



Uniones viga-columna continuas de hormigón armado prefabricado: apuntes sobre su comportamiento.

Precast continuous beam-column joints: Notes on their behavior

Janet Otmara Martínez Cid, Julia Rosa Álvarez López y Nelson Fundora Sautié

RESUMEN: Las uniones viga-columna son consideradas como zonas críticas frente a las acciones horizontales de viento y sismo. La concepción de uniones viga-columna continuas prefabricadas con un adecuado comportamiento frente a estas acciones constituye un motivo de preocupación para los ingenieros que se desempeñan en el diseño y construcción de estructuras prefabricadas. En el presente trabajo se exponen, a partir de la revisión de normativas y resultados de investigaciones nacionales e internacionales en la temática, ejemplos de uniones viga-columna continuas prefabricadas de notable empleo en Cuba, aspectos asociados a la concepción de las mismas, las formas de fallo que las caracterizan así como criterios sobre la influencia de las uniones continuas en pórticos sometidos a cargas horizontales con el objetivo de resaltar la importancia del empleo de este tipo de unión por constituir los pórticos, la tipología estructural empleada con más frecuencia en Cuba para la construcción de edificios altos.

PALABRAS CLAVE: Unión viga-columna, prefabricación, uniones continuas prefabricadas.

ABSTRACT: Beam-column joints are considered critical zones under lateral wind and seismic loads. The creation of continuous precast beam-column joints with satisfactory performance results constitutes a great concern for engineers that design and construct precast concrete structures. This study presents a literature overview of studies that analyze and investigate the behavior of continuous precast beam-column joints with the objective of revealing the need to employ these joints in tall frames structures. Examples of continuous precast beam-column joints used in Cuba are described, with an emphasis on relevant aspects of their conception, behavior, and types of failures. Considerations about the influence of the continuous beam-column joint in the frame's response to lateral loads are presented.

KEYWORDS: beam-column joint, precast concrete, continuous precast joint.

Introducción

“Un sistema prefabricado será tan bueno como lo sea la solución dada a las uniones entre sus elementos”.
[1]

En el diseño y construcción de obras prefabricadas, la unión entre los elementos es uno de los problemas de más difícil solución y aún cuando no es justo calificar un sistema a partir de este único aspecto, las uniones tienen serias implicaciones en el comportamiento estructural de la edificación, en la producción de los elementos y en el montaje de la obra. [1]

El comportamiento estructural de los elementos prefabricados puede diferir sustancialmente de aquellos hormigonados *in situ*, razón por la cual las uniones destinadas a minimizar o transmitir fuerzas tales como retracción, cambios de temperatura, deformaciones elásticas, asentamientos diferenciales, viento y sismo, requieren consideraciones especiales en las estructuras prefabricadas. Los elementos prefabricados y sus uniones deben ser diseñados para todas las condiciones de carga a las que estarán sometidos, desde su fabricación hasta su ubicación final en obra, pues en ocasiones las condiciones de manipulación son más severas que las que el elemento y sus uniones experimentarán en servicio. Estos estados temporales pueden estar originados por excentricidades, viento, cargas de construcción e incluso impacto, aparte de que las condiciones de apoyo en estas etapas pudieran ser diferentes a las definitivas.

La dificultad de la creación de uniones continuas viga-columna entre componentes prefabricados, la incertidumbre de la respuesta de las mismas frente a las acciones horizontales y la preocupación creciente por la seguridad de las estructuras ha conducido a un consenso internacional de la necesidad del estudio del comportamiento de este tipo de unión.

En el presente trabajo se exponen, a partir de la revisión de normativas y resultados de investigaciones nacionales e internacionales en la temática, ejemplos de uniones viga-columna continuas prefabricadas de notable empleo en Cuba, aspectos asociados a la concepción de las mismas, las formas de fallo que las caracterizan, así como criterios sobre la influencia de las uniones continuas en pórticos sometidos a cargas horizontales con el objetivo de resaltar la importancia del empleo de este tipo de unión, por constituir los pórticos la tipología estructural empleada con más frecuencia en Cuba para edificios altos y la prefabricación, una técnica constructiva con amplias aplicaciones y experiencia en el país.

Clasificación y comportamiento de uniones continuas prefabricadas. Ejemplos de su empleo en Cuba.

En las estructuras prefabricadas resulta más complicado lograr las ventajas que se derivan del monolitismo, si se compara con las construcciones *in situ*, dadas las dificultades de resolver las uniones entre los elementos de una forma sencilla y económica, al menos teniendo en cuenta las experiencias de las últimas décadas. En las construcciones convencionales o fundidas *in situ*, las uniones continuas entre los diferentes elementos se logran de manera general, prolongando las barras del elemento ya hormigonado y empalmándolas al refuerzo del que se va a hormigonar. De esta forma se transmiten los esfuerzos de un elemento a otro garantizando la continuidad.

En ocasiones se plantea que las uniones prefabricadas tienden a ser menos dúctiles y brindan una respuesta inelástica, menos evidente que las hormigonadas *in situ*. No obstante, algunas investigaciones [2][3][4] han demostrado que una adecuada realización de la unión prefabricada puede llegar a brindar un comportamiento tan eficiente frente a cargas horizontales como las realizadas *in situ*.

