

Vigas armadas híbridas de acero. Estado del conocimiento

Hybrid Steel plate girders. State of the art

Chacón Flores, Rolando

Departamento de Ingeniería de la Construcción.

Universidad Politécnica de Cataluña

*rolando.chacon@upc.edu

Resumen

Una viga armada se considera híbrida cuando se utilizan diferentes límites elásticos de acero en las chapas de alas y alma que la conforman. Un diseño estructural de una viga armada híbrida puede resultar más eficiente que el de una viga homogénea, tanto desde un punto de vista resistente como desde un punto de vista económico y sostenible. Para una capacidad a flexión dada, se utilizarán chapas de acero de viga armada de menor espesor que su equivalente de viga homogénea. Las vigas armadas híbridas han sido estudiadas a nivel teórico, experimental y numérico bajo solicitaciones de flexión, de inestabilidad por cortante, de interacción flexión-cortante, de cargas concentradas y de fatiga. Los estudios realizados han demostrado que dicho diseño puede ser especialmente atractivo en la construcción de puentes metálicos de tipo biárcena mixtos. En el presente artículo, se presenta una descripción de las diferentes investigaciones realizadas a nivel mundial en las que se aborda la temática mencionada.

Palabras Claves: Vigas armadas híbridas, eficiencia estructural, puentes metálicos.

Abstract

A girder is deemed as being hybrid when it is fabricated with different steel strengths for the flange and web panels. This type of girder is popular as the girder yields a greater flexural capacity at a lower cost and weight compared to a homogeneous girder. Extensive experimental, theoretical and numerical research on hybrid design can be found in the literature. Flexural capacity, shear resistance, instability, patch loading and fatigue resistance of hybrid prototypes have been widely investigated in the last decades. Hybrid design has proven economically sound when used in continuous steel-composite bridges. In this paper, a wide description of the most outstanding research presented worldwide on the subject is depicted.

Key words: Hybrid steel plate girders, structural efficiency, steel bridges.

1 Introducción

Las vigas armadas metálicas representan una de las tipologías estructurales más utilizadas a nivel mundial en la construcción de puentes continuos ferroviarios y de carretera de luces pequeñas y medianas. El diseño y construcción de vigas armadas en taller especializado que luego se dispone en obra según contrastadas tecnologías de la construcción representan una alternativa conocida, estándar y controlada para la construcción de puentes cuando existen condicionantes económicos y de tiempo. Adicionalmente, el acero estructural representa una alternativa sostenible con una gran capacidad para su reciclaje. Para realizar un proyecto adecuado de vigas armadas se requiere de un cálculo exhaustivo de los Estados Límite Últimos a los cuales se verá sometida la estructura. Se deben realizar distintas veri-

ficaciones asociadas a la resistencia y a la inestabilidad de los elementos. Para los Estados Límite de Servicio, se debe limitar la deformabilidad de los elementos y su posible vibración. Asimismo, en el proyecto se debe estudiar el estado de cargas representativo durante su vida útil, que permite establecer criterios sobre los Estados Límite de Fatiga. Finalmente, en el proyecto se deben garantizar condiciones de durabilidad y planes de mantenimiento que minimicen el efecto de la corrosión a largo plazo.

Las vigas armadas se caracterizan por su geometría hecha a medida en la que chapas de acero se sueldan entre sí dando lugar a una sección en doble T o en cajón. Se pueden utilizar distintas combinaciones de anchos y espesores de chapa en función de los condicionantes de inercia y de resistencia que exija el proyecto. Las variables más representativas de las estructuras de viga armada convencionales son: i) espesores de alas (t_f) y alma (t_w) ii) anchos de alas

(b_f) y alma (h_w) iii) límites elásticos de alas (f_{yf}) y alma (f_{yw}) iv) distancia entre riostras laterales (L_b) y v) disposición de rigidización transversal (a). La figura 1 muestra las variables fundamentales descritas en la nomenclatura más utilizada a nivel mundial (y que se establece como estándar en el presente documento).

