

ANÁLISIS DE FALLA DE TORNILLO DE FIJACIÓN DE BUS DE TRANSPORTE PUBLICO DE ALTA CAPACIDAD.

FAILURE ANALYSIS OF A SET SCREW FROM A HIGH-CAPACITY PUBLIC TRANSPORTATION BUS

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS



Medina Lozano Juan Francisco
Torres Caycedo Joseph Damian
García Rodríguez Alejandro

Cra. 9 #51-11, Bogotá

Abstract

Context: This article analyzes the failure of a fastening bolt belonging to the casing of a public transport vehicle in Bogotá, Colombia.

Objective: To propose an effective way to carry out preventive maintenance of the screw, based on the findings of the research.

Methodology: Analytical tools such as scanning electron microscopy (SEM), optical emission spectrometry (OES), and metallographic techniques were employed. The methodology was divided into stages that included a visual characterization of the screw and the identification of its materials, chemical composition, and treatments.

Results: In the visual inspection, corrosion post-storage, thread flattening (plastic deformation), and abrasive wear along most of the screw and its coating were observed. In the fractography and SEM analysis, evidence of tearing in the threads was found; furthermore, due to the orientation of the threads, it was determined that they were subjected to tensile loading. Through metallography and the optical emission spectrometry process used for chemical composition, it was revealed that the screw is made of AISI-SAE 4140 steel with excess C and lack of Mn, based on both the metallographic grain structure and the element percentages in the chemical composition.

Conclusions: The analyzed set screw exhibited multiple failures associated with its operation, including surface wear and deformation. The most probable cause of failure is high preload due to the tearing failure mode. Metallography and chemical composition confirmed that the screw material is AISI-SAE 4140 steel. The latter

revealed an excess of carbon and a deficiency of manganese, which increases hardness and reduces the toughness of the screw. The hardness and UTS properties comply with the standards. This study provides key evidence to strengthen preventive maintenance plans in public transportation companies, helping to avoid catastrophic failures through preload control and early screw characterization.

Keywords: Failure analysis, fastening screw, preventive maintenance, scanning electron microscopy, 4140 steel, corrosion, wear.

Resumen

Contexto: Este artículo analiza la falla de un tornillo de fijación perteneciente a la carcasa de un vehículo de transporte público en Bogotá, Colombia.

Objetivo: Proponer una forma eficaz de realizar el mantenimiento preventivo del tornillo, basándose en los hallazgos de la investigación.

Metodología: Se emplearon herramientas de análisis como la microscopía electrónica de barrido (SEM), la espectrometría de emisión óptica (OES) y técnicas metalografía. La metodología se dividió en etapas que incluyeron una caracterización visual del tornillo y la identificación de sus materiales, composición química y tratamientos.

Resultados: En la inspección visual se observó corrosión post almacenamiento, aplastamiento de filete (deformación plástica) y desgaste abrasivo a lo largo de la mayor parte del tornillo y su recubrimiento. En la fractografía y análisis SEM, se observó evidencia de desgarre en los filetes, también, debido a la orientación de los filetes se determinó que fueron cargados a tensión. Mediante la metalografía y el proceso de espectrometría de emisión óptica usada para

la composición química, se reveló que el tornillo está hecho de acero AISI-SAE 4140 con exceso de C y falta de Mn en base tanto a los granos de la metalografía y los porcentajes de los elementos en la composición química.

Conclusiones: El tornillo de fijación analizado presentó múltiples fallas asociadas a su operación, incluyendo desgaste superficial y deformación. La causa de falla más probable es una alta precarga debido al modo de falla de desgarre. La metalografía y composición química confirmaron que el material del tornillo es acero AISI-SAE 4140. Esta última reveló un exceso de carbono y una deficiencia de manganeso, lo que incrementa la dureza y reduce la tenacidad del tornillo. Las propiedades de dureza y UTS cumplen con la normativa. Este estudio aporta evidencia clave para fortalecer los planes de mantenimiento preventivo en empresas de transporte público, ayudando a evitar fallas catastróficas mediante el control de precarga y la caracterización temprana de tornillos.

Palabras clave: Análisis de falla, tornillo de fijación, mantenimiento preventivo, microscopía electrónica de barrido, acero 4140, corrosión, desgaste.

Introducción – Introduction

Los tornillos son componentes mecánicos esenciales para asegurar la integridad estructural de distintas máquinas. Uno de los campos más influyentes de los tornillos es el vehicular, siendo un componente esencial para carrocerías ya que permite el acople entre diversas partes del vehículo [1]. En Colombia, dentro de la industria del transporte público, los buses se caracterizan por ofrecer altos estándares de seguridad, por lo que las empresas asociadas a esta industria establecen planes de mantenimiento correctivo alineados a las normativas [2]. Los tornillos se

caracterizan por ser fácilmente reemplazables debido a su bajo precio, sin embargo, a largo plazo, el tiempo y dinero gastados en reemplazar un tornillo constantemente pueden resultar en incrementar tiempos de inactividad y aumentar costos [3]. Distintos factores pueden afectar el tiempo de vida útil de un tornillo, como su selección, el almacenamiento, los procesos de fabricación y las condiciones de trabajo. En la Figura 1 se muestran los principales modos de carga en tornillos y pernos.

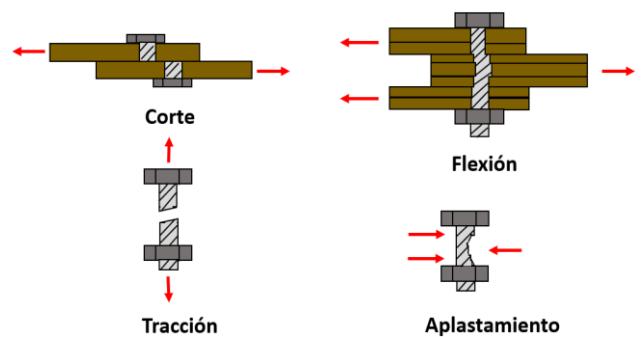


Figure 1. Modos de carga en tornillos.

Fuente:
Autores.

