

# VERIFICACIÓN DE LA DISMINUCIÓN DE LA RESISTENCIA NOMINAL EN UNIONES ABULONADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN DEBIDO A LA APARICIÓN DE FUERZAS SECUNDARIAS

Ing. Diego Siboldi, Ing. Hernán Barrera, Ing. Arturo Cassano

Universidad Tecnológica Nacional

Facultad Regional Paraná

Departamento de Ingeniería Civil

## Resumen

En este trabajo se presenta una revisión del problema del palanqueo (prying) en bulones traccionados, como parte de conexiones en estructuras de acero, desde la perspectiva de verificaciones experimentales en comparación con modelos teóricos dados por otros autores.

Se muestra la metodología de ensayo y los dispositivos adoptados para la validación de los resultados. También se realiza una correlación entre las predicciones teóricas al estado último y las capacidades obtenidas de los ensayos. Se menciona una breve referencia al origen de cada modelo teórico utilizado, en cuanto a sus cualidades y aplicabilidad en cálculos de rutina. Se concluye que los sencillos métodos de análisis mostrados, producen, referidos a la capacidad resistente, resultados precisos sobre los efectos del palanqueo en las conexiones traccionadas.

## Abstract

*This paper presents a revision of the prying problem in tensioned bolts, as part of steel structures connections, from an experimental verification perspective, compared to theoretical models given by other authors.*

*It shows testing methodology and devices adopted for results validation. It is also performed a correlation between theoretical predictions at ultimate state and the capacity obtained from experimental assessment.*

*It is mentioned a brief reference to the origin of each theoretical model used, as regards their qualities and applicability in routine calculations.*

*The conclusions are that simple analysis methods shown, produce, referring to strength capacity, accurate results about prying effects on tensioned connections.*

## Introducción

En las estructuras de acero compuestas por barras (vigas-columnas) tiene particular importancia la conexión elegida por el calculista estructural y cuan acertado es el modelo de rigidez relativa que la representa en el análisis estructural. Si se trata de conexiones que transmiten momento, estas variaciones de rigidez son significativas. Una de las tipologías clásicas para uniones abulonadas es la que mediante dos “T” abulonadas a las alas de la viga (T-Stub, figura 1) transmite el par flector y usando ángulos abulonados al alma, el corte.

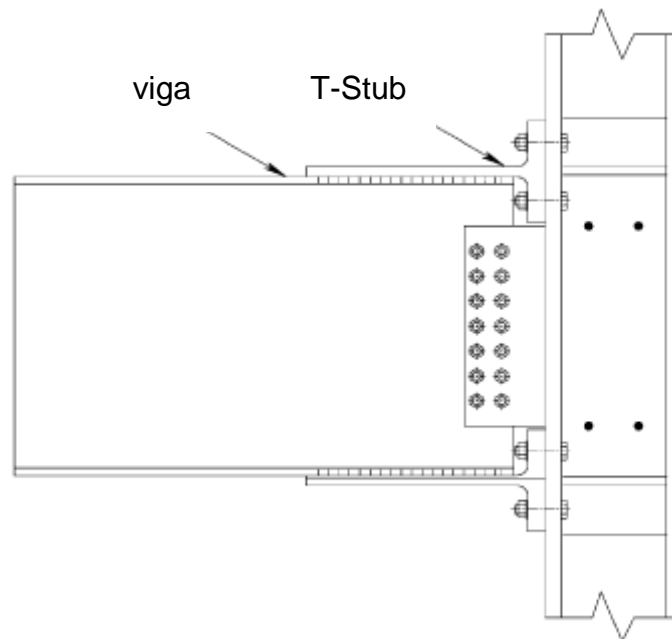


Figura 1 – Conexión a momento mediante T-stub

Cada una de las “T” transmite una fuerza; en el caso de momento negativo (típico de una viga empotrada en columna), la “T” superior estará traccionada y la inferior comprimida. La “T” traccionada posee bulones sometidos a tracción y, según la flexibilidad relativa del ala de la “T”, existe la posibilidad, al apoyarse el borde del ala de la “T” en la pieza a conectar, que aparezca el fenómeno del “palanqueo” (prying), por el que se generan fuerzas secundarias “Q” (figura 2), reduciendo la capacidad nominal de los bulones a tracción y por lo tanto la posibilidad que la conexión completa alcance el momento nominal. De forma similar, la “T” puede asimilarse a partes de otro tipo de conexiones más modernas como lo son las placas de extremo extendidas (figura 3).

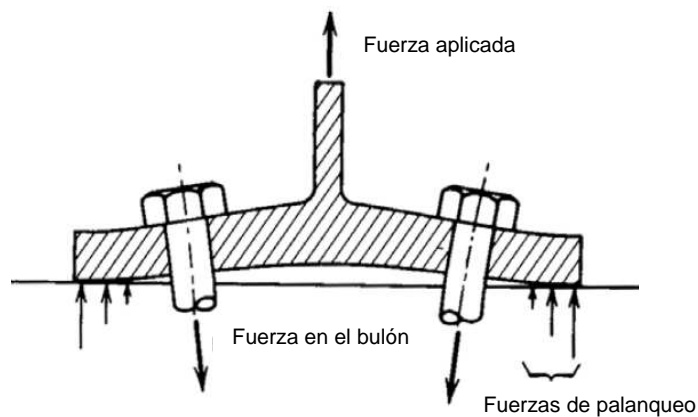


Figura 2 – Fuerzas secundarias de palanqueo

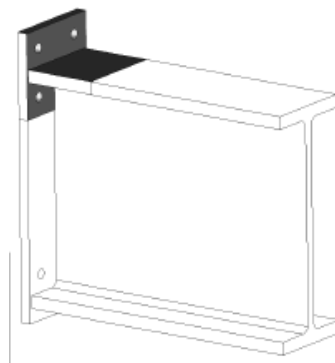


Figura 3 – Similitud entre T-Stub y placa de extremo extendida

La capacidad a tracción en “T” traccionadas es el objeto del presente estudio. Se presentarán resultados experimentales y resoluciones numéricas mediante el Análisis por el Método de los Elementos Finitos (FEA), con especial observancia a la correcta valoración de las fuerzas de palanqueo (prying) y la formación de rótulas plásticas en el ala de la “T”. Además, dos modelos teóricos de rápida aplicación serán contrastados con los resultados de las simulaciones y ensayos, con una breve referencia a su origen, sus hipótesis de trabajo y certeza de sus predicciones.