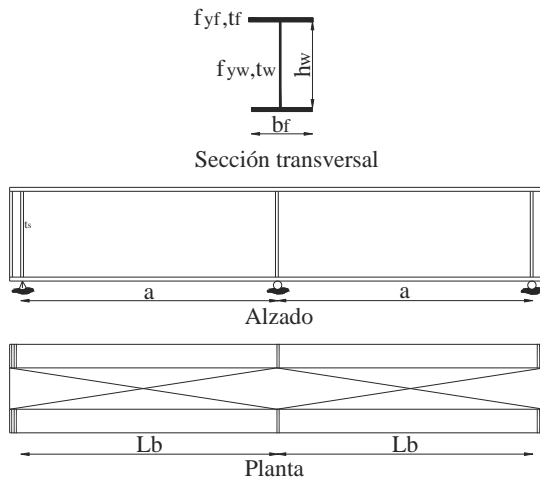


Fig. 1 Vigas armadas metálicas. Variables

Las vigas armadas híbridas representan una alternativa de eficiencia estructural a las vigas armadas homogéneas. Si se cuenta con un diseño de viga homogénea que cumple los requisitos de resistencia y rigidez del proyecto, se puede optimizar la sección transversal de la misma aumentando el límite elástico de las alas (actualmente el costo por unidad de resistencia del acero tiende a estabilizarse en los mercados internacionales) y disminuyendo el espesor de las mismas. Dicha variación tiene las consecuencias evidentes de reducción de peso por unidad de longitud de la sección transversal sin que ello disminuya el canto de la pieza (variable determinante en el cálculo). Sin embargo, una reducción de espesor de las alas puede representar una considerable reducción de las capacidades de la sección a otros fenómenos, notablemente a los de inestabilidad. En los últimos años se ha valorado dicha reducción en numerosos estudios estableciendo conclusiones objetivas que permiten al proyectista e investigador conocer dichas fluctuaciones. En algunos países (Estados Unidos o Suecia) todos los diseños de vigas armadas que se realizan actualmente se hacen exclusivamente con configuraciones híbridas por la eficiencia estructural que proporcionan.

Venezuela es un país emergente en el que se espera se lleven a cabo diversos proyectos de infraestructura relacionados con vialidad y obras de ferrocarril de importancia estratégica. Se prevé que en la próxima década se construyan/mantengan más de tres mil kilómetros entre carreteras y vías férreas. Como muestra, la figura 2 muestra la construcción de un puente de ferrocarril en la línea Encrucijada-Puerto Cabello, el cual ha sido proyectado con vigas arma-

das metálicas de elementos esbeltos los cuales podrían optimizarse con un diseño híbrido adecuado.

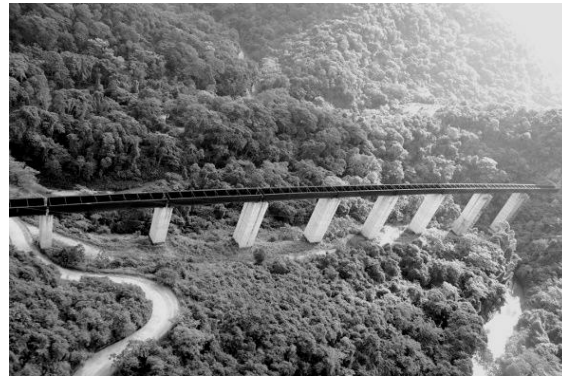


Fig. 2. Línea Encrucijada-Puerto Cabello (IFE, 2013)

En el presente artículo se detallan cronológicamente las más relevantes investigaciones realizadas en el campo del diseño híbrido de las vigas armadas a manera de artículo de revisión. Dentro de ellas, se pueden encontrar estudios asociados a su eficiencia estructural, la capacidad a flexión y la reducción de la capacidad con respecto a otros fenómenos de inestabilidad.

2 Revisión bibliográfica

El primer estudio asociado al diseño de vigas híbridas del que se tiene constancia se realizó en los Estados Unidos en la década de los 40 (Wilson, 1944). En el mismo, se estudia el efecto del cambio del tipo de acero del ala en una pieza en doble T por un material denominado en su época "siliconsteel". Desde entonces, la investigación asociada a las vigas híbridas se podría dividir en tres épocas bien diferenciadas:

- Década de los 60-70, con una profusa investigación experimental
- Década de los 80-90 con un bajo interés en la investigación en el campo híbrido
- Década de los 2000, relanzamiento de la investigación experimental y numérica.

Años 60-70

Durante la década de los 60 y 70, se realizaron numerosas investigaciones experimentales y teóricas asociadas al diseño híbrido. De manera natural, el primer punto que se aborda es la capacidad a flexión de las piezas (Frost y Schillings, 1964). Sus trabajos sirvieron como base para la redacción de la normativa de la época en Estados Unidos. El análisis teórico realizado por dichos investigadores se describe en la figura 3, en la que se observa la aplicación monotónica creciente de un momento flector en una pieza incrementando así su curvatura. Se observa una rama elástica

que posteriormente cambia en el alma, donde debido a su límite elástico, se alcanza la plastificación del material en las fibras próximas al ala (el ala sin embargo, continua comportándose elásticamente). Seguidamente debido a un incremento de la curvatura se alcanza la plastificación en las alas y el alma plastifica gradualmente hasta que se alcanza la misma en el eje neutro, desarrollándose así lo que se entiende como rótula plástica.