Los tornillos presentan dos tipologías de falla: súbita y progresiva. Estas tipologías están asociadas al funcionamiento del componente, por lo cual, la fractura o falla cambia según cada caso [4]. La falla súbita ocurre de forma repentina en un instante concreto durante el servicio del tornillo sin posibilidad de prevención. Este tipo de falla se puede deber a factores como sobrecarga en operación, una inadecuada selección del tornillo, defectos de manufactura, operaciones descuidadas, alto impacto mecánico, ensamble defectuoso, entre otros [10]. En la bibliografía existen algunas investigaciones que realizan un análisis forense sobre componentes de fijación, entre los más relevantes se encuentra el efectuado por Yamira [11] donde se estudia la metodología de falla súbita sobre un perno de fijación manufacturado por técnicas de remoción de

viruta. En el estudio se identificó que la pérdida de precarga, combinada con vibraciones y cargas a tensión, provocó la pérdida de torque de los pernos, culminando en una fractura frágil. Los autores concluyen que probablemente la causa de falla fue una sobrecarga en operación debido al fallo del regulador de velocidad de rotación del motor.

Por otro lado, las fallas de tipo progresiva están relacionadas a largos periodos de tiempo, mostrando indicios de falla durante la vida útil del tornillo; los mecanismos de falla progresiva más comunes en tornillos son fatiga, corrosión, desgaste y sus respectivas sinergias [4]. El 90% de las fallas en uniones atornilladas están asociadas a la fatiga [9]. Cuando un tornillo sobrepasa el límite de resistencia a la fatiga la superficie de fractura avanzará hasta el frente de grieta, reduciendo la cantidad de material del componente e incrementado el esfuerzo aplicado hasta superar el UTS [6]. Los defectos relacionados a la fatiga son evidenciables como marcas de playa o grietas [12]. Existen estudios asociados al análisis de falla de tornillos como el realizado por Chunxia et al [5]. Los autores estudiaron un tornillo que presentó una falla en servicio. La metodología empleada consistió en realizar análisis de las propiedades mecánicas (Dureza, Esfuerzo a tensión), composición química e inspección microestructural para determinar las causas más probables de la falla. Los autores observaron grietas en el mecanizo, las cuales generaron concentradores de esfuerzo, puntos en los que el frente de grieta comenzó a desarrollarse hasta provocar la falla del tornillo.

Los tornillos, expuestos a entornos de trabajo hostiles, enfrentan, además de fatiga, mecanismos de falla interrelacionados que actúan de forma sinérgica. Entre estos, la

corrosión emerge como un fenómeno crítico, provocado por reacciones químicas entre el material y el ambiente [8]. Por ejemplo, la oxidación post-almacenamiento se manifiesta como depósitos naranjas, mientras que la corrosión en operación genera depósitos negros, ambas debilitando la integridad estructural del tornillo [7]. Este proceso no siempre actúa de manera aislada, en ambientes dinámicos, la combinación de esfuerzos cíclicos y agentes corrosivos desencadena corrosión-fatiga, un mecanismo sinérgico que acelera la propagación de grietas debido al efecto acumulativo de tensiones mecánicas y degradación química [7].

Además de los factores ambientales, el desgaste mecánico juega un papel determinante. Dada la naturaleza de la junta, a menudo existe fricción debido al deslizamiento cíclico entre las crestas de los materiales, lo que hace que uno de ellos seda al contacto abrasivo [8]. Especialmente en elementos de fijación como los tornillos el desgaste es más crítico ya que aspectos como la falta de lubricación favorecen la formación de microgrietas, acelerando el deterioro del tornillo [8]. En el estudio realizado por Fut et al [16] se analiza la falla de un tornillo en servicio mediante distintos tipos de ensayos mecánicos, identificando que el desgaste actúa como precursor de grietas, generando distintos concentradores de esfuerzos haciendo más fácil la generación de fracturas.

No solo el desgaste es determinante a la hora de entender la falla de un tornillo, el aplastamiento de filete está fuertemente relacionado a evidencias de deformación plástica, teniendo en cuenta la dirección de la carga, los filetes pueden desviarse en una dirección u otra, este es el primer indicio de este efecto de falla, si la deformación es muy

severa va a llegar un punto en que el filete pase de estar comprimido o doblado a desaparecer por completo, derivando en un modo de falla común en fallos de tornillos denominado stripping o desgarre [9]. Un estudio realizado por Grimsmo et al analiza el modo de falla de desgarre por medio de pruebas de tensión en tornillos, corroborando el estudio con análisis de propiedades mecánicas y simulaciones de elementos finitos (FE) [12]. La investigación de Grimsmo et al concluye que este modo de falla depende de factores como el material del tornillo, la precarga o la longitud de la rosca.

Durante el proceso de análisis de falla es importante comprender que los mecanismos de falla suelen verse asociados a causas de falla, estas pueden estar relacionadas a defectos de diseño, fabricación, mantenimiento e instalación. Todos estos pueden estar vinculados entre sí y ser consecuentes uno del otro, por ejemplo, desde el diseño se establece un valor de precarga para una aplicación en concreto, sin embargo, el tornillo puede ser utilizado para otra aplicación diferente, provocando una falla prematura. También se puede presentar el caso en que la falla haya sido pronosticada y la causa de falla se enfoque en factores operativos predecibles. En cualquier caso, es importante delimitar ciertos aspectos del tornillo para identificar la causa de falla rápidamente [13].

Teniendo en cuenta lo anterior, los tornillos pueden fallar en distintas partes, sin embargo, estudios sugieren que el 65% de fallas en un tornillo de fijación ocurren en la junta, punto en donde se concentran los máximos esfuerzos aplicados durante el servicio del tornillo [9]. Dada la tensión en la junta, los filetes del tornillo pueden estar sometidos ya sea a compresión o tensión, principio que se evidencia con la deformación de la rosca. Dos de los factores más importantes a la hora de

detectar la falla son la precarga del tornillo y su carga en operación, los cuales pueden traer consecuencias como pérdida de torque o desgaste.

Es importante mencionar ciertos factores teóricos relevantes en el diseño del tornillo, ya que estos facilitan la identificación de la causa de falla más probable. Con respecto a la fatiga es importante tener en cuenta el esfuerzo aparente, medio, máximo y mínimo, así como el tipo de carga variable y los efectos involucrados [6].

El desgaste depende de factores como el área superficial, área aparente, volumen de desgaste y la fuerza de coulomb, así como propiedades de material como la rugosidad y dureza. Además de los factores de diseño, aspectos adicionales como la limpieza del tornillo, aspereza, acabado superficial, velocidad de deslizamiento o lubricante son relevantes para vincular una falla en un tornillo con el desgaste.