### Casos estudiados

Fueron modelados dos casos que representan partes de “T-Stub” (de menor ancho, por razones experimentales). Fueron obtenidos resultados de ensayos; resueltos mediante análisis por elementos finitos (FEA) usando el software ALGOR <sup>[1]</sup> y correlacionados con las fórmulas de los modelos teóricos que se muestran mas adelante. En la figura 4 se presentan las denominaciones de los parámetros geométricos que describen los dos casos con la siguiente nomenclatura (unidades de fuerza: kN, unidades de longitud: mm, unidades de tensión: MPa):

$a$  = la distancia desde el eje del bulón al borde del ala de la "T" (limitado  $a \leq 1.25b$ )

$b$  = la distancia desde el eje del bulón a la cara del alma de la "T"

$B$  = la fuerza presente en un bulón traccionado

$B_n$  = la capacidad nominal a tracción de un bulón

$d_b$  = diámetro nominal del bulón

$d_h$  = diámetro del agujero

$d_w$  = diámetro de la arandela

$g_t$  = distancia a ejes de bulones traccionados

$n_{tb}$  = número total de bulones a tracción

$Q$  = la fuerza secundaria de "palanqueo" (por cada bulón a tracción)

$r$  = radio de acuerdo para "T" laminada o cateto del cordón en "T" soldada.

$T$  = la fuerza de tracción aplicada a la conexión (por cada bulón a tracción)

$t_s$  = espesor del alma de la "T"

$t_f$  = espesor del ala de la "T"

$W_{tot}$  = ancho total de la "T"

Los casos serán denominados P1 y P2. En la tabla 1 son presentados los valores geométricos correspondientes, junto a otros parámetros mecánicos necesarios, como ser módulo de elasticidad  $E$  ( $E_b$  para bulones), tensiones de fluencia  $F_y$ , de rotura  $F_u$  ( $F_{u,b}$  para bulones).

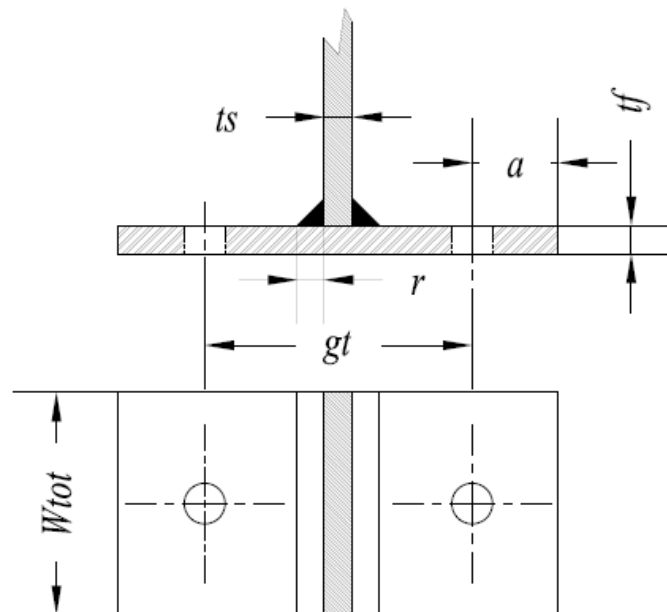


Figura 4 – Geometría de los casos ensayados

Los valores mecánicos  $E$ ,  $F_y$  y  $F_u$ , tanto para chapas como bulones fueron obtenidos experimentalmente, tomando para el cálculo, el valor medio detectado en cada determinación.

	P1	P2
<i>Material</i>	<b>F26</b>	<b>F26</b>
<i>E</i>	203600	203600
<i>Fy</i>	288	288
<i>Fu</i>	463	463
<i>ts</i>	9.8	9.8
<i>tf</i>	9.8	9.8
<i>r</i>	5	5
<i>gt</i>	91.8	158.0
<i>a</i>	29.6	26.0
<i>Wtot</i>	76.5	76.5
<i>ntb</i>	2	2
<i>dh</i>	14	14
<i>bulones</i>	<b>A325</b>	<b>A325</b>
<i>db</i>	12.7	12.7
<i>E,b</i>	218023	218023
<i>Fu,b</i>	819	819

Tabla 1 – Parámetros de casos ensayados

Los modelos de ensayo fueron realizados con planchuelas de calidad comercial. Las soldaduras se ejecutaron en dos pasadas con electrodos rutílicos de 2mm de diámetro y con apriete de “ajuste sin juego” para los bulones (alta resistencia tipo A325, al igual que las tuercas y arandelas utilizadas).

