

En español

Formulación para el diseño de conectores de cortante tipo tornillo en secciones compuestas

Maritzabel Molina Herrera¹,
Xavier Fernando Hurtado Amézquita²

RESUMEN

En Colombia, durante la última década, uno de los tipos de conectores de cortante más utilizados ha sido el de los tornillos, pero hasta ahora surge una formulación para su diseño en secciones compuestas, incluida en el numeral F.2.9.8.2.2 de NSR10. En este artículo se muestra la deducción de dicha formulación de diseño para conectores tipo tornillo, analizando la influencia de diferentes parámetros en el comportamiento de las secciones compuestas cuando se emplean tornillos como conectores de cortante. En esta investigación se estudiaron 18 modelos de sección compuesta fabricados con perfiles de alma llena y losas de concreto de 42 MPa, en las cuales se manejaron configuraciones de 1, 2 o 3 conectores de cortante tipo tornillo con diámetros 1/2", 5/8" o 3/4"; y para separaciones de 0,08 m, 0,12 m o 0,14 m; por cada modelo se ensayaron tres probetas ante sollicitación de corte directo (*push-out*). De acuerdo con los resultados experimentales obtenidos, se efectuó el análisis por medio de la metodología planteada por Ollgaard, donde se evaluó la incidencia del diámetro y la separación de los conectores en el comportamiento de los modelos, y finalmente se plantea la formulación para el diseño de los conectores tipo tornillo en secciones compuestas.

Palabras clave: conectores de cortante, ensayos de corte directo, formulación de diseño, sección compuesta.

Recibido: diciembre 11 de 2009

Aceptado: julio 15 de 2011

Introducción

En el ámbito de la construcción colombiana, desde la pasada década, uno de los tipos de conectores de cortante más utilizados han sido los tornillos; no obstante, sólo hasta ahora fue formulada una expresión de diseño para su uso en vigas de sección compuesta.

Debido a que la mayoría de investigaciones sobre conectores han sido desarrolladas para el uso de canales y espigas, en AISC-LRFD [1] y en la anterior norma colombiana, NSR-98 [2] numeral F2.9.5, sólo se presentan formulaciones de diseño para ese tipo de conectores. Además, en estas normas de diseño se establece que para emplear otro tipo de conectores es necesario

In English

Formulating a design for a screw-type shear connector in a composite section

Maritzabel Molina Herrera³,
Xavier Fernando Hurtado Amézquita⁴

ABSTRACT

Screws-type shear connectors have been most used in Colombia during the last decade; however, an expression for their design in composite sections has only recently been presented (NSR10, paragraph F.2.9.8.2.2). This paper outlines shear design formulation development for screw connectors, analysing the influence of different composite section behaviour parameters. This research studied 18 composite section models using two 42MPa concrete slabs having different arrangements of 1/2", 5/8" or 3/4" diameter 1, 2 or 3 screw shear connectors and 0.08m, 0.12m or 0.14m spacing between connectors. Three specimens were tested by push-out for each model. The laboratory results using the methodology proposed by Ollgaard revealed connector diameter and spacing influence on the model's behaviour. A design formulation for screws in composite sections is presented.

Keywords: shear connector, push-out test, shear design formulation, composite section.

Received: December 11th 2009

Accepted: July 15th 2011

Introduction

Screws have often been used as shear connectors in the Colombian construction sector during the last decade; however, an expression for designing them in composite sections has only recently been formulated.

AISC-LRFD specification [1] and previous Colombian standards for seismic-resistant design and construction (NSR-98) [2] design formulation only deals with channel and stud use as most research about connectors has been developed around these connectors. Such design standards establish that experiment tests must be carried out for determining their nominal strength as

¹ Ingeniera Civil, Magister en estructuras, Universidad Nacional de Colombia. Master en métodos numéricos para cálculo y diseño de la ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña. Estudiante de doctorado en Análisis estructural, Universidad Politécnica de Cataluña. Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. mmolinah@unal.edu.co

² Ingeniero Civil y Magister en ingeniería/ estructuras. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. xfhurtado@unal.edu.co

³ Civil Engineer, Master in structures, Universidad Nacional de Colombia. Master of numerical methods for calculation and design engineering, Universidad Politécnica de Cataluña. Doctoral student in Structural Analysis, Universidad Politécnica de Cataluña. Associate Professor, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. mmolinah@unal.edu.co

⁴ Civil Engineering and a Masters in engineering / structures. Universidad Nacional de Colombia, Colombia. xfhurtado@unal.edu.co

En español

efectuar los ensayos pertinentes para determinar sus resistencias nominales y sustentar un procedimiento de diseño. En este artículo se presenta la deducción de la formulación de diseño para conectores tipo tornillo que es incluida en el numeral F.2.9.8.2.2 de NSR-10 [3].

En este trabajo se muestra la síntesis del estudio realizado a probetas fabricadas con perfiles de alma llena adosados a losas de concreto de 42 MPa, en las cuales se emplearon como medio de conexión configuraciones de 1, 2 o 3 conectores de cortante tipo tornillo con diámetros 1/2", 5/8" o 3/4"; y para separaciones de 0,08 m, 0,12 m o 0,14 m. Estas probetas fueron ensayadas ante un estado de cortante puro utilizando la metodología del ensayo corte directo, *push-out*.

De igual manera, se hace el análisis de los resultados de la experimentación en función de los esfuerzos en los tornillos, estudiando principalmente la influencia del diámetro y de la separación en su comportamiento como conectores de cortante. Finalmente, se plantea la formulación de diseño de conectores tipo tornillo con el fin de garantizar su adecuado desempeño en secciones compuestas conformadas por perfil de acero y losa de concreto.

Antecedentes

Ollgaard *et al.* [9] plantearon el análisis de esfuerzos cortantes para definir el comportamiento de los conectores tipo espigo en las secciones compuestas. Mediante la experimentación con 48 ensayos de corte directo (*push-out*), en los que la interfaz acero-espigo-concreto está solicitada a cortante puro. Se consideraron como variables de análisis: la resistencia a compresión, el módulo de elasticidad y la densidad del concreto, el tipo de agregado, el diámetro de los espigos y el número de conectores por placa. Los modos de falla presentados fueron la fractura del concreto, el corte de los conectores y la combinación de los dos.

El análisis del comportamiento de los espigos como elemento de conexión se basó en la hipótesis de que están sometidos a una distribución de fuerza cortante uniforme en la transferencia de carga que pasa del perfil metálico a la losa de concreto. De los resultados de los ensayos se planteó la formulación de diseño para conectores tipo espigo presentada en AISC-LRFD [1] y NSR-98 [2]:

$$Q_n = 0.50 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{E_c \cdot f'_c} \leq A_{sc} \cdot F_u \quad (1)$$

donde:

Q_n : Capacidad resistente de un conector tipo espigo [N].

A_{sc} : Área nominal de un conector tipo espigo [mm²]

f'_c : Resistencia a la compresión mínima especificada del concreto [MPa]

E_c : Módulo de elasticidad del concreto [MPa]

F_u : Resistencia a tensión mínima especificada para los conectores de cortante tipo espigo [MPa]

Teniendo en cuenta el incremento de las construcciones en Colombia en la última década, en las que se han utilizado tornillos como conectores de cortante en secciones compuestas co-

In English

well as a design procedure. This paper presents deduction about screw-type connector design formulation (as per NSR-10, paragraph F.2.9.8.2.2) [3].

This paper provides a summary about research into specimens made with a steel (wide flange) W-beam section attached to two 42MPa concrete slabs which were tested with different configurations of 1, 2 or 3 screw-type shear connectors having 1/2", 5/8" or 3/4" diameters and 0.08m, 0.12m or 0.14m connector spacing. The specimens were tested by direct shear according to the push-out test method.

The experimental results were analysed according to screw stress, mainly by studying screw connector diameter and spacing influence on composite section behaviour. A screw design formulation has been proposed for use in composite sections made of concrete slabs and steel beams to ensure composite beams' suitable performance.