Dada la importancia de establecer planes preventivos en sistemas de mantenimiento en industrias vehiculares, es necesario caracterizar la falla de los tornillos dentro de un plan de mantenimiento preventivo con fines de agilizar el proceso de detección de fallas y aumentar la disponibilidad del vehículo [10].

Lograr determinar con éxito una falla por medio del análisis de falla conlleva a varias ventajas, como las son disminuir costos de mantenimiento y operación, omitir tiempos de inactividad, evitar riesgos de seguridad, contribuir a la determinación de la causa raíz, aumentar la confiabilidad, cumplir con las normativas, entre otros. En términos de elementos de máquina como tornillos, este tipo de análisis permite identificar si la falla se originó por un error de diseño, un mal proceso de fabricación, un montaje inadecuado o por

condiciones de operación fuera de lo establecido. Además, facilita establecer planes de mantenimiento preventivo al mejorar los criterios de selección de materiales reduciendo la probabilidad de fallas recurrentes. De esta forma, no solo se asegura la integridad del componente, sino también la seguridad de todo el sistema mecánico en el que se encuentre involucrado.

Al equipo de investigación se le entregó un tornillo de fijación proveniente de un bus de transporte público ubicado en la sección de la carcasa del vehículo, este tenía la función de unir la sección plástica del bus con su sección metálica. El objetivo de esta investigación es fortalecer el catálogo de fallas de las empresas de transporte público por medio de la determinación de la causa de falla. Para cumplir el objetivo, se implementará una metodología que integre caracterización superficial mediante inspección visual, fractografía y microscopía electrónica de barrido (SEM). También se realizará un análisis metalográfico para evaluar la microestructura del material, complementándolo con espectrometría de emisión óptica (OES) para determinar composición química, además de realizar ensayos de dureza (RHC) para identificar esta propiedad mecánica. Se busca validar los resultados obtenidos con normativas como la ISO 898-1. Los hallazgos se relacionarán con los modos de falla identificados, lo que permitirá obtener una serie de conclusiones al final del estudio. Por lo anterior, en la presente investigación se realizó la siguiente metodología.

Metodología - Methodology

El estudio se dividió en dos etapas principales, complementadas con técnicas analíticas específicas:

Etapas 1: Evaluación del Desgaste y Corrosión

1.1. Inspección Visual y Documentación Fotográfica

Objetivo: Capturar imágenes que permitan identificar cualquier detalle sobre la superficie del tornillo.

Procedimiento:

- Preparación del tornillo:
 - Se ubica el tornillo sobre una superficie de color azul.
 - Se ilumina la superficie en donde está ubicado el tornillo.
- Registro fotográfico:
 - Captura de imágenes en múltiples ángulos (vista superior, lateral, frontal y detalles de zonas críticas).
 - Uso de iluminación uniforme y difusa para minimizar reflejos y resaltar texturas.

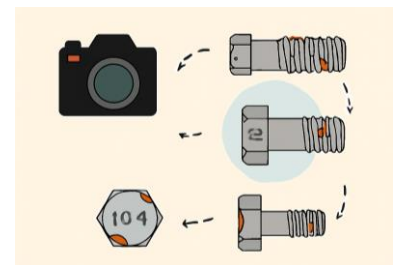


Figure 2: Ejemplo de toma de fotografías.

Fuente: Copilot IA.

- Ejecución de análisis:
 - Inspección fotográfica de

oxidación superficial, con tonalidades que varían de naranja o negro.

- Detección de grietas o picaduras en superficies críticas.

1.2. Análisis Estereoscópico

Equipo: Microscopio estereoscópico (con capacidad de aumento 100x) y sistema de iluminación ajustable.



Figure 3: Microscopio utilizado.

Fuente: Autores.

Objetivo: Examinar macro-deformaciones y grietas superficiales en el tornillo para caracterizar su morfología y distribución.

Procedimiento:

- Preparación de la Muestra:
 - Limpieza superficial no abrasiva con aire comprimido para eliminar partículas sueltas sin alterar las características.
 - Fijación del tornillo en un soporte ajustable para garantizar estabilidad durante la observación.

○ Configuración del Microscopio:

- Selección de aumentos bajos o medios (10x y 20X) para análisis general, y aumentos mayores (40X) para detalles específicos.
- Ajuste de la iluminación: Iluminación para resaltar relieves y grietas en superficie.

○ Ejecución de análisis:

- Barrido secuencial de la superficie del tornillo, priorizando zonas críticas.
- Uso de filtros para reducir reflejos en superficies metálicas y mejorar el contraste.

○ Documentación:

- Captura de imágenes estereoscópicas.
- Registro de coordenadas o marcas de posición.

Etapas 2: Análisis de Material y Propiedades Mecánicas

2.1 Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

Equipo: Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

Objetivo: Caracterizar la microestructura en zonas críticas (filetes de la rosca).

Procedimiento:

- Preparación de la Muestra:
 - Configuración de la máquina SEM adecuada para la muestra en cuestión.
 - Posicionamiento adecuado de la muestra en la máquina.
- Ejecución de análisis:
 - Mapeo de zonas críticas mediante barridos de alta resolución.
 - Identificación de características microestructurales:
 - Porosidad, inclusiones no metálicas o segregaciones químicas.
 - Deformación plástica localizada.
- grit).
 - Pulido final.
- Ataque Químico:
 - Aplicación de nital al 2-5% (ácido nítrico en etanol) para revelar bordes de grano y fases.
 - Tiempo de ataque controlado (5-10 segundos) para evitar sobre corrosión.
- Observación Microscópica:
 - Uso de microscopio óptico con diferentes aumentos (10x – 40x).
 - Registro fotográfico de las microestructuras.

2.2. Estudio Metalográfico

Objetivo: Evaluar la microestructura del material para determinar fases predominantes y calidad del tratamiento térmico.

Procedimiento:

- Preparación de Muestras:
 - Corte: Uso de sierra de corte abrasivo con refrigerante para evitar sobrecalentamiento.
 - Inclusión: Encapsulado en resina termoendurecible para facilitar manipulación.
 - Desbaste y Pulido:
 - Secuencia de lijado con papeles abrasivos (80-1200

2.3 Análisis Químico

Técnica: Espectrometría de emisión óptica.

Objetivo: Verificar conformidad de la composición química con la norma AISI-SAE 4140.

Procedimiento:

- Preparación de la Muestra:
 - Limpieza de la superficie para eliminar óxidos y contaminantes.
 - Aplicación de alcohol isopropílico para desengrasar y secado con aire comprimido.