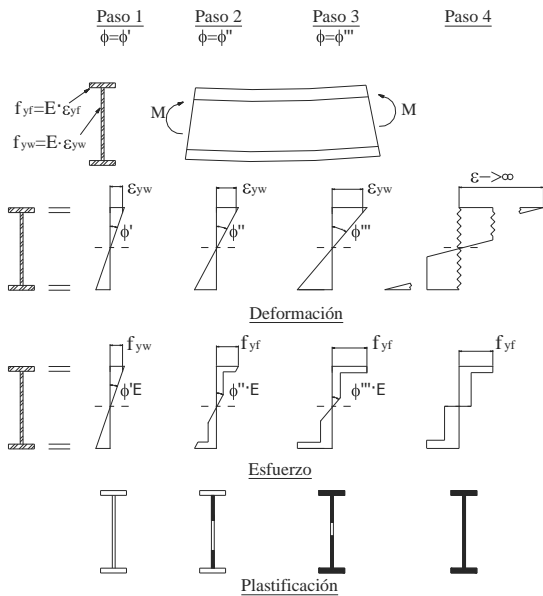


Fig. 3. Comportamiento a flexión de vigas híbridas (Frost y Schillings, 1964)

El comportamiento teórico descrito anteriormente se contrastó con ensayos experimentales en vigas totalmente arriostradas lateralmente no susceptibles a problemas de inestabilidad local. En este mismo tipo de vigas, se realizaron estudios a cortante e interacción flexión-cortante en el que la conclusión fundamental fue que para vigas arriostradas no susceptibles a inestabilidades locales (local buckling), el cortante aplicado no disminuye la capacidad a flexión. Posteriormente se demostraron otros comportamientos que matizan dichas conclusiones.

En el mismo grupo de investigación (Schillings, 1967), se desarrollaron trabajos sobre vigas híbridas robustas (no susceptibles a inestabilidad local) sometidas a cargas concentradas. Se realizaron ensayos aplicando la carga tanto en el ala comprimida como en el ala traccionada los cuales permitieron obtener cargas de diseño empíricas (dichas cargas difieren sustancialmente de las que se encuentran actualmente en las normativas). La figura 4 muestra los estados tensionales teóricos durante el proceso de carga.

Un año después, el mismo investigador (Schillings, 1968) profundizó en el estudio de las vigas armadas híbridas

sometidas a flexión en el caso de que las mismas incluyeran una losa de concreto armado sobre su ala superior (viga mixta). Se propusieron fórmulas aproximadas para el dimensionamiento de elementos híbridos y homogéneos.

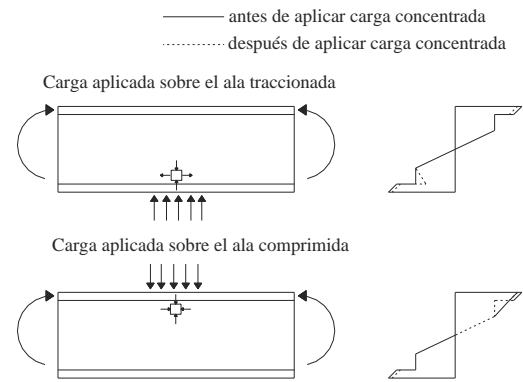


Fig. 4. Comportamiento a cargas concentradas en vigas híbridas (Schillings, 1967)

Posteriormente, se iniciaron los estudios asociados a la inestabilidad en vigas armadas híbridas. Como primer punto, se estudió la abolladura por cortante (Carskaddan, 1968). Se realizó un estudio teórico con el fin de establecer límites en la relación canto/espesor del alma, (esbeltez adimensional h_w/t_w) llegando a conclusiones teóricas que sugerían limitar dicha relación para evitar problemas de inestabilidad. El mismo investigador, después de formular las limitaciones teóricas, encontraba discrepancias con sus propios experimentos. Desde entonces, desde el punto de vista normativo se mantuvo la idea de limitar dichas relaciones pero no es hasta décadas más tarde cuando se esclarecen los conceptos a partir de modelos numéricos.

En el marco de los trabajos desarrollados por la International Association for bridge and Structural Engineers (IABSE), se desarrollaron campañas experimentales sobre distintos prototipos de vigas armadas sometidos a distintas solicitaciones. Dentro de los trabajos se incluyeron especímenes híbridos con y sin rigidización longitudinal (Maeda, 1977) los cuales arrojaron conclusiones adicionales sobre el comportamiento post-crítico de los prototipos rigidizados.

Asimismo, en el Reino Unido se iniciaron estudios de vigas híbridas e inestabilidad (Nethercot, 1977), en los que se valoró principalmente el efecto que podría tener la plastificación prematura del alma debida a la flexión (paso 2 de la figura 3) en el comportamiento a pandeo lateral de la pieza encontrando que la misma no tenía efectos apreciables. Sin embargo, se apuntaba explícitamente a la influencia de las tensiones residuales en el comportamiento a flexión de las vigas armadas en general.

Años 80-90

Durante la década de los 80-90, la investigación sobre vigas armadas híbridas a nivel mundial no fue muy profusa. Se pueden encontrar investigaciones puntuales por parte de institutos de investigación especializados en las estructuras metálicas. El SBI (Instituto de la Construcción en Acero de Suecia) publicó manuales de proyecto con algunas recopilaciones de ensayos realizados a nivel mundial hasta su fecha (Åhlenius, 1994). Algunos investigadores argumentan que dicho fenómeno se debió en su momento a que en los países industrializados con capacidad de realizar investigaciones de tal calibre, se había perdido el interés por optimizar los aspectos relacionados con los materiales en las estructuras y el foco de atención se encontraba en la optimización de los procesos constructivos y el empleo de la mano de obra (Velkovic y Johansson, 2004).