De las soluciones a uniones viga-columna continuas prefabricadas más utilizadas, pueden citarse aquellas que se logran acudiendo a:

1. La proyección de “barras en espera” de uno de los elementos prefabricados para ser empalmados o soldados al refuerzo que proyecta el otro elemento al que se va a conectar, completando la unión con el hormigonado *in situ* del espacio entre dichos elementos [5][6][7]. Esta forma de solución se caracteriza por soportar grandes esfuerzos y se realiza con el objetivo de acercarse al comportamiento de uniones continuas monolíticas, fundamentalmente en edificaciones en las que las solicitaciones debidas a la acción del viento y el sismo rigen su concepción y diseño. (Figura 1)

1. MASPONS, R. Prefabricación. La Habana: Editorial del Instituto Superior Politécnico “José A. Echeverría”, 1987.
2. CHEOK, G. S., LEW, H. S. “Model precast concrete beam to column connections subject to cyclic loading”. *PCI Journal*. 1993, vol. 38, num. 4, p 80-92.
3. STANTON, J., STONE, W. C., CHEOK, G. S. “A hibryd reinforced precast frame for seismic regions”. *PCI Journal*. 1997, vol. 42, num. 2, p 20-32.
4. TIONG, P.; BIN, A, KARIM, A., et al. “Performance of IBS precast concrete beam-column connections under earthquake effects: a literature review”. *American J. of engineering and applied sciences*. 2011, vol. 4, num. 1, p 93-101.
5. ALCOCER, S, M, CARRANZA, R, PÉREZ-NAVARRETE, D, MARTÍNEZ, R. “Seismic tests of beam-to-column connections in a precast concrete frame”. *PCI Journal*. 2002, vo. 47, núm. 3, p 70-89.

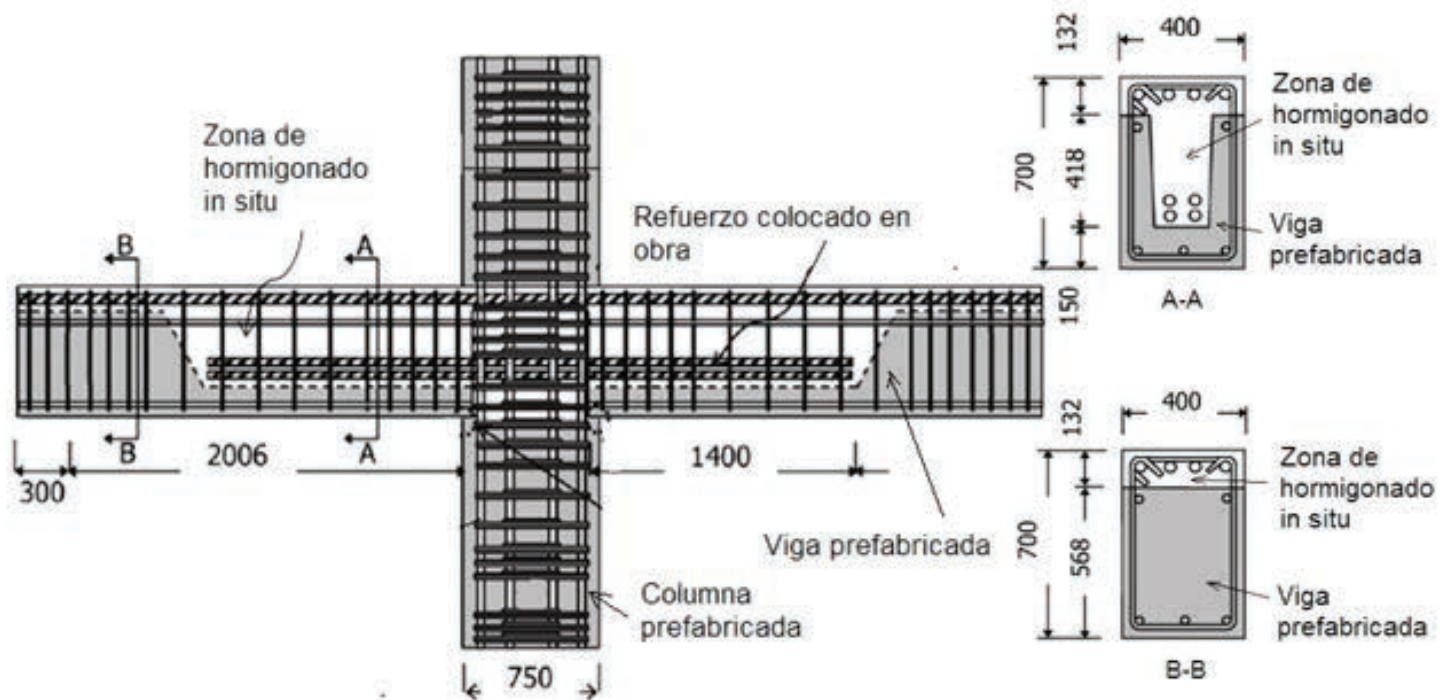


Figura 1: Uniones mediante “barras en espera” y completamiento in situ propuestas por [7].

Según Maspons, [1] el método más sencillo y eficaz de unir rígidamente una viga a una columna, es empalmado mediante soldadura las barras de la armadura que sobresalen de viga y columna y hormigonar posteriormente la junta. Esta forma de vínculo mediante soldadura puede realizarse directamente entre las barras o con insertos metálicos situados en los elementos a unir que a su vez van acoplados a los aceros de refuerzo de los elementos en cuestión. Cuando se empleen cordones de soldadura de gran longitud debe tenerse especial cuidado, pues ello implica calentamientos importantes que provocan, frecuentes fisuras en el hormigón e incluso la rotura de este por la dilatación de las armaduras.

Con el objetivo de conocer el comportamiento de uniones viga-columna continuas frente a la acción de cargas sísmicas cuya solución se basa en diversas propuestas de acero en espera con completamiento de hormigonado *in situ* algunos autores [5][6][7] ensayan especímenes a escala natural para ser comparadas con uniones monolíticas bajo las mismas condiciones de cargas cíclicas en uno y dos sentidos. Las propuestas prefabricadas, si bien mostraron capacidad a cortante, ductilidad y capacidad de disipación de energía menores que las ejecutadas *in situ*, se consideraron como satisfactorias, pues los resultados oscilaron aproximadamente en el 90 % de la obtenida para los casos monolíticos estudiados. Las investigaciones concluyen que esta forma de vínculo puede ser empleada

en edificaciones ubicadas en zonas de moderado y alto riesgo sísmico siempre que se consideren en los cálculos la rigidez y resistencia obtenidas en las mismas.