Background

Ollgaard *et al.*, [9] have proposed shear stress analysis for defining the behaviour of stud shear connectors in composite sections. Forty-eight push-out tests were used in which direct shear was applied to steel-stud-concrete interfaces, taking into account strength, modulus of elasticity, concrete density, aggregate type, diameter and number of studs per slab as analysis variables. Failure modes were concrete slab cracking, stud shear failure and combined damage.

Stud behaviour analysis was based on the hypothesis that this is provided by uniform shear load distribution along a steel-concrete interface. The tests results led to formulating a stud connector design which appears in AISC-LRFD [1] and NSR-98 [2]:

$$Q_n = 0.50 \cdot A_{sc} \cdot \sqrt{E_c \cdot f'_c} \leq A_{sc} \cdot F_u \quad (1)$$

where:

Q_n : nominal stud connector shear strength [N]

A_{sc} : nominal stud connector area [mm²]

f'_c : compressive strength of concrete [mpa]

E_c : concrete's modulus of elasticity [mpa]

F_u : ultimate stud connector tensile strength [MPa]

Bearing in mind the increase in Colombian construction work during the last decade where screws have been used as connectors in composite beams and whose structural designs have not

mo sistemas de entrepiso, sin que los diseños estructurales estuvieran debidamente sustentados con una metodología adecuada, Hurtado *et al.* [6] iniciaron el estudio de este tipo de conectores y analizaron su comportamiento en secciones compuestas con perfiles de alma llena. Para ello realizaron ensayos de corte directo (*push-out*) a 18 configuraciones de probetas, en las cuales variaron la cantidad (1, 2 y 3 conectores), el diámetro (1/2", 5/8" y 3/4") y la separación de los tornillos (0,08 m, 0,12 m y 0,14 m). En este trabajo se registró la información de cargas de falla y se evaluó la pérdida de rigidez de cada sistema por medio de curvas carga-desplazamiento. Además Hurtado *et al.* [6] plantean una metodología de diseño para secciones compuestas con conectores de cortante tipo tornillo y presentan su formulación para estimar la carga máxima por corte de la forma:

$$\sum Q_n = 0.9 \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c \cdot n \cdot \phi} \quad (2)$$

donde:

Q_n : Capacidad resistente del grupo de conectores tipo tornillo [kN].

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto [MPa]

E_c : Módulo de elasticidad del concreto [MPa]

n : Número de conectores del sistema analizado

ϕ : Diámetro de los conectores [m]

De otra parte, Hurtado *et al.* [6], al analizar la proporcionalidad entre la carga de falla y la separación entre los tornillos para los valores promedio de las configuraciones, encontraron la relación indicada como:

$$Q_{push-out} = 0.7 \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c \cdot S} \quad (3)$$

donde:

$Q_{push-out}$: Carga de falla de la probeta del ensayo de corte directo [kN]

f'_c : Resistencia a la compresión del concreto [MPa]

E_c : Módulo de elasticidad del concreto [MPa]

S : Separación entre conectores [m]

Posteriormente, con el fin de revisar la formulación de diseño expuesta por Hurtado *et al.* [6], García y Molina [5] realizaron ensayos a flexión en vigas de 2 m de longitud solicitadas a una carga concentrada en el centro de la luz. En esta investigación estudiaron 12 configuraciones de vigas, en las cuales se tuvieron como variables de estudio la resistencia (21 MPa y 28 MPa) y módulo de elasticidad del concreto, el diámetro de los conectores (1/2", 5/8" y 3/4") y su espaciamento (0,10 m y 0,30 m) y por cada configuración ensayaron tres probetas, para un total de 36 ensayos. De acuerdo con los resultados experimentales y los análisis teóricos basados en los estudios de Nie y Cai [8] y Burnnet y Oehlers [4], se estudió el comportamiento de las secciones en función del incremento de carga, de la resistencia a flexión que induce al corte en los conectores, de la deflexión del sistema y del deslizamiento en la interfaz acero-tornillo--concreto.

been theoretically supported by suitable design methodology, Hurtado *et al.*, [6] began to study this type of connector and analysed screw behaviour in composite sections made with steel W-beams. They carried out a push-out test on 18 configurations changing the number of connectors (1, 2 or 3), their diameters (1/2", 5/8" and 3/4") and the spacing between them. This work led to obtaining failure loads and assessed the loss of stiffness in all specimens by using load-slip curves. Hurtado *et al.*, [6] also proposed a composite section design method for when screw connectors are used; they presented an equation for predicting shear load failure as follows:

$$\sum Q_n = 0.9 \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c \cdot n \cdot \phi} \quad (2)$$

where:

Q_n : nominal connector group shear strength [kN]

f'_c : compressive strength of concrete [MPa]

E_c : concrete modulus of elasticity [MPa]

n : number of screw connectors in each system

ϕ : connector diameter [m]

They also analysed proportionality between shear load failure and connector spacing, leading to the next relationship:

$$Q_{push-out} = 0.7 \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c \cdot S} \quad (3)$$

where:

$Q_{push-out}$: maximum push-out specimen shear load [kN]

f'_c : compressive strength of concrete [MPa]

E_c : concrete modulus of elasticity [MPa]

S : spacing between stud connectors [m]

García & Molina [5] carried out a bending test on 2 m length composite beams to check the above formulation proposed by Hurtado *et al.*, which considered a concentrated load in the middle of the span. They studied 12 beams configurations in which the variables studied were concrete strength (21MPa and 28MPa), concrete modulus of elasticity, screw diameter (1/2", 5/8" and 3/4") and the spacing between connectors; there were 3 specimens for each configuration. According to experimental results, and Nie & Cai [8] and Burnnet & Oehlers' [4] theoretical analysis, the composite beams' behaviour concerned raising a load, flexural strength leading to shear load in connectors, beam deflection and steel-screw-concrete interface slip.

En español

In English

García y Molina [5], en su planteamiento para el diseño de los conectores tipo tornillo, hacen un análisis de la fuerza cortante en cada tornillo por flexión, en el cual utilizaron como base para su formulación la forma de la ecuación (3) propuesta por Hurtado *et al.* [6], dado que con sus resultados se evidenció también la relación proporcional entre la separación de los tornillos y la carga de falla por cortante, aparte de la relación entre el módulo de elasticidad y la resistencia a la compresión del concreto.

Acorde con los análisis realizados, en la investigación de García y Molina [5] se planteó como formulación para estimar la carga máxima por cortante en cada tornillo la ecuación (4):

$$Q_n = A_{sc} \cdot \sqrt{E_c \cdot f'_c \cdot S} \leq A_{sc} \cdot F_u \quad (4)$$

donde:

Q_n : Capacidad resistente de un conector tipo tornillo [N].

A_{sc} : Área nominal de un conector tipo tornillo [mm²]

f'_c : Resistencia a la compresión mínima especificada del concreto [MPa]

E_c : Módulo de elasticidad del concreto [MPa]

S : Separación entre conectores [m]

F_u : Resistencia a tensión mínima especificada para los conectores de cortante tipo tornillo [MPa].

En la figura 1 se grafican las ecuaciones planteadas por Hurtado *et al.* [6] y García y Molina [5], donde se observa la relación carga nominal por tornillo en la sección compuesta con respecto a la separación, y se contrasta con la carga de falla de los tornillos solicitados a tracción. En esta figura las curvas fueron determinadas con las propiedades mecánicas de los materiales de los ensayos, las cuales se indican en la tabla 2 y la tabla 3. Para una comparación objetiva en las cargas por tornillo, en la formulación propuesta por Hurtado *et al.* [6] se tomó una longitud equivalente de 1 ml, tal que la expresión (2) queda escrita como:

$$Q_n = \frac{\sum Q_n}{n} = 0.9 \cdot \sqrt{\frac{f'_c \cdot E_c \cdot \varphi}{n}} = 0.9 \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c \cdot \frac{S}{1ml} \cdot \varphi} \quad (5)$$

En la figura 1 se muestra la diferencia de las formulaciones dadas de acuerdo con los distintos enfoques considerados de estas investigaciones, uno en función de la carga por cortante total del sistema y otro en función de la flexión con la correspondiente distribución del flujo cortante por tornillo. Conforme con lo observado, se evidencia que es necesario analizar la información por medio de una metodología que permita normalizar los datos recopilados en los ensayos, y de esta forma poder optimizar una formulación de diseño para los conectores tipo tornillo.

