

SIMULACIÓN DEL EFECTO DEL APRIETE TUERCA-TORNILLO EN EL COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE CHAPAS PUNZONADAS SOMETIDAS A TRACCIÓN

Aragón A. (1), Alegre J.M. (1), Gutiérrez-Solana F. (2)

(1) Area de Mecánica de Medios Continuos y TE. Universidad de Burgos.

(2) Laboratorio de la División de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Universidad de Cantabria.

Resumen. Para caracterizar el comportamiento en fatiga de uniones estructurales complejas es necesario previamente analizar en detalle el comportamiento de una unión simple. En este trabajo se ha analizado el comportamiento en fatiga de una chapa punzonada, con un apriete tornillo-tuerca, sometida a esfuerzos cíclicos de tracción. Los dos parámetros que es necesario conocer en la unión son la fuerza de apriete y el coeficiente de rozamiento entre los elementos de la unión. Para controlar la fuerza de apriete de la unión en cualquier instante se ha diseñado una pequeña célula de carga interpuesta entre los elementos de la unión. El coeficiente de rozamiento entre los elementos de la unión se ha determinado experimentalmente. Conocidos ambos parámetros se ha efectuado una simulación numérica por elementos finitos en 3D para determinar las tensiones que se generan en la superficie de contacto tuerca-chapa durante el apriete y en condiciones de carga a tracción de la chapa. Una vez calculadas las fuerzas de rozamiento en la unión se ha efectuado una simulación en 3D para predecir la evolución del crecimiento de grieta desde la iniciación hasta la rotura, utilizando la ley de Paris del material. La vida en fatiga obtenida de la simulación se ha comparado con los resultados experimentales del ensayo en fatiga de esta unión, obteniendo buenos resultados, lo que permite que la metodología desarrollada pueda ser aplicada al diseño de uniones estructurales más complejas.

Abstract. In order to analyse the fatigue behaviour of complex structural joints a previous analysis of a simple joint is needed. In this work a study of a punched plate, with a simple clamping nut-bolt, subjected to cyclic traction loads has been effected. The two parameters needed to perform the simulation are the clamping force and the slip coefficient between the joint parts. In order to control at each time the clamping force of the joint a load cell has been designed, and placed between the bolt and the plate. The slip coefficient of the material has been experimentally obtained. After that a 3D finite element simulation has been effected in order to obtain the stress contact between the nut, bolt and the plate originated by the coupled loads, clamping and traction forces. Using the sliding forces previously obtained, a 3D finite element analysis has been effected in order to simulate the fatigue crack growth from the initial crack to the final fracture, using the corresponding Paris law of the material. The fatigue life obtained has been compared with the experimental results for the same geometry and clamping force. Good results have been obtained that permit to apply the methodology performed to simulate more complex joints subjected to fatigue loads.

1. INTRODUCCIÓN

Las uniones estructurales metálicas mediante tortillería presentan la ventaja, frente a las uniones soldadas, de su gran facilidad de montaje en obra. Sin embargo, en el entorno de los taladros efectuados en las chapas se genera una fuerte concentración de tensiones que aumenta la posibilidad de aparición de fisuras por fatiga. Además, si los agujeros se realizan mediante punzonado, se genera un elevado daño en la superficie del agujero que reduce todavía más la vida en fatiga de la placa. [1]

Posteriormente, durante la fase de montaje se somete a los tornillos a una fuerza de apriete que asegura la unión, y que sin duda tiene influencia en el comportamiento a fatiga de la misma. Dicho apriete genera unas fuerzas de rozamiento que aumentan el número de ciclos resistido por la unión.

En consecuencia, para poder conocer la vida en fatiga de una unión compleja es necesario estudiar en profundidad la propagación de fisuras por fatiga en las chapas que conforman dicha unión, bajo diferentes condiciones de apriete y cargas de trabajo. Sin embargo, dado el elevado número de variables con influencia en dicha vida en fatiga, se hace necesario el estudio de una geometría sencilla que permita desarrollar una metodología adecuada para poder abordar el diseño de uniones más complejas.