Entre las causas más frecuentes de los fallos de esta forma de vínculo se hallan el insuficiente anclaje del refuerzo longitudinal de la viga embebido en la unión [7][8], tanto en soluciones *in situ* como prefabricadas, lo que ocasiona el deslizamiento de las barras y el agrietamiento del hormigón, el fallo por cortante en el núcleo de la unión debido fundamentalmente a la ausencia de refuerzo transversal en esa zona lo que determina un insuficiente confinamiento del hormigón del nudo [7][8][9], y la rotación relativa entre viga y columna [5].

- SHARIATMADAR, H, ZAMANI, E., “Experimental investigation of precast concrete beam to column connections subjected to reversed cyclic loads”. En: 6th International Conference on Seismology and Earthquake Engineering. Teheran, 2011.
- IM, H, PARK H, EOM, T. “Cyclic loading test for reinforced-concrete-emulated beam-column connection of precast concrete moment frame”. ACI Structural journal, technical paper. 2013, no.110-S12, p 115-125.
- PAMPANIN, S, CALVI, G. M., MORTTI, M., “Seismic behaviour or RC beam column joints designed for gravity loads”. En: 12th European Conference on Earthquake Engineering. Londres, 2002, paper reference 726.
- PROTA, A., NANNI, A., MANFREDI, G., et al., “Selective upgrade of beam column joints with composites”. En: Proceedings of the international conference on FRP composites in civil engineering. Hong Kong. 2001

2. La fricción debida a la técnica del preesfuerzo, fundamentalmente en zonas de alto riesgo sísmico. Ensayos realizados a especímenes de uniones viga-columna postesadas [2][3] con el objetivo de compararlas con uniones monolíticas en cuanto a resistencia, ductilidad y capacidad de disipación de energía indicaron que esta forma de vínculo presenta una rigidez y ductilidad similar a las uniones monolíticas además de que proporcionan una reducción en la cantidad y abertura de fisuras en comparación con otras soluciones prefabricadas. No obstante, ambas investigaciones concuerdan en que la capacidad de disipación de energía que desarrollan es menor que la que muestran las soluciones monolíticas.

En Cuba, esta solución es adoptada por el sistema IMS del Instituto de Materiales de Serbia, empleado en edificaciones para viviendas y obras sociales de hasta 18 niveles, y por el Sistema de Soporte Estructural Prefabricado Postesado (SS-PP), sistema cubano de reciente creación. [10]

El sistema IMS se basa en una red modular formada por columnas y losas casetonadas unidas a las columnas mediante la fricción que genera la fuerza de compresión que provoca el postesado, de ahí que los pórticos estarán compuestos por las columnas y los nervios perimetrales de las losas que, una vez realizado el postesado de los elementos y hormigonada la junta entre ellos, forman las vigas. (Figura 2)

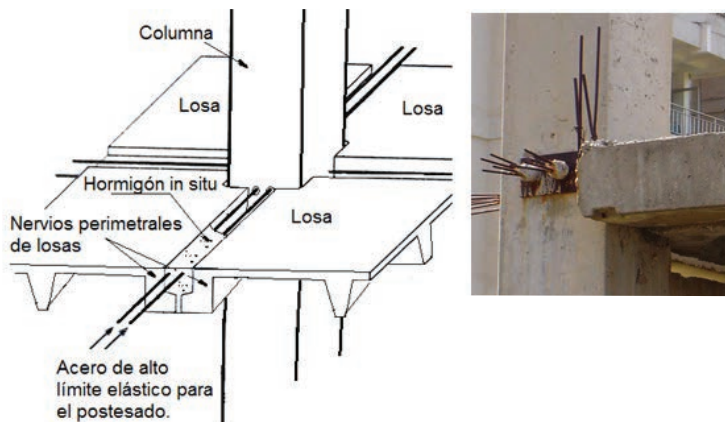


Figura 2. Unión postesada, Sistema IMS. Fuente: Elaboración propia.

Entre las causas de fallos probables para el caso de esta solución se encuentra la elongación plástica de las barras preesforzadas, o sea, la pérdida del tensado lo que provoca una reducción importante de la compresión que es la que permite desarrollar el efecto de fricción. Lo anterior provoca la separación de viga y columna y por consiguiente la rotación relativa entre estos elementos [2][5]. Según Cheok et al [2], la abertura de la separación entre la viga y columna se incrementa a medida que el refuerzo para el postesado se encuentre más cercano

al centroide de la viga. La reducción o pérdida del preesfuerzo se asocia a las elevadas deformaciones provocadas por las cargas horizontales de carácter cíclico, como es la sísmica y no a las pérdidas de tensión propias del proceso de preesfuerzo pues estas últimas tienen que haber sido consideradas previamente en los cálculos.

3. La fricción entre los elementos que se vinculan debido al efecto cuña [11][12]. características de las uniones en el Sistema de Múltiple Aplicación en Cuba (SMAC) y del sistema Losa izada (Lift slab).

En el sistema SMAC (Figura 4) la unión se caracteriza por la intersección espacial de la viga y la columna y el hormigonado *in situ* del espacio en forma de anillo horizontal entre ambos componentes.



Figura 3: Edificio de viviendas con sistema IMS. Fuente: Autores.

10. NAVARRO, N. "Sistema de Soporte Estructural Prefabricado Postesado para Edificios, SS-PP. Prueba de Carga". Informe inédito. Centro Técnico de Vivienda y Urbanismo, CTVU, 2009.
11. TOSCA, J., RUIZ, L. "Instrucciones para la utilización del Sistema Constructivo SMAC". La Habana, 1989.
12. GUERRA, F., MARTÍNEZ, J., RUIZ, L., "Aplicación de la unión tipo cuña entre columna y viga en un sistema prefabricado de módulo máximo de 6,0 x 6,0 m". En: 16 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, La Habana, 2012.