Siglo XXI

A principios del siglo XXI, se retoma el interés económico por las vigas híbridas en los Estados Unidos. Un estudio de alternativas de carácter netamente investigativo (Barker y Schrage, 2000) mostró el potencial económico estructural de dicha tipología utilizando aceros de alto límite elástico (HPS, por sus siglas en inglés "highperformance steel"). Se estudiaron 3 diseños para un puente de luz media. Un diseño homogéneo de acero para alas y alma 50W (según la nomenclatura, $f_y=50\text{ksi}$, lo que equivale a 345 N/mm^2 o 3450 Kg/cm^2). Un diseño homogéneo de 70W ($f_y=70\text{ksi}$, lo que equivale a 4825 N/mm^2 o 4820 Kg/cm^2) y un diseño híbrido con chapa de acero 70W para las alas y 50W para el alma. Los resultados en términos de peso según cada una de las alternativas se muestran en la tabla 1. Se observa una reducción de hasta un 11% de peso utilizando la alternativa híbrida.

Tabla 1. Pesos totales para los diseños realizados (Barker y Schrage, 2000)

| Diseño | Peso de acero (Kg) | Ahorro en peso | Costo (\$, año 2000) | Ahorro en costos |
|---------|--------------------|----------------|----------------------|------------------|
| 50W | 310500 | Base | 505132 | Base |
| 70W | 270600 | 12,85% | 550036 | 8,89% |
| Híbrido | 276700 | 10,89% | 449591 | -11,00% |

A partir de entonces, y dadas las obvias ventajas de ahorro en peso, se retomaron las investigaciones en el campo de las vigas híbridas. Se destacan los trabajos numéricos basados en el método de los elementos finitos en vigas armadas homogéneas e híbridas modelizados con elementos tipo placa (Greco N y Earls C, 2000) en los que se estudia la capacidad de rotación de dichos elementos para diferentes configuraciones de arriostamiento lateral. Se demostró que las disposiciones recogidas en AASHTO relativas al arriostamiento lateral eran insuficientes en algunos casos homogéneos e híbridos.

Por otra parte, vale la pena mencionar que una de las principales limitaciones con que se enfrentaba el proyectista de cara al diseño de las vigas híbridas en puentes de luces

pequeñas o medias era la penalización que tenían las mismas según la normativa AASHTO asociadas a los posibles fenómenos de inestabilidad por cortante. Dentro de las conclusiones establecidas a partir de los trabajos realizados 40 años atrás, se penalizaba el desarrollo de la capacidad post-crítica de las vigas armadas sometidas a cortante (Basler, 1960). La normativa americana penalizaba explícitamente las vigas híbridas en la utilización de su capacidad post-crítica y limitaba la misma a la capacidad crítica, dejando así de lado una reserva considerable de capacidad que no se permitía desarrollar en el diseño híbrido. En una publicación de carácter proyectual de diseño general de vigas armadas realizada a principios del siglo (Wollmann, 2004a, Wollmann, 2004b) se indicaban los procedimientos a seguir en el diseño de vigas armadas para las verificaciones más comunes resaltándose asimismo las penalizaciones para las vigas híbridas.

Por ende, una de las piedras angulares en las investigaciones posteriores fue la de esclarecer si las limitaciones proyectuales que iban en detrimento del diseño híbrido eran adecuadas.

A partir del año 2002, se desarrollan trabajos liderizados por el Departamento de Transporte del Estado de Missouri y distintas universidades americanas cuyo objetivo era estudiar la capacidad post-crítica de las vigas híbridas sometidas a solicitaciones de cortante (Barker y col., 2002). Dichos trabajos se basaron en un número considerable de ensayos experimentales y numéricos (Rush 2001; Zentz 2002; Azizinamini y col. 2007). Los trabajos incluían el estudio sistemático en especímenes híbridos y homogéneos de características geométricas similares y cuyas respuestas estructurales fueron comparadas con herramientas experimentales y numéricas. Como conclusión fundamental, se estableció que las vigas híbridas si podían desarrollar capacidad post-crítica a cortante de manera similar a las vigas homogéneas y por tanto, las limitaciones incluidas en AASHTO podían eliminarse (White D y Barker M, 2008). A raíz de dichos trabajos, se actualizó la normativa y el tratamiento de las vigas híbridas y homogéneas es similar. Cabe destacar que la versión actual de la normativa venezolana COVENIN-MINDUR (1998) no incluye dichas actualizaciones y hoy por hoy el diseño híbrido continúa penalizado.

Finalmente, se destacan los trabajos realizados en el marco proyectual de puentes continuos de vigas armadas híbridas (Felkel y col., 2006) en los que se aplican novedosas tecnologías de medición, verificación y construcción de puentes metálicos. La Fig. 5 muestra el puente sobre el Thicketty Creek en Carolina del Sur utilizado como base de estudio por Felkel y sus colaboradores en el que se compararon las mediciones obtenidas in situ, con los modelos numéricos desarrollados por el grupo de investigación.