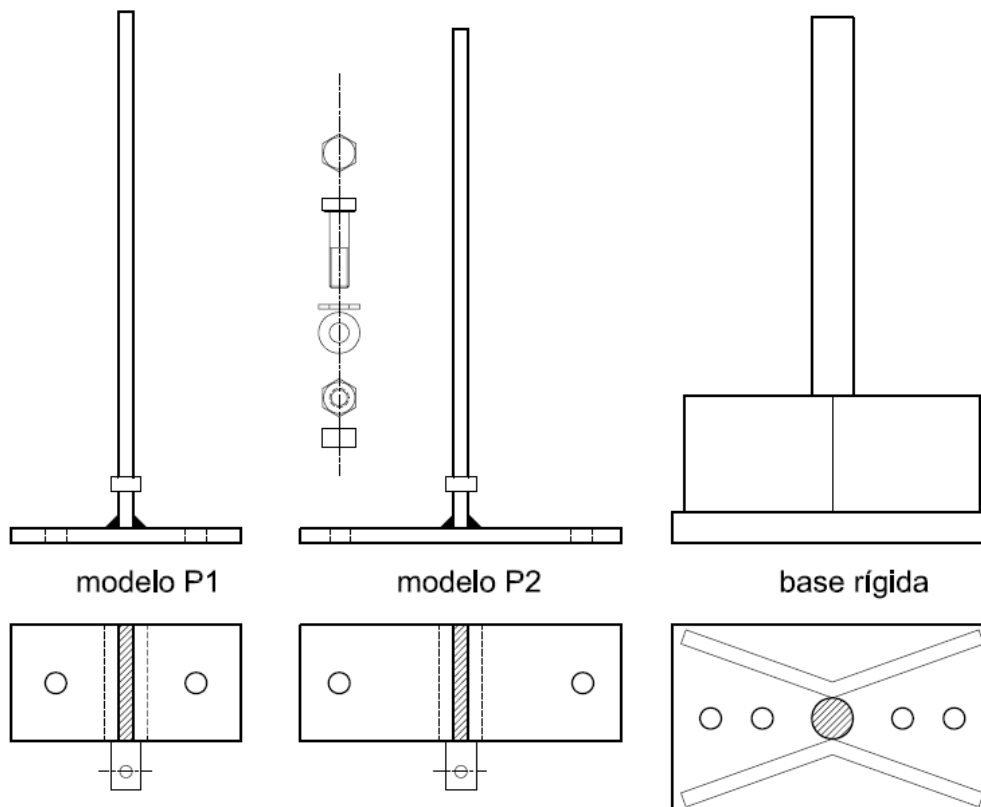


Figura 5 – Esquemas de las piezas y su base

En la figura 5 es presentado un esquema de los dispositivos de ensayo para ambos casos, mientras que en la figura 6 se muestran fotos de los modelos montados, unidos a la “base” rígida de anclaje, considerada indeformable. El modelo P1 fue denominado de “ala corta”, pues la relación  $gt/a$  es 3.10; el caso P2, denominado “ala larga”, posee una relación  $gt/a$  de 6.08 (el doble del caso P1).



Figura 6a – Dispositivo caso P1  
(ala “corta”)

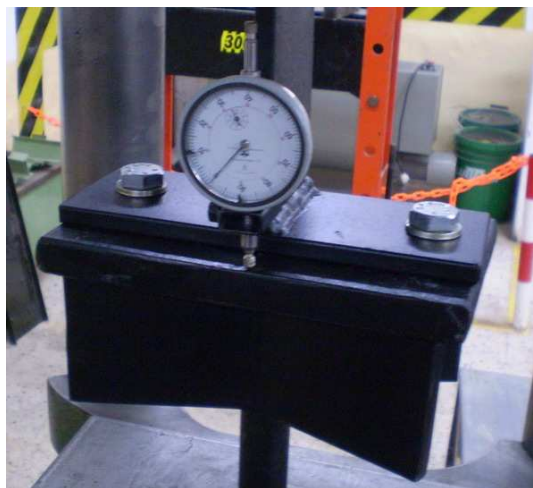


Figura 6b – Dispositivo caso P2  
(ala “larga”)

## Resultados de los ensayos y cálculos

En esta sección presentamos los resultados de los ensayos realizados, el análisis mediante elementos finitos (FEA) y cálculos sencillos mediante dos métodos teóricos clásicos.

### **Modo de cálculo básico**

Como modo básico de cálculo teórico, utilizamos el modelo propuesto por Kulak, Fisher y Struik <sup>[2]</sup>, que debido a una distribución no uniforme de las tensiones resultantes en el bulón, efecto de la flexión que se produce por la propia deformación del ala de la “T” en contacto con la cabeza del bulón, la fuerza en el bulón es supuesta actuando en el borde interno del vástago del bulón, en vez de centrarse en el eje del mismo (figura 7). Entonces, el equilibrio se basa en las medidas  $a'$  y  $b'$  en vez de las originales  $a$  y  $b$ .

$$a' = a + \frac{db}{2} \quad (1)$$

$$b' = b + \frac{db}{2} \quad (2)$$

Las fuerzas secundarias de palanqueo (prying),  $Q$ , son supuestas actuando en el borde externo del ala de la “T”. Si bien esta suposición puede mejorarse suponiendo una presión de contacto actuando en la superficie del ala que se encuentra entre el bulón y el extremo de la misma, los resultados que se obtienen son lo suficientemente precisos sin aumentar significativamente el esfuerzo de cálculo. La

única restricción geométrica es que el valor de  $a$  esté limitado a  $1.25b$ . El esquema del modelo se visualiza en la figura 8.

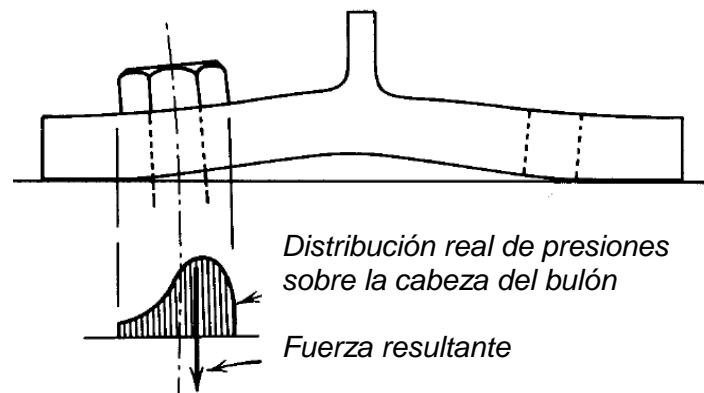


Figura 7 – Distribución de tensiones de contacto en la cabeza de los bulones

El parámetro  $\alpha$  es la relación entre el momento en la línea de acción de la fuerza en el bulón y el momento en el borde del alma traccionada de la “T”. Este parámetro es, por cierto, una medida del grado de palanqueo desarrollado.