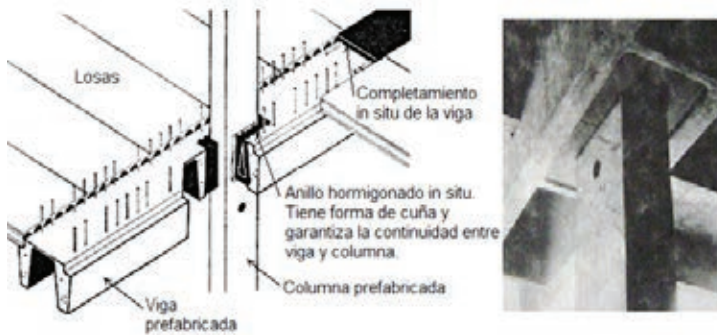


Figura 4. Unión viga-columna del SMAC. Fricción mediante cuña de hormigón. Fuente: Elaboración propia basada en imagen de [1].

Para lograrlo es necesario que durante el montaje, la viga sea izada hasta el extremo superior de la columna donde se ensarta a través de los huecos dejados en la propia viga para este efecto, haciéndola descender hasta su posición definitiva apoyándola sobre ménsulas metálicas para el soporte temporal, que son retiradas una vez hormigonada la unión y alcanzada la resistencia especificada en el proyecto.

Las cuñas se crean por los planos inclinados de las caras interiores de los nervios longitudinales de la viga y por los deprimidos en las dos caras mayores de la columna. Tanto las caras interiores de los nervios de las vigas como la de los deprimidos de las columnas presentan un ranurado vertical que incide decisivamente en la transmisión de los esfuerzos inducidos por los momentos flectores y en el incremento de la fuerza de fricción que se genera en las superficies mencionadas de ambos elementos. Este sistema fue creado para edificaciones sociales de hasta 18 niveles, en el que una cuña hormigonada *in situ* garantiza la continuidad estructural entre viga y columna.

Ensayos realizados [13] en la década del 80 a especímenes a escala natural con el objetivo de estudiar el comportamiento de dicha unión bajo la acción de cargas simétricas y asimétricas y cuantificar su capacidad de carga vertical en el primer tipo de ensayo y de carga vertical y momento en el segundo permitieron demostrar que el comportamiento de la unión viga-columna del sistema SMAC es satisfactorio, pues la unión transmite con seguridad cargas del orden de 2500 kN a través de las vigas trabajando en flexión y el momento flector máximo desequilibrante en el nudo de 900 kN-m son de valor muy superior a las que solicitan al nudo. Pudo comprobarse, además, que no se producen desplazamientos relativos entre ambos elementos, ni deterioro en el hormigón de relleno del mismo. Lo anterior permitió constatar que la cuña, como solución a la unión viga-columna garantiza su continuidad estructural y proporciona numerosas ventajas constructivas, entre las que se citan, no requerir

acero estructural, ménsulas ni soldadura, permitir el montaje completo de hasta dos niveles y la reducción del costo de las cimentaciones, entre otras, lo que inspira a su empleo en nuevas aplicaciones constructivas, como es el caso de viviendas, actualmente en estudio.

Los resultados obtenidos en los ensayos fueron confirmados en las edificaciones construidas con esta forma de vínculo entre viga y columna y que tienen algunas más de 20 años de explotación. Tal es el caso de la Universidad Agraria de la Habana (1978), el Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología (1986) (Figura 5), el Centro de Química Farmacéutica (1990) y el hotel Montehabana (1995). Las ventajas aportadas por la unión viga-columna al sistema prefabricado SMAC así como la novedad que constituyó la creación de la misma permitieron que dicho sistema fuera patentado en Cuba, Reino Unido, Alemania, Checoslovaquia y la antigua URSS.



Figura 5: Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología. Edificación con sistema SMAC en el que las uniones viga-columna se basan en el efecto cuña. Fuente: Internet.

13. PAREDES, R., RUIZ, L., TOSCA, J. "Estudio de la junta viga-columna del sistema SMAC". Informe inédito. Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción, no. 017-06-32, La Habana, 1988.

En el sistema Losa izada (*Lift-slab*), aplicado en Cuba en la década del 60, cuñas de acero son las encargadas de transmitir las cargas axiales y los momentos flectores. (Figura 6) Este es un sistema de prefabricación a pie de obra que consiste en construir sobre el terreno, uno sobre otro, todos los entramados de piso. Luego de erigidas las columnas, se colocan en su extremo superior gatos hidráulicos y se hace subir cada entramado hasta su nivel definitivo, apoyándose temporalmente en ménsulas metálicas colocadas en las columnas para este fin.

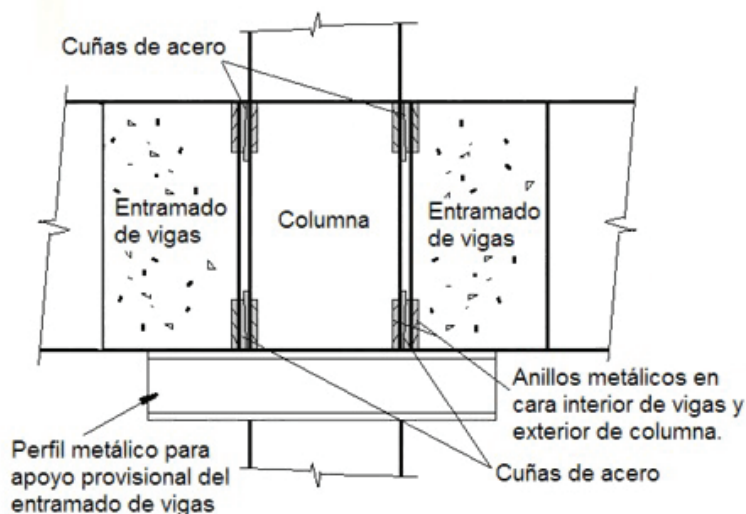


Figura 6. Unión vigas-columna sistema Losa izada. Fricción mediante cuñas de acero. Fuente: Elaboración propia.