Fig. 5. Puente continuo multiviga utilizado en el estudio (Felkel y col., 2006)

En Japón, se desarrollaron trabajos experimentales dedicados al estudio del pandeo local de las alas comprimidas de elementos flectados. Las conclusiones establecidas a partir de seis ensayos experimentales realizados apuntaban a que la capacidad de rotación de las vigas híbridas era similar a la de las vigas homogéneas de geometría similar. La Fig. 6 muestra el fallo de uno de los especímenes ensayados.



Fig. 6. Viga híbrida sometida a solicitaciones de flexión. Fallo por pandeo local del ala comprimida (Ito y col., 2005)

Por otra parte, se observa que a principios de la década, en Europa se retomaron los estudios relativos al campo de las vigas armadas híbridas. Se destacan los trabajos realizados desde el Centro Técnico Industrial de Construcción Metálica francés (CTICM) que potenciaban el diseño híbrido a flexión siguiendo las especificaciones de Eurocódigo 3 (Bitar, 2003).

Siguiendo el interés nombrado previamente, se pueden encontrar publicaciones de connotaciones generales en el diseño híbrido (Veljkovic M y Johansson B, 2004) en las que se describían las ventajas estructurales y económicas de dicha tipología describiendo incluso algunos puentes en Suecia proyectados y construidos con elementos híbridos.

Cabe destacar que actualmente todos los elementos de vigas armadas que se construyen en dicho país nórdico son híbridos. No se proyectan elementos homogéneos por considerarse poco eficientes.

En el marco de un gran Proyecto Europeo de investigación sobre la competitividad del acero en puentes de luces pequeñas y medianas (ComBri 2007), se desarrollaron trabajos de investigación en vigas armadas con distintas configuraciones geométricas y de material sometidas a distintas solicitaciones (incluyendo así las vigas híbridas). En la tabla 2 se destaca la revisión de la práctica híbrida en diferentes países europeos así como la utilización de aceros de altas prestaciones según la época (la nomenclatura S355 hace referencia al límite elástico nominal $f_y=355 \text{ N/mm}^2$ o bien $f_y=3550 \text{ Kg/cm}^2$).

Tabla 2. Diseño híbrido en 5 países europeos (ComBri, 2007)

| País | Tipo de acero más utilizado | | Diseño híbrido |
|----------|-----------------------------|-------------|----------------|
| | Carretera | Ferroviario | |
| Belgica | S355-S460 | S355 | No se utiliza |
| Francia | S460 | S355 | No se permite |
| Alemania | S355-S460 | S355 | Se utiliza |
| España | S460 | S355 | No se permite |
| Suecia | S690 | S420 | Se utiliza |

Asimismo, en el marco de los ciclos de conferencias Eurosteel que se realizan cada tres años en alguna ciudad Europea, se suelen incluir constantemente trabajos asociados a las ventajas estructurales de las vigas híbridas (Veljkovic y Johansson, 2002; Real y col., 2008; Petel y col., 2008).

Cabe destacar que en EN1993-1-5 (2005), que representa la parte del Eurocódigo que de manera específica describe todas las verificaciones de vigas armadas, no existen limitaciones asociadas a la inestabilidad por cortante en vigas híbridas, principalmente porque dichas verificaciones se basan en la teorías del campo girado de tensiones (Höglund, 1971) y el mismo permite diferenciar claramente los aportes de resistencia post-crítica de las vigas híbridas u homogéneas en la formulación.

Finalmente, se destacan los trabajos numéricos y experimentales desarrollados en España (Chacón y col., 2010a; Chacón y col., 2010b; Chacón y col., 2011) asociados a la inestabilidad local de piezas híbridas sometidas a cargas concentradas (local buckling y/o patchloading en inglés). Dicho fenómeno tiene especial relevancia en la construcción de puentes continuos mediante el método del lanzamiento, por lo que su estudio cobra especial interés en vigas híbridas para puentes de luces pequeñas y medianas. Las conclusiones fundamentales de dichos trabajos establecieron que la formulación de EN1993-1-5 asociada a la inestabilidad local, la cual indicaba que una viga híbrida se comportaba mejor que una viga homogénea ante dicha solicitación, debía modificarse, puesto que tanto los ensayos experimentales como todas las modelizaciones numéricas

indicaban que no existía ninguna diferencia entre unas y otras para las configuraciones geométricas habituales. Se destaca igualmente de dicho estudio, la utilización sistemática de herramientas numéricas de acuerdo con las últimas tendencias de cálculo de estructuras de chapa según Eurocódigo 3.

Asimismo, se destacan los últimos trabajos relacionados con la capacidad de rotación de las vigas híbridas (en este caso disponiendo de una losa de concreto en el ala superior) presentados en Corea del Sur por Youn y sus colaboradores (Youn y col. 2011, Youn, 2013).