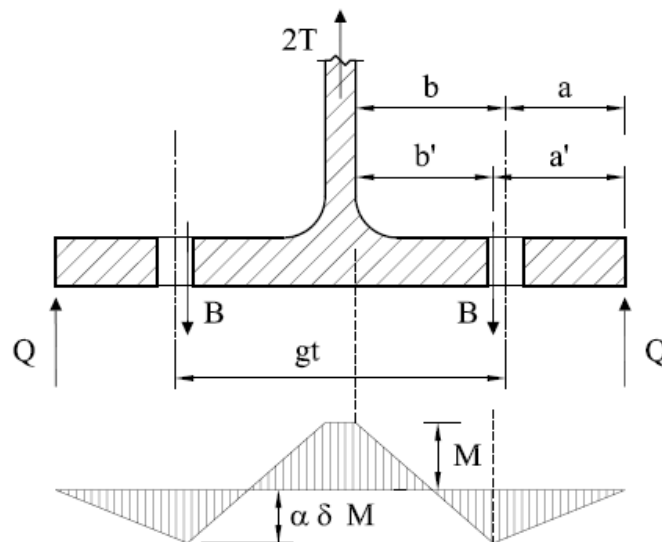


Figura 8 – Modelo propuesto por Kulak, Fisher y Struik

El otro parámetro:  $\delta$ , es la relación entre la sección neta del ala en la línea de bulón y la sección bruta del ala en el borde del alma traccionada (descontando, en caso de perfil rolado, el radio de acuerdo); operando las ecuaciones puede escribirse como:

$$\delta = 1 - \frac{dh}{p} \quad (3)$$

Donde

$$p = \frac{2 W_{tot}}{ntb} \quad (4)$$

Desde un punto de vista físico,  $\alpha$  está limitado a valores entre 0 y 1. Efectivamente, si  $\alpha = 0$ , significa que el ala está completamente separada de la base (bulones muy flexibles respecto a un ala muy rígida) y no aparecen fuerzas secundarias de palanqueo  $Q$ . Por el contrario, si  $\alpha = 1$ , el bulón es suficientemente rígido como para fijar rígidamente el ala con la base y ésta se comportaría como una viga empotrada-empotrada.

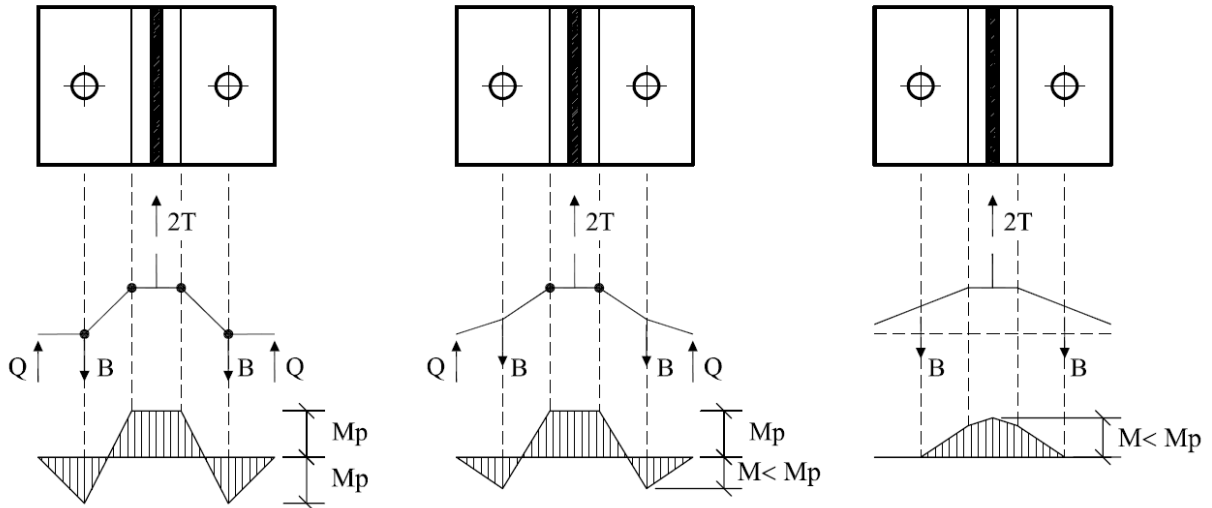


Figura 9 – Mecanismos de falla en función de la rigidez relativa ala-bulón

Esta relación relativa de rigidez entre ala y bulón, genera tres modos de falla extremos (figura 9) que van desde el mecanismo de rótulas plásticas en el ala, ecuación (5), al caso de rotura del bulón sin que aparezcan fuerzas de palanqueo, ecuación (7), pasando por una combinación de plastificación del ala en el borde del alma y rotura de los bulones con aparición de fuerzas  $Q$ , ecuación (6). La capacidad de la conexión estará dada por la mínima fuerza  $T$  que satisfaga las ecuaciones (5), (6) y (7). La figura 10 representa un caso típico en función del espesor del ala.

