

RESISTENCIA A LA FATIGA DE UNIONES ABULONADAS DE ESTRUCTURAS METÁLICAS - APLICACIONES EN INGENIERÍA CIVIL

Bisogno Eyler, Sabrina¹; Pico, Leonel Osvaldo²

¹Ingeniera civil; ²Doctor en Ingeniería, Ingeniero Civil

^{1,2} Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Olavarría, Argentina.
sabrina.bisogno@fio.unicen.edu.ar

RESUMEN

Muchas estructuras metálicas usadas comúnmente en la ingeniería civil, tales como pórticos de edificios, no experimentan una tensión cíclica suficiente como para originar problemas de fatiga. Sin embargo, en el caso de puentes, grúas, entre otras, la carga dinámica constituye una proporción mayor de la carga total y muchos de los colapsos son consecuencia de la propagación de fisuras de fatiga. La estimación de la vida a fatiga suele ser muy poco precisa, existen multitud de criterios distintos, y, en general, las pautas de cálculo se basan en un enfoque de tolerancia de daños. El diseño de las uniones tiene una gran importancia, ya que su fallo por fatiga puede tener graves consecuencias.

Este artículo recopila casos de estudio de la resistencia a fatiga en uniones abulonadas de estructuras metálicas como grúas, puentes de acero, aerogeneradores y estaciones de perforación marinas, así como especificaciones reglamentarias nacionales e internacionales sobre el tema, con el fin de ordenar y actualizar cuáles son las aplicaciones en ingeniería civil.

ABSTRACT

Many metal structures commonly used in civil engineering, such as building frames, do not experience sufficient cyclic stress to cause fatigue problems. However, in the case of bridges, cranes, among others, the dynamic load constitutes a greater proportion of the total load and many of the collapses are a consequence of the propagation of fatigue cracks. The estimation of fatigue life is usually very imprecise, there are many different criteria, and, in general, the calculation guidelines are based on a damage tolerance approach. The design of the joints is of great importance, since failure due to fatigue can have serious consequences.

This article compiles case studies of fatigue resistance in bolted joints of metal structures such as cranes, steel bridges, wind turbines and marine drilling stations, as well as national and international regulatory specifications on the subject, in order to organize and update which are applications in civil engineering.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

Muchas estructuras metálicas usadas comúnmente en la ingeniería civil, tales como pórticos de edificios, no experimentan una tensión cíclica suficiente como para originar problemas de fatiga. Sin embargo, en el caso de puentes, grúas, entre otras, la carga dinámica constituye una proporción mayor de la carga total y muchos de los colapsos son consecuencia de la propagación de fisuras de fatiga. La estimación de la vida a fatiga suele ser muy poco precisa, existen multitud de criterios distintos, y, en general, las pautas de cálculo se basan en un enfoque de tolerancia de daños.

El diseño de las uniones tiene una gran importancia, ya que su fallo por fatiga puede tener graves consecuencias. La resistencia a la fatiga en una estructura metálica depende del recorrido real de las cargas a través de la unión y de la fluctuación de tensiones que se produce en las áreas sensibles a la fatiga, entre otras variables.

Cuando se considera la fatiga como un modo de falla, existen problemas recurrentes de diseño y fabricación, junto con la exposición a condiciones de servicio inusuales, que desempeñan un papel repetido (Gagg & Lewis, 2009).

El peligro fundamental de la fatiga es que puede provocar el fallo a niveles de carga considerablemente menores que la carga de rotura, si fuera constante (Figura 1). Además, es difícil predecir el fallo, ya que se da de manera repentina, pudiendo provocar por ello situaciones catastróficas. Sin embargo, sí existe cierta evolución hacia el fallo. Dicha evolución se hace visible a modo de grietas, las cuales suelen tener origen en concentradores de tensión como entallas, agujeros, roscas. Las grietas pueden ser internas o externas (Juliá Lerma, 2019).

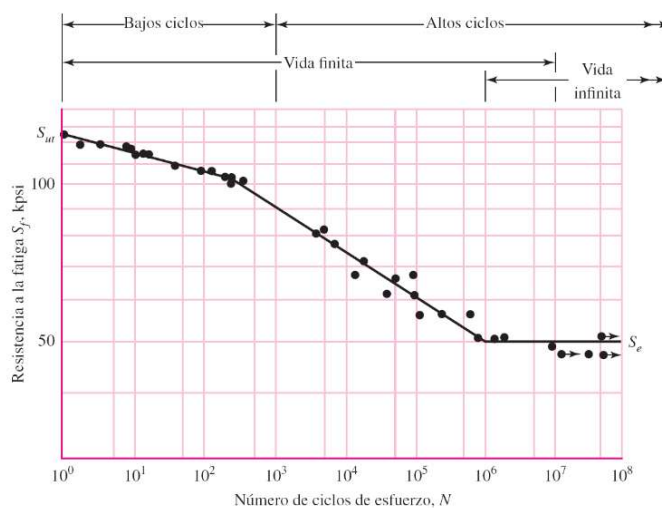


Figura 1 - Resultados de ensayos a Fatiga - curva de Wöhler

Generar un procesamiento de los datos obtenidos en investigaciones es muy difícil debido a la gran cantidad de variables que influyen en la vida a fatiga, y esto hace que en distintos países existan normas que tienen diferentes curvas de referencia para un

Organiza:

mismo detalle constructivo (Cheng et al., 2023).

Este artículo recopila casos de estudio de la resistencia a fatiga en uniones abulonadas de estructuras metálicas como grúas, puentes de acero, aerogeneradores y estaciones de perforación marinas, así como especificaciones reglamentarias nacionales e internacionales sobre el tema, con el fin de ordenar y actualizar cuáles son las aplicaciones en ingeniería civil. En la Figura 2 se puede ver un resumen de los tipos de estructuras civiles solicitadas a fatiga y los autores que las han estudiado.

