

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DE UNIONES METÁLICAS ABULONADAS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Facundo Bre^a, María A. Sosa Zito^{b,c}, Ricardo E. Gomez^{b,d} y Viviana C. Rougier^{a,b}

^aGrupo de Métodos Numéricos, Facultad Regional C. del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional, Ingeniero Pereira 676, E3264BTD Concepción del Uruguay, Argentina,
<http://www.frcu.utn.edu.ar>

^bGrupo de Estudio de Maderas, Facultad Regional C. del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional

^cJefe de Trabajos Prácticos de la cátedra Estructuras Metálicas y de Madera, Facultad Regional C. del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional

^dJefe del Laboratorio de Ingeniería Civil, Facultad Regional C. del Uruguay, Universidad Tecnológica Nacional

Palabras Clave: Uniones abulonadas, Método de Elementos Finitos, Ensayos de tracción.

Resumen. Los medios de unión resultan de fundamental importancia en el estudio de las estructuras de acero, y son precisamente las uniones, las zonas de la estructura donde suelen presentarse más frecuentemente las fallas. Es por ello y con el objetivo de que los alumnos visualicen el estado tensional de los diferentes elementos que materializan una unión abulonada, que desde la cátedra Estructuras Metálicas y de Madera que pertenece al sexto año de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional, se planteó la necesidad de incorporar la simulación numérica al trabajo experimental y al diseño conforme a la reglamentación vigente en el país.

En este trabajo se presenta una aplicación del Método de Elementos Finitos al estudio de la resistencia y la deformación en uniones abulonadas, tipo aplastamiento, de barras sometidas a esfuerzos de tracción. La modelación se realizó mediante un código de elementos finitos no lineal utilizando un modelo tridimensional. Los resultados obtenidos por la aplicación del método numérico ajustan razonablemente los valores determinados experimentalmente y los que surgen de la aplicación de las reglas de diseño prescriptas en el Reglamento antes mencionado.

1 INTRODUCCIÓN

Las estructuras están formadas por elementos estructurales que generalmente deben unirse para que aquella funcione como tal. Los medios de unión más utilizados actualmente en las estructuras de acero son la soldadura y los bulones (Troglia 2003).

Las uniones abulonadas son cada vez más utilizadas debido a varios aspectos que hacen que constituyan un método sencillo, práctico y seguro para resolver el problema de los empalmes. Se pueden hacer tanto con bulones comunes calibrados como con bulones de alta resistencia (Troglia 2003).

Existen dos tipos de uniones abulonadas, diferenciadas por la manera en que se transmite la fuerza cuando ésta actúa en dirección normal al eje del bulón: uniones tipo aplastamiento y uniones tipo deslizamiento crítico (rozamiento). En este trabajo se estudian las primeras, en las cuales, además de las tensiones que se originan en los bulones, se producen importantes concentraciones de tensiones tanto en los elementos a unir como en las piezas auxiliares.

Los reglamentos de diseño estructural establecen métodos aproximados para el cálculo de los esfuerzos, que le permiten al proyectista evaluar la capacidad portante de este tipo de uniones de una forma simple y segura. Los resultados de ensayos llevados a cabo en el Laboratorio de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional corroboraron un adecuado comportamiento de uniones tipo aplastamiento diseñadas conforme a las prescripciones del Reglamento CIRSOC 301, (2005).

La aplicación del Método de los Elementos Finitos (Zienkiewicz, 1985; Hughes, 2000; Rao, 2005) permite lograr una aproximación a la distribución real de tensiones en los elementos componentes de estas uniones mecánicas. Dicha distribución puede ser contrastada con los resultados obtenidos en ensayos llevados a cabo a escala real.

El objetivo del presente trabajo es reproducir el comportamiento tensión-deformación de barras sometidas a un esfuerzo de tracción y vinculadas a través de uniones de tipo aplastamiento con bulones de alta resistencia. Se utilizó el código de elementos finitos no lineal ANSYS.

2 FALLAS DE UNIONES TIPO APLASTAMIENTO

Las posibilidades de falla de una unión abulonada, tipo aplastamiento, cuando debe transmitir fuerzas normales a los ejes de bulones son: (ver Figura 1) (Troglia 2003).

- a. Falla por corte del bulón.
- b. Falla por desgarramiento de la chapa desde el bulón a su extremo libre.
- c. Falla por aplastamiento del bulón.
- d. Falla por aplastamiento de la chapa.
- e. Falla por rotura de la chapa en la sección del agujero.