$$T = \frac{(1 + \delta)}{4b'} (p Fy t f^2) \quad (5)$$

$$T = \frac{(Bn a')}{(a' + b')} + \frac{(p Fy t f^2)}{4(a' + b')} \quad (6)$$

$$T = Bn \quad (7)$$

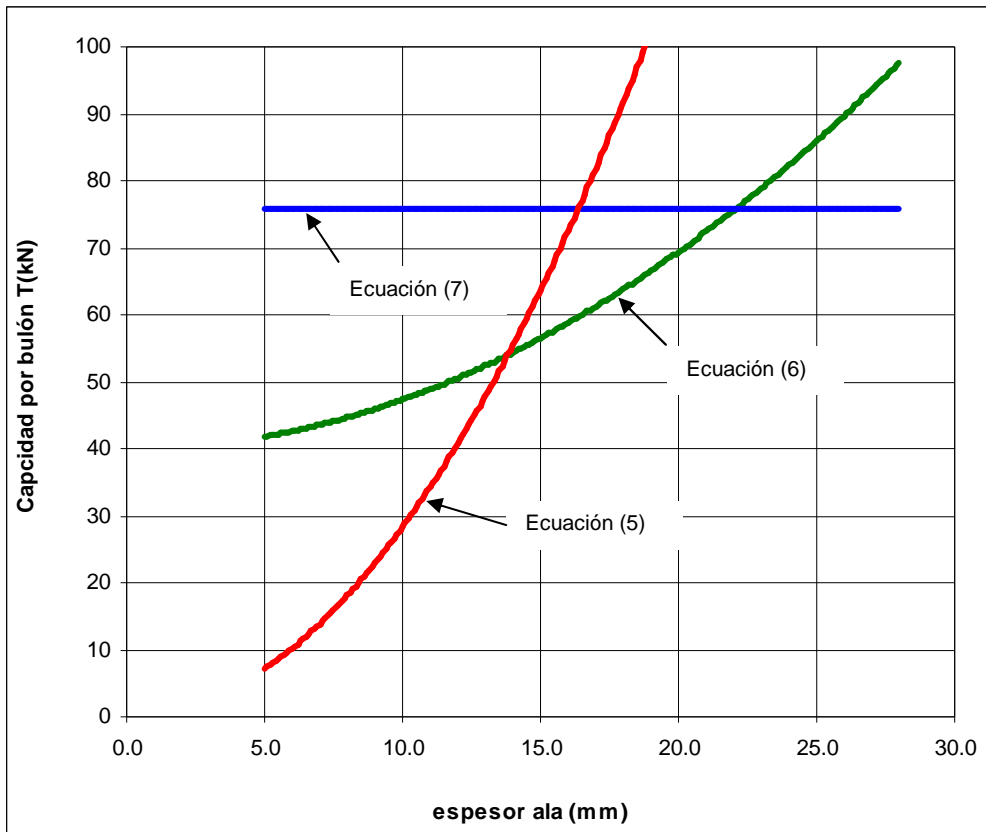


Figura 10 – Representación de la solución del modelo de Kulak, Fisher y Struik

**Modificación propuesta por Swanson**

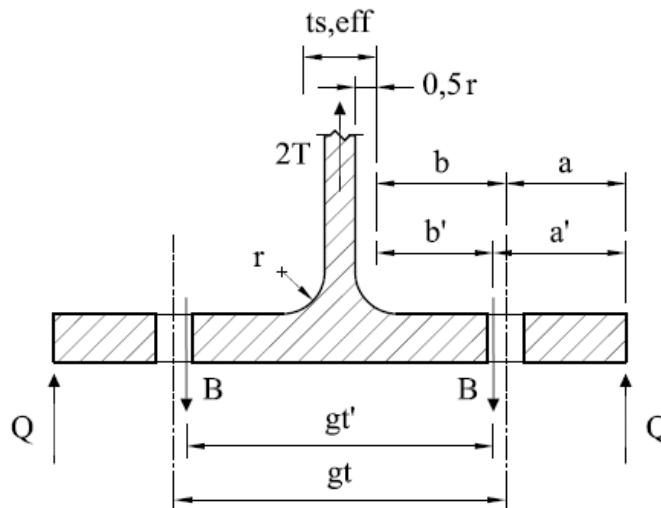


Figura 11 – Modelo propuesto por Swanson

Con ligeras modificaciones al modelo propuesto por Kulak, Fisher y Struik, respecto al plano de cálculo del momento en el ala, Swanson <sup>[3]</sup> logra mejorar las predicciones de falla respecto a la plastificación del ala. Básicamente propone que debido a la rigidez adicional que entrega el aumento de espesor en la zona del radio de acuerdo para perfiles laminados o el cordón de soldadura en elementos soldados, la rótula

plástica se desplaza hacia el bulón una distancia  $0.5r$  (donde  $r$  es el radio de acuerdo o el cateto del cordón de soldadura), generando mas rigidez relativa y por ende mas resistencia final. La propuesta de Swanson es introducir un nuevo parámetro, definido como “espesor efectivo”  $t_{s,eff}$  que se define en la ecuación (8) y figura 11.

$$t_{s,eff} = t_s + r \quad (8)$$

La limitación fundamental de ambas metodologías de cálculo es que son tratados teóricamente como problemas bidimensionales y la distribución tridimensional de tensiones que efectivamente se genera no es tenida en cuenta. Por supuesto, aunque difícil de calcular por métodos manuales, si se computaran los desplazamientos relativos, estos estarían lejos de la realidad. Este punto es importante si el estudio de la conexión es componente de una unión de tipo totalmente restringida en donde las deformaciones relativas entre partes tienen mucha importancia. La misma limitación en la sencillez de los modelos estudiados es su principal ventaja, puesto que convierte el cálculo plástico y no lineal de la predicción de falla en operaciones matemáticas muy simples y que pueden tratarse con una calculadora sencilla.

### **Comparación de resultados**

#### **Caso P1 (ala corta)**

Este caso tiene una separación entre bulones relativamente normal, es decir la relación  $gt/a$  es 3.10.