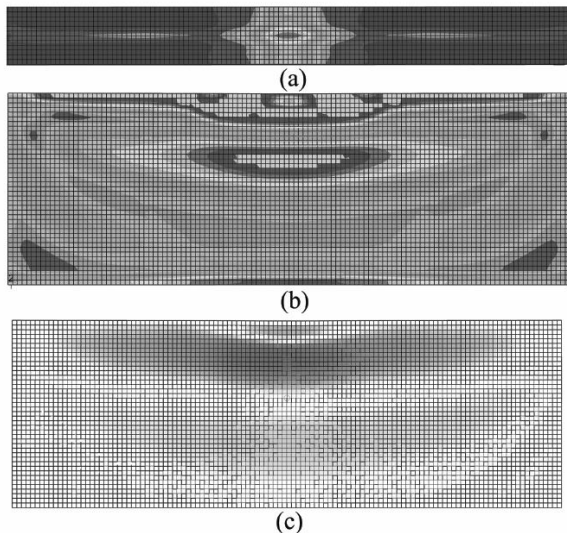


Fig. 5. Viga híbrida sometida a cargas concentradas (Chacón y col. 2010*)
 a) Vista en planta (esfuerzos) b) Vista en alzado (esfuerzos)
 c) Vista en alzado, deformada

En Venezuela, el diseño híbrido no ha sido objeto de estudio. A pesar de la gran cantidad de puentes construidos con vigas armadas, se ha mantenido el diseño homogéneo como alternativa fundamental (en parte o bien porque no se producen chapas de acero de distintas prestaciones o bien, porque no se importan). Presumiblemente, es por ello que no se ha hecho especial hincapié en la investigación del diseño híbrido de vigas armadas. Sin embargo, en trabajos publicados recientemente se describen las semejanzas y diferencias de las normativas americanas, europeas y venezolanas (COVENIN-MINDUR, 1998) en el campo de la inestabilidad por cortante y diseño híbrido (RojasBlonval JE, 2013). Las conclusiones fundamentales de dichos trabajos apuntan a una posible actualización de la normativa para así poder explotar las distintas ventajas estructurales de dicha tipología (Chacón R y Rojas Blonval JE, 2013).

La tabla 3 muestra una cronología de la investigación en el campo de estudio a nivel mundial. Se destaca la naturaleza de la investigación (E: Experimental, T: Teórica y N: Numérica), el país de origen y el tema de estudio. Se destaca que existen considerables investigaciones asociadas a las ventajas estructurales de los prototipos híbridos, al compor-

tamiento a flexión, a la inestabilidad por cortante y a las cargas concentradas. Se destaca igualmente que aún hay mucho camino por recorrer en la verificación de la interacción entre solicitaciones (flexión-cortante, flexión-cargas concentradas, flexión-cargas concentradas-cortante) y al comportamiento en servicio (flechas, vibraciones).

Por otra parte, se destaca que la naturaleza de las investigaciones ha migrado desde la vertiente experimental (con sus costes asociados y preparación necesaria) a investigaciones numéricas con profusos estudios paramétricos. Las últimas investigaciones que se presentan incluyen estudios sistemáticos en códigos numéricos contrastados que pueden servir perfectamente de laboratorios virtuales en el campo del comportamiento estructural de vigas armadas.

Tabla 3. Cronología de la investigación en el diseño híbrido

| Investigadores | País | Año | Base | Temática |
|------------------|------------------|------|----------|--------------------------------|
| Wilson | EEUU | 1944 | T | Definición de viga híbrida |
| Haaier | EEUU | 1961 | T | Aceros de alto límite elástico |
| Frost et al. | EEUU | 1964 | T-E | Flexión y cortante |
| Schilling | EEUU | 1967 | T-E | Cargas concentradas |
| Schilling | EEUU | 1968 | T | Vigas híbridas mixtas |
| Carskaddan | EEUU | 1968 | T-E | Inestabilidad por cortante |
| Maeda | EEUU | 1971 | T-E | Flexión |
| Nethercot | Reino Unido | 1976 | T-E | Inestabilidad por cortante |
| Ahlenius | Suecia | 1994 | General | Manual de proyecto |
| Barker et al. | EEUU | 2000 | Economía | Ventajas económicas |
| Barker et al. | EEUU | 2000 | T | Inestabilidad por cortante |
| Greco | EEUU | 2001 | T-N | Flexión |
| Rush | EEUU | 2001 | E | Inestabilidad por cortante |
| Veljkovic et al. | Suecia | 2002 | General | Proyecto |
| Ito et al. | Japón | 2002 | T-E-N | Flexión |
| Zentz | EEUU | 2002 | E | Inestabilidad por cortante |
| Bitar y col. | Francia | 2003 | T-E-N | Flexión |
| Barker y col. | EEUU | 2004 | E | Inestabilidad por cortante |
| Fenkel y col. | EEUU | 2006 | T-E-N | Pandeo lateral |
| Barth y col. | EEUU | 2007 | N | Flexión |
| Combr project | Europa | 2007 | T-E-N | Proyecto |
| Chacon y col. | España | 2007 | T-E-N | Cargas concentradas |
| Azzinamini | EEUU | 2007 | E | Inestabilidad por cortante |
| Petel et al. | Francia | 2008 | Economía | Eficiencia estructural |
| Real et al. | España | 2008 | E | Inestabilidad por cortante |
| Chacon y col. | España | 2010 | E-N | Cargas concentradas |
| Chacon y col. | España | 2010 | E-N | Cargas concentradas |
| Chacon y col. | España | 2011 | T-N | Cargas concentradas |
| Youn | Corea del Sur | 2011 | E | Flexión |
| Youn | Corea del Sur | 2013 | T-N | Flexión |
| Rojas Blonval | España-Venezuela | 2013 | T-N | Inestabilidad por cortante |

3 Conclusiones

Las vigas híbridas representan una alternativa de proyecto de vigas armadas metálicas eficiente, sostenible y económica. Diversas investigaciones realizadas a nivel mundial respaldan dicha afirmación. En el presente estudio se incluyen las investigaciones más relevantes de la literatura desde las vertientes teórica, experimental, proyectual y numérica. Dentro de las investigaciones consultadas, se resalta que en Venezuela no se ha explotado sistemáticamente dicha tipología estructural a pesar de la gran cantidad de puentes de luces pequeñas y medianas construidos hasta la actualidad.

Para poder explotar adecuadamente las prestaciones estructurales del diseño híbrido (las cuales favorecen sobre todo a la capacidad por unidad de peso de dichos elementos

a flexión), se debe garantizar un buen comportamiento de las vigas a cortante (estudiando su inestabilidad), a cargas concentradas y a pandeo lateral. Cabe destacar que un diseño híbrido supone utilizar un límite elástico superior para las alas reduciendo así su espesor. Para una capacidad a flexión dada, una viga híbrida de menor espesor de ala vera mermada su capacidad de rotación por inestabilidad global (se requerirá más arriostramiento lateral) y local (menor capacidad para resistir cargas concentradas y cortante).

Las normativas europeas y americanas han sido objeto de actualización constante en los últimos años. Dichas actualizaciones han permitido por una parte, mejorar las formulaciones conservadoras que penalizaban las vigas híbridas (en concreto, las limitaciones de inestabilidad por cortante encontradas en la normativa americana) y por otra, limitar las formulaciones que se encontraban del lado de la inseguridad en el diseño híbrido (en concreto, las formulaciones de resistencia a cargas concentradas recogidas en el Eurocódigo 3 parte 1-5). Dichas revisiones de la normativa son fruto de la investigación teórica, experimental y numérica desarrollada recientemente por diversos grupos de investigación en Estados Unidos y en Europa.

Finalmente, se destaca la necesidad de revisar las formulaciones de la normativa venezolana asociadas al proyecto de vigas armadas, para que así la misma pueda nutrirse de las más recientes investigaciones realizadas y contrastadas a nivel mundial y por tanto, el diseño híbrido pueda representar una alternativa de interés para el sector de la construcción de puentes metálicos.