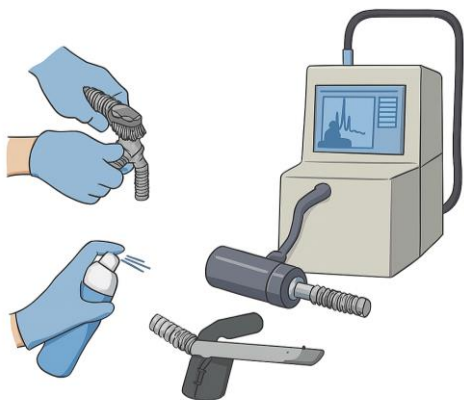


Figure 4: Procedimiento del análisis químico.

Fuente: Copilot IA.

- Ejecución del Análisis:
 - Medición de elementos clave según AISI-SAE 4140:
 - Elementos principales: Fe, C, Cr, Mo, Mn.
 - Elementos traza: Si, S, P (control de impurezas).

2.4 Pruebas de Dureza

Norma: ISO 898-1 (Grado 10.9).

Objetivo: Verificar por medio del equipo que el tornillo tenga la resistencia mecánica adecuada.

Equipo: Durómetro Rockwell C (HRC).

Prueba de Dureza Rockwell C (HRC) Norma: ISO 898-1 (Grado 10.9)

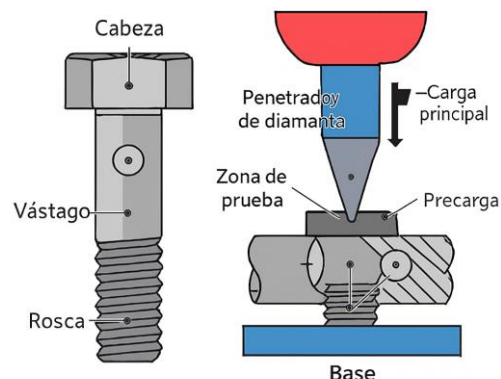


Figure 5: Diagrama del equipo de dureza y del tornillo.

Fuente: Copilot IA.

Procedimiento:

- Preparación de la Muestra:
 - Superficies de prueba limpias.
 - Calibración del equipo con el material de referencia de 60 HRC.
- Ejecución del procedimiento:
 - Medición en dos puntos del tornillo con una referencia de calibración de 60 HRC.
 - Medición en zona central del vástago y bajo cabeza.
 - Se aplica precarga en un

aproximado de 10 segundos.

- Se registra el valor obtenido por el equipo.

Resultados – Results

Identificación del tornillo

○ Propiedades mecánicas

Sabiendo que la norma que contempla el grado 10.9 del tornillo es la ISO 898-1, se realizaron distintas pruebas experimentales para verificar la correcta aplicación de la norma en el tornillo y así poder descartar fallos de fabricación.

La primera comparación se realizó con las propiedades mecánicas del tornillo, específicamente se buscó comparar la dureza y la resistencia a la tensión (UTS).

Sub-clause number	Mechanical and physical property	9.8 ^b	10.9	12.9
5.1	Nominal tensile strength, $R_{m, nom}$ N/mm ²	900	1 000	1 200
5.2	Minimum tensile strength, $R_{m, min}$ ^{d e} N/mm ²	900	1 040	1 220
5.3	Vickers hardness, HV $F \geq 98$ N	min.	290	320
		max.	360	380
5.4	Brinell hardness, HB $F = 30$ l ²	min.	276	304
		max.	342	361
5.5	Rockwell hardness, HR	min. HRB	—	—
		HRC	28	32
		max. HRB	—	—
		HRC	37	44

Tabla 1. Tabla norma ISO 898-1 de dureza y resistencia a la tensión.

Fuente: International Organization for Standardization.

En la Tabla 1 se muestran las distintas propiedades mecánicas para la norma ISO 898-1. A continuación se resume la información tanto de resistencia a la tensión como de dureza entregadas por la norma para el grado 10.9.

Resistencia a la tension	
Nominal (R_m , nom).	1000 N/mm ²
Mínima (R_m , min)	1040 N/mm ²

Tabla 2. Tabla norma ISO 898-1 resistencia a la tensión.

Fuente: Autores.

Dureza	
Vickers (HV)	Mínimo de 320
Brinell (HB)	Mínimo de 304
Rockwell (HRC)	Mínimo de 32, máximo de 39

Tabla 3. Tabla norma ISO 898-1 dureza.

Fuente: Autores.

A partir de la Tabla 3 se seleccionó la medición HRC para medir la dureza del tornillo, la herramienta utilizada fue un durómetro tipo Leeb, el cual toma mediciones por medio de dureza por rebote. Los resultados de las mediciones se muestran en la siguiente tabla de resultados:

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	RESULTADOS				
	1	2	3	4	5
Núcleo	35	35	35	36	35
Bajo cabeza	35	35	35	36	34
Material de referencia (60 HRC)	60	61	60		

Tabla 4. Resultados de dureza experimental del tornillo.

Fuente: Autores.

En la Tabla 4 se muestran los resultados de las mediciones de dureza, en ella se verifica la precisión del durómetro utilizado realizando tres pruebas en un material con un HRC conocido (60 HRC), los resultados de estas mediciones están al final de la tabla. Se realizó la medición de dureza del tornillo en dos puntos: El núcleo, que vendría siendo la parte central del vástago y la sección bajo la cabeza. Las pruebas de dureza en ambos puntos se repitieron 5 veces como se evidencia en la tabla. Realizando un promedio de los resultados obtenidos se concluye que la dureza experimental del tornillo es de 35 a 36 HRC. Comparando los resultados obtenidos con la norma ISO 898-1 (de 32 a 39 HRC) de la Tabla 3 se determina que efectivamente el tornillo estudiado sí cumple con la norma en términos de dureza.

Desafortunadamente no se pudo realizar una prueba para determinar el UTS debido a que para hacerla es necesario que el tornillo cuente por lo menos con sus últimos 4 filetes [17], lo que no aplica para este tornillo, en su lugar se realizó una lectura de datos conociendo la

dureza del tornillo, para ello se utilizó la información de la norma ASTM 370-22, la cual relaciona la dureza HRC con el UTS para aceros no austeníticos [17].

Rockwell C Scale, 1 50 kgf Load, Diamond Penetrator	Approximate Tensile Strength, ksi (MPa)
37	166 (1140)
36	161 (1110)
35	156 (1080)
34	152 (1050)

Tabla 5. Fragmento de interés norma ASTM 370-22.

Fuente: Autores.

En la Tabla 5 subrayado de color amarillo se encuentra la información relevante para el tornillo, ya que sabiendo la dureza experimental (de 35 a 36 HRC) se puede navegar en la tabla mostrada por la norma ASTM 370-22 hasta encontrar la relación adecuada y poder concluir que el UTS del tornillo es de 1080 a 1110 MPa. Comparando el esfuerzo anteriormente obtenido con la norma del tornillo (ISO 898-1), se considera que el tornillo cumple con la normativa con respecto al UTS (1040 MPa mínimo).

○ Composición química

Con fines de determinar la composición química del tornillo se empezó por considerar que debido a que la normativa encontrada del grado 10.9 describe que el material de este tipo de tornillos es un AISI-SAE 4140 se delimitó que el tornillo de esta investigación es de este mismo material. No siendo suficiente evidencia la información de la norma, se realizó una comparación entre la normativa y la composición química experimental del material AISI-SAE 4140.

Elemento	Porcentaje Métrico
Carbono, C	0.38 - 0.43 %

Cromo, Cr	0.80 - 1.1 %
Hierro, Fe	96.785 - 97.77 %
Manganeso, Mn	0.75 - 1.0 %
Molibdeno, Mo	0.15 - 0.25 %
Fósforo, P	≤ 0.035 %
Silicio, Si	0.15 - 0.30 %
Azufre, S	≤ 0.040 %

Tabla 6. Composición química de aceros AISI-SAE 4140 bajo la norma ASTM A29.

Fuente: Autores.

En la Tabla 6 se muestra la composición química para aceros AISI-SAE 4110, en donde se pueden observar los elementos involucrados y sus respectivos porcentajes dentro del material.

Elemento	Promedio (%)	Desv. Estándar (S.D.)	Desv. Relativa (R.S.D.) (%)	Mínimo (%)	Máximo (%)
Fe	97.386	0.0459	0.0	97.337	97.427
C	0.485	0.0067	1.4	0.478	0.490
Mn	0.631	0.0111	1.8	0.622	0.644
P	0.000	0.0023	0.0	0.000	0.000
S	0.003	0.0024	84.2	0.001	0.005
Si	0.291	0.0089	3.1	0.285	0.301
Cu	0.011	0.0003	2.6	0.011	0.012
Ni	0.021	0.0009	4.3	0.020	0.022
Cr	0.922	0.0074	0.8	0.918	0.931
V	0.008	0.0002	3.2	0.008	0.008
Mo	0.163	0.0014	0.9	0.162	0.164
W	0.012	0.0084	71.2	0.002	0.018
Co	0.009	0.0007	7.1	0.009	0.010
Ti	0.004	0.0001	1.7	0.004	0.005
Sn	0.004	0.0009	23.2	0.003	0.005
Al	0.031	0.0014	4.3	0.030	0.032
Nb	0.003	0.0011	39.5	0.002	0.004
B	0.0004	0.00017	39.8	0.0003	0.0006
Pb	0.013	0.0013	9.8	0.012	0.015
Mg	0.001	0.0001	21.7	0.000	0.001

Tabla 7. Composición química experimental de un espectrómetro de emisión óptica (OES).

Fuente: Autores.

En la Tabla 7 por otro lado, se muestra la composición química del tornillo analizado, esta fue realizada con un espectrómetro de emisión óptica (OES). Se llevaron a cabo un total de 3 descargas sobre el tornillo, de las cuales se pudieron obtener los resultados mostrados en la tabla. De esta se puede observar que la S.D de los porcentajes de los elementos es muy baja, lo que significa que hubo una buena obtención de resultados en las tres descargas, demostrando consistencia durante el proceso. También, los resultados demuestran que aparte del alto porcentaje de Fe hay un porcentaje de C que coincide con un material de medio carbono, esta evidencia se compara más adelante con la información suministrada por la ASTM A29. Como era de esperar, los elementos de baja concentración como el B o Sn presentan una R.S.D alto, lo que tiene sentido al haber ausencia de estos elementos durante las descargas, lo contrario ocurre en elementos de alta concentración como el Fe o Mn, estos cuentan con un R.S.D bajo gracias a su constante presencia durante las descargas.

Los resultados de la Tabla 7 dejan claro que el tornillo es un acero de medio carbono por el resultado de C, por otro lado, la alta presencia de Cr y Mn después del C sugiere una fuerte presencia de estos elementos aleados. Dada la baja presencia de ciertos elementos que posiblemente puedan ser contaminantes como el P se considera que no es significativa la aparición de contaminantes externos en el tornillo.

Ahora bien, teniendo los porcentajes de la composición química obtenidos tanto de las

pruebas experimentales (Tabla 7) como de la normativa del tornillo (Tabla 6) se realiza la respectiva comparación con el objetivo de encontrar alguna discrepancia química.

Elemento	ASTM A29 % (norma)	OES % (experimental promedio)	Error porcentual %
Carbono, C	0.38 - 0.43	0.485	12,7906977
Cromo, Cr	0.80 - 1.1	0.922	-
Hierro, Fe	96.785 - 97.77	97.386	-
Manganeso, Mn	0.75 - 1.0	0.631	15,8666667
Molibdeno, Mo	0.15 - 0.25	0.163	-
Fósforo, P	≤ 0.035	0.000	-
Silicio, Si	0.15 - 0.30	0.291	-
Azufre, S	≤ 0.040	0.003	-

Tabla 8. Comparación entre composición química del acero AISI-SAE 4140 (ASTM A29 y OES).

En la Tabla 8 se muestra la comparación entre los elementos más relevantes de la composición química sugerida por la norma y la obtenida en los resultados experimentales por OES. Se puede identificar que en la norma se muestra el rango típico para el porcentaje de cada elemento del acero 4140, estos datos se compararon con el porcentaje promedio de los mismos elementos mostrados por el OES. Se realizó una columna destinada a mostrar el error porcentual del porcentaje OES respecto a la norma en caso de que dicho resultado estuviera fuera del límite. La gran mayoría de elementos se encuentran dentro del límite establecido por la ASTM A29, sin embargo, tanto el C como el Mn se encuentran por fuera.

