

Estudio de Casos Reportados en la Literatura Sobre Análisis de Falla en Pernos Usados como
Elementos de Fijación en Válvulas de Acero Bridadas

Sara Sofía Mejía Ortiz

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Metalúrgica

Directora

Ana María Pérez Ceballos

Doctora en Ingeniería

Codirector

Mauricio Rincón Ortiz

Doctor en Ciencia y Tecnología de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A mi mamá, por todo su amor y apoyo incondicional, por ser mi mayor motivación para siempre seguir, por darme las bases para ser lo que soy hoy en día y por su compañía en todo este proceso, por motivarme a superarme y siempre ser mejor.

A mi papá, que, aunque ya no está físicamente, vive en mi corazón, siempre fue mi mayor apoyo en cada idea y ocurrencia, por siempre motivarme a ser profesional, por cuidarme y darme lo mejor de sí en el tiempo que me acompaño.

A mi hermana Luisa, por ser mi compañera de vida, llenar mis días de felicidad, enseñarme una forma diferente de ver la vida y siempre brindarme su amor incondicional.

A mi abuela Otilia, por impartirme el valor de trabajo, siempre darme su apoyo, amor y compañía durante todos estos años de vida, por enseñarme el valor de la vida.

A mi tía Paty, por siempre cuidarme y estar pendiente de mí, por brindarme enseñanzas para mi crecimiento personal e intelectual y por su apoyo y amor incondicional.

A mi tía Laura, Gabriela, Jerónimo y Darlyng, por siempre darme amor, acogerme, darme felicidad, por apoyarme y brindarme experiencias en mi crecimiento como persona.

A mis demás familiares por estar ahí y brindarme su apoyo.

A mi novio Cristian, por estar para mí, ser un gran apoyo, brindarme su amor, hacerme feliz, aportarme conocimiento para mi crecimiento profesional y como persona y por motivarme a ser mejor y superarme.

A mi amiga Diana, por brindarme su amistad y apoyo, desde que nos conocimos, por siempre estar dispuesta a ayudarme, por brindarme conocimientos y siempre darme lo mejor de ella.

A mi amiga Wendy, por brindarme su amistad y compañía a lo largo de la carrera, por enseñarme cosas y ser una persona muy especial.

A mi amigo José por brindarme su compañía y amistad en estos últimos meses, por ser un buen compañero, por brindarme conocimientos y por hacer buen trabajo en equipo conmigo.

Agradecimiento

A mi directora Ana María Pérez Ceballos, por brindarme la oportunidad de trabajar con ella en este proyecto y por todos los conocimientos brindados a lo largo de la carrera.

A mi codirector Mauricio Rincón, por el conocimiento impartido durante mi carrera universitaria.

A los profesores de ingeniería metalúrgica, por compartirme su conocimiento y amor hacía la carrera, por enseñarme a ir más allá.

A todos los técnicos de laboratorio de ingeniería metalúrgica, por brindarme sus amplios conocimientos, su paciencia y anécdotas.

Finalmente, agradecer a todas las personas que hicieron parte de este bonito proceso.

Contenido

Introducción	12
1. Objetivos.....	14
1. Objetivo General.....	14
2. Objetivos Específicos.....	14
2. Generalidades.....	15
2.1. Falla de un componente.....	15
2.2. Bridas	15
2.3. Válvulas bridadas	15
2.4. Principales causas de falla en pernos	15
2.5. Efecto de las variables temperatura y presión sobre los mecanismos de falla	16
2.6. Mecanismos de prevención bajo normas para prolongar la vida útil de la brida	17
3. Fundamentación teórica	19
3.1. Fractura.....	19
3.2. Corrosión.....	27
3.3. En las fuerzas aplicadas sobre el perno.....	32
3.4. En la rosca del perno	33
3.5. Dilatación de la tuerca.....	35
3.6. Aflojamiento por vibración	35
3.7. Fuerza de apriete	36
3.8. Efectos de la temperatura y presión sobre los mecanismos de falla	36
3.9. Mecanismos de prevención bajo la Norma ASME B16.5.....	42
3.10. Mecanismos de prevención bajo la Norma ASME PCC-1	44
3.11. Mecanismos de prevención bajo la Norma API 571-2020	50
4. Conclusiones.....	53
Referencias Bibliográficas	55

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Presiones y temperaturas nominales para materiales</i>	43
Tabla 2. <i>Tolerancias comunes de alineación.</i>	45

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Fractura en perno de brida.</i>	19
Figura 2. <i>Fractura Dúctil en Acero ASTM A354 grado 8 en SEM.</i>	20
Figura 3. <i>Fractura Dúctil a tracción.</i>	21
Figura 4. <i>Perno con fractura dúctil a flexión.</i>	22
Figura 5. <i>Fractura frágil a tracción superficie y fractografía en SEM.</i>	23
Figura 6. <i>Fractura frágil a flexión.</i>	24
Figura 7. <i>Fractura por fatiga Acero ASTM A354 grado 8.</i>	25
Figura 8. <i>Fractura por fatiga a flexión.</i>	26
Figura 9. <i>Fractura por fatiga a tensión Acero ASTM A354 grado 8.</i>	27
Figura 10. <i>Degradación de perno por corrosión.</i>	28
Figura 11. <i>Efecto de la corrosión galvánica en perno.</i>	29
Figura 12. <i>Proceso de corrosión uniforme en perno.</i>	29
Figura 13. <i>Ludimiento en pernos Acero ASTM A354 grado 8.</i>	30
Figura 14. <i>Corrosión bajo tensión en rosca de perno de acero inoxidable austenítico con altos contenidos de Mn y Si, observación en SEM a 120x y 40x.</i>	31
Figura 15. <i>Fragilización por hidrógeno en la superficie de pernos de acero de alta resistencia 33KhMIF.</i>	32
Figura 16. <i>Flexión de rosca en perno.</i>	34
Figura 17. <i>Desgaste en la rosca del perno.</i>	35
Figura 18. <i>Medida de tolerancia de la línea central.</i>	46

ESTUDIO DE CASOS DE FALLAS EN PERNOS DE VÁLVULAS BRIDADAS	8
Figura 19. <i>Medida de tolerancia de espacio excesivo.</i>	46
Figura 20. <i>Medida de tolerancia de paralelismo.</i>	47
Figura 21. <i>Alineación de dos orificios de rotación.</i>	48
Figura 22. <i>Aplicación del lubricante debe dejar una marca visible.</i>	50
Figura 23. <i>Corrosión atmosférica.</i>	51

Glosario

API	Instituto Americano de Petróleo
ASME	Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos
ASTM	Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales
CL	Línea central
GP	Separación
Mpa	Megapascal
PRL	Paralelismo
RTH	Dos orificios de rotación
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido

Resumen

Título: Estudio de Casos Reportados en la Literatura Sobre Análisis de Falla en Pernos Usados como Elementos de Fijación en Válvulas de Acero Bridadas

Autor: Sara Sofía Mejía Ortiz.

Palabras Clave: Pernos, brida, temperatura, presión, mecanismos de falla y prevención.

Descripción:

En la industria, se implementan las uniones bridas como sistemas de unión porque ofrecen ventajas sobre otros métodos como la soldadura, ya que, su instalación y mantenimiento es más sencillo y económico, permitiendo ser desmontadas sin operaciones destructivas, gracias a una circunferencia de agujeros por los cuales se introducen pernos de unión, sin embargo, las bridas tienen un proceso de fabricación y producción distinto al elemento al cual generalmente son unidas, por lo que, al iniciar su vida de servicio, pueden presentar alteraciones mecánicas o metalúrgicas, las cuales posteriormente generan fallas. Un ejemplo muy común son los pernos de sujeción en bridas, los cuales, al unirse generalmente a un material disímil, presentan detrimento en sus propiedades mecánicas y metalúrgicas.

La preocupación de los fallos en servicio ha motivado a realizar investigaciones, para identificar los mecanismos y las variables involucradas, con el fin de establecer mecanismos de prevención y mitigación de fallas. Por lo que esta investigación se enfocó en identificar los mecanismos más comunes de falla en pernos usados como elementos de fijación en Válvulas de Acero Bridadas. Igualmente, se analizaron los efectos de la temperatura y presión, sobre estos mecanismos, identificando la influencia que se produce sobre las propiedades de los pernos. Por último, se establecieron mecanismos de prevención de fallas por medio de la normativa disponible, entre los que se tienen, los códigos ASME B16.5, ASME PPC-1 y la norma API 571, en aspectos fundamentales para prolongar la vida útil de la brida.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales.

Director: Ana María Pérez Ceballos. Codirector: Mauricio Rincón Ortiz.

Abstract

Title: Case Studies Reported in the Literature on Failure Analysis of Bolts Used as Fasteners in Flanged Steel Valves.

Author: Sara Sofía Mejía Ortiz

Key words: Bolts, flange, temperature, pressure, failure and prevention mechanisms.

Description:

In the industry, flanged joints are implemented as joining systems because they offer advantages over other methods such as welding, since their installation and maintenance is simpler and cheaper, allowing them to be disassembled without destructive operations, thanks to a circumference of holes through which joining bolts are introduced. However, flanges have a manufacturing and production process different from the element to which they are generally joined, so, at the beginning of their service life, they can present mechanical or metallurgical alterations, which subsequently generate failures. A very common example is the fastening bolts in flanges, which, when generally joined to a dissimilar material, present deterioration in their mechanical and metallurgical properties.

The concern about failures in service has motivated research to be carried out to identify the mechanisms and variables involved, in order to establish failure prevention and mitigation mechanisms. Therefore, this research focused on identifying the most common failure mechanisms in bolts used as fixing elements in Flanged Steel Valves. The effects of temperature and pressure on these mechanisms were also analyzed, identifying the influence that occurs on the properties of the bolts. Finally, failure prevention mechanisms were established through the available regulations, including ASME B16.5, ASME PPC-1 and API 571, in fundamental aspects to prolong the useful life of the flange.

*Bachelor Work

**Faculty of Physicochemical Engineering. School of Metallurgical Engineering and Materials Science.

Director: Ana María Pérez Ceballos. Codirector: Mauricio Rincón Ortiz.

Introducción

A través de los años diversas industrias como la petroquímica, naval, aeronáutica, etc. Han implementado diversos procesos de unión. Los dos procesos más usados como método de sujeción son la soldadura y las bridas, estas últimas tienen una gran ventaja con respecto a las uniones soldadas, ya que, su instalación y mantenimiento es más sencillo y económico, permitiendo ser desmontadas sin operaciones destructivas, gracias a una circunferencia de agujeros por los cuales se introducen pernos de unión (Stiven et al., 2018).