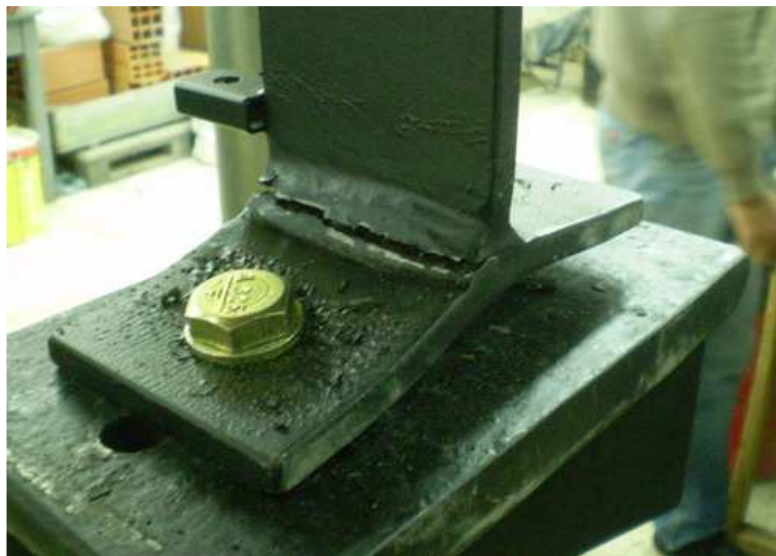


Figura 12 – Pieza de ensayo P1, falla última

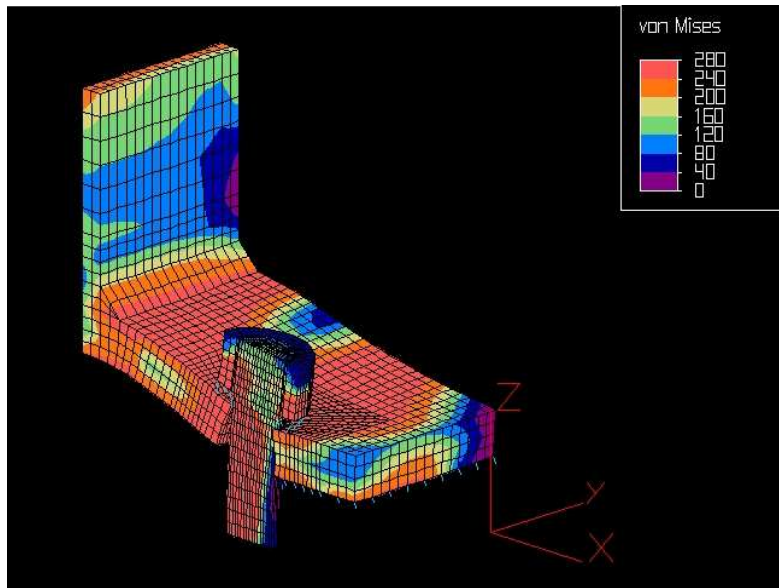


Figura 13 – modelo FEA caso P1, instante de plastificación ala (64kN)

En la figura 12 se muestra la pieza ensayada en su condición de falla última; esta se presentó con rotura de un bulón y fisura en la soldadura, pero luego de una previa y completa plastificación del ala, cuyo valor obtenido aproximadamente por el cambio de pendiente de la curva carga-deformación se estimó en 64kN (carga total: 2T); la rotura del bulón se verificó para una carga (total) de 92kN.

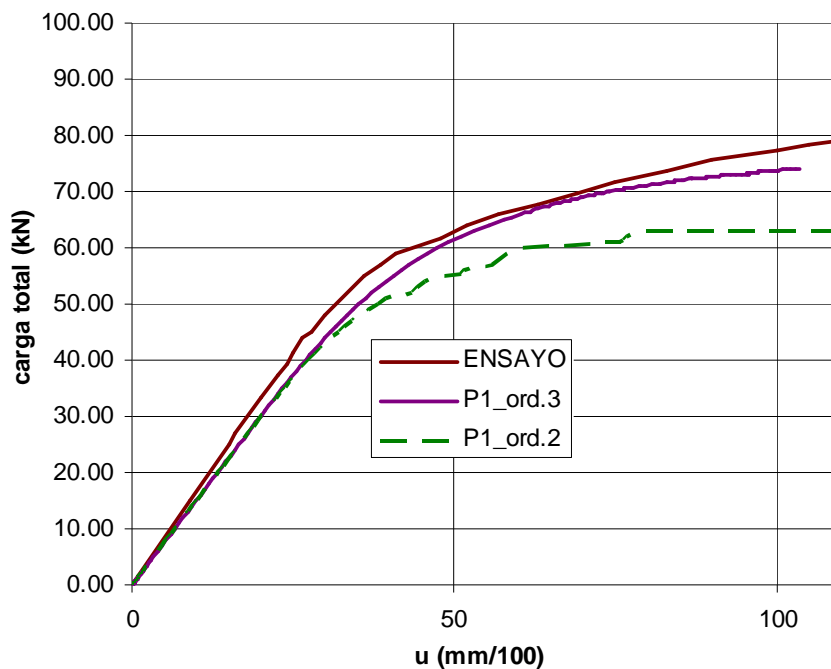


Figura 14 – Curvas carga-deformación FEA/ensayo para P1

En la figura 13 se presenta el modelo de elementos finitos analizado con la distribución de tensiones de Von Mises durante la plastificación del ala. Por otro lado, en la figura 14 se presentan las curvas carga versus deformación comparando

mediciones experimentales con resultados numéricos; para ello se trabajó con dos variantes: P1\_ord.3, para elementos de 20 nodos con tercer orden de integración y P1\_ord.2, usando elementos de 8 nodos con segundo orden de integración. La correlación entre los valores de ensayo y los resultados teóricos son mostrados en la figura 15. Visualizando ese gráfico (resumen del que aparece en la figura 10), puede determinarse la pérdida de capacidad en la conexión por la aparición de fuerzas secundarias:

$$Q = Bn - T \quad (9)$$

$$Q = 75,7 \text{ kN} - 48,1 \text{ kN}$$

$$Q = 27,6 \text{ kN}$$

Lo que significa “perder” 27,6 kN de la capacidad total de cada bulón de 75,7 kN

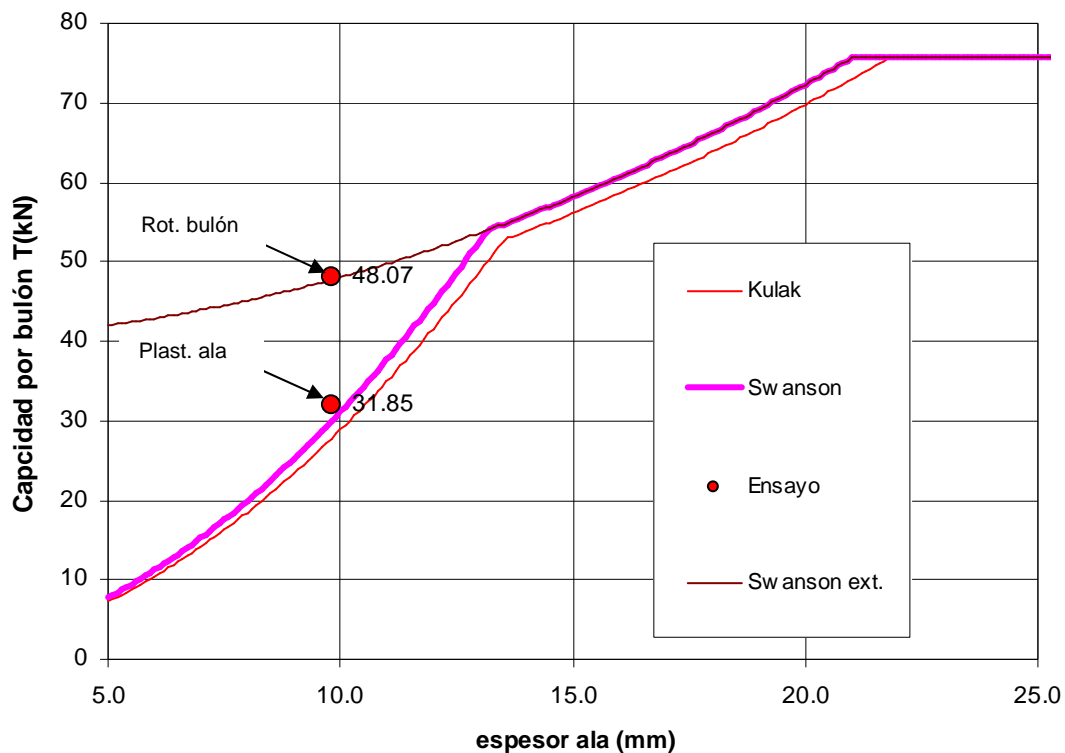


Figura 15 – Curvas teóricas Vs. Ensayo, caso P1

### Caso P2 (ala larga)

Intentando modificar la relación de fuerzas de palanqueo, se realizó una pieza de ensayo con mayor separación relativa entre bulones, con una la relación  $gt/a$  de 6.08 (el doble del caso P1). En la figura 16 se muestra la pieza ensayada en su deformación final.



Figura 16 – Pieza de ensayo P2, fin de ensayo (sin rotura de bulones)

Fue necesario concluir el ensayo porque las deformaciones salieron de escala del dispositivo de medición, aunque no se había alcanzado la condición de resistencia última; la lectura de carga final fue de 104kN (sin romper los bulones). En la figura 17 se visualiza el modelo FEA correspondiente en el paso de carga de plastificación del ala, la formación de rótulas plásticas fue detectada aproximadamente a los 33kN (similares consideraciones que el caso anterior).

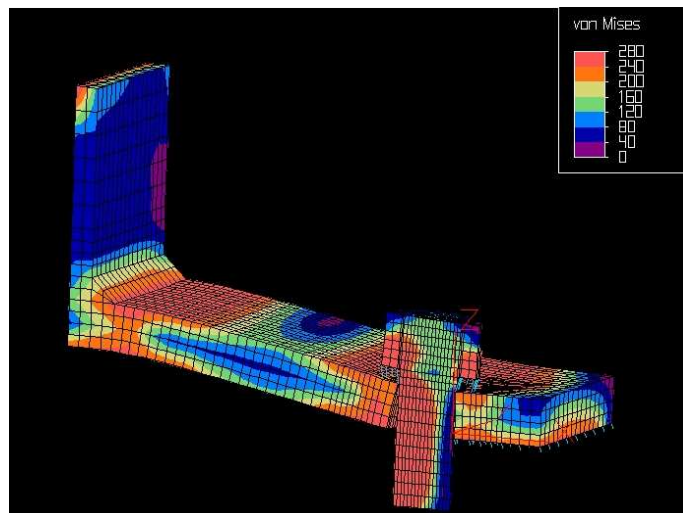


Figura 17 – modelo FEA, caso P2, carga de plastificación ala (33kN)

En la figura 18 se presentan las comparaciones de resistencias predichas por los modelos teóricos, versus las mediciones experimentales.