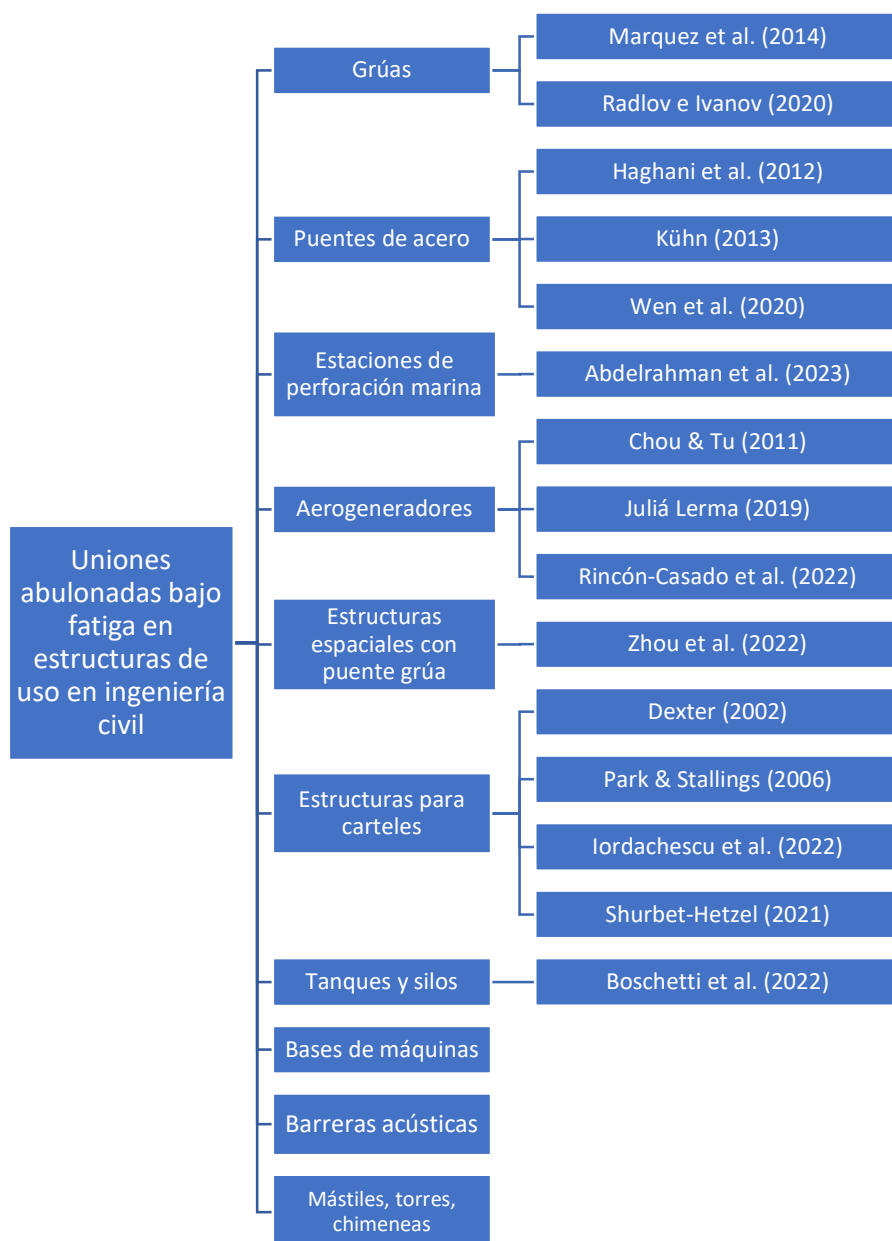


Figura 2 - Estructuras de ingeniería civil solicitadas a fatiga

Organiza:

Caso 1 – Grúas

Las grúas son estructuras esbeltas sometidas a grandes cargas que generan tensiones alternas en las bases. Los constructores y operadores, que están acostumbrados a lidiar con cargas intrínsecamente estáticas, a menudo no comprenden ni valoran completamente los efectos y las implicaciones de las cargas variables.

En el trabajo de (Radlov & Ivanov, 2020) se analizaron las causas de los accidentes de grúas torre en obras de construcción (Figura 3). Del total de casos estudiados, informaron que el 5% de esos accidentes fueron causados por la falla de los componentes mecánicos y estructurales de la grúa, por ejemplo, la rotura de los bulones del dispositivo giratorio de soporte. Este tipo de falla podría evitarse si se efectuaran obligatoriamente las inspecciones periódicas de los componentes y se realizaran las reparaciones y/o reemplazos necesarios. Por otra parte, en el 2% de los casos, la causa estuvo relacionada a fallas en la estructura de fundación de la grúa.

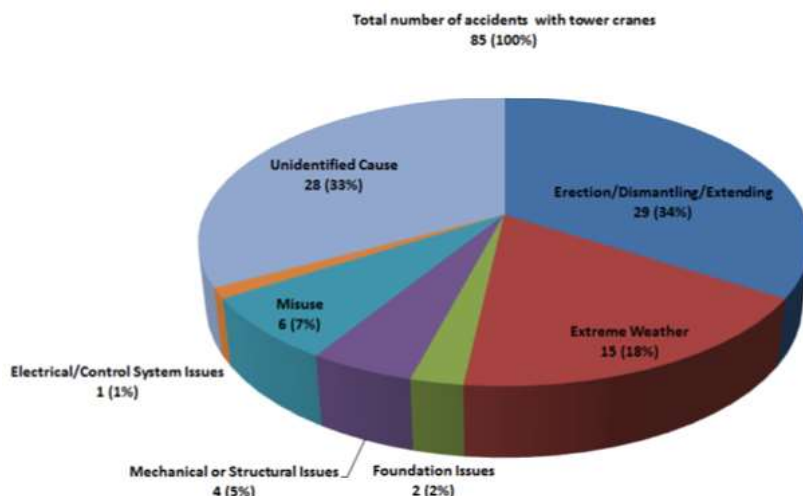


Figura 3 - Causas de accidentes mayores con grúas torre para el periodo 1989-2009. Fuente: Radlov & Ivanov (2020)

En el caso detallado en Marquez et al. (2014) en una grúa abatible falló la unión del rodamiento giratorio a la base. El sistema de rotación estaba compuesto por una brida de 2,6 m de diámetro que contenía 90 bulones de 1 ½" de diámetro. Había signos de fatiga en la mayoría de las superficies de fractura de los bulones, lo que demostró que la fatiga se produjo antes de la falla general de la grúa. La fatiga redujo la cantidad de bulones que transferían la carga desde la grúa hasta la fundación; luego el crecimiento de grietas por fatiga se aceleró en los demás bulones, hasta que las secciones no fueron suficientes y se produjo el colapso.

Al inspeccionar, se detectaron dos tipos diferentes de tuerca; en los datos de fabricación se encontró que las tuercas especiales se habían usado para posicionar las plantillas durante el montaje en lugar de utilizar una placa de nivelación (Figura 4).

Organiza:

En todos los bulones inspeccionados, la fatiga ocurrió en una sección debajo de la tuerca inferior. Si no se hubiese colocado esa tuerca inferior, el apriete de los bulones hubiese producido cargas de compresión en la base y precarga de tracción en el bulón, lo que hubiese evitado que los bulones estuvieran solicitados a cargas cíclicas.

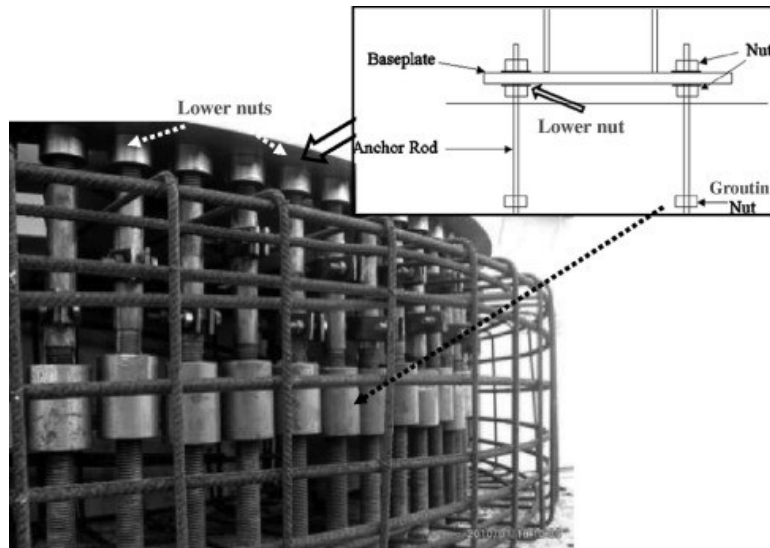


Figura 4 - Tuercas inferiores que soportan la grúa, durante la construcción de la base. Fuente: Marquez et al. (2014)

Caso 2 – Puentes de acero

En el caso de los puentes de acero, la fatiga suele ser un problema importante que limita la capacidad de carga y la vida residual de las estructuras existentes. La identificación correcta de los detalles propensos a la fatiga en un puente, junto con rutinas de inspección bien planificadas y programas de refuerzo y reparación exitosos, pueden garantizar el desempeño continuo y satisfactorio de los puentes durante su vida útil. Además, durante la fase de diseño de nuevos puentes, es importante evitar los detalles estructurales que han demostrado ser susceptibles a la fatiga (Haghani et al., 2012).

En lo referido específicamente a uniones abulonadas en puentes, Haghani et al. (2012) informa casos de grietas por fatiga en:

Uniones de las péndolas de puentes de arco de acero

Estos soportes verticales generalmente están diseñados para soportar fuerzas axiales. Los detalles de las conexiones entre las péndolas y el arco; y entre las péndolas y el tablero del puente, generalmente están diseñados para garantizar una conexión sin momento, por ese motivo se usan bulones.

En la mayoría de los casos, una combinación de dos mecanismos diferentes ha contribuido al agrietamiento por fatiga en estos detalles; por un lado, la vibración generada por cargas de tráfico en el puente y/o cargas de viento, ya que las péndolas suelen tener una rigidez a la flexión muy baja, lo que las hace muy sensibles a la resonancia. Por otro, esfuerzos secundarios debidos a la rigidez de la conexión: las

Organiza:

conexiones abulonadas libres de momento ideales no existen en la realidad. Incluso cuando se diseña como tal, una conexión siempre adquirirá cierta rigidez rotacional inherente al detalle o gradualmente durante la vida útil del puente, debido a la corrosión, por ejemplo.

La oscilación de los cables combinada con una rigidez de la conexión imprevista puede provocar numerosos ciclos con una fluctuación de momento flector en la péndola cerca de sus conexiones (Figura 5). Aunque la magnitud de estas tensiones de flexión puede ser relativamente baja, la gran cantidad de ciclos de carga causados por la vibración pueden provocar grietas por fatiga en el detalle.

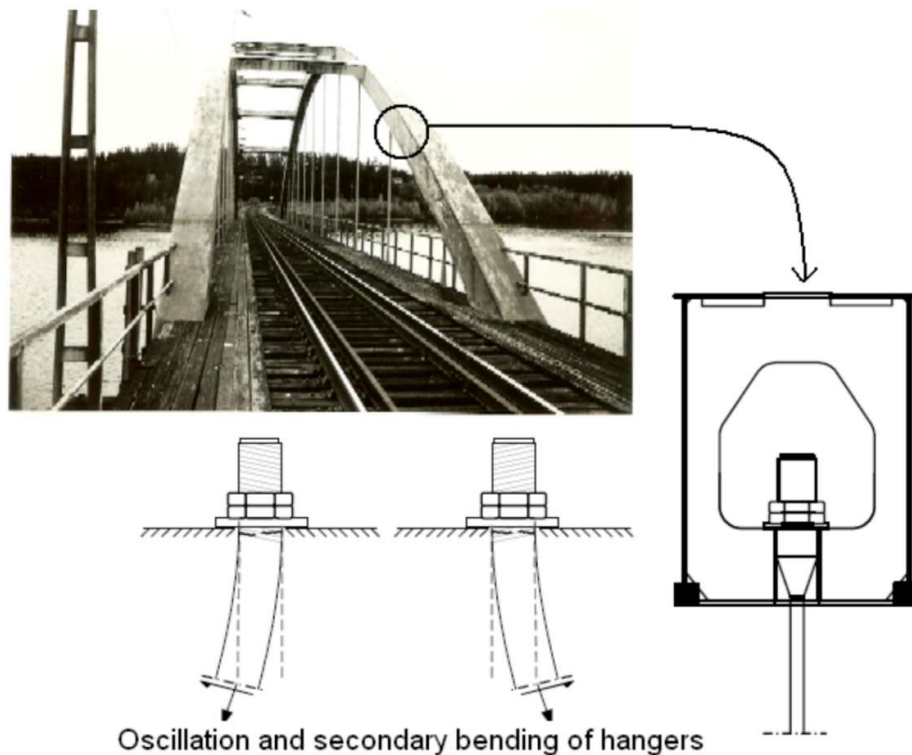


Figura 5: Fatiga de los soportes del puente sobre el río Skellefte en Suecia. Fuente: Haghani et al. (2012)

Conexiones entre largueros y vigas de piso

En muchos puentes existentes, las conexiones entre los largueros y las vigas del piso se fijan mecánicamente utilizando ángulos dobles remachados o abulonados a las placas del alma de ambos miembros. La práctica común de ingeniería ha sido diseñar estas conexiones para tener en cuenta únicamente las fuerzas cortantes (su función de soporte de carga es transferir las reacciones de los extremos de los largueros a la viga del piso). Si bien esta suposición puede ser adecuada para el diseño del estado límite último, el comportamiento de estas conexiones bajo cargas moderadas puede diferir sustancialmente.

Las conexiones de este tipo han mostrado una alta vulnerabilidad al agrietamiento por fatiga.

Organiza:

El agrietamiento por fatiga en las conexiones entre largueros y vigas de piso se genera por efectos secundarios que son de naturaleza inducida por deformación; se pueden identificar dos mecanismos:

Uno es la rotación de los extremos del larguero asociada con la flexión. Aunque las conexiones de doble ángulo se diseñan como conexiones de corte simples, generalmente es inevitable que estas conexiones también adquieran cierta rigidez rotacional, restringiendo así parcialmente el giro de los extremos de los largueros. En consecuencia, se desarrollará un momento flector negativo en los extremos de los largueros, sometiendo a los bulones y a los ángulos de las conexiones a efectos de carga que no se tuvieron en cuenta durante el diseño (Figura 6). Este tipo de acción tiene una línea de influencia relativamente corta, dando lugar a un gran número de ciclos de carga durante la vida útil del puente.

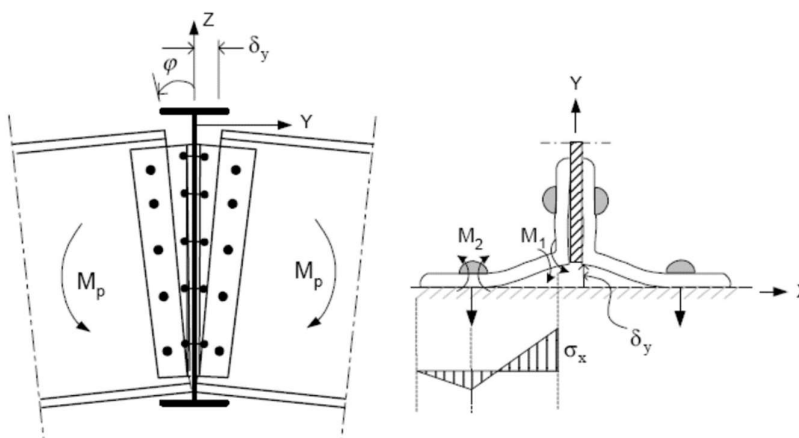


Figura 6 - Efectos en las uniones debido a la flexión en los extremos de los largueros. Fuente: Haghani et al. (2012)

El otro mecanismo es una interacción no considerada entre el sistema de piso (largueros y vigas de piso) y la estructura principal portante (vigas principales o cerchas principales, por ejemplo). La deformación por flexión de la estructura principal del puente, por ejemplo, implica el desplazamiento longitudinal de las uniones de la estructura a la que están conectadas las vigas del piso. Sin embargo, las vigas de piso están parcialmente impedidas de seguir esta deformación debido a la rigidez axial de los largueros y las uniones. Como resultado, se desarrollarán fuerzas axiales secundarias en los largueros y sus conexiones con las vigas del piso, mientras que estas últimas estarán sujetas a flexión secundaria (en el eje débil), ver Figura 7. Este tipo de interacción tiene una línea de influencia que es igual a la luz del puente y, en el caso de los puentes ferroviarios, hay esencialmente un ciclo de carga cada vez que pasa un tren.