Las cuñas son planchas metálicas de aproximadamente 80 x 160 mm (3 x 6 pulgadas) ubicadas por pares en el espacio que queda entre el reticulado de vigas y la columna. Las cuñas juntas alcanzan un espesor aproximado de 25 mm (1 pulgada) que es justo el ancho del espacio que existe entre la columna y el reticulado. Tanto la columna como las caras interiores del reticulado coincidentes con las cuñas presentan anillos metálicos de tal manera que la fricción entre los elementos se genere con el mismo material. Esta forma de vínculo permite la transmisión de los momentos flectores a partir de los pares de fuerzas que se crean en las zonas de las cuñas debido a la fricción y aporta la rigidez suficiente a los pórticos para enfrentar las cargas horizontales de viento. Este sistema ha sido empleado en Cuba en edificaciones de hasta nueve niveles como es el caso de la Facultad de Ingeniería Civil del Instituto Superior Politécnico "José Antonio Echeverría." (Figura 7)



Figura 7: Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría". Sistema Losa-izada con uniones viga-columna por fricción mediante cuñas metálicas. Fuente: Elaboración propia.

Para el caso de las uniones por fricción basadas en el efecto cuña el fallo puede ser provocado por la ocurrencia de desplazamientos relativos entre viga y columna debido a la pérdida del efecto cuña, o sea, que las tensiones tangenciales que se generan por las solicitaciones actuantes superen la fricción entre los planos inclinados que forman la cuña.

La solución que se da a la unión viga-columna para lograr la continuidad, cualquiera sea esta, estará catalogada en uno de los dos grandes grupos adoptados internacionalmente: unión seca o unión húmeda.

Las uniones secas [14][15] son aquellas que se logran mediante el empleo de soldadura o pernos asociados a insertos metálicos situados en los elementos a unir por lo que el mortero que interviene es solo de protección [1].

Estas conexiones son muy utilizadas debido a que son rápidas de ejecutar y comienzan a tomar cargas inmediatamente, por lo que aceleran el proceso constructivo. Se emplean para soportar solicitaciones de moderado valor y entre sus desventajas pueden citarse que requieren de mucha precisión en el montaje de los elementos en obra y personal calificado para su realización, aparte de que su comportamiento presenta una ductilidad muy limitada.

Una variante de unión viga-columna continua prefabricada seca es desarrollada por Metelli [14] mostrada en la figura 8, la cual ha sido sometida a ensayos con cargas cíclicas para simular la carga sísmica y determinar el desempeño de la unión en términos de resistencia, ductilidad y capacidad de disipación de energía. Los resultados arrojaron una adecuada respuesta frente a la acción sísmica siempre que los valores de desplazamientos relativos de los pisos no superen el 2 %. Para valores superiores, asociados a sismos de gran intensidad, la unión muestra una limitada capacidad de disipación de energía debido a su colapso frágil por la zona de unión viga-columna. Lo anterior confirma lo poco factible del empleo de soluciones secas en la concepción de uniones viga-columna para zonas de alto riesgo sísmico.

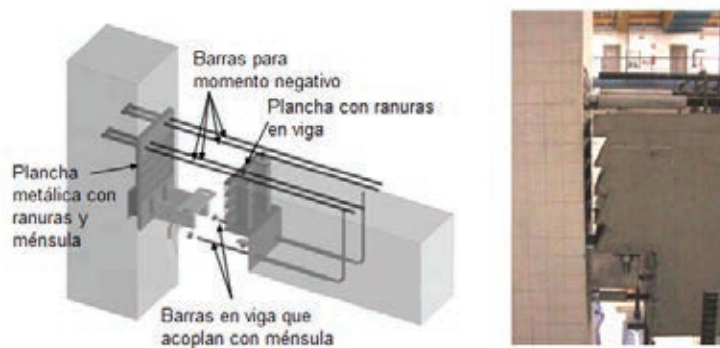


Figura 8. Unión seca propuesta por Metelli [14]. Posterior al ensamblaje de los dispositivos mostrados se emplea un mortero que cubre toda la unión. Fuente: Metelli [14].

En las uniones húmedas [5][6][7][11] el hormigón interviene de forma activa en la capacidad resistente de la unión (Figura 9). Su uso evita la discontinuidad en el trabajo estructural de los elementos conservando el monolitismo de las estructuras *in situ*. Se caracterizan por asimilar grandes cargas y, en general, no requieren de gran precisión en el montaje de los elementos, comparadas con las uniones secas. No obstante, tienen limitaciones como el no poder trabajar estructuralmente hasta que el hormigón alcance una resistencia mínima para su funcionamiento por lo que retardan el proceso de montaje en obra.

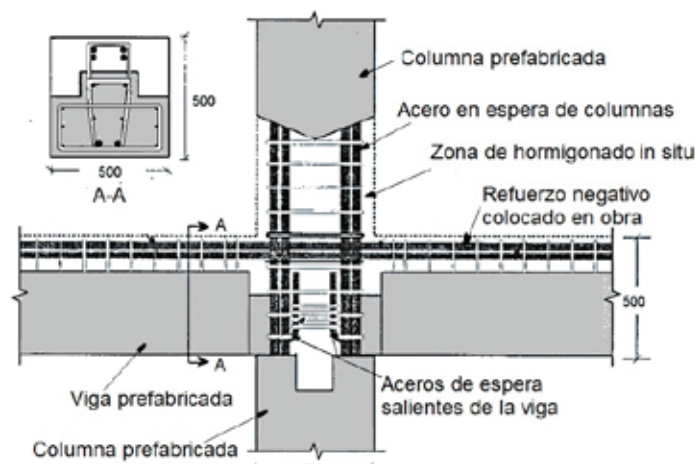


Figura 9. Unión húmeda propuesta por [5].

