

Análisis de fallas en uniones atornilladas

Juan Manuel Salgado López*, Abraham Silva Hernández, Francisco Ignacio López Monroy,
José Luis Ojeda Elizarrarás y Jesús Mauricio Tello Rico.

*msalgado@cidesi.edu.mx

Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial,
Querétaro, Qro., México.

Resumen

Las uniones atornilladas son ampliamente aplicadas en la industria metal mecánica y la construcción, ya que los tornillos son elementos mecánicos utilizados para fijar, sujetar o ensamblar diferentes componentes metálicos. Existen recomendaciones generales que deben ser tomadas en cuenta al momento de utilizar tornillos para unir o sujetar elementos. No obstante, el material base donde se ha de sujetar el tornillo juega un papel determinante en la integridad de la unión ya que la presencia de defectos del material base tiene un efecto y consecuencias. En este trabajo se muestran dos casos de fallas en uniones atornilladas, las cuales ocurrieron debido a fallas de los materiales base. El primer caso, muestra la consecuencia de fijar mediante tornillos una prótesis de cadera a hueso poroso. En forma similar, el segundo caso muestra el efecto del apriete de un tornillo de sujeción a una pieza de aluminio con porosidad. Con estos dos casos de análisis de falla se muestra que existe una influencia de los defectos del material base en la integridad mecánica de la unión roscada.

Palabras clave: Unión por tornillo, falla, defecto.

Abstract

Bolted joints are widely applied in the metal and construction industry; since screws are mechanical elements that are used to fix, hold or assemble different metal components. There are general recommendations that must be taken into account when using screws to join or fasten elements. However, the base material where the screw is held plays a very important role for the integrity of the joint. This is so, since defects in the base material have an influence in the performance of the joint and there are consequences if defects and workloads interact in the bolted joint. This work shows two cases of failure in bolted joints, which occurred due to defects of the base materials. The first case shows the consequence of fixing a hip prosthesis to porous bone with screws. Similarly, the second case shows the effect of tightening a clamping screw on an aluminum part with porosity. With these two cases of failure, it is shown the influence in the performance of the bolted joint of defects in the base material.

Keywords: Bolted joints, failure, defect.

Artículo arbitrado

Recibido:
28 de Mayo de 2020

aceptado:
10 de julio de 2020

Introducción

Las uniones atornilladas son formas de unión muy importantes en diferentes ámbitos y donde están presentes son consideradas de vital importancia para la integridad de estructuras como son puentes, motores de combustión interna, prótesis metálicas unidas a hueso humano, etc.

Una unión atornillada puede definirse como el acoplamiento desmontable de piezas de trabajo conectadas por medio de tornillos que transmiten vibraciones o cargas. En estas uniones, los tornillos que fijan los diferentes componentes deben soportar dichas cargas o vibraciones para evitar el colapso. En otras palabras, el propósito básico de una unión con tornillos es lograr el mayor aprovechamiento de la adherencia causada por la fricción entre los hilos de las partes roscadas. De este hecho se deduce que la integridad de la unión atornillada depende, en gran medida, de la integridad de los tornillos y las cavidades con roscas interna.

En literatura técnica existen reportes de fallas en uniones atornilladas en distintos componentes y materiales. Por ejemplo, en uniones de implantes dentales fijados por roscado, en implantes de cadera, brazo, etc. hasta fallas de uniones roscadas en puentes. De igual manera estas uniones se dan tanto en materiales metálicos como materiales compuestos. En todos estos ámbitos y materiales queda claro que se requiere de conocimiento del tipo de falla y el mecanismo que las origina con el fin de evitar futuras fallas.

Entonces queda claro que los materiales de las uniones atornilladas intervienen de manera importante en el desempeño de dichas uniones, pero además debe considerarse que dicho desempeño también depende de la eficiencia del armado de la unión referida.

El objetivo de este trabajo es mostrar las consecuencias de realizar uniones atornilladas en materiales base con defectos que reducen su integridad y llevan a fallas de la unión. Para mostrar la influencia de los defectos en la integridad mecánica de uniones atornilladas, en este trabajo se muestran dos casos de fallas en uniones atornilladas, las cuales ocurrieron debido a defectos de los materiales base donde son sujetados los tornillos.

Metodología

Con el fin de mostrar algunas de las consecuencias de fijar tornillos a materiales con defectos, en este trabajo se muestran dos ejemplos de fallas en uniones atornilladas en

materiales diferentes que fallaron después de ser sometidas a cargas. Cabe señalarse que aquí se presentan dos uniones atornilladas en materiales distintos pero que son comparables desde el punto de vista de la presencia de defectos en el material base de ambos.

Además, se considera que, al ser dos casos de análisis de falla, se trata de muestras distintas y no puede darse un diseño de experimentos con una matriz de reproducibilidad como tal, ya que son muestras únicas. No obstante, la metodología de estudio de las fallas fue consistente en ambos casos y los resultados de cada uno son comparables por ser fallas localizadas en el material base de la unión roscada.

El primer caso, muestra la consecuencia de fijar mediante tornillos una prótesis de cadera a hueso poroso; en forma similar, el segundo caso muestra el efecto del apriete de un tornillo de sujeción a una pieza de aluminio con porosidad.

Para determinar el mecanismo metalúrgico que dio lugar a las fallas, en ambos casos se procedió a aplicar las siguientes técnicas de inspección, análisis y ensayos de laboratorio sobre los especímenes fallados.

La metodología utilizada para ambos casos de fallas consistió de recabado de información, inspección visual a simple vista y utilizando microscopio estereográfico, así como análisis de la microestructura de los materiales.

En primer lugar, se llevó a cabo una entrevista con los usuarios de cada uno de los especímenes bajo estudio donde se recolectó la mayor información posible sobre la detección de las fallas, tipo de materiales, etc. Después se procedió a realizar una inspección visual a simple vista y utilizando microscopio estereográfico marca Leica.

Una vez realizada la inspección visual se determinaron las secciones de donde se cortaron muestras para realizar preparación metalográfica siguiendo la norma ASTM E03-11 (2017) y para observar las microestructuras se utilizó un microscopio óptico Nikon Epihot 440 con analizador de imágenes. Cabe mencionarse que en ambos casos no fue necesario realizar ni análisis químico cuantitativo ni alguna otra prueba para determinar la causa de la falla.

Resultados

Caso 1

En abril de 2007, una prótesis de cadera fue colocada en un paciente (Figura 1), la cual después de un par de meses causó molestias. Seis meses después se detectó por medio de radiografía de Rx que la prótesis estaba fracturada (Figura 2). En esta entrevista fue informado que la paciente padecía de osteoporosis.

La prótesis metálica fue extraída de la cadera del paciente por medio de una operación y entregada al laboratorio de metalografía y análisis de falla de CIDESI para determinar la causa metalúrgica que llevó a la falla de dicho componente. En la Figura 3 se observa la prótesis metálica en la condición de entrega al laboratorio. En la Figura se señala la posición donde se localizaba la fractura. Además, que es claro que la prótesis no presentaba evidencia de deformación ni de productos de corrosión.



Figura 1.- Radiografía de la colocación de la prótesis de cadera. Fuente: paciente.

Estas evidencias son importantes porque indican que no hubo daño causado por la interacción entre el material de la prótesis y los fluidos del cuerpo humano.

La Figura 4 muestra la superficie de fractura de la prótesis metálica. Se pueden observar marcas de playa, lo cual indica que la grieta creció por el mecanismo de fatiga, así como también éstas indican los orígenes de las grietas.

En la Figura 4 se observa que los orígenes de las grietas están localizados en los bordes de la caja del tornillo de fijación.



Figura 2. Radiografía de la prótesis de cadera 6 meses después de su colocación. Fuente: paciente.



Figura 3.- Prótesis metálica en la condición de entrega al laboratorio, posición de la fractura. Fuente: elaboración propia.

El material de la prótesis de cadera consistía de acero inoxidable AISI 316L al igual que los tornillos de fijación. Por otro lado, el análisis metalográfico del material de la prótesis demostró que la microestructura del material no tenía precipitación de carburos ni precipitación de fase sigma (Figura 5).

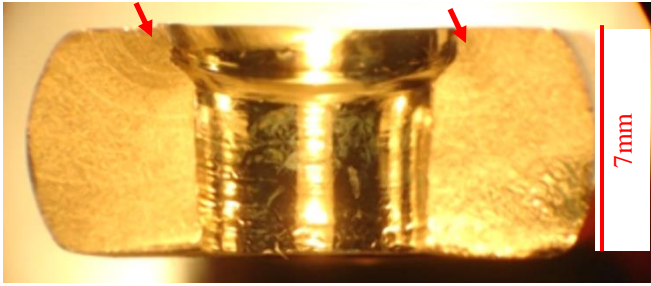


Figura 4.- Superficie (7x) de la prótesis fracturada. Se observa marcas de playa y las posiciones de los orígenes de las fracturas. Fuente: elaboración propia.

De lo anterior, se deduce que no hubo defecto en la microestructura del material que indujera el crecimiento de la grieta, por ello es que se continuó con la inspección visual en la caja del tornillo de fijación utilizando un microscopio estereográfico para determinar la presencia de daño mecánico o defectos de fabricación.

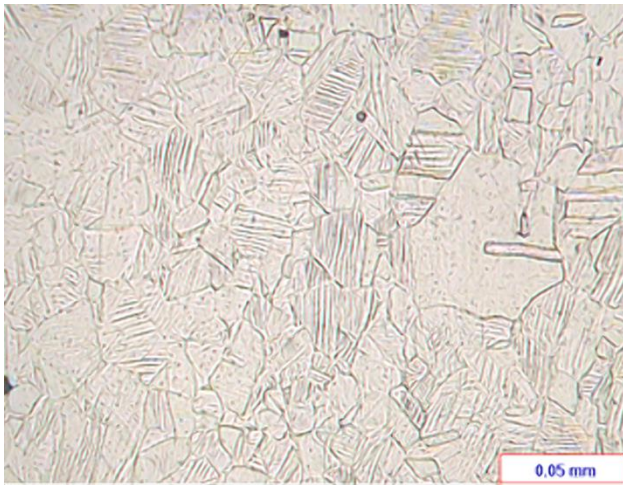


Figura 5.- Microestructura del material de la prótesis metálica (200x). Se observan granos maclados. Fuente: elaboración propia.

La Figura 6 muestra evidencia de daño mecánico (rayas y deformación plástica) en la caja del tornillo fracturada en una región muy cercana a la superficie de fractura. Esto último coincide con la Figura 4 donde se localizó el origen de las grietas en el borde la caja. De esta evidencia se deduce que el daño mecánico fue causado por los hilos del tornillo que estaban en contacto con esta región de la caja de los barrenos de la prótesis y debió ser provocado por un juego del tornillo. Este juego puede ser explicado por el hecho de que el paciente sufría de osteoporosis la cual produce porosidad en los huesos y con ello se disminuye la integridad de una unión roscada de prótesis al generarse huecos en el hueso.

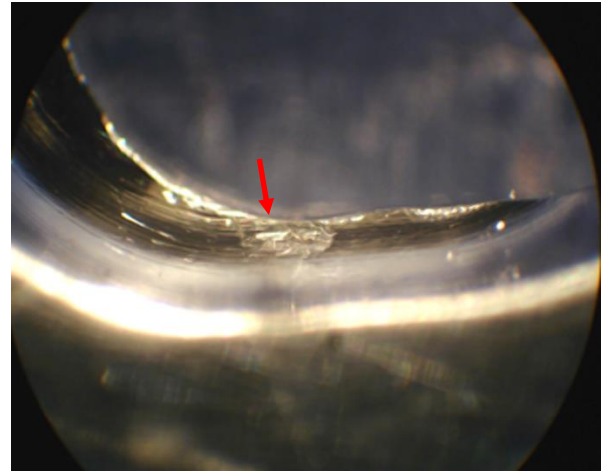


Figura 6.- Evidencia de daño mecánico en la caja del tornillo donde se originó la fractura (7x). Fuente: elaboración propia.

Caso 2

El segundo caso de falla de una unión roscada ocurrió en una pieza de aluminio fundido. En este caso las grietas de la unión roscada fueron detectadas en el material donde se localiza el barreno roscado que aloja al tornillo. Las grietas en esta pieza de aluminio fundido fueron detectadas después de la prueba neumática realizada al finalizar los procesos de maquinado. Esta prueba es realizada en las piezas de aluminio fundido antes de todas las operaciones de maquinado y después de maquinado, donde se incluye al barrenado y roscado de estos agujeros. Cabe señalar que esta práctica fue llevada a cabo en las piezas falladas.

En la Figura 7 se muestra un corte transversal de la pieza de aluminio fundido, mientras que, en la Figura 8 se indica que las grietas detectadas se localizaban al fondo del barreno roscado.

Este caso pone de relevancia la aseveración hecha anteriormente, porque las grietas en la unión roscada aparecieron durante el proceso de roscado. En la Figura 8 se observa que las grietas están localizadas de manera perpendicular al eje del barreno. Este hecho es importante porque considerando que las grietas crecen por esfuerzos de tensión entonces se puede decir que el esfuerzo que indujo el crecimiento de grietas fue paralelo al eje del barreno roscado. En este caso el esfuerzo realizado para el aseguramiento de los tornillos fue el que propició el crecimiento de la grieta a partir de las contracciones por solidificación también llamadas rechupes.



Figura 7.- Corte transversal de la pieza de aluminio fundido donde se localizaban los barrenos con fuga durante la prueba neumática. Fuente: elaboración propia.

Las Figuras 8 y 9 muestran cortes transversales de la pieza de aluminio fundido; con estas imágenes queda clara la presencia de grietas que unen los defectos de fundición. Este hecho indica que la grieta creció uniendo rechupes o porosidad, con lo cual se comprueban las aseveraciones hechas previamente.

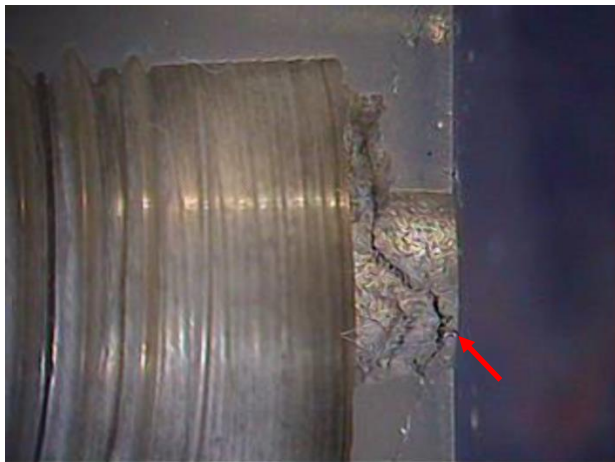


Figura 8.- Ejemplo de las grietas localizadas en el fondo del barreno roscado de la pieza fundida (7x). Fuente: elaboración propia.

En la micrografía de la Figura 10 se observa la microestructura a 50x en el fondo del barreno roscado y es clara la presencia de contracciones por solidificación y porosidad. Entonces con esta micrografía se evidencia la presencia de este tipo de defectos de fundición los cuales se localizan en el material base de aluminio donde fueron hechos los barrenos de roscado.



Figura 9.- Corte transversal de la pieza de aluminio fundido (20x). Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 11 muestra una micrografía a 50X, donde se observa el crecimiento de grietas secundarias generadas a partir de rechupes.

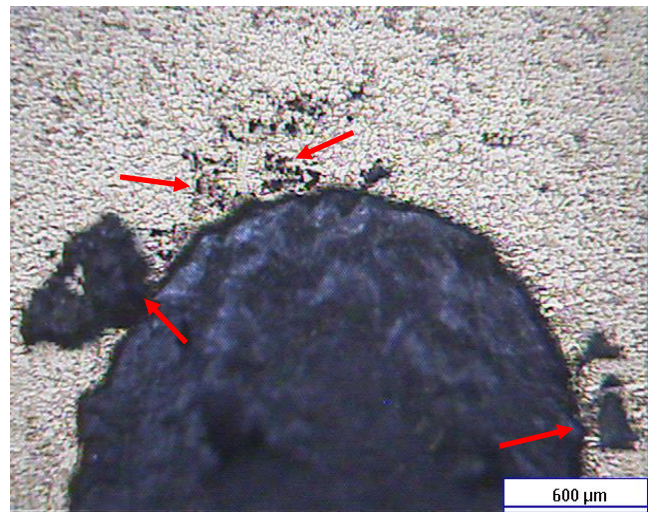


Figura 10.- Microestructura del material en el fondo del barreno roscado (50x). Se observan contracciones por solidificación y porosidad. Fuente: elaboración propia.

Esta evidencia deja en claro que en componentes sometidos a ciclos de cargas o presión/descompresión los defectos actúan como concentradores de esfuerzos donde tienen origen las grietas, y en el caso de la presencia de alineamiento de defectos el crecimiento de grietas es favorecido al unirse las microgrietas a partir de este tipo de defectos.

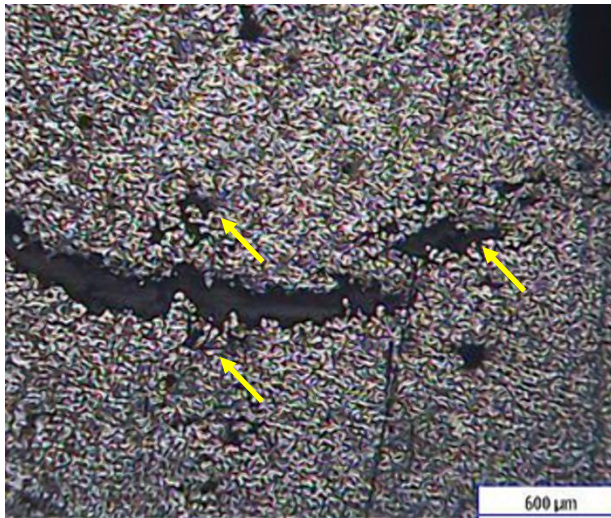


Figura 11.- Crecimiento de grietas secundarias generadas a partir de contracciones por solidificación (50x). Fuente: elaboración propia.

Discusión y conclusiones

En este trabajo se demuestra con los casos de fallas anteriores que la presencia de defectos del material base donde se realizan barrenos roscados, tales como porosidad, disminuyen la resistencia de la unión roscada y llevan a fracturas. Por otro lado, las fallas en las uniones atornilladas mostradas en este trabajo ocurrieron por el mecanismo de fatiga o por sobrecarga. Lo cual coincide con la teoría que dice que en componentes sometidos a ciclos de carga o presión/descompresión con presencia de defectos, en este caso en la microestructura, estos actúan como concentradores de esfuerzos donde tienen origen las grietas, y en el caso de la presencia de alineamiento de defectos el crecimiento de grietas es favorecido al unirse las microgrietas a partir de este tipo de defectos.

En el primer caso es relevante el hecho de encontrar daño mecánico (ralladuras y deformación plástica) en la caja del tornillo donde se localizaba la grieta, ya que esa es evidencia de concentradores de esfuerzos, los cuales inducen al crecimiento de grietas por fatiga por lo que se dedujo que la falla de la prótesis metálica de cadera fue inducida por el daño mecánico y a partir de allí las grietas crecieron por el mecanismo de fatiga.

Como dato adicional, el laboratorio fue informado que la persona que tuvo el implante sufría de osteoporosis, la cual produce porosidad en los huesos, disminuyendo así la integridad de una unión roscada de prótesis. En este caso la pérdida de masa del hueso de la cadera causó movimiento de los tornillos de sujeción que dieron pie al

daño en la prótesis metálica con lo que se generaron los orígenes de las grietas que crecieron por fatiga.

Los resultados del segundo caso que fueron mostrados con anterioridad y dejan en claro que las grietas crecieron uniendo defectos de fundición y se originaron por un esfuerzo perpendicular a éstas, resultado de la fuerza de apriete aplicada durante la sujeción de los tornillos. Este tipo de daño se denomina sobrecarga.

A pesar de tratarse de uniones roscadas hechas con materiales distintos y en distintos contextos pueden correlacionarse las fallas de ambos casos utilizando la metodología de análisis de falla presentada en este trabajo, que consistió de recabado de información, inspección visual a simple vista y utilizando microscopio estereográfico, así como análisis de la microestructura de los materiales.

Entonces, correlacionando la evidencia mostrada con los datos recabados de ambos casos de fallas, se puede decir que en ambos existían defectos en los materiales base donde se localizaban los barrenos roscados.

Por un lado, está la presencia de osteoporosis en la cadera, la cual degrada el hueso por la aparición de huecos y con ello causa una pérdida de integridad en la unión roscada. Por otro lado, están los defectos de fundición del material base (aluminio fundido) actuaron como orígenes de múltiples grietas, las cuales se unieron durante su crecimiento. Esto ocurrió así por la fuerza de apriete aplicada durante la sujeción del componente. Las fugas detectadas durante la prueba neumática fueron consecuencia de las grietas que se unieron y conectaron con la superficie externa.

Comparando las causas de fallas de ambos casos puede deducirse que la integridad del material base de ambas uniones roscadas estaba reducida por la ausencia de material (por un lado, huecos por osteoporosis y por el otro por defectos de fundición) entonces los resultados de los casos anteriormente mostrados, nos llevan a las siguientes conclusiones:

- 1.- Las fallas de uniones atornilladas dependen de la integridad de los materiales de donde se localiza el barreno roscado.
- 2.- Los tipos y número de defectos en los materiales base donde se localiza el barreno roscado, juegan un papel crítico en el desempeño de la unión roscada.

Referencias

Pan, J., Chen, W. N., Sung, S. J., Su, X., & Friedman, P. (2018). Failure Mode and Fatigue Behavior of Flow Drill Screw Joints in Lap-Shear Specimens of Aluminum 6082-T6 Sheets Made with Different Processing Conditions. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 11(4), 327-340.

Kar, N. K., Roig, T., Kar, J. K., & Hu, Y. (2016). Failure analysis of a Ti6Al4V screw used in a RASL procedure. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 16(3), 482-488.

Osti, M., Philipp, H., Meusburger, B., & Benedetto, K. P. (2011). Analysis of failure following anterior screw fixation of Type II odontoid fractures in geriatric patients. *European Spine Journal*, 20(11), 1915-1920.

Lee, J. H., Huh, Y. H., Park, C. J., & Cho, L. R. (2016). Effect of the Coronal Wall Thickness of Dental Implants on the Screw Joint Stability in the Internal Implant-Abutment Connection. *International Journal of Oral & Maxillofacial Implants*, 31(5).

Hong, S. H., Yan, F., Sung, S. J., Pan, J., Su, X., & Friedman, P. (2016). Investigation of failure mode and fatigue behavior of flow drill screw joints in lap-shear specimens of aluminum 6082-T6 sheets. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 9(3), 746-750.

Haghani, R., Al-Emrani, M., & Heshmati, M. (2012). Fatigue-prone details in steel bridges. *Buildings*, 2(4), pp. 456-476.

Croccolo, D., De Agostinis, M., & Vincenzi, N. (2011). Failure analysis of bolted joints: Effect of friction coefficients in torque-preloading relationship. *Engineering Failure Analysis*, 18(1), 364-373.

Panjeh Shahi, E. (1995). Stress concentration factors for multiplanar joints in RHS. *HERON*, 40 (4).

Simpson, A. H. R. W., Varty, K., & Dodd, C. A. F. (1989). Sliding hip screws: modes of failure. *Injury*, 20(4), 227-231.

Osti, M., Philipp, H., Meusburger, B., & Benedetto, K. P. (2011). Analysis of failure following anterior screw fixation of Type II odontoid fractures in geriatric patients. *European Spine Journal*, 20(11), 1915-1920.

Binon, P. P. (1996). The effect of implant/abutment hexagonal misfit on screw joint stability. *International Journal of Prosthodontics*, 9(2).

Höglund, T., & Mazzolani, F. M. (1994). Design of joints. *TALAT Lecture*, 2302.