Según la Tabla 8 existe un exceso de C de alrededor de 13%, esto significa que, aunque el tornillo sea de medio carbono, este se encuentra ligeramente por encima de ese estándar desde la ASTM A29, este hecho puede traer varias consecuencias a nivel mecánico. Como bien menciona Zhang et al, el carbono dentro de una aleación de acero

contribuye a la dureza del material [14], en el caso del tornillo analizado, este exceso de dureza tiene como consecuencia un aumento en igual escala de la fragilidad del material [14], haciendo que sea más fácil que se fracture. A diferencia del C, existe una ausencia de alrededor de 16% de Mn, la consecuencia de este resultado tiene que ver con posibles defectos a la hora de realizar un tratamiento térmico debido a la importancia del Mn en este proceso [15], también, la falta de Mn provoca una menor tenacidad del material [15], lo que lo hace más propenso a fracturas tempranas. En conjunto, el exceso de C y falta de Mn puede provocar que el tornillo tenga una mayor facilidad para fracturarse a medida que se deforme, incluso a pesar de que tenga mayor dureza. Durante el servicio del tornillo esto es crítico especialmente en partes de la rosca sometidas a una mayor carga que el resto.

El exceso de C en el tornillo también afecta negativamente en la junta y especialmente en el comportamiento de la tuerca. El estudio de Grimsco et al destinado a identificar y estudiar el modo de fallo del desgarre en tornillos analiza el efecto de las propiedades mecánicas del tornillo bajo pruebas a tensión, allí se concluye que el incremento de dureza en el tornillo provoca la dilatación de la tuerca, facilitando así el desgarre en los filetes [12]. Así pues, el exceso de C presente en el tornillo analizado probablemente haya facilitado que este se vea afectado por el modo de fallo estudiado por Grimsco et al.

○ Metalografía

Inspección visual

Continuando con el análisis, ahora se muestran las imágenes del tornillo, en donde se destacan las características más relevantes para obtener conclusiones a partir de la inspección visual.

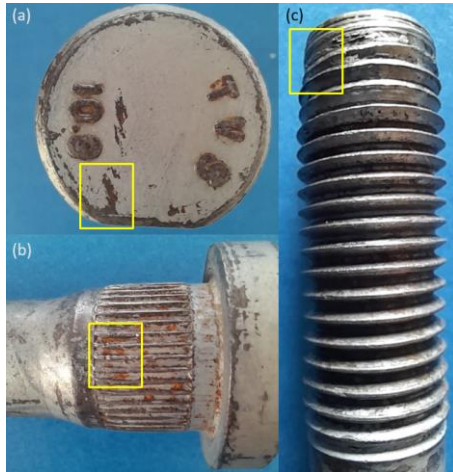


Figure 6. Imágenes superficiales de la cabeza (a), el cuello (b) y la rosca (c).

Fuente: Autores.

A partir de la inspección visual realizada se logra evidenciar en la Figura 6 signos del desgaste del recubrimiento a lo largo de todo el tornillo, dejando a la vista zonas de color negro correspondientes al acero del tornillo (a). Se logran observar depósitos naranjas en el cuello del tornillo, lo que corresponde a corrosión post almacenamiento (b). También, en la sección de la rosca más alejada de la cabeza se muestran indicios de deformación plástica además de una ausencia parcial de filetes (c), lo que no ocurre en el resto de la rosca.

El factor más evidente en las imágenes es la deformación plástica al final de la rosca (c), una señal seguramente de aplastamiento de filete derivado de cargas en la junta ya sea de tensión o compresión [9]. No se observa evidencia de picaduras ni marcas de playa, por lo que la fatiga se puede descartar como posible causa de falla [6]. La deformación plástica es evidente hasta cierto punto, en donde ni siquiera se puede observar la rosca deformada, este efecto, el cual está relacionado con la deformación de los filetes se puede tratar de desgarre, un tipo de falla en tornillos

caracterizada por la ausencia total del filete Grimsmo et al [12].

Teniendo en cuenta las imágenes es difícil determinar si existe corrosión en operación, la cual se caracteriza por ser de color negro [7], esta evidencia se puede confundir fácilmente con el color del tornillo, el cual se puede ver gracias al desgaste del recubrimiento como se mencionó anteriormente.

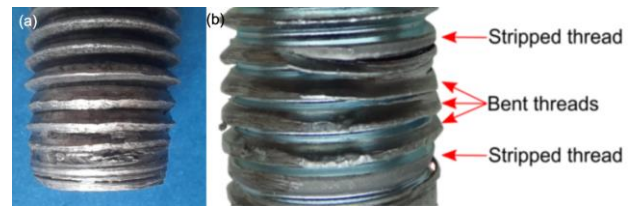


Figure 7. Rosca del tornillo analizado (a) y rosca de Grimsmo et al en una prueba de tensión (b).

Fuente: Autores y Grimsmo et al.

También, en la Figura 7 se muestra una comparación entre la última sección de la rosca del tornillo analizado (a) y un tornillo de prueba cargado a tensión por Grimsmo et al [12] (b), en la imagen los autores señalan las dos etapas del modo de falla propuesto, la deformación del filete (Bent threads) y su desgarre (Stripped thread). La fase de deformación o aplastamiento de filete se puede observar como una desviación de la forma del filete hacia la dirección de la carga, por otra parte, la fase de desgarre del filete se puede ver como la ausencia del propio filete dejando a su vez una marca o línea que demuestra que ahí estuvo el filete. Los hallazgos hechos por Grimsmo et al son similares a los evidenciados en el tornillo analizado.

Análisis SEM

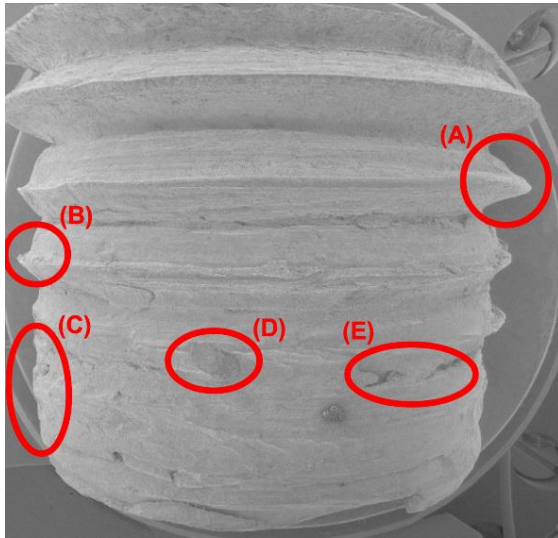


Figure 8. Imagen SEM (Morfología).

Fuente: Autores.

En la Figura 8 se presenta la imagen SEM de morfología del tornillo, en ella se pueden evidenciar varias evidencias de falla, en donde las más destacables están marcadas y numeradas. Ubicándose en la parte del filete que se encuentra casi completo se ven pequeños indicios de deformación, a diferencia del filete de arriba este presenta variaciones de sección con respecto a lo que debería ser el filete, se pueden ver ciertas ondulaciones a lo largo de este (A). A medida que se baja a través de la rosca se muestra la evolución de la deformación de los filetes, justo en el filete debajo del anteriormente analizado se ve un hundimiento mucho más agresivo, en este punto se ve como se comienza a reducir la sección útil del filete (B). Por último, en la sección más baja de la rosca ya no hay presencia de ninguna rosca, lo que indica que el proceso de deformación de los filetes llegó a su límite, eliminando por completo cualquier señal de material (C). Además del aplastamiento de filete evidenciado paso a paso anteriormente, también se ven signos de grietas producto del desgarré del filete en esa zona (E),

así como evidencia de cavidades localizadas en la sección ausente de filetes, este signo puede significar un impacto en servicio (D). Precisamente, dada la posición del tornillo se ve como en la zona derecha hay un mejor estado de los filetes a diferencia de la zona opuesta, esto demuestra que la carga en la junta era irregular a lo largo de la rosca.

El aplastamiento de filete (deformación plástica) evidenciado se puede clasificar en las tres fases descritas previamente, (A), (B) y (C). Esta evidencia obtenida de las imágenes SEM corrobora aún más la similitud de esta investigación con el trabajo de Grimsmo et al [12]. Lo que ahora vale la pena analizar es la progresión de la deformación a lo largo de la rosca, es decir, a medida que se llega al final de la rosca la deformación es cada vez más evidente. Un estudio de Hobbs et al describe el efecto del run-out, demostrando que existe un concentrador de esfuerzos al final de la rosca debido a la falta parcial de filete en dicha sección [13], esto conlleva a que en los primeros tres filetes existe una carga mayor que en el resto de la rosca [9]. En el tornillo analizado se evidencia claramente que los últimos filetes de la rosca fueron los más afectados por la carga de la junta.

Teniendo en cuenta los resultados SEM es muy probable que este tornillo haya sido ajustado con una alta precarga, la razón de esto es que no se logra ver evidencia de fracturas frágiles en algún filete ni tampoco la deformación completa de toda la rosca, así mismo, Osakue et al vincula las fallas progresivas a deformaciones plásticas, una señal que depende del esfuerzo aplicado en la junta [9], no solo eso, Osakue et al también menciona que las altas precargas están relacionadas a las ya mencionadas deformaciones plásticas [9], un tornillo, al ser altamente precargado está predispuesto a presentar deformaciones en

operación más rápidamente. A partir de lo anterior, lo más probable es que el tornillo analizado falló por medio de una falla progresiva, además de haber sido instalado con una alta precarga.

Fractografía

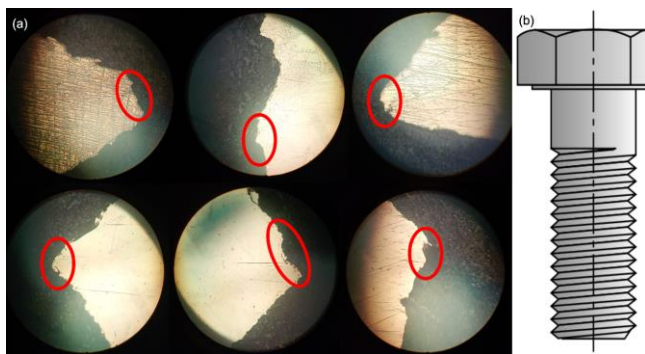


Figure 9. Imágenes de microscopio (aumento 20x) a lo largo de la rosca del tornillo (a) y referencia de orientación del tornillo (b)

Fuente: Autores (a) y Norton (b).

En la Figura 9 se muestran las imágenes obtenidas a partir de la fractografía, en ellas se puede evidenciar que, teniendo en cuenta la orientación seleccionada para tomar las imágenes, el desgaste de las crestas del tornillo y los fragmentos de material desprendidos por la abrasión van en una dirección en común, lo que, según la posición de colocación del tornillo significa que este fue sometido a cargas de tensión. De acuerdo con el trabajo realizado por Osakue et al, los tornillos suelen fallar en gran medida bajo cargas de tensión [9], esto se debe a la aplicación usual de un tornillo dentro de una maquina o estructura, en el caso del bus del cual fue extraído este tornillo, es correcto decir que el tornillo fue sometido a cargas de tensión ya que servía como elemento de unión entre una carcasa plástica y una placa metálica. Como es usual, la operación de los buses provoca que un tornillo de fijación como el analizado sea cargado a tensión.

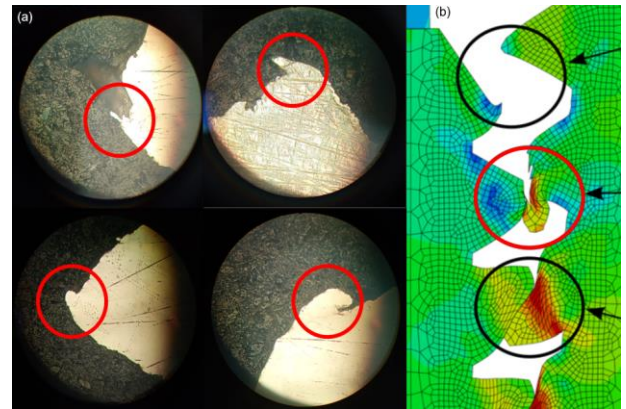


Figure 10. Imágenes de filetes de microscopio (aumento 40x) (a) y simulación de desgaste hecha por Grimsmo et al(b).

Fuente: Autores (a) y Grimsmo et al (b).

En la Figura 10 se puede ver una comparación entre la deformación del tornillo en 4 diferentes filetes en la zona más alejada de la cabeza y la deformación de un tornillo simulado por Grimsmo et al [12] los cuales probaron el modo de falla de desgaste por medio de la simulación mostrada en la figura (b). En la figura (a) se hace un énfasis en la cresta de los filetes, punto en el que destaca un fragmento de material inclinado hacia la dirección de la carga, este mismo parece que se está desprendiendo del filete de una manera particular. Comparando la forma de estos fragmentos con una de las fases del proceso de falla por desgaste (shear fracture) en la figura (b) existe una coincidencia, lo que puede acercar la conclusión de este artículo a una falla por desgaste.

Conclusiones - Conclusion

- El desgaste, aunque no decisivo, jugó un papel importante en la falla del tornillo, degradando abrasivamente tanto el recubrimiento del tornillo como ciertas partes de la rosca, este último hallazgo, en combinación con el desgaste mostrado en la fractografía,

deja claro que el tornillo falló bajo cargas a tensión. Por otro lado, la corrosión post almacenamiento, aunque no tan presente, contribuye a la falla del tornillo.

- Lo más probable es que el tornillo haya fallado por medio del modo de falla de desgarre, la evidencia demostrada en la inspección visual, análisis SEM y fractografía dejan evidencia suficiente para concluirlo. El factor más significativo de este hecho es la deformación plástica encontrada, la cual coincide con las pruebas realizadas por uno de los autores investigados. De acuerdo con fuentes bibliográficas que estudiaron casos similares, la presencia de deformación plástica y por tanto la ausencia de fracturas directas o deformación en toda la rosca es suficiente evidencia para concluir que el tornillo experimentó una falla progresiva.
- La causa de falla más probable es una alta precarga, esto provoca daño al tornillo incluso antes de empezar a entrar en servicio, algo que afecta considerablemente el estado de este. La alta precarga también está relacionada a efectos de deformación dado el constante contacto de la junta, además de eso, cargar el tornillo contra la tuerca previo a su operación facilita el desgarre de los filetes. A pesar de esto, no se descarta la posibilidad de que el tornillo haya estado sometido a una alta carga en servicio.
- La caracterización química del tornillo realizada mediante espectrometría de emisión óptica demuestra el alto contenido de C, confirmando que el tornillo, aunque corresponde a un acero

de medio carbono, presenta un exceso de este elemento. La consecuencia directa de esto es que, el tornillo al ser más duro que la tuerca, la dilata facilitando el desgarre. Por otro lado, hay una falta de Mn que provoca la disminución de tenacidad del material. En conjunto, estos dos defectos fueron consecuentes logrando facilitar la falla del tornillo.

- Tanto las propiedades mecánicas de dureza como de UTS concuerdan con lo establecido por la normativa, descartando directamente alguna falla proveniente de estos factores de fabricación.
- Los resultados de esta investigación pueden ser relevantes para complementar el catálogo de fallas de tornillos de las empresas de transporte público que cuentan con buses de alta capacidad, provocando a su vez que las estrategias del mantenimiento preventivo para los elementos de maquina involucrados en los buses se vea fortalecida.
- La investigación realizada es clave para desarrollar diversas estrategias de planes de mantenimiento preventivo enfocados en prevenir el daño a corto y largo plazo de los tornillos de fijación usados en las empresas de transporte público. Solo destacando los beneficios económicos y de seguridad para la empresa es suficiente motivación para integrar programas preventivos enfocados a evitar daños catastróficos que comienzan por desconocer la precarga adecuada de un tornillo, daños que podrían provocar pérdidas millonarias y posibles multas por accidentes de pasajeros.

Referencias

- [1] R. C. Juvinall y K. M. Marshek, *Fundamentals of Machine Component Design*, 7^a ed., Wiley, 2020. doi: 10.1002/9781119724586.
- [2] Ministerio de Transporte de Colombia, *Decreto 1079 de 2015: Por medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Transporte*, 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.minTransporte.gov.co>
- [3] A. Kelly y A. K. S. Jardine, *Maintenance Strategy: Business-Centred Maintenance*, 2^a ed., Butterworth-Heinemann, 2020. doi: 10.1016/C2018-0-02345-9.
- [4] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 11.^a ed., McGraw-Hill Education, 2019. ISBN 978-0073398211.
- [5] C. Fu, F. Ren y J. Hu, "Fracture failure analysis on a bolt," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1676, no. 1, p. 012015, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1676/1/012015.
- [6] R. L. Norton, *Diseño de máquinas: Un enfoque integrado*, 4.^a ed., Pearson Educación, 2011. ISBN 978-6073205894.
- [7] ASM International, *ASM Handbook*, 11^a ed., ASM International, 2021. doi: 10.31399/asm.hb.v13.
- [8] G. W. Stachowiak y A. W. Batchelor, *Engineering Tribology*, 5.^a ed., Butterworth-Heinemann, 2025. ISBN 978-0443341496.
- [9] E. E. Osakue y L. Anetor, "Design of elastic screw fasteners under tensile load," *Mechanical Engineering Research*, vol. 7, no. 1, pp. 13–30, 2017. doi: 10.5539/mer.v7n1p13.
- [10] J. Smith y B. K. N. Rao, "Failure Characterization for Predictive Maintenance in Industrial Systems," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 26, no. 3, pp. 401–420, 2020. doi: 10.1108/JQME-07-2019-0065.
- [11] Y. Guerra-Fernández, U. Ordofiez-Hernández y V. González-Fernández, "Análisis de la falla de pernos de fijación de las zapatas polares de un motogenerador," *Ingeniería Mecánica*, vol. 22, no. 3, pp. 156–160, 2019.
- [12] E. L. Grimsmo, A. Aalberg, M. Langseth y A. H. Clausen, "Failure modes of bolt and nut assemblies under tensile loading," *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 126, pp. 15–25, 2016. doi: 10.1016/j.jcsr.2016.06.023.
- [13] J. W. Hobbs, R. L. Burguete, y E. A. Patterson, "Investigation into the Effect of the Nut Thread Run-Out on the Stress Distribution in a Bolt Using the Finite Element Method", *J. Mech. Des.*, vol. 125, no. 3, pp. 527-532, Sept. 2003.
- [14] X. Zhang, Y. Li, Q. Xia, J. Zhu y Z. Feng, "Effect of Carbon Content on Abrasive Impact Wear Behavior of Cr-Si Steels", *Materials*, vol. 12, no. 1, Art. no. 53, Jan. 2019. doi:10.3390/ma12010053.
- [15] Y. Akinay y F. Hayat, "The Influence of the Heat Treatment on Mechanical and Microstructure Properties of Fe-22Mn-0.6C High-Manganese Steel," *Kovove Mater.*, vol. 54, pp. 91-96, 2016.
- [16] C. Fu, F. Ren y J. Hu, "Fracture failure analysis on a bolt," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1676, no. 1, p. 012015, 2020. doi: 10.1088/1742-6596/1676/1/012015.
- [17] ASTM International, *Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products*, ASTM A370-22, West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2022.