



Conference Paper

Predicción de la resistencia de las conexiones tipo canal en estructuras compuestas de acero y hormigón

Rafael Larrúa Quevedo¹, Ramiro Vargas Vergara², and Jennifer Espino Louzado¹¹Universidad de Camaguey, Camaguey, Cuba²Universidad Tecnológica de Panamá, Panamá, Panamá

Abstract

This article deals with channel connections in steel and concrete composite structures, with the main objective of obtaining a new formulation to determine the resistance of this widely used type of connection in the American region. Data from channel connections tests are collected from reliable experimental and numerical sources, and a valid database is created to make predictions by means of different combinations of artificial intelligence techniques, to obtain the most effective cases. Finally, a new formulation is proposed to calculate the resistance of channel connections in solid slab, applying statistical techniques to a database that incorporates experimental, numerical and artificial intelligence results, demonstrating its superiority with respect to the existing formulations in the international literature, by means of statistical measures appropriately applied to the studied case. The proposed methodology is novel and effective, and it can be expanded to other types of structural elements.

Keywords: composite structures, connections, resistance, prediction.

Resumen

En el trabajo se abordan las conexiones tipo canal en estructuras compuestas de acero y hormigón, con el objetivo principal de obtener una nueva formulación para determinar la resistencia de este tipo de conexión de amplio uso en el área americana. Se recopilan, a partir de fuentes confiables, datos experimentales y numéricos de ensayos de conexiones tipo canal, a partir de lo cual se crea una base de datos válida para realizar predicciones por medio de diferentes combinaciones de técnicas de inteligencia artificial, a los efectos de determinar la más efectiva. Finalmente, se propone una nueva formulación para el cálculo de la resistencia de las conexiones tipo canal en losa maciza, aplicando técnicas estadísticas a una base de datos que integra resultados experimentales, numéricos y de inteligencia artificial, y se demuestra su superioridad respecto a las formulaciones existentes en la literatura internacional, por

Corresponding Author:

Rafael Larrúa Quevedo
rafael.larrua@reduc.edu.cu

Received: 15 November 2017

Accepted: 5 January 2018

Published: 4 February 2018

Publishing services provided
by Knowledge E© Rafael Larrúa Quevedo
et al. This article is distributed
under the terms of the

Creative Commons Attribution

License, which permits
unrestricted use and
redistribution provided that
the original author and source
are credited.Selection and Peer-review
under the responsibility of the
ESTEC Conference Committee.

medio de medidas estadísticas apropiadas al caso de estudio. El enfoque propuesto, que integra resultados experimentales, numéricos y de inteligencia artificial, teniendo como elemento rector el diseño estadístico de experimentos, es novedoso y efectivo, y puede ser generalizado a otros tipo de elementos estructurales.

Palabras claves: estructuras compuestas, conexiones, resistencia, predicción.

1. Introducción

Las estructuras compuestas de acero y hormigón son ampliamente utilizadas en la práctica constructiva internacional dadas las reconocidas ventajas que presentan, entre las que sobresalen la mayor rigidez y resistencia de las vigas como consecuencia favorable del trabajo conjunto, lo que es conducente, principalmente, a la reducción del peso de las vigas de acero.

En la solución compuesta acero – hormigón clásica, los conectores, elementos claves en el logro del trabajo conjunto, se instalan en el ala superior de la viga de acero, usualmente mediante soldadura, antes del hormigonado de la losa. Las funciones esenciales de la conexión son la trasmisión de las fuerzas horizontales en la superficie de contacto acero – hormigón, y oponerse a la tendencia de separación vertical entre la viga de acero y la losa de hormigón armado.

En la literatura técnica internacional, incluyendo las principales normativas relativas a esta tipología, pueden encontrarse innumerables tipos de conexiones, y entre estas las que utilizan pernos con cabeza, segmentos de secciones de acero (canales, angulares, entre otras), placas de acero con orificios cerrados o abiertos colocadas a lo largo del eje de las vigas, o diversos tipos de conexiones basadas en el uso de barras de acero corrugadas o lisas con formas diversas, entre otros tipos de configuraciones.