Si existieran dos o más bulones en línea en cada uno de ellos se puede producir la falla por corte y además pueden producirse entre bulones, el desgarramiento de la chapa o su aplastamiento (Troglia 2003).

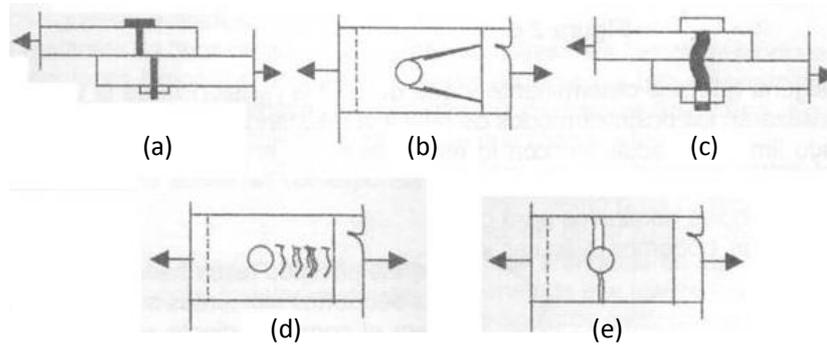


Figura 1: Tipos de falla una unión abulonada tipo aplastamiento (Troglia 2003)

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

El programa experimental se llevó a cabo mediante ensayos de tracción de barras unidas con diferente número de bulones en línea. A continuación se detallan los especímenes ensayados, características de los materiales y procedimiento de ensayo e instrumentación.

3.1 Descripción de los especímenes ensayados

Se ensayaron 3 especímenes con 2, 3 y 4 agujeros en línea, respectivamente. En la [Figura 2](#) se pueden ver fotos de las distintas probetas y en la [Tabla 1](#) se presentan las denominaciones y características de las mismas. Se dispusieron dos planchuelas base de 1.27 mm (1/2") de espesor, a las que se unieron las piezas (chapas de 0.635 mm (1/4") de espesor) a ensayar tal como se muestra en la [Figura 3](#). Las planchuelas base son las que durante el ensayo permanecen sujetas a las mordazas. Se adoptó esta disposición con la finalidad de lograr una adecuada transmisión de la carga. Para materializar la unión se usaron en total 4, 6 y 8 bulones, es decir el espécimen a ensayar estaba unido mediante 4, 6 u 8 bulones a cada una de las planchuelas base. Se utilizaron bulones de alta resistencia ISO 8.8 de 8 mm de diámetro. Los agujeros de 10 mm de diámetro en las planchuelas, se hicieron mediante perforación por agujereadora. La distribución de bulones en los elementos a unir, es decir la separación entre centros de agujeros (L_a), y las distancias de centros de agujeros a bordes (d_b) se hizo de acuerdo a especificaciones dadas por el [Reglamento CIRSOC 301, \(2005\)](#) (ver [Figura 3](#)).