Para lograr una unión húmeda se emplean cualquiera de los métodos de conexión del acero de refuerzo especificados por el ACI-318. Para el caso en el que la continuidad esté dada por la presencia de barras longitudinales se plantea que dicho refuerzo, tanto el superior como el inferior de la viga, debe prolongarse hasta la cara más distante del núcleo confinado de la columna y anclarse según los requisitos establecidos ya sea por tracción o compresión.

Esto se recomienda para evitar el deslizamiento de las barras de refuerzo ante la posibilidad de inversión de momento flector debido a la acción de cargas sísmicas. Este deslizamiento genera altos esfuerzos de adherencia que requieren ser controlados, recomendándose en el ACI 318-11 que la dimensión de la columna paralela al refuerzo de la viga no debe ser menor que 20 veces el mayor diámetro del refuerzo de la viga para el caso de hormigones normales.

14. METELLI, G., RIVA, P., "Behaviour of a beam to column "dry" joint for precast concrete elements". En: 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing. 2008.
15. VIDJEAPRIYA, R., JAYA, K. P., "Behaviour of precast beam column tie rod connection under cyclic load". En: ISET Golden Jubilee Symposium, Indian Society of Earthquake Technology. 2012, paper No. D016.

En este código se establece además, que en las conexiones entre elementos principales de pórticos tales como vigas y columnas, los empalmes del refuerzo que continúan y el anclaje del refuerzo que termina en tales conexiones deben confinarse debidamente independientemente del valor de la fuerza cortante calculada en el nudo. El confinamiento en las conexiones debe consistir en hormigón exterior, o en estribos cerrados o espirales interiores. El ACI 318-11 comenta que cuando existen vigas ubicadas en los cuatro lados de la junta y el ancho de las mismas es al menos $\frac{3}{4}$ del ancho de la columna, la cantidad de refuerzo transversal en la zona de la unión puede reducirse a la mitad y aumentarse el espaciamiento hasta 150 mm. Esto es debido al confinamiento que confiere al núcleo de la unión la presencia de las vigas en su perímetro.

Independientemente del tipo de unión viga-columna prefabricada que se conciba, el buen diseño de estas no solo implica que debe ser capaz de soportar las combinaciones de las cargas de diseño, sino que es necesario que cumplan una serie de aspectos que permitan evaluarlas y comprobar su aceptación. Entre estos se encuentran que sean de fácil ejecución, es decir, que los elementos sean de rápido y fácil montaje; no deben permitir el desplazamiento o la rotación relativa de las piezas que une [5]; deben requerir poco material y transmitir rápidamente los esfuerzos previstos con el correspondiente grado de seguridad; han de tener la capacidad de cubrir las tolerancias dimensionales típicas de la construcción prefabricada así como brindar una adecuada facilidad de inspección durante su ejecución y futuro mantenimiento o reparación.

Estudios experimentales realizados [2][5] han demostrado que a medida que el comportamiento de la solución dada a la unión prefabricada se aleje de la deseada como monolítica, el daño producido por la acción de cargas horizontales debidas al viento o el sismo es mayor, generando entre otros aspectos, agrietamientos prematuros y reducción de la capacidad resistente a esfuerzos cortantes.

Influencia del empleo de uniones viga-columna continuas en los pórticos resistentes a momentos.

La unión viga-columna tiene gran influencia en el comportamiento de una estructura debido a que es una de las zonas más afectadas por la acción de las cargas tanto verticales como horizontales. Estudios realizados durante los últimos 30 años las han reconocido como puntos vulnerables en los pórticos de hormigón armado diseñados para resistir la acción de un sismo severo. [16]

La escasez de investigaciones y regulaciones de diseño en el mundo para la concepción de uniones prefabricadas entre los años 50 y 90 del pasado siglo trajo consigo que

a los efectos del análisis, gran parte de las juntas viga-columna fueran consideradas como articuladas. Por tanto, en muchas edificaciones ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico, los pórticos fueron diseñados para soportar exclusivamente cargas gravitatorias.

Estudios recientes [8][9] evalúan la capacidad de disipación de energía y las causas potenciales del fallo de estas edificaciones frente a la acción de cargas sísmicas. Las investigaciones se basaron en la reproducción de uniones viga-columna con las deficiencias estructurales típicas de las décadas del 50 al 70 en Italia y que fueron empleadas en edificaciones que sufrieron graves daños por acción sísmica. Las deficiencias estructurales eran fundamentalmente, el empleo de barras lisas, insuficiente anclaje de las barras principales, así como carencia de refuerzo transversal en la zona de la unión.

Los resultados de los ensayos permitieron constatar que la causa fundamental del fallo de las edificaciones radicó en el inconsecuente diseño estructural de las uniones viga-columna. En los pórticos que forman la estructura de estas edificaciones las columnas se caracterizan por tener secciones transversales mínimas y una disposición y cantidad insuficiente de refuerzo longitudinal para resistir adecuadamente los esfuerzos de flexión y cortante generados por el sismo. Son además, pórticos concebidos bajo el principio de "columna débil-viga fuerte" lo que determina que durante la acción de cargas sísmicas se generen articulaciones plásticas en la columna y se reduzca la rigidez de dichos pórticos. Por tanto, resulta errónea la concepción sobre la disipación de energía del conjunto a causa del fallo frágil de la estructura.

