

Calibración de un modelo para el estudio de uniones con cordones laterales, mediante elementos finitos en tres dimensiones

JOSÉ LAVADO RODRIGUEZ (*)

RESUMEN Este artículo presenta un modelo para cordones de soldadura en tres dimensiones empleando la técnica de elementos finitos, calibrándolo para el estudio de uniones soldadas con cordones laterales, para casos de carga paralelas al eje del cordón. El cálculo de uniones metálicas formadas por chapas soldadas a solape se realiza en todas las Normas mediante un cálculo unidimensional, considerando que el cordón trabaja uniformemente en toda su longitud. Mediante el modelo aquí presentado es posible estudiar todo el complejo proceso de transmisión de tensiones a través del cordón.

CALIBRATION OF A MODEL FOR THE STUDY OF LONGITUDINAL WELDED JOINTS, TRANSMITTING LOADS IN THE DIRECTION OF THE AXIS OF THE WELD, USING THREE-DIMENSIONAL FINITE ELEMENTS

ABSTRACT This paper shows a fillet weld model, employing three-dimensional finite elements technique, making a calibration for the study of welded joints, formed with lateral welds, in such cases where the load is applied parallel to the axis of the weld. The calculation of metal joints formed with welded plates is carried out in all the rules in an unidimensional behaviour, considering that the fillet weld works uniformly in its all length. With the model here presented is possible to study the full complex process of tensional transmission along the fillet weld.

Palabras clave: Modelo; Soldaduras laterales; Calibración; Elementos finitos.

1. INTRODUCCIÓN

El dimensionamiento de los cordones de soldadura en ángulo de las uniones soldadas, formadas por cordones transmitiendo cargas según la dirección del cordón, aparece tratado en todas las Normas de una manera muy simple. El planteamiento que recogen todas las Instrucciones, Normas y Reglas de cálculo de uniones soldadas se basa en considerar que la carga transmitida (o resistida) por cada elemento diferencial del cordón es igual a lo largo de toda su longitud.

Este planteamiento lleva a la hipótesis de un reparto lineal de la carga a lo largo del cordón, y por lo tanto a que todos los elementos del cordón están a la misma tensión y alcanzan la tensión crítica al mismo tiempo. Así, las distintas Normas e Instrucciones plantean una fórmula a través de la cual se obtiene una relación entre la carga soportada por la unión, la longitud del cordón L , su

espesor de garganta a y la tensión admisible del material a unir.

Las Normas admiten que el cordón trabaja uniformemente por la gran capacidad de plastificación del mismo, lo que lleva a que al final todo el plano de garganta se encuentra plastificado y por tanto trabajando con la misma tensión.

Dicho planteamiento es demasiado simplista, pues la transmisión y reparto de tensiones a lo largo del cordón depende de más variables que este modelo unidimensional empleado en las Normas no contempla.

Así, para transmitir la carga de una a otra chapa a través del cordón es necesario que se produzca un incurvamiento de las isostáticas, apareciendo unas tensiones normales al eje del cordón que alteran dichas tensiones (figura 1).

Ello hace que aparezcan puntas de tensión en los extremos del cordón, disminuyendo las tensiones hacia el centro del mismo. En cordones cortos este hecho no importa, ya que su capacidad de plastificación hace que toda su longitud acabe prácticamente a la misma tensión de trabajo (figura 2).

En cordones largos formando parte de uniones sometidas a fatiga sí tiene importancia, ya que puede llegarse a un fa-

(*) Dr. Ingeniero de Caminos.
Dpto. de Mecánica de Estructuras. Universidad de Granada

- Módulo de elasticidad transversal:

$$G = E \nu / 2(1 + \nu)$$

donde ν es el módulo de Poisson ($\nu=0.3$) $\Rightarrow G = 8.077E+10 \text{ N/m}^2$.

El acero es un material que presenta un diagrama tensión-deformación (σ - ϵ) en el cual aparece una primera rama elástica; alcanzado un cierto valor de la tensión (el llamado límite elástico (σ_e)) disminuye el módulo de elasticidad longitudinal, entrando el material en su fase plástica.