A pesar de sus amplios beneficios, las bridas tienen un proceso de fabricación y producción distinto al elemento al cual generalmente son unidas, por lo que, al iniciar su vida de servicio, pueden presentar alteraciones mecánicas o metalúrgicas, las cuales posteriormente generan fallas en el material.(Stiven et al., 2018)

Históricamente las fallas en servicio de los materiales, han sido una preocupación de innumerables industrias, por lo que se han realizado diversos estudios, en búsqueda de los materiales que posean las propiedades idóneas para una aplicación específica. A pesar de los estudios preliminares implementados, es muy complicado que los materiales mantengan sus propiedades intrínsecas una vez inician su vida en servicio, principalmente por las condiciones operacionales a las que son sometidos. (Jaramillo, 2008).

Un ejemplo muy común son los pernos de sujeción en bridas, los cuales, al unirse generalmente a un material disímil, presentan detrimento en sus propiedades mecánicas y metalúrgicas. Finalmente, después de un deterioro e incremento de la mencionada anomalía, se alcanza un nivel crítico a partir del cual se genera la falla de la unión bridada, impidiendo así que cumpla la función principal de la misma. (Jaramillo, 2008).

Lo ideal en estos casos, es realizar un procedimiento de análisis, para revelar el mecanismo por el cual se dio la falla, analizando el efecto de las variables involucradas. Todo este procedimiento es realizado con el fin de generar un ahorro considerable, teniendo en cuenta los altos costos que conlleva la falla de un elemento en cualquier industria, en cuanto a cese de actividades, defectos irreparables en los productos o pérdidas de vidas humanas por accidente laboral.(Tovar & Profesor Investigador, n.d.)

1. Objetivos

1. Objetivo General

Determinar las causas más comunes de falla en pernos usados para la fijación de válvulas de acero bridadas.

2. Objetivos Específicos

Identificar los mecanismos de falla frecuentes en pernos de fijación de bridas.

Analizar el efecto de las variables temperatura y presión sobre los mecanismos de falla de los pernos de fijación de bridas.

Proponer mecanismos de prevención bajo normas estandarizadas para prolongar la vida útil de la brida.

2. Generalidades

A continuación, se definirán algunos conceptos importantes para la contextualización y comprensión de los temas abordados. Los conceptos concernientes a los mecanismos de falla, el efecto de la temperatura y la presión sobre la posibilidad de falla y las normas para minimizar los fallos en servicio serán ampliamente expuestos en el capítulo 3.

2.1. Falla de un componente

Se habla de falla cuando un componente, equipo o máquina ha fallado en servicio. Se considera la misma cuando es completamente inoperable, no cumple la función para la cual fue hecho y/o cuando su manipulación es insegura (Tovar & Profesor Investigador, n.d.).

2.2. Bridas

Las fijaciones roscadas, son componentes mecánicos primordiales en la industria, que cumplen las funciones de conexión, fijación y sellado. Se aplican en la industria petroquímica, naval, aeronáutica, mecánica, civil, entre otras, ya que son económicas, tienen buena intercambiabilidad y facilidad de instalación y desmontaje. (Sahoo, 2021)

2.3. Válvulas bridadas

Estas válvulas son usadas en sistemas principalmente de tuberías para controlar el flujo de líquidos, gases o fluidos. Dependiendo de las características de fabricación pueden soportar altas presiones y temperaturas. (Sahoo, 2021)

2.4. Principales causas de falla en pernos

Los pernos de una unión bridada pueden fallar por diversos mecanismos, entre los principales se encuentran fallas por corrosión, generalmente de tipo galvánica, debido a la interacción de los distintos metales usados en la válvula y los pernos de la unión bridada. De igual manera, se han observado fallas por corrosión bajo tensión debido a la acción conjunta de un medio

corrosivo y los esfuerzos a tracción a los cuales son sometidos los pernos para mantener la unión bridada (Stiven et al., 2018). Debido a la naturaleza del servicio, es común encontrar fallas de pernos asociadas a procesos de fatiga, este fenómeno ocurre debido a la acumulación de tensiones cíclicas, vibraciones, impactos y fluctuaciones térmicas, lo que desencadena la fractura de los pernos. (H. S. Chen et al., 2006). Por otro lado, la dilatación de la tuerca, que se produce debido al aumento de la temperatura de servicio a las que está sometida la brida de la válvula, puede provocar la expansión del perno y, en el caso de que no cuente con suficiente espacio para expandirse, se producirá una acumulación de tensiones hasta la falla. (Stiven et al., 2018). Adicionalmente, se ha encontrado que, en la región roscada del perno, se produce flexión de la rosca, que ocurre debido a que las fuerzas que actúan sobre el perno son mayores que la capacidad del material para contrarrestarlas. (Sahoo, 2021). Por otra parte, el aflojamiento por vibración, se genera principalmente debido a las vibraciones del medio que conllevan a deslizamientos de la unión roscada, que se traducen como una pérdida de precarga lo que conlleva la falla. En ocasiones, las vibraciones también se dan por las altas presiones y temperaturas que manejan las líneas. (H. S. Chen et al., 2006). Por último, se ha encontrado que, al realizar una aplicación excesiva de fuerza, se tendrá una distribución de carga no homogénea, lo que reduce la eficiencia de la unión pudiendo contribuir a la falla de los pernos de fijación (Sahoo, 2021).

2.5. Efecto de las variables temperatura y presión sobre los mecanismos de falla

La temperatura y presión pueden modificar el buen funcionamiento de los pernos a través de la variación de propiedades como: el módulo del material, la expansión térmica de los diferentes materiales de los componentes de la brida, la fatiga térmica, la pérdida de tensión en calentamiento-enfriamiento y cambios de presión que provocan fluctuaciones en la carga de compresión de la unión y pueden aumentar la posibilidad de fallo. (Martínez Zarco, s. f.)

Cuando se varía la temperatura de servicio a la que está sometida la unión bridada causa efectos negativo sobre los pernos. El aumento de la temperatura de servicio a la que está sometida el componente, puede provocar que el perno llegué a su límite de fluencia, en el cual se empezará a deformar plásticamente, aunque la carga se situé en los límites de operación establecidos. Con el pasar del tiempo, el perno continuará deformándose hasta llegar al punto en el que no soporte la carga y falle. En otro caso, cuando se da un aumento de la temperatura, el perno se dilata térmicamente, lo que puede generar la acumulación de tensiones que pueden llevar a una falla. (H. S. Chen et al., 2006)

Igualmente, la fuerza de presión que es aplicada a la unión bridada, provoca una distribución de la fuerza de compresión en los pernos que se encargan de la fijación. En el caso de que esta fuerza sea menor que la necesaria, los pernos van a redistribuir el esfuerzo y unos van a soportar una fuerza mayor, por lo que se verá afectada la estanqueidad de la unión bridada y se pueden producir fallos como fugas o pérdida del torque de los mismos. En el caso de que esta fuerza sea mayor que la necesaria, el exceso de fuerza en los pernos, puede provocar deformaciones y fallas. (Sahoo, 2021)

2.6. Mecanismos de prevención bajo normas para prolongar la vida útil de la brida

De acuerdo al código ASME B16.5 se pueden establecer mecanismos de prevención, para seleccionar los materiales de acuerdo a las condiciones de trabajo de temperatura y presión de la brida, en general la norma enfatiza en cómo hacer una buena selección de una brida dependiendo de las variables operacionales. Además, de las variables descritas anteriormente, también especifica detalladamente cómo realizar la fabricación de la brida teniendo en cuenta la clasificación de la misma y otras variables como diámetro nominal, diámetro externo, diámetro del círculo del perno, número de agujeros de la brida y su respectivo diámetro, mínimo espesor

requerido para la brida, entre otras variables que deben tenerse en cuenta para un óptimo desempeño de la unión bridada. (ASME B16.5-2013).

En general, la norma ASME PCC-1 enfatiza en las recomendaciones para realizar un correcto ensamblaje de juntas bridadas con límites de presión. La norma, además especifica detalles del acabado superficial, lubricación de los pernos, el torque de apriete, técnicas y secuencias de apriete, pruebas de integridad de las juntas ensambladas y consideraciones de seguridad durante el montaje, entre otras variables garantizando un confiable rendimiento de la unión bridada. (ASME PCC-1- 2022)

Por último, la norma API 571, se basa en la evaluación de la integridad, por medio de las pautas proporcionadas se evalúa la probabilidad de falla de los componentes, ante los diferentes mecanismos de daño como fractura, fatiga, corrosión y ataques por hidrógeno. Garantizando la seguridad y confiabilidad de los equipos y componentes al identificar y reducir los mecanismos de daño de los equipos. (API 571-2020)

3. Fundamentación teórica

El proyecto se dividió en tres temas principales los cuales se investigan mediante la revisión bibliográfica. Como punto de partida se identificaron los mecanismos de falla frecuentes en pernos de fijación de bridas, se analizó el efecto de las variables temperatura y presión sobre estos y por último se proponen mecanismos de prevención bajo normas estandarizadas para prolongar la vida útil de la brida.

3.1. Fractura

Es la separación de una pieza en dos o más partes, esto se puede dar por las fuerzas de flexión, tensión o la combinación de estas. En la Figura 1, podemos observar cómo se evidencia el fenómeno de fractura, una de las principales causas de falla en pernos. (*ASM handbook. Volume 12, Fractography.* (1987). A S M International).

Figura 1.

Fractura en perno de brida.



Nota. Tomado de (Ren & Wu, 2019)

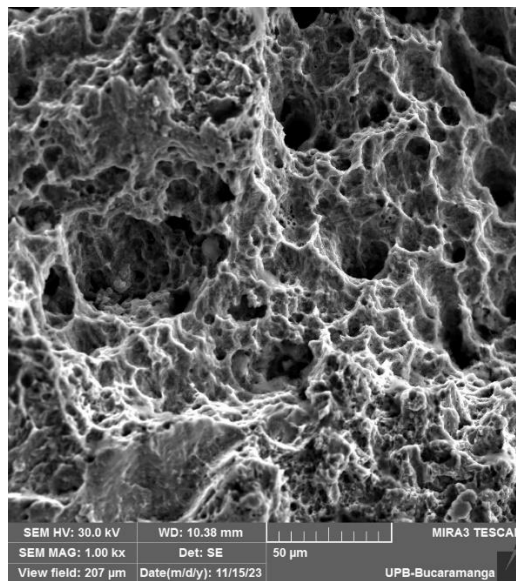
La fractura dúctil se presenta cuando la pieza sobrepasa los límites de deformación plástica, por lo que ya no puede regresar a su forma inicial, quedando con una deformación permanente al retirar la carga ejercida. Esta deformación se da progresivamente con la carga de tracción aplicada

que el perno debe soportar. El perno se seguirá elongando, hasta llegar a un punto de tensión máxima, en el cual el perno se va a fracturar. La falla se caracteriza por tener una apariencia fibrosa en la superficie de fractura. (Martínez Zarco, s. f.).

A escala microscópica, se pueden observar los microhoyuelos que se dan en el proceso de deformación plástica antes de que se produzca la fractura. Estos microhoyuelos se caracterizan por su tamaño microscópico, su forma es redonda u ovalada (Ver figura 2) y se presentan en la zona de mayor concentración de tensiones (Khanzhin et al., 2014a).

Figura 2.

Fractura Dúctil en Acero ASTM A354 grado 8 en SEM.



Nota. Tomado de (Pérez Ceballos, 2024)

La fractura dúctil se clasifica de acuerdo a las fuerzas ejercidas sobre los pernos, como se detalla a continuación:

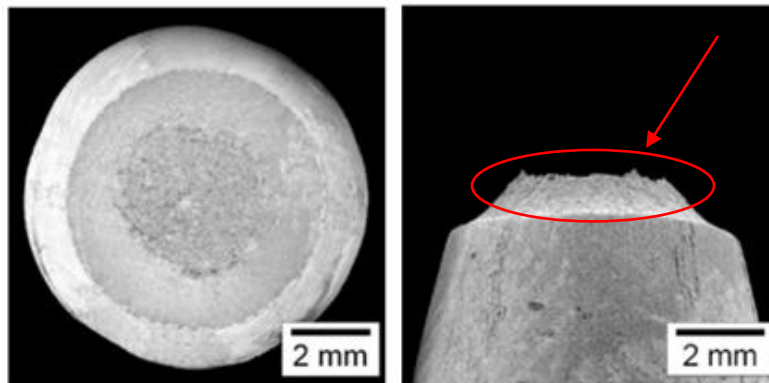
En el caso, de la fractura dúctil a tracción el perno está sometido a cargas paralelas a su eje, lo que conlleva a una reducción gradual en su diámetro y un alargamiento de la geometría, generando una deformación permanente a la forma original de la pieza, que posteriormente genera

un grado de falla, hasta desencadenar la falla total, en la cual se origina la fractura dúctil a tracción (Stiven et al., 2018).

En la figura 3 se observa la deformación del material antes de que ocurra la fractura, dando lugar a la formación de un cuello o cono (ver flecha roja), donde se evidencia un cambio en las dimensiones (Balan, 2018b).

Figura 3.

Fractura Dúctil a tracción.



Nota. Tomado de (González et al., 2008)

Por otra parte, la fractura dúctil a flexión se produce cuando el eje del perno está sometido a cargas laterales perpendiculares, se produce deformación, que induce una desviación respecto a la posición inicial del perno, dando origen a la formación de curvas perceptibles (ver figura 4), estas se hacen más pronunciadas con el pasar de los ciclos, hasta que se da una separación en el material y por consiguiente la fractura. (Martínez Zarco, s. f.)

Se caracteriza por el notable labio de cizallamiento en la circunferencia del perno (ver figura 4, flecha roja), que muestra la dirección de la carga aplicada, se identifica el aspecto fibroso en la zona de la fractura. En estos casos se involucra la fluencia del material que está sometido a

cargas cíclicas laterales, la deformación del perno se da debido a los esfuerzos de flexión provenientes de las cargas aplicadas (Martínez Zarco, s. f.; Stiven et al., 2018).

Figura 4.

Perno con fractura dúctil a flexión.



Nota. Tomado de (VEGA GUEROVICH, 2013)

Hablamos de fractura frágil, si el material del perno tiene baja ductilidad, presenta una baja capacidad de deformación cuando se somete a esfuerzos; si se varían las condiciones operativas superando los esfuerzos máximos, esto conllevará a la fractura. Se presenta principalmente cuando la fractura comienza a nivel intergranular y en los casos de propagación de fractura (Stiven et al., 2018).

La fractura frágil se clasifica de acuerdo a la aplicación de cargas ejercidas sobre los pernos, como se detalla a continuación:

Debido a las cargas cíclicas paralelas aplicadas al eje principal del perno, cuando estas cargas son menores a la carga máxima que puede soportar el perno y aun así ocurre fractura frágil a tracción, producto de esfuerzos adicionales generados sobre el perno. Esto se debe a que a medida que pasa el tiempo la suma de las cargas individuales van a dar paso a la formación de grietas, que se van a propagar ciclo a ciclo, lo suficiente para llegar a un nivel crítico, generando fractura

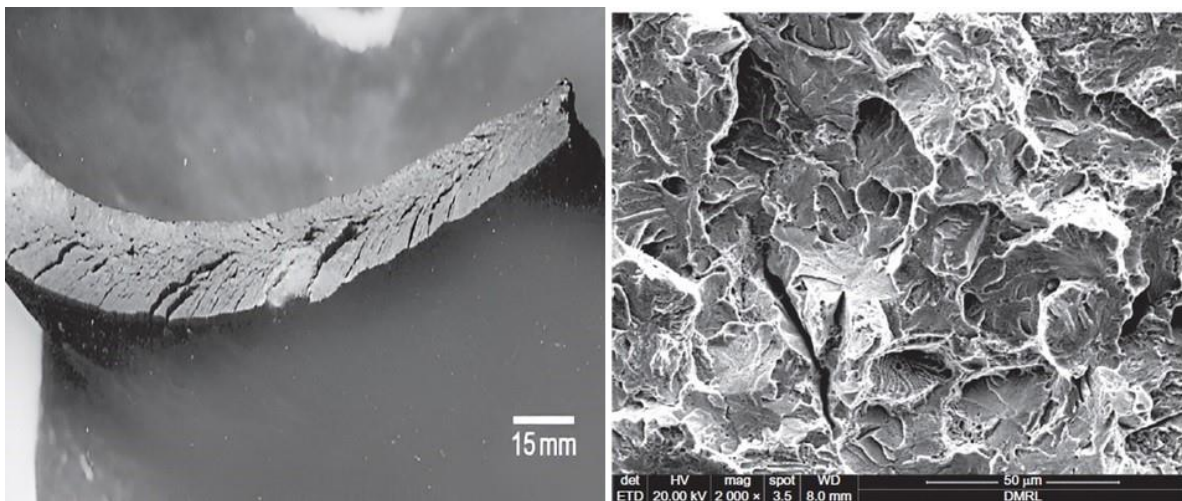
repentina del material (Stiven et al., 2018).

Se identifica por ser componente de una carga uniaxial en el eje x del cuerpo cilíndrico del perno, donde se aprecia una zona de fractura escalonada de tamaño moderado con aspecto transgranular o intergranular, estas texturas son características de un material frágil (Martínez Zarco, s. f.).

En la figura 5 se muestra las marcas de chevron que revelan el origen de la fractura, al examinar con SEM se identifica un clivaje transgranular que indica la dirección de propagación de la grieta a lo largo de planos cristalográficos bien definidos (Balan, 2018c).

Figura 5.

Fractura frágil a tracción superficie y fractografía en SEM.



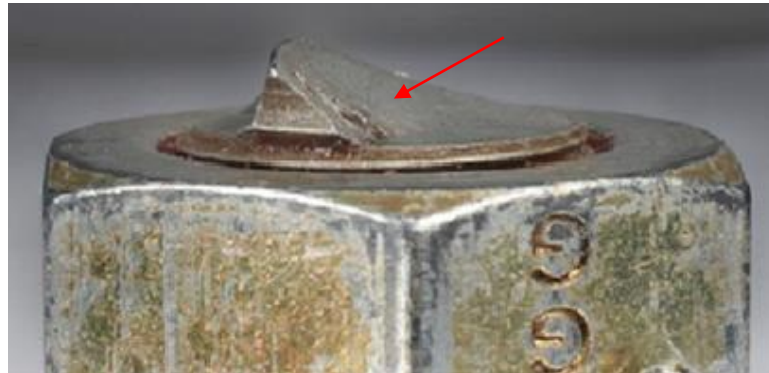
Nota. Tomado de (Balan, 2018c)

Por otra parte, la fractura frágil a flexión no muestra deformación plástica, ocurre de manera inesperada, debido a la aplicación de cargas de flexión al perno, este no absorbe la energía de manera progresiva y se fractura. (ASM handbook. Volume 12, Fractography. (1987). A S M International).

Se identifica por una zona de fractura escalonada de tamaño considerable con aspecto granular brillante (ver figura 6, flecha roja), textura característica de un material con alta dureza, esto reduce la elasticidad del material (Martínez Zarco, s. f.).

Figura 6.

Fractura frágil a flexión.



Nota. Tomado de (Valles González et al., 2020)

En el caso de la fractura frágil a tracción - torsión se produce cuando se aplican cargas de tracción y torsión al mismo tiempo, estas cargas van a afectar los diferentes ejes y direcciones del perno haciendo que se produzcan concentradores de esfuerzos en puntos críticos, falle y se produzca la fractura. Se identifica porque la fractura tiene un aspecto granular y fibroso (Martínez Zarco, s. f.)

Por último, la fractura por fatiga ocurre debido a la acumulación de tensiones cíclicas, vibraciones, impactos y fluctuaciones térmicas, que aunque son menores que la resistencia de tracción del perno, desencadenan pequeñas grietas, que son difíciles de identificar y se propagan en tamaño y profundidad de manera gradual, a medida que los ciclos siguen avanzando, debido a que la tensión máxima que puede soportar el perno disminuye con la aparición de las grietas, sin importar si se aplican tensiones elevadas y ciclos bajos o tensiones bajas y ciclos elevados, al

seguir operando repetitivamente, se continúa la propagación de las grietas de manera progresiva, hasta llegar a un tamaño crítico que ocasiona fractura por fatiga. Esta fractura generalmente se da en tres etapas: Iniciación, propagación y fractura (Wulpi, 2013).

Se observa una superficie de aspecto suave con arranque de material (ver figura 7, zona 1, flecha roja), seguido de una zona fibrosa en forma de estría (ver figura 7, zona 2, flecha roja) que se relaciona con la última zona de falla (Balan, 2018a).

Figura 7.

Fractura por fatiga Acero ASTM A354 grado 8.



Nota. Tomado de (Pérez Ceballos, 2024)

La fractura por fatiga se clasifica de acuerdo a la aplicación de cargas ejercidas sobre los pernos, como se detalla a continuación:

En esta clasificación está la fractura por fatiga a flexión, que es generada por las cargas laterales aplicadas al perno que, aunque sean menores al límite de cedencia del material, debido a su repetición cíclica provocan fuerzas de flexión y esfuerzos adicionales que favorecen a las fuerzas de separación que exceden las fuerzas de sujeción, favoreciendo la propagación gradual de grietas hasta causar la fractura. Se caracteriza porque presenta un área irregular (Ver figura 8,

flechas rojas), en la cual se puede observar donde se desencadenó la fractura debido a que la grieta se propaga hasta colapsar (ASM handbook. Volume 12, Fractography. (1987). A S M International).