Las conexiones que forman parte de pórticos especiales resistentes a momento deben responder a la combinación de cargas horizontales y verticales actuantes de manera que se satisfaga el objetivo de que los pórticos a los que pertenecen cumplan con el principio de "columna fuerte-viga débil" que establece que el fallo de las vigas debe suceder antes que el de las columnas. [17]

Lo anterior se explica a partir de la jerarquía de fallo que rige el diseño estructural de los elementos que conforman una edificación además de las características que tiene ese fallo según se trate de una columna o una

16. UMA, S. R., MEHER, A. "Seismic behaviour of beam column joints in reinforced concrete moment resisting frames". En: IITK-GSDMA Project on building codes, Final Report: A- Earthquake codes, document no. IITK-GSDMA-EQ31-V1.0.
17. MOEHLE, J., HOOPER, J. D., LUBKE, C. D. "Seismic design of reinforced concrete special moment frames: a guide for practicing engineers". En: NEHRP Seismic Design Technical Brief No. 1. National Institute of Standards and Technology. 2008

viga. En el caso de los pórticos, las columnas en un nivel dado soportan las cargas de toda la edificación por encima de ellas mientras que las vigas solo soportan las cargas del piso del que forman parte, de ahí que el fallo de una columna será mucho más grave que el de una viga. Por otro lado, el fallo de una viga es, usualmente demorado por tratarse de un elemento en flexión, con señales de aviso debido a las deformaciones crecientes, mientras que el de la columna suele ser súbito por tratarse de elementos con predominio de la compresión. Ello explica la exigencia por parte de los reglamentos que los pórticos sean concebidos en el principio de "columna fuerte-viga débil". Esto no quiere decir que las vigas, para lograr la adecuada disipación de energía durante la acción de un sismo, tenga que "colapsar," pues uno de los principios que rigen la concepción de las normas sismorresistentes de cualquier país es que ante un sismo severo la estructura no colapse. El concepto de "viga débil" se refiere al hecho de que sea justamente en este elemento donde se produzcan articulaciones plásticas que sí garantizan la ductilidad necesaria del conjunto.

Las articulaciones plásticas se forman cuando en una sección del elemento el acero ubicado en la zona de tracción fluye y no puede aumentar su capacidad de carga existiendo un valor de momento flector constante o casi constante en la misma. Si bien el acero no se puede esforzar por encima del valor de fluencia, tampoco está "roto", por lo que el valor de momento resistente de la sección será aquel que provocó la entrada en fluencia del acero [18].

La repercusión de la formación de articulaciones plásticas en las vigas dependerá de las condiciones de borde del elemento, de ahí la importancia de la solución que se dé a la unión viga-columna. Si estas uniones son articuladas la viga es isostática y tendrá la mínima cantidad de restricciones para soportar cargas exteriores por lo que la formación de la primera articulación plástica será la que generará el colapso del elemento al convertirse automáticamente en un mecanismo cinemático por concurrir tres articulaciones en línea recta.

En cambio, si las uniones viga-columnas son continuas, se estaría en presencia de elementos hiperestáticos en los que la aparición de la primera articulación plástica no implica el fallo o colapso del elemento sino un cambio en la forma de sustentación del mismo. En estructuras hiperestáticas podrán formarse tantas articulaciones plásticas como grado de hiperestaticidad tenga el conjunto. Por tanto, la formación de articulaciones plásticas en elementos hiperestáticos está asociada a una redistribución de tensiones que garantizan, frente a la acción de cargas sísmicas, la disipación de energía y la reducción de afectaciones en los elementos

estructurales. Como resulta evidente, también aumenta la seguridad de la estructura.

Atendiendo a lo anterior, el ACI-318 establece dos formas de concepción de las uniones viga-columna desde el punto de vista de la forma de fallo: unión rígida y unión dúctil. Las llamadas "uniones fuertes o rígidas" son aquellas en las que su diseño y detallado se realiza de tal forma que las articulaciones plásticas se forman alejadas de la cara de la columna, por lo que la fluencia por flexión se alcanza fuera de las conexiones asegurando una disipación de energía y ductilidad más estable. [5]

Para el caso del empleo de "uniones dúctiles", la fluencia por flexión se alcanza en la región de la unión mientras que los elementos estructurales se mantienen con poco daño. Para lograrlas, las vigas y columnas que se unen deben diseñarse con capacidades resistentes mucho mayores que la propia unión. Issa [19] demuestra la posibilidad del empleo de esta forma de vínculo para soportar grandes deformaciones inelásticas debido a la acción del sismo, aunque alerta sobre el cuidado que debe tenerse en la distribución de los pórticos resistentes a cargas laterales pues los elevados esfuerzos debidos a la acción sísmica unido al principio que rige la concepción de este tipo de unión, trae consigo grandes dimensiones de vigas y columnas así como cantidades excesivas de refuerzo, lo que dificulta su colocación en los elementos. De ahí que se recomiende por el ACI-318 que las uniones viga-columna de hormigón armado, ya sean prefabricadas o in situ, que formarán parte de estructuras ubicadas en zonas de alto riesgo sísmico e incluso de vientos, sean concebidas como continuas y respondiendo al concepto de "uniones fuertes o rígidas".

A la inconveniencia del comportamiento estructural de pórticos con uniones viga-columna articuladas sometidos a cargas horizontales, se suma el aspecto negativo relativo a la economía. En estos casos, el diseño de los cimientos, las columnas y las propias vigas no se benefician de la continuidad estructural y los elementos deben diseñarse bajo el principio de la isostaticidad con el consiguiente incremento en el consumo de los materiales. Cuando la unión viga-columna es continua, la redistribución natural de momentos hace

18. RUIZ, L. "Estructuras de hormigón y mampostería". Libro digital, La Habana, 2010.

19. ISSA, E. "Evaluation of ductile beam-column connections for use in seismic resistant precast frames". Tesis Doctoral, Universidad de Texas, Austin, 1995.

que disminuyan las solicitaciones en la base de la columna reduciendo también el momento flector en la cimentación y por tanto sus dimensiones (Figura 10).

En los sistemas prefabricados y en aras de obtener soluciones constructivas más sencillas, al estar articuladas las vigas, la columna trabaja en voladizo frente a cargas horizontales, lo que prácticamente hace obligatoria la inclusión de sistemas verticales más rígidos en algunos de los ejes del edificio. Estas soluciones de vigas articuladas a las columnas son particularmente indeseables en zonas de riesgo sísmico moderado y alto por la escasa capacidad de disipación de energía del conjunto.