El conector canal, objeto de estudio del presente trabajo, puede ser fabricado con facilidad a partir de los perfiles y ser unido a la viga de acero mediante soldadura convencional; posee una resistencia considerablemente mayor que la de los conectores tipo perno con cabeza, la que a su vez puede ser regulada en el diseño a través de su longitud, que es directamente proporcional a la resistencia de la conexión. Por tales razones, el conector canal es considerado como un tipo viable y efectivo en el contexto latinoamericano.

Un número notable de estudios experimentales han sido desarrollados para profundizar en el estudio del comportamiento de las conexiones, específicamente, los

ensayos de conectores del tipo “push-out”; el espécimen para este ensayo es un modelo físico simplificado del comportamiento de las conexiones en la estructura real y está compuesto por un perfil de acero de sección I, o dos perfiles T que se unen por el alma para formar una sección I (Rambo-Roddenberry, 2002), al cual son soldados simétricamente en las caras exteriores de sus alas los conectores a estudiar. Posteriormente, se hormigonan losas a ambos lados, quedando embebidos en ellas los conectores. En la figura 1 se presenta una vista del ensayo “push out” realizado en una prensa convencional.



Figura 1: Ensayo de conexiones tipo “push out” en una prensa convencional

Las conexiones canal, no han sido abordadas de manera extensiva en los programas experimentales desarrollados en comparación con los dedicados a las conexiones tipo perno con cabeza; sin embargo, pueden citarse los estudios de este corte realizados por Viest et al. (1952), Slutter y Driscoll (1965), Larrúa (1992), Hidehiko y Hosaka (2002), Pashan (2006), Maleki y Bagheri (2008a), y Ramírez et al. (2010). Este último programa fue desarrollado en la Universidad Tecnológica de Panamá, como parte del Proyecto SENACYT COL 06-007 “Fundamentación experimental de sistemas estructurales y productos para el desarrollo competitivo de la construcción compuesta”, orientado a la

caracterización experimental del comportamiento bajo carga monotónica de tres tipos de conectores: asas verticales elaboradas a partir de barras de acero, canales laminadas en caliente y placas continuas. No obstante, puede afirmarse que los programas experimentales desarrollados a escala internacional no abarcan todas las situaciones de diseño posibles, por lo que resulta necesaria su ampliación y/o su complementación con otras técnicas.

En tal sentido, en años recientes se han desarrollado potentes herramientas computacionales capaces de simular de manera virtual experimentos reales. En la actualidad es una tendencia de las investigaciones del comportamiento de las estructuras hacer uso de la modelación numérica implementada en software profesionales, a los efectos de complementar los costosos ensayos experimentales, y contribuir al continuo perfeccionamiento de las expresiones de diseño. En correspondencia, en la investigación de las conexiones en estructuras compuestas se aprecia igual tendencia (Lam y Ellobody, 2005; Ellobody y Young, 2006; Bonilla, 2007; Maleki y Bagheri, 2008b; García, 2010 y Ramal, 2011), incluidas modelaciones numéricas relativas a las conexiones tipo canal, realizadas en las tres últimas investigaciones.

Por su parte, el Aprendizaje Automático es el área de la Inteligencia Artificial que se ocupa de desarrollar técnicas capaces de aprender, es decir, extraer de forma automática conocimiento subyacente en la información. Constituye junto con la estadística el corazón del análisis inteligente de los datos. Existen antecedentes de la utilización ventajosa de tales técnicas en la predicción de la resistencia de conexiones tipo perno con cabeza. (Larrúa et al., 2009)

Respecto al objeto de estudio, ha sido comprobado por los autores del presente trabajo que las formulaciones propuestas en las principales normativas (CSA, 2001; AISC, 2010) o por autores de investigaciones relevantes (Pashan, 2005), subestiman la resistencia de las conexiones determinadas por métodos experimentales, al tiempo que tanto estas como la información experimental disponible, no son representativas de la gama de situaciones de diseño posibles. Por tanto, existe la necesidad del perfeccionamiento de tales formulaciones. Para el logro de tal propósito la presente investigación aborda un enfoque de trabajo en el que se integran diferentes técnicas, tales como las experimentales, la modelación numérica, la inteligencia artificial y los métodos estadísticos, a fin de proponer una formulación más efectiva que las existentes para determinar la resistencia de las conexiones tipo canal en presencia de losa maciza.