Como primer paso, en trabajos previos se ha estudiado el efecto del punzonado en el comportamiento en fatiga de una chapa simple [2,3], determinando el tamaño de defecto inicial para el análisis de propagación de grieta por fatiga. En este artículo se pretende analizar el efecto de las variables asociadas al apriete de una unión simple, tales como la fuerza de apriete o el coeficiente de rozamiento.

2. GEOMETRIA

Para el estudio desarrollado se ha considerado una unión formada por una chapa punzonada en la que se ha montado un conjunto formado por tornillo, tuerca, contratuerca y las correspondientes arandelas. Las dimensiones de la chapa utilizada para el desarrollo del trabajo aparecen esquematizadas en la Fig. 1.

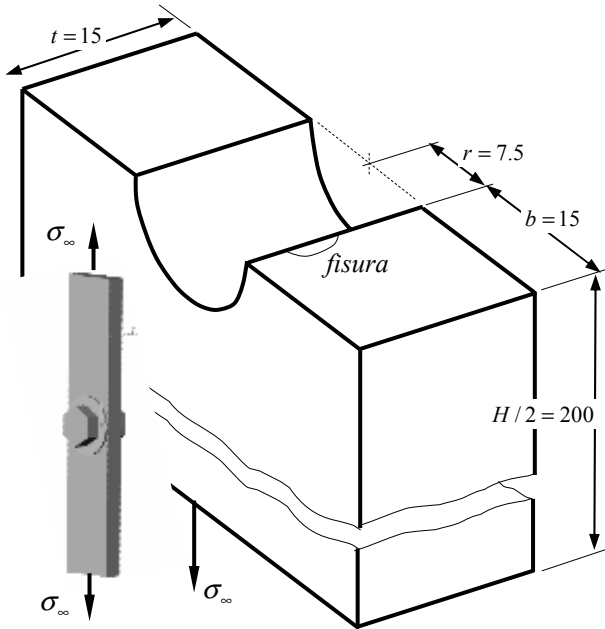


Fig. 1. Dimensiones (en mm) de la chapa sobre la que se montará la unión.

En la unión simple considerada se controla la fuerza de apriete del tornillo mediante la colocación de una célula de carga interpuesta entre el tornillo y la placa punzonada. La célula de carga consiste en un cilindro hueco cuya dimensión exterior es el diámetro del tornillo y la media interior es el diámetro del agujero de la placa. Se han pegado 4 galgas extensiométricas en 4 generatrices del cilindro (cada 90°), como se muestra en la Fig. 2.

Lo primero que se ha realizado es la calibración de la célula de carga desarrollada. Para ello se ha sometido a la misma a un esfuerzo de compresión creciente en su dirección axial desde cero hasta 30 kN, y se ha registrado el valor de las 4 galgas extensiométricas. Con estas 4 medidas se ha calculado el valor medio de la deformación en la dirección axial y se ha comparado con el valor teórico esperado, ajustando el módulo de elasticidad para obtener la mejor precisión posible. El módulo que mejor ajusta los resultados experimentales es $E = 207 \text{ GPa}$. En la Fig. 2. se representa dicha relación, que permite posteriormente conocer la fuerza de apriete en la unión a partir de la medida de la deformación. La precisión obtenida es mucho mejor que con el uso de una llave dinamométrica, la cual solo proporciona valores aproximados y no permite controlar la posible pérdida de apriete a lo largo del ensayo de fatiga.

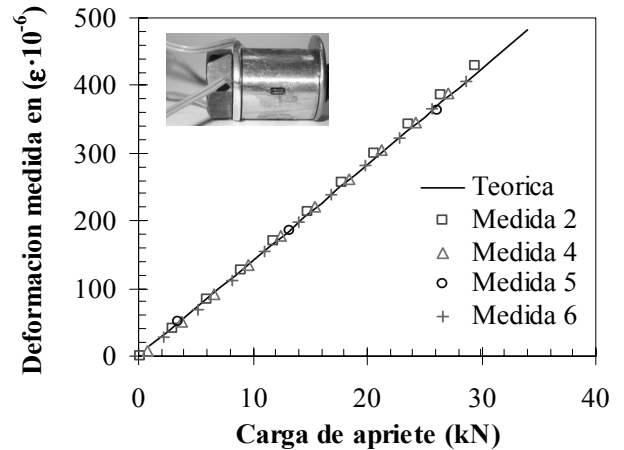


Fig. 2. Calibración de la célula de carga.