Así el programa ANSYS permite adoptar inicialmente un valor para E (módulo de elasticidad longitudinal) y otro para G (módulo de elasticidad transversal), de modo que mientras en el material no se alcance su límite elástico, la relación σ - ϵ será constante.

Al superar su límite elástico el material entra en la fase plástica.

Dentro de los distintos diagramas σ - ϵ que ofrece el programa ANSYS, se ha adoptado un diagrama de respuesta multilíneal (Multilinear Isotropic Hardening (MISO)), que tiene en cuenta para el cálculo de tensiones el criterio de Von Mises. De este modo podemos definir diagramas σ - ϵ con una rama elástica y una o más ramas que reflejen el comportamiento plástico del acero.

Para las chapas se ha empleado un diagrama σ - ϵ del tipo MISO con una rama elástica y una única rama plástica, que es el que se observa en la figura 6.

b) Material que conforma el cordón:

Como material de aportación para el cordón de soldadura se ha empleado un electrodo convencional llamado O.K.46.

Sus características mecánicas son:

- Límite elástico: 4.000 kp/cm^2
- Límite de rotura: 5.200 kp/cm^2
- Módulo de deformación longitudinal en la rama elástica:

$$E_e = 0,2 \times 2.100.000 \text{ kp/cm}^2 = 4.2E+10 \text{ N/m}^2$$

- Módulo de deformación en la rama plástica:

$$E_p = 4.438 \text{ kp/cm}^2 = 4.438E+9 \text{ N/m}^2$$

- Módulo de deformación transversal:

$$G = E / 2(1 + \nu)$$

donde ν es el módulo de Poisson ($\nu=0.3$)

Para el cordón de soldadura se ha empleado también un diagrama σ - ϵ del tipo MISO con una rama elástica y una única rama plástica, que se presenta en la siguiente figura.

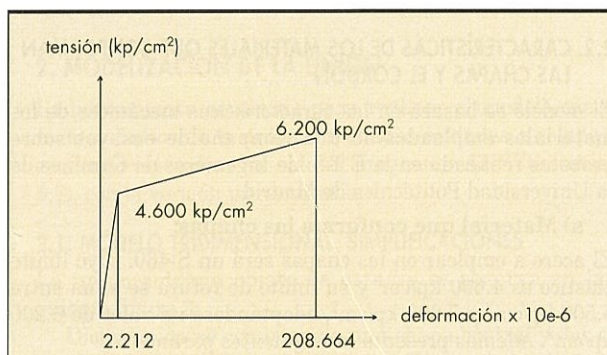


FIGURA 6. Diagrama tensión-deformación del material que forma las chapas de la unión.

2.3. TIPO DE ELEMENTOS EMPLEADOS EN CHAPAS Y CORDÓN

El modelo tridimensional de la unión que se estudia se ha modelizado con elementos sólidos. La versión 5.7 del programa ANSYS pone a disposición del usuario en su biblioteca varios tipos de elementos tridimensionales diseñados para un cálculo estructural que permiten estudiar un comportamiento elasto-plástico.

De todos los elementos con posibilidad de comportamiento plástico se ha empleado el SOLID95, ya que con sus 20 nodos permite mucha más precisión que otros existentes en ANSYS con menos nodos (SOLID45, SOLID185) para el mismo número de elementos del modelo.

El SOLID95 es un elemento prismático. Presenta tres grados de libertad por nodo, correspondientes a los tres desplazamientos en el espacio (u_x , u_y , u_z). Permite adoptar formas irregulares sin perder precisión en su comportamiento. Presenta nodos en sus esquinas y en el centro de sus aristas, por lo que se adapta fácilmente a la modelización de contornos más difíciles. Mediante la agrupación de parejas de nodos el elemento se puede convertir en un prisma triangular o en un tetraedro (figura 8).

3. DISCRETIZACIÓN DE LA MALLA

Para discretizar el modelo se ha seguido un principio esencial en la técnica de análisis con elementos finitos, con el fin de obtener una solución lo más exacta posible: densificar la malla en aquellas zonas donde existan concentraciones de tensiones.

En el proceso de transmisión de tensiones entre las chapas que forman la unión y el cordón de soldadura podemos apreciar de manera intuitiva cómo dichas tensiones serán mucho mayores en el interior del volumen correspondiente al cordón, ya que toda la fuerza soportada por la unión tiene que ser transmitida íntegramente a través de dicho cordón de soldadura. Por tanto las tensiones que sufre la unión serán menores en las chapas que en el cordón.

Profundizando en esta observación y por continuidad en dichas tensiones, cuanto más nos acerquemos al cordón de soldadura desde las chapas las tensiones irán creciendo gradualmente hasta hacerse máximas en las caras de contacto de dichas chapas con el cordón de soldadura.

Por tanto la discretización de la malla a emplear tiene que ser máxima en el cordón de soldadura y en las inmediaciones de las chapas a dicho cordón, requiriendo el modelo menos elementos a medida que nos alejamos del cordón de soldadura, ya dentro de las chapas.

Dentro de lo que es el volumen del cordón además cabe esperar una concentración de tensiones mayor en sus extre-

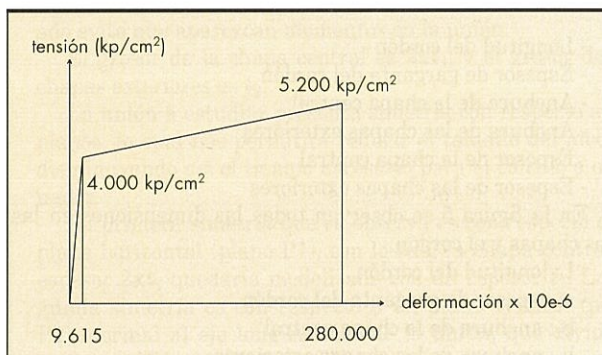


FIGURA 7. Diagrama tensión-deformación del material que forma el cordón.

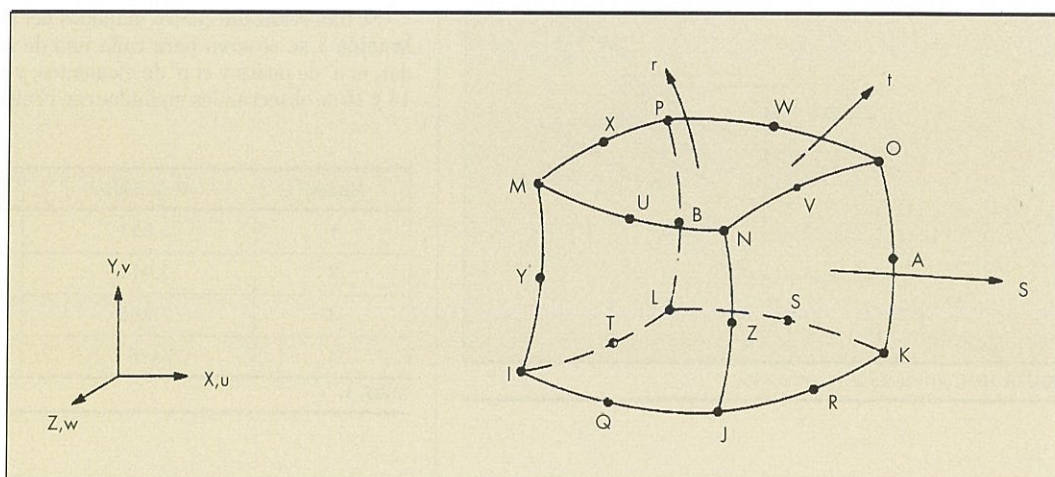


FIGURA 8. Elemento SOLID95.

mos que en el centro. Por tanto, la malla deberá ser más densa en dichos extremos del cordón que en su zona central. Esta necesidad de aumentar el número de elementos en los extremos del cordón es más evidente cuanto más largo es el cordón de soldadura.

