

# Caracterización experimental y teórica de conexiones metálicas asimétricas susceptibles a falla de pernos

## Experimental and theoretical characterization of steel asymmetrical connections prone to bolt failure

J. Chanchi <sup>1\*</sup>, J. Castro \*, C. Gómez \*

\* Universidad Nacional de Colombia, Caldas, COLOMBIA

Fecha de Recepción: 29/07/2018  
Fecha de Aceptación: 20/12/2018  
PAG 193-204

### Abstract

*This article describes and proposes a model of the force versus elongation behaviour of asymmetrical connections prone to bolt failure when subjected to quasi-static axial load. 14 connections were assembled with one bolt varying the distance from the bolt to the edge of the clamped zone, and 14 connections were assembled with two bolts varying the distance between bolts. Results show that the axial force versus elongation behaviour of the connection is approximately trilinear, that while the connection stiffness is not sensitive to the bolt location in the clamped zone, the plastic elongation of the connection is. The model shows that the stiffness of the asymmetrical connection can be predicted from the stiffness of the connection components assessed by means of spring elements or beam elements, and that the load capacity of the connection can be predicted using the dry friction theory of Coulomb and the shear bolt capacity.*

*Keywords: Steel connection, Asymmetrical connection, Distance between bolts, Distance from bolt to edge, Asymmetrical connection stiffness*

### Resumen

El Este artículo describe y propone un modelo del comportamiento fuerza contra elongación de conexiones metálicas asimétricas susceptible a falla de pernos cuando sometidas a carga axial cuasi-estática. 14 conexiones se ensamblaron con un perno variando la distancia desde el perno al borde de la zona de unión de las platinas y 14 conexiones se ensamblaron con dos pernos variando la distancia entre pernos. Los resultados experimentales muestran que el comportamiento fuerza axial contra elongación de la conexión es aproximadamente trilineal y que mientras la rigidez de la conexión no es sensible a la localización de los pernos en la zona de unión de las platinas; la elongación plástica de la conexión si lo es. El modelo muestra que la rigidez de la conexión asimétrica se puede predecir evaluando la rigidez de los componentes de la conexión usando elementos de resorte y viga y que la capacidad de carga de la conexión se puede predecir con base en la teoría de la fricción seca de Coulomb y la capacidad a corte de los pernos.

**Palabras clave:** Conexión metálica, Conexión asimétrica, Distancia entre pernos, Distancia desde el perno al borde, Rigidez de conexión asimétrica

## 1. Introducción

Las conexiones metálicas apernadas usadas para transferir cargas axiales a través de esfuerzos de corte y aplastamiento son denominadas conexiones de corte. Estas conexiones de acuerdo a la configuración de los elementos que unen pueden clasificarse en simétricas y asimétricas. Mientras en conexiones simétricas un elemento central transmite la carga a dos elementos exteriores, en conexiones asimétricas la carga se transmite entre dos elementos únicamente (Bresler et al., 1968). Estos dos tipos de conexiones pueden usarse en diferentes sistemas estructurales de manera convencional para únicamente unir elementos estructurales o de manera sofisticada como mecanismo de disipación de energía sísmica (Grigorian y Popov, 1994) (Clifton, 2005). Para conexiones usadas de manera convencional, el diseño se rige únicamente por la capacidad de carga asociada a los estados límites de falla y muy poco interés se le atribuye a la rigidez de la conexión. De hecho,

cuando se analizan y diseñan sistemas estructurales, las rigideces de las conexiones no son consideradas debido a que su análisis es complejo e indeterminado, en tal sentido se consideran como elementos muy rígidos cuando comparados con el sistema estructural (Trahair y Bradford, 1988) (McGuire, 1968). Cuando la cuantificación de la rigidez de las conexiones es requerida regularmente se acude a métodos numéricos sofisticados tales como un análisis por elementos finitos validados a partir de información experimental como los reportados por (Clifton, 2005) para el caso de conexiones asimétricas. Esta metodología debe seguirse, no solo debido a que el mecanismo de transferencia de carga de las conexiones es complejo; sino también porque el mecanismo es sensible a la presencia de perforaciones y a la posible fluencia de los componentes de la conexión (Gorenc y Tynyoun, 1984). Debido a la ausencia de una metodología simple que no requiera el uso de métodos numéricos sofisticados para la cuantificación de la rigidez de conexiones asimétricas, este artículo propone una metodología simple para evaluar la rigidez de este tipo de conexión validado a partir de información experimental y usando teoría simple de elasticidad como sugerido por (Schenker et al., 1954) y (Grigorian y Popov, 1994) en la evaluación de rigidez de conexiones simétricas. Este artículo pretende responder las siguientes preguntas:

<sup>1</sup> Autor de Correspondencia:

Universidad Nacional de Colombia, Caldas, COLOMBIA  
E-mail: jcchanchigo@unal.edu.co



- i. ¿Cuál es el comportamiento fuerza axial contra elongación de la conexión asimétrica susceptible a la falla de los pernos?
- ii. ¿Cuál es el efecto de variar la localización de los pernos en la zona de unión de las platinas sobre la tendencia de la curva fuerza axial contra elongación y sobre la deformabilidad de la conexión asimétrica susceptible a la falla de los pernos?
- iii. ¿Cuál es un modelo teórico para estimar la capacidad de carga de la conexión asimétrica susceptible a la falla de los pernos?
- iv. ¿Cuál es un modelo teórico para estimar la rigidez de la conexión asimétrica susceptible a la falla de los pernos?

- v. ¿Cuál es un modelo teórico que represente el comportamiento fuerza axial contra elongación de la conexión asimétrica susceptible a la falla de los pernos?

## 2. Materiales

La conexión asimétrica se conformó con dos platinas denominadas fija y móvil unidas con pernos en una zona denominada zona de unión de las platinas. Un primer tipo de conexión denominado Ensamblaje 1 se conformó uniendo las platinas con un perno y variando la distancia entre el borde de la perforación del perno y el borde de la zona de unión de las platinas ( $B$ ) (Figura 1a).

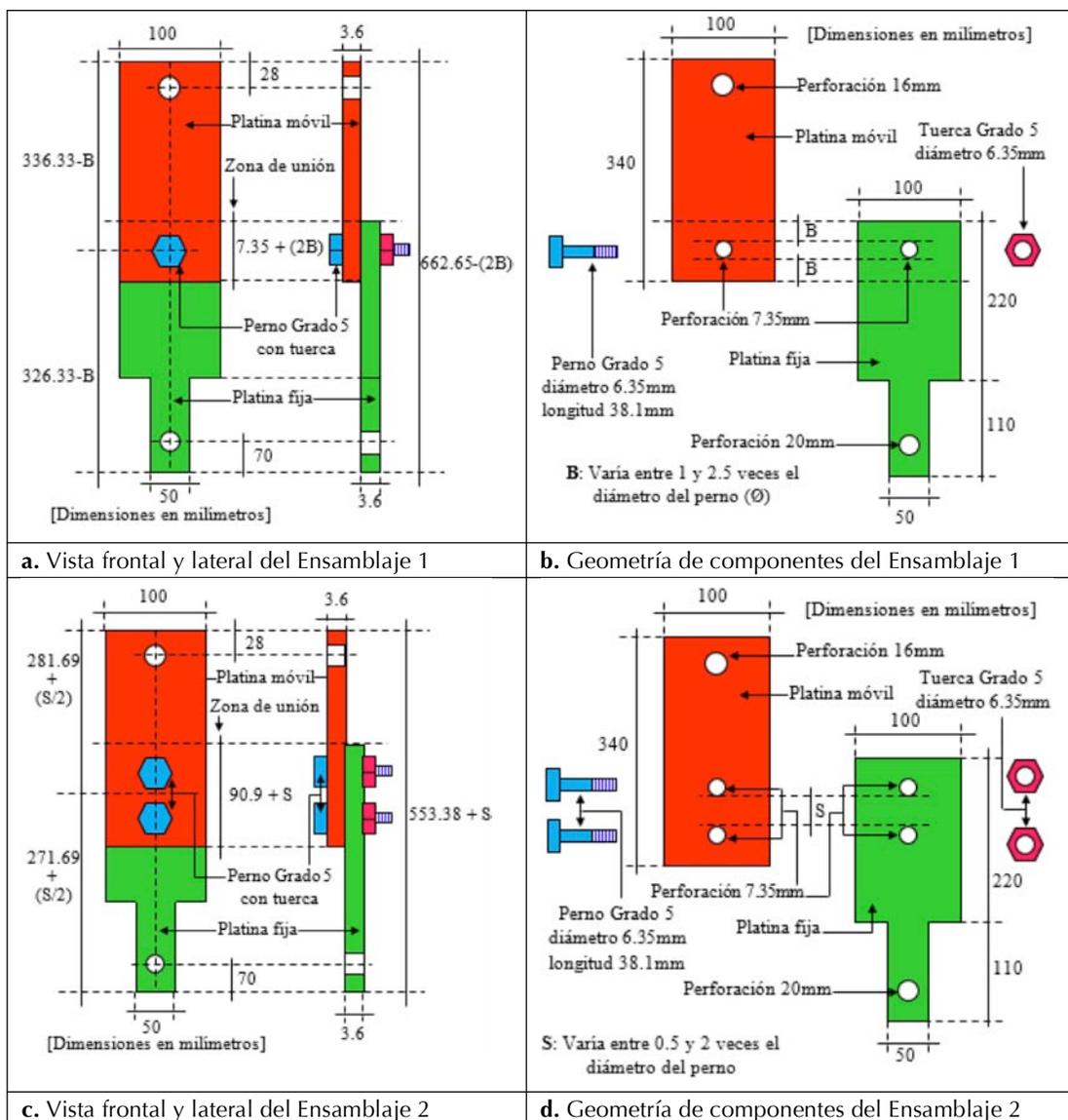


Figura 1. Geometría de los componentes y de los ensambles 1 y 2 de la conexión

Un segundo tipo de conexión denominado Ensamblaje 2 se conformó uniendo las platinas con dos pernos, variando la distancia entre bordes de las perforaciones de los pernos (S) y manteniendo constante la distancia entre el borde de las perforaciones de los pernos y el borde de la zona de unión de las platinas (Figura 1c). En los dos ensamblajes las platinas fija y móvil fueron manufacturadas con acero A36 (esfuerzo de fluencia de 250MPa, esfuerzo último de 410MPa). Las dimensiones de las platinas fija y móvil en ambos ensamblajes se muestran en la (Figura 1). Los pernos en la zona de unión de las platinas fueron de acero medio carbono tratado térmicamente tipo SAE Grado 5 (esfuerzo de prueba de 595MPa, esfuerzo último de 840MPa) con diámetro 6.35mm y longitud 38.1mm. Los pernos fueron ensamblados usando únicamente una tuerca y tensionados a la carga de prueba usando el

método del giro de la tuerca (Figura 1). En ambos ensamblajes las conexiones fueron diseñadas para que fallara el perno a esfuerzos de corte antes que las platinas a esfuerzos de tensión y para que los bordes de las perforaciones fueran susceptibles a deformaciones por aplastamiento apreciables visualmente.

### 3. Metodos de ensayo

#### 3.1 Descripción del montaje

Cada conexión se ensayó en un montaje dispuesto verticalmente en una prensa hidráulica servo-controlada, en donde la conexión fue provista de un apoyo fijo y aun apoyo móvil (Figura 2a) (Figura 2b).



Figura 2. Montaje del ensayo de la conexión

El apoyo fijo de la conexión se conformó restringiendo el desplazamiento vertical de la platina fija a través de un pasador denominado fijo que atravesó la platina fija y se apoyó en la cara inferior de la platina perforada (Figura 1c). El apoyo móvil de la conexión se conformó uniéndolo al actuador a la platina móvil a través de una camisa metálica provista de un pasador denominado móvil (Figura 2b) (Figura 2d). Este montaje fue instrumentado con una celda de carga conectada en serie con el actuador y con un extensómetro localizado a lo largo de la conexión (Figura 2a) (Figura 2b) (Figura 2c) (Figura 2d).

### 3.2 Cantidad y metodología de los ensayos

28 ensayos distribuidos en 14 ensayos en el Ensamblaje 1 y 14 ensayos en el Ensamblaje 2 fueron realizados (Tabla 1). Los 14 ensayos del Ensamblaje 1 se

dividieron en 7 grupos en los cuales la distancia entre el borde de la perforación del perno y el borde de la zona de unión de las platinas (B) se varió en función del número de veces el diámetro del perno ( $\emptyset$ ) (Tabla 1). Los 14 ensayos del Ensamblaje 2 se dividieron en 7 grupos en los cuales la distancia entre bordes de las perforaciones de los pernos en la zona de unión de las platinas (S) se varió en función del número de veces el diámetro del perno ( $\emptyset$ ) (Tabla 1) y la distancia desde el borde de las perforaciones al borde de la zona de unión de las platinas se mantuvo constante e igual a seis veces el diámetro del perno. En cada ensayo la conexión fue cargada axialmente de manera cuasi-estática a una velocidad de 10mm/s desde una carga nula hasta la carga que falló el perno. Para cada ensamblaje y en cada uno de los ensayos se utilizó un juego nuevo de platinas y de pernos.

**Tabla 1.** Cantidad de ensayos por ensamblaje de la conexión

ENSAMBLAJE 1			ENSAMBLAJE 2		
B expresado en mm y en número de veces un diámetro de perno ( $\emptyset$ ) de 6.35 mm		Cantidad de ensayos	S expresado en mm y en número de veces un diámetro de perno ( $\emptyset$ ) de 6.35 mm		Cantidad de ensayos
mm	#	#	mm	#	#
6.35	1.0 $\emptyset$	2	3.18	0.5 $\emptyset$	2
7.94	1.25 $\emptyset$	2	4.76	0.75 $\emptyset$	2
9.53	1.5 $\emptyset$	2	6.35	1.0 $\emptyset$	2
11.11	1.75 $\emptyset$	2	7.94	1.25 $\emptyset$	2
12.70	2.0 $\emptyset$	2	9.53	1.5 $\emptyset$	2
15.88	2.5 $\emptyset$	2	11.11	1.75 $\emptyset$	2
19.05	3.0 $\emptyset$	2	12.70	2.0 $\emptyset$	2
Total ensayos		14	Total ensayos		14

## 4. Resultados y análisis

### 4.1 Comportamiento fuerza axial contra elongación de la conexión asimétrica.

En la figura 3 se puede observar que la tendencia global de la curva fuerza axial contra elongación de la conexión es similar para los ensamblajes 1 y 2. Esta similitud indica que la tendencia de la curva fuerza axial contra elongación no es sensible a la cantidad de pernos en la zona de unión de las platinas ni a la localización de los pernos en

la zona de unión de las platinas. Tres zonas de tendencia casi lineal definen la curva fuerza axial contra elongación (Figura 3). La primera zona es denominada pre-deslizamiento debido a que no se observó movimiento aparente de las platinas ni contacto entre las platinas y el vástago de los pernos. En esta zona la conexión exhibe su máxima rigidez y el comportamiento de la conexión está gobernado por el comportamiento elástico de las platinas y de los pasadores (Figura 3).

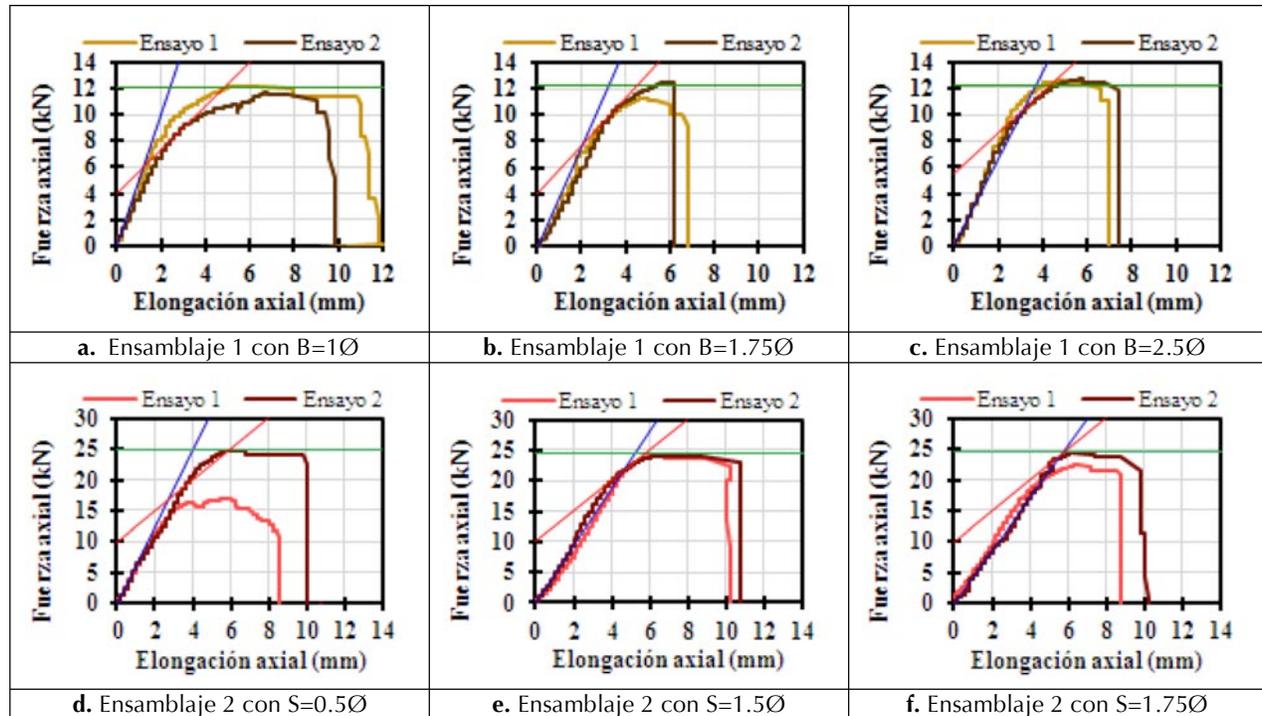


Figura 3. Curva fuerza axial contra elongación de los ensamblajes 1 y 2

La segunda zona es denominada post-deslizamiento debido a que la platina móvil se desliza hasta entrar en contacto con el vástago de los pernos produciendo el deslizamiento de los pernos a lo largo de la perforación. Mientras que las platinas y los pasadores se comportan elásticamente, los pernos se comportan elásticamente al inicio de la zona e inician fluencia al final de la zona. La conexión exhibe una reducción de rigidez no solo debido a que la rigidez de los pernos es pequeña comparada con la rigidez de las platinas y los pasadores, sino también debido a que los pernos inician fluencia (Figura 3). En la tercera zona denominada plástica la rigidez de la conexión se torna nula debido a que los pernos fluyen totalmente hasta la falla a corte y las zonas de las perforaciones en contacto con los pernos fluyen debido a la concentración de esfuerzos de aplastamiento transferidos por los pernos. Una vez los pernos fallan a corte la conexión se descarga completamente (Figura 3).

#### 4.2 Deformabilidad de las perforaciones

Para los ensamblajes 1 y 2 las platinas fijas fueron extraídas después del ensayo. La figura 4 muestra la zona de unión de las platinas fijas desmontadas y las respectivas curvas fuerza axial contra elongación para los dos ensamblajes. Se puede observar que la máxima deformabilidad en las perforaciones se presentó en la conexión con la mínima separación entre el borde de la perforación del perno y el borde de la zona de unión de las platinas (Figura 4a) y en la conexión con la mínima distancia entre bordes de perforaciones de los pernos en la zona de unión de las platinas (figura 4d). Para ambos ensamblajes se observa también que el aumento de estas distancias disminuyó la deformabilidad en las perforaciones (Figura 4b) (Figura 4e) y que las deformabilidades son pequeñas para distancias superiores a 1.75 veces el diámetro del perno (Figura 4c) (Figura 4f).



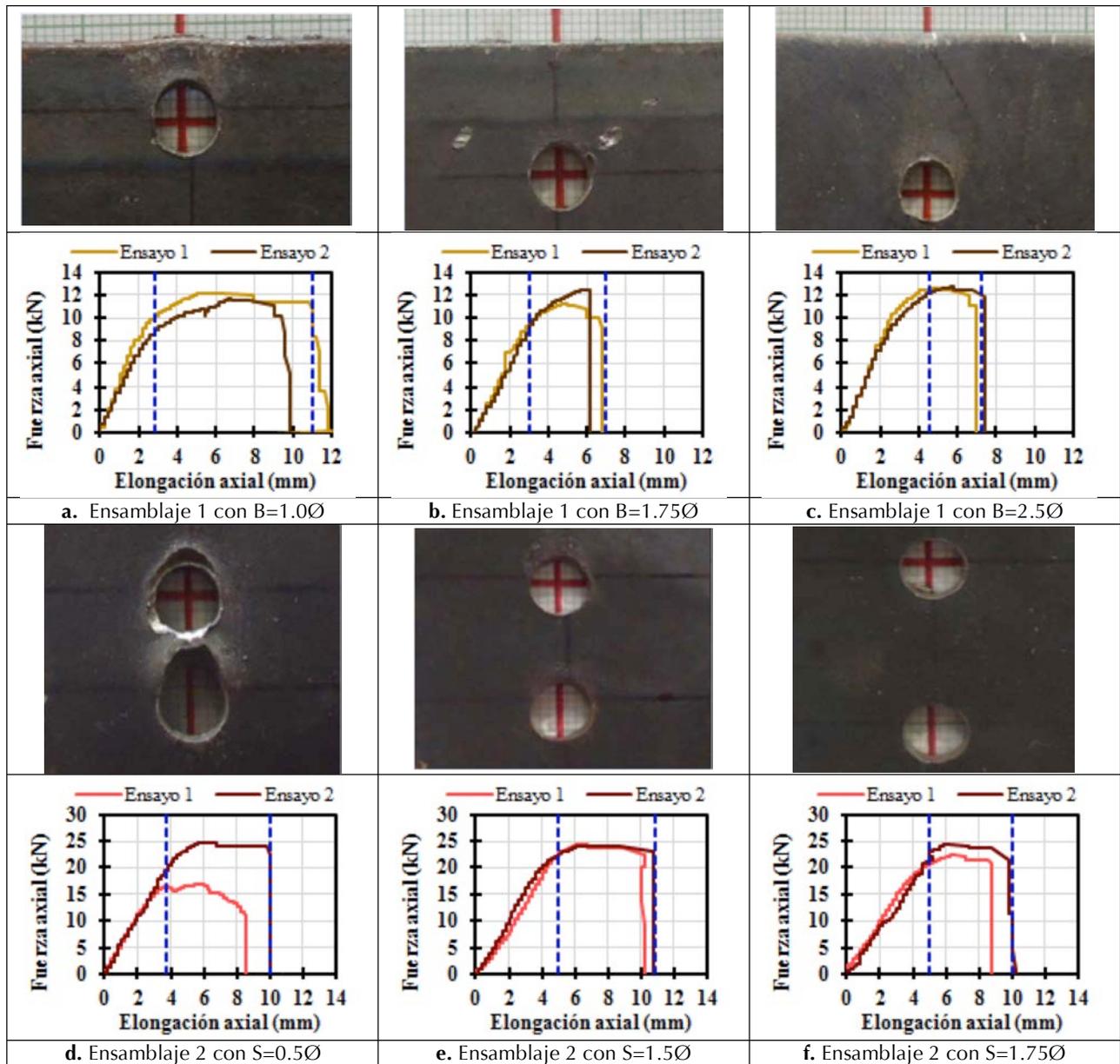


Figura 4. Curva fuerza axial contra elongación y deformabilidad de las perforaciones para los ensambles 1 y 2

La (Figura 4) muestra que el aumento de estas distancias disminuye la amplitud de la zona plástica de la curva fuerza axial contra elongación. Esta reducción de la zona plástica es debida a que al aumentar estas distancias los esfuerzos de contacto de los pernos sobre las platinas se distribuyen en mayores áreas disminuyendo la deformabilidad de las zonas cercanas a las perforaciones.

## 5. Desarrollo del modelo teórico

### 5.1 Capacidad de carga de la conexión asimétrica

La capacidad de carga de la conexión se definió a partir de la fuerza que inicia el deslizamiento de la platina

móvil denominada fuerza que activa el deslizamiento y de la fuerza que produce la falla de los pernos.

#### 5.1.1 Fuerza que activa el deslizamiento

La fuerza que activa el deslizamiento de la platina móvil se modeló considerando que el deslizamiento se activa cuando la fricción en la interfase entre las platinas fija y móvil es superada. Esta fuerza de fricción se evaluó usando la teoría de la fricción seca de Coulomb (Fórmula 1), en donde la fuerza de fricción ( $F$ ) es proporcional a un coeficiente de fricción en la interfase de las superficies en las que se produce el deslizamiento ( $\mu$ ) y a la fuerza normal entre las superficies ( $N$ ) (Popov, 2002). En conexiones asimétricas esta teoría se aplicó considerando el coeficiente de fricción entre las platinas fija y móvil y considerando la fuerza normal entre

SPANISH VERSION.....

las superficies fija y móvil como el producto del número de pernos ( $m$ ), el número de interfases de fricción ( $n$ ) y la fuerza de tensionamiento inducida en cada perno al momento del ensamblaje de la conexión ( $T$ ) (Fórmula 2).

$$F = \mu \times N \quad (1)$$

$$F = \mu \times [m \times n \times T] \quad (2)$$

### 5.1.2 Fuerza que falla los pernos

La fuerza que falla los pernos ( $F_u$ ) se modeló considerando que los pernos fallan cuando las platinas fija y móvil entran en contacto con los pernos produciendo esfuerzos cortantes que superan la resistencia a corte en la zona roscada de los pernos. El esfuerzo último a corte de los pernos ( $\tau$ ) se consideró proporcional al esfuerzo ultimo a tensión de los pernos ( $\sigma$ ) a través de un factor adimensional ( $\phi$ ) de valor 0.6 siguiendo la teoría de Von Mises (Beer et al.,

2010) (Fórmula 3). La resistencia última a corte en la zona roscada de los pernos ( $R$ ) se calculó como el producto entre el esfuerzo último a corte y el área efectiva en la zona roscada de los pernos expresada como una reducción del área bruta ( $A_{perno}$ ) a través de un factor adimensional ( $\beta$ ) de valor 0.7 (Fórmula 4).

$$\tau = \phi \times \sigma \quad (3)$$

$$F_u = \tau \times (\beta \times A_{perno}) \quad (4)$$

### 5.2 Rigidez de la conexión asimétrica

La conexión se dividió en cuatro componentes: el conjunto de platina fija y móvil, el pasador fijo, el pasador móvil y los pernos en la zona de unión de las platinas (Figura 5).

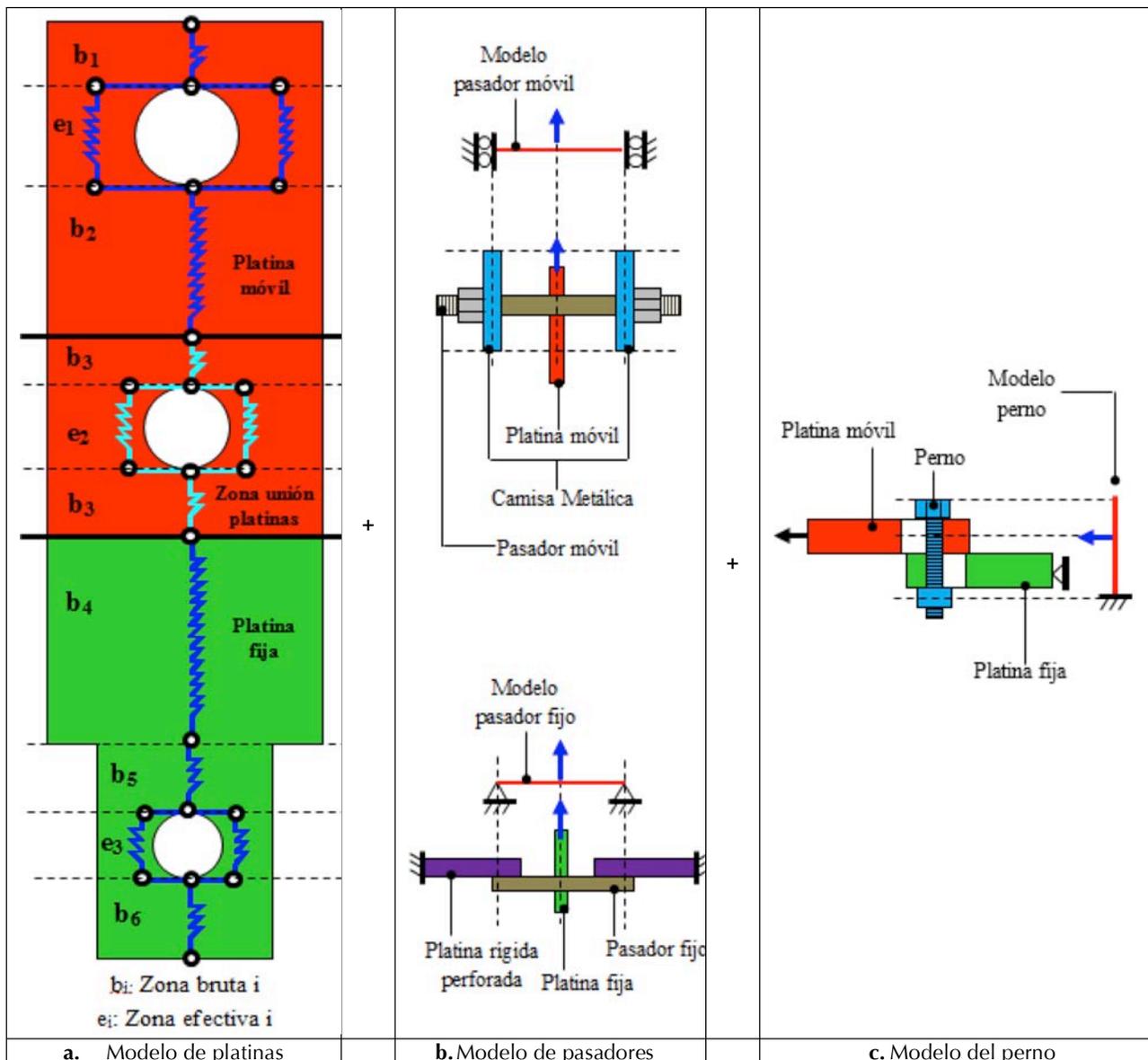


Figura 5. Rigidez de la conexión



La rigidez de la conexión ( $K$ ) se evaluó acoplando en serie la rigidez del conjunto de platina fija y móvil ( $K_{\text{platinas}}$ ), la rigidez del pasador fijo ( $K_{\text{pasador-fijo}}$ ), la rigidez del pasador móvil ( $K_{\text{pasador-móvil}}$ ) y la rigidez de los pernos en la zona de unión de las platinas ( $K_{\text{pernos}}$ ) (Fórmula 5).

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{platinas}}} + \frac{1}{K_{\text{pasador-fijo}}} + \frac{1}{K_{\text{pasador-móvil}}} + \frac{1}{K_{\text{pernos}}}} \quad (5)$$

### 5.2.1 Rigidez de las platinas

La rigidez del conjunto de platina fija y móvil se evaluó discretizando el conjunto en una sucesión de fracciones de platina denominadas efectiva y bruta, las cuales fueron asignadas a zonas de platina con perforación y sin perforación respectivamente. Las fracciones de platina bruta fueron representadas por un resorte y las fracciones de platina efectiva por dos resortes, uno a cada lado de la perforación (Figura 5a). La rigidez de cada resorte ( $K_i$ ) se evaluó en función del área de la fracción de platina ( $A_i$ ), el módulo de elasticidad ( $E_i$ ) y la longitud de la fracción de platina ( $L_i$ ) (Fórmula 6). La rigidez del conjunto de platina fija y móvil ( $K_{\text{platinas}}$ ) se evaluó acoplando en serie las rigideces de los resortes que representaron las fracciones de platina efectiva ( $K_{e_i}$ ) y las rigideces de las fracciones de platina bruta ( $K_{b_i}$ ) (Fórmula 7).

$$K_i = \frac{A_i \times E_i}{L_i} \quad (6)$$

$$K_{\text{platinas}} = \frac{1}{\sum \left[ \frac{1}{K_{e_i}} \right] + \sum \left[ \frac{1}{K_{b_i}} \right]} \quad (7)$$

### 5.2.2 Rigidez de los pasadores fijo y móvil

La rigidez de los pasadores fijo y móvil se evaluó considerando que estos se comportan como una viga simplemente apoyada sometida a una carga en el centro de la luz, la cual corresponde a la carga transferida por la platina fija y la platina móvil en el centro del pasador correspondiente (figura 5b). La rigidez de cada pasador ( $K_{\text{pasador}}$ ) se evaluó usando el módulo de elasticidad del pasador ( $E_{\text{pasador}}$ ), la inercia del pasador ( $I_{\text{pasador}}$ ) y la distancia entre soportes del pasador ( $L_{\text{pasador}}$ ) (Fórmula 8).

$$K_{\text{pasador}} = \frac{48 \times E_{\text{pasador}} \times I_{\text{pasador}}}{L_{\text{pasador}}^3} \quad (8)$$

### 5.2.3 Rigidez del perno en la zona de unión de las platinas

La rigidez del perno se evaluó considerando que este se comporta como una viga en voladizo empotrada en la mitad del espesor de la tuerca, con extremo libre en la parte superior de la cabeza del perno y sometida a una carga

puntual en la mitad del espesor de la platina móvil correspondiente a la transferida por la platina móvil al perno cuando entran en contacto (Figura 5c). La rigidez del perno se evaluó usando el módulo de elasticidad del perno ( $E_{\text{perno}}$ ), la inercia del perno ( $I_{\text{perno}}$ ), la distancia desde la mitad del espesor de la tuerca hasta la parte superior de la cabeza del perno ( $L_{\text{perno}}$ ) y la distancia desde el centro del espesor de la tuerca hasta el centro del espesor de la platina móvil ( $a_{\text{perno}}$ ) (Fórmula 9).

$$K_{\text{perno}} = \frac{6 \times E_{\text{perno}} \times I_{\text{perno}}}{a_{\text{perno}}^2 \times \left[ (3 \times L_{\text{perno}}) - a_{\text{perno}} \right]} \quad (9)$$

### 5.3 Modelo teórico de la curva fuerza axial contra elongación de la conexión

La curva fuerza axial contra elongación de la conexión fue representada usando un modelo trilineal (Figura 6a). La primera zona denominada pre-deslizamiento es limitada por la fuerza que activa el deslizamiento (Figura 6a) y la rigidez ( $K_{\text{pre-deslizamiento}}$ ) corresponde a la interacción en serie de las rigideces del conjunto de platina fija y móvil y de los pasadores fijo y móvil (Fórmula 10). Esta rigidez representa el caso en el cual el conjunto de platina fija y móvil y los pasadores se deforman elásticamente sin interacción con el vástago de los pernos (Figura 6b). La segunda zona denominada post-deslizamiento es limitada inferiormente por la fuerza que activa el deslizamiento y superiormente por la fuerza que falla los pernos (Figura 6a) y la rigidez ( $K_{\text{post-deslizamiento}}$ ) corresponde a la interacción en serie de las rigideces del conjunto de platina fija y móvil, de los pasadores fijo y móvil y de los pernos (Fórmula 11). Esta rigidez representa el caso en el cual la platina móvil se desliza hasta entrar en contacto con el vástago de los pernos produciendo el deslizamiento de los pernos a lo largo de la perforación. En este caso todos los componentes de la conexión se comportan elásticamente hasta iniciar la fluencia de los pernos (Figura 6c).

$$K_{\text{pre-deslizamiento}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{platinas}}} + \frac{1}{K_{\text{pasador-fijo}}} + \frac{1}{K_{\text{pasador-móvil}}}} \quad (10)$$

$$K_{\text{post-deslizamiento}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{\text{platinas}}} + \frac{1}{K_{\text{pasador-fijo}}} + \frac{1}{K_{\text{pasador-móvil}}} + \frac{1}{K_{\text{pernos}}}} \quad (11)$$

La tercera zona denominada plástica está limitada por la fuerza que falla los pernos y presenta una rigidez nula debido a que los pernos fluyen hasta la falla (figura 6a). La extensión de esta zona está gobernada por la deformabilidad de los pernos sometidos a esfuerzos de flexión y por la deformabilidad de las zonas de las perforaciones en contacto con los pernos sometidas a esfuerzos de aplastamiento transferidos por los pernos (Figura 6d).

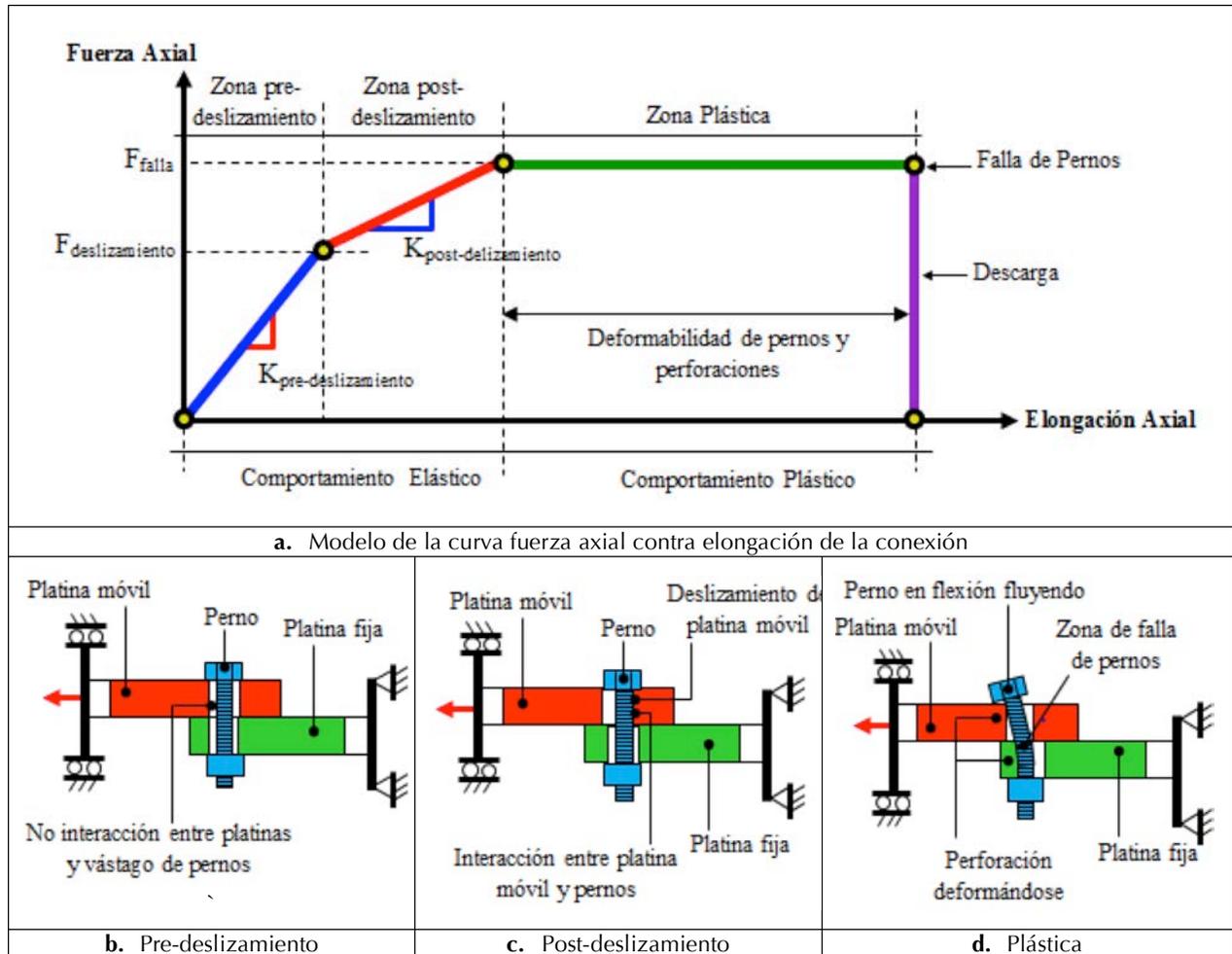


Figura 6. Modelo del comportamiento a fuerza axial de la conexión

## 6. Correlación

Para cada uno de los casos de los ensamblajes 1 y 2, el modelo de la curva fuerza axial contra elongación descrito en la Sección V se implementó. La fuerza que activa el deslizamiento se calculó considerando un coeficiente de fricción ( $\mu$ ) de 0.30 correspondiente al coeficiente de fricción dinámico reportado por (Chanchí et al., 2012) y considerando una interfase de fricción, la cual corresponde a la interfase

entre la platina fija y móvil. La fuerza que falla los pernos se calculó considerando un esfuerzo último a tensión de los pernos ( $\sigma$ ) de 900MPa correspondiente al valor reportado por el fabricante (Gutiérrez, 2000). En la (Tabla 2) se presenta un resumen de la implementación del modelo de la curva fuerza axial contra elongación para el caso del Ensamblaje 2 con una distancia entre bordes de las perforaciones de los pernos de 1.25 veces el diámetro del perno ( $S=1.25$ ).

**Tabla 2.** Implementación del modelo del Ensamblaje 2 con S=1.25

		Área	Longitud	Módulo de elasticidad	Rigidez
		mm <sup>2</sup>	mm	MPa	kN/mm
Zonas brutas	b1	360.0	20.0	200000.0	3600.0
	b2	360.0	205.2	200000.0	351.0
	b3	720.0	38.1	200000.0	3779.5
	b4	720.0	7.9	200000.0	18471.7
	b5	187.2	30.0	200000.0	594.2
	b6	187.2	60.0	200000.0	1248.0
	b7	187.2	60.0	200000.0	624.0
Zonas efectivas	e1	302.4	16.0	200000.0	3780.0
	e2	1176.7	7.4	200000.0	32017.8
	e3	115.2	20.0	200000.0	1152.0
Pasador fijo	Módulo de elasticidad	E	MPa	200000.0	
	Inercia	I	mm <sup>4</sup>	1277.0	
	Longitud	Lp	mm	65.0	
Pasador móvil	Módulo de elasticidad	E	MPa	200000.0	
	Inercia	I	mm <sup>4</sup>	523.0	
	Longitud	Lp	mm	100.0	
Perno	Diámetro	d	mm	6.4	
	Inercia	I	mm <sup>4</sup>	19.2	
	Módulo de elasticidad	E	MPa	200000.0	
	Distancia desde la mitad del espesor de la tuerca hasta la parte superior de la cabeza del perno	L	mm	14.0	
	Distancia desde el centro del espesor de la tuerca hasta el centro del espesor de la platina móvil	a	mm	8.2	
Rigidez de componentes	Platinas	K <sub>platinas</sub>	kN/mm	111.0	
	Pasador fijo	K <sub>pasador</sub>	kN/mm	44.7	
	Pasador móvil	K <sub>pasador</sub>	kN/mm	5.0	
	Perno	K <sub>b</sub>	kN/mm	10.2	
Fuerza	Fuerza que activa el deslizamiento	F	kN	7.9	
	Fuerza que falla los pernos	R	kN	24.0	
Rigidez de la conexión	Pre-deslizamiento	K <sub>pre-deslizamiento</sub>	kN/mm	5.4	
	Post-deslizamiento	K <sub>post-deslizamiento</sub>	kN/mm	2.6	
	Fluencia	K <sub>fluencia</sub>	kN/mm	0.0	

Siguiendo la metodología presentada en la (Tabla 2), las variables que definen la curva fuerza axial contra elongación fueron determinadas para cada uno de los casos

de los ensamblajes 1 y 2. En la (Figura 7) se muestra el modelo de la curva fuerza axial contra elongación para los ensamblajes 1 y 2 superpuesto en los datos experimentales.

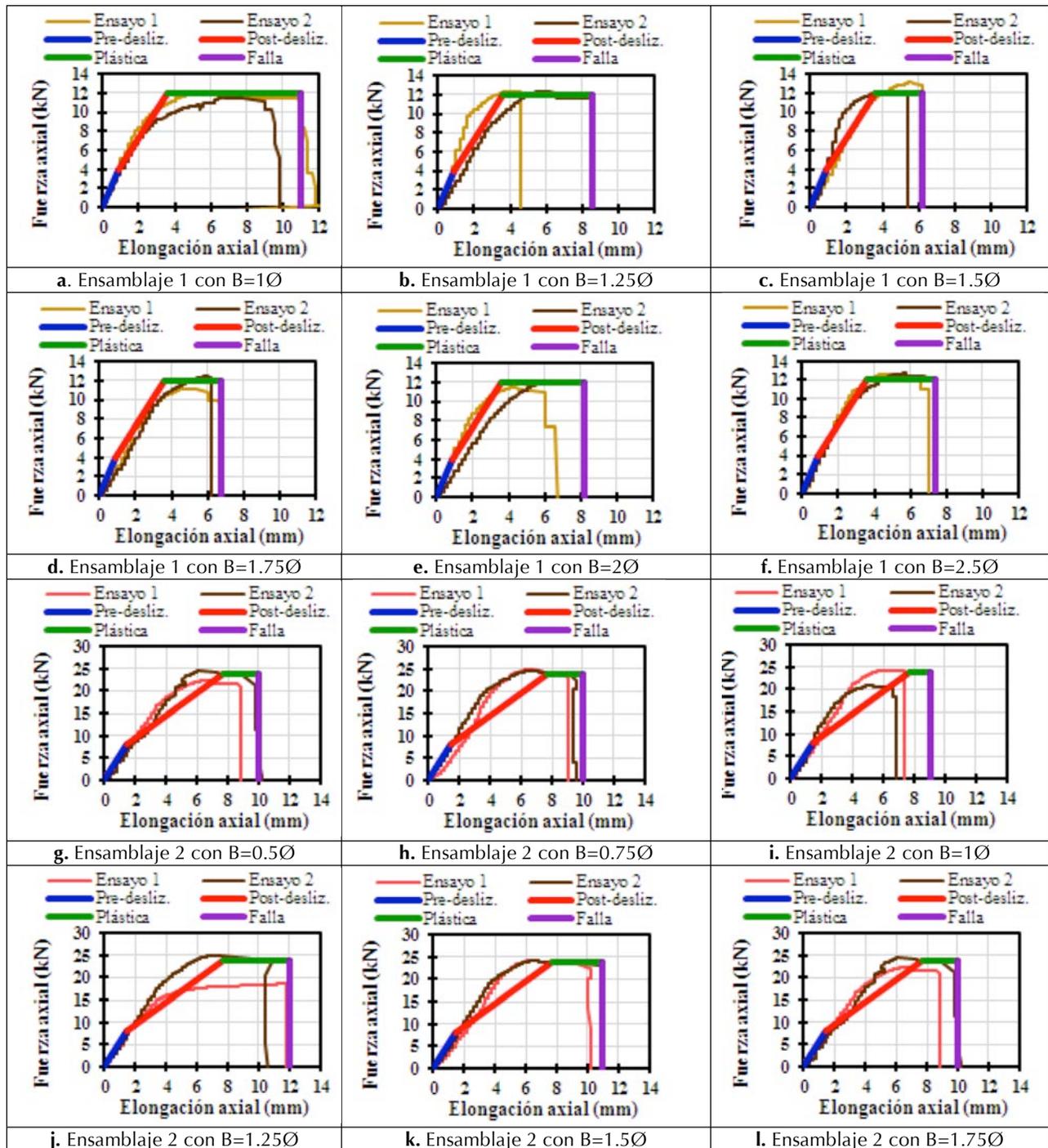


Figura 7. Correlación entre modelo teórico y resultados experimentales para las conexiones asimétricas de los ensamblajes 1 y 2

En la (Figura 7) se puede observar que el modelo predice con buena aproximación las zonas de post-deslizamiento y plástica de los datos experimentales. Sin embargo, el modelo predice con una aproximación aceptable la rigidez de la zona de post-deslizamiento. Esta discrepancia

se debe a que el modelo de la rigidez de la zona de post-deslizamiento se basó en suponer que los pernos se comportan elásticamente a lo largo de la totalidad de la zona de post-deslizamiento. Esta suposición solo es válida para el inicio de esta zona cuando la platina entra en contacto con



los pernos y no para el final cuando los pernos inician la fluencia. Adicionalmente los pernos no inician simultáneamente su fluencia o su fluencia no se presenta exactamente al final de la zona de post-deslizamiento debido a que el método del giro de la tuerca usado durante el ensamblaje no garantiza con precisión el nivel de tensionamiento de los pernos.

## 7. Conclusiones

Este artículo describe experimentalmente y propone un modelo teórico de comportamiento fuerza axial contra elongación de conexiones asimétricas susceptibles a la falla de los pernos. Se demostró que:

- i. El comportamiento fuerza axial contra elongación de la conexión se caracteriza por tres zonas de tendencia lineal. La primera zona denominada pre-deslizamiento donde la conexión exhibe su máxima rigidez sin movimiento aparente de las platinas. La segunda zona denominada post-deslizamiento donde la conexión exhibe una reducción de rigidez debido al deslizamiento de la platina móvil hasta entrar en contacto con el vástago de los pernos y la tercera zona denominada plástica donde la rigidez de la conexión es nula debido a la fluencia de los pernos y de las zonas cercanas a las perforaciones del perno.
- ii. La tendencia global de la curva fuerza axial contra elongación de la conexión no es sensible a la localización de los pernos en la zona de unión de las platinas. Sin embargo, la amplitud de la zona plástica si lo es. El aumento de la distancia entre el borde de la perforación del perno y el borde de la zona de unión de las platinas y el aumento de la distancia entre bordes de perforación de los pernos disminuye la deformabilidad axial de la conexión, la

deformabilidad de las perforaciones de los pernos y la amplitud de la zona plástica.

- iii. La capacidad de carga de la conexión puede describirse a partir de la fuerza que activa el deslizamiento y la fuerza que falla los pernos. La fuerza que activa el deslizamiento se puede modelar usando la teoría de la fricción seca de Coulomb considerando que esta fuerza es proporcional a la fuerza de tensionamiento de los pernos y al coeficiente de fricción en la interfase entre la platina fija y la platina móvil. La fuerza que falla los pernos se puede modelar considerando que esta fuerza es proporcional a la capacidad a tensión de los pernos reducida por un factor de 0.6.
- iv. La rigidez de la conexión se puede evaluar acoplado en serie la rigidez de cada uno de sus componentes evaluada a través de la rigidez de elementos de viga o de elementos de resorte. La rigidez de los elementos de viga puede usarse en componentes sometidos a flexión como en el caso de los pernos y los pasadores. La rigidez de los elementos de resorte puede usarse en componentes sometidos a fuerza axial como en el caso de las platinas.
- v. El comportamiento fuerza axial contra elongación de la conexión se puede representar por un modelo trilineal conformado por las zonas de pre-deslizamiento, post-deslizamiento y plástica. Estas zonas se delimitan por la fuerza que activa el deslizamiento y la fuerza que falla los pernos. Para evaluar la rigidez en la zona de pre-deslizamiento se considera la rigidez de las platinas y los pasadores, para evaluar la rigidez en la zona de post-deslizamiento se considera la rigidez de las platinas, los pasadores y los pernos. La rigidez de la zona plástica se considera nula.

## 8. Referencias

- Beer, F. P., Johnston, E. R., DeWolf, J. T., Mazurek, D. F., (2010).** Mecánica de Materiales, p. 791, México, D. F.- México: McGraw-Hill. \*p. 452.
- Bresler, B., Lin, T. Y., Scalzi, J. B. (1968).** Design of Steel Structures, p. 830, New York - United States of America: John Wiley & Sons, Inc. \*p. 111, 113, 118, 119.
- Chanchí, J., MacRae, G. A., Chase, J. G., Rodgers, G. W., Clifton, G. C. (2012, 13 de abril).** Behaviour of Asymmetrical Friction Connections Using Different Shim Materials. New Zealand Society for Earthquake Engineering – Annual Technical Conference. Christchurch – New Zealand.
- Clifton, G.C. (2005).** Semi-Rigid Joints for Moments Resisting Steel Framed Seismic Resisting Systems. Published PhD Thesis. Auckland – New Zealand: University of Auckland. Department of Civil and Environmental Engineering.
- Gorenc, B. E., Tinyou, R. (1984).** Steel Designers Handbook, p. 336, New South Wales - Australia: New South Wales University Press Ltda. \*p. 41, 42, 46.
- Grigorian, C. E., Popov, E. P., (1994).** Energy Dissipation with Slotted Bolted Connections, p. 234, Berkeley – United States of America: College of engineering, University of Berkeley. \*p. 9,10.
- Gutiérrez, H. (2000).** Manual de tornillos, pernos y tuercas, p. 63, Bogotá – Colombia. \*p. 10.
- McGuire, W. (1968).** Steel Structures, p.1112, United States of America: Prentice Hall, Inc. \*p.787, 788.
- Popov, V. L. (2010).** Contact Mechanics and Friction. Physical Principles and Applications, p. 362, New York - United States of America: Springer. \*p. 134.
- Schenker, L., Salmon, C. G., Johnston, B. G. (1954).** Structural Steel Connections, p. 256, Michigan – United States of America: University of Michigan. \*p. II-26, II- 27, II-28.
- Trahair, N. S., Bradford, M. A. (1988).** The Behaviour and Design of Steel Structures, p. 391, Sidney – Australia: Methuen of Australia. \*p. 359, 362, 363, 364.