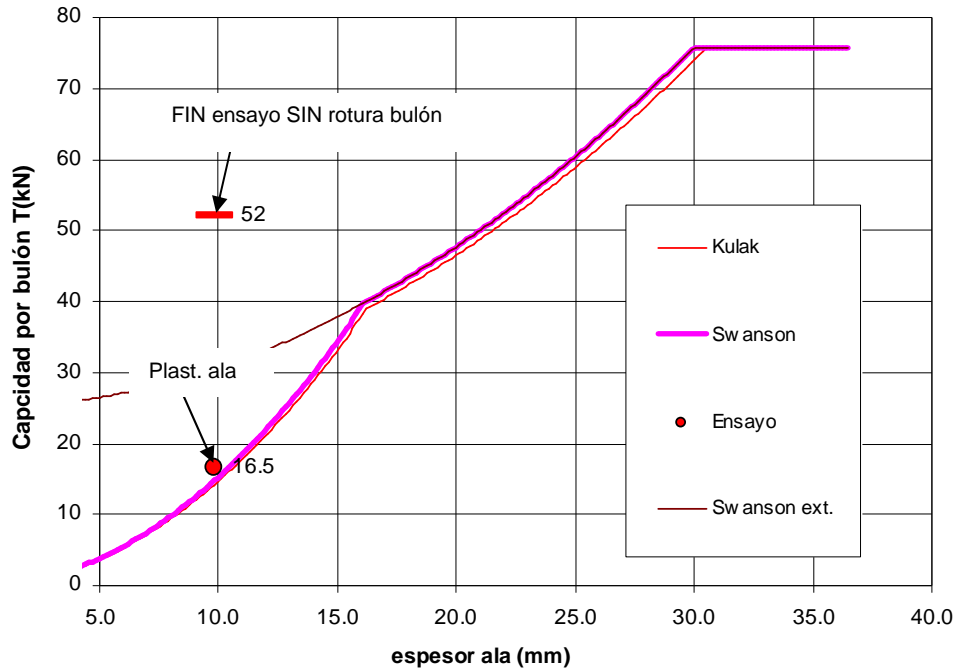


Figura 18 – Resultados para el caso P2

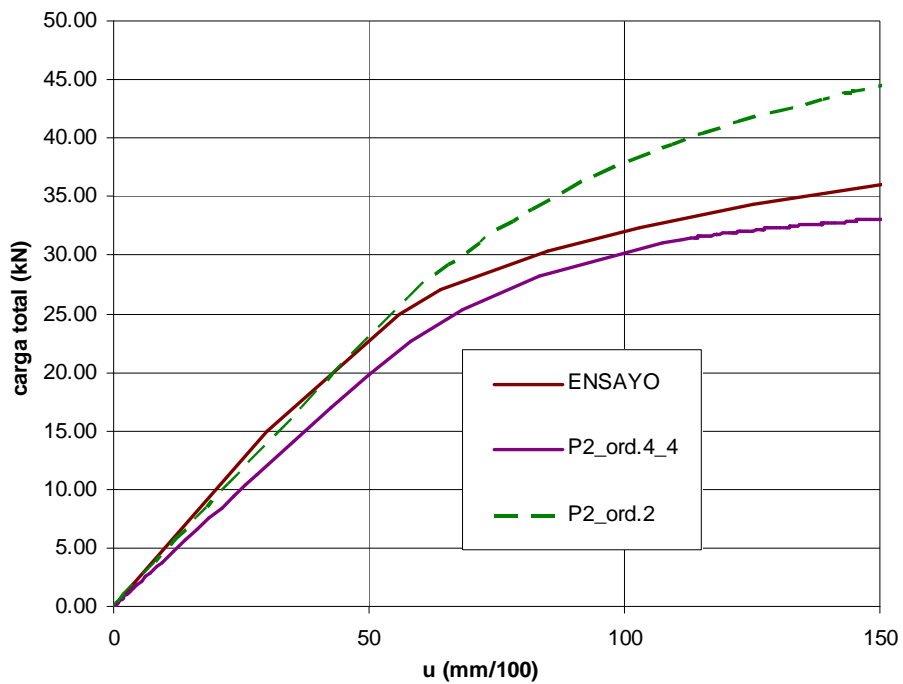


Figura 19 – Curvas carga-deformación FEA/ensayo para P2

Las comparaciones entre ensayo y modelo FEA se aprecian en la figura 19. Los modelos FEA utilizados fueron, también, uno con elementos de 20 nodos e integración de orden 4 (P2\_ord.4\_4) y otro (de menor precisión) con 8 nodos y orden de integración 2 (P2\_ord.2).

## CONCLUSIONES

En ambos casos, la predicción de falla hecha por las sencillas fórmulas (5), (6), (7) y la modificación propuesta por Swanson en la ecuación (8), brinda valores muy cercanos a los reales de ensayo. Los dos casos presentan el modo de falla de plastificación del ala (formación de dos rótulas plásticas) y la capacidad del bulón solo se alcanza continuando la carga de la prueba. Esta sobrerresistencia, no tiene validez desde el punto de vista del cálculo de una conexión real en un proyecto de estructuras de acero, puesto que para esa instancia, las deformaciones son inadmisibles.

Las simulaciones computacionales también logran predecir las plastificaciones del ala en una configuración deformada que representa correctamente la aparición de fuerzas secundarias de palanqueo  $Q$ , aunque con mucho mayor “costo” en tiempo de modelado y análisis. Las deformaciones calculadas mediante FEA se corresponden con las mediciones realizadas en las pruebas, siempre dentro de límites de error aceptables en la toma de las medidas. Las formaciones de las rótulas plásticas que se observan tanto en las fotos de ensayos como en las salidas gráficas de del análisis FEA, coinciden con las hipótesis previas que llevan a los modelos teóricos presentados.

Para estos casos, podemos decir que las fórmulas (5), (6), (7) y (8) predicen correctamente y con muy poco esfuerzo de cálculo la plastificación del ala. Para el caso P1 con relaciones normales entre  $gt$  y  $a$ , es decir casos de “T” no muy “esbelta” en la separación entre bulones respecto a la longitud del ala, una “extensión” de la curva que corresponde a la modificación de Swanson, dada por la ecuación (6) con los parámetros  $b'$  y  $a'$  modificados según el  $t_{s,eff}$  (ecuación 8), logra predecir la rotura del bulón teniendo en cuenta la aparición de fuerzas secundarias. La distancia entre esta curva denominada en la figura 15 “Swanson ext.” y la recta de capacidad nominal de los bulones, es aproximadamente la magnitud de las fuerzas de palanqueo “Q”.

Es intención del grupo de trabajo, extender estas experiencias a una serie de ensayos sistematizados, con variaciones paramétricas en su geometría, de forma que se pueda corroborar toda la gama de espesores, cubriendo el espacio de solución de las tres curvas (5), (6) y (7) e incluso proponer, a futuro algunas modificaciones a los modelos teóricos que permitan extender los resultados numéricos a las partes traccionadas de la placa de extremo extendida.

## Referencias

- [1] *Algor Design Software*. ALGOR Inc., Pistburg, USA, 2000.
- [2] Kulak, G. L., Fisher, J. W., and Struik, J. H. A. (1987), *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*, 2nd ed., John Wiley & Sons, New York.
- [2] Swanson, James A (2002), *Ultimate Strength Prying Models for Bolted T-stub Connections*; Engineering Journal, American Institute of Steel Construction, Third Quarter.
- [3] Eurocode (1993), *Design Procedures to C-EC3 – Concise Eurocode 3 for the Design of Steel Buildings in the United Kingdom*, The Steel Construction Institute.
- [4] Girão Coelho, A. M., Bijlaard, F., Gresnigt, N., and Simões da Silva, L. (2004). *Experimental assessment of the behaviour of bolted T-stub connections made up of welded plates*. J. Constr. Steel Res., 60, 269–311.
- [5] Jaspart, J. P., Maquoi, R. (1991), *Plastic Capacity of End-Plate and Flange Cleated Connections – Predictions and Design Rules*, Proceedings of the 2nd International Workshop on Connections in Steel Structures: Behavior, Strength and Design, Pittsburgh, PA,