequeños.

En las conexiones ente viga de acero y muro de hormigón, por lo tanto, es necesario considerar, además de los modos de falla o estados límite usuales en vigas de acero, los modos de falla asociados al hormigón, tales como aplastamiento bajo compresión, deslizamiento por corte o desprendimiento del cono de falla. La forma de determinar las capacidades asociadas a estos modos de falla está incluida en el código ACI 318 (2005), o bien es posible encontrar una referencia al documento adecuado en él. Ejemplos de diseño de este tipo de conexiones pueden encontrarse en Tamboli (2009).

El detalle de conexión mostrado en la Figura 2(a) puede ser extendido al caso de vigas de acople mixtas entre muros de hormigón armado, como se muestra en la Figura 3. Este sistema estructural mixto ha sido ampliamente estudiado, principalmente por Sharooz et al (2001), El-Tawil y Harries (2007), y Park y Yun (2006).

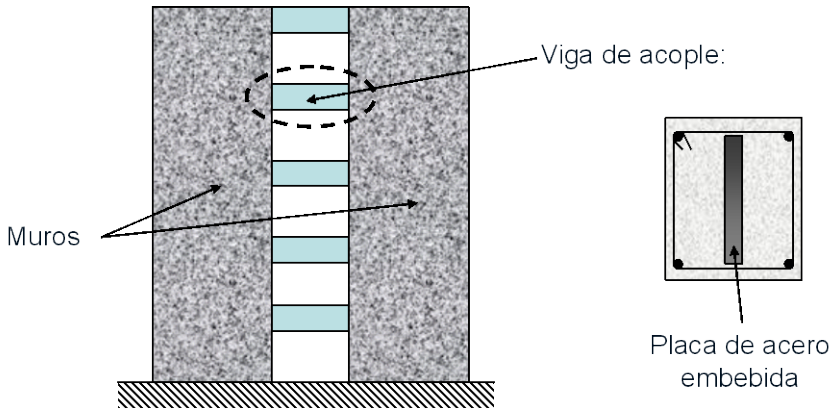
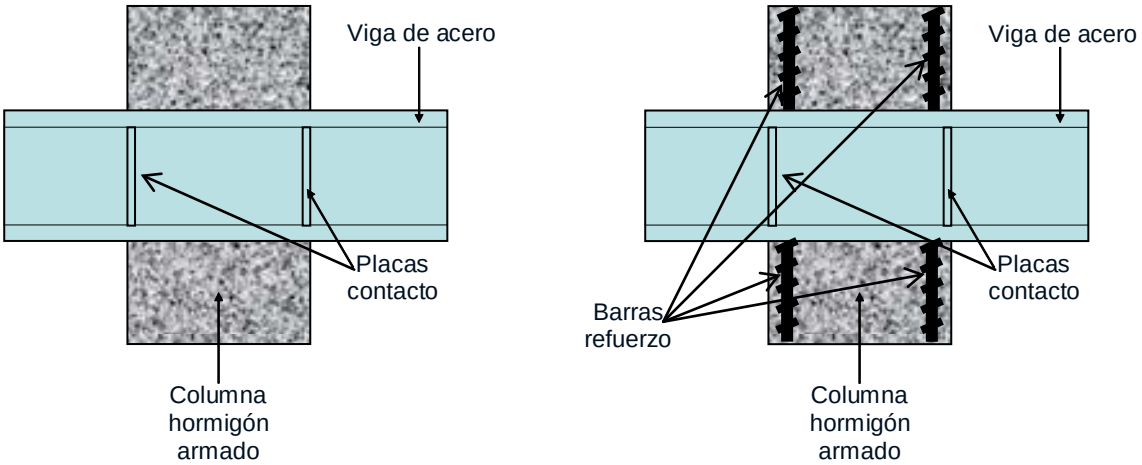


Figura 3: Muros de hormigón acoplados por viga mixta

Conexión entre viga de acero y columna de hormigón armado

Este caso, que podría ser similar al caso anterior, debe resolverse de una forma diferente debido a que normalmente las columnas de hormigón armado no poseen un ancho suficiente para poder embeber la viga en una longitud adecuada.

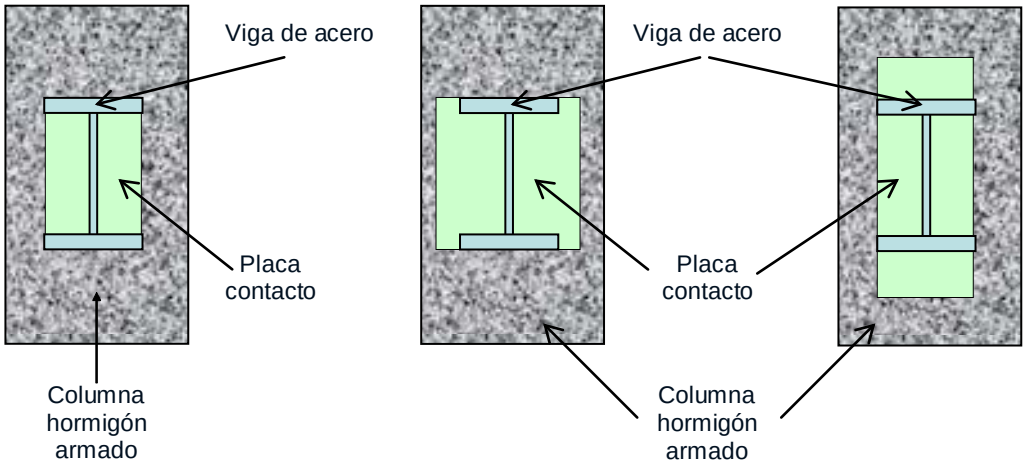
El ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete (1994) recomienda los detalles de conexión mostrados en la Figura 4.



(a) Unión con placas de contacto **(b) Unión con placas de contacto y refuerzo**

Figura 4: Conexiones entre columna de hormigón armado y viga de acero

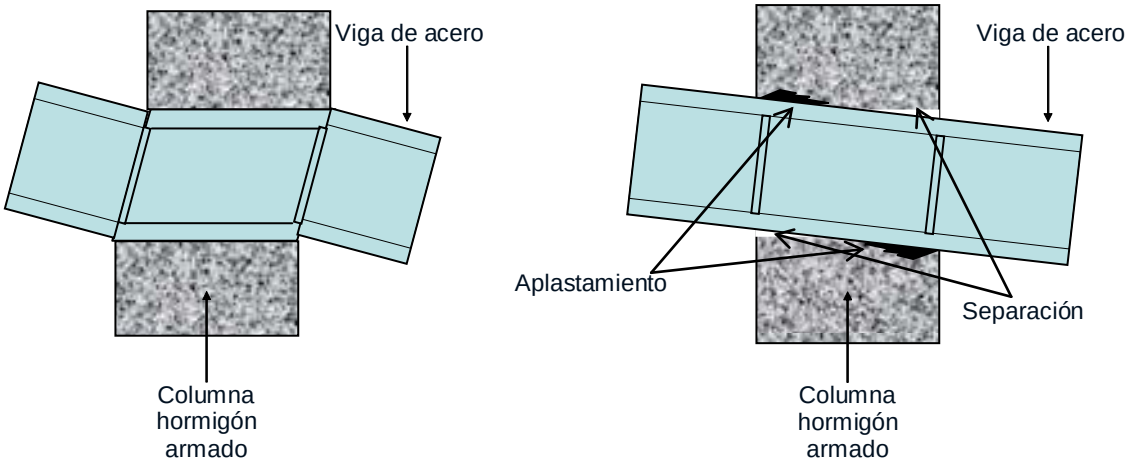
En ambos casos la viga pasa en forma continua de lado a lado del nudo. Ambos tipos de conexiones utilizan una placa de contacto para evitar que la viga de acero deslice como un cuchillo en la columna de hormigón, por efecto del punzonamiento. Las placas de contacto deben ser, como mínimo, ajustadas al perfil (Figura 5(a)), pero pueden ser más grandes (Figura 5(b)) de ser necesario, por la resistencia limitada del hormigón al aplastamiento o la magnitud del momento flector a transmitir. La función de la armadura de refuerzo, que debe ir soldada al ala de la viga, es mejorar la resistencia de esa zona a la falla del hormigón, como se describirá más adelante.



(a) Placa ajustada **(b) Placa extendida**

Figura 5: Tamaño de placa de contacto

Además de los estados de falla asociados a la viga de acero, dos estados adicionales pueden controlar el diseño de esta unión, los cuales se muestran en la Figura 6



(a) Falla de zona de panel **(b) Aplastamiento del hormigón**

Figura 6: Estados límite de conexión entre columna de hormigón armado y viga de acero

En el primer caso, la falla en la zona de panel, la capacidad está dada por la resistencia al corte del alma de la viga delimitada por las alas y las placas de contacto, y la resistencia al corte del hormigón circundante. Dependiendo de la rigidez relativa de acero y hormigón y del nivel de confinamiento, puede llegar a alcanzarse la plastificación en corte en el alma de la viga y la formación de un campo de compresiones en el hormigón circundante. En el segundo caso, la viga gira como cuerpo rígido prácticamente y la falla se concentra en el hormigón, arriba y abajo de la viga, por compresión y por separación. Para mejorar la resistencia de la conexión a este modo de falla es que se agregan barras de refuerzo soldadas a la viga, las que impiden la apertura de las grietas en los lados traccionados del nudo.

Para poder diseñar el nudo se considera el diagrama de cuerpo libre de la Figura 7. En esta figura, se muestran los momentos flectores y cortes provenientes de cada viga y columna, donde en las columnas, el momento flector ha sido reemplazado por la compresión en el hormigón y la tracción en las barras de refuerzo. A partir de este diagrama de cuerpo libre es posible determinar el esfuerzo de corte al que estará sometida la zona de panel y la compresión en el hormigón de la columna.

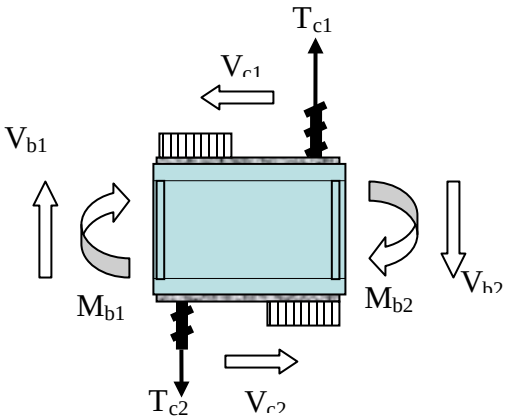


Figura 7: Diagrama de cuerpo libre de la zona de panel

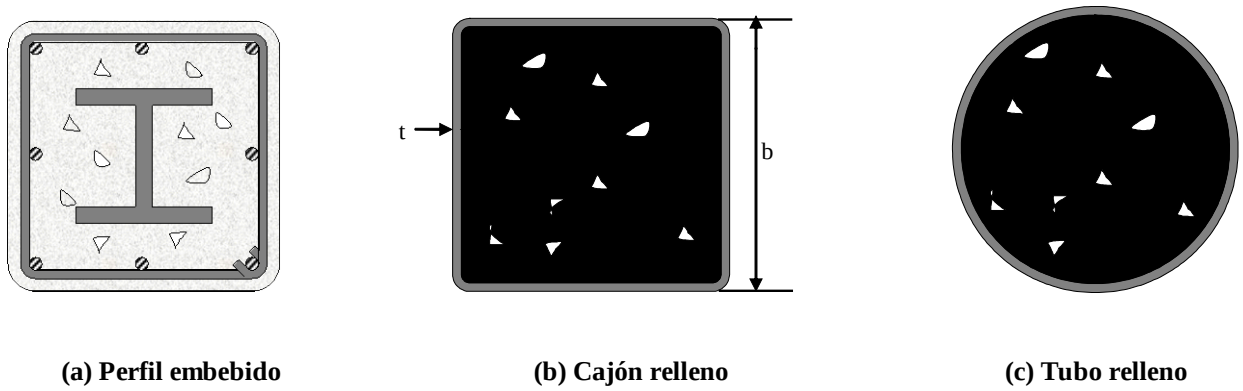
Conociendo la demanda sobre la zona de panel, es posible entonces dimensionar la cantidad de hormigón y el tamaño del alma de la viga en esa zona para tener suficiente resistencia.

Finalmente, hay que considerar que para que el nudo funcione en forma conjunta, es necesario que el hormigón esté bien confinado. Como consecuencia de este requisito, generalmente será necesario usar estribos “corchetes”, traslapados en una longitud suficiente, y perforar el alma de la viga, para

pasar el refuerzo transversal. Además, debido a que la viga pasa en forma continua a través del nudo, es necesario hacer el empalme de la viga lejos de la unión.

Conexiones para columnas mixtas

En el caso de columnas mixtas, existen dos tipos de miembros: perfiles de acero embebidos en hormigón (también conocidos como ferroconcreto) y perfiles tubulares rellenos de hormigón (Concrete-Filled Tubes o CFT). Un esquema simplificado de estos dos tipos de columnas se muestra en la Figura 8.



(a) Perfil embebido **(b) Cajón relleno** **(c) Tubo relleno**

Figura 8: Columnas compuestas

Debido a las características particulares de estos dos tipos de columnas mixtas, es necesario separar los detalles de las conexiones utilizados para cada una de ellas.

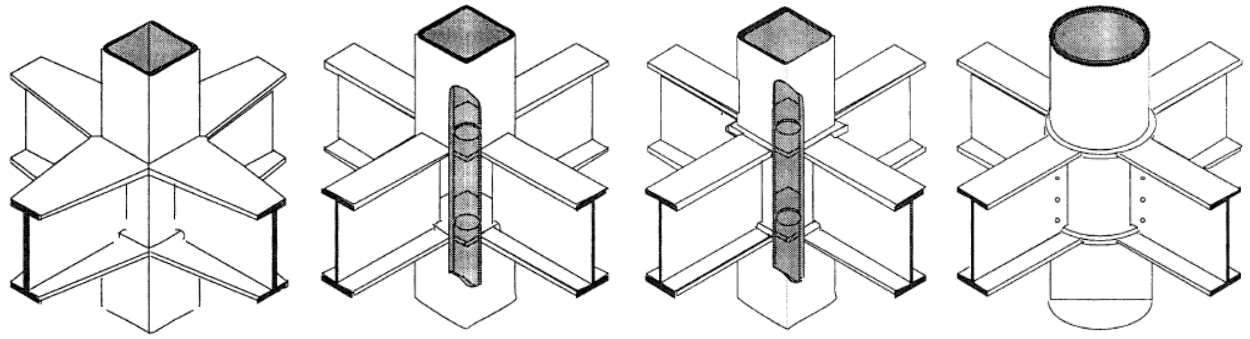
Conexiones para columnas de acero embebidas en hormigón

Debido a su forma constructiva, los detalles de conexión para este tipo de columnas son muy similares a los mostrados para el caso de columnas de hormigón armado y vigas de acero. En el caso de columnas con perfiles de acero livianos, diseñados únicamente para las cargas gravitacionales, por ejemplo, es práctica común interrumpir la columna en el nudo y dejar a la viga pasar en forma continua. En casos de columnas más importantes en tamaño, puede ejecutarse una unión soldada de la viga a la columna en taller, dejando los empalmes de viga alejados de la unión. Luego, el diseñador debe asegurarse de la continuidad de la armadura de refuerzo en columnas y en vigas, si se trata de vigas compuestas del mismo tipo, proveyendo los traslapos adecuados, de manera que los dos materiales puedan funcionar en conjunto en toda la estructura, incluyendo las uniones.

Conexiones para columnas tubulares de acero rellenas con hormigón

El principal problema de las uniones a columnas tubulares rellenas de hormigón es el mismo que ocurre cuando se conectan secciones tubulares huecas. Debido al espesor de las paredes del

elemento, conectar directamente a este a través de soldadura puede generar una falla local por rasgadura de la pared. Para evitar este problema, la solución más común ha sido utilizar alguno de los esquemas de conexión mostrados en la Figura 9, todos los cuales utilizan diafragmas para reforzar el tubo.



(a) Diafragma externo (b) Diafragma interno (c) Diafragma transversal (d) Anillo rigidizante

Figura 9: Conexiones a columna tubular rellena de hormigón usando diafragmas (basado en Morino et al. 2001)

Normalmente, esta conexión se realiza entre una columna mixta CFT y una viga convencional de acero estructural. La columna es fabricada en taller con los diafragmas soldados y, dependiendo de la práctica local, con un pedazo de viga, a la que posteriormente se empalma el resto de la viga en terreno. El uso de CFT o perfiles embebidos en hormigón, como vigas para este tipo de sistemas estructurales, presenta desafíos que por ahora hacen poco práctica su utilización para esos fines. La principal desventaja de este tipo de conexión consiste en que los diafragmas dificultan un buen hormigonado de los tubos, pudiendo formarse bolsones de aire o generarse problemas de segregación en torno a los diafragmas. La gran ventaja de esta conexión es que es una conexión donde sólo participa el acero, porque todo el traspaso de fuerzas se hace en forma directa al hormigón y las paredes del tubo, a través del diafragma.

Otra posibilidad es utilizar pernos de anclaje instalados previo al llenado del tubo de acero con hormigón. Después de fraguado el hormigón, los elementos que hacen la conexión entre viga y columna se apernan a estos pernos de anclaje. O bien, es posible dejar algunos de estos elementos embebidos adecuadamente, instalados a través de ranuras en la pared del tubo de acero. Estas dos soluciones, sin embargo, presentan grandes desafíos desde el punto de vista de tolerancias de construcción, debido a que existe una alta probabilidad de que los elementos embebidos queden inclinados significativamente, complicando la ejecución posterior de la conexión.

Una alternativa que fue propuesta y probada en ensayos de conexiones aisladas por Ricles et al. (2004) y, posteriormente validada para marcos de varios pisos y vanos (Herrera et al., 2008), se muestra en la Figura 10.

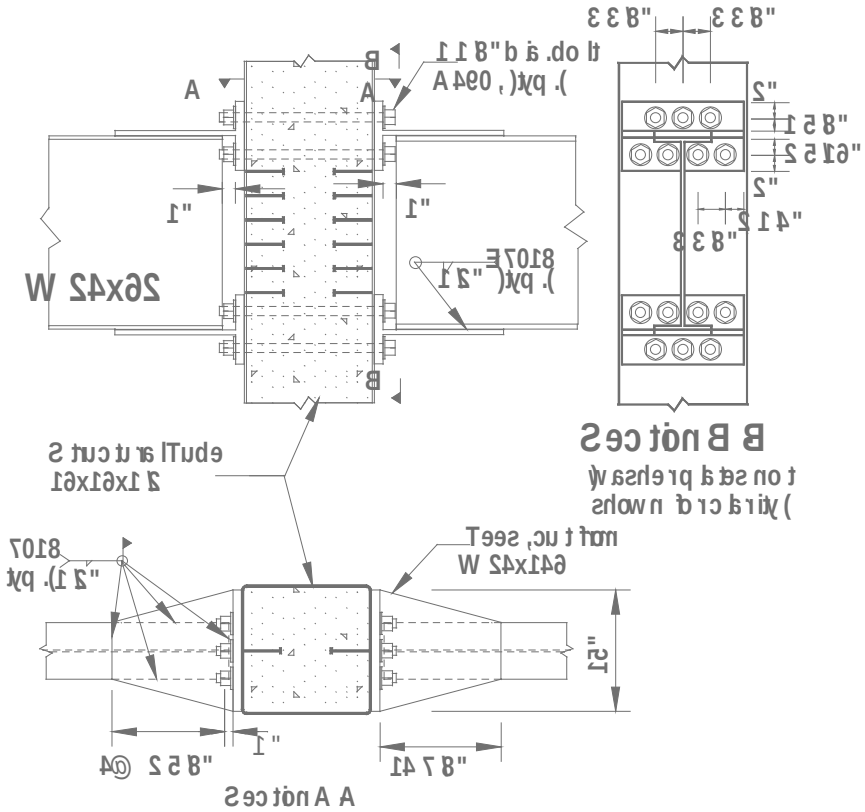


Figura 10: Conexión de momento usando perfiles T

En esta conexión, barras con hilo atraviesan la columna de lado a lado, separadas del hormigón que las rodea. A estas barras se apernan perfiles T, los que a su vez pueden apernarse o soldarse a las alas de la viga para transmitir la flexión y el corte a la columna. Dependiendo del tamaño de la columna y la demanda de esfuerzos, los conectores de corte internos pueden ser eliminados. Además, puede utilizarse una placa de corte soldada al tubo para transmitir el corte y dejar que los perfiles T sólo transmitan la flexión. Aparte de los modos de falla asociados a los elementos de acero, es necesario verificar que el hormigón puede resistir la compresión generada por la tensión en las barras con hilo y que la columna no va a fallar por un problema de sección neta en las perforaciones. Como ya se dijo, estas conexiones han tenido un comportamiento excelente, pero presentan la dificultad de cómo mantener las barras separadas del hormigón, durante el proceso de vaciado y fragüe del hormigón. Una solución a este problema es meter las barras dentro de tubos metálicos o de otro material resistente a la abrasión y los golpes del árido del hormigón.

Conclusiones

En este artículo se presentaron algunas de las conexiones que pueden ser utilizadas en estructuras mixtas, ya sea formadas por elementos convencionales de acero y hormigón trabajando en forma conjunta, o por elementos mixtos.

Además de destacar las características principales de cada conexión, se destacaron los puntos principales que distinguen a estas conexiones de aquellas propias de los sistemas estructurales convencionales de acero u hormigón armado.

Como conclusión principal, las conexiones en construcción mixta requieren que el diseñador tenga un conocimiento acabado del comportamiento del acero y el hormigón armado, de manera que pueda distinguir todos los posibles estados límite que puedan controlar el diseño de la conexión.

Referencias

- ACI (2005). “Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- AISC (2005). “ANSI/AISC 360-05: Specification for Structural Steel Buildings,” American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois.
- ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete (1994), “Guidelines for design of joints between steel beams and reinforced concrete columns”, Journal of Structural Engineering, Vol. 120, No. 8: 2330-2357.
- El-Tawil, S., y Harries, K. (2007), “Recommendations for seismic design of hybrid coupled walls”, Proceedings ASCE Structures Congress 2007.
- Herrera R.A., Ricles J.M., Sause R. (2008), “Seismic performance evaluation of a large-scale composite MRF using pseudodynamic testing,” Journal of Structural Engineering-ASCE, 134(2): 279-288.
- Morino, S., Uchikoshi, M., y Yamaguchi, I. (2001), “Concrete-Filled Steel Tube Column System-Its Advantages”, International Journal of Steel Structures, Vol. 1: 33-44.
- Park, W.-S. y Yun, H.D. (2006), “Seismic performance of steel coupling beam–wall connections in panel shear failure”, Journal of Constructional Steel Research 62 (2006) 1016–1025.
- Ricles, J.M., Peng, S. W., y LU, L. W. (2004), “Seismic Behavior of Composite Concrete Filled Steel Tube Column-Wide Flange Beam Moment Connections”, Journal of Structural Engineering, Vol. 130, No. 2: 223-232.

– Shahrooz, B.M., Gong, B., Tunc, G. y Deason, J.T. (2001). “An overview of reinforced concrete core wall-steel frame hybrid structures,” Prog. Struct. Engng Mater. 3: 149-158.
– Tamboli, A. R. (2009), “Handbook of Structural Steel Connection Design and Details”, McGraw-Hill Professional, 2nd edition.