3. MATERIAL Y COMPORTAMIENTO EN FATIGA

El material de la chapa es un acero 355N, con un límite elástico $E = 200 \text{ GPa}$, y un coeficiente de Poisson de 0.30. La curva correspondiente a la Ley de Paris, necesaria para simular el crecimiento de grieta, se ajusta con los siguientes parámetros [4],

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_I^m = 2 \cdot 10^{-12} \cdot \Delta K_I^{3.1} \quad (1)$$

donde da/dN viene expresado en (m/ciclo) y ΔK_I en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$. Se ha considerado un valor umbral de propagación de $\Delta K_{th} = 6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, valor habitual para la mayoría de los aceros estructurales.

4. UNION: FUERZA DE APRIETE Y COEFICIENTE DE ROZAMIENTO

En el diseño de una unión las dimensiones de los elementos que la forman (tuerca, vástago y arandelas) definen la distribución de tensiones de contacto. Las principales variables que afectan al comportamiento en fatiga son la fuerza de apriete f_{ap} , y la fuerza de rozamiento f_r que se generan en el contacto y que contribuyen a disminuir el factor de intensidad de tensiones en la zona de propagación. La fuerza de rozamiento es función del coeficiente de rozamiento entre los materiales de la unión μ , de la fuerza de apriete y de la tensión de tracción aplicada en los extremos de la chapa σ_∞ .

En consecuencia, para poder realizar adecuadamente la simulación en fatiga de la unión se debe conocer perfectamente tanto el valor de la fuerza de apriete como del coeficiente de rozamiento entre los materiales que conforman la unión. La fuerza de apriete de la unión está controlada continuamente mediante la célula

de carga interpuesta entre el tornillo y la chapa. Por su parte el contacto entre acero-acero en seco suele venir definido por un coeficiente de rozamiento entre 0.2 y 0.5. Este rango de valores es excesivamente amplio, y en consecuencia es necesario calcular, de forma experimental, un valor más preciso.

Para obtener el coeficiente de rozamiento experimentalmente se ha seccionado una chapa por el plano medio perpendicular a la dirección axial de la probeta, tal y como se presenta en la Fig 3. Se posicionan las dos partes de la probeta en cada una de las mordazas de la máquina de tracción.

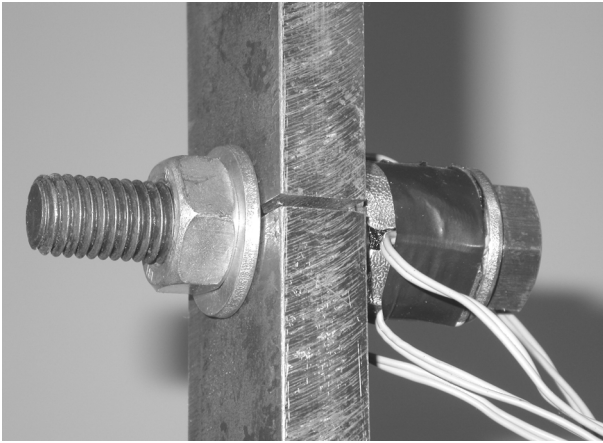


Fig. 3. Preparación del ensayo para determinar experimentalmente el coeficiente de rozamiento.

Posteriormente se monta la unión con el apriete deseado, que es controlado por la célula de carga. Comenzamos a traccionar la probeta de tal forma que la fuerza de rozamiento coincide con la fuerza de tracción aplicada por la máquina. En el momento en el que se produce el deslizamiento la fuerza de rozamiento ha alcanzado su valor máximo definido como

$$f_r^{\max} = P_{tr}^{\max} = \mu \cdot f_{ap} \quad (2)$$

donde P_{tr}^{\max} es la fuerza de tracción máxima alcanzada en el ensayo.

En la Fig. 4. se presenta un ejemplo del registro correspondiente a un ensayo efectuado. El ensayo se debe realizar en control de carga. Con la fuerza de apriete de la célula de carga y la carga máxima de tracción de obtiene el coeficiente de rozamiento a partir de la expresión (2). Se han realizado varios ensayos variando la fuerza de apriete de la unión y no se ha detectado influencia en el coeficiente de rozamiento.

Sin embargo, si que se ha detectado que a medida que se efectuaban ensayos con la misma arandela y chapa el coeficiente de rozamiento aumentaba ligeramente desde un valor inicial de $\mu=0.22$ hasta valores en torno a $\mu=0.32$ para uniones con 20 ensayos previos. Este efecto es debido a que se va eliminando la capa de

oxido inicial de la chapa y las rebabas de estampación de la arandela. Sin embargo, en un montaje en obra solo se monta la unión una vez por lo que el valor más característico es el primero de los comentados.

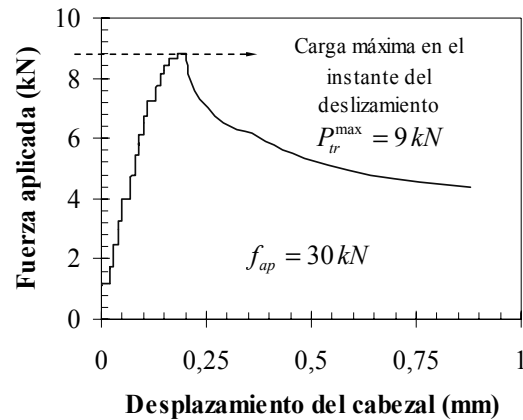


Fig. 4. Registro de uno de los ensayos realizados para determinar el coeficiente de rozamiento.

5. SIMULACION DEL APRIETE: FUERZAS DE CONTACTO

Se ha efectuado una simulación numérica del apriete para determinar la distribución de tensiones y esfuerzos resultante en la zona de contacto, como consecuencia de la acción conjunta de una carga de tracción y de un apriete. Mediante el análisis no lineal por elementos finitos se ha obtenido la distribución tensional, y las resultantes f_x, f_y y $f_z = f_{ap}$. En la Fig. 5. se muestra el mallado utilizado en el análisis y la distribución de fuerzas nodales de contacto en la dirección longitudinal de la chapa.

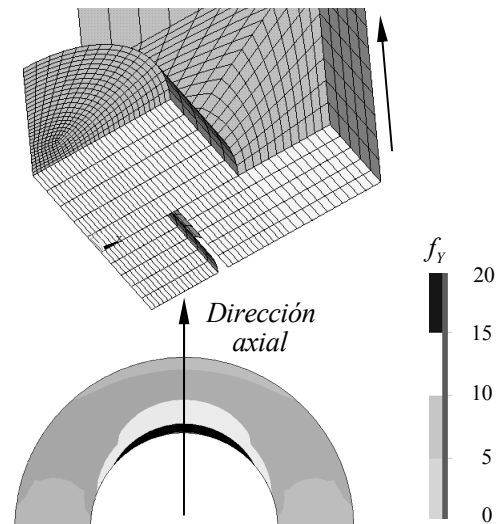


Fig. 5. Mallado y fuerzas nodales de contacto.

Las tensiones debidas al apriete en la zona de contacto se generan en las direcciones longitudinal, transversal y perpendicular a la chapa. En la Fig. 6. se presenta un esquema de las componentes tensionales en las tres

direcciones mencionadas en la zona de contacto de la chapa.

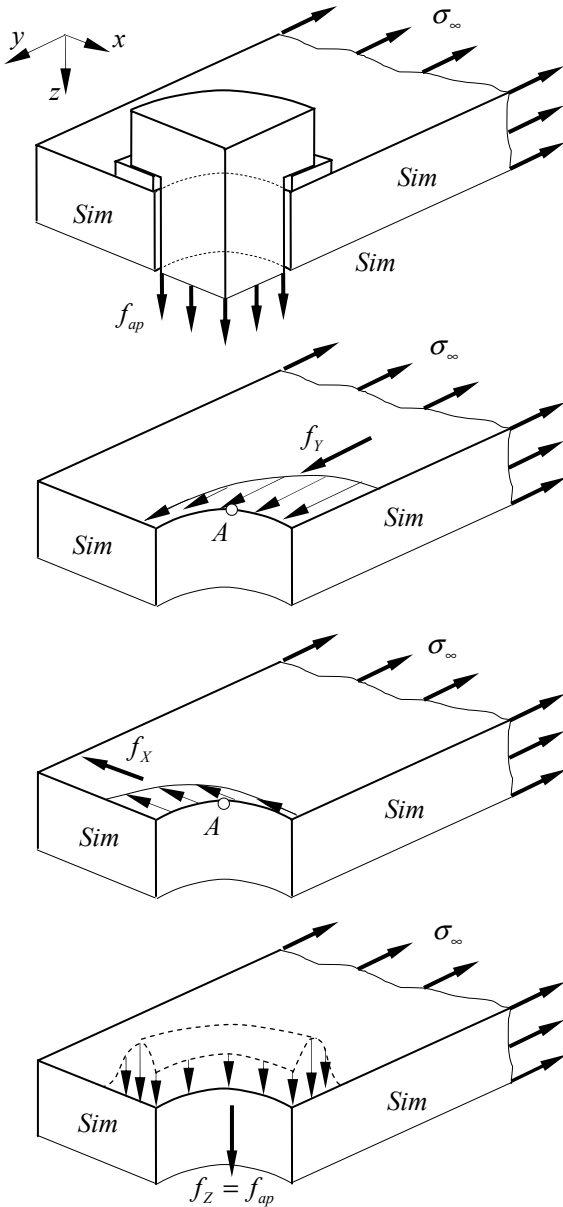


Fig. 6. Distribución tensional en la zona del contacto.

Evidentemente la resultante de las tensiones en la dirección z debe coincidir con la fuerza de apriete. Por su parte, en la Fig. 7. y Fig. 8. se presentan los valores de las resultantes f_x y f_y frente a la carga aplicada en el extremo de la chapa σ_∞ , para distintos valores de la carga de apriete y coeficiente de rozamiento.

Para obtener una representación ingenieril del contacto se ha analizado la forma más adecuada de situar las resultantes de las tensiones de contacto para reproducir el estado tensional en la zona de propagación de la fisura. Se ha observado que considerando la carga de apriete uniformemente repartida en el área correspondiente al diámetro de la tuerca, y las fuerzas f_x y f_y actuando en el punto medio del arco A, ver Fig. 6., se obtiene una distribución de tensiones en el

centro de chapa donde se inicia la fisura muy aproximada a la producida por el contacto real.

En consecuencia, para el posterior análisis en fatiga de la unión se ha utilizado esta simplificación de fuerzas, sustituyendo el conjunto tornillo-tuerca-arandelas por sus resultantes equivalentes de la forma mencionada. De esta manera, se realiza primero una simulación numérica por elementos finitos en 3D no lineal, para obtener las fuerzas de contacto. Posteriormente se utilizan estas fuerzas equivalentes para simular el comportamiento en fatiga, utilizando para ello un modelo lineal de la chapa punzonada [6].

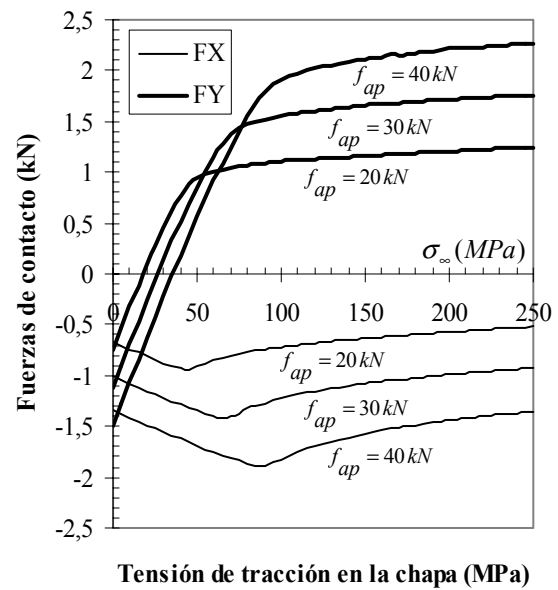


Fig. 7. Valor de f_x y f_y en función de f_{ap} y de la tensión de tracción σ_∞ . Coeficiente de rozamiento 0.3.

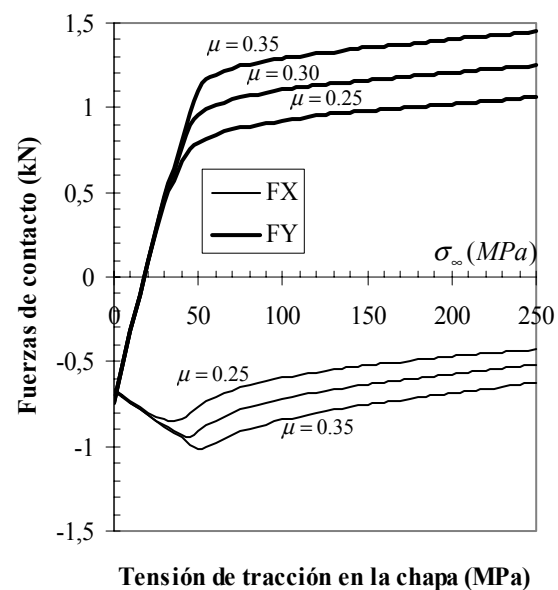


Fig. 8. Evolución f_x y f_y en función del coeficiente de rozamiento μ y de σ_∞ , para una $f_{ap} = 20$ kN.

6. SIMULACION DEL PROCESO DE FATIGA

En estudios anteriores efectuados con las mismas chapas, pero sin apriete, se determinó el tamaño de fisura inicial originado por el mismo proceso de punzonado, obteniendo un valor aproximado de $a_0 = 0.4 \text{ mm}$ [5]. Dicho valor permite reproducir el daño local originado por el punzonado en la zona de iniciación de la fisura. Utilizando este tamaño de defecto inicial se ha efectuado una simulación por EF del proceso de fatiga desde su iniciación hasta su rotura, controlado por el factor de intensidad de tensiones en cada punto.

El método consiste en partir del tamaño de defecto inicial, de forma semicircular, y determinar el FIT en cada punto del frente de fisura. Con el FIT y la ley de Paris se puede determinar el avance que sufre cada punto transcurrido un determinado número de ciclos ΔN_1 . Esto permite situar el nuevo frente de fisura, volver a calcular el FIT y determinar un nuevo avance después de otro bloque de ciclos ΔN_2 . De esta forma se consigue simular el proceso de crecimiento de la fisura desde su valor inicial hasta el final. Sumando todos los bloques de ciclos se obtiene $vida = \sum \Delta N_i$. Este proceso se resume en el esquema de la Fig. 9. Una vez estimada la vida en fatiga para un nivel de tensión determinado se ha efectuado el mismo análisis para distintos niveles de carga de tracción $\Delta \sigma_\infty$ y se ha obtenido la curva S-N

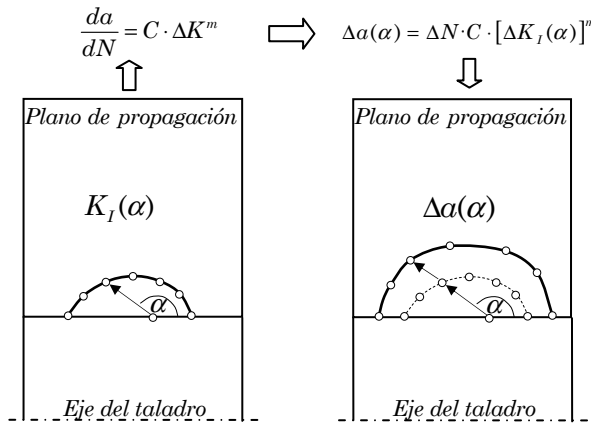


Fig. 9. Metodología para simular el proceso de fatiga.

Para determinar la vida en fatiga de la unión se ha efectuado un análisis utilizando la misma metodología pero con las nuevas cargas originadas por la unión. En la Fig. 10. se presenta el mallado utilizado para el estudio de propagación de fisura y estimación de la vida, junto con el camino seguido por el frente de la fisura a lo largo de los diferentes pasos de cálculo. Se ha representado únicamente una serie de pasos para mayor claridad, pero el análisis a sido realizado con un número de pasos de cálculo mucho mayor para conseguir una buena evolución de la propagación y una mayor precisión en el número de ciclos obtenido de la simulación.

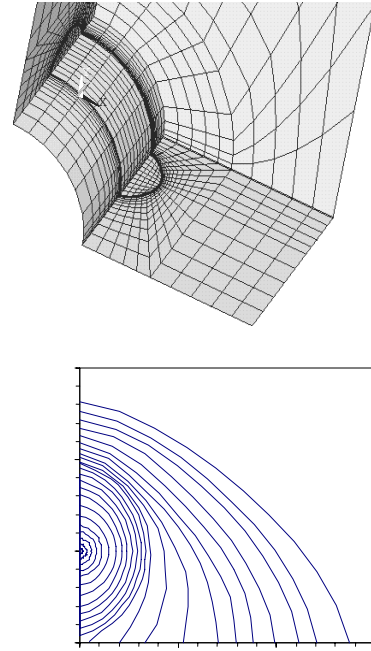


Fig. 10. Mallado simulación de la propagación de fisura, y evolución de la misma en uno de los análisis efectuados.

En la Fig. 11. se muestran los resultados de la simulación a través de las curvas S-N obtenida para cargas de apriete en el tornillo de 20, 30 y 40 kN, considerando un valor del coeficiente de rozamiento 0.3. Se puede observar como el efecto del apriete se traduce en un aumento no solo del número de ciclos en todos los niveles de tensión, sino también del límite de fatiga. En la Fig. 12. se presentan las curvas S-N obtenidas de la simulación para una carga de apriete de 20 kN, pero variando el coeficiente de rozamiento entre los materiales desde 0.25 hasta 0.35. En este caso se puede observar como el efecto en la vida en fatiga no es excesivamente acusado, lo cual supone una ventaja a la hora del diseño, dado que es una variable difícil de cuantificar y que incluso en los ensayos experimentales presenta cierta dispersión, como se ha mencionado en un apartado anterior.

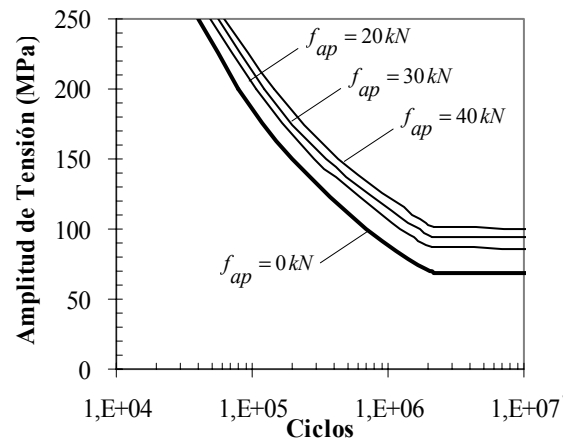


Fig. 11. Efecto de la carga de apriete en la Curva S-N para un coef. de rozamiento 0.3

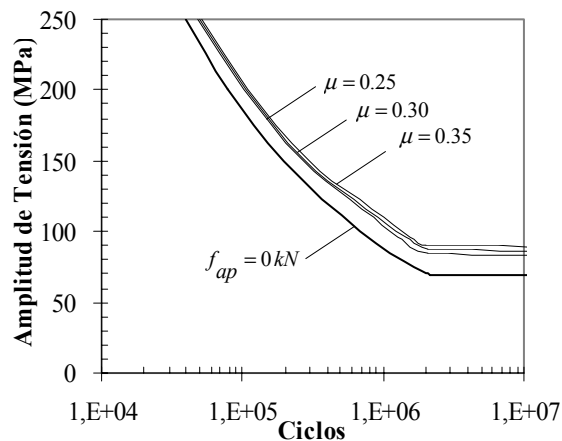


Fig. 12. Efecto del coef. de rozamiento en la Curva S-N, para una carga de apriete en el tornillo de 20 kN.

Una vez efectuada la simulación numérica se hace necesario una comprobación experimental de los cálculos realizados. Para ello se han efectuado dos ensayos experimentales, considerando una carga de apriete de 20 kN. El coeficiente de rozamiento entre los materiales es próximo a 0.3. Se han efectuado dos niveles de carga para poder obtener un mínimo de certeza en la comparativa realizada. Los resultados obtenidos, junto con la correspondiente simulación numérica aparecen reflejados en la Fig. 13. Se puede observar la buena coincidencia entre simulación y experimentación. En todo caso, será necesario la realización de más ensayos para distintos niveles de la fuerza de apriete.

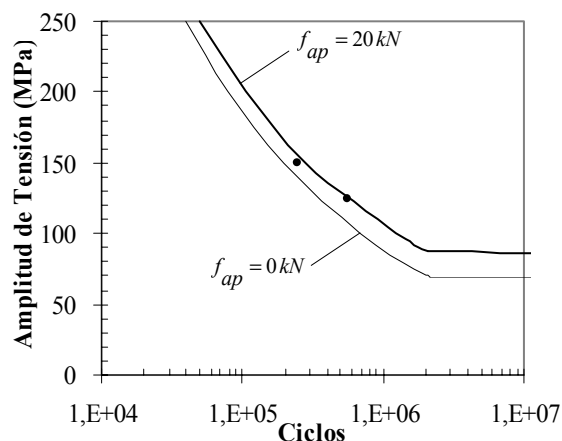


Fig. 13. Comparación entre los resultados experimentales y la simulación numérica ($\mu = 0.30$).

7. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha efectuado una simulación por EF para determinar la vida en fatiga de una unión simple formada por una chapa punzonada y un apriete tornillo-tuerca. Para ello es necesario controlar perfectamente la carga de apriete aplicada, así como el coeficiente de rozamiento entre los materiales.

Las fuerzas de rozamiento originadas en la unión se han determinado por simulación por EF, siendo función de la fuerza de apriete en el tornillo, coeficiente de rozamiento tuerca-chapa y tensión de tracción en la chapa. El apriete del tornillo sobre la chapa, se puede simplificar por la acción de una presión uniforme sobre el área de la tuerca y dos fuerzas puntuales actuando sobre el punto medio del arco de agujero.

Se ha estimado la vida en fatiga aplicando un procedimiento paso a paso que permite reproducir el crecimiento de la fisura desde un valor inicial hasta su rotura. El efecto del apriete se traduce en un aumento no solo del número de ciclos en todos los niveles de tensión, sino también del límite de fatiga. La influencia del coeficiente de rozamiento en la vida a fatiga es pequeña, comparada con el efecto de la carga de apriete, y su efecto entra dentro de la dispersión propia de los ensayos de fatiga.

La metodología desarrollada puede ser aplicada a la simulación de uniones complejas, y en consecuencia aplicarla directamente al diseño de uniones estructurales.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer la financiación recibida por el Proyecto "Criteria Performance for Cold Formed Structural Steels (Coldfoss)" ECSC 7210.PR/246, y al proyecto de la JCyL "Desarrollo de modelos predictivos de vida a fatiga en elementos estructurales metálicos y su comprobación experimental", BU/05/03.

REFERENCIAS

- [1] Sánchez, L., Pesquera, D. y Gutiérrez-Solana, F., "Comportamiento en fatiga de aceros estructurales punzonados", Anales de la Mecánica de la Fractura XX, 225-230 (2003).
- [2] Alegre, J.M., Aragón, A. y Gutiérrez-Solana, F., "Simulación del comportamiento en fatiga de aceros estructurales para chapas punzonadas y taladradas", Anales de la Mec. de Fractura XX, 23-28 (2003).
- [3] Aragón, A., Alegre, J.M., y Gutiérrez-Solana, F., "Cálculo de los factores de intensidad de tensiones en fisuras iniciadas en los bordes de taladros de chapas sometidas a tracción", Anales de la Mecánica de Fractura XX, 29-34 (2003).
- [4] "Performance Criteria for Cold Formed Structural Steels", ECSC Contract No. 7210.PR/246, London July 2003.
- [5] Alegre, J.M., Gutiérrez-Solana, F. y Aragón, A., "A finite element simulation methodology of the fatigue behaviour of punched and drilled plate components", Eng failure Analysis. In Press.