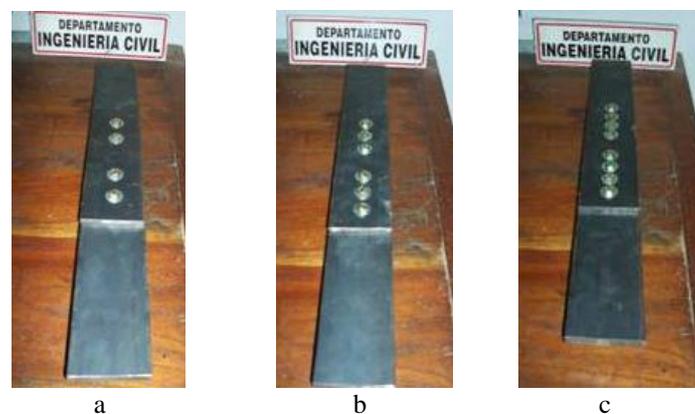


Figura 2: Fotografías de las probetas ensayadas

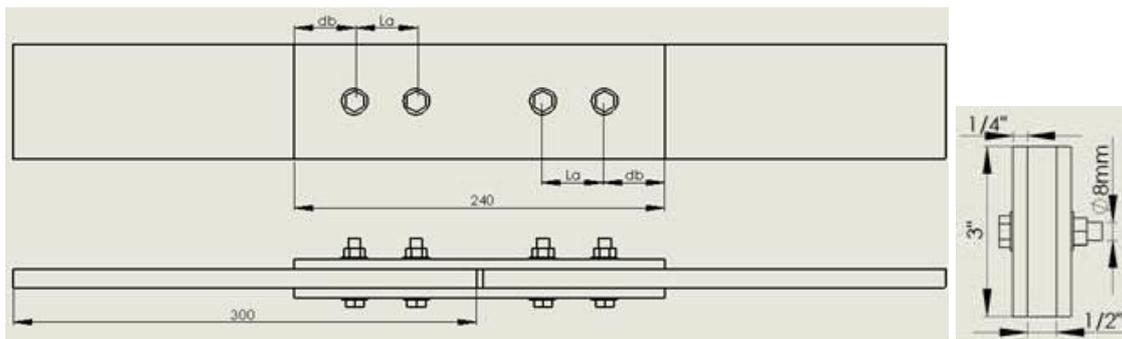


Figura 3: Detalle de las medidas de diseño [mm]

Espécimen	Descripción	Referencia	L_a [mm]	d_b [mm]
2BL	2 bulones en línea	Figura 2a	40	40
3BL	3 bulones en línea	Figura 2b	30	30
4 BL	4 bulones en línea	Figura 2c	25	25

Tabla 1: Características y denominaciones de las probetas ensayadas.

3.2 Características de los materiales

Las características mecánicas del acero de las planchuelas y bulones se presentan en la [Tabla 2](#).

	Planchuelas	Bulones
Tensión de Fluencia, F_y (MPa)	235	640
Tensión de Rotura a Tracción, F_u (MPa)	400	800
Módulo de Elasticidad, E (MPa)	210000	210000
Coefficiente de Poisson	0.3	0.3

Tabla 2: Propiedades mecánicas del acero de las planchuelas y los bulones.

3.3 Procedimiento de ensayo

Todos los ensayos realizados consistieron en la aplicación de cargas cuasiestáticas monótonas crecientes en el plano. La carga fue aplicada usando una prensa Shimatzu con sistema hidráulico y posibilidad de desarrollar una carga vertical nominal máxima de 1000 kN. Se adoptó una velocidad de carga de 1 mm/min hasta producirse la rotura de la pieza. En la [Figura 4](#) se muestra el esquema de ensayo. Cargas y desplazamientos se midieron a través de los dispositivos de la máquina de ensayos.

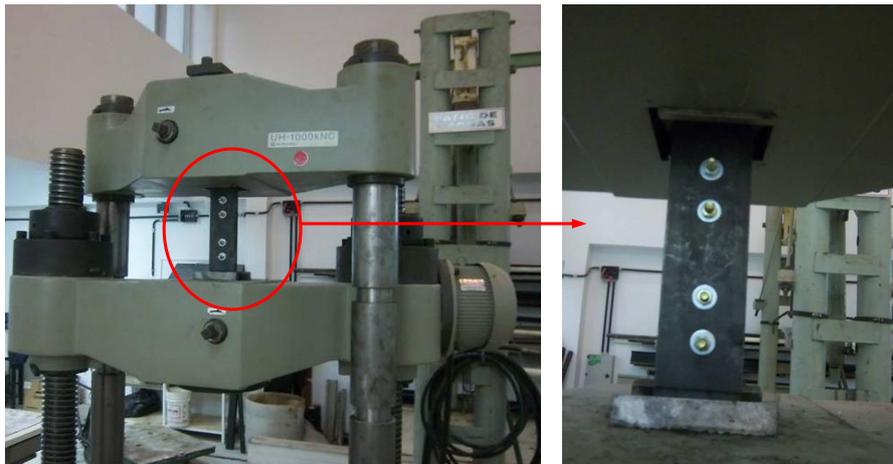


Figura 4: Esquema de ensayo e instrumentación

4 PREDICCIÓN TEÓRICA DEL TIPO DE FALLA Y LA CARGA DE ROTURA

Mediante el análisis y conocimiento de las características mecánicas del material empleado, y tomando como base lo establecido por las especificaciones dadas por el [Reglamento CIRSOC 301, \(2005\)](#), se verificó en primer término que la distribución de bulones en los elementos a unir, es decir la separación entre centros de agujeros, y las distancias de centros de agujeros a bordes, se encontraban dentro de los límites permitidos. Luego se determinó la resistencia de diseño de las barras traccionadas, teniendo en cuenta que es el menor de los valores obtenidos al considerar los siguientes estados límites:

1. Fluencia en la sección bruta.
2. Rotura en la sección neta.

Debido a que resulta ser una unión de tipo aplastamiento, entre dos chapas, que debe transmitir una fuerza de tracción, es decir una fuerza normal a los ejes de los bulones, se determinaron también la posibilidad de falla por corte en el bulón y la resistencia al aplastamiento de la chapa en la zona de los agujeros.

En la [Tabla 3](#) se pueden ver los valores de resistencia obtenidos de la aplicación de las reglas de diseño prescriptas en el Reglamento antes mencionado.

Especímen	Carga de rotura (kN)			
	Corte del bulón	Aplastamiento de la chapa	Fluencia de la sección bruta	Rotura en la sección neta
2BL	80.4	225	229	314
3BL	120	338	229	314
4BL	161	451	229	314

Tabla 3: Valores de resistencia teóricos.

5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

En la [Tabla 4](#) se presentan los resultados obtenidos de los ensayos. Se debe destacar que la falla se produjo, tal como se esperaba, y de acuerdo a los resultados teóricos por corte en los bulones.

Espécimen	Carga de rotura (kN)
2BL	89.4
3BL	127
4BL	169.2

Tabla 4: Resultados experimentales.

En la [Figura 5](#) se muestran las probetas luego del ensayo. Se observa la deformación de la chapa en la zona de agujeros y el corte y deformación de los bulones.



Figura 5: Tipo de falla de especímenes con dos y cuatro agujeros

6 ANÁLISIS CON ELEMENTOS FINITOS

A fin de introducir a los alumnos en la modelación numérica se realizó un análisis detallado de uno de los especímenes ensayados en el laboratorio, utilizando el programa de elementos finitos no lineal ANSYS. Se simuló la probeta constituida por dos bulones en filas. El objetivo planteado por la cátedra fue mostrar a los alumnos la distribución de tensiones y deformaciones y contrastarla con los resultados obtenidos en el ensayo de laboratorio.

Se creó un modelo tridimensional, que, dada la precisión geométrica requerida, alcanzó un número elevado de nudos y elementos. Es por ello y, a los efectos de obtener una solución suficientemente precisa en un tiempo de cálculo razonable, se usó un mallado menos fino en las zonas de menor concentración de tensiones.

Se realizó un cálculo no lineal, caracterizado por dos tipos de no linealidad:

- 1) No linealidad del material acero, cuya curva tensión deformación se introdujo con una rama elástica y otra plástica, según se detalla más adelante.
- 2) No linealidad de las superficies de contacto entre vástagos de bulones y agujeros de barras, sin rozamiento.

6.1 Tipos de Elementos

Las planchuelas y los bulones se discretizaron utilizando elementos finitos sólidos tridimensionales. Se emplearon en su mayoría elementos SOLID 186, de 20 nodos e

integración reducida y diferentes herramientas automáticas de mallado que posee el software ANSYS ([Mechanical Help Software ANSYS v12.1](#)), tales como Sweep y MultiZone. Sweep es una herramienta automática de mallado para elementos hexaédricos, aplicable solamente a sólidos extruibles (ej.: planchuelas). MultiZone, en cambio, es un mallador automático que se puede utilizar en sólidos no extruibles (ej.: bulones). Esta última herramienta define un elemento primordial (ej.: hexaedros) para todos los volúmenes que son aplicables y otro tipo de elemento opcional (ej.: tetraedros) para aquellos volúmenes que no pueden ser mallados con elementos primordiales. Se analizaron diferentes tamaños de mallas a fin de lograr un refinamiento adecuado. En la [Figura 6](#) se puede observar el detalle de la malla del ensamblaje completo y la de un bulón. No se modelaron las tuercas ni arandelas con el fin de reducir el número de contactos. El número total de elementos y nodos fue de 15932 y 68697, respectivamente.

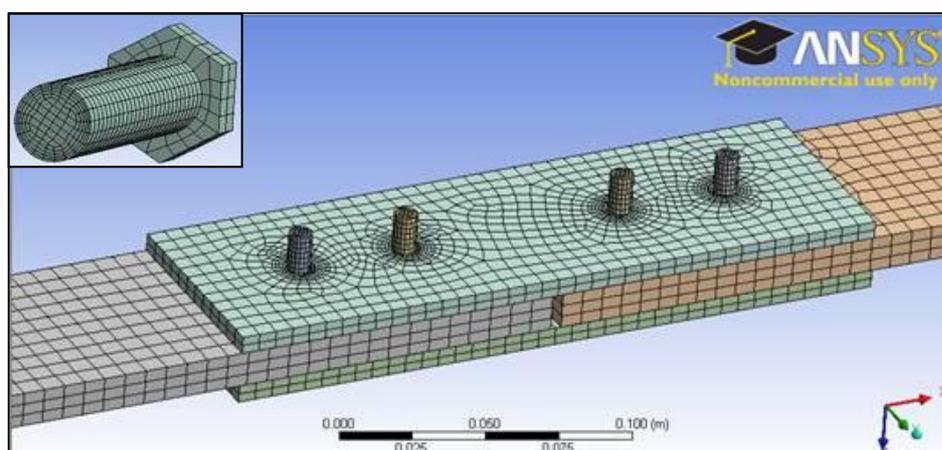


Figura 6: Malla de elementos finitos: unión estructural y bulón

6.2 Estadísticas y calidad del mallado

La calidad del elemento se puede calificar según dos indicadores: a) “relación de aspecto” (aspect ratio) y b) “asimetría o distorsión” (Skewness). El primero define una relación entre las longitudes del elemento. Cuanto más similares son las longitudes mejor es la relación de aspecto del elemento siendo el cuadrado y el triángulo equilátero las geometrías ideales ya que estos poseen las mismas relaciones de longitud entre sus lados por lo tanto su relación de aspecto es igual a 1 (ver [Figura 7](#)). El segundo indicador define una relación entre el tamaño del elemento y el tamaño del elemento óptimo. Sus valores varían entre 0 y 1, siendo 0 el elemento ideal (ver [Figura 7](#)).

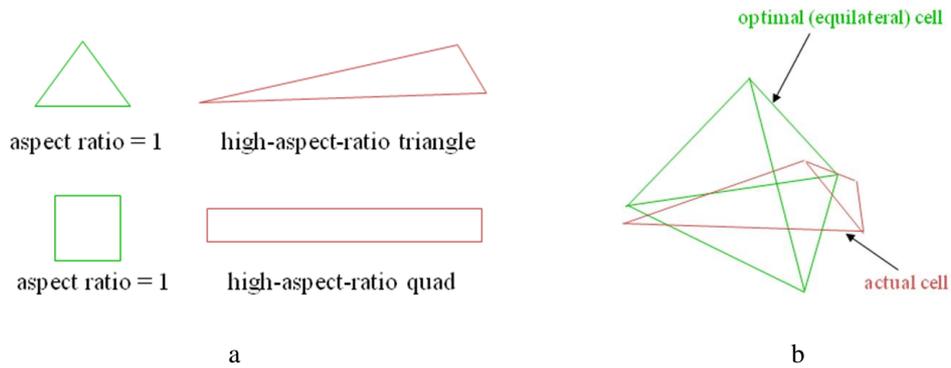


Figura 7: a) relación de aspecto; b) Asimetría (Skewness) ([Mechanical Help Software ANSYS v12.1](#))

El mallado utilizado en la presente simulación tuvo una “relación de aspecto” promedio de 2 y una “distorsión” máxima de 0,64. Teniendo en cuenta dichos valores y de acuerdo a la clasificación antes mencionada ([Mechanical Help Software ANSYS v12.1](#)), se considera que la malla generada resultó adecuada para llevar a cabo la simulación.

6.3 Condiciones de borde

En la [Figura 8](#) se muestran las condiciones de borde de la probeta. Se aplicó un desplazamiento impuesto a una de las planchuelas de base ([Figura 8](#)), equivalente al desplazamiento máximo obtenido experimentalmente (10 mm) y un empotramiento a la otra planchuela de base ([Figura 8](#)).

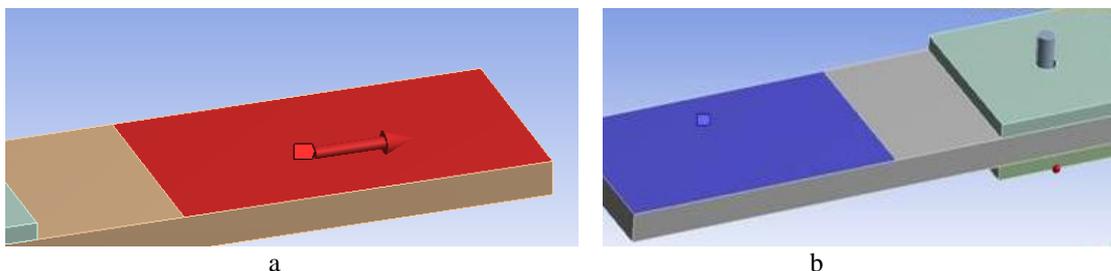


Figura 8: Malla de elementos finitos: condiciones de borde a) Desplazamiento impuesto; b) empotramiento

6.4 Modelación del contacto

Cuando dos superficies separadas se tocan una con la otra se vuelven tangentes, se dice entonces que están en contacto. Se presenta un problema de naturaleza no lineal inherente, dado que a priori no se conoce qué parte de la frontera del cuerpo está en contacto con el otro cuerpo elástico o rígido.

En sentido físico, dos superficies que están en contacto tienen las siguientes características:

- No hay penetración de una superficie en la otra.
- Pueden transmitir fuerzas normales de compresión y tangenciales de fricción.
- Normalmente no transmiten tensiones de tracción.

En este trabajo se modeló el contacto entre vástagos de bulones y agujeros de planchuelas. Se utilizaron contactos tipo “No Separación” que se resolvieron mediante la aplicación de la formulación de Lagrange Aumentada (Augmented Lagrange) que recomienda el software empleado ([Mechanical Help Software ANSYS v12.1](#)). No se consideró rozamiento.

Según la formulación de Lagrange Aumentada la fuerza de contacto F_{normal} se calcula de la siguiente manera:

$$F_{normal} = k_{normal} x_{penetración} + \lambda \quad (1)$$

Donde k_{normal} es la rigidez normal del contacto, $x_{penetración}$ es la penetración y λ es un término adicional que hace menos sensible el método a la rigidez normal del contacto k_{normal} .

6.5 Materiales

Se adoptó para el acero de las planchuelas y bulones una curva tensión-deformación (σ - ϵ) bilineal, según se ve en la [Figura 9](#), criterio de fluencia de Von Mises y flujo asociado. En la [Tabla 2](#) se resumen las propiedades mecánicas consideradas.

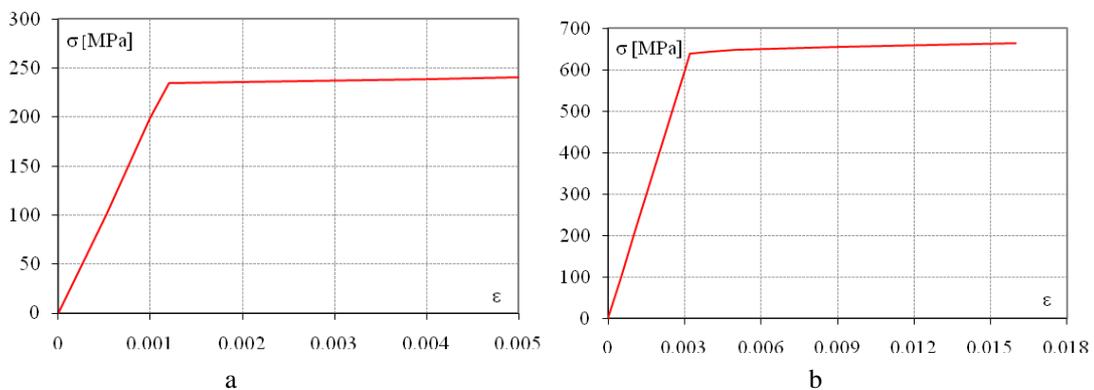


Figura 9: Curva tensión-deformación adoptada para los aceros: a) planchuelas; b) bulones

7 COMPARACIÓN DE RESULTADOS NUMÉRICOS Y EXPERIMENTALES

A continuación se presenta la comparación de los resultados numéricos con los obtenidos experimentalmente.

En la [Figura 10 a y b](#) se muestra la distribución de tensiones de von Mises de una barra de 1.27 mm de espesor (planchuela de base) y de otra de 0.635 mm, respectivamente y la comparación con el resultado experimental. Se destaca la concentración de tensiones en los alrededores de los agujeros, que coincide satisfactoriamente con lo observado experimentalmente. Además se puede ver que se ha superado la tensión última del acero de la barra ([Tabla 2](#)).

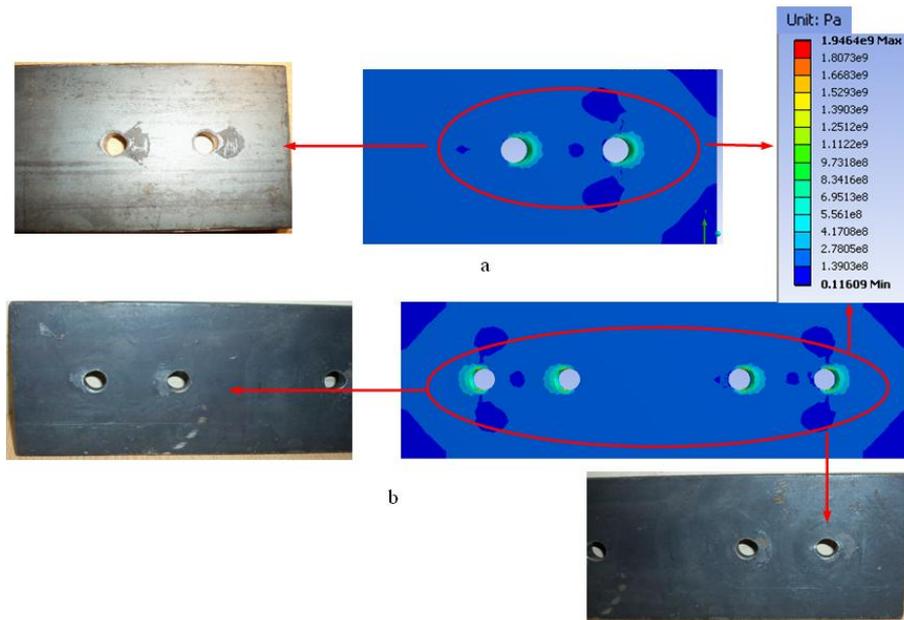


Figura 10: Distribución de tensiones en planchuelas: a) 1.27 mm, b) 0.635 mm

En la [Figura 11](#) se puede ver la distribución de deformaciones plásticas en un bulón que no llegó a romperse durante el ensayo y en los dos tipos de planchuelas (1.27 y 0.635 mm de espesor), respectivamente. Se observa un ajuste aceptable con el ensayo experimental.

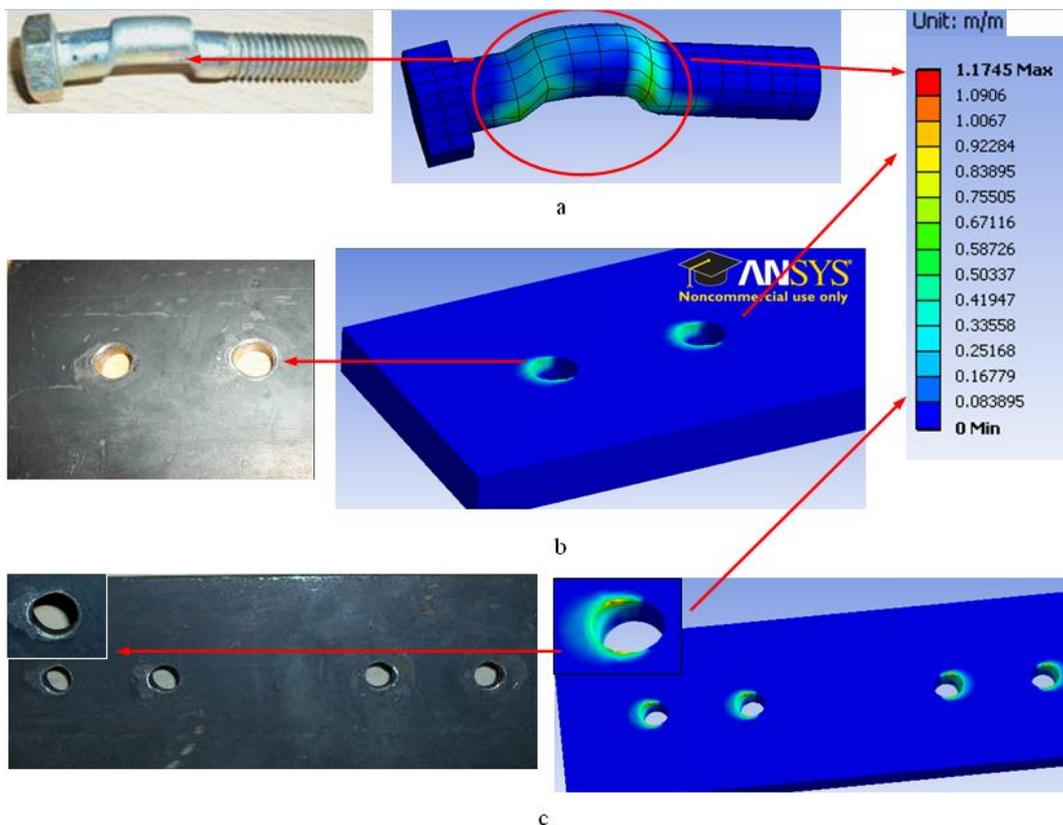


Figura 11: Distribución de deformaciones plásticas: a) bulón, b) Planchuela de 1.27 mm de espesor, c) Planchuela de 0.635 mm de espesor

En la **Figura 12** se observa la trayectoria de las tensiones principales en el ensamblaje completo. En rojo se destacan las tensiones principales máximas, en azul las mínimas.

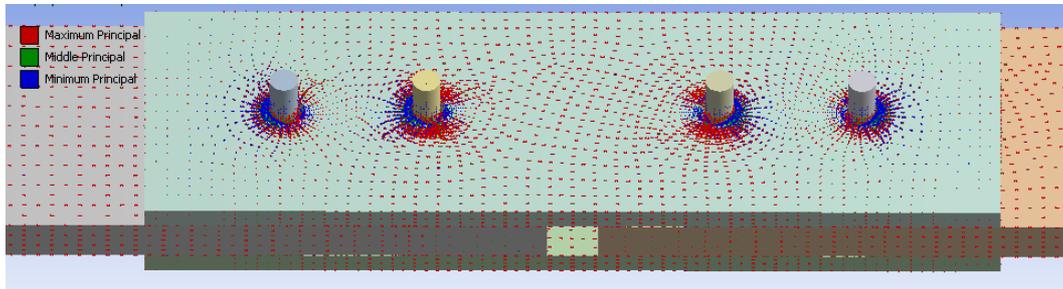


Figura 12: Trayectoria de las tensiones principales

Finalmente en la **Figura 13** se muestra la configuración deformada del ensamblaje completo. La deformación de los bujes es mayor que la observada experimentalmente, debido a que no se consideraron las arandelas en la simulación.

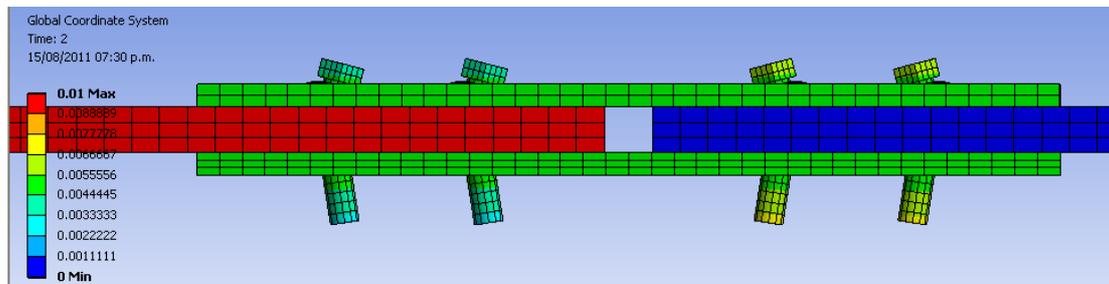


Figura 13: Configuración deformada de la unión

8 CONCLUSIONES

La utilización del Método de Elementos Finitos para el tratamiento de uniones abulonadas ha resultado una experiencia interesante y enriquecedora. El ejemplo elegido para realizar la simulación numérica ha permitido crear un modelo complejo que abarcó dos tipos de no linealidad: material y de contacto.

El análisis mediante código de elementos finitos no lineal ANSYS permitió a los alumnos visualizar la distribución de tensiones y deformaciones de una unión abulonada tipo aplastamiento. Este análisis fue validado por comparación con resultados experimentales, convirtiendo a dicho software en una herramienta útil para la detección de concentración de tensiones y posibles zonas fallas.

Por otro lado los alumnos comprendieron que el uso de un software de Elementos Finitos debe hacerse con criterio y conocimiento no sólo de método en sí, sino también del tipo de problema que se está analizando.

9 AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Juan Carlos Piter, Profesor Titular de la Cátedra Estructuras Metálicas y de Madera de la carrera de Ingeniería Civil de la Facultad Regional Concepción del Uruguay por el apoyo y asesoramiento brindado y al Departamento de Ingeniería Civil por el soporte económico.

REFERENCIAS

- Hughes, T., *The finite element method*, Dover Publication Inc., 2000.
Mechanical Help Software ANSYS v12.1.
- Rao, S., *The finite element method in Engineering*, Fourth Edition. Elsevier Inc., 2005.
- Reglamento CIRSOC 301, Proyecto de Reglamento Argentino de Estructuras de Acero para Edificios, Buenos Aires, 2005.
- Troglia, G., Estructuras Metálicas. Proyecto por Estados Límites. Parte I: Fundamentos, procedimientos y criterios de proyecto. Universitas, Editorial Científica Universitaria, Córdoba, 2003.
- Zienkiewicz, O.C., *The finite element method*, Third Revised Edition. McGraw Hill, 1985.