



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

**Departamento:** Ingeniería civil, de materiales y fabricación.

**Área de Conocimiento:** Ciencia de Materiales e ingeniería metalúrgica.

# TRABAJO FIN DE GRADO

## Evaluación Postmortem de la Fractura en un Palier de Camión: Un Estudio de Ingeniería Forense

Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: Achraf Ellatifi El Hattab

Tutor: Pablo López Crespo

Cotutor: Pablo Moreno Cerezo

MÁLAGA, mayo de 2025



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

**Evaluación Postmortem de la Fractura en un Palier de Camión:  
Un Estudio de Ingeniería Forense**



## Resumen

En este Trabajo Fin de Grado se ha realizado un análisis detallado del fallo por fractura de un palier de camión, componente fundamental en el sistema de transmisión de vehículos pesados. El objetivo principal ha sido identificar las causas que provocaron la rotura, para comprender mejor los factores implicados en este tipo de fallo mecánico.

Para abordar este análisis, se ha comenzado con la inspección física del componente, tomando medidas y extrayendo una probeta para ensayos destructivos. Se realizaron pruebas de dureza Vickers y análisis metalográficos mediante microscopía óptica para estudiar las propiedades mecánicas y la microestructura del material. Estos ensayos mostraron la presencia de un tratamiento termoquímico superficial tipo cementación, que modifica las características mecánicas desde la superficie hacia el interior del palier.

Asimismo, se diseñó un modelo CAD tridimensional del palier, que sirvió para realizar simulaciones numéricas por elementos finitos. Estas simulaciones permitieron identificar concentraciones de tensión y deformaciones bajo las condiciones de carga aproximadas, ayudando a relacionar los puntos críticos con la fractura observada.

Una vez recogidos todos los datos experimentales y numéricos, se procedió a su análisis e interpretación conjunta para determinar las causas más probables del fallo. Se concluyó que la fractura fue consecuencia de una combinación de factores, entre ellos los esfuerzos mecánicos extremos, la posible presencia de defectos internos y las condiciones severas de operación del componente.

**Palabras claves:** palier, fractura, análisis postmortem, tratamiento térmico, cementación ensayos de dureza Vickers, SolidWorks, ingeniería forense.

## Abstract

This Bachelor's Thesis presents a detailed analysis of the fracture failure of a truck axle shaft, a key component in the transmission system of heavy-duty vehicles. The main objective was to identify the causes that led to the failure, in order to better understand the factors involved in this type of mechanical failure.

To carry out this analysis, a physical inspection of the component was started, taking measurements and extracting a specimen for destructive testing. Vickers hardness tests and metallographic analyses using optical microscopy were performed to study the mechanical properties and microstructure of the material. These tests showed the presence of a surface thermochemical treatment, specifically carburizing, which modifies the mechanical characteristics from the surface toward the interior of the axle shaft.

Additionally, a three-dimensional CAD model of the shaft was created to perform finite element simulations. These simulations helped identify stress concentrations and deformations under approximate load conditions, establishing a correlation between critical areas and the observed fracture.

Once all experimental and numerical data had been collected, a comprehensive analysis and interpretation were carried out to determine the most probable causes of the failure. It was concluded that the fracture resulted from a combination of factors, including extreme mechanical stresses, the possible presence of internal defects, and the severe operating conditions of the component.

**Key words:** axle shaft, fracture, postmortem analysis, heat treatment, carburizing, Vickers hardness testing, SolidWorks, forensic engineering.

## Índice

1.	Introducción.....	1
2.	Objetivos .....	1
3.	Marco teórico .....	2
3.1.	Concepto y función del palier en un camión .....	2
3.2.	Condiciones de servicio y solicitaciones del palier.....	4
3.2.1.	Condiciones de servicio .....	4
3.2.2.	Solicitaciones mecánicas.....	4
3.3.	Material de fabricación .....	5
3.4.	Mecanismos de fallo en componentes mecánicos.....	6
3.4.1.	Fallo por torsión .....	6
3.4.2.	Fallo por fatiga .....	8
3.4.3.	Otros tipos de fallos relevantes.....	10
3.5.	Propiedades del material de un palier.....	11
3.6.	Tratamientos térmicos aplicables.....	12
3.7.	Análisis numérico .....	14
3.7.1.	Introducción al método de elementos finitos.....	14
3.7.2.	Conceptos básicos.....	14
3.7.3.	Mallado .....	14
3.8.	Ensayos del material.....	15
3.8.1.	Ensayo de Dureza Vickers.....	15
3.8.2.	Ensayos de metalográficos .....	16
4.	Análisis práctico .....	18
4.1.	Recopilación de información .....	18
4.2.	Mediciones.....	20
4.3.	Ensayos .....	20
4.3.1.	Ensayo Vickers .....	21
4.3.2.	Ensayo Metalográfico .....	26
4.4.	Análisis estático .....	31
4.5.	Modelado .....	33
4.6.	Simulación .....	35
4.7.	Interpretación y discusión de resultados .....	39
5.	Conclusiones.....	42

6. Referencias Bibliográficas.....	43
------------------------------------	----

## Índice de figuras

Figura 1. Modelo 3D del eje trasero de un camión [29].	2
Figura 2. Despiece diferencial autoblocante [30].	3
Figura 3. Representación real del conjunto del palier [34].	3
Figura 4. Plano de ruptura de materiales dúctiles y frágiles [35].	7
Figura 5. Plano de máximas tensiones normales [35].	7
Figura 6. Deformación de un eje sometido a torsión [35].	7
Figura 7. Fallo por fatiga (Líneas de playa) [36].	10
Figura 8. Dureza frente el tamaño de grano en un ensayo de Rockwell [37].	12
Figura 9. Ensayo de dureza Vickers [26].	16
Figura 10. Microdurómetro [26].	16
Figura 11. Microscopio óptico [22].	17
Figura 12. Pulidora las muestras metalográficas [23].	18
Figura 13. Componente objeto a estudiar.	19
Figura 14. Zona de ruptura.	19
Figura 15. Detalles de la ruptura.	19
Figura 16. Medición con la cinta métrica.	20
Figura 17. Distancia entre dos indentaciones.	21
Figura 18. Indentaciones a lo largo del diámetro de la probeta.	22
Figura 19. Coordenadas de los puntos de la indentacion.	22
Figura 20. Perfil de dureza desde la superficie hacia el núcleo de la línea 1.	25
Figura 21. Perfil de dureza desde la superficie hacia el núcleo de la línea 2.	25
Figura 22. Superficie interna de la pieza.	26
Figura 23. Probeta junto la pieza inicial.	26
Figura 24. Cortador de disco con refrigeración.	27
Figura 25. Superficie antes del pulido.	27
Figura 26. Superficie final de la muestra.	28
Figura 27. Muestra post ataque químico.	29
Figura 28. Microscopio óptico.	29
Figura 29. Microestructura en el centro de la pieza.	30
Figura 30. Microestructura en los extremos.	30
Figura 31. Análisis en el interior de la muestra.	31
Figura 32. Análisis en el exterior de la muestra.	31
Figura 33. Prontuario viga simple apoyada-empotrada.	32
Figura 34. Distancia desde el extremo al punto de falla.	33
Figura 35. Extremo del eje con detalles de fijación y orificios.	34
Figura 36. Modelado final de la pieza.	34
Figura 37. Modelado del dentado mediante perfil y matriz circular.	34
Figura 38. Vista final de la pieza con las sujeciones.	35
Figura 39. Curva de par y potencia del motor MAN D2876 LF04 [39].	36
Figura 40. Obtención de resultados.	37
Figura 41. Curva S-N del 42CrMo4 [40].	38
Figura 42. Resultado del porcentaje de daño.	38

Figura 43. Resultado de la vida total (ciclos).....	39
Figura 44. Zona 1 de máxima tensión de Von Mises. ....	41
Figura 45. Zona 2 de máxima tensión de Von Mises. ....	41

## Índice de tablas

Tabla 1.Tratamientos térmicos .....	13
Tabla 2.Resultados de dureza Vickers HV en la Línea 1 de indentaciones. ....	23
Tabla 3.Resultados de dureza Vickers HV en la Línea 1 de indentaciones. ....	24

# 1. Introducción

El propósito de este Trabajo Fin de Grado es llevar a cabo un análisis postmortem de la fractura de un palier, empleando técnicas como metalografía, ensayos de dureza y microscopía óptica para examinar las características del fallo. Asimismo, se realizará una simulación mediante el método de elementos finitos (MEF) para modelar el comportamiento del palier bajo las condiciones de carga experimentadas. El objetivo es vincular los resultados obtenidos con las condiciones operativas del vehículo y posibles defectos en el material o en el proceso de fabricación que pudieran haber contribuido a la fractura.

El palier es un componente crítico en el sistema de transmisión de los vehículos, cuya función principal es transmitir el par desde el diferencial hacia las ruedas. En vehículos de carga pesada, como los camiones, estos elementos están sometidos a condiciones extremas de operación, incluyendo altas cargas y momentos torsionales. Estas condiciones pueden generar fallos mecánicos que afectan no solo la funcionalidad del vehículo, sino también la seguridad y los costos asociados a reparaciones o interrupciones operativas.