En las estructuras prefabricadas, las ventajas del monolitismo que ofrece el hormigón in situ que permite la obtención de uniones continuas "al natural" no pueden aprovecharse totalmente, convirtiéndose en una dificultad la creación de uniones continuas en este tipo de estructuras. Las soluciones descritas en el epígrafe anterior, empleadas en obras construidas han demostrado lo adecuado de su concepción.

El estudio del comportamiento de uniones viga-columna y su influencia en la respuesta estructural de los pórticos está regido por la realización de ensayos

al estudio del estado tensional y deformacional del medio continuo y su aplicación ha facilitado la creación de modelos computacionales bidimensionales y tridimensionales para el estudio del comportamiento de uniones viga-columna y su influencia en la respuesta de pórticos frente a cargas laterales. Existen numerosos trabajos de investigación sobre el tema en el mundo.

En Cuba, como parte de un proyecto de investigación de la Facultad de Ingeniería Civil de la Cujae, se desarrollan actualmente modelos tridimensionales de uniones viga-columna continuas prefabricadas con el empleo de programas computacionales basados en el Método de los Elementos Finitos. Las investigaciones están dirigidas específicamente a uniones basadas en el efecto cuña y a uniones postesadas. Estos modelos, calibrados a partir de resultados experimentales, permitirán ampliar el estudio del comportamiento de estas formas de vínculo para su futuro empleo en edificaciones asociadas a diversos programas arquitectónicos.

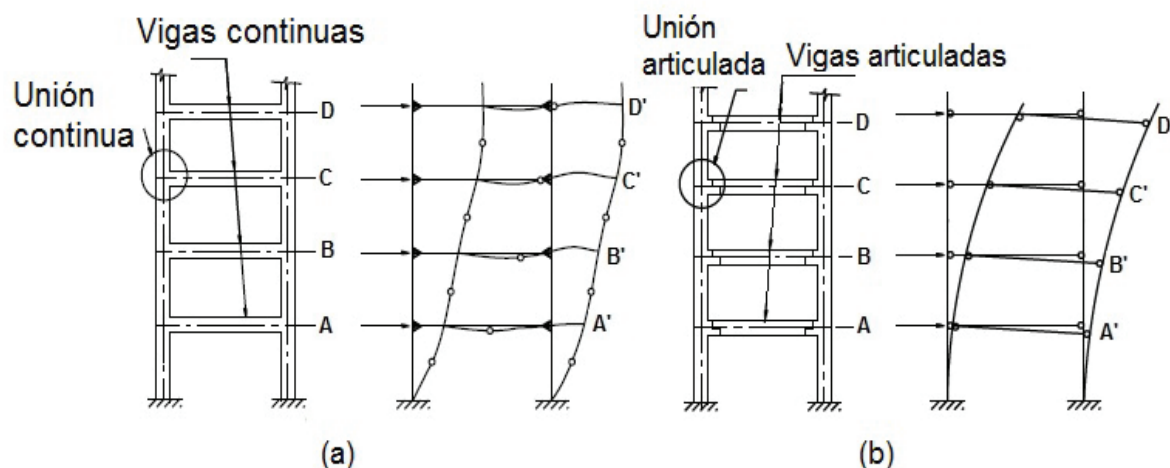


Figura 10. Pórticos con vigas continuas (a) y articuladas (b) sometidos a cargas horizontales. Modelos analíticos y curvas elásticas respectivas. Tomado de [18]

que expongan la respuesta frente a diversas acciones así como las causas de fallo. Estos ensayos, ya sean a escala real o reducida, llevan implícitos altos costos lo que frena, en muchas ocasiones, el desarrollo de los mismos a nivel mundial.

El progreso de las computadoras digitales ha permitido la profundización del estudio del medio continuo a partir de la discretización del problema matemático. El Método de los Elementos Finitos ha abierto nuevas posibilidades

Conclusiones

El empleo de pórticos con uniones viga-columna continuas constituye una ventaja tanto estructural como desde el punto de vista de consumo de materiales y representa además, seguridad adicional a la estructura frente a la acción de cargas horizontales.

A medida que el comportamiento de la unión viga-columna prefabricada se aleje de la deseada como monolítica, el daño a los pórticos producido por la acción de cargas horizontales será mayor. Una adecuada realización de la unión prefabricada puede llegar a brindar un comportamiento tan eficiente frente a cargas horizontales como las realizadas *in situ*.

Entre las soluciones de uniones viga-columna continuas prefabricadas revisadas, resulta interesante destacar aquellas logradas por fricción, ya sea mediante el postesado o aprovechando el efecto cuña, pues son fácilmente ejecutables y garantizan la continuidad y la ductilidad adecuada frente a la acción de cargas horizontales. Su utilización en países como Cuba se justifica mucho más debido al elevado valor de las cargas debidas al viento que debe emplearse en el diseño.

Se recomienda considerar en la concepción de uniones viga-columna que los elementos prefabricados, para lograr la unión entre ellos, no tengan barras en espera o anclajes metálicos de ningún tipo, por las favorables implicaciones que tiene para la economía especialmente por la simplicidad de los moldes.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Ing. Ricardo Fernández Álvarez y al Dr. Ing. Leonardo Ruiz Alejo por sus atinados comentarios.



Janet Otmara Martínez Cid.

Profesora auxiliar, MSc. Ing. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría". E-mail: jcid@civil.cujae.edu.cu



Julia Rosa Álvarez López.

Profesora auxiliar MSc. Ing. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría". E-mail: juliaral@civil.cujae.edu.cu



Nelson Fundora Sautié.

Instructor, Ing. Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría". E-mail: nelsonfs@tesla.cujae.edu.cu