Referencias

- AASHTO, 2005, LRFD Bridge Specifications, American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., USA
- Åhlenius E, 1994, Hybridbalkar I stål. Swedish Institute of Steel Construction, Pub.147
- Azizinamini A, Hash J, Yakel A y Farimani R, 2007, Shear capacity of hybrid plate girders, *Journal of Bridge Engineering*, Vol. 12 (5), pp. 535-543
- Barker MG y Schrage SD, 2000, High performance Steel Bridge Design and Cost Comparisons. *Transportation Research Record*, Vol.1740, pp. 33-39.
- Barker M, Hurst, A y White, D, 2002, Tension Field Action in Hybrid Steel Girders, *Engineering Journal*, AISC, Vol. 39(1), pp. 52-62.
- Basler K, 1961, Strength of Plate Girders in Shear. *Journal of Structural Division ASCE*, 87(7), pp. 151-180.
- Bitar, D, 2003, Résistance a la flexion des poutres hybrides à section en I, *Construction Métallique*, Vol. 40 (2), pp. 77-92
- Carskaddan P, 1968, Shear buckling of unstiffened hybrid beams. *Journal of the structural division. ASCE*; Vol. 94 (ST8), pp. 1965-1990.
- Chacón R, Mirambell, E y Real, E, 2010, Hybrid steel plate girders subjected to patch loading, Part 1: Numerical study, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 66 (5), pp. 695-708.
- Chacón R, Mirambell, E y Real, E, 2010, Hybrid steel plate girders subjected to patch loading, Part 2: Design proposal, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 66 (5), pp. 709-715.
- Chacón R, Mirambell, E y Real, E, 2011, Longitudinally stiffened hybrid steel plate girders subjected to patch loading, *Journal of Constructional Steel Research*, Vol 67 (9), pp.1310-1324.
- Chacón R y Rojas Blonval JE, 2014. Evaluación de la resistencia a abolladura por cortante de vigas armadas híbridas de acero según la norma venezolana COVENIN 1618:1998, Artículo aceptado para su publicación en: *Informes de la Construcción*, CSIC-Instituto Torroja, Madrid, España (en proceso de edición)
- ComBri, 2007, Competitive Steel and Composite Bridges by Improved Steel Plated Structures, Final Report, RFCS Contract No. RFS-CR-03018.
- COVENIN-MINDUR, 1998, Estructuras de acero para edificaciones, MINDUR 1618-98. Caracas.
- Felkel J, Rizos D y Ziehl P, 2007, Structural performance and design of HPS70W bridge girders. *Journal of Constructional Steel Research*. Vol. 63 (7) pp. 909-921
- Frost R y Schilling C, 1964, Behaviour of hybrid beams subjected to static loads, *Journal of the Structural Division ASCE*, Vol. 90 (3), pp. 55-86.
- Greco N y Earls C, 2000, Structural Ductility in Hybrid High Performance Steel Beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.129 (12), pp. 1584-1595.
- Höglund T, 1971, Simply supported long thin plate I-girders without webstiffeners subjected to distributed transverse load. *IABSE Colloquium London*, Reports of the Working Comissions, Vol. 11.
- Instituto de Ferrocarriles del Estado, 2013. Se encuentran en www.ife.gob.ve. Fecha de consulta: 29 de mayo de 2014.
- Ito, M, Nozaka, K y Shirosaki, T, 2005. Experimental Study on Moment-Plastic Rotation Capacity of Hybrid Beams, *Journal of Bridge Engineering*, ASCE, Vol.10 (4), pp 490-496
- Maeda Y, 1976, Additional Study on Static Strength of Hybrid Plate girders in Bending, *Colloquium of Design of Plate and Box Girders for Ultimate Strength*, London, International Association for Bridge and Structural Engineering
- Nethercot D, 1976, Buckling of welded hybrid steel I-beams. *Journal of the structural division. ASCE*. Vol.102 (ST3), pp. 461-74
- Petel A, Picard L, Imberty F y Raoul J, 2008, Design of a composite road bridge with high strength steels and ultra-high performance fiber reinforced concrete. *Proceedings of 5th European Conference on Steel and Composite Structures*, Graz, Austria, pp. 159-164.
- Real E, Chacón R y Mirambell E, 2008, Shear response of hybrid steel plate girders. *Proceedings of Eurosteel. 5th European Conference of Steel and Composite Structures* Graz, Austria.

- Rojas JE, 2013, Vigas híbridas sometidas a solicitaciones de cortante. Propuesta de actualización de la Norma Venezolana COVENIN 1618:1998. Tesis de Máster, ETSE-CCPB, UPC. Se encuentra en: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/18448> Fecha de consulta 29 de mayo de 2014.
- Rush C, Experimental tension field action behaviour in HPS plate girders, 2001, MS thesis, Univ. of Missouri-Columbia, USA
- Schilling C, 1967, Web Crippling Test on Hybrid Beams, Journal of the Structural Division ASCE, Vol.93.
- Schilling C, 1968, Bending behaviour of composite hybrid beams, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.94 (ST8)
- Veljkovic M y Johansson B, 2002, Design of hybrid steel girders. Proceedings of 3rd European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel 2002. Coimbra, Portugal, pp. 541-550
- Veljkovic M y Johansson B, 2004, Design of hybrid steel girders. Journal of Constructional Steel Research, Vol. 64 (3-5), pp. 535-547
- White D y Barker M, 2008, Shear Resistance of Transversely Stiffened Steel I-Girders, Journal of Structural Engineering, Vol 134 (9), pp. 1425-1436.
- Wilson W, 1944, Physical Properties That Affect Behaviour of Structural Members, Transactions ASCE, Vol. 109.
- Wollmann G, 2004, Steel Girder Design per AASHTO LRFD Specifications. Part 1, Journal of Bridge Engineering, Vol. 9 (44), pp. 364-374
- Wollmann G, 2004, Steel Girder Design per AASHTO LRFD Specifications. Part 2, Journal of Bridge Engineering, Vol. 9 (4), pp. 375-381.
- Youn S, Bae, D y Kim D. 2011. Ultimate Flexural Strength of Hybrid Composite Girders Using High-Performance Steel of HSB600 at Sagging Bending, Youn, S., Bae, D., and Kim, Y., Composite Construction in Steel and Concrete VI: pp. 680-690
- Youn S. 2013. Nominal moment capacity of hybrid composite sections using HSB600 high-performance steel. International Journal of Steel Structures, Vol. 13 (2), pp 243-252
- Zentz A, 2002. Experimental moment-shear interaction and TFA behaviour in hybrid plate girders, MS thesis, Univ. of Missouri-Columbia, USA

Recibido: 17 de diciembre de 2013

Revisado: 06 de febrero de 2014

Chacón, Rolando: Ing. Civil (ULA), Ing. de Caminos, Canales y Puertos y PhD en Ing. de la Construcción (UPC). Actualmente es Profesor Agregado del Dept. de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña en el área de Estructuras Metálicas.