Figura 8.

Fractura por fatiga a flexión.



Nota. Tomado de (VEGA GUEROVICH, 2013)

Asimismo, se encuentra la fractura por fatiga a tensión, es provocada por las cargas cíclicas paralelas al eje principal del perno, ya que estas cargas producen fuerzas de tensión que hacen que el perno se estire y se comprima constantemente que, aunque no excedan el límite de fluencia del material, hace que se originen grietas que se propagan progresivamente hasta la fractura. (Martínez Zarco, s. f.).

Se identifica por una zona de fractura con marcas crestas (ver figura 9, flechas rojas) que forman el rango esencial de la región lisa, que indican en qué dirección se aplicaron las cargas. (Balan, 2018a)

Figura 9.

Fractura por fatiga a tensión Acero ASTM A354 grado 8.



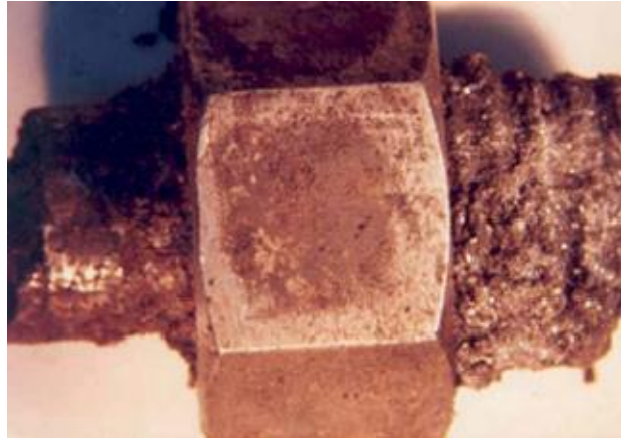
Nota. Tomado de (Pérez Ceballos, 2024)

3.2. Corrosión

Degradación del material debido a las reacciones químicas o electroquímicas y la interacción con el ambiente. En la figura 10 se observa el proceso de corrosión en el perno, debido a su interacción con el entorno (Cramer, S. D., & Covino, B. S. (2003). *ASM handbook. Volume 13A, Corrosion: fundamentals, testing and protection.* ASM International).

Figura 10.

Degradación de perno por corrosión.



Nota. Tomado de (Elshawesh et al., 2008).

La corrosión galvánica se produce debido a que, los distintos metales usados en la brida y los pernos de la unión, tienen diferentes potenciales químicos. Esto genera una celda galvánica, en la que el metal más activo va a actuar como ánodo, depositándose en el metal noble que va a actuar como cátodo, debido a la cercanía física entre los dos metales los efectos galvánicos son mayores. (Cramer, S. D., & Covino, B. S. (2003). *ASM handbook. Volume 13A, Corrosion: fundamentals, testing and protection.* ASM International).

Figura 11.

Efecto de la corrosión galvánica en perno.



Nota. Tomado de (Jiang et al., 2022).

La corrosión uniforme causa la disminución de masa, que se da gradualmente de forma uniforme en la toda la superficie del perno, debido a esta pérdida de masa se originan concentradores de esfuerzos y se pierde la geometría inicial de este, por lo que, se restringe su utilidad operativa de fijación, dando lugar a fallas por deformación y fractura. Se caracteriza por dar un aspecto de un tono cobrizo de óxido en la superficie de la pieza (ver figura 12). Este tipo de corrosión puede darse por la exposición a ambientes corrosivos, humedad, sustancias químicas o la presencia de oxígeno. (Martínez Zarco, s. f.).

Figura 12.

Proceso de corrosión uniforme en perno.



Nota. Tomado de (Guo et al., 2023)

En el caso de la corrosión por rendija, el perno se ve afectado de manera localizada, en las zonas afectadas, se generan concentradores de esfuerzos como efecto de las grietas, en situaciones críticas se observan porosidades en forma de agujeros con pérdidas de masa significativas, lo que conlleva a una falla por la reducción en las propiedades mecánicas de la pieza. (Cramer, S. D., & Covino, B. S. (2003). *ASM handbook. Volume 13A, Corrosion: fundamentals, testing and protection*. ASM International).

Por otro lado, el desgaste por ludimiento es causado por el contacto de dos superficies metálicas que se encuentran sometidas a esfuerzos cíclicos, debido a esto, la superficie es propensa a la formación de grietas y facilita la formación de corrosión por picado, lo que implica la reducción de las propiedades mecánicas y químicas del perno. (Martínez Zarco, s. f.).

En la figura 13, se refleja el desgaste en la superficie de los pernos, causando rugosidad superficial, por la cual se reflejan cambios en la forma y dimensiones de los pernos (ver figura 13 parte 1, flecha roja y señalado), también se puede observar depósitos de óxidos en las zonas corroídas (ver figura 13 parte 2, flecha roja). (Martínez Zarco, s. f.).

Figura 13.

Ludimiento en pernos Acero ASTM A354 grado 8.

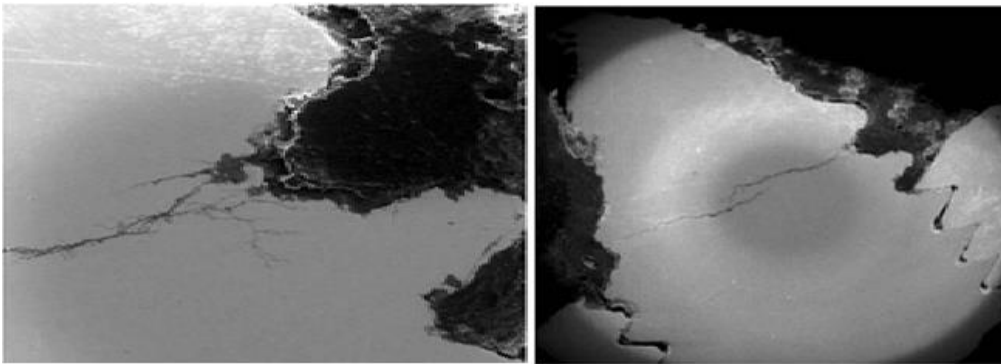


Nota. Tomado de (Pérez Ceballos, 2024)

Cuando nos referimos a la corrosión bajo tensión, hablamos de la combinación entre un esfuerzo de tensión y la exposición a un ambiente corrosivo al que está sometido el perno, disminuye la resistencia para soportar la carga, ya que la tensión genera un agrietamiento progresivo en la superficie de la pieza y el ambiente corrosivo conduce a la propagación de esto, lo que conlleva a que la grieta alcance un tamaño crítico en el que la pieza falla por fractura de manera repentina, con un esfuerzo más bajo al de diseño. (Sahoo, 2021). Generalmente, las grietas tienen un aspecto de ramificado (ver figura 14) y se observan perpendiculares a donde se genera la tensión de tracción (Wulpi, 2013).

Figura 14.

Corrosión bajo tensión en rosca de perno de acero inoxidable austenítico con altos contenidos de Mn y Si, observación en SEM a 120x y 40x.



Nota. Tomado de (Elshawesh et al., 2008)

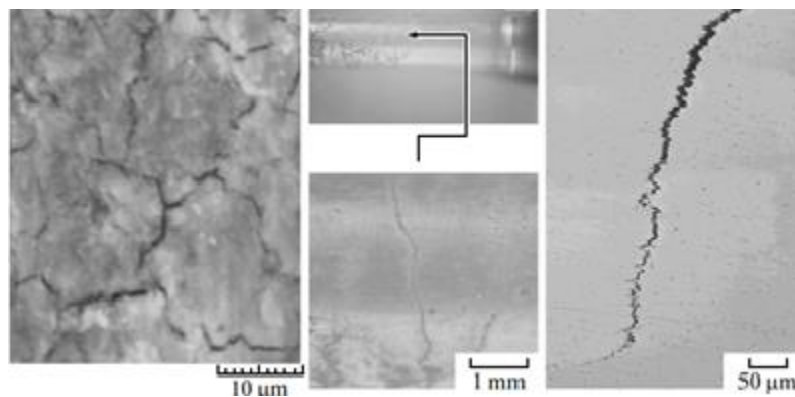
Por último, la fragilización por hidrógeno en los pernos de fijación se da, generalmente, por la combinación de tensión de tracción y el hidrógeno libre. Este hidrógeno puede estar presente en los procesos electrolíticos de recubrimiento o en el entorno, ya sea en el agua, aire húmedo los ácidos, el sulfuro de hidrógeno o hidrocarburos. Cuando el hidrógeno entra en contacto con el acero, este se absorbe y penetra el material del perno, debilitando su estructura y dando paso a la

formación de grietas y fisuras en la zona de mayor tensión, debido a la reducción de las propiedades, es susceptible a la falla por fractura prematura. (Cramer, S. D., & Covino, B. S. (2003). *ASM handbook. Volume 13A, Corrosion: fundamentals, testing and protection*. ASM International; Balan, 2018d).

En la figura 15, se observa la acumulación de hidrógeno en las zonas de mayor tensión, llevando a que se debilite la estructura del material, con la formación de grietas y fisuras que se propagan en los límites de grano de manera rápida.

Figura 15.

Fragilización por hidrógeno en la superficie de pernos de acero de alta resistencia 33KhMIF.



Nota. Tomado de (Khanzhin et al., 2014a)

3.3. En las fuerzas aplicadas sobre el perno

La fuerza de torsión que se aplica a los pernos debe ser calculada exactamente, ya que el 50% de la fuerza de torsión aplicada se pierde debido a la fuerza de fricción de acoplamiento debajo de la cabeza del perno, el 40% de fricción se utiliza para vencer la resistencia de las roscas y el 10% restante es para ejercer la fuerza sobre el perno. En el caso de que la fuerza sea menor o mayor a la requerida, se van a provocar fallas (Sahoo, 2021).

Cuando la fuerza de torsión es excesiva puede superar la carga de prueba que la brida resiste en operación, generando una carga desigual, que disminuye la eficacia de la unión brida/perno. Estos esfuerzos adicionales llevan a un estado de deformación al superar el límite elástico, por el cual se puede cortar la cabeza del perno, lo que conlleva a que se aumente el riesgo de escape de presión como falla. (Sahoo, 2021).

Cuando la fuerza de torsión es pequeña, el perno va a ciclar más veces de lo calculado, acortando la vida de fatiga útil del perno, lo que lo va a llevar a la falla. En otro caso se puede tener una pérdida de estanqueidad, lo que conlleva a fallas por fugas. (Sahoo, 2021).

En el caso, de la fuerza de compresión hace referencia a la aplicación de fuerza de apriete para lograr la sujeción de los pernos, con esto se obtiene una estanqueidad y conexión hermética en la brida. Una aplicación excesiva de fuerza de compresión hará que la distribución de carga sea desigual y baje la eficiencia de la unión, lo que lleva a la falla. (Sahoo, 2021).

3.4. En la rosca del perno

La flexión de la rosca ocurre debido a que las fuerzas que actúan sobre el perno son mayores que la capacidad del material para contrarrestarlas. Esto se expresa con la formación de una curvatura en la zona de la rosca (ver figura 16, señalado en rojo), porque, aunque esta zona soporta menos tensión que el vástago del perno, este presenta mayor rigidez, lo que hace que soporte la deformación de las tensiones generadas por la distribución desigual de fuerzas, por lo que las tensiones se concentran en la rosca llevándola a la falla por flexión. (Sahoo, 2021).

Figura 16.

Flexión de rosca en perno.



Nota. Tomado de (Grimsno et al., 2016)

Por otra parte, en la rosca del perno también se produce desgaste, lo cual se distingue por presentar surcos con pérdida del material de la pieza en la zona de las roscas (ver figura 17, señalado en rojo), en diferentes áreas de formas variadas, haciendo que la pieza difiera de su forma original, este desgaste puede ser adhesivo, el cual se produce principalmente por el contacto que se presenta brida/perno o abrasivo debido a las partículas abrasivas que entran en contacto con el perno ,reduciendo gradualmente la sujeción del sistema, lo que conlleva a la falla. (Martínez Zarco, s. f.;Balan, 2018e)

Figura 17.

Desgaste en la rosca del perno.



Nota. Tomado de (Vega Guerovich, 2013).

3.5. Dilatación de la tuerca

Sucede cuando aumenta el tamaño de la tuerca al ejercer la fuerza de apriete para unir las bridas, lo que produce acuñaamiento, en el que se da un desplazamiento diametral. Esto también se ve influenciado por la temperatura, ya que la temperatura influencia la expansión en el material. En el caso de que no cuente con suficiente espacio para expandirse, se acumulan tensiones hasta fallar. Generalmente, la cara superior de la tuerca se contrae en la dirección diametral y la superficie de apoyo se expande. (Sahoo, 2021).

3.6. Aflojamiento por vibración

Se da principalmente, debido a las vibraciones y fricción del medio en el que está sometido el perno, esto produce pérdidas de las funciones inherentes de este, que se traducen en deslizamientos laterales de la tuerca o cabeza del perno, provocando el movimiento relativo en las roscas internas y externas en dirección opuesta al apriete, lo que se traduce en una pérdida de la

precarga conllevando a la falla. Las principales causas del movimiento relativo en las roscas son: La flexión que genera fuerzas en la superficie de fricción, los efectos térmicos producto de las diferentes temperaturas y aplicación de fuerzas alternas transversalmente (Gong et al., 2022).

3.7. Fuerza de apriete

Es la fuerza que el perno ejerce sobre el sistema de ensamble para mantener los componentes unidos. La pérdida de fuerza de apriete que el tornillo experimenta cuando opera a elevadas temperaturas, si no se compensa, se producirá un fallo por fatiga o una unión floja, aunque inicialmente estuviera bien apretada. Dado que la temperatura de trabajo es previamente establecida, el objetivo del diseño es seleccionar un material de tornillo que proporcione la fuerza de apriete deseada en todos los puntos críticos del rango de funcionamiento para que no se produzca relajación por efecto de la temperatura de operación (Domínguez Gómez et al., 2006; Sahoo, 2021).

Dependiendo de los factores por los cuales se produzca, la pérdida de fuerza de apriete se da a corto y largo plazo. Cuando se produce a corto plazo genera flexión, torque y variaciones geométricas en los pernos y a largo plazo provoca aflojamiento por vibración y relajación de estrés y tensiones (Abid et al., 2015).

3.8. Efectos de la temperatura y presión sobre los mecanismos de falla

La óptima operación de los pernos puede variar, debido a los cambios de temperatura y presión, ocasionando cambios en las principales propiedades de estos como en el caso de la ductilidad, fluencia, dilatación y fatiga térmica, fluctuaciones en las cargas de la unión bridada, incrementando el riesgo de falla (Martínez Zarco, s. f.).

Por lo anterior, a continuación, se analiza el efecto de estas dos variables en el comportamiento de los pernos de fijación de bridas:

Cuando hay variaciones drásticas en la temperatura de servicio a la que está sometida la unión bridada, ya sean elevadas o muy bajas, esto causa efectos sobre los pernos. Estos efectos repercuten en los mecanismos de falla, aumentando la posibilidad de que ocurra dicho fenómeno. Por otro lado, la fuerza de presión que es aplicada a la unión bridada, provoca una distribución de la fuerza de compresión en los pernos que se encargan de la fijación, en caso de que esta sea mayor o menor al rango de presión para la cual se diseñó la unión bridada, va a tener efectos significativos sobre los diversos mecanismos que pueden ocasionar fallas debido a estas variaciones. (Gao et al., 2022)

De acuerdo a los mecanismos de falla anteriormente establecidos, se realiza el análisis del efecto de la temperatura y presión sobre estos:

En la fractura, al variar la temperatura y presión de servicio, se dan cambios en las propiedades mecánicas de los materiales, su resistencia y ductilidad son las propiedades más afectadas, generalmente se dan cambios a nivel de la microestructura (Wulpi, 2013).

Por lo anterior, Shan Gao, Jieqi Li, Lanhui Guo, Qi Bai, Fangyi Li, realizaron pruebas en pernos de alta resistencia, para analizar la influencia de temperaturas superiores a 600°C en la fractura. Identificando que se experimenta la deformación máxima en las curvas esfuerzo-deformación. Además, observaron cambios en la estructura del material, en la cual se precipitan los átomos de carbono, disminuyendo la densidad de dislocaciones en la red y dando lugar a la deformación plástica (Gao et al., 2022).

De manera que, la fractura dúctil posee un comportamiento, en el que, aunque la carga de los pernos se sitúe en los límites de operación establecidos, cuando se aumenta la temperatura de

servicio a la que está sometida el componente, se dará una reducción en el límite de fluencia y cedencia del material, lo que conlleva a una disminución de la rigidez, haciendo que el perno se deforme descontroladamente hasta llegar al punto en el que no soporte la carga y falle de manera anticipada (Kodur et al., 2017).

A su vez, varias investigaciones han determinado que, al elevar la temperatura por encima de 800°C, se produce un cambio en la microestructura de los pernos de acero de alta resistencia grado 8.8, lo que restringe el desplazamiento de los átomos. Por otro lado, según Venkatesh Kodur, Mahmood Yahyai, Abbas Rezaeian, Mohamadreza Eslami Alireza Poormohamadi, analizaron que estos pernos, a temperaturas por encima de 800°C, se experimenta una pérdida del límite elástico residual hasta del 70%. Esto implica que el material se deforme permanentemente bajo esfuerzo, lo que conlleva a una disminución de su resistencia y un aumento de su fragilidad hasta que se produce la fractura (Kodur et al., 2017; Gao et al., 2022).

Adicionalmente, el aumento de los niveles de presión, produce que se eleven las cargas que se ejercen sobre el perno, de tal manera que esto afecta la resistencia a la tracción y flexión, aumentando las cargas paralelas y laterales perpendiculares al eje del perno, acelerando la deformación plástica y finalmente ocurriendo una fractura dúctil (Wulpi, 2013; Sawa et al., 2002).

En el caso de la fractura frágil, al disminuir equivocadamente la temperatura de operación del sistema, se reduce la ductilidad del material del perno, haciendo que se aumente la dureza de tal forma que el material se fragiliza con una baja deformación y termina fallando (Wulpi, 2013). Teniendo en cuenta que el aumento de la presión interna es lineal al aumento de la carga axial del perno, si el material de la pieza presenta baja ductilidad, tendrá una baja capacidad de deformación y de acuerdo con la literatura al variar las condiciones de operación aumentando la presión interna,

el perno puede tener una precarga hasta del 10%, presentando la posibilidad de superar el esfuerzo que puede soportar la pieza (Sawa et al., 2002).

Es importante tener en cuenta que, de acuerdo a la variación de la temperatura, la fractura puede presentar un cambio en la zona de dúctil-frágil, al disminuir la temperatura, esta zona de variación aumenta o disminuye su tamaño, cuando esta zona es mayor, probablemente da lugar a la fractura frágil (Gao et al., 2022).

En la fractura por fatiga, el perno se encuentra sometido a una carga cíclica que genera que el material, esté en constantes ciclos de cargue y descargue. Las condiciones de operación a elevadas temperatura y presión reducen la resistencia a la fatiga, aumentando así la tensión fluctuante experimentada por la unión bridada. Este efecto se intensifica por los esfuerzos alternantes, cargas laterales y paralelas que se ejercen sobre el perno. Estas condiciones facilitan la iniciación y propagación de grietas, incrementando la probabilidad de que la pieza falle por fatiga (Wulpi, 2013).

Por otro lado, en la fragilización por hidrógeno, se analiza que cuando la pieza contiene hidrógeno y se expone a un ambiente con elevada temperatura, la resistencia a la tracción y ductilidad de los pernos, se ve afectada debido a la presión que ejercen las burbujas de hidrógeno en los granos del metal, que promueven mayor velocidad de difusión, el hidrógeno atómico se permea con mayor facilidad en el acero, dando paso a la formación de metano, que conlleva a la formación de microgrietas o fisuras, que con el tiempo crecen y se propagan en los granos del material del perno, llevándolo pronto a la fractura (Shaheen et al., 2020).

En el caso del aflojamiento por vibración, las altas temperaturas hacen que la pieza sea más susceptible a sufrir pérdidas de precarga, debido a que la pieza está sometida a la carga de apriete y las vibraciones cíclicas constantes, en las que el perno experimenta mayor fluencia, generando

una deformación y por consiguiente una disminución en la carga de apriete, que se ve traducida en pérdida de tensión por la relajación de una manera más acentuada que a temperatura ambiente. Las fluctuaciones y cambios en la presión provocados por el par de apriete de torsión repetitivo, puede generar fuerzas alternas transversales, fuerzas de fricción que con los efectos térmicos producen un mayor aflojamiento rotacional (Gong et al., 2022).

Para la pérdida de fuerza de apriete, la temperatura es un factor determinante en el comportamiento del perno, las altas temperaturas provocan que el perno experimenta relajación de tensiones de forma acelerada, por lo que la resiliencia va disminuir, expresando una pérdida de ductilidad, haciendo que se pierda la fuerza de apriete inicial de manera progresiva (Abid et al., 2015).

Sumado a lo anterior, al aplicar presión interna, se va a dar una pérdida de fuerza de apriete en los pernos que conlleva a que se desplace la brida, este desplazamiento da como resultado la pérdida de contacto. Entre mayor sea la presión, mayor será la pérdida de tensión de contacto. (Sawa et al., 2002)

Asimismo, se analizaron los efectos en los mecanismos de falla de fuerzas aplicadas sobre el perno, como se describe, a continuación:

Al mantener la torsión aplicada al perno a altas temperaturas bajo condiciones de presión en un amplio lapso de tiempo, se presentan cambios en su estructura cristalina, debido a la variación en sus propiedades mecánicas, afectando la resistencia de la pieza, haciendo que sea más susceptible a la maleabilidad y deformación bajo las cargas aplicadas, por lo que se reduce la torsión de la unión (BICKFORD, 1990).

Además, las bridas están sometidas a ciclos térmicos y de presión, la presión tiene un impacto en la carga hidrostática final, la cual ejerce fuerzas sobre la conexión bridada y los ciclos

térmicos, así mismo, se pueden dar diferencias en la expansión térmica de los componentes de la unión, debido al calentamiento y enfriamiento. Estos mecanismos pueden causar fluctuaciones en la carga de compresión, incrementando la probabilidad de falla por fuga (Sahoo, 2021).

Por otra parte, para los mecanismos que se dan en la rosca del perno, se realizó el análisis a continuación:

Al someter el perno a altas temperaturas, la pieza va a experimentar mayor deformación plástica, bajo la influencia de tensiones mecánicas, por lo que el perno va a experimentar fluencia, las cargas aplicadas se mantienen iguales, sin embargo, la capacidad de la rosca se reduce, haciendo que sea más susceptible a la deformación por flexión, principalmente se da en la rosca, ya que esta presenta menor rigidez. En el caso de la presión, se ejercen fuerzas sobre la unión, de modo que influye en la carga de compresión, si esta carga no es uniforme, las fuerzas van a desalinearse la posición de la brida, aumentando de manera acelerada la flexión de la rosca (Medvecký, 2020; Sahoo, 2021).

También, las variaciones de temperatura por los ciclos térmicos y la presión, causan tensiones térmicas y aumenta la carga axial, sobre las superficies del contacto que se presenta brida/perno, aumentando la susceptibilidad a la fricción y abrasión, causando más fácilmente desgaste en las roscas de los pernos (Sahoo, 2021).

Por último, se analizaron los efectos causados en el mecanismo en la tuerca del perno, en la dilatación de la tuerca, la acción cíclica aplicada a la pieza, genera que esté sometida a un cambio de temperatura y presión, dando lugar a un constante calentamiento y un posterior enfriamiento, por lo que el perno se va a expandir y contraer de manera intercalada. Cuando se da el enfriamiento se provoca una contracción lo que da como resultado la acumulación de tensiones de tracción y un aumento de la carga axial debido a la presión. Al seguir operando de manera continua el efecto de

la temperatura de enfriamiento y presión, conlleva a que se dé una deformación plástica en la pieza, dando como consecuencia pérdida en la estanqueidad y haciendo que se propaguen con mayor facilidad las grietas, fisuras y posteriormente falle (Wulpi, 2013; Medvecký, 2020).

3.9. Mecanismos de prevención bajo la Norma ASME B16.5

Para prolongar la vida útil de las bridas bajo la normativa ASME B16.5, se recomienda tener en cuenta la selección de materiales, de acuerdo a las necesidades de operación de la brida, ya que dependiendo de la aplicación a la que se va a exponer los factores a tener en cuenta son temperatura y presión. (ASME B16.5-2013)

Las altas temperaturas pueden provocar pérdida de apriete de los pernos, produciendo pérdida de apriete del elemento, de tal forma que resulta más difícil soportar las cargas aplicadas sobre el perno, debido a esto se presentan fugas. La norma estandarizada recomienda prevenir las cargas y gradientes térmicos severos. La clasificación de designación de las bridas se da por ratings: 150,300,400,600,900,1500 o 2500 de acuerdo a esta denominación, se verifica la presión de operación requerida y temperatura para elegir la clasificación de la brida. En la tabla 1 se observa la clasificación de las bridas para un seleccionado grupo de materiales, en los cuales destaca el acero al carbono ASTM A105, C-Si, C-Mn-Si, C-Mn-Si-V, $3^{1/2}$ Ni, A350, señalados en rojo, son ampliamente usado en aplicaciones de accesorios y bridas para tuberías de procesos. Como se señala en rojo en la tabla 1 se indica que, para temperatura ambiente y una presión baja (19,6 bar) lo ideal es trabajar con una brida de rating 150 y, a medida que se necesite una temperatura y/o presión mayor, se vaya aumentando la clasificación de la brida (ASME B16.5-2013).

Tabla 1.*Presiones y temperaturas nominales para materiales*

Designación Nominal	Forjas	Piezas Fundidas	Láminas				
C-Si	A105 (1)	A216 Gr. WCB (1)	A515 Gr. 70 (1)				
C-Mn-Si	A350 Gr. LF2 (1)	...	A516 Gr. 70 (1), (2)				
C-Mn-Si-V	A350 Gr. LF6 Cl 1 (3)	...	A537 Cl. 1 (4)				
3 ¹ / ₂ Ni	A350 Gr. LF3				
Presión de trabajo por clases, bar							
		Clase					
Temp, °C	150	300	400	600	900	1500	2500
-29 to 38	19.6	51.1	68.1	102.1	153.2	255.3	425.5
50	19.2	50.1	66.8	100.2	150.4	250.6	417.7
100	17.7	46.6	62.1	93.2	139.8	233.0	388.3
150	15.8	45.1	60.1	90.2	135.2	225.4	375.6
200	13.8	43.8	58.4	87.6	131.4	219.0	365.0
250	12.1	41.9	55.9	83.9	125.8	209.7	349.5
300	10.2	39.8	53.1	79.6	119.5	199.1	331.8
325	9.3	38.7	51.6	77.4	116.1	193.6	322.6
350	8.4	37.6	50.1	75.1	112.7	187.8	313.0
375	7.4	36.4	48.5	72.7	109.1	181.8	303.1
400	6.5	34.7	46.3	69.4	104.2	173.6	289.3
425	5.5	28.8	38.4	57.5	86.3	143.8	239.7
450	4.6	23.0	30.7	46.0	69.0	115.0	191.7
475	3.7	17.4	23.2	34.9	52.3	87.2	145.3
500	2.8	11.8	15.7	23.5	35.3	58.8	97.9
538	1.4	5.9	7.9	11.8	17.7	29.5	49.2

Nota. Adaptado de (ASME B16.5-2013)

De acuerdo a la resistencia necesaria en la unión bridada se utilizan los materiales de la norma ASME B16.5, se presentan las especificaciones a seguir para elegir los materiales de los pernos, ya sea de alta resistencia, mediana resistencia o baja resistencia de acuerdo a la necesidad. (ASME B16.5-2013)

Para aplicaciones de alta resistencia se emplean los materiales con tensiones permitidas iguales o superiores a ASTM 193 grado B7, estos materiales se pueden usar para cualquier junta bridada, cabe resaltar que su factor económico es considerable. (ASME B16.5-2013)

En el caso de la selección de los pernos para aplicaciones de baja resistencia, se emplean materiales cuyo límite elástico especificado mínimo sea por encima de 206 Mpa, estos u otros con una resistencia semejante deben usarse solo en uniones bridadas de clase 150 y 300. Para aplicaciones que utilizan pernos de aceros de baja resistencia no se recomienda emplear una temperatura por encima de 200°C y por debajo de -29°C. (ASME B16.5-2013)

3.10. Mecanismos de prevención bajo la Norma ASME PCC-1

Un correcto ensamblaje es fundamental para asegurar que la brida funcione de manera óptima. La unión de los distintos componentes impacta en la integridad, eficiencia y seguridad del sistema, Por lo que, a continuación, de acuerdo a la norma ASME PCC-1, se establecen recomendaciones para realizar un correcto ensamblaje de juntas bridadas.

La alineación de juntas bridadas es un requisito indispensable para mantener la estanqueidad de la brida y así soportar la carga máxima de forma uniforme, de tal manera que se minimice la fricción de los pernos, por lo que se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones, para evitar falla por falta de estanqueidad, de acuerdo a la normativa ASME

PCC-1- 2022, el manual para el montaje debe especificar la secuencia del proceso de montaje, controles, medición, verificación, límites de cargas, tolerancias, métodos y herramientas para la alineación.

En caso de ser necesario realizar una evaluación de ingeniería, es importante definir los parámetros para realizar la medición de la alineación inicial y final de la junta. Se deben evaluar ambas mediciones y reportar desalineaciones, que no sea posible corregir con las cargas permitidas. (ASME PCC-1- 2022)

Tabla 2.

Tolerancias comunes de alineación.

Propiedad	Tolerancia Máxima, mm (in.) [Nota (1)]
CL	$1.5^{(1/16)}$
GP	Espesor de la junta $\times 2$
PRL	$0.8^{(1/32)}$
RTH	$3^{(1/8)}$

Nota: (1) Esta tabla debe usarse con los métodos y herramientas de alineación que están descritos a continuación.

Nota. Adaptado de (ASME PCC-1- 2022)

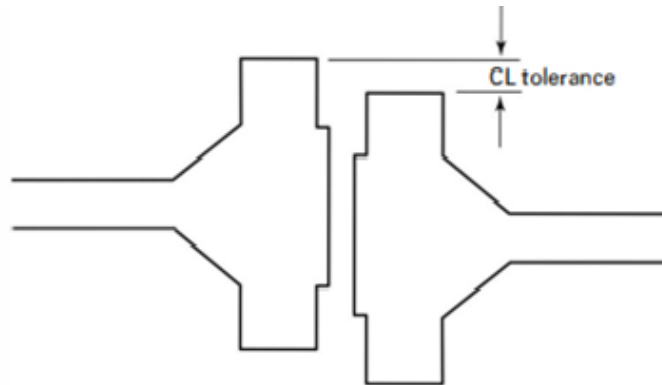
De acuerdo a la tabla 2, los valores máximos de tolerancias indicados en la tabla para cada ítem. Se aconseja llevar a cabo, la medición de las tolerancias para verificar la alineación de la brida:

Tomar la tolerancia de la línea central (CL) de la brida, en cuatro puntos con una distancia de 90° entre cada medida, se debe colocar la regla en el eje, en la posición (0,0), se extiende la regla hasta la brida adyacente para realizar la medición de la distancia de la superficie del borde

recto hasta la misma superficie en la brida adyacente, asegurándose de que se encuentran alineadas (ver figura 18). (ASME PCC-1- 2022)

Figura 18.

Medida de tolerancia de la línea central.

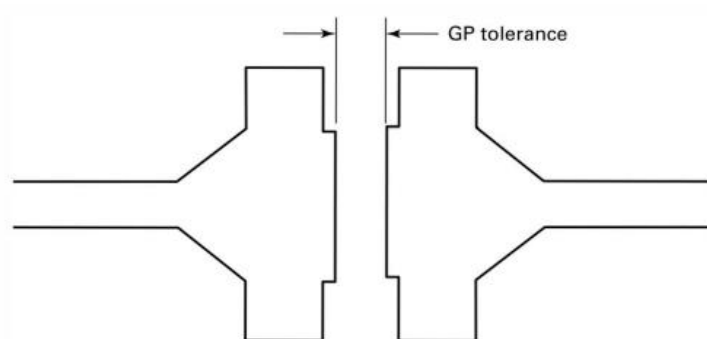


Nota. Tomado de (ASME PCC-1- 2022)

Se sugiere llevar a cabo la medición de la tolerancia de espacios (GP), la cual se realiza entre las superficies de asiento de las bridas (ver figura 19), esta tolerancia debe permanecer dentro de los valores establecidos en la tabla 2. (ASME PCC-1- 2022)

Figura 19.

Medida de tolerancia de espacio excesivo.

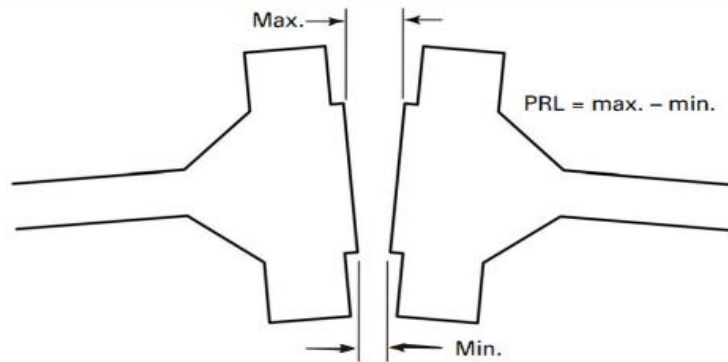


Nota. Tomado de (ASME PCC-1- 2022)

Se aconseja efectuar la medición del paralelismo (PRL), lo cual hace referencia a la uniformidad de la distancia entre el sellado de las superficies de las dos caras de las bridas adyacentes (ver figura 20). Se debe calcular mediante la diferencia entre la mayor y la menor distancia entre las superficies, tomando desde el punto de sellado (0,0). Esto garantiza una compresión uniforme de la junta antes, durante y después del ajuste. (ASME PCC-1- 2022)

Figura 20.

Medida de tolerancia de paralelismo.

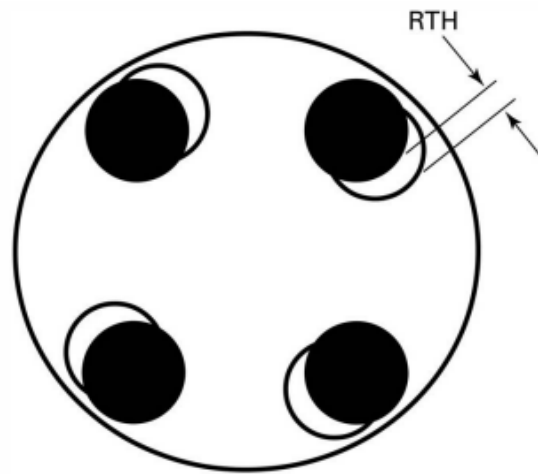


Nota. Tomado de (ASME PCC-1- 2022)

Se recomienda garantizar la alineación de los dos orificios rotacionalmente entre sí (RTH), de tal manera, que se pueda realizar el montaje de los pernos perpendicularmente (ver figura 21). (ASME PCC-1- 2022)

Figura 21.

Alineación de dos orificios de rotación.



Nota. Tomado de (ASME PCC-1- 2022)

Por otra parte, es fundamental, contar con una correcta alineación de juntas de brida, por lo que el manual de montaje debe especificar los métodos para garantizar la integridad de la brida. Es importante inspeccionar la junta para asegurarse que no presente daños o defectos y cumpla con las dimensiones especificadas. El proceso de instalación de la junta, se debe realizar con un método aprobado, garantizando que la empaquetadura se mantenga en su posición, alineándola de manera concéntrica con el diámetro interior de la brida para proporcionarle soporte a la junta en el proceso de posicionamiento. Además, se debe verificar que ninguna sección de la cara de sellado de la junta sobresalga hacia la trayectoria del flujo. Por último, es importante resaltar que se debe evitar la aplicación de cinta adhesiva u otros materiales sobre la junta de sellado de la junta, así mismo, no aplicar grasa ni pasta selladora en la junta o brida. (ASME PCC-1- 2022)

Después de la alineación, se realiza la instalación de pernos, en la que se aconseja verificar que los elementos del sistema cumplen con las especificaciones necesarias, como: la longitud mínima que pueden tener los pernos para que se adapten a todo el sistema de sujeción. El perno

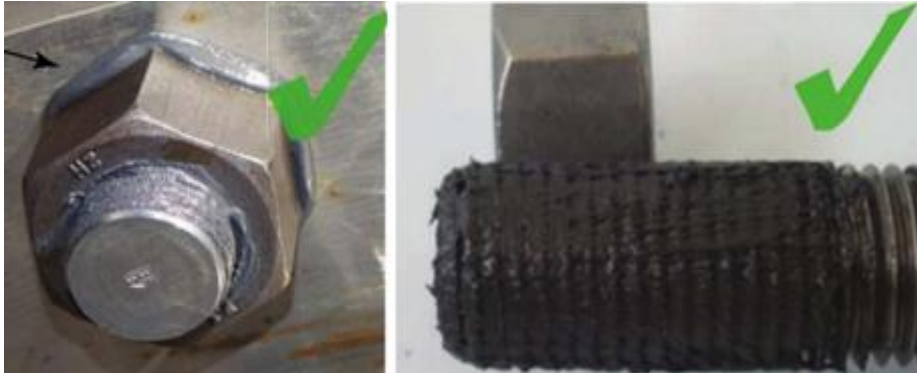
debe tener un tamaño acorde a la brida, ya que no se recomienda que el tornillo sobresalga de la superficie, porque puede generar problemas para realizar el desmontaje debido a corrosión, pintura, entre otros.

Al realizar el montaje, las tuercas se deben apretar manualmente y posteriormente se les debe aplicar una fuerza 15 N·m a 30 N·m (10 ft-lb a 20 ft-lb) a los pernos, de tal manera que no se exceda el 10% de la carga total del perno, asegurándose de posicionar la marca de identificación hacia afuera facilitando la inspección. En el caso, de montajes que implican tensión en pernos, la longitud de estos debe permitir que la parte roscada del perno este un diámetro por encima de la cara exterior de la tuerca del lado del tensor de la junta. (ASME PCC-1- 2022)

Asimismo, el lubricante es una parte importante del proceso de unión en la instalación de pernos, por lo que es necesario verificar que sea compatible con el fluido y sistema de sujeción, en caso de que no sea así, generará fallas relacionadas a la corrosión bajo tensión, galvánica, o autoignición en servicio de oxígeno. Es necesario, aplicar lubricante sin importar el método de unión. Se debe aplicar en todo el sistema de sujeción, a excepción de la junta y las superficies de asiento de esta, la forma correcta de realizar el procedimiento es llenar las roscas desde la raíz hasta la cresta del extremo del perno y en el lugar donde se ajustan las caras de la rosca (ver figura 22). (ASME PCC-1- 2022)

Figura 22.

Aplicación del lubricante debe dejar una marca visible.



Nota. Tomado de (ASME PCC-1- 2022)

Por último, el apriete es un paso crítico en el montaje, por ello la guía de montaje debe especificar: El método de apriete aprobado y las herramientas requeridas para llegar a éste, si se requiere el uso de una o más herramientas, la secuencia de apriete, indicaciones del número de pasadas y el incremento de carga por pasada. (ASME PCC-1- 2022)

El grado del servicio que presta la brida determina el tipo de herramientas para realizar el ajuste, se clasifican en: Leve, se recomienda realizar el apriete con herramientas manuales o auxiliares, en el caso de un nivel intermedio, se usan herramientas manuales o auxiliares o par tensión-torsión, cuando es crítico se recomienda realizar el apriete con el par tensión-torsión. (ASME PCC-1- 2022)

3.11. Mecanismos de prevención bajo la Norma API 571-2020

Con el propósito de prevenir la formación de corrosión atmosférica, se debe realizar una correcta preparación de la superficie y aplicar pintura o revestimiento para asegurar una protección óptima a largo plazo. (API 571-2020)

Figura 23.

Corrosión atmosférica.



Nota. Tomado de (API 571-2020)

Para evitar las fallas por fractura frágil se debe mantener un control de las condiciones de operación: temperatura y presión. Por lo que, se debe bajar a la presión mínima y la temperatura a ambiente durante los arranques y paradas. También es primordial seleccionar un material con mayor tenacidad a una temperatura baja, como un grado de acero ASTM/ASME con un % de níquel o un acero inoxidable austenítico serie 300 y realizar inspecciones periódicas de los puntos críticos de la pieza. (API 571-2020)

Para evitar los problemas asociados a la corrosión galvánica, no se recomienda unir materiales con diferentes potenciales químicos en la brida, pernos y accesorios. En cambio, se sugiere aplicar un recubrimiento en el ánodo y cátodo para minimizar si se tienen dos materiales diferentes, en el caso de solo aplicar recubrimiento a una de las partes, se debe aplicar al material que actúe como cátodo minimizando la velocidad de corrosión. Por otro lado, es necesario eliminar las corrientes eléctricas, ya que aceleran el proceso de corrosión e instalar ánodos de sacrificio, que operan como elemento menos estable, cediendo sus electrones, disminuyendo la velocidad. (API 571-2020)

Para prevenir los ataques por hidrógeno a alta temperatura, se recomienda utilizar para la fabricación de bridas y conexiones, tuberías de procesos, aceros aleados con cromo, molibdeno, vanadio o tungsteno, reduciendo la formación de metano. Además, es común utilizar recubrimientos de aceros inoxidables serie 300 o 400, los cuales se aplican a los materiales base para prevenir los daños por hidrógeno a altas temperatura. (API 571-2020)

Con el fin de prevenir las fallas por fatiga mecánica en equipos fijos, es esencial considerar un enfoque completo que abarque la selección de un material resistente para el servicio cíclico de la brida como un diseño adecuado para evitar puntos de concentración de tensiones. También, es necesario instalar amortiguadores para mitigar las vibraciones del sistema, lo que contribuye a minimizar y eliminar la aparición de vórtices, proporcionándole estabilidad al flujo. Es importante eliminar los defectos superficiales de la pieza por procesos de esmerilado, garantizando un buen funcionamiento. En el caso de los equipos rotativos, es fundamental seleccionar un material que se ajuste a los requerimientos cíclicos del equipo. En el diseño, es importante considerar un radio amplio en los bordes y esquinas, especialmente en los chaveteros de los ejes. Por último, se deben eliminar los defectos superficiales de la pieza como rebabas provenientes de procesos de mecanizado. (API 571-2020)

4. Conclusiones

Se estableció por medio de la revisión bibliográfica que los mecanismos de falla más comúnmente presentados en tornillos de uniones bridadas son: fractura, corrosión, aflojamiento por vibración, torsión, pérdida de la fuerza de apriete, compresión, dilatación de tuerca y flexión y desgaste en la rosca. Estos mecanismos se ven influenciados por fuerzas de tracción, flexión, torsión, tensiones cíclicas, vibraciones, impactos, fluctuaciones térmicas, presencia de hidrogeno, el material de la pieza y la interacción con el entorno. Es importante comprender la interacción entre estos mecanismos para tomar enfoques que permitan mitigar las fallas.

Se determinó que la temperatura y presión, tienen gran influencia sobre los mecanismos de falla en pernos, ya que, en todo momento están presentes en la operación de las bridas, por lo que, al presentar fluctuaciones de temperatura y presión, se van a producir cambios en las propiedades mecánicas de los materiales y un aumento en las cargas ejercidas sobre la pieza, afectando su resistencia e incrementando el riesgo de falla. Se concluye que es importante, considerar el impacto de la temperatura y presión, por lo que, se deben tener en cuenta las condiciones de operación a las que va a trabajar la brida, para garantizar la integridad y un funcionamiento óptimo.

Es esencial regirse bajo normativa para asegurar un funcionamiento óptimo y seguro, las norma ASME B16.5, ASME PCC-1 Y API 571, contribuyen con mecanismos de prevención. La norma ASME B16.5, propone estrategias que permiten evitar fallas al realizar la selección según las especificaciones de la norma de la brida dependiendo de las variables operacionales de temperatura y presión requeridas, también las especificaciones para elegir los materiales del empernado de acuerdo a la resistencia necesaria. La norma ASME PCC-1 contribuye al correcto ensamble de juntas de recipientes a presión, con mecanismo que permiten la reducción de fallas por fugas, el cálculo de fuerza de torque de apriete, secuencias y métodos para aplicar este, la

lubricación del sistema de sujeción evitando fricción. Por último, la norma API 571, permite la evaluación y propone mecanismos de prevención y mitigación, sobre mecanismos de daño de equipos, lo que anticipar los daños y tomar precauciones, prolongando la vida útil de la brida. Estas tres normas son clave para preservar la integridad de la brida garantizando operar de manera segura y eficiente.

Referencias Bibliográficas

- Abid, M., Khalil, M. S., & Wajid, H. A. (2015). AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE RELAXATION OF BOLTS. In *IJUM Engineering Journal* (Vol. 16, Issue 1).
- ASME B16.5.(2013) Pipe Flanges and Flanged Fittings NPS ½ Through NPS 24 Metric/Inch Standard. Nueva York, NY: American Society of Mechanical Engineers.
- ASME PCC-1-2022. Pressure Boundary Bolted Flange Joint Assembly. Nueva York, NY: American Society of Mechanical Engineers.
- API 571. (2020). Damage Mechanisms Affecting Fixed Equipment in the Refining Industry. Washington, DC: American Petroleum Institute.
- Bickford, J. H. (1990). Bolt torque: Getting it right. *Machine Design*, 62(13), 67. Retrieved from <https://www-proquest-com.bibliotecavirtual.uis.edu.co/trade-journals/bolt-torque-getting-right/docview/217147148/se-2>
- Balan, K. P. (2018a). Fatigue. In *Metallurgical Failure Analysis* (pp. 133–154). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814336-0.00008-1>
- Balan, K. P. (2018b). Fracture. In *Metallurgical Failure Analysis* (pp. 7–16). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814336-0.00002-0>
- Balan, K. P. (2018d). Hydrogen Embrittlement and Stress Corrosion Cracking. In *Metallurgical Failure Analysis* (pp. 179–202). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-814336-0.00010-x>
- Balan, K. P. (2018e). Wear. In *Metallurgical Failure Analysis* (pp. 203–233). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814336-0.00011-1>

- Cramer, Stephen D. Covino, Bernard S., Jr.. (2003). ASM Handbook, Volume 13A - Corrosion: Fundamentals, Testing, and Protection - Fundamentals of Corrosion.(pp. 1). ASM International. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007P0P44/asm-handbook-volume-13a/fundamentals-corrosion>
- Chen, H. S., Tseng, P. T., & Hwang, S. F. (2006). Failure analysis of bolts on an end flange of a steam pipe. *Engineering Failure Analysis*, 13(4), 656–668. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.10.019>
- Domínguez Gómez, Wojcik Filipek, & Cruz Morales. (2006). Medición de la fuerza de apriete en un ensamble, utilizando un tornillo autorroscante. *Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal*, 2, 53-62. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=76820203>
- Elshawesh, F., Abusowa, K., Mahfud, H., & Ezuber, H. (2008). Stress-corrosion cracking and galvanic corrosion of internal bolts from a multistage water injection pump. In *Journal of Failure Analysis and Prevention* (Vol. 8, Issue 1, pp. 48–53). <https://doi.org/10.1007/s11668-007-9109-2>
- Gao, S., Li, J., Guo, L., Bai, Q., & Li, F. (2022). Mechanical properties and low-temperature impact toughness of high-strength bolts after elevated temperatures. *Journal Of Building Engineering*, 57, 104851. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104851>
- Gong, H., Ding, X., Liu, J., & Feng, H. (2022). Review of research on loosening of threaded fasteners. In *Friction* (Vol. 10, Issue 3, pp. 335–359). Tsinghua University. <https://doi.org/10.1007/s40544-021-0497-1>
- González, Matos, Ayaso, & Toribio. (2008). *COMPORTAMIENTO EN FATIGA DE UNIONES ROSCADAS*.

- Grimsmo, E. L., Aalberg, A., Langseth, M., & Clausen, A. H. (2016). Failure modes of bolt and nut assemblies under tensile loading. *Journal of Constructional Steel Research*, 126, 15–25. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2016.06.023>
- Guo, Q., Ma, H., Lu, Y., Wang, S., & Chen, Q. (2023). Experimental study on fatigue performance of corroded high-strength bolts under axial force. *Journal of Constructional Steel Research*, 207. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2023.107952>
- Jaramillo, H., De Sánchez, A., Canizales, N. C., Juan Pablo Toro, & Álvaro José. (2008). *Introducción a la mecánica de la fractura y análisis de fallas* (1.^a ed.). <https://hdl.handle.net/10614/13853>
- Jiang, C., Xiong, W., Cai, C. S., Zhu, Y., & Wang, J. (2022). Preload loss of high-strength bolts in friction connections considering corrosion damage and fatigue loading. *Engineering Failure Analysis*, 137. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106416>
- Khanzhin, V. G., Nikulin, S. A., Khanzhin, O. V., Turilina, V. Y., Smarygina, I. V., & Rogachev, S. O. (2014a). Hydrogen embrittlement of steels: V. Delayed fracture of bolts. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2014(4), 336–340. <https://doi.org/10.1134/S0036029514040041>
- Kodur, V., Yahyai, M., Rezaeian, A., Eslami, M., & Poormohamadi, A. (2017). Residual mechanical properties of high strength steel bolts subjected to heating-cooling cycle. *Journal of Constructional Steel Research*, 131, 122–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2017.01.007>
- Martínez Zarco. (s. f.). *Sistema Experto prototipo para el análisis de fallas en tornillos ferrosos* [Tesis de pregrado, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO]. <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/5862/3/Sistema%20>

experto%20prototipo%20para%20el%20análisis%20de%20fallas%20en%20tornillos%20ferrosos.pdf

Medvecký, S., Hrček, S., Kohar, R., Brumerčik, F., & Konstantová, V. (2020). *Current Methods of Construction Design: Proceedings of the ICMD 2018* (1st ed. 2020.). Springer International Publishing AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-33146-7>

Mills, Kathleen Davis, Joseph R.. (1987). ASM Handbook, Volume 12 - Fractography - 1. History of Fractography. (pp. 1). ASM International. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt007P3DF6/asm-handbook-volume-12/history-fractography>

Ren, F., & Wu, X. (2019). Fracture failure analysis of flange connecting bolt. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 631(3). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/631/3/032060>

Sahoo, T. (2021). *Root Cause Failure Analysis: A guide to improve plant Reliability* (First Edition). <https://doi.org/10.1002/9781119615606>

Sawa, T., Ogata, N., & Nishida, T. (2002). Stress analysis and determination of bolt preload in pipe flange connections with gaskets under internal pressure. *Journal of Pressure Vessel Technology, Transactions of the ASME*, 124(4), 385–396. <https://doi.org/10.1115/1.1511736>

Shaheen, M. A., Foster, A. S. J., Cunningham, L. S., & Afshan, S. (2020). Behaviour of stainless and high strength steel bolt assemblies at elevated temperatures — A review. In *Fire Safety Journal* (Vol. 113). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.102975>

Stiven, W., Rojas, P., & Cortes Pineda, J. A. (2018). *Análisis de falla de pernos de acero*.

Tovar, G., & Profesor Investigador, S. (n.d.). *Análisis de falla de componentes de ingeniería*.

Valles González, P., Pastor Muro, A., & García-Martínez, M. (2020). Failure analysis study on a fractured bolt. *Engineering Failure Analysis*, 109.

<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.104355>

Vega Guerovich. (2013). *Analisis de falla en pernos de bombas KSB DE 800 HP* [Tesis de pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú].

<http://hdl.handle.net/20.500.12404/5333>

Wulpi, D. J. (2013). *Understanding how components fail* (B. Miller, Ed.; 3rd ed.). ASM International. <https://doi.org/10.31399/asm.tb.uhcf3.9781627082709>