Organiza:

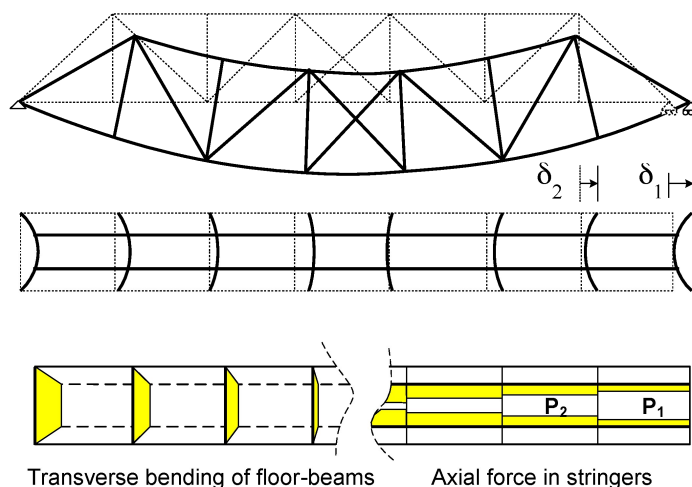


Figura 7 - Interacción entre el sistema de piso y la estructura principal portante. Fuente: Haghani et al. (2012)

Conexiones entre las vigas del piso y los miembros principales portantes

Las conexiones entre vigas de piso y viga principal, tirantes de arco, etc. también han mostrado numerosos problemas de fatiga. En principio, los mecanismos de interacción detrás del agrietamiento por fatiga son, por un lado, un momento flector secundario (en el plano del alma de la viga de piso) que podría desarrollarse en los extremos de las vigas de piso como resultado de la restricción rotacional proporcionada por sus conexiones a los elementos principales que soportan carga. Además, la interacción entre el sistema de piso (largueros y vigas de piso) y la estructura principal que soporta la carga podría resultar en una flexión secundaria fuera del plano de las vigas de piso, como se ilustra en la Figura 7.

La Figura 8 muestra un ejemplo de grieta por fatiga causada por la rotación restringida de los extremos de las vigas del piso. En uniones abulonadas, el daño por fatiga generalmente se encuentra en los ángulos de conexión o en los bulones que conectan los ángulos al elemento principal de carga.

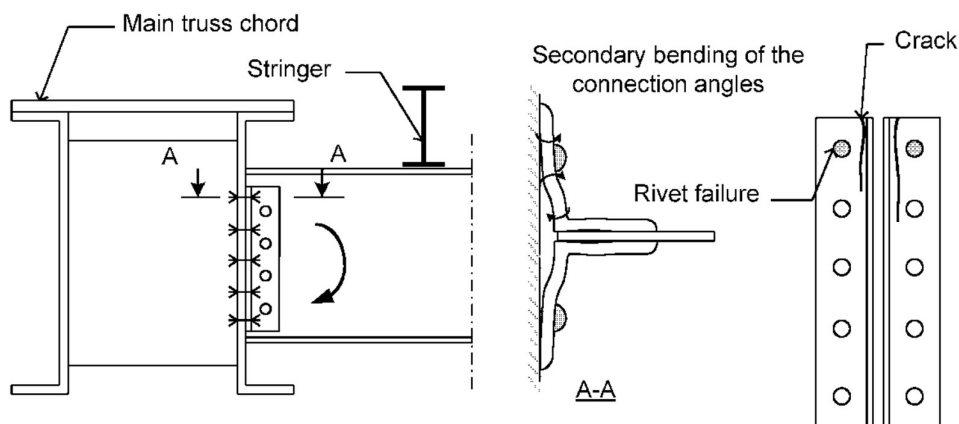


Figura 8 - Fisuras por rotación restringida. Fuente: Haghani et al. (2012)

Organiza:

Kühn (2013) presentó una guía de evaluación de fatiga para la estimación de la vida de fatiga restante de los puentes de acero. Propuso un procedimiento de evaluación de fatiga para estructuras de acero existentes que integra información sobre materiales antiguos y métodos de ensayo no destructivos para la evaluación de detalles. La guía presta especial atención a las medidas correctivas que se proponen para los detalles débiles y los daños causados por la fatiga. El procedimiento de evaluación de la fatiga desarrollado se puede aplicar a estructuras de acero existentes bajo carga cíclica en general, aunque se enfoca en la infraestructura de tráfico existente hecha de acero antiguo y apunta principalmente a uniones remachadas y soldadas.

Caso 3 – Estaciones de perforación marina

El uso de conexiones de bulones de alta resistencia es muy común en estructuras prefabricadas instaladas en alta mar. Las fuerzas y los momentos generados por los efectos del viento, las olas y las cargas complejas pueden contribuir a la fractura en la ingeniería práctica, lo que genera pérdidas económicas e incluso accidentes. La falla por fatiga es la razón principal del colapso estructural (Zhang et al., 2023).

Abdelrahman et al. (2023) realizaron un análisis detallado de fallas de un bulón de acero galvanizado de alta resistencia M20, usado en una estación de perforación marina (Figura 9). Les suministraron un bulón de acero galvanizado de alta resistencia M20 de grado 8.8 que falló tras estar cinco años en servicio; era uno de los seis bulones (HEX, M20 × 100 mm) que se usaron para sostener la estructura del equipo. Los autores destacaron la importancia de conocer el método de instalación y la cantidad de torsión que se utilizó para instalar estos bulones. El apriete flojo o por sobrecarga constituye un factor sustancial en el desempeño de la unión. Un apriete excesivo o el uso incontrolado de lubricantes durante la instalación, por ejemplo, pueden provocar fallas en los bulones.

Los estados de carga del bulón que falló, en condiciones de servicio, eran la carga estática de la estructura de la plataforma y la carga dinámica durante la operación de la plataforma, sin presión ni temperatura.

Se hicieron análisis de la macroestructura y de la microestructura. La inspección visual del bulón no reveló signos de daños por corrosión, lo que pudo deberse a que el zinc introducido en el proceso de galvanización le generaba una triple protección.

La morfología de la fractura demostró poca o incluso ninguna deformación plástica, lo que indicó una fractura frágil en lugar de una fractura dúctil. No se produjo un cuello en la rosca del vástago del bulón.

Organiza:

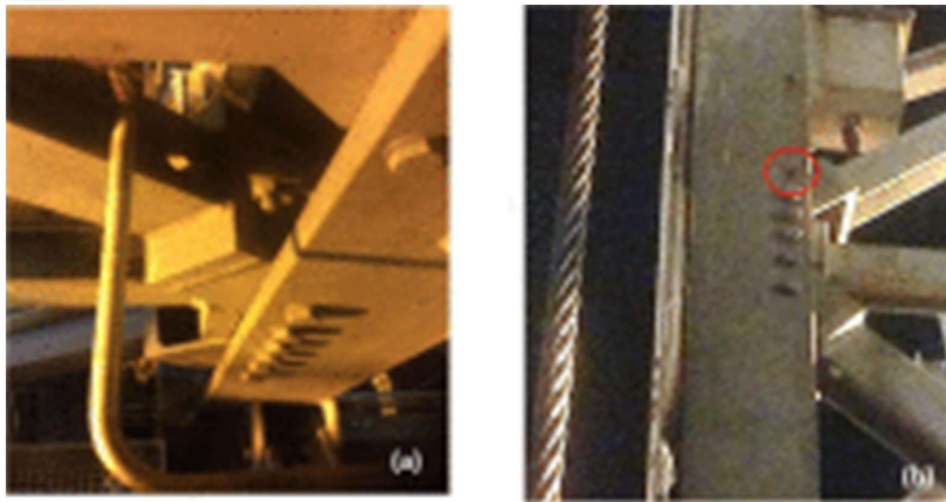


Figura 9 - Ubicación de la falla en una plataforma de perforación marina : (a) disposición de los bulones en la viga y (b) ubicación del bulón fallado. Fuente: Abdelrahman et al. (2023)

La Figura 10 muestra la ubicación de la falla, que ocurrió en la primera raíz de la rosca de los vástagos, cerca de la tuerca, desde la cabeza del bulón en la dirección transversal. Esto podría estar relacionado con el alto gradiente de tensión introducido por las cargas de servicio, especialmente en esta área.



Figura 10 - ubicación de la falla. Fuente: Abdelrahman et al. (2023)

El examen de la macroestructura de la superficie de la fractura se realizó en la dirección transversal en el lado de la cabeza del bulón y el lado de la rosca del bulón. La fractura en ambos suele ser una fractura por fatiga.

Se investigaron las propiedades mecánicas del bulón que falló para garantizar que fueran adecuadas para resistir las cargas aplicadas. Se realizaron pruebas de tracción y de dureza Vickers sobre el material del bulón. Las mediciones de dureza se hicieron en dirección transversal, a través de la superficie fracturada del bulón. Tanto las mediciones de tracción como de dureza se compararon con los valores estándar (Tabla 1) para las clases de propiedad 8.8, 9.8 y 10.9.

Tabla 1 - Resistencia estándar a fluencia y a rotura de bulones

Clase de resistencia	Resistencia a fluencia (F_y) - MPa	Resistencia a rotura (F_u) - MPa
8.8	640	800
9.8	720	900
10.9	900	1000

Organiza:

Las propiedades de tracción del bulón que falló resultaron adecuadas para los requisitos de todas las clases. La dureza medida a partir del material del bulón fue mayor que la aceptada para la clase 8.8. Esto podría estar relacionado con el contenido cualitativamente medio de inclusiones no metálicas. En general, estas inclusiones no metálicas juegan un papel importante como generadores de tensión, lo que a su vez aumenta la dureza y promueve la iniciación y propagación de grietas.

La investigación encontró que el principal mecanismo de falla del bulón fue el agrietamiento por fatiga, generado por la existencia de inclusiones no metálicas que estaban presentes tanto en el centro del bulón como cerca de las microestructuras de la raíz de la rosca; además de las fuerzas de precarga desequilibradas que provocaron el aflojamiento de los bulones, lo que provocó un desgaste por fricción del espesor de la capa galvanizada. Se descubrió que la grieta se propagó a través de una escisión completa de transición a una fractura de cuasi escisión y que la etapa final de la falla por fatiga fue causada por fractura dúctil de la zona sobrecargada.

Los autores recomendaron imponer un mayor control durante las etapas de la siderurgia secundaria para evitar o disminuir la existencia de inclusiones no metálicas. Además, plantearon la necesidad de cálculos más sofisticados de las precargas y cargas externas para garantizar un equilibrio preciso y reducir el riesgo de que los bulones se aflojen.

Caso 4 - Aerogeneradores

Debido a la variación de la carga y la aleatoriedad, la falla por fatiga de los bulones en conexiones de palas anillo-brida o en conexiones estructurales de brida son causas frecuentes de falla en las turbinas eólicas. La caída de los bulones de unión de las palas de un aerogenerador puede suponer accidentes muy graves. Es entonces necesario realizar un seguimiento y mantenimiento de los bulones. La causa del fallo de los bulones de las uniones de un aerogenerador suele ser la fatiga, por estar solicitados a cargas cíclicas.

En su tesis de maestría, Juliá Lerma (2019), realizó un estudio experimental a escala sobre la vida a fatiga de uniones aulonadas de aerogeneradores, a partir del caso real de un campo de aerogeneradores en Francia en el que los bulones comenzaron a fallar tras una vida en servicio de 10 a 15 años y como consecuencia se produjo la caída de una pala. Luego la empresa quiso garantizar la seguridad del resto de aerogeneradores. Como es caro renovar todas las uniones, no solo por el precio de los propios elementos de la unión, sino por tener que parar la producción de energía eléctrica durante varios días, decidieron realizar ensayos de fatiga para averiguar la vida residual existente en los bulones que estaban montados.

Se realizaron ensayos hasta la rotura sobre algunos de los bulones instalados y sobre otros bulones del mismo tipo (M16) pero nuevos. Luego se comparó la vida obtenida entre los bulones nuevos y los usados, obteniendo así la vida residual de los bulones usados como un porcentaje de la vida de los bulones nuevos.

Previamente fue necesario realizar el apriete de los bulones. Cuando los bulones usados se aprietan de nuevo, la posición de la probable grieta existente puede cambiar

Organiza:

de posición respecto a la tuerca, ya que no siempre se puede tener control sobre la posición exacta en la que estaban montados.

Entonces, se determinó una carga para la cual la vida total de la unión fuese de 500.000 ciclos. Luego, se realizaron diversos bloques de ensayos donde, a mitad de vida, se cambió la ubicación respecto a la tuerca de la grieta existente en el tornillo y se analizó la vida obtenida en comparación con el caso ininterrumpido. Se concluyó que existe un aumento de vida debido al cambio de posición de la grieta, pero que no depende tanto de cuánto se ha movido como para ser apreciable frente a la propia dispersión de los ensayos de fatiga.

El estudio realizado por Chou & Tu (2011) investigó las causas del colapso de la torre de un aerogenerador en Taiwán. Con base en documentos oficiales recopilados, resultados analíticos, experimentos de laboratorio y el resultado de la prueba de hipótesis, se analizaron las posibles causas de fallas de las torres. Revisaron un total de 62 casos de accidentes de torres de turbinas eólicas en todo el mundo en el período 1997-2009. El 35% de estos accidentes fueron fallas de palas, que también impactaron en las estructuras, dentro de los cuales hubo tres casos de falla por fatiga (dos en Alemania y uno en Estados Unidos). Los resultados de las pruebas de laboratorio demostraron que la mayoría de los bulones tenían una resistencia insuficiente y que existía una gran variación en la calidad de los bulones. Esto no se identificó en la prueba de muestreo de una sola etapa realizada por los subcontratistas. Por otro lado, los procedimientos de instalación de bulones son importantes porque su resistencia aumenta cuando se los sigue. Sin embargo, no se registró en la lista de verificación de inspección del contratista ni en la lista de verificación de inspección in situ del propietario si los bulones se apretaron dos veces. Además, las máquinas utilizadas para instalar bulones no tenían registros de ajuste ni mantenimiento. Los autores sugirieron que para garantizar que las herramientas estén alineadas y que la torsión aplicada a los bulones cumple con las especificaciones de diseño, se deben verificar si los bulones se apretaron dos veces; cuál es la torsión de un bulón abulonado por primera vez; y si el equipo o las herramientas de instalación se ajustan correctamente antes de su uso.

Rincón-Casado et al. (2022) presentaron una metodología experimental destinada a estimar la vida a fatiga residual de los bulones de turbinas eólicas en servicio. El objetivo principal fue planificar su sustitución y evitar roturas inesperadas de las conexiones de las palas de los aerogeneradores. Utilizaron bulones M16 de calidad 10.9 con predaño controlado, simulando condiciones de operación en servicio. La vida de fatiga residual se estimó a partir de la diferencia en la vida de fatiga de las pruebas de bulones nuevos y la vida de fatiga de las pruebas de bulones predañados, simulando condiciones de servicio. Los autores concluyeron que los resultados de su estudio y el procedimiento a seguir para la realización de ensayos experimentales son extrapolables de forma general a otro tipo de uniones abulonadas sometidas a cargas cíclicas. Además, en su investigación demostraron que pequeños errores en el posicionamiento de la tuerca para las pruebas de vida residual producen pequeñas desviaciones en las estimaciones de vida residual.

Organiza:

En la Figura 11 se muestran las vidas residuales promedio para diferentes posiciones de la tuerca para cuatro grupos de cuatro pruebas. En todos los casos se aplicó un daño previo de 207.368 ciclos. Las flechas representan el ángulo girado por la tuerca desde la posición original (0 mm). Las flechas discontinuas indican que la tuerca se giró $+90^\circ$ (+0,5 mm) o $+180^\circ$ (+1 mm) desde la posición original, mientras que una flecha continua indica que la tuerca se giró -180° (-1 mm) desde la posición original posición.

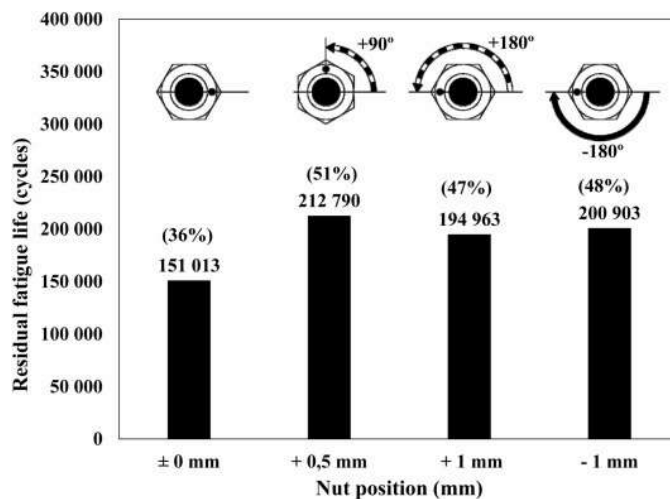


Figura 11 - Vidas residuales según la posición de la tuerca. Fuente: Rincón-Casado et al. (2022)

Caso 5 – Estructuras reticuladas espaciales

La fatiga de los bulones de alta resistencia es crítica para las uniones bulón-esfera de estructuras reticuladas espaciales bajo la acción de grúas suspendidas. Los bulones de alta resistencia y de gran diámetro se utilizan con mayor frecuencia cuando aumentan la luz de las estructuras reticuladas espaciales y la carga de las grúas suspendidas. Zhou et al. (2022) realizaron 27 pruebas de fatiga bajo amplitud constante en bulones M60 de alta resistencia con un gran diámetro, utilizados en las uniones bulón-esfera de estructuras reticuladas espaciales.

Si la luz de una estructura es superior a 36 m, no se puede adoptar un puente grúa tradicional. Sin embargo, las estructuras reticuladas espaciales con grúas suspendidas presentan ventajas considerables en hangares y edificios industriales debido a la flexibilidad de la disposición y la adaptabilidad del flujo del proceso.

A medida que aumentan la carga, la cantidad y la frecuencia de operación de las grúas suspendidas, el problema de fatiga de las estructuras reticuladas espaciales se intensifica. Bajo la carga de grúas suspendidas, la fatiga de las uniones bulón-esfera se produce principalmente en las uniones abulonadas.

En su investigación, obtuvieron una expresión para la curva S-N del bulón M60 de alta resistencia. Al comparar los resultados con los bulones de alta resistencia M20, M30 y M39, se encontró que no había una relación entre disminución de la resistencia a la fatiga de los bulones de alta resistencia y el aumento de su diámetro (Figura 12).

Organiza:

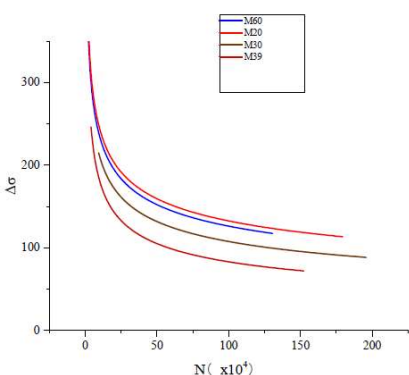


Figura 12 - Comparación de curvas S-N para distintos tamaños de bulones. Fuente: Zhou et al. (2022)

El análisis de la morfología de la fractura reveló el mecanismo de falla por fatiga del bulón M60 de alta resistencia. La posición principal de la falla por fatiga fue donde el vástago del bulón se enganchó con la primera rosca de la esfera. Además, la fractura por fatiga mostró características típicas del área de origen de la fatiga, el área de propagación de la grieta y el área de la fractura transitoria;

Caso 6 – Estructuras para carteles de tránsito

En las últimas décadas, (Dexter, 2002) y (Park & Stallings, 2006) reportaron casos de falla por fatiga de soportes de tráfico en voladizo con una característica común: su ubicación en juntas estructurales como la conexión de mástil a columna, conexión de columna a placa base y anclajes abulonados.

El artículo de Iordachescu et al. (2022) aborda el análisis del fallo detectado durante una inspección de servicio rutinario en una estructura de pórtico elevado para señalización de tráfico instalada en la principal autopista norte-sur de España (Figura 13). La falla consistió en el aflojamiento parcial o total de algunos bulones, que se produjo después de más de 30 años de servicio y se localizó en la unión abulonada del tramo medio. Los datos en los que se basó el análisis de fallos fueron el diseño estructural proporcionado por la Superintendencia de Carreteras y Transportes de España, y los resultados del examen exhaustivo de los bulones desmantelados, suministrados por la empresa de mantenimiento. La investigación consistió en una evaluación de la mecánica de fractura para conocer el origen de la falla a partir del estudio microestructural y fractográfico de los bulones fallados y la caracterización del comportamiento a tracción, fractura y fatiga, este último respecto a las especificaciones de diseño a fatiga del Eurocódigo 3, no vigentes cuando se instaló la estructura de soporte.

Se determinó que la falla fue propiciada por la acción ambiental, que facilitó el inicio de procesos de fatiga en los bulones de acero fallados y acortó la vida a fatiga. La ubicación de la estructura, que implicó la exposición a acciones de fatiga aerodinámicamente inducidas por el paso de vehículos y la condición de galvanizado profundo en caliente de los bulones de acero de alta resistencia, fueron contribuciones determinantes a la falla.

Organiza:



Figura 13 - Inspección en servicio y bulones retirados de la junta del tramo medio. Fuente: Iordachescu et al. (2022)

El comportamiento a fatiga y fractura del bulón de acero cumplía con los supuestos del Eurocódigo 3 para aceros estructurales modernos, a pesar de que la estructura analizada no estaba diseñada explícitamente contra fatiga. Por lo tanto, el análisis de falla se centró en los mecanismos de iniciación de la fatiga, con los siguientes hallazgos: la acción ambiental produjo el deterioro del recubrimiento de Zinc, creando el acceso posterior a la interfaz Zinc-acero lo que promovió la nucleación de microfisuras. Estas se comportaron como iniciadores de fatiga y disminuyeron la resistencia a la fatiga de los bulones.

El estudio de Shurbert-Hetzel et al. (2021) evaluó la respuesta estructural y la posibilidad de falla de las estructuras de soporte de celosías aéreas para cartelera de mensajes dinámicos, en una amplia gama de escenarios de carga de viento. Para ello, se desarrolló un modelo representativo de elementos finitos utilizando los datos de las estructuras de soporte instrumentadas en campo. Luego, el modelo validado se sometió a cargas de viento extremo de diversas intensidades. Se estudiaron las principales medidas de respuesta estructural, incluidas las de las uniones con bulones que unen la celosía horizontal a los soportes verticales, y se concluyó que las configuraciones de bulones en U consideradas en el estudio permanecerían intactas bajo un evento de viento en línea recta hasta 500.000 años, además de que la demanda de carga experimentada por los bulones en U era hasta un tercio de su capacidad de extracción y corte bajo el evento de viento de 500.000 años. Por lo tanto, los bulones en U no serían un eslabón débil bajo cargas de viento extremo.

Caso 7 – Tanques y silos

Varias uniones abulonadas simples que sujetaban las placas de acero de tres tanques de agua de 25.000 m³ en una planta potabilizadora mostraron fallas prematuras (Figura 14). La mayoría de los bulones fracturados se encontraban en el sector inferior de los tanques. Los bulones de acero martensítico templado fueron galvanizados mecánicamente, y la mala calidad de la galvanización permitió que los agentes corrosivos se filtraran a través de las partículas de revestimiento de zinc y selenio, alcanzando finalmente la superficie de acero de los bulones. Además, se observaron múltiples prefisuras intergranulares de 6 µm de profundidad en las raíces de las roscas de los nuevos bulones. Durante la etapa de servicio, estas grietas previas acumularon agentes corrosivos, creando numerosos poros de corrosión de 10 µm de profundidad,

Organiza:

nucleando las grietas ambientalmente asistidas de los bulones (Boschetti Pereira et al., 2022).



Figura 14 - Detalle de la unión del tanque de agua y bulón roto. Fuente: Boschetti Pereira et al. (2022)

Otros casos

Las fijaciones de las estructuras de acero de barreras acústicas en estaciones ferroviarias de alta velocidad son afectadas por la carga aerodinámica que actúa sobre esas barreras cuando pasan los trenes. Su amplitud depende de la velocidad del tren, la forma, la altura de la barrera y su distancia desde el eje de la vía (Revista Bolted, edición 1).

Los autores tienen conocimiento de casos de estructuras metálicas de soporte de máquinas en las que las uniones se han visto afectadas por fatiga generada por los sucesivos ciclos de arranque, régimen permanente y parada de la maquinaria que sostienen. Sin embargo, hasta el momento no se han encontrado referencias específicas.

NORMATIVA

En Argentina, el reglamento vigente para estructuras de acero para edificios es el CIRSOC 301/2018. En el apéndice 3, se detalla el proyecto para cargas cíclicas (fatiga). El apéndice se aplica a miembros y uniones solicitados por cargas cíclicas dentro del rango elástico de tensiones, de frecuencia e intensidad suficiente para iniciar la fisuración y la falla progresiva que definen el estado límite de fatiga. Se dispone que los bulones de alta resistencia deberán ser apretados hasta cierto valor de tracción tabulado, y se indica la rotación que se debe dar a la tuerca a partir de la posición de contacto firme. Si bien la fatiga es un estado límite último porque afecta a la seguridad de la estructura, como resulta de la aplicación repetida de la sobrecarga útil, el proyecto estructural se debe basar en el criterio de cargas de servicio.

Además, existe el reglamento CIRSOC 304/2007 “Recomendación para uniones estructurales con bulones de alta resistencia”, en el que se establece que:

- En uniones que están sometidas a efectos de fatiga sin inversión del sentido de

Organiza:

las cargas, uniones con bulones Nivel 1¹ que están sujetas a fatiga por tracción y uniones con bulones Nivel 2² que están sometidas a tracción o a una combinación de corte y tracción, con o sin fatiga, se requieren uniones pretensadas.

- En aplicaciones que involucran corte o combinación de corte y tracción, las uniones sometidas a cargas de fatiga con inversión de la dirección de las cargas, deben ser uniones de deslizamiento crítico.
- Como alternativa a lo establecido en el Reglamento CIRSOC 301/2005, se puede considerar que en el bulón la tensión de tracción que se produce como resultado de la aplicación cíclica de las acciones de servicio externas y la fuerza de palanca, si corresponde, (pero excluyendo la pretensión) no debe ser mayor que las tensiones dadas. Para calcular la tensión de los bulones se debe utilizar su diámetro nominal. Las partes conectadas se deben dimensionar de manera tal que la fuerza de palanca calculada no supere el 30 % de la carga externa aplicada.

El reglamento CIRSOC 301/2018 está basado en la norma norteamericana ANSI / AISC 360-16, que trata el tema Fatiga también en su apéndice 3. Estas normas establecen que no es necesario realizar la verificación a fatiga frente a efectos sísmicos o cargas de viento en los sistemas estructurales para cargas horizontales o en los elementos de cerramiento de edificios comunes.

En los comentarios del apéndice 3 del CIRSOC 301, se menciona que la resistencia a fatiga de bulones sometidos a tracción es predecible si no existe pretensión o acción de palanca. En el Reglamento se dan criterios para cada detalle no pretensado tales como bulones y anclajes roscados. En el caso de bulones pretensados, la deformación de las partes unidas cuando se aplica el pretensado introduce una acción de palanca, cuya intensidad no es totalmente predecible. Los efectos de la acción de palanca no se limitan al cambio de la tracción promedio en el bulón e incluyen flexión en el área roscada bajo la tuerca. Por estas incertidumbres no se incluyen en el Reglamento criterios definitivos para calcular los efectos de la acción de palanca y para el rango de tensión de diseño. Para limitar las incertidumbres, el rango de tensión de diseño dado es apropiado para cargas de muchos ciclos solo si la acción de palanca producida por las cargas aplicadas es pequeña.

El CIRSOC 301 no permite el uso de pasadores no pretensados para uniones sometidas a fuerzas cíclicas de corte. Los bulones instalados en uniones que cumplen las especificaciones de las uniones de deslizamiento crítico resultan ilesos cuando se los somete a tensiones cíclicas de corte suficientes incluso para romper las partes unidas.

El reglamento no obliga a evaluar la resistencia a los efectos de fatiga si el rango de tensión debido a las sobrecargas útiles es menor que un umbral especificado.

¹ Nivel de resistencia 1: norma IRAM 5453 (en redacción en base al documento ASTM A325), norma IRAM a redactar en base al documento ASTM A325M, norma IRAM 5464-Clase 8.8 (en redacción en base al documento ISO 7412 C8.8).

² Nivel de resistencia 2: norma IRAM 5455 (en redacción en base al documento ASTM A490), norma IRAM a redactar en base al documento ASTM A490M, norma IRAM 5464-Clase ISO 10.9 (en redacción en base al documento ISO 7412 C10.9)

Organiza:

Tampoco es necesario si el número de aplicaciones de las sobrecargas útiles en la vida útil del elemento estructural considerado es menor a 2×10^4 , ni para la acción del viento especificada en CIRSOC 102/2005. Las estructuras deben contar con una adecuada protección contra la corrosión y estar en atmósferas poco corrosivas, y con temperaturas menores o iguales a 150°C.