Frente a la evidente influencia del área y la separación de los tornillos en su resistencia como conectores de cortante, en este trabajo se propone una formulación para su diseño mediante el análisis de los resultados experimentales encontrados por Hurtado *et al.* [6] utilizando la metodología realizada por Ollgaard *et al.* [9] para el diseño de los espigos, donde estudia la influencia de las diferentes variables en el comportamiento de los conectores en función de los esfuerzos por tornillo.

García & Molina's [5] formulation of screw connectors analysed shear load on each screw produced by bending. This work was based on equation (3) proposed by Hurtado *et al.*, [6], because the experimental results led to seeing the proportional relationship between the spacing between screws, shear load failure, compressive strength and concrete elasticity modulus.

García & Molina [5] thus proposed the following equation (4) to predict maximum load per shear connector:

$$Q_n = A_{sc} \cdot \sqrt{E_c \cdot f'_c \cdot S} \leq A_{sc} \cdot F_u \quad (4)$$

where:

Q_n : nominal screw connector shear strength [N]

A_{sc} : nominal screw connector area [mm²]

f'_c : compressive strength of concrete [MPa]

E_c : concrete modulus of elasticity [MPa]

S : spacing between screw connectors [m]

F_u : ultimate tensile strength of the screw [MPa]

Figure 1 shows the plots for the equations proposed by Hurtado *et al.*, [6] and García & Molina [5]. That Figure shows the relationship between nominal shear load per screw and spacing between connectors, compared to tensile load and screw failure. The curves in this graph were constructed from the mechanical properties of the materials being tested (summarised in Table 2 and Table 3). A 1 ml length was taken in the formulation proposed by Hurtado *et al.*, [6] for providing an objective comparison between screw loads. Expression (2) was thus rewritten as:

$$Q_n = \frac{\sum Q_n}{n} = 0.9 \cdot \sqrt{\frac{f'_c \cdot E_c \cdot \varphi}{n}} = 0.9 \cdot \sqrt{f'_c \cdot E_c \cdot \frac{S}{1ml} \cdot \varphi} \quad (5)$$

The difference between formulations is shown in Figure 1. Some researchers took shear load in push-out specimens into account and others based their approach on shear flow distribution by bending composite beams. Experimental results must be compared to other methods to standardise data test and thereby to optimise formulating screw connector design.

The method proposed by Ollgaard *et al.*, [9] was used for analysing the experimental results obtained by Hurtado *et al.*, [6] to study the influence of different variables on connector behaviour based on screw stress for obtaining a suitable design formulation.

En español

In English

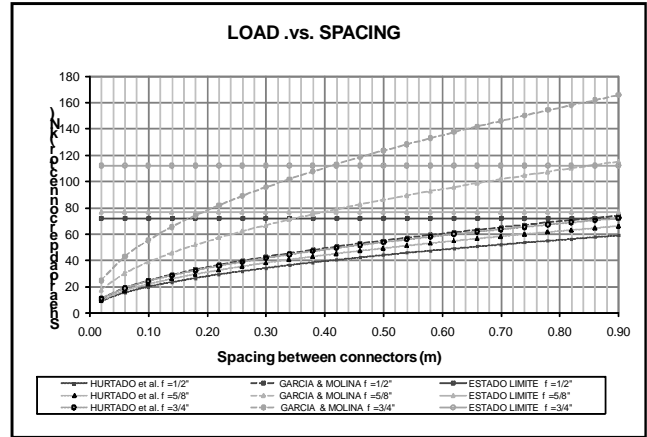
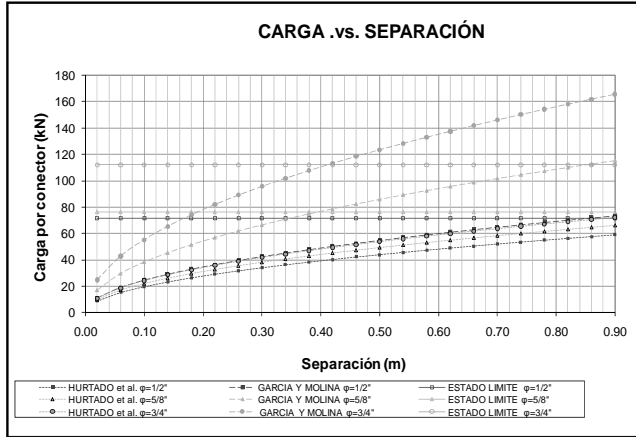


Figura 1. Gráfica comparativa formulaciones Hurtado et al. y García y Molina.

Figure 1. Comparative curves from formulations by Hurtado et al., and García & Molina.

Ensayos de laboratorio

Descripción de las probetas

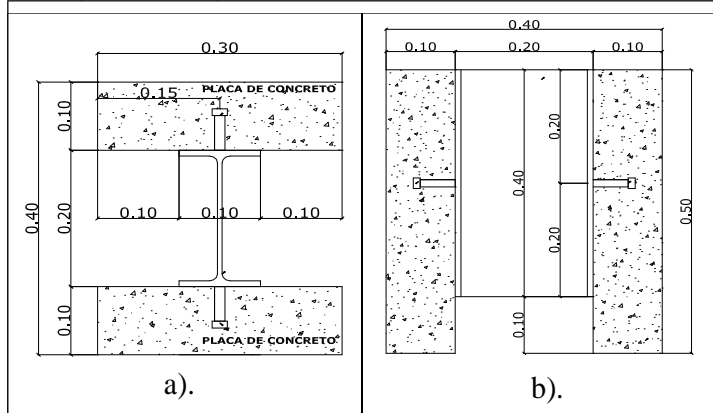


Figura 2. Configuración general de las probetas de ensayo. a) Vista en planta. b) Vista en alzada.

Figure 2. Push-out specimen: a) front view b) view from above

En la figura 2 se muestra la geometría de las probetas. Los especímenes del ensayo consisten en dos placas de concreto de 0,30 m de alto, 0,50 m de largo y 0,10 m de ancho, adosadas a las aletas de una viga metálica IPE200 por medio de conectores de cortante tipo tornillo, de diámetros 1/2", 5/8" y 3/4", con separaciones de 0,08 m, 0,12 m y 0,14 m. La cantidad de conectores también varía entre 1, 2 o 3 tornillos, teniendo así 18 configuraciones, cada una con tres probetas de ensayo, para un total de 54. Los conectores fueron soldados al perfil metálico, pero las propiedades de la soldadura no fueron consideradas en el análisis.

Figure 2 shows specimen geometry. The specimens were made from two 0.30m high, 0.50m long and 0.10m thick concrete slabs attached to IPE200 steel beam flanges with 1/2", 5/8" and 3/4" diameter screw connectors having 0.08m, 0.12m and 0.14m spacing between them. The number of connectors was varied to use 1, 2 or 3 screws. There were thus 18 configurations for 54 specimens. Screw connectors were welded to a steel profile but weld properties were not considered in this analysis.

La descripción de las probetas ensayadas se señala en la tabla 1.

Table 1 gives a description of the specimens tested.

Materiales

Materials

Se realizaron ensayos de cargas de rotura, módulo de elasticidad en el concreto y carga de rotura por corte en los conectores, cuyos resultados se registran en las tablas 2 y 3, los cuales fueron empleados para hacer los análisis del comportamiento de las probetas como sistemas compuestos.

Experimental tests included concrete modulus of elasticity, concrete strength, screw connector tension and shear strength. Experimental results are listed in Tables 2 and 3. This data was used to analyse the specimens' behaviour as composite systems.

Tabla 2. Resultados de los ensayos del concreto

f'c (MPa)	Ec (MPa)
42.4	21324.5

Table 2. Properties of tested concrete specimens

f'c (MPa)	Ec (MPa)
42.4	21324.5

En español

In English

MODELO / MODEL	TORNILLOS/SCREW CONNECTORS				PLACAS DE CONCRETO/CONCRETE SLABS				VIGA IPE200/IPE200 BEAM	
	f (in)	N. DE TORNILLOS / NUMBER OF SCREWS	SEPARACIÓN / SEPARATION (m)	fy (MPa)	b (m)	h (m)	L (m)	fc (MPa)	L (m)	fy (MPa)
Mx-0-0-1,2,3	--	0	--	--	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M4-1-0-1,2,3	1/2	2	--	577,1	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M4-2-8-1,2,3	1/2	4	0,08	577,1	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M4-2-12-1,2,3	1/2	4	0,12	577,1	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M4-2-14-1,2,3	1/2	4	0,14	577,1	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M4-3-12-1,2,3	1/2	6	0,12	577,1	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M4-3-14-1,2,3	1/2	6	0,14	577,1	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M5-1-0-1,2,3	5/8	2	--	394,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M5-2-8-1,2,3	5/8	4	0,08	394,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M5-2-12-1,2,3	5/8	4	0,12	394,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M5-2-14-1,2,3	5/8	4	0,14	394,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M5-3-12-1,2,3	5/8	6	0,12	394,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M5-3-14-1,2,3	5/8	6	0,14	394,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M6-1-0-1,2,3	3/4	2	--	401,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M6-2-8-1,2,3	3/4	4	0,08	401,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M6-2-12-1,2,3	3/4	4	0,12	401,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M6-2-14-1,2,3	3/4	4	0,14	401,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M6-3-12-1,2,3	3/4	6	0,12	401,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0
M6-3-14-1,2,3	3/4	6	0,14	401,2	0,30	0,10	0,50	42,4	0,40	339,0

Tabla 1. Numeración de las probetas de ensayo. (Tomado de Hurtado, 2005).

Table 1. Test specimens (taken from Hurtado 2005)

La nomenclatura de los especímenes está dada por la forma:

Specimen notation was given as follows:

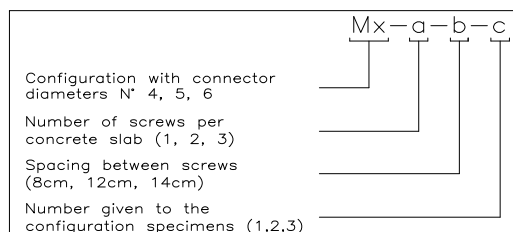
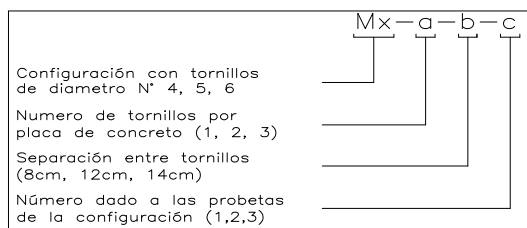


Tabla 3. Resultados de los ensayos de los tornillos a tensión simple y a corte.

DIAMETRO	CARGA MÁXIMA TENSIÓN (kN)	CARGA MÁXIMA CORTE (kN)
1/2"	71.71	48.68
5/8"	76.54	64.21
3/4"	112.18	91.63

Table 3. The screws' maximum tension and shear loads

DIAMETER	FAILURE LOAD OF TENSION (kN)	FAILURE LOAD OF SHEAR (kN)
1/2"	71.71	48.68
5/8"	76.54	64.21
3/4"	112.18	91.63

Descripción del ensayo

Los ensayos de corte directo (push-out) se han realizado desde 1956, inicialmente utilizados en las investigaciones de conectores de Viest [10]. Este ensayo consiste en aplicar carga axial sobre el perfil metálico hasta la falla de las probetas, de manera que exista transferencia de esfuerzos sólo a través de los conectores: por lo tanto, se aísla el efecto de corte directo, tal y como se muestra en la figura 3.

La medición en los ensayos se hizo con dos deformímetros mecánicos localizados en la parte inferior del perfil, con el propósito de medir los desplazamientos promedio de éste y revisar si se presentaban giros en el perfil durante el ensayo (figura 3).

Resultados

Las cargas de falla se indican en la tabla 4. De acuerdo con los resultados experimentales observados, el modo de falla predominante, con un 80% del total, se dio para las probetas con dos y

Push-out test setup

Push-out tests have been carried out since 1956; they were initially used by Viest [10] in research into connectors. Axial load was applied to the top of a steel profile until failure occurred so that shear stress was only transferred through the connectors; therefore, the effect of shear direct became isolated, as shown in Figure 3.

Two mechanical gauges located at the bottom of the IPE200 profile were used for measuring average displacement and to check whether any profile rotations occurred during the push-out test (Figure 3).

Results

Table 4 lists ultimate loads. Regarding experimental results, the predominant failure mode involved one of the concrete slabs cracking with screw deformation appearing in 80% of all tests in

En español

In English

tres conectores donde se fracturó una de las placas de concreto con significativa deformación de los tornillos (figuras 4a y 4b). En el 20% restante la falla se produjo por corte en la soldadura que fijaba los conectores al perfil metálico de la soldadura (figuras 4c y 4d), pero en ningún caso se superó la resistencia a corte de los conectores hallada en los ensayos efectuados a los tornillos (tabla 3).

specimens having two or three connectors (Figure 4a and 4b). Failure was produced by the weld shearing off in the other 20% (Figure 4c and 4d) but screw shear strength was never exceeded as found in tests carried out on the screws (Table 3).

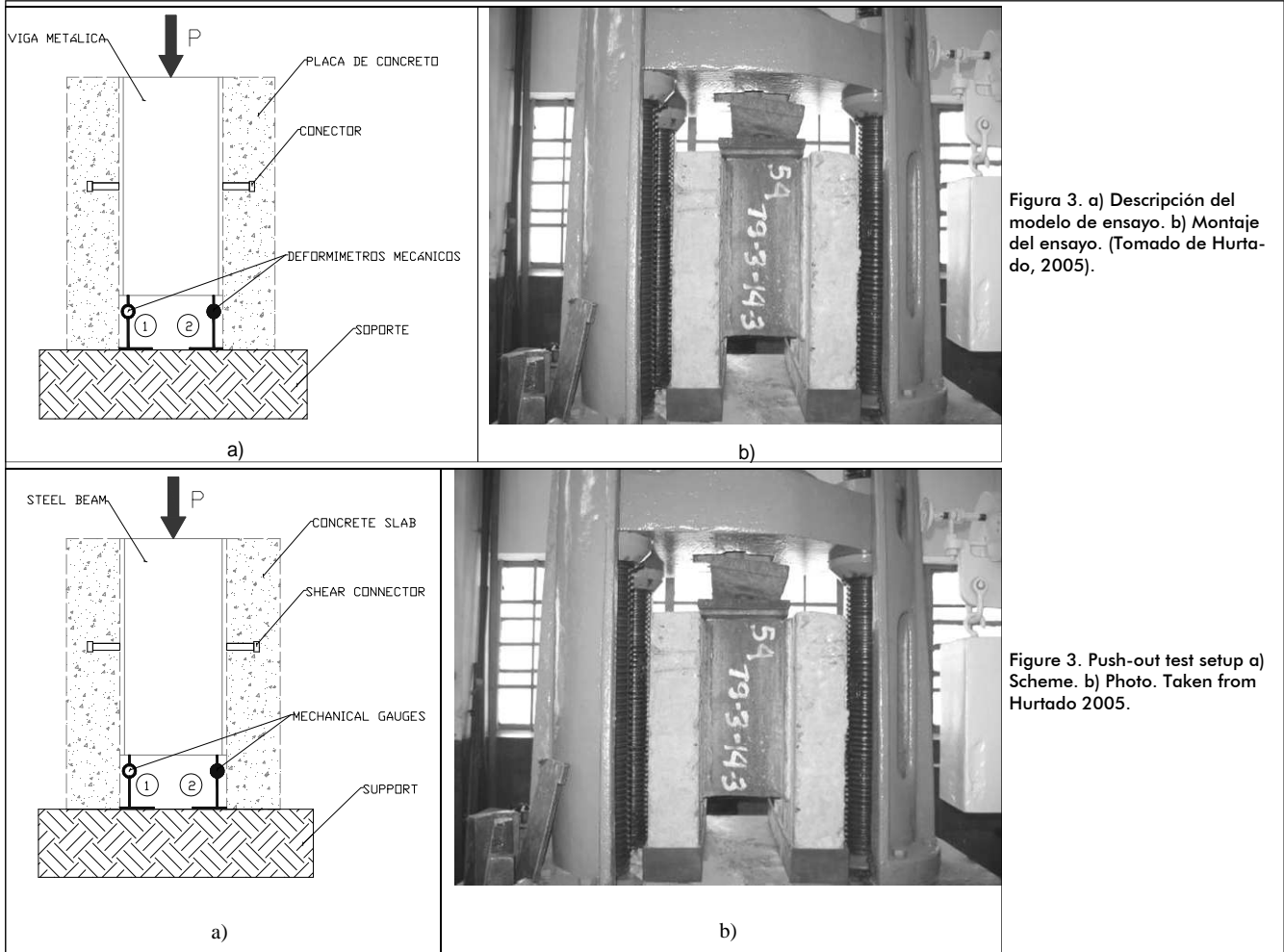


Figura 3. a) Descripción del modelo de ensayo. b) Montaje del ensayo. (Tomado de Hurtado, 2005).

Figure 3. Push-out test setup a) Scheme. b) Photo. Taken from Hurtado 2005.

Tabla 4. Cargas de falla del sistema compuesto. (Tomado de Hurtado, 2005).

Table 4. Push-out specimens' failure loads (taken from Hurtado, 2005)

	CARGA DE FALLA DEL SISTEMA (kN)		
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
M4-1-0-1,2,3	105.46	100.88	94.92
M4-2-8-1,2,3	173.47	199.63	189.53
M4-2-12-1,2,3	218.75	146.78	153.54
M4-2-14-1,2,3	203.10	169.02	169.02
M4-3-12-1,2,3	213.50	243.79	245.35
M4-3-14-1,2,3	241.88	212.39	245.57
M5-1-0-1,2,3	119.52	124.54	142.89
M5-2-8-1,2,3	229.16	201.14	155.68
M5-2-12-1,2,3	240.81	221.60	242.50
M5-2-14-1,2,3	213.24	252.65	231.56
M5-3-12-1,2,3	250.69	254.07	239.57
M5-3-14-1,2,3	207.94	221.24	297.48
M6-1-0-1,2,3	194.38	148.52	192.86
M6-2-8-1,2,3	260.47	302.82	246.29
M6-2-12-1,2,3	267.10	282.36	285.78
M6-2-14-1,2,3	216.22	231.56	251.09
M6-3-12-1,2,3	317.45	351.79	320.26
M6-3-14-1,2,3	353.79	299.66	349.26

	FAILURE LOAD OF SYSTEM (kN)		
	SPECIMEN 1	SPECIMEN 2	SPECIMEN 3
M4-1-0-1,2,3	105.46	100.88	94.92
M4-2-8-1,2,3	173.47	199.63	189.53
M4-2-12-1,2,3	218.75	146.78	153.54
M4-2-14-1,2,3	203.10	169.02	169.02
M4-3-12-1,2,3	213.50	243.79	245.35
M4-3-14-1,2,3	241.88	212.39	245.57
M5-1-0-1,2,3	119.52	124.54	142.89
M5-2-8-1,2,3	229.16	201.14	155.68
M5-2-12-1,2,3	240.81	221.60	242.50
M5-2-14-1,2,3	213.24	252.65	231.56
M5-3-12-1,2,3	250.69	254.07	239.57
M5-3-14-1,2,3	207.94	221.24	297.48
M6-1-0-1,2,3	194.38	148.52	192.86
M6-2-8-1,2,3	260.47	302.82	246.29
M6-2-12-1,2,3	267.10	282.36	285.78
M6-2-14-1,2,3	216.22	231.56	251.09
M6-3-12-1,2,3	317.45	351.79	320.26
M6-3-14-1,2,3	353.79	299.66	349.26

En español

In English

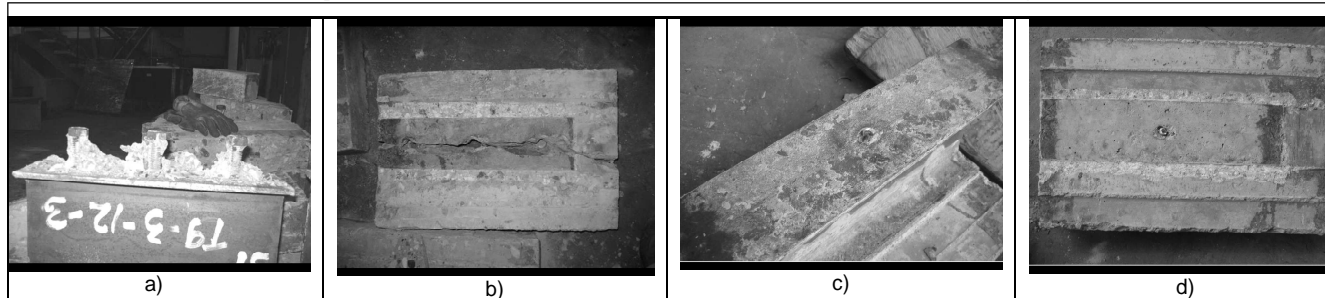


Figura 4. a) Estado final de los conectores en la falla del concreto. b) Estado final de la placa de concreto. c) Estado final del perfil metálico en la falla de la soldadura. d) Tornillo embebido en la placa de concreto ante la falla de la soldadura. (Tomado de Hurtado, 2005).

Figure 4. a) Screws in concrete failure, b) cracked concrete slab, c) shank failure, d) concrete slab embedment failure (taken from Hurtado 2005)

Como se observa en la figura 5, en el desencofrado de las probetas sin conectores se separaron las placas de concreto del perfil, por tanto no se pudo evaluar el efecto de la adherencia entre el acero y el concreto. No obstante, este tipo de falla indica que para una óptima formulación de los conectores no se debe considerar la fricción entre el acero y el concreto, y que la interacción entre los dos materiales en las secciones compuestas debe estar totalmente garantizada por los conectores de cortante.

While formworks stripped off specimens without connectors, the concrete slabs split from the steel beam (Figure 5); the adherence between steel profile and concrete slab could thus not be measured. However, such failure proved that friction between steel and concrete should not be considered for an optimal connector design and that the interaction between these materials in composite sections must be fully ensured by the shear connectors.



Figura 5. Desencofrado de probetas sin conectores.

Figure 5. Failure of specimens without screws

Acorde con los modos de falla que se presentaron en los ensayos, y teniendo en cuenta que la resistencia del concreto obtenida de las pruebas del material es de 42 MPa, en este trabajo se parte de la hipótesis de que para sistemas compuestos con resistencias menores de concreto y con conectores tipo tornillo de resistencia mayor o igual a la del grado dos, el modo de falla prevaiente es la fractura en el concreto, siempre que se garantice un apropiado diseño de los conectores y una adecuada aplicación de la soldadura alrededor del conector.

En esta investigación se considera otro enfoque al análisis de la formulación por cargas promedio de las configuraciones dada originalmente por Hurtado *et al.* [6]. Teniendo en cuenta la metodología de análisis desarrollada por Ollgaard *et al.* [9], se analizan los esfuerzos de corte por tornillo suponiendo una distribución uniforme de cortante entre ellos, y de esta manera se normalizan todos los datos experimentales de falla a una misma escala, independientemente de la separación y del número de tornillos. Con esta metodología se amplía el panorama de comparación entre los diferentes modelos.

Por otra parte, con el fin de optimizar la propuesta de la formulación de diseño de los conectores tipo tornillo, se estudiaron las 54 probetas sin considerar los valores promedio, ya que éstos al depender del comportamiento medio de las tres probetas pueden estar influenciados por datos espurios que afectan el análisis del efecto por tornillo. Los valores de los esfuerzos se indican en la tabla 5.

This work was based on the hypothesis that in composite beams having lower concrete strength than 42 MPa and screw connector strength greater than or equal to grade two, then the main failure mode would be concrete slab cracking in view of the failure modes presented in the push-out tests and that the strength of concrete obtained from material tests was 42MPa. This would have depended on proper screw connector design and suitable application of welding around the connector.

This research adopted a different approach to formulation based on average loads used by Hurtado *et al.*, [6]. The method proposed by Ollgaard *et al.*, [9], stating that screw shear stress should be analysed assuming uniform shear flow distribution between them, was adopted and thus all experimental data were normalised on the same scale, regardless of screw separation and number. This methodology extended the overview of comparing different configurations.

All 54 specimens were studied without considering average values for optimising screw connector design formulation because they may have been influenced by spurious data depending on three specimens' average behaviour, and therefore affected screw performance analysis. The stress values are listed in Table 5.

En español

In English

Inicialmente el comportamiento de las probetas se comparó en función de los esfuerzos cortantes en los conectores producidos por la carga de falla. Por ello se elaboró la expresión Q_u/A_{sc} vs. S (figura 6), con el fin de evaluar la incidencia de la separación y del diámetro de los conectores, y vincular estas variables a una expresión general de diseño de conectores tipo tornillo.

At the beginning of this analysis, specimen behaviour was compared in terms of screw shear stress caused by load failure. The Q_u/A_{sc} cf S graph (Figure 6) was drawn up to assess the influence of screw diameter and spacing and link these variables to a general expression for screw connector design.

Tabla 5. Esfuerzos de falla por conector.

Table 5. Shear stress per screw connector

	ESFUERZO DE FALLA POR CONECTOR (MPa)		
	PROBETA 1	PROBETA 2	PROBETA 3
M4-1-0-1,2,3	416.26	398.18	374.66
M4-2-8-1,2,3	342.35	393.97	374.04
M4-2-12-1,2,3	431.71	289.68	303.02
M4-2-14-1,2,3	400.81	333.57	333.57
M4-3-12-1,2,3	280.90	320.76	322.81
M4-3-14-1,2,3	318.24	279.44	323.10
M5-1-0-1,2,3	301.92	314.61	363.49
M5-2-8-1,2,3	289.44	254.05	196.63
M5-2-12-1,2,3	304.16	279.89	306.30
M5-2-14-1,2,3	269.33	319.11	292.48
M5-3-12-1,2,3	211.09	213.94	201.73
M5-3-14-1,2,3	175.10	186.30	250.49
M6-1-0-1,2,3	340.99	260.54	338.33
M6-2-8-1,2,3	228.47	265.61	216.02
M6-2-12-1,2,3	234.28	247.66	250.67
M6-2-14-1,2,3	189.65	203.11	220.24
M6-3-12-1,2,3	185.63	205.71	187.27
M6-3-14-1,2,3	206.88	175.23	204.23

	FAILURE STRESS PER SHEAR CONNECTOR (MPa)		
	SPECIMEN 1	SPECIMEN 2	SPECIMEN 3
M4-1-0-1,2,3	416.26	398.18	374.66
M4-2-8-1,2,3	342.35	393.97	374.04
M4-2-12-1,2,3	431.71	289.68	303.02
M4-2-14-1,2,3	400.81	333.57	333.57
M4-3-12-1,2,3	280.90	320.76	322.81
M4-3-14-1,2,3	318.24	279.44	323.10
M5-1-0-1,2,3	301.92	314.61	363.49
M5-2-8-1,2,3	289.44	254.05	196.63
M5-2-12-1,2,3	304.16	279.89	306.30
M5-2-14-1,2,3	269.33	319.11	292.48
M5-3-12-1,2,3	211.09	213.94	201.73
M5-3-14-1,2,3	175.10	186.30	250.49
M6-1-0-1,2,3	340.99	260.54	338.33
M6-2-8-1,2,3	228.47	265.61	216.02
M6-2-12-1,2,3	234.28	247.66	250.67
M6-2-14-1,2,3	189.65	203.11	220.24
M6-3-12-1,2,3	185.63	205.71	187.27
M6-3-14-1,2,3	206.88	175.23	204.23

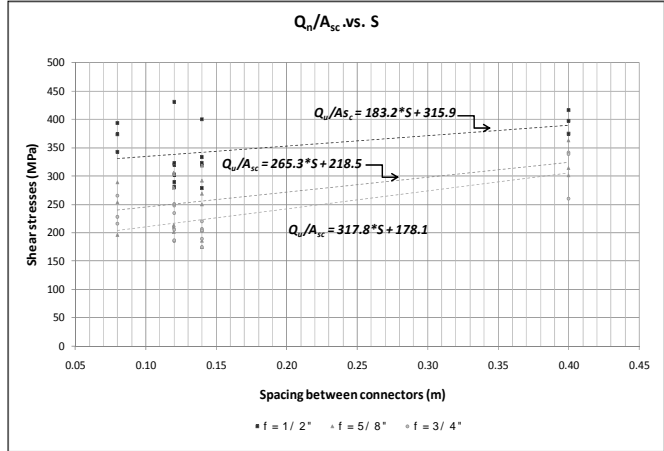
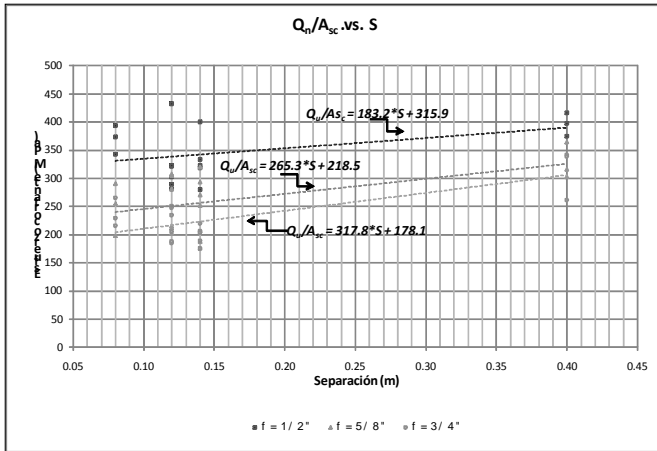


Figura 6. Q_u/A_{sc} vs. S .

Figure 6. Q_u/A_{sc} cf S

En la figura 6 se evidencia que hay mayores esfuerzos al ser menor el diámetro de los tornillos, independientemente de la separación y del número de tornillos que se usen. De otra parte, también se aprecia la relación que existe entre los esfuerzos y la separación para cada diámetro, en la cual a menor separación hay un menor esfuerzo en el tornillo. Este hecho también se vio reflejado en las curvas carga-desplazamiento de la investigación de Hurtado [7], donde se observó que a menor diámetro se presenta mayor degradación en la rigidez de la sección.

Figure 6 shows that connector shear stress was greater when screw diameter was less, regardless of screw spacing and the number used. It also shows the relationship between shear stress and spacing for each diameter; screw stress was lower for smaller separations. This was also in Hurtado's thesis [7] stating that load-slip curves show that the smaller the screw diameter, the greater section degradation stiffness.

Partiendo de los análisis realizados por García y Molina [5], quienes plantearon la formulación (3), y teniendo en cuenta la relación de proporcionalidad que existe entre los esfuerzos, la separación y el diámetro f , se plantea una fórmula:

Based on Garcia & Molina [5] who proposed formulation (3), and taking into account the relationship between screw connector shear stress, spacing and diameter, the following formulation was stated:

$$Q_n = \alpha_\beta \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^\beta \cdot A_{sc} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \quad (6)$$

$$Q_n = \alpha_\beta \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^\beta \cdot A_{sc} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \quad (6)$$

En español

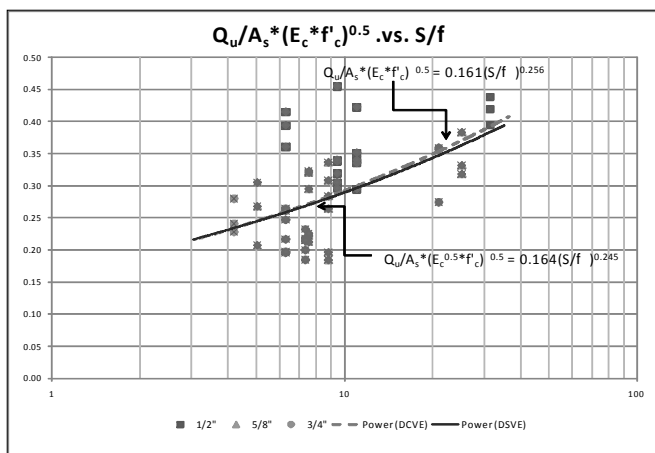
In English

Esta formulación permite relacionar la resistencia y el módulo de elasticidad del concreto, el esfuerzo cortante de los conectores y la relación S/f de una manera dimensional fácil de aplicar.

Inicialmente, para determinar el exponente b se consideró la ecuación (7), donde sólo se reorganiza la ecuación (6) y la regresión exponencial correspondiente se hace con los datos existentes. Los resultados obtenidos se muestran en la ecuación 7:

$$\frac{Q_u}{A_{sc} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5}} = \alpha_\beta \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^\beta \quad (7)$$

Observando la variabilidad de la información de las 54 probetas, en la figura 7 se plantean dos regresiones: una, en la que se consideran todos los datos, y otra, en la que para evitar la dispersión que provocan valores extremos en la relación se excluyeron los valores superiores al 95% del valor máximo, y los valores inferiores al 105% del valor mínimo calculado de la misma relación.



(DSVE – Datos sin valores extremos, DCVE – Datos con valores extremos).
Figura 7. Regresión para obtención del exponente b.

Acorde con las curvas de la regresión, se adoptó b = 0,25 dado que el exponente presenta poca variación y además facilita el manejo de la formulación.

El siguiente paso consiste en establecer el valor de la pendiente a₂₅. Para ello se hizo la regresión lineal indicada en (8), donde se hizo el análisis con y sin los datos extremos. En las regresiones se obtuvieron a₂₅ de 0.143 y 0.164 respectivamente, como se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$\frac{Q_u}{A_{sc}} = 0.143 \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \approx \frac{1}{7} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \quad (8)$$

$$\frac{Q_u}{A_{sc}} = 0.164 \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \approx \frac{1}{6} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \quad (9)$$

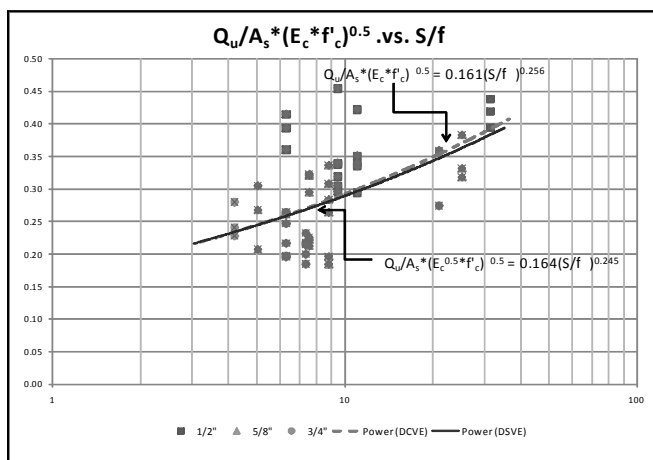
Por seguridad se toma a₂₅ = 0.14. De igual manera, para la ecuación de diseño se considera que la relación pasa por el punto (0,0) de la gráfica, con el propósito de no tener en cuenta la adherencia entre el concreto y el perfil, dado que la resisten-

This equation allows compressive strength to be linked to the elasticity modulus of concrete, along with connector shear stress and S/f relationship in an easily applicable manner.

Equation (7) was considered where equation (6) was otherwise arranged and exponential regression was done from experimental data. These results are shown in Figure 7.

$$\frac{Q_u}{A_{sc} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5}} = \alpha_\beta \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^\beta \quad (7)$$

Two regressions are shown in Figure 7 in view of the variability of information for the 54 specimens; the first assessed all experimental results and the other excluded extreme upper and lower values (i.e. top and bottom 5%).



DSVE – results minus 5% extreme values, DCVE – results with 5% extreme values

Figure 7. Regression to find exponents

According to the regression curves, b=0.25 was adopted due to this coefficient having little variation and allowing easy handling of the formulation.

The next step was to find out the value of slope a₂₅. Linear regression was done (Figure 8) with and without extreme data. The values for coefficient a₂₅ were 0.143 and 0.164, given in the following equations:

$$\frac{Q_u}{A_{sc}} = 0.143 \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \approx \frac{1}{7} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \quad (8)$$

$$\frac{Q_u}{A_{sc}} = 0.164 \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \approx \frac{1}{6} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \quad (9)$$

a₂₅=0.14 was thus taken. It was considered that the relationship crossed through point (0,0) of the graph for designing the equation so as to disregard the adherence effect between steel profile and concrete slab because the frictional strength between these

En español

In English

cia por fricción es mínima entre el perfil y la placa de concreto, como ya se mencionó. De esta manera, la ecuación general de diseño que se propone en este estudio corresponde a:

$$\frac{Q_n}{A_{sc}} = 0.14 \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \leq F_u \quad (10)$$

donde:

Q_n : Capacidad resistente de un conector tipo tornillo [N].

A_{sc} : Área nominal de un conector tipo tornillo [mm²]

f_c' : Resistencia a la compresión mínima especificada del concreto [MPa]

E_c : Módulo de elasticidad del concreto [MPa]

ϕ : Diámetro de los conectores [mm]

S : Separación entre conectores [mm]

F_u : Resistencia a tensión mínima especificada para los conectores de cortante tipo tornillo [MPa].

La ecuación de diseño (10) se representa en la figura 9 para resistencias nominales de concreto de 21 MPa y 28 MPa, y diámetros de conectores de 1/2", 5/8", 3/4" y 7/8", materiales comúnmente utilizados en el medio de la construcción colombiana.

En esta gráfica se corrobora la relación de proporcionalidad existente entre el diámetro de los tornillos, la resistencia del concreto y la carga resistente por conector tipo tornillo, por lo tanto se concluye que para una determinada separación se puede obtener una mayor carga nominal por tornillo, aumentando su diámetro, incrementando la resistencia del concreto, o una combinación de las dos, medidas con las que también se mejora el comportamiento de la interfaz acero-tornillo-concreto de las vigas compuestas.

elements was negligible. The general equation proposed in this research was thus:

$$\frac{Q_n}{A_{sc}} = 0.14 \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \leq F_u \quad (10)$$

where:

Q_n : nominal screw connector shear strength [N]

A_{sc} : nominal screw connector area [mm²]

f_c' : compressive strength of concrete [MPa]

E_c : concrete modulus of elasticity [MPa]

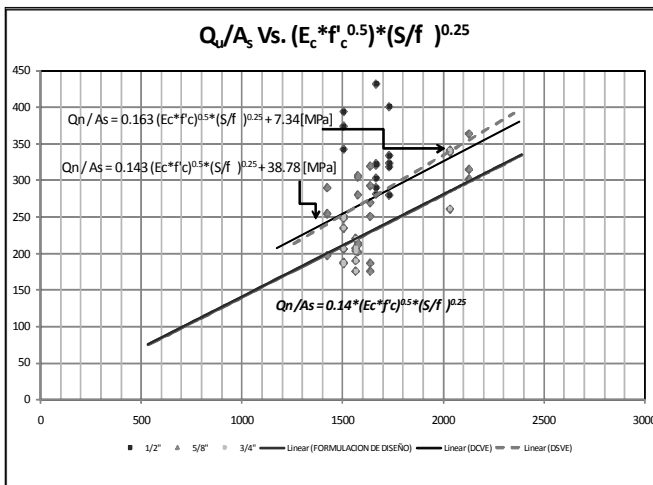
ϕ : connector diameter [mm]

S : spacing between stud connectors [mm]

F_u : ultimate screw tensile strength [MPa]

Design equation (10) (shown in Figure 9) had 21MPa and 28MPa compressive strength for concrete and 1/2", 5/8", 3/4" and 7/8" connector diameter. Such materials are often used in Colombian construction work.

This Figure confirms the relationship between screw diameter, concrete's compressive strength and screw connector shear load. It may thus be concluded that specified composite screw spacing may lead to greater nominal screw load and increasing connector diameter may lead to increased concrete compressive strength or a combination of both. These measurements may also improve composite beams' steel-screw-concrete interface behaviour.



(DSVE – Datos sin valores extremos, DCVE – Datos con valores extremos).
 Figura 8. Regresión, planteamiento general de diseño.

DSVE – results without 5% extreme values DCVE – results with 5% extreme values

Figure 8. Regression, general design formulation

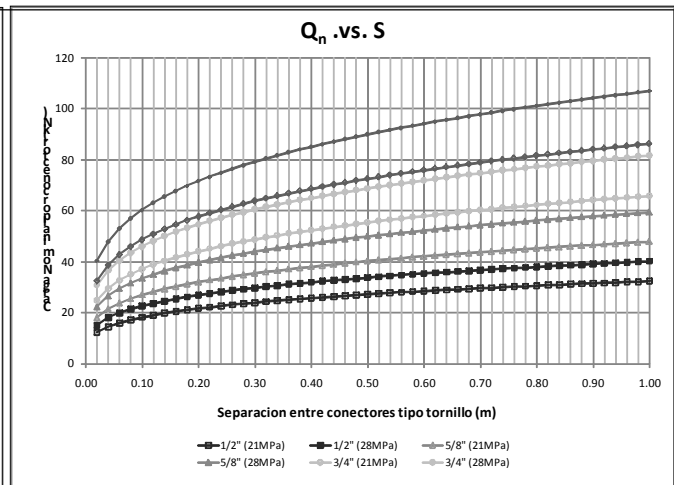


Figura 9. Ecuación de diseño para concreto de 21 MPa y 28 MPa

Figure 9. Design equation curves at 21MPa and 28MPa concrete strength

Por otra parte, la separación también tiene un papel fundamental en la resistencia por corte de la sección compuesta. Al incrementar la separación entre tornillos, cada conector va a estar expuesto a una mayor carga. Por lo tanto, los tornillos podrían tener un comportamiento inelástico y presentar deformaciones permanentes, donde la distribución de fuerza cortante en el conjunto de tornillos no va a ser uniforme, contrario a lo planteado en la hipótesis de este análisis. De igual manera, si la separación se reduce, aparte de incurrir en sobrecostos, se puede limitar la acción de cada conector debido a que se superponen las zonas de aferencia de los conectores, con lo cual se reduce la eficiencia de los tornillos. Se recomienda hacer un estudio con respecto a las separaciones entre conectores tipo tornillo, para precisar los valores máximos y mínimos permisibles en el diseño, ya que la NSR solamente establece lineamientos para espigos.

Conclusions

Conforme con el enfoque planteado en este documento para la formulación de conectores tipo tornillo, al analizar lo que pasa a nivel de esfuerzos cortantes se puede estudiar más en detalle el desempeño de los tornillos como conectores en las secciones compuestas.

De acuerdo con las variables involucradas en esta investigación, se plantea como ecuación de diseño para conectores de cortante tipo tornillo la expresión:

$$Q_n = 0.14 \cdot A_{sc} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \leq F_u \cdot A_{sc}$$

Con las probetas sin conectores se evidenció que la adherencia entre el perfil metálico y la placa de concreto es mínima, por ello la resistencia a cortante por fricción entre el perfil y la losa de concreto no se debe tener en cuenta para determinar la resistencia a cortante de la sección; asimismo, la interacción entre los dos materiales en las secciones compuestas debe estar totalmente garantizada por los conectores de cortante.

Nomenclatura

A_{sc}	= Nominal area of a screw connector [mm ²].
E_c	= Concrete modulus of elasticity [MPa].
f_c'	= Compressive strength of concrete [MPa].
S	= Spacing between connectors [mm].
f	= Screw connector diameter [mm].
F_u	= Ultimate tensile strength of the screw [MPa].
Q_n	= Nominal shear strength of the screw connector [N].
a_β	= Correlation coefficient of the slope given to a β coefficient.
b	= Correlation coefficient of the relationship (S/f).

Agradecimientos

La primera etapa de la investigación "Comportamiento de los conectores de cortante tipo tornillo para un sistema de sección compuesta" fue apoyada por la División de Proyectos de Investigación (DIB) de la Universidad Nacional de Colombia mediante la convocatoria 20201005550, resolución 70 del 10 de febrero del 2005.

Connector spacing also exerts an important influence on composite section shear strength. If the spacing between screws is increased, each connector will be subjected to a heavier load. Screws could thus have inelastic behaviour with permanent deformations where shear load distribution in the set of screws will not be uniform (thereby going against this work's initial hypothesis). If screw spacing is reduced, then design will become very expensive and system efficiency will be reduced because screw performance will become limited by overlapping afferent areas. Given that the NSR only sets guidelines for stud spacing, screw spacing should be studied to define minimum and maximum allowable values in design.

Conclusions

The approach adopted in this paper for designing screw connector formulation regarding screw shear stress led to a detailed study of screw performance in composite sections.

Taking into account the variables involved in this study, the proposed design equation is:

$$Q_n = 0.14 \cdot A_{sc} \cdot (E_c \cdot f_c')^{0.5} \cdot \left(\frac{S}{\phi}\right)^{0.25} \leq F_u \cdot A_{sc}$$

Specimens lacking connectors showed that concrete slab adherence to steel profile was negligible, so friction strength should be disregarded when ascertaining composite section shear strength. Shear stress transfer between concrete and steel must thus only be ensured by shear connectors.

Nomenclature

A_{sc}	= nominal screw connector area [mm ²]
e_c	= concrete modulus of elasticity [MPa]
f_c'	= compressive strength of concrete [MPa]
s	= spacing between connectors [mm]
f	= screw connector diameter [mm]
f_u	= ultimate screw tensile strength [MPa]
q_n	= nominal screw connector shear strength [N]
a_β	= correlation coefficient of the slope given a β coefficient
b	= the relationship's coefficient of correlation (S/f)

Acknowledgements

This research's first phase was financed by the Universidad Nacional de Colombia's Research Division (DIB) (20201005550, Resolution 70 February 10th, 2005).

Referencias / References

- American Institute of Steel Construction., Specification for Structural Steel Buildings, Chicago, 2005.
- Asociación de Ingeniería Sísmica., NSR-98, Tomo 3, Bogotá, 1998, pp. F38-F39.
- Asociación de Ingeniería Sísmica., NSR-10, Título F, Bogotá, 2010, pp. F102-F103.
- Burnet, M., Oehlers D., Fracture of Mechanical Shear Connectors in Composite Beams MECH., STRUCT & MACH, 2001, pp. 1-41.
- García, A., Molina, M., Comportamiento de vigas de sección compuesta con perfiles de acero laminado y losa de concreto empleando conectores de cortante tipo tornillo grado dos (2)., Ingeniería e Investigación, 2008, pp. 11-21.
- Hurtado, X., Molina, M., Linero, D., Comportamiento de conectores de cortante tipo tornillo de resistencia grado dos para un sistema de sección compuesta., Ingeniería e Investigación, 2008, pp. 4-14.
- Hurtado, X., Comportamiento de conectores tipo tornillo grado dos para un sistema de sección compuesta con concreto de 21MPa ante sollicitación de corte directo., Tesis de Magister en Ingeniería- Estructuras, Universidad Nacional de Colombia, 2007.
- Nie, J., Cai, C., Steel-Concrete Composite Beams Considering Shear Slip Effects., Journal of Structural Engineering, Vol. 129, 2008, pp. 4-14.
- Ollgaard, J., Slutter, R., Fisher, J., Shear strength of stud connectors in lightweight and normal-weight concrete., Engineering Journal, AISC, 1971, pp. 55-64.
- Viest, I., Investigation of stud shear connectors for composite concrete and steel t-beams., Journal of the American Concrete Institute, ACI, 1956, pp. 875-890.