Así pues el modelo que va a servir para este cálculo con elementos finitos presentará una malla con las siguientes características:

- 1.- Densidad máxima de elementos en los extremos del cordón de soldadura y en sus inmediaciones, ya dentro de las chapas.
- 2.- Densidad también elevada de elementos pero decreciendo hacia el centro del cordón de soldadura y en sus inmediaciones, ya dentro de las chapas.
- 3.- Densidad de elementos decreciendo gradualmente en las chapas a medida que nos alejamos de las proximidades del cordón de soldadura.

Hay sin embargo dos zonas extremas en las chapas del modelo donde se requerirá una densidad de elementos determinada y uniforme en toda la anchura y espesor de las chapas. Dichas zonas son los extremos de las chapas donde se aplica en el modelo la fuerza axial que solicita a la unión. En dichas zonas la malla debe tener un tamaño de elementos uniforme, de manera que las fuerzas que se aplican puntualmente en cada uno de los nodos que forman dichas caras proporcionen una tensión constante en toda la sección transversal de la chapa.

Vistos los criterios para discretizar la malla queda únicamente por determinar el número de elementos que deben formarla para conseguir resultados con un grado de precisión aceptable.

4. PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL MODELO

4.1. INTRODUCCIÓN. HIPÓTESIS DE ROTURA DEL CORDÓN

La solución que obtengamos con el modelo deberá ser lo más exacta posible, con tiempos de cálculo razonables.

Este proceso de calibración se va a realizar para un modelo que reproduce una de las probetas ensayadas en la campaña de ensayos referida anteriormente, realizada en la E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad Politécnica de Madrid. Dicho modelo presenta cordones de longitud $L = 5$ cm. El espesor de garganta de los cordones es de 4 mm. En la figura 9 se observa dicha probeta.

Los materiales que forman la probeta son los definidos en el apartado 2.2.

El modelo va a ser sometido a un esfuerzo axial hasta la rotura, que se manifestará por un desplazamiento excesivo de los nodos del cordón, llegado éste a su agotamiento plástico.

Para este cordón de 5 cm. de longitud su longitud eficaz será con toda seguridad la longitud total, ya que en cordones cortos todo el cordón trabaja. Suponiendo la rotura por el plano de garganta, tomaremos la fórmula de resistencia de cordones adoptada en el Eurocódigo 3. La rotura del cordón en los cálculos realizados por el programa ANSYS se producirá según las características del material del cordón ya definidas. Por tanto en el cálculo teórico de la fuerza de rotura según el Eurocódigo tomaremos la resistencia última del metal soldado (en vez del límite elástico del metal base):

$$F_{\text{rotura}} = \tau_{\text{rotura}} (\text{kp/cm}^2) \times L (\text{cm}) \times a (\text{cm})$$

siendo:

$$- \tau_{\text{rotura}} = 5.200 \text{ kp/cm}^2 / \sqrt{3} = 3002 \text{ kp/cm}^2.$$

$$- L (\text{cm}) = \text{longitud del cordón} = 5 \text{ cm.}$$

$$- a (\text{cm}) = \text{espesor de garganta del cordón} = 0.4 \text{ cm.}$$

Así la **fuerza de rotura teórica** que prescribe el Eurocódigo 3 será $F_{\text{rotura}} = 3002 \text{ kp/cm}^2 \times 5 \text{ cm.} \times 0.4 \text{ cm} = 6.004 \text{ kp.}$

Con los criterios de discretización de malla vistos en el párrafo anterior se ha realizado un proceso de calibración del modelo, aumentando progresivamente y de manera uni-

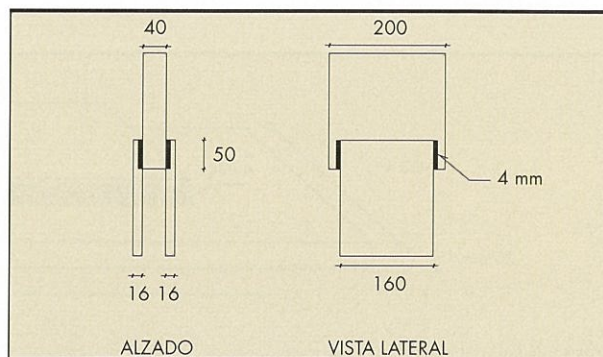


FIGURA 9. Dimensiones de la probeta.

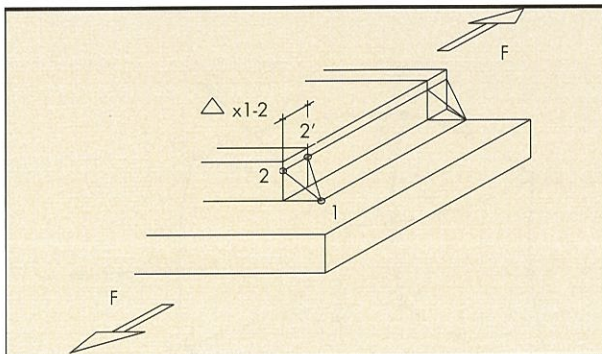


FIGURA 10. Corrimiento Δx_{1-2} del cordón.

forme en todo el modelo el número de elementos de la malla, comparándolo con el tiempo de cálculo empleado.

En cada uno de los mallados que forman parte de la calibración se ha procedido aumentando progresivamente la fuerza axial aplicada, viendo el correspondiente desplazamiento longitudinal en el cordón. Dicho desplazamiento longitudinal del cordón se obtiene mediante el corrimiento relativo según el eje X entre los nodos 1 y 2, tal como se muestra en la figura 10.

Para el valor de la deformación límite del cordón en el cálculo con el programa ANSYS adoptamos el límite propuesto por Fischer en los ensayos por él realizados. Así la fuerza de rotura será aquella que produzca una deformación angular γ_{1-2} (cociente entre el corrimiento relativo entre los nodos 1 y 2 (Δx_{1-2}) y el espesor de garganta "a" de valor:

$$\gamma_{1-2} = \Delta x_{1-2} / a = 0.5$$

Dicho valor es superior al establecido por el Instituto Internacional de la Soldadura, el cual predice la rotura del cordón cuando la deformación angular en uno de sus extremos alcanzar el valor $\gamma_{1-2} = 0.2$. Este valor lo adoptó el I.I.S. hace varias décadas, cuando se empleaban electrodos de peor calidad. Parece más lógico adoptar el valor propuesto por Fischer (obtenido con ensayos más recientes), ya que los cordones empleados actualmente son más dúctiles, permitiendo mayores deformaciones.

Por tanto para un cordón de 4 mm. de espesor de garganta, el desplazamiento máximo llegada la rotura es:

$$\Delta x_{1-2} = 0.5 \times a = 0.5 \times 4 \text{ mm.} = 2.0 \text{ mm.}$$

En la figura 11 se observa las dimensiones del modelo creado en ANSYS a partir de la probeta presentada anteriormente.

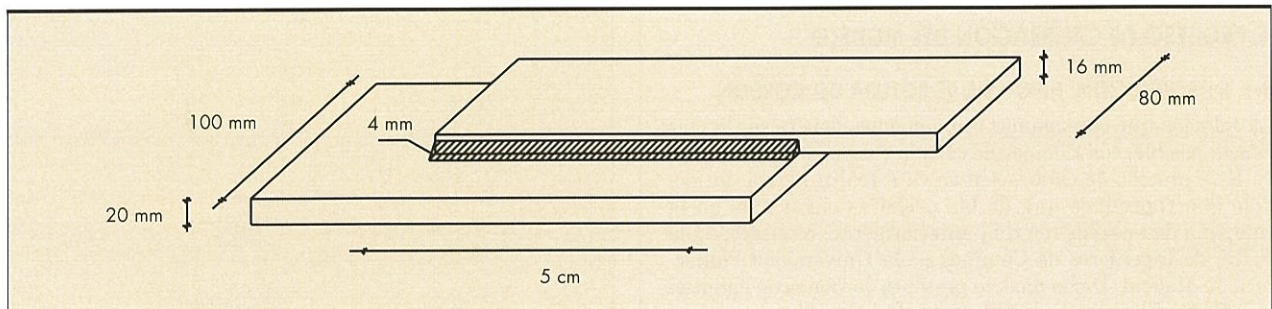


FIGURA 11. Dimensiones del modelo en ANSYS.

Se han realizado cuatro mallados del modelo de cálculo. En la tabla 1 se observa para cada uno de los mallados estudiados, el n° de nodos y el n° de elementos; y en las figuras 12, 13, 14 y 15 se observan los mallados con el elemento SOLID95.

Modelo	Nº de nodos	Nº de elementos
1	2.851	1.426
2	3.911	1.940
3	7.986	3.394
4	14.617	6.313

TABLA 1.

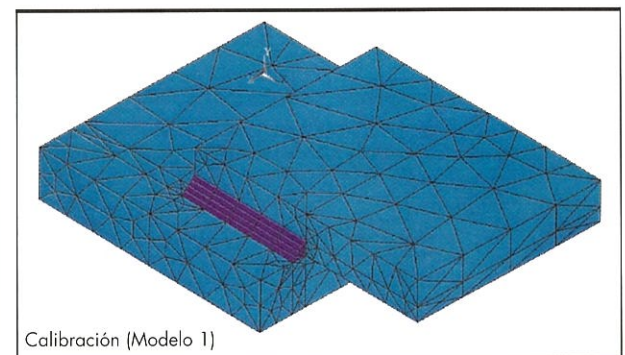


FIGURA 12. Modelo 1.

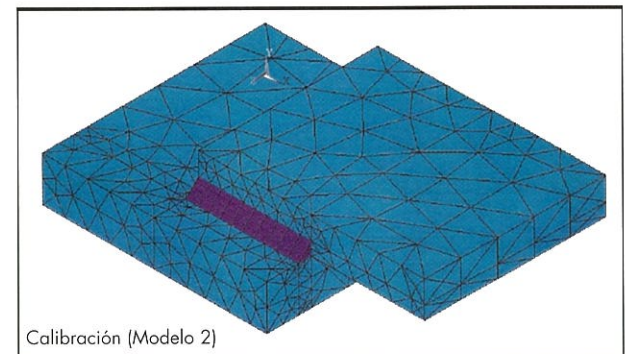


FIGURA 13. Modelo 2.

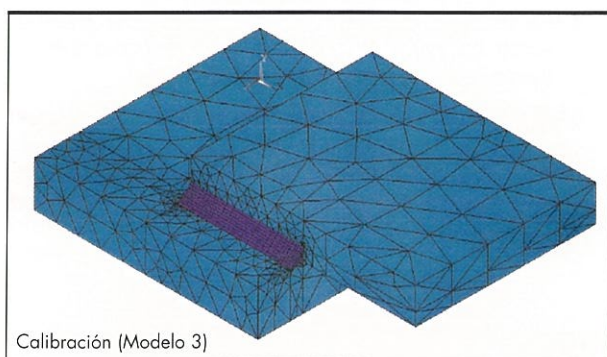


FIGURA 14. Modelo 3.

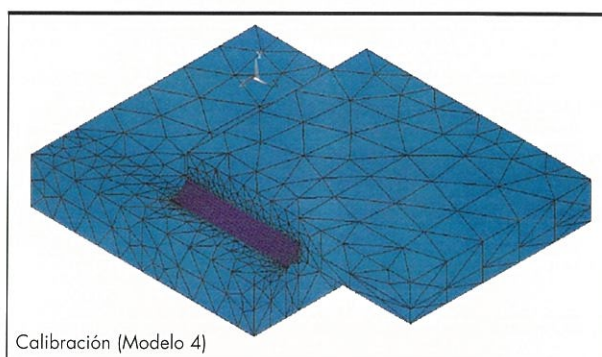


FIGURA 15. Modelo 4.

4.2. RESULTADOS

Con el programa ANSYS se ha procedido aumentando la carga aplicada al modelo, hasta alcanzar el límite de deformación admisible $\Delta x_{1-2} = 2.0$ mm. En la tabla 2 se observa para cada uno de los modelos estudiados:

1. La fuerza de rotura en la unión (correspondiente a un corrimiento relativo $\Delta x_{1-2} = 2.0$ mm.)

2. El tiempo empleado en el cálculo.

De los resultados obtenidos se observa cómo los tiempos de cálculo crecen rápidamente a medida que aumentamos el número de nodos y elementos del modelo. En el gráfico 1 se observa la relación entre el n° de nodos y la fuerza de rotura.

Como vemos, la fuerza de rotura tiende asintóticamente a un valor constante a medida que aumentamos el número

Modelo	Nº de nodos	Nº de elementos	Fuerza de rotura (Kp)	Tiempo de cálculo
1	2.851	1.426	9.890	2 h.
2	3.911	1.940	7.650	4 h.
3	7.986	3.394	6.750	12 h.
4	14.617	6.313	6.300	49 h.

TABLA 2.

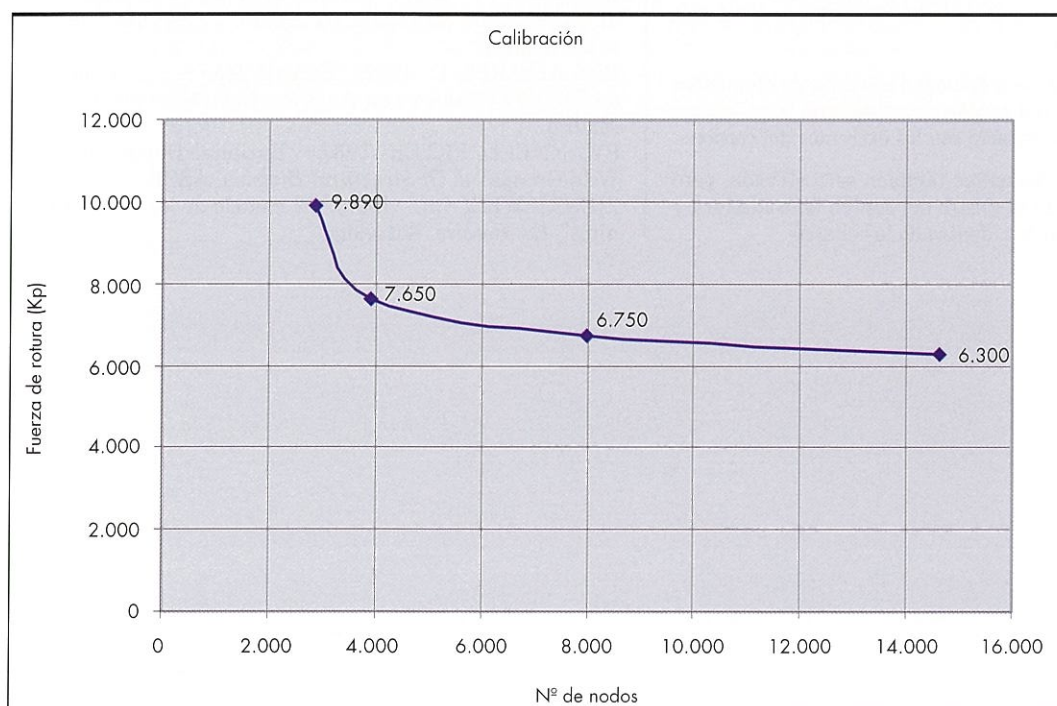


GRÁFICO 1.

de nodos. Se observa que la fuerza de rotura para el modelo más discretizado es muy similar a la teórica ($F_{teórica} = 6.004$ kp), resultando la sección de garganta del cordón completamente plastificada en los cálculos realizados con ANSYS.

Para cordones cortos como el estudiado (Longitud $L = 5$ cm) con mallados del modelo por encima de 8.000 nodos los tiempos de cálculo crecen desmesuradamente, ganando muy poco más en precisión.

No obstante, para el estudio de cordones más largos sí deberán emplearse modelos de mayor número de nodos.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo se presenta un modelo en tres dimensiones de uniones formadas por chapas soldadas a solape con cordones laterales, sometidas a cargas según la dirección del cordón.

Todas las Normas admiten que el cordón trabaja uniformemente por la gran capacidad de plastificación del mismo, lo que lleva a que al final todo el plano de garganta se encuentra plastificada y por tanto trabajando con la misma tensión. Esto es cierto en cordones cortos, pero en cordones largos formando parte de uniones sometidas a fatiga sí tiene importancia, ya que puede llegarse a un fallo del cordón en sus extremos encontrándose su parte central sin trabajar apenas.

Además la transmisión y reparto de tensiones a lo largo del cordón depende de más variables que este modelo unidimensional empleado en las Normas no contempla, ya que para transmitir la carga de una a otra chapa a través del cordón es necesario que se produzca un incurvamiento de las isostáticas, apareciendo unas tensiones normales al eje del cordón que alteran dichas tensiones. Mediante el modelo tridimensional planteado se puede estudiar el estado tensional completo, tanto del volumen del cordón como de las chapas.

Tras los criterios de mallado vistos en el apartado 3 y con la calibración cuyos resultados vemos en el apartado 4, se ha analizado un modelo con cordones cortos, de longitud $L = 5$ cm. Para dicho modelo se propone realizar mallados con las siguientes características (empleando el programa ANSYS, versión 5.7 universitaria):

- 1.- Número mínimo de nodos: 8.000 (empleando el elemento SOLID95)
- 2.- Empleo de mallas con densidad máxima de elementos en los extremos del cordón de soldadura, y en las zonas de chapa en contacto con los extremos del cordón.
- 3.- La densidad de elementos también será elevada, pero decreciendo, hacia el centro del cordón de soldadura y en sus inmediaciones, dentro de las chapas.

4.- La densidad de elementos irá decreciendo gradualmente en las chapas a medida que nos alejamos de las proximidades del cordón de soldadura.

5.- En los extremos de las chapas donde se aplica en el modelo la fuerza axil que solicita a la unión la malla debe tener un tamaño de elementos uniforme, de manera que las fuerzas que se aplican puntualmente en cada uno de los nodos que forman dichas caras proporcionen una tensión constante en toda la sección transversal de la chapa.

REFERENCIAS

- ANSYS (1998), Revisión 5.7. Versión Universitaria. Swanson Analysis Systems, Inc.
- BORNSCHEUER, F.W.; FEDER, D. (1966): "Traglastversuche an Laschenverbindungen aus St 37 mit Flanken- und Stirnnähten". *Schw. Schn.* 18, H.7, S. 305/308.
- BUTLER, L.J.; KULAK, G.L. (1971): "Strenght of Fillet Welds as a Function of Direction of Load", *Welding Journal*.
- COMISION XV IIW (1976): "Design rules for arc-welded connexions in steel submitted to static loads", *Welding in the World*.
- COMISION XV IIW (1981): "Deformation curves of fillet welds", *Welding in the World*.
- EA-95: Normativa Española para Cálculo de Estructuras de Acero. Ministerio de Fomento.
- EUROCODIGO 3 (1992): Normativa Europea para Diseño y Cálculo de Estructuras de Acero. *Edit. Group*.
- FALTUS, F. (1986): "Joints with Fillet Welds". *Elsevier*.
- FISCHER, MAFREE; WENK, PETER (1990): "Taglastuntersuchungen an vorwiegend ruhend beanspruchten langen Flankenkehlnähten (Investigación de la carga última en cordones de soldadura en ángulo largos sometidos a carga estática)", *Der stahlbau*.
- OÑATE, E. (1992): "Cálculo de Estructuras por el Método de Elementos Finitos. Análisis estático lineal". *Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería*, Barcelona.
- QUINTERO, F. (1993): "Estudio mediante elementos finitos de cordones de soldadura en ángulo", *Comunicación privada*, Madrid.
- RUA ALVAREZ, E. (1992): "Estudio Teórico y Experimental de Uniones Soldadas en Angulo", *Comunicación privada*, Madrid.
- SWANNELL, PETER (1981): "Rational Design of Fillet Weld Groups", *J. Of Structural Division*, ASCE.
- ZIENKIEWICZ, O.C. (1980): "El método de los elementos finitos". *Ed. Reverté*, Barcelona.