2. Metodología de la investigación.

La metodología aplicada puede describirse de manera resumida a través de la siguiente secuencia general:

a) Recopilar a partir de fuentes confiables datos experimentales y numéricos de ensayos de conexiones tipo canal en estructuras compuestas de acero y hormigón, y conformar una base de datos válida para realizar predicciones por medio de técnicas de inteligencia artificial.

b) Realizar predicciones por medio de diferentes combinaciones de técnicas de inteligencia artificial, y determinar la más efectiva.

c) Proponer una nueva formulación para el cálculo de la resistencia de las conexiones tipo canal en losa maciza, aplicando técnicas estadísticas a una base de datos que integra resultados experimentales, numéricos y de inteligencia artificial, con el objeto de demostrar su efectividad y superioridad.

La recopilación de información experimental y numérica pertinente condujo a la conformación de una base de datos integrada por 46 instancias provenientes de resultados experimentales de los programas de Pashan (2005), con conectores de 102 mm y 127 mm de altura, y del Proyecto SENACYT 2010 (Ramirez et al., 2010), con conectores de 76.2 mm de altura, así como 15 instancias derivadas de resultados numéricos de especímenes con alturas de canal de 76.2 mm. (Ramal, 2011). Este último autor desarrolló la simulación virtual tridimensional del ensayo "push out" de conexiones tipo canal en losa maciza de hormigón armado, implementada en el programa computacional ABAQUS/CAE (Versión 6.8-1, 2008). La calibración de los modelos fue realizada tomando en cuenta los resultados experimentales del Proyecto SENACYT COL 06-007 (Ramirez et al., 2010).

La base de datos cuenta con cinco variables de entrada continuas con datos de la conexión a estudiar, como son: altura del conector canal (H), espesor del ala (t) y del alma (w) del conector canal, longitud del conector (L) y la resistencia a compresión del hormigón ($f'c$). Incluye además como variable de respuesta continua la resistencia última de cada instancia (Q_{con}).

Por su parte, se utiliza el estimador de funciones kNN (k vecinos más cercanos) a los efectos de realizar las predicciones por medio de técnicas de inteligencia artificial. El estimador kNN es un algoritmo de clasificación que utiliza funciones de similitud o distancias para generar predicciones. El mismo se complementa con dos tipos de algoritmos de optimización, que permiten la asignación de pesos a los atributos de

las bases de datos: algoritmo de optimización de enjambres de partículas (PSO) y algoritmo genético (AG) (Larrúa et al., 2009).

Para predecir la resistencia de las conexiones por medio de técnicas de inteligencia artificial se utiliza el sistema automatizado PROCON v 4.0, desarrollado en la Universidad de Camaguey, el cual constituye una herramienta eficaz para la predicción de diversas respuestas estructurales. En tanto, para evaluar los resultados de las predicciones fueron empleadas las siguientes medidas estadísticas: Q_{exp} / Q_m (media), coeficiente de correlación, coeficiente de determinación múltiple (R^2) y la cantidad de instancias (%) de las relaciones Q_{exp}/Q_m comprendidas en los rangos: $0.95 \leq Q_{exp}/Q_m \leq 1.05$, $0.9 \leq Q_{exp}/Q_m \leq 1.1$, $0.85 \leq Q_{exp}/Q_m \leq 1.15$.

Una vez seleccionada la combinación de técnicas de inteligencia artificial más efectiva, con base a los resultados de las medidas estadísticas antes expuestas, se realiza un diseño de experimentos que asegura la generación de combinaciones (en este caso un total de 90), que abarcan las situaciones de diseño más frecuentes en la práctica internacional; a tal efecto se combinan alturas de 70, 100 y 130 mm, espesores del alma de 4 y 8 mm, longitudes de 50, 100 y 150 mm, y resistencias a la compresión del hormigón de 20, 25, 30, 35 y 40 MPa. Las combinaciones que arroja el anterior diseño se comparan con la base de datos original (con datos experimentales y numéricos), con el propósito de seleccionar las instancias no representadas en la misma (un total de 39), y se procede a la predicción de la variable de salida de estas (resistencia de la conexión), por medio de la combinación de técnicas de inteligencia artificial más efectiva definida en el paso previo.

Finalmente, se propone una nueva formulación para el cálculo de la resistencia de las conexiones tipo canal en losa maciza, aplicando técnicas estadísticas a la base de datos que integra resultados experimentales, numéricos y de inteligencia artificial, según ha sido descrito previamente, y realizando un cuidadoso análisis de su efectividad por medio de las medidas estadísticas antes indicadas, y se demuestra su superioridad respecto a las formulaciones existentes.

3. Resultados y discusión

La Tabla 1 resume las medidas estadísticas de los resultados de las diferentes combinaciones de técnicas de inteligencia artificial aplicadas a la predicción de la variable de respuesta de la base de datos original, integrada por datos experimentales y numéricos.

TABLA 1: Medidas estadísticas de los resultados de las diferentes combinaciones de IA

Medidas estadísticas	AG			PSO		
	k=1	k=2	k=3	k=2	k=2	k=3
Q_{exp} / Q_m (media)	1,02	0,99	1,02	0,99	1,01	0,97
Coefficiente de correlación (c.c)	0,95	0,91	0,96	0,86	0,93	0,91
Coefficiente R^2	0,9	0,84	0,93	0,74	0,87	0,83
$0,95 \leq Q_{exp}/Q_m \leq 1,05$ (%)	24,07	37,04	35,2	24,1	38,9	29,6
$0,90 \leq Q_{exp}/Q_m \leq 1,10$ (%)	53,7	68,52	72,2	38,9	59,3	59,3
$0,85 \leq Q_{exp}/Q_m \leq 1,15$ (%)	74,07	74,07	81,5	62,96	68,5	75,9

Se selecciona la combinación de AG con $k=3$, por la calidad de las medidas estadísticas que ofrece (Q_{exp} / Q_m (media) cercana a 1, elevados valores de c.c y R^2 y elevados % de Q_{exp} / Q_m en las franjas cercanas a 1). Se procede a realizar, utilizando AG con $k=3$, las predicciones de la variable de salida de las 39 instancias no representadas en la base de datos original (con datos experimentales y numéricos) y una vez completada con los resultados de las predicciones con inteligencia artificial, se obtienen diferentes alternativas de formulaciones, entre las cuales se selecciona por su efectividad la siguiente:

$$Q_{sc} = [161,6 - 13,77(t + w) = 0,54L + 1,09w^2] \sqrt{f'_c} \tag{1}$$

La Tabla 2 resume las medidas estadísticas de los resultados de la formulación propuesta (ecuación 1) y las formulaciones de CSA (2001), AISC (2010) y Pashan (2005), en la predicción de la variable de salida de la base de datos que incluye resultados experimentales, numéricos y de inteligencia artificial.

TABLA 2: Medidas estadísticas acerca de la comparación entre formulaciones.

Medidas estadísticas	Ecuación (1)	CSA (2001)	AISC (2010)	Pashan (2005)
Q_{exp} / Q_m (media)	0,99	2,16	1,82	1,13
Coefficiente de correlación (c.c)	0,96	0,88	0,76	0,76
Coefficiente R^2	0,91	0,78	0,88	0,59
$0,95 \leq Q_{exp}/Q_m \leq 1,05$ (%)	33	-	-	23
$0,90 \leq Q_{exp}/Q_m \leq 1,10$ (%)	69	-	-	42
$0,85 \leq Q_{exp}/Q_m \leq 1,15$ (%)	90	-	-	51

Pueden apreciarse claramente las favorables medidas estadísticas que ofrece la formulación propuesta (ecuación 1), que son del mismo orden de magnitud que las

ofrecidas por la combinación AG y $k=3$ (ver Tabla 1), lo que es indicativo de una amplia superioridad respecto a las formulaciones existentes. Nótese la tendencia de estas últimas a la subestimación de la resistencia de las conexiones. Información detallada de la aplicación de la metodología y de los resultados alcanzados, pueden encontrarse en Espino (2012).

4. Conclusiones

Las formulaciones existentes en la literatura internacional para la determinación de la resistencia de las conexiones tipo canal con losa maciza no predicen con efectividad los resultados experimentales, los que a su vez no abarcan todas las situaciones de diseño posibles. Se ha comprobado la factibilidad de predecir con efectividad y bajo costo computacional la resistencia de las conexiones tipo canal con técnicas de inteligencia artificial. Fue sobresaliente por sus resultados la combinación que emplea algoritmos genéticos con kNN ($k=3$). La formulación propuesta es efectiva y superior a las existentes en la literatura internacional, lo que fue demostrado por medio de medidas estadísticas apropiadas para el caso de estudio, y es válida para las principales situaciones de diseño posibles. El enfoque propuesto, que integra resultados experimentales, numéricos y de inteligencia artificial, teniendo como elemento rector el diseño estadístico de experimentos, es novedoso y efectivo, y puede ser generalizado a otros casos de estudio.

Referencias

- [1] American Institution of Steel Construction. (2010). *Specification for Structural Steel Buildings*. Chicago, USA: AISC.
- [2] Bonilla, J., Larrúa, R., Mirambell, E. y Recarey, C. (2007). Simulación virtual del ensayo push-out para conectadores tipo perno y con sección en U en estructuras mixtas hormigón- acero. *Revista Ingeniería Civil*, Vol. 148, pp 83-93.
- [3] Canadian Institute of Steel Construction (2001). *Handbook of steel constructions*. (8va ed.). Canada: [s.n.]
- [4] Ellobody, E. y Young, B. (2006). Performance of shear connection in composite beams with profiled steel sheeting. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, pp 682-694.
- [5] Espino, J. (2012). Predicción de la capacidad resistente de conexiones tipo canal en estructuras compuestas hormigón-acero. Tesis de grado. Universidad de Camagüey.

- [6] García, S. (2010). Estudio del comportamiento de conectores tipo canal en estructuras compuestas de hormigón y acero mediante modelación numérica. Tesis de Maestría. Universidad de Camagüey, Cuba.
- [7] Lam, D. y Ellobody, E. (2005). Behavior of Headed Stud Shear Connectors in Composite Beam. *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 1, pp 96-106.
- [8] Larrúa, R. (1992). Cálculo de estructuras compuestas de hormigón y acero sometidas a flexión bajo carga estática con fundamentación experimental de los conectores. Tesis de Doctorado. ISPJAE. Habana. Cuba.
- [9] Larrúa, R., Caballero, Y., Filiberto, Y., Olivera, I., y Bello, R. (2009). "Aplicación de la inteligencia artificial a la predicción de la capacidad resistente última de las conexiones en estructuras compuestas acero - hormigón". *Revista de la Construcción*, Vol. 8, No. 2, pp 109-119.
- [10] Maleki, S. y Bagheri, S. (2008a). Behavior of channel shear connectors, Part II: Analytical study. *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 64, pp 1341-1348.
- [11] Maleki, S. y Bagheri, S. (2008b). "Behavior of channel shear connectors, Part I: Experimental study". *Journal of Structural Engineering*, Vol. 131, No. 1, 96-106.
- [12] Pashan, A. (2006). Behaviour of channel shear connectors: push-outs tests. Tesis de Maestría. Universidad de Saskatchewan, Canada.
- [13] Ramal, Ch. (2011). Modelación numérica de conectores canal en secciones de viga y losa maciza de hormigón. Tesis de grado. Universidad de Camagüey. Cuba.
- [14] Rambo- Roddenberry, M. D. (2002). Behavior and Strength of Welded Stud Shear Connectors. Tesis de Doctorado. Universidad de Virginia, EE.UU.
- [15] Ramírez, O., Larrúa, R., Vargas, R., Yeomans, F. y Pinto, M. (2010). Caracterización experimental de conectores en estructuras compuestas de hormigón y acero. Proyecto SENACYT COL 006 - 007. Informe final. Universidad Tecnológica de Panamá. Panamá.
- [16] Slutter, R. G. y Driscoll, G. C. (1965). Flexural strength of steel - concrete composite beams. *Journal of Structural Division*, 91 (2), 71- 99.
- [17] Viest, I.M., Siess, C.P., Appleton, J.H. y Newmark, N.M. (1952). Full scale tests on channel shear connectors in composite T- Beams. Bulletin 405. University of Illinois.



Autorización y exoneración de responsabilidad

Los autores autorizan a ESTEC a publicar el artículo en las memorias de la Conferencia. Ni ESTEC ni los editores son responsables del contenido ni de las implicaciones de lo que se expresa en el documento.