Las reglas para el cálculo de fatiga contenidas en el Eurocódigo 3 se basan en los resultados de ensayos de fatiga obtenidos fundamentalmente bajo cargas de amplitud constante. La clasificación de un detalle concreto, bien sea soldado o abulonado, es producto de una evaluación estadística de los datos de los ensayos de fatiga con una probabilidad de supervivencia del 95% para un intervalo de confianza del 75%. Esta evaluación se compara con una serie de curvas S-N equiespaciadas con una pendiente constante de $m = 3$.

El concepto del cálculo para la resistencia a fatiga se ajusta a las recomendaciones de la European Convention for Constructional Steelwork (ECCS). Las recomendaciones definen una serie de curvas de resistencia a fatiga equiespaciadas con una pendiente constante de $m = 3$ (en el caso de tensión normal), o de $m = 5$ (para tensiones tangenciales, uniones de sección hueca y algunos detalles concretos). Además de este enfoque, en el Eurocódigo 3 se hace referencia a otro concepto, el de la concentración de tensiones geométricas, también conocido como el método de la “tensión del punto crítico” (Fuente: guía 14 del Instituto Técnico de la Estructura en Acero).

Zhang et al. (2023) analizaron el comportamiento a fatiga, la concentración de tensiones y el análisis de fractura en bulones de alta resistencia solicitados a corte por torsión. Se realizaron diez experimentos de fatiga de amplitud constante para estudiar el rendimiento de fatiga de bulones de alta resistencia M20 y se estableció un modelo numérico para estudiar más a fondo la distribución de tensiones de los bulones. Dentro de las conclusiones, se encontró que la amplitud de tensión permitida de los bulones de alta resistencia M20 solicitados a corte por torsión es el doble del valor de diseño obtenido de ANSI/AISC 360-16 (2016) y 1,93 veces el valor de diseño obtenido del Eurocódigo 3 (2005) y GB 50017 (2017). Esto les indicó que las normas de diseño existentes son relativamente conservadoras para predecir el comportamiento a la fatiga de estos bulones.

Los ensayos de fatiga (Wöhler) de alto ciclo según las normas DIN 50100 / ASTM E466-15 / ISO 1099 permiten determinar la vida a fatiga y la resistencia a la fatiga de alto ciclo para cargas de tracción, compresión, flexión y torsión. Especialmente en componentes, se pueden determinar los puntos débiles para poder mejorarlos a través del diseño y modificaciones del material.

Organiza:

CONCLUSIONES

Se han recopilado casos de diferentes estructuras usadas en el campo de la ingeniería civil que son susceptibles a sufrir daños por fatiga. Si bien muchas estructuras de acero usadas comúnmente en la ingeniería civil no experimentan una tensión cíclica o un número de ciclos suficiente como para originar problemas de fatiga, los casos presentados demuestran que no siempre se puede ignorar o subestimar la fatiga que sufren, especialmente los elementos de unión.

No se han encontrado casos de estudio sobre la fatiga en las uniones abulonadas de las estructuras de soporte de máquinas y equipos industriales, sin embargo los autores tienen conocimiento de fallas y colapsos ocurridos en los que la fatiga ha sido la causa o al menos ha colaborado junto con otros factores para producirla, por lo que ésta es una de las posibles líneas de investigación a seguir.

Es necesario continuar investigando la resistencia a fatiga de bulones sometidos a tracción cuando son pretensados o existe efecto de palanca, ya que el rango de tensión de diseño dado por el CIRSOC 301 no es apropiado para cargas de muchos ciclos cuando la acción de palanca es grande.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdelrahman, M. S., Khalifa, W., & Abdu, M. T. (2023). Failure Analysis of Fatigue Failed M20 Class 8.8 Galvanized Steel Bolt. *Engineering Failure Analysis*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107304>
- Boschetti Pereira, H., Rocha Maia, R., Shen, J., Tong, Q., de Farias Azevedo, C. R., & Paulo Tschiptschin, A. (2022). In-service failure of mechanically galvanised low alloy steel bolts of three 25,000 m3 bolted water tanks. *Engineering Failure Analysis*, 142, 106839. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106839>
- Cheng, L., Yang, F., Seidel, M., & Veljkovic, M. (2023). FE-assisted investigation for mechanical behaviour of connections in offshore wind turbine towers. *Engineering Structures*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116039>
- Chou, J.-S., & Tu, W.-T. (2011). Failure analysis and risk management of a collapsed large wind turbine tower. *Engineering Failure Analysis*, 18(1), 295–313. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2010.09.008>
- Dexter, R. J. (2002). *Fatigue-resistant design of cantilevered signal, sign, and light supports* (Vol. 469). Transportation Research Board.
- Gagg, C. R., & Lewis, P. R. (2009). In-service fatigue failure of engineered products and structures – Case study review. *Engineering Failure Analysis*, 16(6), 1775–1793. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2008.08.008>
- Haghani, R., Al-Emrani, M., & Heshmati, M. (2012). Fatigue-prone details in steel bridges. *Buildings*, 2(4), 456–476. <https://doi.org/10.3390/buildings2040456>
- Iordachescu, M., Valiente, A., De Abreu, M., Santos, P., & Scutelnicu, E. (2022). Environmentally assisted fatigue failure of a structural bolted-joint connection. *Engineering Failure Analysis*, 137, 106322. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106322>

Organiza:

- Juliá Lerma, J. M. (2019). *Estudio experimental de la vida a fatiga en uniones atornilladas*.
- Kühn, B. (2013). Assessment of Existing Steel Structures – Recommendations for Estimation of the Remaining Fatigue Life. *Procedia Engineering*, 66, 3–11. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2013.12.057>
- Marquez, A. A., Venturino, P., & Otegui, J. L. (2014). Common root causes in recent failures of cranes. *Engineering Failure Analysis*, 39, 55–64. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.012>
- Park, J. S., & Stallings, J. M. (2006). Fatigue evaluations of variable message sign structures based on AASHTO specifications. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10, 207–217.
- Reglamento CIRSOC 301/2018 "Reglamento Argentino de estructuras de acero para edificios"
- Reglamento CIRSOC 304/2007 "Recomendación para uniones estructurales con bulones de alta resistencia"
- Radlov, K., & Ivanov, G. (2020). Analysis of accidents with tower cranes on construction sites and recommendations for their prevention. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 951(1), 012025. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/951/1/012025>
- Rincón-Casado, A., Juliá-Lerma, J. M., García-Vallejo, D., & Domínguez, J. (2022). Experimental estimation of the residual fatigue life of in-service wind turbine bolts. *Engineering Failure Analysis*, 141, 106658. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2022.106658>
- Shurbert-Hetzel, C., Shafei, B., & Phares, B. (2021). Performance of steel dynamic message sign-support structures in extreme wind events. *Engineering Structures*, 237, 112086. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112086>
- Slessor-Marriott, K. (Edición 1, 2022). Alexa: ¿Cómo pueden los productos inteligentes redefinir el mantenimiento de los pernos?. Bolted. www.bolted.com
- Zhang, L., Lei, H., Shen, Y., Zhang, S., & Zhou, Z. (2023). Fatigue Behavior of M20 Torque Shear High-Strength Bolts under Constant-Amplitude Loading. *Buildings*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/buildings13020367>
- Zhou, Z., Lei, H., Qiu, B., Zhang, S., & Wang, G. (2022). Experimental Study on Fatigue Performance of M60 High-Strength Bolts with a Huge Diameter under Constant Amplitude Applied in Bolt–Sphere Joints of Grid Structures. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(17). <https://doi.org/10.3390/app12178639>

Organiza: