

FUNDAMENTOS CONCEPTUALES DE LA RESISTENCIA A FATIGA DE UNIONES ABULONADAS EN ESTRUCTURAS METÁLICAS

Bisogno Eyler, Sabrina¹; Montanaro, María Inés²

¹Ingeniera civil; ²Magister en ingeniería estructural

^{1,2} Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la provincia de Buenos Aires, Olavarría, Argentina.

sabrina.bisogno@fio.unicen.edu.ar

RESUMEN

La ocurrencia de comportamientos mecánicos inadecuados y recientes colapsos en estructuras industriales debidos a la variabilidad de las cargas ha generado interés respecto a la determinación de las causas de fallas y de colapso. Las acciones dinámicas sobre elementos estructurales contribuyen a la aparición de fenómenos de fatiga y de daño acumulado que deben ser debidamente estudiados. El diseño adecuado de las uniones en estructuras metálicas solicitadas a cargas dinámicas de altos ciclos es muy importante para asegurar una determinada vida útil y planificar su mantenimiento.

Este trabajo aborda el estado de conocimiento actual sobre modelos de acumulación de daño y vida a fatiga, haciendo foco particularmente en la fatiga de uniones abulonadas de estructuras metálicas. Con el fin de definir nuevas líneas de investigación, se analizan las variables que influyen en la resistencia a fatiga de uniones abulonadas, como la pretensión, la geometría de la unión, el tipo de carga cíclica, el material, el tratamiento superficial y los procesos de fabricación.

ABSTRACT

The occurrence of inadequate mechanical behaviors and recent collapses in industrial structures due to the variability of loads has generated interest regarding the determination of the causes of failures and collapse. Dynamic actions on structural elements contribute to the appearance of fatigue and accumulated damage phenomena that must be properly studied. The proper design of joints in metallic structures subjected to high cycle dynamic loads is very important to ensure a certain useful life and plan their maintenance.

This work addresses the current state of knowledge on damage accumulation and fatigue life models, focusing particularly on the fatigue of bolted joints of metallic structures. In order to define new lines of research, the variables that influence the fatigue resistance of bolted joints are analyzed, such as pretension, joint geometry, type of cyclic loading, material, surface treatment and processes of manufacturing.

Organiza:

INTRODUCCIÓN

La estimación de la vida a fatiga suele ser muy poco precisa. Existen multitud de criterios distintos dados por diversos científicos e ingenieros a lo largo de la historia; algunos están más del lado de la seguridad, otros sólo dan buenos resultados para aplicaciones concretas. Debido a la dispersión característica de los resultados de vida a fatiga, es usual utilizar coeficientes de seguridad amplios. Todo coeficiente de seguridad conlleva un sobre costo en la fabricación, por lo que es importante tratar de disminuir dicha dispersión de resultados a la hora de obtener la vida a fatiga de un elemento ante una carga concreta (Juliá Lerma, 2019).

En los elementos estructurales de acero, las uniones abulonadas son uno de los métodos de unión más utilizados. Entre las principales ventajas de este tipo de uniones frente a otras se pueden mencionar la economía del proceso, la rapidez y facilidad de montaje, la fiabilidad del servicio; la facilidad de inspección, el rendimiento bajo tensiones aplicadas variables.

MODELOS DE ACUMULACIÓN DE DAÑO Y VIDA A FATIGA

El concepto de cálculo del daño acumulado por fatiga se remonta a la década de 1920, cuando Palmgren publicó por primera vez la idea de la acumulación de daño por fatiga lineal. En 1945, Miner formuló la misma hipótesis, que ahora se conoce ampliamente como la regla de Palmgren-Miner, la regla de daño lineal, o simplemente como la regla de Miner. La regla de Miner se basa en la hipótesis de que el daño por fatiga es igual a la relación del ciclo acumulado, expresado como:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

D es el daño (donde D igual a la unidad teóricamente corresponde a la falla), n_i y N_i son el número de ciclos aplicados y el número de ciclos hasta el fallo para el nivel de tensión de amplitud constante σ_i , respectivamente. La regla de Miner se ha convertido en el estándar de la industria para el diseño de fatiga de estructuras metálicas basado en el enfoque de resistencia debido a su simplicidad intrínseca.

A pesar de su amplio uso, se sabe que la regla de Miner presenta deficiencias, como la independencia del nivel de carga, la independencia de la secuencia de carga y la falta de consideración de los efectos de interacción de la carga debido a la plasticidad de la punta de la grieta. Desde su publicación, se han desarrollado un gran número de modelos de acumulación de daño por fatiga y cada año se publican más. De acuerdo a las conclusiones de la revisión realizada por (Hectors & De Waele, 2021), la mayoría de los modelos de daños por fatiga disponibles sólo se han validado con conjuntos de datos experimentales relativamente pequeños, lo que hace imposible juzgar su rendimiento genérico. La acumulación de daños por fatiga es un proceso complejo, lo que significa que el desarrollo de un modelo generalizado que abarque

Organiza:

todo es extremadamente difícil.

Schütz (1996) hizo una evaluación de la importancia de los científicos e ingenieros y su trabajo para un mayor desarrollo de la tecnología y el conocimiento de la fatiga desde 1883 hasta la década de 1990, con un enfoque especial en las contribuciones alemanas entre 1920 y 1945.

Fatemi & Yang (1998) realizaron una revisión exhaustiva de las teorías del daño acumulado por fatiga para metales y sus aleaciones, enfatizando los enfoques desarrollados entre principios de los años 1970 y principios de los 1990. Estas teorías se agrupan en seis categorías: reglas de daño lineal; curva de daño no lineal y enfoques de linealización en dos etapas; métodos de modificación de la curva de vida; enfoques basados en conceptos de crecimiento de grietas; modelos de mecánica de daño continuo; y teorías basadas en la energía.

Cui (2002) hizo una revisión de los últimos desarrollos de métodos de predicción de la vida de fatiga que se habían hecho hasta ese momento. Los dividió en dos categorías: teorías del daño acumulado por fatiga y teorías de propagación de grietas por fatiga. A su vez, clasificó los factores que afectan a la vida a fatiga de las estructuras metálicas en cuatro categorías: material, estructura, carga y entorno.

El enfoque de vida total supone que los elementos están libres de defectos y que su vida útil se basa en el inicio y la propagación de fisuras. Esta filosofía de diseño se sigue para aplicaciones que no son críticas para la seguridad, sin concentraciones de tensión y sin fallas existentes conocidas. Por otro lado, el principio de tolerancia a defectos supone que todos los materiales tienen defectos iniciales y que su vida útil se basa únicamente en la propagación de fisuras. Se utiliza en aplicaciones críticas para la seguridad (Gagg & Lewis, 2009).

Con base en las revisiones de Fatemi & Yang (1998) y de Hectors & De Waele (2021), se hace un breve resumen de los fundamentos teóricos y se actualizan hasta la fecha, como se puede observar en la Figura 1.

VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA A FATIGA DE UNIONES ABULONADAS

Las uniones abulonadas se usan comúnmente en estructuras de ingeniería civil. En las estructuras metálicas, las uniones abulonadas (cuando no hay soldaduras) son los componentes donde se pueden observar principalmente los efectos de la fatiga, donde se desarrollan las primeras fisuras. Su falla puede generar el colapso de toda la estructura.

Zampieri et al. (2019) realizaron una revisión de la literatura sobre ensayos, análisis numéricos y reglas de diseño a fatiga de conexiones abulonadas solicitadas a corte. En su trabajo se discuten los parámetros que influyen en la fatiga de uniones abulonadas. Los factores ambientales tales como temperatura, corrosión, etc. también son variables que condicionan la vida a fatiga (Cui, 2002).

Organiza:

Clasificación de modelos de acumulación de daño y vida a fatiga

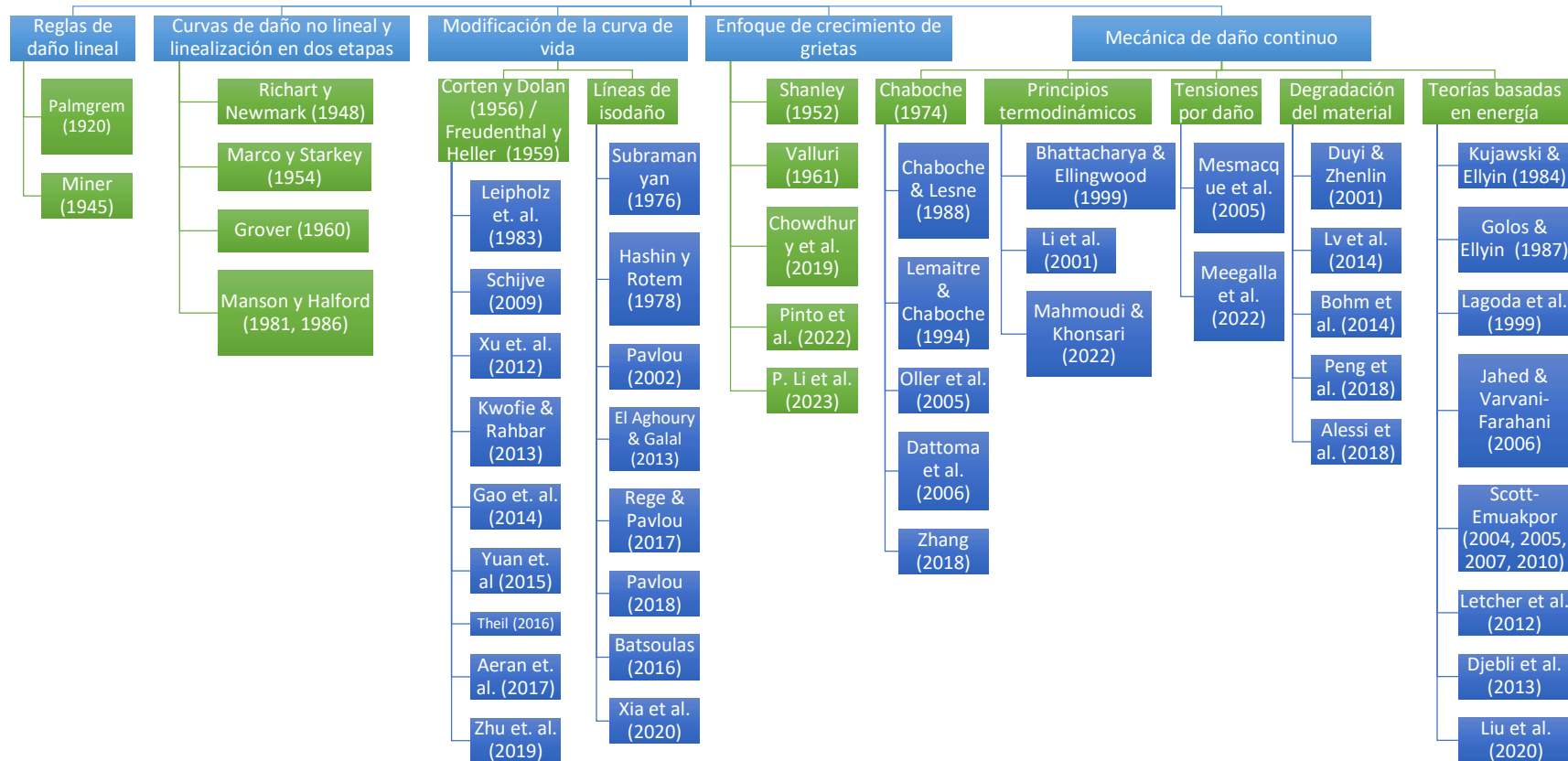


Figura 1 - Clasificación de los modelos

Organiza:

Maljaars & Euler (2021) presentaron un metaestudio donde se evaluaron miles de pruebas realizadas sobre uniones abulonadas. Se resalta la importancia de parámetros como el proceso de producción, la configuración de la unión, la relación de tensiones y la precarga.

En la guía 14.6 del Instituto Técnico de la Estructura de Acero, se distinguen dos casos de carga en uniones abulonadas: las uniones solicitadas a tracción, y las solicitadas a corte, además de la combinación de ambas. En las uniones a tracción, se analiza el efecto del pretensado y del emplazamiento del área de contacto. En el caso de las uniones a corte, se analiza la influencia de la pretensión.

Todas las variables que influyen en la resistencia a fatiga se resumen en la Figura 2 y, además, en la Figura 3 se clasifican según los autores que las han estudiado.

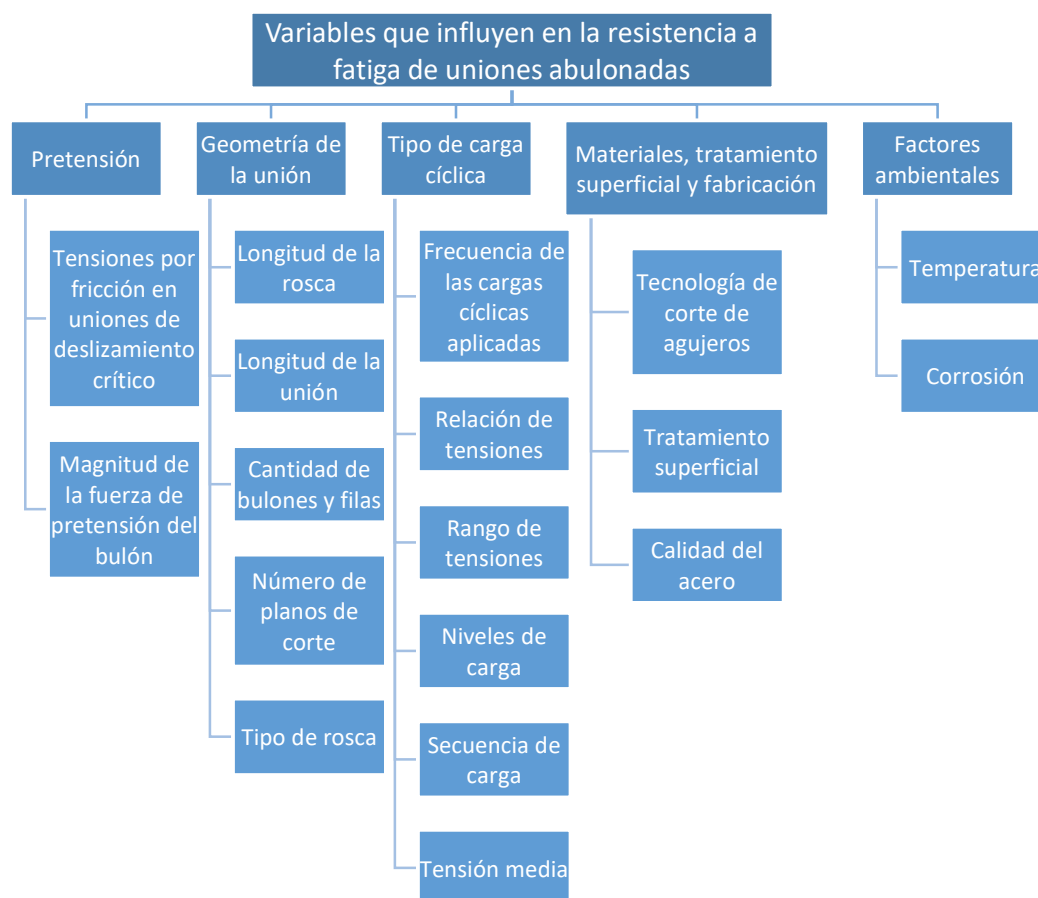


Figura 2 - Variables que influyen en la resistencia a fatiga de uniones abulonadas

Organiza:

Variables que influyen en la resistencia a fatiga de uniones abulonadas

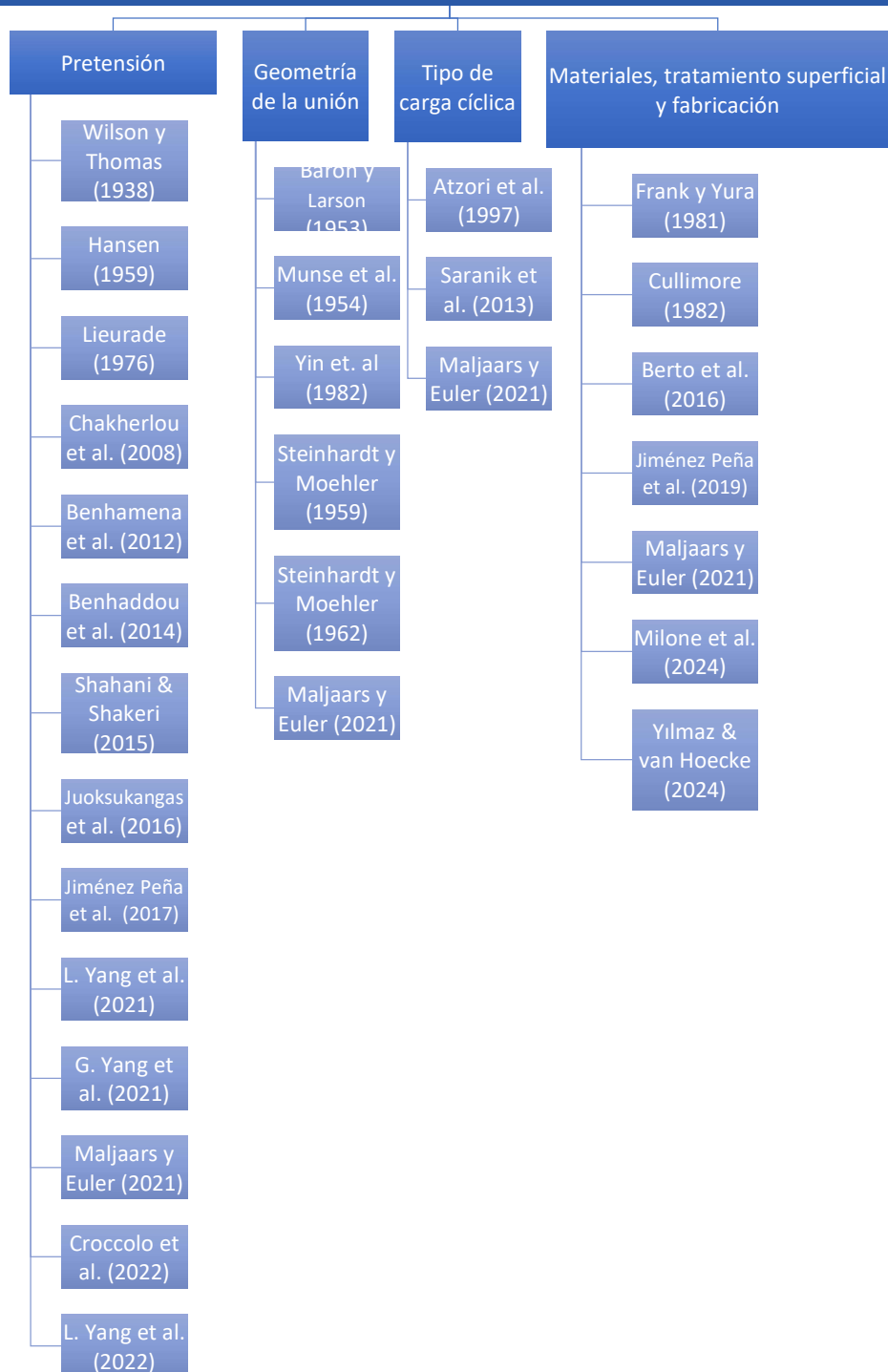


Figura 3 - Autores que estudiaron cada variable

Organiza:

Influencia de la pretensión

Wilson (1938) realizó por primera vez ensayos experimentales con el objetivo de evaluar la influencia de la pretensión en la vida a fatiga de uniones abulonadas.

Chakherlou et al. (2008) utilizaron métodos tanto experimentales como numéricos para investigar el comportamiento a fatiga de placas abulonadas de aleación de aluminio. Concluyeron que:

- Los resultados FEM predijeron la tensión tangencial neta alrededor del orificio en la placa abulonada debido al efecto de la fuerza de pretensión del bulón. Esa es la zona crítica, en términos de inicio y propagación de una grieta por fatiga. La magnitud de la tensión aumentó al aumentar la fuerza de pretensión.
- Las pruebas experimentales y los análisis FEM confirmaron que la resistencia a la fatiga de las placas abulonadas generalmente mejora sustancialmente utilizando pares de apriete más altos. La tensión de compresión en la placa, que resulta del apriete del bulón, ha reducido claramente el efecto neto de la dañina tensión de tracción longitudinal cíclica.
- Se encontró que la carga cíclica que produce un alto nivel de tensión, suficiente para causar una zona plástica y una gran contracción cerca del agujero, da como resultado una menor mejora en la vida por fatiga que a niveles más bajos. Se cree que esto se debe a la relajación de la fuerza de pretensión del bulón y la consecuente reducción de la tensión tangencial de compresión.
- Las grietas por fatiga se iniciaron en el borde de un agujero en las muestras pretensadas y luego se propagaron a través del espesor de la placa. La ubicación exacta del inicio de la grieta depende del nivel de la carga axial cíclica remota. Con cargas más pequeñas ocurrieron principalmente en la región del plano medio, y lejos del plano medio con cargas más grandes.
- Es deseable mantener los niveles de tensión alterna al mínimo en cualquier diseño de unión abulonada. Si la junta abulonada se somete a cargas cíclicas de gran magnitud, no habrá ninguna mejora significativa en la resistencia a la fatiga al aplicar un par elevado para apretar firmemente la junta. Sin embargo, si el nivel de cargas cíclicas no es alto, apretar los bulones tanto como sea posible mejora considerablemente la resistencia a la fatiga de la unión.

Benhaddou et al. (2014) presentaron un enfoque numérico para la determinación de la resistencia a la fatiga de uniones abulonadas precargadas, basado en la formulación de un criterio del plano crítico en el que la caracterización de la presión hidrostática y el esfuerzo cortante equivalente en el plano octaédrico crítico permite aproximar la vida a fatiga. Calcularon la vida a fatiga en cada punto del conjunto para determinar el sitio de inicio de la fatiga. Las simulaciones FE permitieron determinar el tensor de tensiones en cada punto de la estructura y fueron validadas en base a las corridas experimentales realizadas.

Shahani & Shakeri (2015) concluyeron que la precarga reduce el límite de fatiga de los bulones en una cantidad proporcional al aumento de la tensión media producida por la precarga. Sin embargo, más allá de un esfuerzo medio significativo, el límite de

Organiza:

resistencia aumenta también.

De acuerdo a Maljaars & Euler (2021), en la transmisión de carga de juntas a tope con doble cubierta influye si los bulones están precargados. Cuando existe precarga en los bulones de alta resistencia, las fuerzas se transmiten por fricción entre placas. El modo de falla asociado suele ser la fatiga por fricción en el extremo de la arandela o, en algún caso, en el extremo de las placas de cubierta. El procedimiento de precarga debe ser cuidadoso para que no se vea reducida la vida a fatiga.

Cuando en ese mismo tipo de juntas los bulones no están precargados, las fuerzas se transmiten por corte de los bulones y por el aplastamiento de las placas de cubierta. Los modos de falla pueden ser, por un lado, el inicio de grietas en el borde del agujero por una mayor concentración de tensiones, por eso se considera el rango de tensiones en la sección neta; por otro, la fatiga por corte de los bulones ajustados manualmente. En estos casos, existe una influencia muy grande de la ubicación del plano de corte. Por esta razón, en tales conexiones se deben evitar bulones con un plano de corte a través de la parte roscada.

Los bulones traccionados suelen estar pretensados, ya que esto reduce el rango de tensiones en ellos. El porcentaje de transmisión de fuerza a través del bulón depende de la rigidez y composición de la junta. Las placas deben nivelarse cuidadosamente para evitar efectos de palanca (Maljaars & Euler, 2021).

La fatiga por fricción es un proceso de daño por fatiga que ocurre cuando dos superficies en contacto entre sí están sujetas a un microdeslizamiento relativo, causando una vida de fatiga reducida con respecto al caso de fatiga simple. Esto se ha estudiado en profundidad durante más de cincuenta años, pero todavía no se ha aceptado universalmente ningún enfoque de diseño unívoco. La revisión hecha por Croccolo et al. (2022) presenta un estudio de la literatura que involucra los tres tipos principales de juntas mecánicas afectadas por la fatiga por fricción (entre ellas, las juntas abulonadas) con el objetivo de dar una idea del progreso realizado en términos de pautas de diseño para ingenieros. Concluyeron que aún se necesitan más investigaciones para la validación de todos los criterios identificados, ya que no se ha producido una descripción completa y universal de los efectos de la fatiga por fricción y el método de diseño.

Benhamena et al. (2012) estudiaron el efecto de las fuerzas de contacto sobre el comportamiento de fatiga por fricción de placas abulonadas. Llevaron a cabo experimentos de fatiga por fricción y simulación numérica con observaciones y análisis en elementos finitos, microscopía de barrido electrónico y espectroscopía de energía dispersada. Concluyeron que las fuerzas de contacto cambian significativamente el comportamiento a fatiga. Los resultados experimentales y numéricos y las observaciones y análisis micrográficos mostraron que el mecanismo de fatiga por fricción depende de la tensión local (tensión de contacto por fricción, tensión de corte, tensión normal) y del desplazamiento relativo. La vida a fatiga por fricción aumenta cuando aumenta la fuerza de contacto. Este aumento de la vida a fatiga por fricción podría atribuirse a la transferencia del mecanismo de iniciación de la grieta y al cambio de la zona de adhesión.

Organiza:

En uniones solicitadas a tracción, de acuerdo a la guía 14.6 del ITEA, el pretensado reduce la desviación de las fuerzas en los bulones y puede evitar el agotamiento por fatiga de los mismos. Para ello, el pretensado debe ser mayor que la carga de tracción externa. Pero con este pretensado no es suficiente, también debe analizarse el emplazamiento del área de contacto para que sea favorable. En general, esto se consigue cuando el área de contacto se ubica lo más cerca posible de los componentes en los que está actuando la fuerza de tracción. Cuando la unión está solicitada a corte, cualquier deslizamiento de la unión debido a una carga extrema puede reducir el coeficiente de fricción, por lo que el pretensado debe establecerse en base al caso de carga extrema máxima. Cuando la unión está cargada a tracción, una carga excesiva que cancele las fuerzas de contacto producirá una desviación de las fuerzas en el bulón, esto por sí mismo no genera fisuras por fatiga, pero puede reducir el pretensado debido a la fluencia local y la deformación plástica del bulón, o de las áreas de contacto.

Juoksukangas et al. (2016) desarrollaron un sistema de prueba para estudiar el efecto de diferentes parámetros operativos y de diseño de una sola unión abulonada sobre la vida a fatiga por fricción. Se realizaron pruebas de vida útil por fatiga por fricción para investigar, en particular, el efecto de la precarga del bulón y la carga masiva cíclica sobre la vida por fatiga. La vida a fatiga por fricción disminuyó al aumentar la precarga y también al aumentar la tensión volumétrica. Se aplicó el método de correlación de imagen digital para medir desplazamientos tangenciales cercanos al contacto. Se utilizó un modelo de elementos finitos para analizar las variables de contacto con mayor detalle. Los resultados numéricos se correspondieron bien con los resultados experimentales.

En su estudio, Carlos Jiménez-Peña et al. (2017) utilizaron una configuración experimental de unión abulonada traslapada simple para investigar el efecto de la carga de pretensión en el mecanismo de falla por fatiga por fricción de conexiones abulonadas hechas de acero de alta resistencia (HSS). El material utilizado fue HSS 500MC (acero para herramientas de alta aleación). Los resultados experimentales revelaron que un aumento en la fuerza de pretensión mejora significativamente la vida a fatiga de la conexión. La falla por fatiga por fricción fue el mecanismo de falla dominante. Se construyó un modelo 3D-FEA representativo para estudiar cuatro criterios de fatiga por fricción, en la interfaz de contacto. Los resultados numéricos y experimentales muestran que la pretensión afecta el tamaño de la región de adherencia y la ubicación de la concentración de tensión. Además, se aplicaron varios criterios multiaxiales para predecir la posible ubicación de la grieta inicial. Una minuciosa comparación de los resultados numéricos y la región de grieta inicial obtenida experimentalmente permitió evaluar la precisión de los criterios propuestos. Se muestra que sólo el parámetro daño por fatiga por fricción fue capaz de reflejar adecuadamente el efecto beneficioso del aumento de la carga de pretensión sobre la vida a fatiga por fricción.

Cuando se aplican cargas axiales y transversales simultáneamente, la carga transversal agrava la fatiga del bulón, mientras que la carga axial tiene un impacto significativo en el aflojamiento del bulón. Los bulones normalmente se aflojan antes

Organiza:

de la fractura por fatiga; sin embargo, bajo una carga axial grande, también existe una condición en la que no se produce un aflojamiento evidente y el bulón experimenta directamente una fractura por fatiga. El proceso de aflojamiento de los bulones va acompañado de la acumulación de daños por fatiga; por lo tanto, el aflojamiento de los bulones y la fatiga no son procesos independientes. L. Yang et al. (2021) investigaron sobre el aflojamiento de bulones y la fatiga bajo cargas combinadas.

En el estudio de G. Yang et al. (2021) se analizó la relación de falla competitiva entre el aflojamiento de bulones y la fatiga bajo excitación compuesta a través de pruebas bajo diferentes precargas. Los resultados indicaron que el modo de falla del bulón solo está relacionado con la relación de carga y no está relacionado con la precarga inicial y la amplitud de excitación, que solo determinan la vida útil del bulón. Las pequeñas cargas axiales de la excitación compuesta pueden limitar la falla del bulón, y el grado significativo de este efecto de restricción es diferente para diferentes precargas. Posteriormente, se realizó un análisis de fractura del bulón para verificar la relación de falla competitiva del bulón desde una perspectiva microscópica, y se determinó el mecanismo de falla. Propusieron una ecuación de cálculo para la precarga óptima de bulones de alta resistencia de grado 8,8.

L. Yang et al. (2022) establecieron un método numérico para calcular la carga crítica en el bulón bajo excitación combinada, al analizar la fuerza en la superficie de la rosca. Realizaron experimentos y el cálculo numérico de la carga crítica. Estudiaron la influencia de los parámetros de la estructura del bulón en la relación de carga crítica.

Influencia de la geometría de la unión

De acuerdo a las investigaciones de Munse et al. (1954) y Baron y Larson (1953) la longitud roscada de un bulón no tiene influencia significativa en la vida a fatiga de los bulones precargados.

Los estudios de Yin et al. (1982) y Steinhardt y Moehler (1962) concluyeron que el efecto sobre la vida a fatiga provocado por la variación de la longitud de la unión no era sustancial.

En el trabajo de recopilación de Maljaars & Euler (2021) se informa que la resistencia a la fatiga se reduce a medida que aumenta el número de filas de bulones, ya que la transferencia de fuerza por fricción cerca de la primera fila de bulones es mayor que cerca de las demás. Estas conexiones suelen estar diseñadas para resistir el deslizamiento bajo cargas estáticas, pero en el caso de fatiga la primera fila de bulones es crítica en cuanto a la fuerza de deslizamiento y a la transmisión de carga. Entonces, los requerimientos para fatiga suelen ser más estrictos en conexiones con gran cantidad de filas de bulones.

Por otro lado, en el mismo artículo se menciona que las conexiones traslapadas simples, al tener un único plano de corte, tienen una menor resistencia a la fatiga que las uniones a tope con doble cubierta, debido a la distribución asimétrica de la fuerza. Las conexiones simples se suelen aplicar cuando se conecta sólo un elemento de la sección transversal, y eso genera concentraciones de tensiones específicas según el Organiza:

caso.

En referencia al tipo de rosca, los bulones cargados a tracción generalmente fallan en la primera rosca de la tuerca, a veces en el cuello de la cabeza del bulón y, eventualmente, en la primera rosca adyacente al vástago sin rosca. La forma de la rosca determina la concentración de tensiones del modo de falla dominante. Una de las consecuencias es que los bulones con rosca fina tienen una resistencia a la fatiga diferente a la de los bulones con rosca gruesa. Las estructuras de ingeniería civil utilizan casi exclusivamente bulones con rosca gruesa métrica ISO (Maljaars & Euler, 2021).

Influencia del tipo de carga cíclica

Este es uno de los aspectos que más influye en el comportamiento a fatiga de las uniones abulonadas (Zampieri et al., 2019). Se define por el rango de tensiones, la tensión media y la secuencia de tensiones a la que está solicitada la unión.

Respecto al rango de tensiones, en uniones con dos planos de corte y pares de apriete elevados investigadas por Chakherlou et al. (2011), cuando se aplicaron tensiones cíclicas bajas, las grietas por fatiga comenzaron a alejarse del orificio y se descubrió que la causa de la falla se debía a la fatiga por fricción. Por el contrario, ante tensiones cíclicas elevadas, todas las uniones fallaron en el borde del agujero y las grietas de fatiga se nuclearon en el borde del agujero debido a la alta concentración de tensiones en el borde como resultado de la reacción de soporte del vástago del bulón en el agujero. Por otro lado, con pares de apriete bajos aplicados en la junta, todas las muestras fallaron en el borde del agujero y las grietas comenzaron también en el borde del agujero.

La relación de tensiones R es el cociente entre la tensión mínima y la tensión máxima, y varía generalmente entre -1 y 1. Atzori et al. (1997) en su investigación sobre uniones abulonadas de empalme a tope de aluminio tipo cojinete y fricción, concluyeron que la resistencia media a la fatiga depende de la relación R , siendo mayor cuando $R = -1$ respecto al caso $R = 0$. Por otro lado, para juntas de tipo fricción ensayadas bajo $R = -1$, la dispersión es bastante pronunciada y por lo tanto podría ser aceptable usar la curva de fatiga $R = 0$ en el diseño, considerando que esta elección sería conservadora.

La relación de tensiones en la mayoría de las estructuras prácticas de ingeniería civil varía de muy baja a muy alta. Sin embargo, para relaciones de tensión muy altas, como $R > 0,5$, la resistencia estática suele ser decisiva para las calidades de acero con un límite elástico nominal menor a 600 MPa y los tipos de estructuras usados en ingeniería civil (Maljaars & Euler, 2021).

En bulones traccionados, los datos de los bulones con una tensión media baja dan en promedio una vida de fatiga más larga pero también más dispersa en comparación con los bulones con una tensión media alta. La mayor dispersión se atribuye a efectos de imperfecciones. Las mediciones de deformación en bulones con una precarga baja demuestran que el rango de tensión no es igual alrededor del perímetro del bulón si ese bulón está ligeramente torcido (Maljaars & Euler, 2021).

Organiza:

Saranik et al. (2013) llevaron a cabo un estudio experimental para desarrollar un modelo para predecir la vida de fatiga de bajo ciclo de la conexión abulonada. Los especímenes de prueba eran vigas en voladizo con un extremo fijado por una conexión abulonada y el otro extremo libre. Cada viga en voladizo estaba sujeta a una masa en el extremo libre. Se aplicaron diferentes niveles de carga cíclica al sistema de vigas por medio de un vibrador. Además, se realizó un análisis numérico para estudiar la incertidumbre del modelo experimental y predecir la dispersión de la vida útil de la conexión abulonada.

Influencia de materiales, tratamiento superficial y fabricación

El procedimiento usado en la realización de agujeros es un factor esencial en la evaluación de la resistencia a la fatiga de uniones abulonadas, ya que diferentes técnicas producen diferentes calidades superficiales y tensiones residuales, lo que en consecuencia impacta el límite de fatiga final. El trabajo de C. Jiménez-Peña et al. (2019) aborda el efecto de las principales técnicas de corte mecánico (punzonado, taladrado y chorro de agua) y térmico (plasma y láser) sobre el comportamiento a fatiga de placas de acero de alta resistencia que contienen agujeros. Se estudiaron mediante evaluación óptica, pruebas de dureza y evaluación de rugosidad la superficie, la geometría y el daño residual de cada procedimiento de perforación, y se observaron grandes diferencias: se encontró que el taladrado produce un agujero geométricamente más preciso y un acabado superficial más suave; mientras que el corte por láser y la técnica de corte por chorro de agua mostraron el mejor rendimiento ante la fatiga.

Zampieri et al. (2019) concluyeron que las normas no habían incorporado los resultados obtenidos referidos a la influencia de las tecnologías de corte en la vida a fatiga.

Luego, los resultados informados en Maljaars & Euler (2021) fueron incorporados en la norma europea EN 1993-1-9. En este trabajo se informa que la resistencia a la fatiga de las placas con agujeros depende del método de formación de los agujeros. Se distinguen tres métodos:

- Orificios perforados o escariados según cualquiera de los dos métodos siguientes. Las grietas se inician en el orificio, cerca del centro del espesor de la placa para placas gruesas o en la superficie de la placa en las placas delgadas.
- Orificios cortados térmicamente (oxicorte, plasma o láser). Estos tres métodos parecen dar un rendimiento de fatiga similar. La dureza Vickers estuvo generalmente por debajo de 400 HV5.
- Agujeros perforados. Las grietas se inician en el orificio de la superficie de la placa.

Las placas con orificios cortados con chorro de agua rara vez se aplican en estructuras de ingeniería civil.

Yilmaz & van Hoecke (2024) llevaron a cabo una serie de experimentos de fatiga en

Organiza:

grados de acero con límites elásticos de 700 a 960 MPa utilizando muestras cargadas axialmente con un orificio fabricado mediante punzonado y corte por láser, luego realizaron pruebas adicionales bajo carga de flexión de cuatro puntos para centrarse en bordes planos mecanizados mediante corte y fresado por láser. Concluyeron que para ciclos altos y vidas de fatiga infinita, los grados probados fueron superiores a las curvas de diseño típicas cuando los orificios se perforaron con poca holgura o se cortaron con láser.

En referencia al tratamiento superficial, la durabilidad de las uniones estructurales está fuertemente influenciada por el grado de corrosión encontrado en las condiciones operativas de servicio y por el ambiente externo o factores agresivos. El deterioro debido a la corrosión suele provocar rigidez de los elementos de fijación y fallos prematuros, en forma de fatiga por corrosión. Por lo tanto, una protección adecuada de las uniones abulonadas es de suma importancia si la integridad general de una estructura se considera un punto clave en el diseño. Berto et al. (2016) investigaron el efecto de un revestimiento galvanizado sobre la resistencia a la fatiga del acero estructural S355, y concluyeron que la reducción de la vida útil a la fatiga es muy limitada en comparación con la de las juntas sin revestimiento. También proporcionaron un procedimiento detallado para la preparación precisa de las probetas, mostrando una buena repetibilidad en el montaje de las probetas y luego en el comportamiento final a fatiga.

Milone et al. (2024) concluyeron en su estudio que la resistencia a la fatiga característica de las piezas abulonadas de alta resistencia investigadas superior a la sugerida en las normas (EN 1993-1-9 Eurocode 3. Design of steel structures—part 1-9: fatigue) en condiciones originales, mientras que para las muestras recubiertas y granalladas investigadas es 6 % menor debido a la galvanización. Sin embargo, el proceso de galvanización en caliente puede dar como resultado una resistencia a la fatiga mayor respecto a juntas desprotegidas expuestas a ambientes agresivos.

Con respecto a la calidad del acero, la resistencia a la fatiga puede beneficiarse de una alta calidad de acero en material simple y conexiones fijadas mecánicamente en aplicaciones prácticas, siempre que la superficie de la muestra sea relativamente lisa. Dado el tratamiento de los materiales durante la construcción y el uso, no siempre se puede garantizar que un producto inicialmente liso permanezca liso durante toda su vida sin disposiciones especiales. La mayoría de las estructuras de ingeniería civil se construyen actualmente con calidades de acero con un límite elástico nominal inferior a 500 MPa. Los bulones son la excepción, para los cuales se han considerado grados hasta 10,9 (límite elástico nominal de 900 MPa). Se han reportado diferentes observaciones sobre la influencia de la capa de zinc en acero galvanizado en caliente, una razón es el espesor de la capa de zinc. (Maljaars & Euler, 2021).

Organiza:

CONCLUSIONES

Se ha realizado una recopilación de investigaciones que contribuyen al estado de conocimiento actual sobre modelos de acumulación de daño y vida a fatiga, particularmente la fatiga de uniones abulonadas de estructuras metálicas.

Se clasificaron y analizaron las variables que influyen en la resistencia a fatiga de uniones abulonadas, como la pretensión, la geometría de la unión, el tipo de carga cíclica, el material, el tratamiento superficial y los procesos de fabricación.

Existen diferencias en la resistencia a fatiga en función de las sollicitaciones sobre la unión: a corte, a tracción, o combinadas, por lo que se debería realizar una clasificación general previa en función de esa variable.

El trabajo realizado permite aclarar el estado de conocimiento actual para poder definir nuevas líneas de investigación, a partir de la selección de variables y parámetros significativos para el estudio de las uniones de estructuras metálicas bajo cargas de altos ciclos, así como el rango de análisis de cada uno.

Los trabajos analizados abarcan diferentes materiales, por lo que debería acotarse la investigación a aceros de uso estructural en ingeniería civil, utilizados en Argentina.

BIBLIOGRAFÍA

Aeran, A., Siriwardane, S. C., Mikkelsen, O., & Langen, I. (2017). A new nonlinear fatigue damage model based only on S-N curve parameters. *International Journal of Fatigue*, 103, 327–341. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.06.017>

Alessi, R., Vidoli, S., & De Lorenzis, L. (2018). A phenomenological approach to fatigue with a variational phase-field model: The one-dimensional case. *Engineering Fracture Mechanics*, 190, 53–73. <https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACMECH.2017.11.036>

Atzori, B., Lazzarin, P., & Quaresimin, M. (1997). A re-analysis on fatigue data of aluminium alloy bolted joints. *International Journal of Fatigue*, 19(7), 579–588. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(97\)00065-0](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(97)00065-0)

Batsoulas, N. D. (2016). Cumulative Fatigue Damage: CDM-Based Engineering Rule and Life Prediction Aspect. *Steel Research International*, 87(12), 1670–1677. <https://doi.org/10.1002/srin.201600048>

Benhaddou, T., Chirol, C., Daidie, A., Guillot, J., Stephan, P., & Tuery, J.-B. (2014). Pre-tensioning effect on fatigue life of bolted shear joints. *Aerospace Science and Technology*, 36, 36–43. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2014.03.003>

Benhamena, A., Amrouche, A., Talha, A., & Benseddig, N. (2012). Effect of contact forces on fretting fatigue behavior of bolted plates: Numerical and experimental analysis. *Tribology International*, 48, 237–245. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2011.12.008>

Organiza:

Berto, F., Mutignani, F., & Guido, E. (2016). Effect of hot dip galvanization on the fatigue behaviour of steel bolted connections. *International Journal of Fatigue*, 93, 168–172. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.08.022>

Bhattacharya, B., & Ellingwood, B. (1999). A new CDM-based approach to structural deterioration. *International Journal of Solids and Structures*, 36(12), 1757–1779. [https://doi.org/10.1016/S0020-7683\(98\)00057-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7683(98)00057-2)

Böhm, E., Kurek, M., Junak, G., Cieśla, M., & Łagoda, T. (2014). Accumulation of Fatigue Damage Using Memory of the Material. *Procedia Materials Science*, 3, 2–7. <https://doi.org/10.1016/J.MSPRO.2014.06.002>

Chaboche, J. L. (1974). Differential Fatigue Damage Law with Nonlinear Cumulation. | UNE LOI DIFFERENTIELLE D'ENDOMMAGEMENT DE FATIGUE AVEC CUMULATION NON LINEAIRE. *RFM, Revue Francaise de Mecanique*, 50–51, 71–82.

Chaboche, J. L., & Lesne, P. M. (1988). A NON-LINEAR CONTINUOUS FATIGUE DAMAGE MODEL. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 11(1), 1–17. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.1988.tb01216.x>

Chakherlou, T. N., Oskouei, R. H., & Vogwell, J. (2008). Experimental and numerical investigation of the effect of clamping force on the fatigue behaviour of bolted plates. *Engineering Failure Analysis*, 15(5), 563–574. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2007.04.009>

Chakherlou, T. N., Razavi, M. J., Aghdam, A. B., & Abazadeh, B. (2011). An experimental investigation of the bolt clamping force and friction effect on the fatigue behavior of aluminum alloy 2024-T3 double shear lap joint. *Materials & Design*, 32(8–9), 4641–4649. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2011.04.022>

Chowdhury, S., Deeb, M., & Zabel, V. (2019). Effects of parameter estimation techniques and uncertainty on the selection of fatigue crack growth model. *Structures*, 19, 128–142. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.11.018>

Croccolo, D., De Agostinis, M., Fini, S., Olmi, G., Robusto, F., & Scapecchi, C. (2022). Fretting Fatigue in Mechanical Joints: A Literature Review. *Lubricants*, 10(4). <https://doi.org/10.3390/lubricants10040053>

Cui, W. (2002). A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures. *Journal of Marine Science and Technology*, 7(1), 43–56. <https://doi.org/10.1007/s007730200012>

Dattoma, V., Giancane, S., Nobile, R., & Panella, F. W. (2006). Fatigue life prediction under variable loading based on a new non-linear continuum damage mechanics model. *International Journal of Fatigue*, 28(2), 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.05.001>

Djebli, A., Aid, A., Bendouba, M., Amrouche, A., Benguediab, M., & Benseddig, N. (2013). A non-linear energy model of fatigue damage accumulation and its verification for Al-2024 aluminum alloy. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 51, 145–

Organiza:

151. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2013.01.007>

Duyi, Y., & Zhenlin, W. (2001). A new approach to low-cycle fatigue damage based on exhaustion of static toughness and dissipation of cyclic plastic strain energy during fatigue. *International Journal of Fatigue*, 23(8), 679–687. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00027-5](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00027-5)

El Aghoury, I., & Galal, K. (2013). A fatigue stress-life damage accumulation model for variable amplitude fatigue loading based on virtual target life. *Engineering Structures*, 52, 621–628. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.03.001>

Fatemi, A., & Yang, L. (1998). Cumulative fatigue damage and life prediction theories: a survey of the state of the art for homogeneous materials. *International Journal of Fatigue*, 20(1), 9–34. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(97\)00081-9](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(97)00081-9)

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>

Gao, H., Huang, H.-Z., Zhu, S.-P., Li, Y.-F., & Yuan, R. (2014). A modified nonlinear damage accumulation model for fatigue life prediction considering load interaction effects. *The Scientific World Journal*, 2014. <https://doi.org/10.1155/2014/164378>

Golos, K., & Ellyin, F. (1987). Generalization of cumulative damage criterion to multilevel cyclic loading. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 7(3), 169–176. [https://doi.org/10.1016/0167-8442\(87\)90032-2](https://doi.org/10.1016/0167-8442(87)90032-2)

Hashin, Z., & Rotem, A. (1978). A cumulative damage theory of fatigue failure. *Materials Science and Engineering*, 34(2), 147–160. [https://doi.org/10.1016/0025-5416\(78\)90045-9](https://doi.org/10.1016/0025-5416(78)90045-9)

Hectors, K., & De Waele, W. (2021). Cumulative damage and life prediction models for high-cycle fatigue of metals: A review. *Metals*, 11(2), 1–32. <https://doi.org/10.3390/met11020204>

Jahed, H., & Varvani-Farahani, A. (2006). Upper and lower fatigue life limits model using energy-based fatigue properties. *International Journal of Fatigue*, 28(5), 467–473. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2005.07.039>

Jiménez-Peña, C., Goulas, C., Rossi, B., & Debruyne, D. (2019). Influence of hole-making procedures on fatigue behaviour of high strength steel plates. *Journal of Constructional Steel Research*, 158, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.03.005>

Jiménez-Peña, Carlos, H. Talemi, R., Rossi, B., & Debruyne, D. (2017). Investigations on the fretting fatigue failure mechanism of bolted joints in high strength steel subjected to different levels of pre-tension. *Tribology International*, 108, 128–140. <https://doi.org/10.1016/J.TRIBOINT.2016.11.014>

Juliá Lerma, J. M. (2019). Estudio experimental de la vida a fatiga en uniones atornilladas.

Juoksukangas, J., Lehtovaara, A., & Mäntylä, A. (2016). Experimental and

Organiza:

numerical investigation of fretting fatigue behavior in bolted joints. *Tribology International*, 103, 440–448. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.07.021>

Kujawski, D., & Ellyin, F. (1984). A cumulative damage theory for fatigue crack initiation and propagation. *International Journal of Fatigue*, 6(2), 83–88. [https://doi.org/10.1016/0142-1123\(84\)90017-3](https://doi.org/10.1016/0142-1123(84)90017-3)

Kwofie, S., & Rahbar, N. (2013). A fatigue driving stress approach to damage and life prediction under variable amplitude loading. *International Journal of Damage Mechanics*, 22(3), 393–404. <https://doi.org/10.1177/1056789512449638>

Lagoda, T., Macha, E., & Będkowski, W. X. (1999). A critical plane approach based on energy concepts: application to biaxial random tension-compression high-cycle fatigue regime. *International Journal of Fatigue*, 21(5), 431–443. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00003-1](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00003-1)

Leipholz, H. H. E., Topper, T., & El Menoufy, M. (1983). Lifetime prediction for metallic components subjected to stochastic loading. *Computers & Structures*, 16(1–4), 499–507. [https://doi.org/10.1016/0045-7949\(83\)90190-6](https://doi.org/10.1016/0045-7949(83)90190-6)

Letcher, T., Shen, M.-H. H., Scott-Emuakpor, O., George, T., & Cross, C. (2012). An energy-based critical fatigue life prediction method for AL6061-T6. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 35(9), 861–870. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2011.01669.x>

Li, P., Li, W., Li, B., Yang, S., Shen, Y., Wang, Q., & Zhou, K. (2023). A review on phase field models for fracture and fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109419>

Li, Z. X., Chan, T. H. T., & Ko, J. M. (2001). Fatigue damage model for bridge under traffic loading: application made to Tsing Ma Bridge. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 35(1), 81–91. [https://doi.org/10.1016/S0167-8442\(00\)00051-3](https://doi.org/10.1016/S0167-8442(00)00051-3)

Lv, Z., Huang, H.-Z., Zhu, S.-P., Gao, H., & Zuo, F. (2014). A modified nonlinear fatigue damage accumulation model. *International Journal of Damage Mechanics*, 24(2), 168–181. <https://doi.org/10.1177/1056789514524075>

Mahmoudi, A., & Khonsari, M. M. (2022). Investigation of metal fatigue using a coupled entropy-kinetic model. *International Journal of Fatigue*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106907>

Maljaars, J., & Euler, M. (2021). Fatigue S-N curves of bolts and bolted connections for application in civil engineering structures. *International Journal of Fatigue*, 151. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106355>

Manson, S. S., & Halford, G. R. (1981). Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage. *International Journal of Fracture*, 17(2), 169–192. <https://doi.org/10.1007/BF00053519>

Manson, S. S., & Halford, G. R. (1986). Re-examination of cumulative fatigue damage analysis—an engineering perspective. *Engineering Fracture Mechanics*, 25(5–6), 539–571. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(86\)90022-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(86)90022-6)

Organiza:

Meegalla, M. A. V. S. G., Saparamadu, P. V. D. P. L., Wijayarathna, I. M. U. I., Pallewatta, T. M., & Karunananda, P. A. K. (2022). Modification of Sequential Law for Fatigue Damage Assessment of Steel Structures Based on the Length of Stress/Strain Life Curves. In Lecture Notes in Civil Engineering (Vol. 174). https://doi.org/10.1007/978-981-16-4412-2_25

Mesmacque, G., Garcia, S., Amrouche, A., & Rubio-Gonzalez, C. (2005). Sequential law in multiaxial fatigue, a new damage indicator. *International Journal of Fatigue*, 27(4), 461–467. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2004.08.005>

Milone, A., Foti, P., Viespoli, L. M., Wan, D., Mutignani, F., Landolfo, R., & Berto, F. (2024). Influence of hot-dip galvanization on the fatigue performance of high-strength bolted connections. *Engineering Structures*, 299, 117136. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117136>

Oller, S., Salomón, O., & Oñate, E. (2005). A continuum mechanics model for mechanical fatigue analysis. *Computational Materials Science*, 32(2), 175–195. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2004.08.001>

Pavlou, D. G. (2002). A phenomenological fatigue damage accumulation rule based on hardness increasing, for the 2024-T42 aluminum. *Engineering Structures*, 24(11), 1363–1368. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(02\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(02)00055-X)

Pavlou, D. G. (2018). The theory of the S-N fatigue damage envelope: Generalization of linear, double-linear, and non-linear fatigue damage models. *International Journal of Fatigue*, 110, 204–214. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.01.023>

Peng, Z., Huang, H.-Z., Zhou, J., & Li, Y.-F. (2018). A New Cumulative Fatigue Damage Rule Based on Dynamic Residual S-N Curve and Material Memory Concept. In *Metals* (Vol. 8, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/met8060456>

Pinto, A. L., Cardoso, R. A., Talemi, R., & Araújo, J. A. (2022). Early crack orientation prediction methods under fretting fatigue loading including wear effects. *International Journal of Fatigue*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2022.106893>

Rege, K., & Pavlou, D. G. (2017). A one-parameter nonlinear fatigue damage accumulation model. *International Journal of Fatigue*, 98, 234–246. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.01.039>

Saranik, M., Jézéquel, L., & Lenoir, D. (2013). Experimental and Numerical Study for Fatigue Life Prediction of Bolted Connection. *Procedia Engineering*, 66, 354–368. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2013.12.090>

Schijve, J. (2009). Fatigue of structures and materials. In *Fatigue of Structures and Materials*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6808-9>

Schütz, W. (1996). A history of fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*, 54(2), 263–300. [https://doi.org/10.1016/0013-7944\(95\)00178-6](https://doi.org/10.1016/0013-7944(95)00178-6)

Scott-Emuakpor, O. E. (2007). Development of a novel energy-based method for multi-axial fatigue strength assessment. The Ohio State University.

Organiza:

Scott-Emuakpor, O., George, T., Cross, C., & Shen, M.-H. H. (2010). Multi-axial fatigue-life prediction via a strain-energy method. *AIAA Journal*, 48(1), 63–72. <https://doi.org/10.2514/1.39296>

Scott-Emuakpor, Onome, Shen, M.-H. H., Cross, C., Calcaterra, J., & George, T. (2005). A Promising New Energy-Based Fatigue Life Prediction Framework (pp. 397–404). <https://doi.org/10.1115/GT2005-68423>

Scott-Emuakpor, Onome, Shen, M.-H. H., George, T., Cross, C. J., & Calcaterra, J. (2004). Development of an Improved High Cycle Fatigue Criterion. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 129(1), 162–169. <https://doi.org/10.1115/1.2360599>

Shahani, A. R., & Shakeri, I. (2015). Experimental evaluation of the effect of preload on the fatigue life of bolts. *International Journal of Steel Structures*, 15(3), 693–701. <https://doi.org/10.1007/s13296-015-9015-5>

Subramanyan, S. (1976). CUMULATIVE DAMAGE RULE BASED ON THE KNEE POINT OF THE S-N CURVE. *American Society of Mechanical Engineers (Paper)*, 76-Mat-E.

Theil, N. (2016). Fatigue life prediction method for the practical engineering use taking in account the effect of the overload blocks. *International Journal of Fatigue*, 90, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.04.006>

Wilson, M. (1938). Fatigue tests of riveted joints. *Bull. Eng. Exp. Stat.*, 302.

Xi, L., & Songlin, Z. (2009). Changes in mechanical properties of vehicle components after strengthening under low-amplitude loads below the fatigue limit. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 32(10), 847–855. <https://doi.org/10.1111/j.1460-2695.2009.01391.x>

Xia, F.-L., Zhu, S.-P., Liao, D., Dantas, R., Correia, J. A. F. O., & De Jesus, A. M. P. (2020). Isodamage curve-based fatigue damage accumulation model considering the exhaustion of static toughness. *Engineering Failure Analysis*, 115. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104575>

Xu, J., Shang, D.-G., Sun, G.-Q., Chen, H., & Liu, E.-T. (2012). Fatigue life prediction for GH4169 superalloy under multiaxial variable amplitude loading. *Beijing Gongye Daxue Xuebao/Journal of Beijing University of Technology*, 38(10), 1462–1466.

Yang, G., Yang, L., Chen, J., Xiao, S., & Jiang, S. (2021). Competitive Failure of Bolt Loosening and Fatigue under Different Preloads. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 34(1), 141. <https://doi.org/10.1186/s10033-021-00663-3>

Yang, L., Yang, B., Yang, G., Xiao, S., Zhu, T., & Jiang, S. (2022). Critical-load calculation method of bolt competitive failure under composite excitation. *International Journal of Fatigue*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106660>

Yang, L., Yang, B., Yang, G., Xu, Y., Xiao, S., Jiang, S., & Chen, J. (2021). Analysis of competitive failure life of bolt loosening and fatigue. *Engineering Failure Analysis*, 129. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105697>

Organiza:

Yilmaz, O., & van Hoecke, D. (2024). Hole-making and cutting effects on fatigue performance of ultra high strength steels. *Procedia Structural Integrity*, 57, 420–427. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.03.045>

Yuan, R., Li, H., Huang, H.-Z., Zhu, S.-P., & Gao, H. (2015). A nonlinear fatigue damage accumulation model considering strength degradation and its applications to fatigue reliability analysis. *International Journal of Damage Mechanics*, 24(5), 646–662. <https://doi.org/10.1177/1056789514544228>

Zampieri, P., Curtarello, A., Maiorana, E., & Pellegrino, C. (2019). A Review of the Fatigue Strength of Shear Bolted Connections. *International Journal of Steel Structures*, 19(4), 1084–1098. <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0189-5>

Zhang, J., Fu, X., Lin, J., Liu, Z., Liu, N., & Wu, B. (2018). Study on damage accumulation and life prediction with loads below fatigue limit based on a modified nonlinear model. *Materials*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/ma11112298>

Zhu, S.-P., Hao, Y.-Z., de Oliveira Correia, J. A. F., Lesiuk, G., & de Jesus, A. M. P. (2019). Nonlinear fatigue damage accumulation and life prediction of metals: A comparative study. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 42(6), 1271–1282. <https://doi.org/10.1111/ffe.12937>

Organiza: