**12do SIMPOSIO INTERNACIONAL DE ESTRUCTURAS, GEOTECNIA Y MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

# **Análisis tensional de unión viga-columna con efecto cuña**

# *Tensional analysis of beam to column joint with wedge effect*

**Dra. Ing. Janet Otmara Martínez Cid1, MSc. Ing. Nelson Fundora Sautié2, Ing. José Antonio Mirabal Berástegui3, Dr. Ing. Carlos Alexander Recarey Morfa4, Dr. Ing. Leonardo Ruiz Alejo5**

1-Janet Otmara Martínez Cid. Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría” Cujae, Cuba. E-mail: jcid@civil.cujae.edu.cu

2- Nelson Fundora Sautié. Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría” Cujae, Cuba. E-mail: nelsonfs@civil.cujae.edu.cu

3-José Antonio Mirabal Berástegui, Empresa de proyectos EPROB, Cuba.

4-Carlos Alexander Recarey Morfa. Universidad Central “Marta Abreu”, Cuba. E-mail: recarey@uclv.edu.cu

5-Leonardo Ruiz Alejo. Universidad Tecnológica de La Habana “José A. Echeverría” Cujae, Cuba.

**Resumen:** La unión viga-columna del Sistema de Múltiple Aplicación en Cuba (SMAC) basa su desempeño en el efecto cuña del hormigón entre los planos inclinados de los elementos que vincula, capaz de garantizar la trasmisión de las cargas verticales y los momentos flectores. Las ventajas estructurales de la misma conllevaron a extender su aplicación al programa de viviendas lo que hace necesario profundizar en el comportamiento estructural. Estudios preliminares a partir de la modificación de los parámetros geométrico y físico-mecánico basados en la obtención de desplazamientos demuestran el excelente comportamiento de la unión.

El objetivo de la presente investigación es determinar, a partir del estado tensional, los por cientos de carga vertical que se trasmiten por cada zona de la unión. Se emplean los modelos computacionales utilizados en investigación previa con el empleo del programa Abaqus. Se reportan los por cientos de carga que se trasmiten por fricción y aplastamiento que rigen el trabajo estructural de la unión.

***Abstract:*** *The structural behavior of beam to column joint of the prefabricated Multipurpose Construction System for Cuba (SMAC System) is based on the wedge effect of concrete between the inclined planes in both element to be connected and the transmission of vertical loads and bending moments is guaranteed. The structural advantage of the joint led to extend its application to the housing program so is important to study the structural behavior. Preliminary investigation based on the modification of geometric, physical and mechanical parameters demonstrated an excellent behavior.*

*The objective of the present investigation is to determine, from the stress state, the per cent of vertical load that is transmitted by each zone of the union by means of the statistical design of two experiments. Computational models in Abaqus program, of previous research are used. The loads that are transmitted by friction and bearing effect are reported as part of the structural work of the union.*

**Palabras Clave:** Efecto cuña; SMAC; Abaqus; Unión viga-columna prefabricada.

***Keywords:*** *Wedge effect; SMAC; Abaqus; Precast beam-column joint.*

**1. Introducción**

El análisis del comportamiento de uniones viga-columna continuas prefabricadas con el empleo de modelos matemáticos computacionales calibrados con los resultados de ensayos experimentales ha sido el objetivo del estudio de numerosas investigaciones ([Danesh et al., 2008](#_ENREF_22); [Luk,Kuang, 2012](#_ENREF_58); [Deaton, 2013](#_ENREF_23); [Bigdar,Bhattacharya, 2014](#_ENREF_9)). A pesar de la complejidad estructural que caracteriza la concepción de uniones viga-columna continuas prefabricadas, se han ideado numerosas soluciones de esta forma de vínculo que han demostrado un excelente desempeño ([Cheok,Lew, 1993](#_ENREF_18);[Tiong et al., 2011](#_ENREF_103); [Breccolotti et al., 2016](#_ENREF_13)).

En Cuba fue concebida una novedosa unión viga-columna que responde al Sistema de Múltiple Aplicación en Cuba (SMAC), creado por el arquitecto Juan Tosca Sotolongo y el ingeniero Leonardo Ruiz Alejo. Es un sistema prefabricado concebido para ser empleado en la construcción de edificios sociales de hasta 18 niveles y cargas de hasta 15 kN/m2 (Ruiz & Martínez, 2015).

La unión viga-columna del sistema fue concebida empleando el “efecto cuña” garantizando el monolitismo sin la necesidad de emplear acero pasante ni soldadura. Dicha solución aportó numerosas ventajas constructivas, organizacionales y estructurales al sistema y su eficiencia quedó demostrada en los resultados de los ensayos (Paredes, Ruiz, & Tosca, 1988) a escala real que le fueron realizados así como por las edificaciones construidas con el sistema las cuales ya superan décadas de su puesta en explotación manteniendo un excelente desempeño.

Debido a lo anterior es que se analiza la aplicación de esta forma de vínculo en edificios destinados a viviendas, lo que implica una adaptación a luces, intercolumnios y cargas menores que los que se emplean en edificios sociales ([Fundora, 2015](#_ENREF_27); [Fundora et al., 2016](#_ENREF_28); [Ruiz et al., 2016](#_ENREF_85)). Lo anterior requiere de la realización de un análisis del comportamiento de la unión. Estudios recientes (Martínez, 2016) del comportamiento de la unión basados en la obtención de desplazamientos demostraron el excelente desempeño de la misma.

El análisis se realizó mediante un modelo calibrado a partir de ensayos realizados a escala real de la unión bajo la acción de cargas simétricas en la viga (Martínez, 2016). Se consideró, una vez calibrado el modelo, la modificación de los parámetros geométricos y físico-mecánicos asociados a su concepción. Para la realización de este análisis se empleó la modelación en el programa Abaqus en su versión 6.14, utilizando como herramienta de cálculo el Método de los Elementos Finitos (MEF) y un modelo de daño plástico para el comportamiento del hormigón.

En el presente trabajo se realizará el análisis tensional de la unión tomando como base los modelos presentados en Martínez (2016).

**2. Metodología**

La unión viga-columna del SMAC 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. 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. (Figura 1).

a)

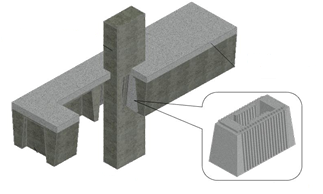


Figura 1. Unión viga-columna. a) Montaje de los elementos, b) Unión terminada, detalle del anillo con forma de cuña que garantiza el vínculo continuo. Elaboración propia.

b)

Tanto la cara interior de la viga como la columna presentan superficies inclinadas y ranuradas que originan la forma de la cuña. El llamado “efecto cuña” es el que se deriva de la fricción generada entre las dos superficies mencionadas al iniciarse el desplazamiento relativo entre ambas. La carga vertical debida a la viga es resistida no solo por el efecto cuña originado por la fricción sino también por el apoyo de la cuña en la cajuela de la columna lo que provoca la aparición de grandes solicitaciones de compresión que podrían conllevar al aplastamiento del hormigón en esta zona (figura 2).

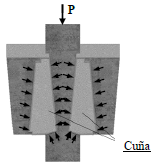


Figura 2. Forma de trabajo de la cuña. (Martínez, 2017)

La forma en la que se concibió la unión aparece un efecto de confinamiento en el hormigón de la cuña proporcionado por las paredes de la cajuela de la columna, de modo que al ensancharse esta como resultado de la compresión generada por la carga axial comprime a la cuña contra las paredes interiores de los nervios longitudinales de la viga, que poseen suficiente rigidez para impedir los desplazamientos laterales de la masa de hormigón de la cuña (Martínez, 2016).

Dicho confinamiento provoca incrementos notables en la resistencia a compresión y por tanto, una reducción de la correspondiente deformación unitaria pues queda restringida la deformación transversal de este material, generando un aumento de la capacidad resistente de la unión (Martínez & Fundora, 2014; Martínez, 2016).

Para el análisis tensional de la unión se aplica la técnica del diseño estadístico de experimentos con la modificación de los parámetros geométricos y físico-mecánicos que intervienen en el comportamiento de la unión. Se realizan dos experimentos: el primero, en el que se valoran el número de ranuras de las cajuelas y el segundo, en el que se analiza la resistencia a compresión del hormigón de la cuña y la carga axial en la columna. Ambos incluyen la presencia de los cercos. Para el primer experimento se mantiene la resistencia a compresión del hormigón de la cuña de 20 MPa.

Se determinarán, para cada caso, los valores de carga que se trasmiten tanto por fricción como por aplastamiento en la columna, siendo estas las variables dependientes. Estos diseños de experimentos tienen el objetivo de determinar si las variables independientes y la interacción entre ellas tienen una influencia en la respuesta de las variables dependientes.

Para ello se proponen las siguientes hipótesis:

H0: La variable independiente (A o B) o la interacción entre ellas (AB) no influyen en el valor de la variable dependiente X.

H1: La variable independiente (A o B) o la interacción entre ellas (AB) influyen en el valor de la variable dependiente X.

Los resultados del análisis dependen de la obtención de valor P que indica la probabilidad de rechazar H0 cuando esta es cierta para un nivel de significación del 5%. Lo anterior establece que si el valor P es menor que 0.05 se rechaza H0, de lo contrario es aceptada. Desde el punto de vista estadístico, si el valor P es menor que 0.05 se plantea que hay suficiente evidencia estadística para rechazar que la variable independiente (A, B) o la interacción entre ellas (AB) no influyen en los valores de las variables dependientes X con un 5% de nivel de significación(Miller, Freund, & Johnson, 1992; Walpole, Myers, & Myers, 2008). Para el análisis estadístico de los resultados se emplea el programa Statgraphic Plus (Statgraphics, 2007).

**Tensiones por aplastamiento**

La figura 3 muestra la zona analizada en la cajuela de la columna.

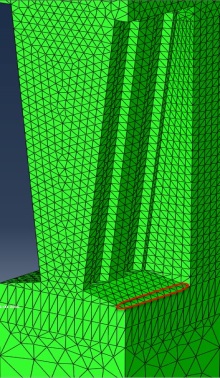
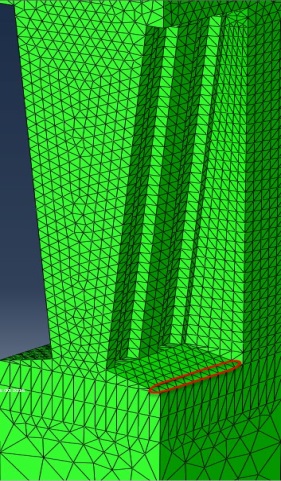


Figura 3. Zona analizada por aplastamiento. Elaboración propia.

La carga máxima admisible por aplastamiento se determina por la expresión (1) (ACI-318, 2014):

(1)

Donde:

P: Valor de compresión máximo que es capaz la base de la cajuela

: Coeficiente de minoración; para el análisis del aplastamiento adopta el valor de 0.65.

: Resistencia a compresión del hormigón.

: Área de apoyo de la cuña en la cajuela de la columna.

**Tensiones por fricción**

El análisis de las tensiones por fricción incluye demostrar la no existencia de deslizamientos en la cuña y el correcto funcionamiento del efecto cuña. La figura 4 muestra la zona analizada.

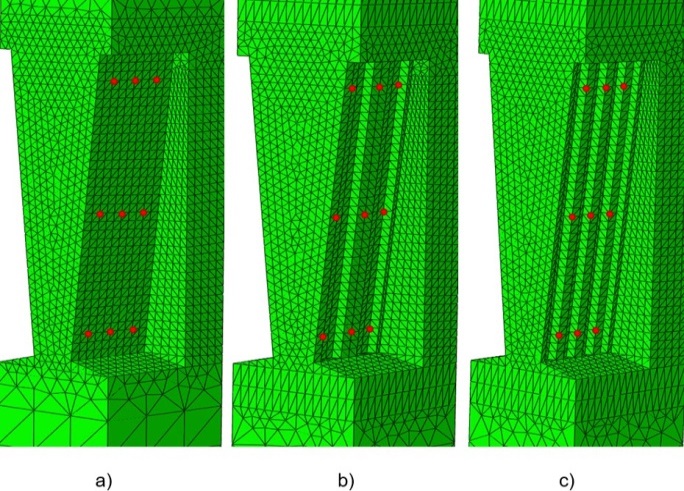


Figura 4. Zona analizada por fricción. Elaboración propia.

Para demostrar la no ocurrencia de deslizamiento se emplearon las variables de salida declaradas por el manual (ABAQUS, 2014): Cpress (tensión máxima que es capaz de soportar una superficie) y Cshear (tensión de cortante por fricción).

La componente tangencial se determina por la expresión 2 (ABAQUS, 2014):

(2)

Donde:

: Coeficiente de fricción de la superficie (0.6).

: Solicitación resistente a la acción a la fricción generada en la interfaz columna-cuña.

Si no ocurre deslizamiento entre las superficies que se analizan. (ABAQUS, 2014).

**3. Resultados y discusión**

* 1. **Experimento 1: Cantidad de ranuras**

El ranurado presente en las caras de la columna y en la viga está formado por entrantes y salientes de 20mm de espesor. Se proponen tres casos: la cantidad de ranuras originales a las que se denominarán 100%, el 50% de las ranuras existentes en la unión original y por último, sin ranuras.

**Tensiones por aplastamiento**

La figura 5 muestra los valores de cargas transmitidas producto de la compresión en la zona de apoyo de la cajuela de la columna para cada modelo analizado. La carga máxima admisible por aplastamiento determinada según la expresión (1) es de 552 kN.

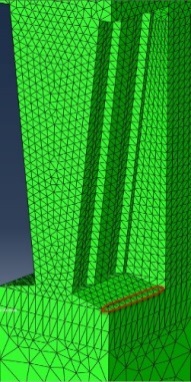
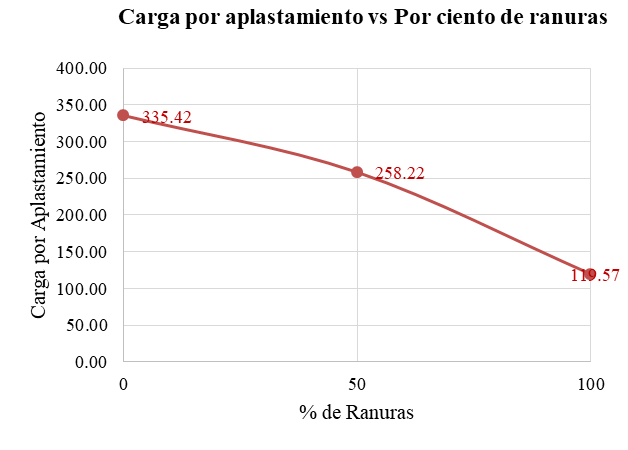


Figura 5. Carga por aplastamiento en la base de la cajuela para cada modelo analizado.

En ningún caso las cargas que se trasmiten superan la carga máxima admisible por aplastamiento. El ancho de la cajuela contribuye de manera efectiva a trasmitir la carga axial sin que suceda el fallo por aplastamiento. La presencia del 100% de ranuras representa una reducción de un 64% con relación a la no presencia de estas.

**Tensiones por fricción**

La figura 6 representa los valores de carga por fricción transmitidos en cada caso analizado. En todos los casos por lo que no hay deslizamiento entre las superficies cajuela-cuña.

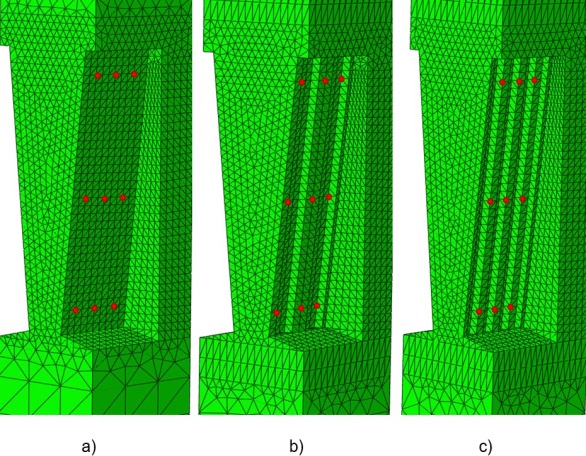


Figura 6. Valores de carga por fricción en cada modelo analizado.

El mayor valor de carga por fricción se trasmite para el 100% de ranuras de la cuña lo que demuestra la eficiencia del trabajo estructural de la unión concebida para el sistema prefabricado. El incremento del número de ranuras implica un aumento en la trasmisión de cargas por fricción de un 32%.

Existe una compensación entre los mecanismos de transmisión por fricción y apoyo cuando se comparan los resultados obtenidos en ambos análisis.

La tabla 1 resume los por cientos de carga transmitidos por la compresión en la base de la cajuela, la fricción en la interfaz columna-cuña y la combinación de ambos para los modelos analizados en el experimento 1.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Tabla 1: Por cientos de carga reportados por los modelos del experimento 1. | | | |
| **Modelos** | **Carga por aplastamiento (%)** | **Carga por fricción**  **(%)** | **Carga total transmitida en la cuña**  **(%)** |
| Sin ranuras | 6.04 | 47.35 | 53.39 |
| 50% de ranuras | 4.65 | 57.29 | 61.94 |
| 100 % de ranuras | 2.15 | 62.56 | 64.71 |

* 1. **Experimento 2: Resistencia a compresión del hormigón (f'c) de la cuña y carga axial en la columna.**

Las variaciones propuestas para la resistencia a compresión promedio del hormigón de la cuña y el valor de la carga axial en la columna dan lugar a un experimento con un diseño del tipo factorial 32, que origina 9 modelos.

Los valores de carga axial evaluados responden al análisis de una edificación de 8 niveles. Se tomaron para el análisis los valores de carga axial correspondiente a un eje intermedio de columnas para el último, medio y primer nivel.

**Tensiones por aplastamiento**

De manera análoga a lo planteado en el experimento 1, en ningún caso las cargas que se trasmiten por efecto de compresión en la base de la cajuela de la columna superan la carga máxima admisible por aplastamiento. En la figura 7 se muestran los resultados obtenidos para cada caso de estudio. Se evidencia el lógico incremento de esta solicitación al aumentarse la carga axial sobre la columna.

Figura 7. Influencia de la carga axial en la columna en la solicitación de aplastamiento generada en la zona de apoyo de la cuña.

Los resultados demuestran que para igual resistencia a compresión del hormigón de la cuña se obtiene un incremento de entre un 57% y 61% de la carga por aplastamiento con el aumento de la carga axial en la columna.

Para un mismo valor de carga axial en la columna, no es significativo el aumento de la solicitación por aplastamiento con el incremento de la resistencia a compresión del hormigón, valores que oscilan entre un 8% y 15%.

**Tensiones por fricción.**

La figura 8 expone los valores de carga por fricción para cada modelo analizado.

Figura 8. Influencia de la carga axial en la columna en la solicitación de fricción generada en la cajuela de la columna.

Atendiendo a la figura 8, para valores de carga axial por debajo de los 2500 kN no existe variación en las solicitaciones reportadas lo que demuestra que la resistencia a compresión del hormigón de la cuña solo tiene influencia para altos valores de carga axial en la columna.

Para el caso de la carga axial de 4790 kN, la mayor trasmisión por fricción se reporta para la resistencia a compresión de la cuña de 20 MPa, con una diferencia de un 26% y un 35% con respecto a los valores reportados para los 25 MPa y 30 MPa respectivamente. Lo anterior se justifica a partir de los resultados obtenidos en investigación previa (Martínez, 2016) en la que se obtienen mayores desplazamientos laterales o ensanchamiento de la cuña con el empleo de 20 MPa.

El aumento de la carga axial en la columna implica un incremento de la trasmisión de carga por fricción. El incremento de la carga axial en la columna implica un aumento del ensanchamiento de la cuña y por tanto un mayor trabajo por fricción entre las superficies de columna y cuña. (Martínez, 2016)

Las tablas 2 y 3 muestran los resultados del valor P alcanzados para cada variable independiente y la interacción entra ellas.

|  |  |
| --- | --- |
| Tabla 2: Valores P para la variable “Carga por aplastamiento” en el experimento 2. | |
| **Variables independientes** | **Valor P** |
| A: Resistencia a compresión del hormigón. | 0.0917 |
| B: Carga axial en columna. | 0.0003 |
| AB: | 0.3558 |

|  |  |
| --- | --- |
| Tabla 3: Valores P para la variable “Carga por fricción” en el experimento 2. | |
| **Variables independientes** | **Valor P** |
| A: Resistencia a compresión del hormigón. | 0.0999 |
| B: Carga axial en columna. | 0.0011 |
| AB: | 0.0702 |

Para ambas variables dependientes se obtuvo un valor P menor que 0.05 para la variable independiente “Carga axial en columna”. Lo anterior ratifica que la carga axial ejercida sobre la columna tiene influencia significativa en la solicitación de compresión generada por el apoyo de la cuña en la cajuela de la columna y en la carga por fricción transmitida por la interfaz columna-cuña.

La tabla 4 refleja los por cientos de carga transmitidos por la compresión en la base de la cajuela, la fricción en la interfaz columna-cuña y la combinación de ambos para los modelos analizados en el experimento 2.

Tabla 4: Por cientos de carga reportados por los modelos del experimento 2.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Modelos** | **Carga por aplastamiento (%)** | **Carga por fricción**  **(%)** | **Carga total transmitida en la cuña**  **(%)** |
| 20-4790 | 2.15 | 62.56 | 64.71 |
| 20-2790 | 2.28 | 54.71 | 57.00 |
| 20-770 | 3.38 | 35.07 | 38.45 |
| 25-4790 | 2.34 | 46.18 | 48.52 |
| 25-2790 | 2.70 | 54.27 | 56.97 |
| 25-770 | 3.38 | 35.07 | 38.45 |
| 30-4790 | 2.35 | 40.77 | 43.11 |
| 30-2790 | 2.81 | 53.20 | 56.01 |
| 30-770 | 3.38 | 35.04 | 38.43 |

En todos los casos analizados prima la trasmisión de la solicitación axial por efecto de fricción con respecto al efecto de aplastamiento.

**4. Conclusiones**

La investigación presentada, orientada a la determinación de los valores de carga que se trasmiten por las zonas de trabajo de la unión viga-columna del SMAC permite definir las siguientes conclusiones:

1. Considerando el 100% de ranuras con las que fue creada la unión, los por cientos de carga que se trasmiten bajo la acción de cargas simétricas en la viga están por el orden del 60% por fricción y 4% por apoyo en la base de la cajuela. El 36% restante se trasmite por los planos restantes del perímetro del anillo.
2. El predominio de la trasmisión de cargas por fricción en la unión confirma la forma de trabajo para la que fue concebida la misma.
3. El incremento de la carga axial en la columna contribuye al desarrollo del efecto cuña al propiciar el incremento de la trasmisión de carga por fricción.
4. No se requiere del empleo de una resistencia a compresión de la cuña superior a los 20 MPa.
5. No se recomienda el empleo de cuñas sin ranuras.

La investigación presentada constituye el inicio del estudio del comportamiento de uniones prefabricadas con el empleo de la modelación computacional en el país y es la continuidad de un estudio previo realizado para el análisis del “efecto cuña” en uniones viga-columna bajo la acción de cargas simétricas en la viga. Investigaciones futuras están destinadas a definir dicho comportamiento bajo la acción de cargas asimétricas de modo que se puedan establecer expresiones de diseño para un empleo generalizado de esta forma de vínculo.

**5. Referencias bibliográficas**

1. Bigdar, S. & Bhattacharya, P. (2014). *Nonlinear Finite Element Analysis of reinforced concrete exterior beam column joint subjected to monotonic loading*. Recent Trends in Civil Engineering & Technology, 4**,** 1-10, ISSN 2249-8753, https://[www.researchgate.net/publication/266735503](http://www.researchgate.net/publication/266735503).
2. Breccolotti, M., Gentile, S., Tommasini, M., Materazzi, A. & Bonfigli, M. (2016). *Beam-column joints in continuous RC frames: Comparison between cast in situ and precast solutions*. Engineering Structures, 127**,** 129-144, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.08.018>.
3. Cheok, G. & Lew, H. (1993). *Model Precast Concrete Beam-to.Column Connections Subject to Cyclic Loading*. PCI Journal, 38**,** 80-92, <http://www.pci.org/uploadedFiles/Siteroot/Publications/PCI_Journal/1993/DOI_Articles/jl-93-july-august-7.pdf>.
4. Danesh, F., Esmaeeli, E. & Alam, M. F. (2008). *Shear Strengthening of 3D RC Beam-Column Connection Using GFRP: FEM Study*. Asian Journal of Applied Sciences, 1**,** 217-227, ISSN 1996-3343, <http://server1.docfoc.com/uploads/Z2015/12/31/7emlilK7Ya/6837ece18e0e36d96c4acca8cd9b1e75.pdf>.
5. Deaton, J. (2013). *Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete exterior beam-column joints with nonseismic detailing.* Doctor of Philosophy, School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, <http://hdl.handle.net/1853/47538>.
6. Fundora, N. (2015). *Empleo del efecto cuña en unión viga-columna continua prefabricada para la concepción de sistemas constructivos aplicados a viviendas.* Tesis de Maestría, Facultad de Arquitectura, Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría", La Habana, Cuba.
7. Fundora, N., Martínez, J. & Ruiz, L. (2016). *Modelo matemático computacional de unión continua prefabricada con efecto cuña*. 18 Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura, 21-25 noviembre La Habana, Cuba. ISBN 978-959-261-533-5.
8. Luk, S. & Kuang, J. (2012). *Seismic behaviour of RC exterior wide beam-column joints* 15 World Conference of Earthquake Engineering, Lisboa, 2012. <http://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/WCEE2012_1861.pdf>.
9. Martínez, J. (2016). *Estudio del comportamiento estructural de la unión viga-columna con efecto cuña del sistema de múltiple aplicación en cuba (SMAC) con el empleo de técnicas de modelación numérica.* Tesis de Doctorado, CUJAE, La Habana.
10. Paredes, R., Ruiz, L. & Tosca, J. (1988). *Estudio de la junta viga-columna del sistema SMAC,* informe 017-06-32,Centro Técnico para el Desarrollo de los Materiales de Construcción, La Habana, Cuba.
11. Ruiz, L., Fundora, N. & Martínez, J. (2016). *Empleo del efecto cuña en unión viga-columna continua prefabricada*. XI Conferencia Científico Técnica de la Construcción, 4-7 abril La Habana, Cuba. ISBN 978-959-247-146-7.
12. Ruiz, L. & Martínez, J. (2015). *The wedge effect in the beam column joint of the Multipurpose Construction System for Cuba (SMAC System)*. Revista de la Construcción, Chile, 14**,** 41-46, 0717-7925, <http://www.scielo.cl/pdf/rconst/v14n3/art05.pdf>.
13. Tiong, P., Adnan, A., Mirasa, A. & Rahman, A. (2011). *Performance of IBS precast concrete beam-column connections under earthquake effects: a literature review*. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 4**,** 93-101, ISSN 1941-7020, https://[www.researchgate.net/profile/Patrick\_Tiong2/publication/285050246\_Performance\_of\_IBS\_Precast\_Concrete\_Beam-Column\_Connections\_Under\_Earthquake\_Effects\_A\_Literature\_Review/links/5664695d08ae192bbf9096b0.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Patrick_Tiong2/publication/285050246_Performance_of_IBS_Precast_Concrete_Beam-Column_Connections_Under_Earthquake_Effects_A_Literature_Review/links/5664695d08ae192bbf9096b0.pdf)
14. Tosca, J. & Ruiz, L. (1989). *Instrucciones para la utilización del sistema constructivo SMAC,* La Habana, Cuba, Empresa de Proyecto No.2. Ministerio de la Construcción.
15. Tyau, J. (2009). *Finite element modeling of reinforced concrete using 3-dimensional solid elements with discrete rebar.* Master of Science, Department of Civil and Environmental Engineering, Brigham Young University.