## 2. Objetivos

Este trabajo tiene como propósito principal adquirir conocimientos sobre metodologías de análisis e identificación de causas que generan fallos en componentes mecánicos. Además, busca desarrollar habilidades prácticas que permitan aplicar estas técnicas en investigaciones y proyectos futuros para prevenir fallos futuros incidentes en condiciones similares.

El alcance del trabajo se detalla a continuación:

1. **Análisis de la pieza:** Se evaluará el defecto presente en la pieza y las condiciones bajo las cuales operaba. También se diseñará un modelo en un software de CAD, que servirá como base para realizar un análisis por elementos finitos considerando lo más similar posible las condiciones reales de trabajo.
2. **Realización de ensayos destructivos:** Se llevará a cabo un ensayo destructivos para examinar tanto la microestructura como el comportamiento mecánico de la pieza, con el objetivo de identificar las propiedades del material y su composición.
3. **Determinación de las causas del fallo:** Se seleccionará una causa de fallo, que mejor represente las posibles razones detrás de la falla observada.

El análisis comienza con una descripción del componente, sus materiales y condiciones de operación. Posteriormente, se lleva a cabo un estudio

metalográfico de una probeta extraída del palier, acompañado de ensayos de dureza Vickers para caracterizar las propiedades mecánicas y determinar si el material ha sido sometido a tratamientos térmicos. Complementariamente, se utiliza el software SolidWorks para modelar y simular el comportamiento del palier bajo cargas torsionales, lo que permite visualizar las concentraciones de tensiones y predecir posibles zonas críticas de falla.

### 3. Marco teórico

#### 3.1. Concepto y función del palier en un camión

El palier es un componente esencial del sistema de transmisión de un vehículo, cuya principal función es transmitir el par motor desde el diferencial hasta las ruedas, permitiendo el movimiento del vehículo. En el caso de los camiones, esta función se ve sometida a un entorno operativo especialmente exigente, caracterizado por cargas elevadas y variables, cambios bruscos de velocidad y condiciones de adherencia variables. Lo que implica que los palieres deben estar diseñados con materiales de alta resistencia, capaces de soportar esfuerzos torsionales repetitivos impactos y fatiga mecánica a lo largo del tiempo.

Desde el punto de vista técnico, el análisis del palier comienza con su modelado tridimensional, que permite entender su geometría interna, su conexión con el conjunto del eje y la transmisión, así como las zonas más sensibles a la concentración de tensiones. La figura (1) muestra un modelo 3D esquemático del eje trasero de un camión, donde se puede observar la ubicación del palier entre el diferencial y las ruedas [2].

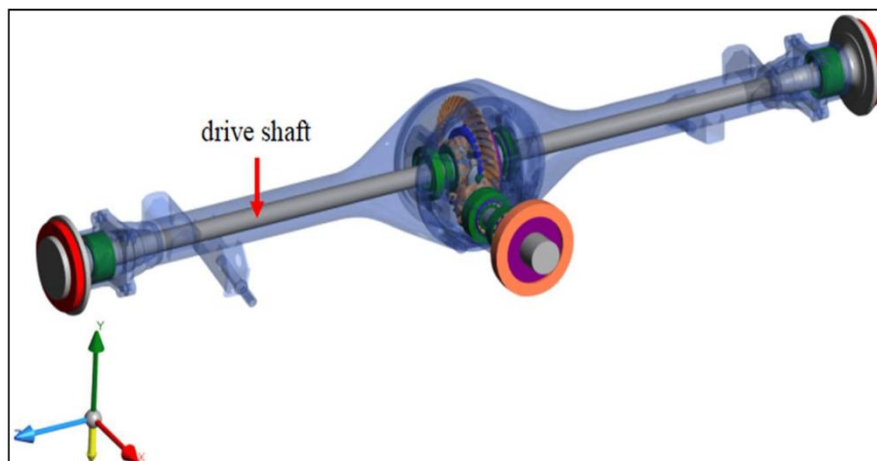


Figura 1. Modelo 3D del eje trasero de un camión [29].

A nivel funcional, el palier no solo transmite par, sino que también absorbe las irregularidades del terreno y las variaciones de carga derivadas del transporte de mercancías. Está sometido a tensiones torsionales variables. Estas condiciones se agravan cuando el vehículo utiliza sistemas de tracción especiales, como los diferenciales autoblocantes (ver figura (2)). Este sistema, diseñado para mejorar la tracción en terrenos complicados o de baja



## 3.2. Condiciones de servicio y solicitaciones del palier

### 3.2.1. Condiciones de servicio

El palier de un camión enfrenta a condiciones de servicio muy exigentes debido a las características propias de los vehículos pesados. Estos camiones son sometidos a condiciones de trabajo que incluyen:

- **Altas cargas estáticas y dinámicas:** Los camiones de transporte pesado llevan grandes cargas muy pesadas, que varían en función del tipo de mercancía transportada. Estas cargas se suman al peso propio del vehículo, lo que incrementa significativamente las tensiones en el palier. También los cambios dinámicos de carga que ocurren durante la aceleración, el frenado y las maniobras, lo que puede generar picos de esfuerzo.
- **Condiciones térmicas extremas:** Durante el funcionamiento, el palier puede sufrir temperaturas elevadas debido al rozamiento con otros componentes del sistema de transmisión, como el diferencial y las juntas. Esta exposición prolongada al calor puede afectar la microestructura del material, aumentando el riesgo de desgaste, deformación y, en situaciones extremas, la fatiga térmica.
- **Entornos contaminantes:** Los camiones destinados a transporte pesado, como aquellos que trabajan en terrenos difíciles, están expuestos a condiciones de trabajo que incluyen polvo, humedad, lodo y agentes corrosivos. Estos factores no solo afectan al rendimiento del material, sino que también pueden acelerar el proceso de corrosión si no se han implementado adecuadas medidas de protección superficial.

### 3.2.2. Solicitaciones mecánicas

El palier está expuesto a varias solicitaciones mecánicas que deben ser analizadas durante su diseño para asegurar su fiabilidad y durabilidad. Las principales solicitaciones a las que está sometido son:

- **Esfuerzos de torsión:** Esta es la principal carga que soporta el palier, ya que transmite el par motor del diferencial a las ruedas motrices. Estos esfuerzos de torsión se producen principalmente durante la aceleración y deceleración del vehículo. El par transmitido genera deformaciones en el palier que, si no se diseñan adecuadamente, pueden provocar la formación de grietas y eventual fractura por fatiga torsional.
- **Esfuerzos de flexión:** Aunque los esfuerzos de torsión son predominantes, el palier también está sometido a flexión. La flexión puede ser el resultado de desalineaciones, fuerzas laterales o deformaciones del eje debido a la distribución desigual de la carga. Esto provoca que el palier sufra tanto esfuerzos de flexión estática como dinámica.

- **Fatiga multiaxial:** La interacción entre esfuerzos de torsión y flexión genera un tipo de fatiga multiaxial. Este tipo de fatiga es particularmente crítico en componentes sometidos a ciclos de carga alternantes, como el palier, que debe soportar repetidos esfuerzos cíclicos durante su vida útil.
- **Impactos y vibraciones:** Los palieres también están sujetos a impactos repentinos y vibraciones generadas por las condiciones de conducción. Las vibraciones también pueden generar fluctuaciones de carga que afectan tanto al palier como a otros componentes de la transmisión. Estos impactos pueden generar concentraciones de tensión localizadas en puntos críticos incrementando el riesgo de fallo [33].

### 3.3. Material de fabricación

Los palieres de camión son componentes sometidos a altos niveles de esfuerzo mecánicos. Por ello suelen fabricarse con materiales que combinan alta resistencia mecánica y buena tenacidad, como los aceros aleados tratados térmicamente [28].

En general, se emplean aceros de medio carbono aleados con elementos como molibdeno y manganeso, que mejoran la templabilidad, la resistencia a la fatiga y la dureza superficial. Uno de los aceros más comunes en este tipo de aplicaciones es el AISI 4140 (equivalente al 42CrMo4 según la norma europea). Este acero se caracteriza por:

- Alta resistencia a la fatiga y al desgaste.
- Buena resistencia a la torsión.
- Excelente capacidad para ser endurecido mediante tratamiento térmico (templado y revenido).
- Buena maquinabilidad en estado de suministro.

El acero AISI 4140 / 42CrMo4 es muy utilizado en la industria automotriz para ejes, engranajes y palieres, debido a su equilibrio entre resistencia mecánica y durabilidad en condiciones exigentes.

La composición estándar de este acero basada en la norma ASTM A29 es la siguiente:

- Carbono (C): 0.38–0.43%

El carbono es el principal responsable de aumentar la resistencia mecánica del acero. Cuanto mayor es su contenido, mayor es la dureza y la resistencia a la tracción del material. Sin embargo, un exceso de carbono puede reducir la tenacidad y la soldabilidad.

- Cromo (Cr): 0.90–1.20%

El cromo mejora significativamente la resistencia al desgaste, la dureza y la resistencia a la corrosión. También aumenta la templeabilidad, lo cual permite obtener altos valores de dureza incluso en piezas de gran sección.

- Molibdeno (Mo): 0.15–0.30%

El molibdeno ayuda a aumentar la resistencia al revenido y mejora la resistencia a la fatiga. También previene la fragilización del acero durante el tratamiento térmico y aumenta la resistencia a la fluencia a altas temperaturas.

- Manganeso (Mn): 0.75–1.00%

El manganeso actúa como un desoxidante y mejora tanto la resistencia mecánica como la tenacidad del acero. También favorece la templeabilidad y ayuda a reducir la fragilidad en caliente.

Entre sus propiedades mecánicas típicas tras tratamiento térmico se encuentran:

- Límite elástico: 655–1050 MPa
- Resistencia a la tracción: 850–1000 MPa
- Dureza: hasta 40–50 HRC

En el caso particular del palier objeto de este estudio, no se dispone de información exacta sobre el material original de fabricación, ya que no se encontraron datos identificativos en la pieza y tampoco se dispone de documentación técnica. Sin embargo, a partir del análisis de dureza realizado y del tipo de componente, es razonable suponer que se trata de un acero aleado con tratamiento térmico, posiblemente de características similares a un 42CrMo4.

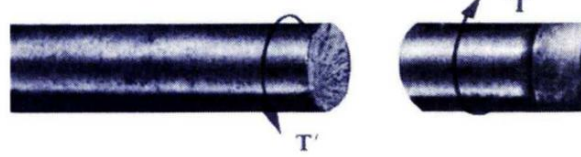
### 3.4. Mecanismos de fallo en componentes mecánicos

#### 3.4.1. Fallo por torsión

Las fallas por torsión ocurren cuando el esfuerzo cortante excede la resistencia del material, provocando fracturas o deformaciones permanentes. Este tipo de falla es común en componentes como los palieres, especialmente bajo condiciones de sobrecarga. En este caso, se trata de una carga única, sin repetición ni ciclos [1].

En el caso de materiales metálicos, la rotura se produce según planos a 45° del eje de la barra. Mientras que, si el material es dúctil, la rotura es perpendicular al eje de la barra tal como se observa en figura (4).

rotura dúctil:



rotura frágil:

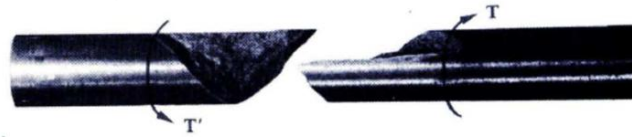


Figura 4. Plano de ruptura de materiales dúctiles y frágiles [35].

Las tensiones normales máximas aparecen en planos helicoidales a  $45^\circ$  con el eje como se observa en la figura (5).

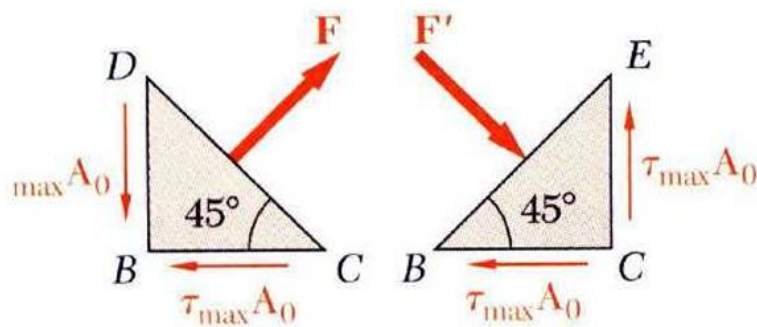


Figura 5. Plano de máximas tensiones normales [35].

El par torsional  $T$  es un momento que provoca la rotación de un elemento alrededor de su eje longitudinal tal como se observa en la figura (6). Cuando una barra se somete a este tipo de momento, se dice que está bajo torsión. Analizar este fenómeno es esencial en el diseño de ejes y árboles de transmisión empleados en vehículos y maquinaria.

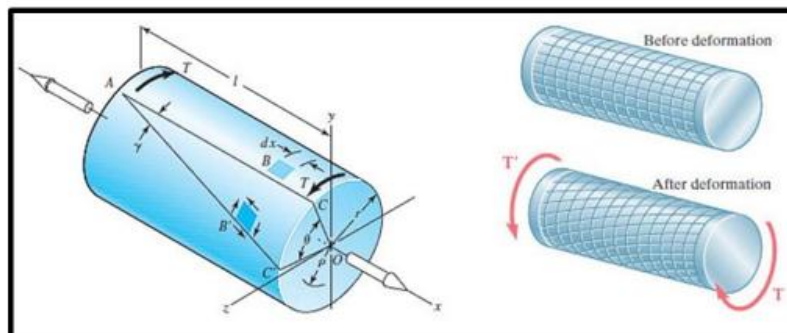


Figura 6. Deformación de un eje sometido a torsión [35].

El ángulo de torsión, medido en radianes, de una barra sólida con sección circular se calcula como el giro relativo entre dos secciones extremas de la barra mediante la siguiente fórmula:

$$\theta = \frac{Tl}{GI}$$

Donde:

- $l$ : es la longitud del eje
- $T$ : es el par de torsión
- $G$ : es el módulo de rigidez al esfuerzo cortante (es una propiedad mecánica del material)
- $I$ : es el momento polar de inercia del área transversal (valor depende únicamente de la geometría de la sección)

En la sección transversal de una barra redonda sometida a torsión se generan esfuerzos cortantes. Estos esfuerzos varían linealmente con el radio y se calculan mediante la siguiente expresión:

Esfuerzo cortante en un eje sometido a torsión en una distancia radial  $r$

$$\tau = \frac{Tr}{I}$$

$$I = \frac{\pi D^4}{32} \text{ (para ejes sólidos)}$$

Por lo tanto, para los esfuerzos cortantes máximos generados por torsión, las ecuaciones se expresan de la siguiente forma:

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{I} = \frac{16T}{\pi D^3}$$

- $r$ : es el radio que desea calcular el esfuerzo
- $D$ : es el diámetro del eje sólido

El diferencial autoblocante incrementa significativamente el riesgo de este tipo de fallas, ya que, al bloquear el giro de una de las ruedas o distribuir desigualmente el par motor, genera un aumento considerable en los esfuerzos que deben soportar los palieres. Este mecanismo puede ser especialmente crítico durante maniobras como aceleraciones bruscas, giros cerrados o en terrenos accidentados, donde la distribución de la carga es asimétrica [3].

### 3.4.2. Fallo por fatiga

El fallo por fatiga es un proceso de deterioro progresivo que ocurre cuando un componente metálico está sometido a sollicitaciones repetidas en el tiempo,

incluso cuando dichas cargas se mantienen por debajo del límite elástico del material.

El inicio de la fatiga suele originarse en zonas del material donde existen concentraciones de tensiones, las cuales pueden deberse a defectos geométricos (entallas, radios agudos, roscas), imperfecciones superficiales (rayaduras, poros, inclusiones) o variaciones microestructurales. En estas regiones, la tensión local se incrementa significativamente respecto a la tensión nominal aplicada.

Cuando el componente está sometido a cargas cíclicas, estas tensiones elevadas provocan la acumulación progresiva de dislocaciones alrededor de las discontinuidades del material. Las dislocaciones son defectos lineales en la red cristalina que, al moverse repetidamente bajo carga, tienden a concentrarse y a interactuar entre sí. Esta acumulación localizada de dislocaciones genera zonas de deformación plástica microscópica, las cuales debilitan la estructura del material en puntos específicos.

Con el tiempo, estas zonas de deformación favorecen la aparición de microgrietas, generalmente orientadas de forma perpendicular a la dirección del esfuerzo cíclico. Estas microgrietas surgen generalmente la superficie del componente, donde el material está más expuesto, aunque también pueden originarse internamente si existen inclusiones o defectos internos relevantes.

En los palieres el fallo por fatiga aparece especialmente en las zonas crítica como esquinas y transiciones entre secciones donde hay mayores concentraciones de tensiones [4][32].

La rotura por fatiga no ocurre de manera súbita desde el inicio del esfuerzo cíclico, sino que es un fenómeno progresivo que se desarrolla a lo largo del tiempo. Este proceso puede dividirse clásicamente en tres etapas diferenciadas, cada una con características propias desde el punto de vista microestructural y macroscópico. A continuación, se describen en detalle las tres fases que componen la evolución del daño por fatiga:

**1. Iniciación de la grieta:** En esta etapa comienzan a formarse pequeñas grietas, generalmente en la superficie del material, en zonas donde hay concentraciones de tensión, como defectos, bordes afilados o superficies rugosas. Estas grietas se generan debido a la aplicación repetida de cargas.

**2. Propagación de la grieta:** La grieta crece de forma progresiva con cada ciclo de carga. Este crecimiento suele ser lento y deja señales características en la superficie del material. Durante esta fase, el daño avanza sin que el componente falle por completo.

**3. Rotura final:** Cuando la sección restante del material ya no puede soportar la carga, se produce una fractura rápida y repentina. En esta etapa, el componente se rompe de forma completa.

En la figura (7) podemos observar una pieza que ha sufrido un fallo por fatiga, y también podemos apreciar el inicio de la falla que son las líneas de playa y la propagación de la de la falla.



Figura 7. Fallo por fatiga (Líneas de playa) [36].

### 3.4.3. Otros tipos de fallos relevantes

#### **Fallo por fabricación**

Este tipo de falla puede incluir grietas internas, inclusiones no metálicas o irregularidades geométricas producidas por un proceso de fabricación inadecuado. Un defecto de fabricación puede actuar como un punto de concentración de tensiones provocando grietas bajo carga. En el caso de los palieres, estos defectos de fabricación son particularmente peligrosos, ya que los esfuerzos cíclicos y las cargas por tensión aumentan la posibilidad de fractura prematura. Para evitar este tipo de fallas, se realizan inspecciones rigurosas mediante ensayos no destructivos, como ultrasonidos o radiografías, y controles de calidad estrictos en la producción [5].

#### **Fallo por corrosión**

En entornos donde el palier está en contacto con la humedad, sal o productos químicos, pueden generarse un defecto por corrosión que deterioren la superficie del componente. Esto debilita el material al producir microfisuras que sirven como puntos de inicio para otros tipos de fallas como la fatiga. Además, la corrosión puede modificar el comportamiento el palier enfrenta esfuerzos adicionales debido al autobloqueo. Para evitar este tipo de falla se utilizan recubrimientos protectores y materiales resistentes a la corrosión [2].

#### **Fallo por impacto**

Los impactos son situaciones de carga puntual que superan los límites de elasticidad del material que producen deformaciones plásticas o fracturas inmediatas. En el caso de los palieres, estos impactos pueden producirse por maniobras bruscas por ejemplo el paso por terrenos irregulares o la colisión con

objetos. Los materiales utilizados para la fabricación de palieres son de alta tenacidad para absorber energía y evitar fracturas bajo impacto [1].

## Fallo por desgaste

La falla por desgaste se produce por el contacto continuo entre superficies bajo carga, produciendo pérdidas de material y reducción en la tolerancia del sistema. En los palieres, el desgaste puede ser generado por malas condiciones de lubricación o presencia de contaminantes. Para prevenir el desgaste, se utilizan tratamientos superficiales como la nitruración y lubricantes adecuados [5].

### 3.5. Propiedades del material de un palier

Las características metalúrgicas y mecánicas de los materiales empleados en la fabricación de palieres son importantes para garantizar un funcionamiento fiable y duradero frente a condiciones exigentes como cargas elevadas, esfuerzos torsionales y desgaste. En este apartado se examina cómo la estructura interna del material influye directamente en propiedades esenciales como la resistencia, la dureza y la rigidez.

- La microestructura es disposición y tipo de fases presentes en el interior del material, como la ferrita, perlita o martensita. Estas fases tienen un efecto directo sobre el comportamiento mecánico global. En el caso de los palieres, es común modificar la microestructura mediante tratamientos térmicos como el temple o el revenido, con el objetivo de optimizar la combinación de fases según los requerimientos del componente [9]. Una microestructura adecuada mejora la dureza superficial, favoreciendo la resistencia al desgaste y limitando la deformación plástica. Además, permite conservar una elevada resistencia a la tracción, esencial para soportar los esfuerzos derivados de la transmisión de par motor [6][7].
- El tamaño de grano, por su parte, desempeña un papel clave en la respuesta mecánica del material. Un grano más fino contribuye a mejorar la resistencia a la tracción y la resistencia a la fatiga, ya que los límites de grano obstaculizan el desplazamiento de dislocaciones. Para los palieres, técnicas como el temple rápido permiten refinar el grano, logrando así una mayor dureza superficial y mejor comportamiento bajo cargas repetidas [10].

Asimismo, la rigidez del material, expresada mediante el módulo de elasticidad, también se ve influenciada por la microestructura y el tamaño de grano. Esta propiedad es esencial en componentes como los palieres, que deben mantener su forma y funcionalidad frente a altos niveles de torsión, sin sufrir deformaciones permanentes [8].

La Figura (8) ilustra cómo varía la dureza, evaluada mediante el ensayo Rockwell, en función del tamaño de grano en diferentes tipos de acero. Esta gráfica evidencia que una microestructura más refinada puede mejorar considerablemente el comportamiento mecánico del material. En apoyo a esta observación, investigaciones tanto experimentales como numéricas han confirmado una fuerte correlación entre la dureza y el tamaño del grano. En particular, la figura 8 es de un estudio analizado que compara las curvas de dureza obtenidas experimentalmente y por simulación para los aceros AISI 4140 y 1045, considerando tamaños de grano de 110, 40, 14 y 5  $\mu\text{m}$  [37].

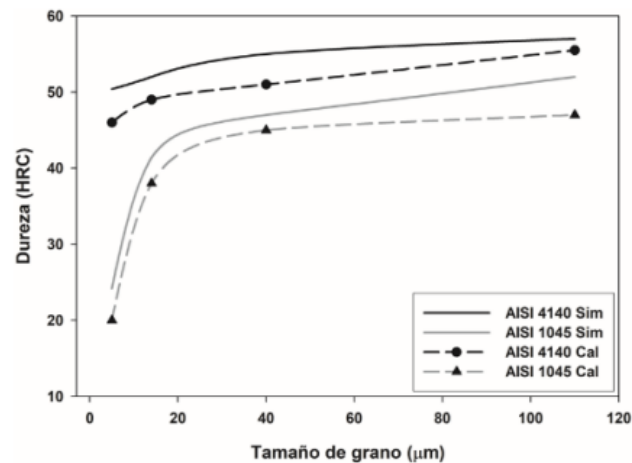


Figura 8. Dureza frente el tamaño de grano en un ensayo de Rockwell [37].

### 3.6. Tratamientos térmicos aplicables

Aunque no se cuenta con datos específicos sobre los tratamientos térmicos aplicados al palier en estudio, es posible realizar hipótesis fundamentadas basadas en los resultados de los ensayos de dureza, el comportamiento del material y la función del componente. Dado que los palieres están expuestos a elevadas sollicitaciones mecánicas, es común que se sometan a tratamientos térmicos específicos para mejorar su rendimiento, especialmente en términos de dureza, tenacidad y resistencia al desgaste. En la siguiente tabla se resumen los tratamientos más habituales en este tipo de piezas, detallando en cada caso su definición, los beneficios que aportan y una descripción general del proceso.

Tabla 1. Tratamientos térmicos

Tratamiento	¿Qué es?	Objetivos o beneficios	Proceso
Templado	Tratamiento térmico para aumentar la dureza del acero.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de la dureza superficial.</li> <li>- Mejora de la resistencia al desgaste.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calentamiento entre 800 °C y 900 °C.</li> <li>2. Enfriamiento rápido en agua, aceite o aire para formar martensita.</li> </ol>
Revenido	Tratamiento térmico posterior al templado para reducir la fragilidad.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Reducción de tensiones internas y fragilidad.</li> <li>- Mejora de la tenacidad y resistencia al impacto.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aplicación de templado previo.</li> <li>2. Calentamiento entre 150 °C y 650 °C para recuperar propiedades mecánicas.</li> </ol>
Cementado	Tratamiento termoquímico que introduce carbono en la superficie del acero.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Endurecimiento superficial con núcleo tenaz.</li> <li>- Alta resistencia al desgaste.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Cementación en atmósfera rica en carbono a alta temperatura.</li> <li>2. Templado posterior para endurecer la superficie.</li> </ol>
Endurecimiento por inducción	Tratamiento térmico localizado mediante calentamiento por campo magnético alterno.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Endurecimiento superficial localizado.</li> <li>- Alta velocidad de tratamiento, ideal para producción en masa.</li> </ul>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Generación de calor mediante corriente alterna en zonas específicas.</li> <li>2. Enfriamiento rápido (agua o aceite) para endurecer la superficie.</li> </ol>

Origen: [13][14][15][17]

## 3.7. Análisis numérico

### 3.7.1. Introducción al método de elementos finitos

El Método de Elementos Finitos es una herramienta de cálculo fundamental en la ingeniería, utilizada para el análisis de estructuras sometidos a varias condiciones físicas como las cargas, tensiones y deformaciones. El método de elementos finitos divide un dominio continuo en partes discretas denominadas elementos finitos, los cuales están conectadas por puntos llamados nodos en los cuales se calcula el comportamiento del sistema.

En el campo de la ingeniería mecánica, el método de elementos finitos se aplica en el análisis de componentes críticos, como ejes de transmisión o palieres, gracias a su capacidad para simular condiciones de funcionamiento reales. Algunos softwares más utilizados como ANSYS y SolidWorks han facilitado su uso en proyectos tanto industriales como académicos [19].

### 3.7.2. Conceptos básicos

El MEF se basa en principios matemáticos y físicos para transformar ecuaciones diferenciales en sistemas de ecuaciones algebraicas resolubles mediante herramientas numéricas. Las acciones clave consisten en:

- Discretización del dominio: Se divide la geometría del modelo en elementos más pequeños que simplifican su análisis.
- Formulación de ecuaciones de elementos: Mediante funciones de forma, se aproximan las variables de interés, como desplazamientos o esfuerzos.

$$K \cdot u = F$$

$K$  : Matriz de rigidez global,

$u$ : Vector de desplazamientos nodales

$F$ : Vector de fuerzas nodales externas aplicadas.

- Ensamblaje global: Las ecuaciones de los elementos se agrupan para formar un sistema de ecuaciones que expresa el comportamiento del modelo completo.
- Resolución numérica: Utilizando métodos como el de Gauss otras técnicas, se resuelve el sistema de ecuaciones para obtener las variables desconocidas [20].

### 3.7.3. Mallado

El mallado es un proceso importante en el MEF, ya que especifica la representación discreta de la geometría a través de una red de elementos finitos. Un mallado eficiente permite representar adecuadamente los fenómenos físicos y también optimiza los recursos computacionales.

Tipos de Elementos Finitos según su Forma:

1. **Elementos lineales (1D)**: se utiliza para análisis de barras, vigas y estructuras esbeltas.
2. **Elementos bidimensionales (2D)**: Ideales para problemas en placas o membranas.
3. **Elementos tridimensionales (3D)**: Para modelos volumétricos, como tetraedros y hexaedros.

Según la Función de Forma:

1. **Elementos lineales**: Su función de forma es de primer grado son más simples, pero menos precisos en zonas de alta curvatura.
2. **Elementos cuadráticos**: Mayor precisión debido a funciones de forma de segundo grado, pero requieren más recursos computacionales [21].

### 3.8. Ensayos del material

#### 3.8.1. Ensayo de Dureza Vickers

Este método permite medir dureza prácticamente de todos los materiales metálicos independientemente del estado en que se encuentren y de su espesor. [25]

El procedimiento emplea un penetrador de diamante en forma de pirámide de base cuadrada. El penetrador es aplicado perpendicularmente a la superficie cuya dureza se desea medir bajo la acción de una carga  $P$ . Esta carga es mantenida durante un cierto tiempo (dependiendo del material a estudiar), después del cual es retirada y se mide el diagonal de la impresión que quedó sobre la superficie de la muestra. Con este valor se puede obtener la dureza de Vickers aplicando la siguiente fórmula:

$$HV = \frac{2 \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{l^2} = \frac{1.8544P}{l^2}$$

Donde  $P$  es la carga aplicada y  $l$  es la longitud del hueco que ha dejado el penetrador.

Por lo que la dureza en el ensayo de Vickers (HV) se define como la relación entre la carga aplicada (expresada en Kgf) y el área de la superficie lateral de la impresión.

El penetrador es una pirámide de diamante de base cuadrada, cuyo ángulo en el vértice es de  $136^\circ$ . La dureza Vickers viene definida por la relación ilustrada en la figura (9).

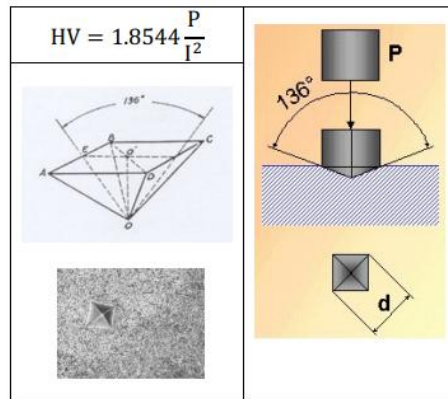


Figura 9. Ensayo de dureza Vickers [26].

En este ensayo muy versátil se pueden aplicar cargas muy pequeñas inferiores a 1 kg y también se pueden medir durezas hasta 1000kg/mm<sup>2</sup>. Por lo que se pueden aparatos de medida de diferentes escalas dependiendo del material que vamos a estudiar.

Por ejemplo, mediante el aparato de la figura (10) podemos estudiar la dureza de las distintas fases y microconstituyentes que conforman el material, lo que es de gran importancia para su caracterización y análisis.



Figura 10. Microdurómetro [26].

### 3.8.2. Ensayos de metalográficos

Los ensayos metalográficos son técnicas muy importantes en el campo de la metalografía, que se emplean para analizar la estructura interna de los materiales metálicos. Estos ensayos permiten identificar y caracterizar las fases y compuestos presentes en un material, y también su distribución y morfología. También se utilizan para relacionar la microestructura de un material con sus propiedades mecánicas y físicas, ya que es de gran importancia para el control de calidad y la investigación de fallos en componentes metálicos [27].

Estos ensayos consisten en estudiar los componentes presentes en un material utilizando diferentes niveles de ampliación visual. Dependiendo del rango de tamaño en que es posible observar la microestructura de un material el estudio se puede clasificar en tres niveles: macroscópico, mesoscópico o microscópico [27].

Definición de los tres niveles anteriores:

- **Macroscópico:** Es el estudio que se puede realizar a un material a simple vista sin necesidad de ampliación visual. Todas las dimensiones superiores  $100\ \mu\text{m}$ .
- **Mesoscópico:** Son los estudios de una escala intermedia que tiene como rango de estudio de  $1$  a  $100\ \mu\text{m}$ . En esta escala podemos observar características microestructurales a nivel de grano sin ver en mucho detalle la estructura del grano
- **Microscópico:** es el análisis de todos los materiales a una escala menor a  $1\ \mu\text{m}$  y es necesario utilizar un microscopio óptico. En este nivel podemos observar la estructura con mayor detalle a tal punto que se observa el tamaño de grano, las maclas y su distribución.

En la figura (11) podemos observar un microscopio óptico que nos permite analizar materiales a niveles microscópicos.



Figura 11. Microscopio óptico [22].

Para poder aplicar este tipo de ensayos es necesario tener una superficie del material plana y pulida con grano muy fino. Con el objetivo de poder visualizar en el microscopio con mayor claridad después de aplicar un ataque químico.

Los pasos a seguir para preparar la superficie son:

1. **Corte de probetas y muestras.** Es el primer paso en el proceso de preparación de las muestras. En este paso hay que tener un especial cuidado para no dañar o modificar la estructura metalográfica del material.

2. **Desbaste, lijado y pulido.** este paso es muy importante en el ensayo metalográfico y consiste en el pulido, lijado y desbaste para obtener una superficie lisa y adecuada para el análisis mediante microscopía.

Este paso se suele llevar a cabo mediante una pulidora las muestras metalográficas como la que se muestra en la figura (12).



Figura 12. Pulidora las muestras metalográficas [23].

3. **Ataque químico.** En este paso se emplea un reactivo químico que actúa sobre las partes estructurales de la muestra.

4. **Análisis microscópico.** Permite identificar fases, tamaño de grano y posibles tratamientos térmicos, lo cual es clave para entender el comportamiento del material. El microscopio opera mediante la reflexión de la luz en la superficie del metal.

## 4. Análisis práctico

### 4.1. Recopilación de información

En una primera aproximación al componente objeto de estudio, tal como se puede ver en la figura (13), a partir de una inspección visual se observa que la estructura está dividida en dos partes, presentando indicios de haber sufrido una rotura en el extremo derecho, como se aprecia en las figuras (14) y (15). La fractura presenta un desarrollo de tipo helicoidal y se localiza aproximadamente a dos tercios de la longitud total desde el centro del eje del vehículo hacia el extremo. Este tipo de rotura sugiere una falla por torsión.

Cabe destacar que, en el momento del fallo, el diferencial del vehículo se encontraba bloqueado. Además, el camión pisó unas hojas, lo que provocó que una de las ruedas patinara, transfiriendo repentinamente todo el par motor a la

rueda opuesta. Esta condición habría generado un esfuerzo torsional excesivo en el palier, superando su capacidad mecánica y provocando su fractura.

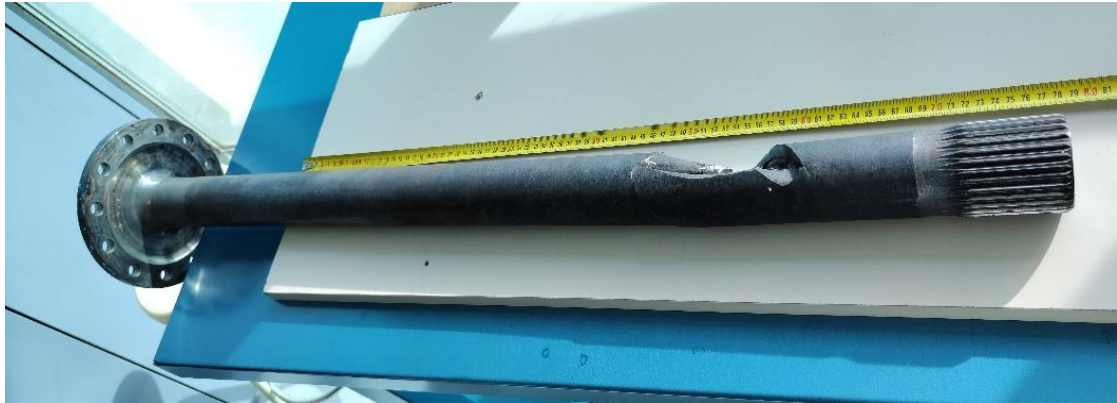


Figura 13. Componente objeto a estudiar.



Figura 14. Zona de ruptura.



Figura 15. Detalles de la ruptura.

## 4.2. Mediciones

Para poder realizar el modelado con mayor precisión de la pieza es importante tomar las mediciones de la pieza ya que esto también nos permitirá obtener resultados los más cercanos posibles en la simulación.

Para realizar las mediciones se han utilizada las siguientes herramientas:

- Cinta métrica.
- Pie de rey



Figura 16. Medición con la cinta métrica.

## 4.3. Ensayos

Para comprender el origen de la fractura en el palier objeto de estudio, es necesario partir de una serie de hipótesis que permitan orientar los ensayos realizados. En base al análisis visual preliminar y al tipo de componente, se plantean las siguientes hipótesis como posibles causas del fallo:

- **Hipótesis 1: Rotura por torsión**  
El palier pudo haber fallado debido a un momento torsional excesivo, generado por una sobrecarga puntual o un bloqueo repentino en la transmisión.
- **Hipótesis 2: Presencia de defectos internos en el material**  
Inclusiones, porosidades o una microestructura inadecuada podrían haber originado concentraciones de tensión localizadas, facilitando el inicio de grietas incluso bajo condiciones normales de trabajo.
- **Hipótesis 3: Fatiga del material**  
Una exposición prolongada a cargas cíclicas podría haber provocado el crecimiento progresivo de una grieta, originando una fractura por fatiga.

### 4.3.1. Ensayo Vickers

Este ensayo se realiza para conocer la dureza del material en distintas zonas del palier, lo cual permite evaluar su resistencia al desgaste y comprobar la efectividad de posibles tratamientos térmicos.

Para realizar este ensayo se utilizó un microdurómetro con un penetrador de cuadrangular de diamante. Para mejores resultados se realizaron un total 60 indentaciones las cuales, si dividen en 2 líneas como se muestra en la figura (19), esto ayudó estudiar la superficie de material en su totalidad lo que permitió analizar tanto las zonas frágiles como las más resistentes. El ensayo se realizó de acuerdo con las especificaciones de la norma UNE-EN ISO 6507-1:2024.

Este es el procedimiento que se aplicó para realizar el ensayo:

1. Se selecciono una carga de 1 kg ya que el material tenía una alta resistencia y para garantizar una buena visibilidad de las indentaciones.
2. Mediante el microscopio del microdurómetro definimos el punto inicial para aplicar la carga en este caso se aplicó en los extremos de la muestra.
3. Después se coloca el penetrador en la posición inicial y de aplica la carga.
4. Se efectuaron mediciones de dureza con una separación de 1 mm entre cada indentación, extendiéndose más allá del centro de la muestra, como se observa en la figura (17). Sin embargo, de acuerdo con lo establecido en la normativa técnica ISO 6507-1, la distancia mínima entre dos indentaciones Vickers debe ser al menos 3 veces el diámetro de la huella si se trata de indentaciones en línea recta para evitar que las mediciones se vean afectadas por deformaciones previas [38].

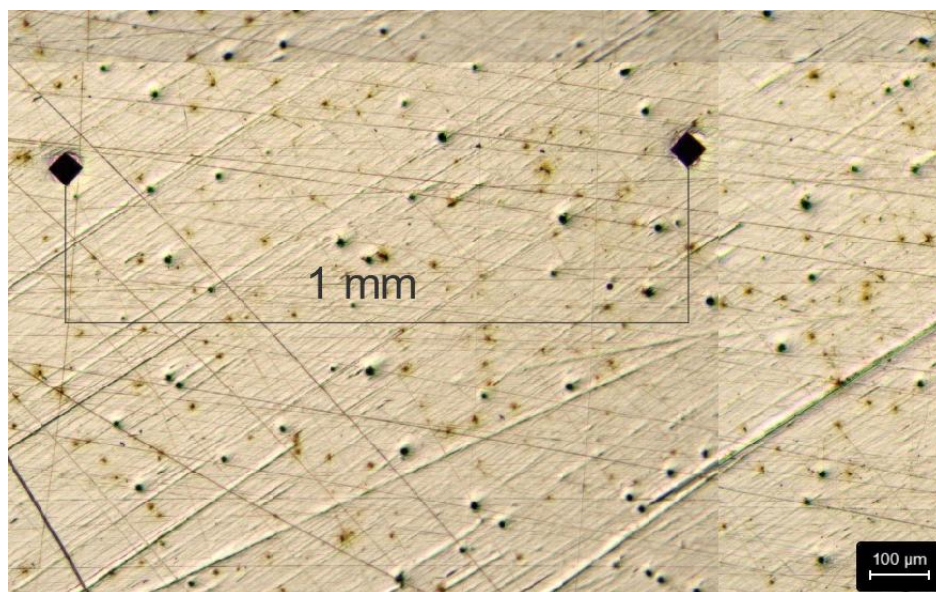


Figura 17. Distancia entre dos indentaciones.

La figura (18) muestra la disposición de las indentaciones realizadas en dos líneas paralelas que cruzan la sección del palier, permitiendo analizar la variación de dureza desde el borde hasta el centro.

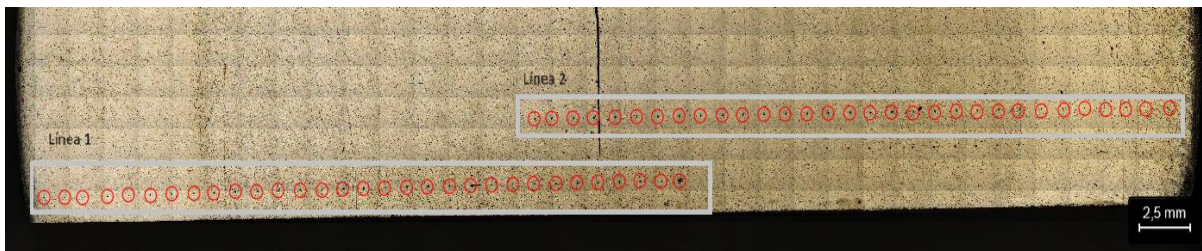


Figura 18. Indentaciones a lo largo del diámetro de la probeta.

Posteriormente se calculó las diagonales de cada indentacion en cada línea con ayuda del software del microscopio óptico para localizar cada punto y mediante la suma de cuadrados hallar el valor de la diagonal, tal como se muestra en la figura (19). Luego aplicando la formula del ensayo de Vickers se obtiene la dureza HV, como se muestran en las siguientes tablas:

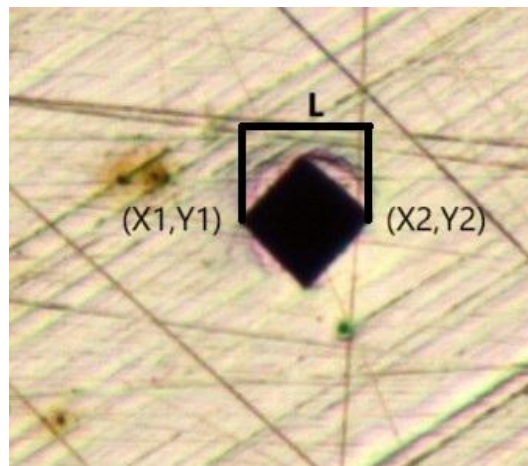


Figura 19. Coordenadas de los puntos de la indentacion.

Luego aplicando la formula del ensayo de Vickers se obtiene la dureza HV, como se muestran en las siguientes tablas:

*Tabla 2. Resultados de dureza Vickers HV en la Línea 1 de indentaciones.*

<b>Línea 1</b>		
<b>Punto</b>	<b>L(μm)</b>	<b>Dureza HV</b>
1	55,00	613,02
2	56,04	590,57
3	54,00	635,94
4	54,01	635,72
5	56,04	590,57
6	58,08	549,78
7	59,01	532,57
8	80,02	289,57
9	82,01	275,75
10	78,01	304,71
11	78,00	304,78
12	78,00	304,80
13	83,01	269,14
14	80,01	289,70
15	82,02	275,62
16	81,02	282,47
17	76,11	320,17
18	86,01	250,70
19	81,50	279,19
20	86,02	250,59
21	84,05	262,48
22	82,02	275,62
23	72,01	357,65
24	72,01	357,65
25	119,85	129,09
26	65,03	438,50
27	70,03	378,14
28	70,11	377,22
29	141,00	93,27

Tabla 3. Resultados de dureza Vickers HV en la Línea 1 de indentaciones.

Línea 2		
Punto	L(μm)	Dureza HV
1	51,01	712,68
2	51,01	712,68
3	51,01	712,68
4	52,27	678,73
5	53,00	660,16
6	55,04	612,22
7	54,00	635,94
8	77,00	312,77
9	78,00	304,80
10	77,03	312,56
11	80,00	289,75
12	76,70	315,25
13	76,01	321,00
14	74,06	338,09
15	125,00	118,68
16	65,01	438,81
17	65,00	438,91
18	63,01	467,10
19	65,03	438,50
20	72,01	357,65
21	73,01	347,92
22	65,07	437,98
23	76,03	320,83
24	67,00	413,10
25	80,02	289,57
26	73,01	347,92
27	71,01	367,79
28	79,01	297,08
29	73,06	347,40
30	80,01	289,70
31	75,01	329,61

Una vez obtenidos los valores de dureza HV, se elaboraron gráficas para cada línea de indentaciones, donde se representa la variación de la dureza en función de la distancia (en mm) desde el extremo de la pieza hasta el centro. Estas curvas permiten visualizar cómo evoluciona la dureza a lo largo de la sección analizada

En este perfil de la figura (20) y la figura (21) se ha tomado como referencia el exterior del palier, es decir, el punto 1 mm corresponde a la superficie, avanzando hacia el núcleo del material.

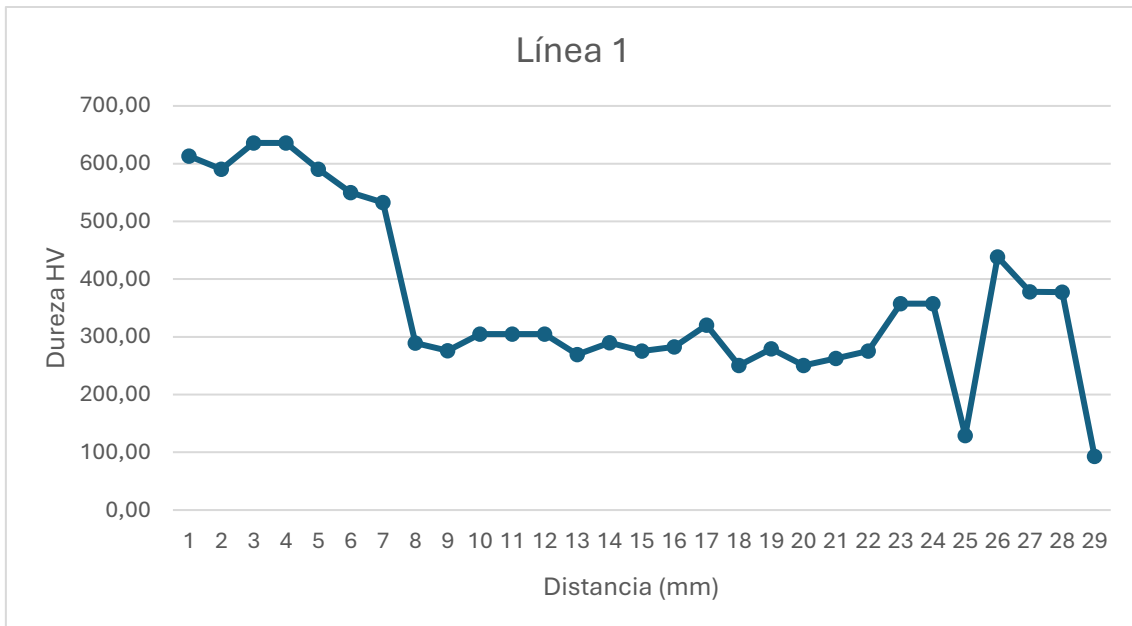


Figura 20. Perfil de dureza desde la superficie hacia el núcleo de la línea 1.

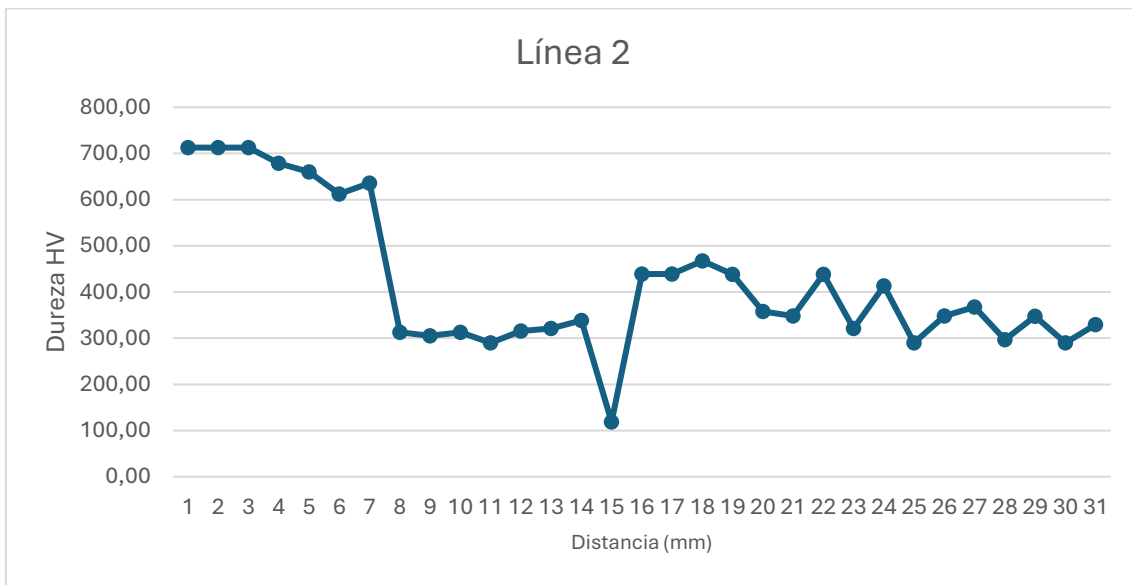


Figura 21. Perfil de dureza desde la superficie hacia el núcleo de la línea 2.

Tal como se observa en las gráficas anteriores, la dureza disminuye progresivamente a medida que las indentaciones se acercan al centro de la muestra. Esto indica que el palier ha sido sometido a un tratamiento de endurecimiento superficial termoquímico como la cementación, ya que la dureza es notablemente mayor en las zonas próximas a la superficie y disminuye hacia el núcleo.

### 4.3.2. Ensayo Metalográfico

Este ensayo se realiza con el objetivo principal de estudiar la microestructura de la pieza, con especial atención a la variación del tamaño de grano entre distintas zonas, identificando aquellas donde los granos presentan un mayor o menor desarrollo. Esto es fundamental ya que como se puede observar en la figura (22), a simple vista se puede observar que la pieza presenta dos superficies internas con estructuras diferentes. Por tanto, no se tiene certeza de si la pieza está compuesta por un solo material, por varios materiales diferentes, o si ha sido sometida a algún tratamiento térmico.



*Figura 22. Superficie interna de la pieza.*

Para realizar el ensayo se han de seguir una serie de pasos como de reflejo en el apartado 4.9. Ensayos de metalográficos.

**Corte de la probeta:** Debido a las dimensiones de la pieza se llevó a cabo un corte para tener una probeta pequeña así facilitando su inspección. Este corte se llevó a cabo mediante una cortadora de disco, figura (23), la cual dispone de un sistema de refrigeración para evitar que el calor generado durante el corte modifique la microestructura que se desea estudiar. En la figura (24) se muestra la probeta junto a la pieza original.



*Figura 23. Probeta junto la pieza inicial.*

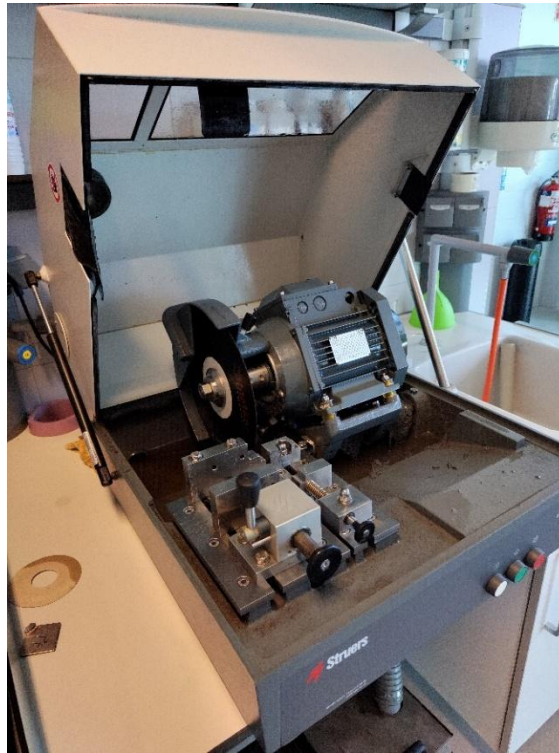


Figura 24. Cortador de disco con refrigeración.

**Desbaste, lijado y pulido:** Para poder observar con total claridad este proceso es fundamental. El objetivo principal es lograr una superficie sin rayones y brillante para que el proceso del ataque químico se realice con éxito. En la siguiente figura (25) se muestra la superficie antes del pulido.

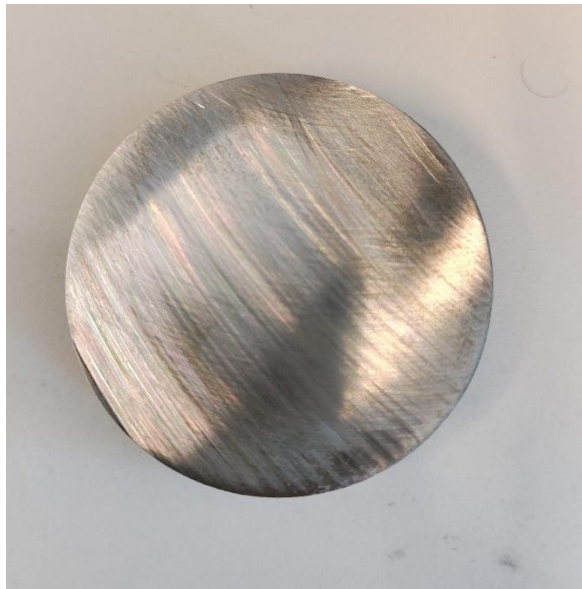


Figura 25. Superficie antes del pulido.

El pulido se ha realizado en diferente paso que se detallan a continuación:

1. Esmerilado
2. Pulido con lija de grano de 400
3. Pulido con lija de grano de 600
4. Pulido con lija de grano de 800
5. Pulido con lija de grano de 1200

Este proceso se ha realizado con una pulidora las muestras metalográficas la cual tiene un sistema de refrigeración mediante agua el cual el calor generado por la fricción para así no modificar la microestructura del material. Durante el proceso de lijado se ha ido observando la superficie del material en un microscopio invertido para ver si la superficie no tiene rayones y está lista para cambiar de lija para un pulido más fino. En la figura (26) se muestra la superficie final obtenida la cual podemos ver que es una superficie espejo y libre de rayones lista para el ataque químico.



*Figura 26. Superficie final de la muestra.*

**Ataque químico:** En este proceso para preparar la disolución es necesario disponer de: alcohol y ácido nítrico con una composición de 65%.

El objetivo es realizar un ataque de 4% de nital. Y queremos prepara una disolución de 25 ml, por tanto, es necesario  $25 \times 0.04 = 1 \text{ ml}$  de ácido nítrico al 100%.

Por lo que se aplica la siguiente proporción:

$$\frac{1}{65} = \frac{x}{100}$$

Resolviendo la igualdad anterior se obtiene que se requiere 1,53 ml de ácido nítrico al 65% y 23,46 de alcohol.

En la figura (27) se muestra la muestra después del ataque químico de 20 segundos.



*Figura 27. Muestra post ataque químico.*

**Análisis microscópico:** Después de completar el procedimiento de ataque químico se lleva a cabo la observación de la muestra en el microscopio óptico como el que se muestra en la figura (28).



*Figura 28. Microscopio óptico.*

La Figura (29) presenta la microestructura en centro de la muestra.

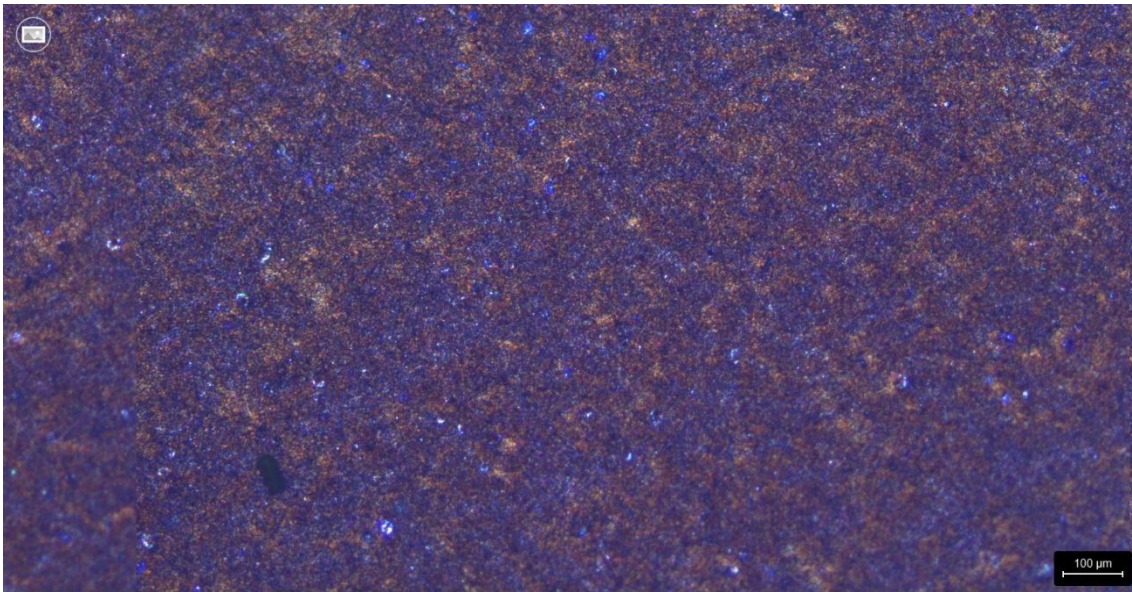


Figura 29. Microestructura en el centro de la pieza.

La Figura (30) presenta la imagen microestructura en de los extremos de la muestra.

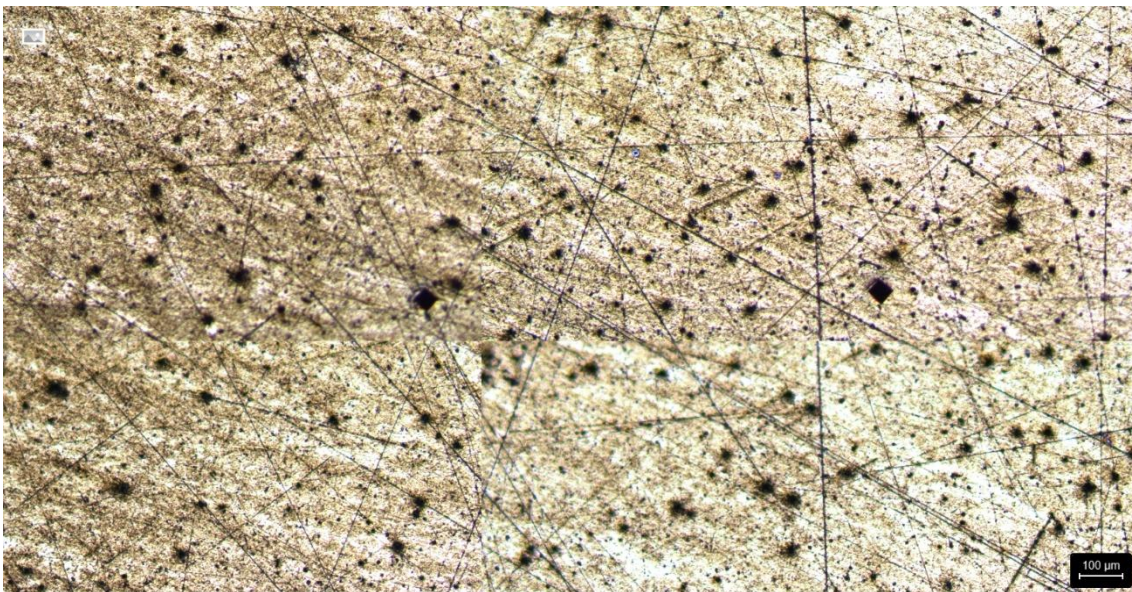


Figura 30. Microestructura en los extremos.

Utilizando el software incorporado al microscopio óptico, se llevó a cabo un análisis microestructural con el propósito de determinar el tamaño y la distribución del grano en distintas zonas de la muestra. Dicho análisis se realizó en las áreas correspondientes a las figuras (29) y (30). En la figura (31) se presenta la microestructura del interior de la pieza, donde los granos observados son más pequeños, con un valor medio de 6.65. En cambio, la figura (32) corresponde al exterior de la muestra, donde los granos presentan un mayor tamaño y menor uniformidad con una media de 9.16, lo que sugiere una posible

influencia del proceso de fabricación o un tratamiento térmico superficial. Esta variación estructural entre el centro y en la frontera indica que la pieza podría haber sido sometida a un procedimiento de endurecimiento superficial con el objetivo de mejorar sus propiedades en las zonas expuestas al desgaste.

Aunque el software proporciona resultados rápidos y estructurados, existen ciertas limitaciones en su aplicación. Entre ellas se encuentra la dependencia de parámetros como el umbral de contraste, que puede afectar la detección precisa de los bordes de grano. Además, el método de intersección utilizado genera una representación bidimensional que no siempre refleja fielmente la morfología tridimensional real del material.

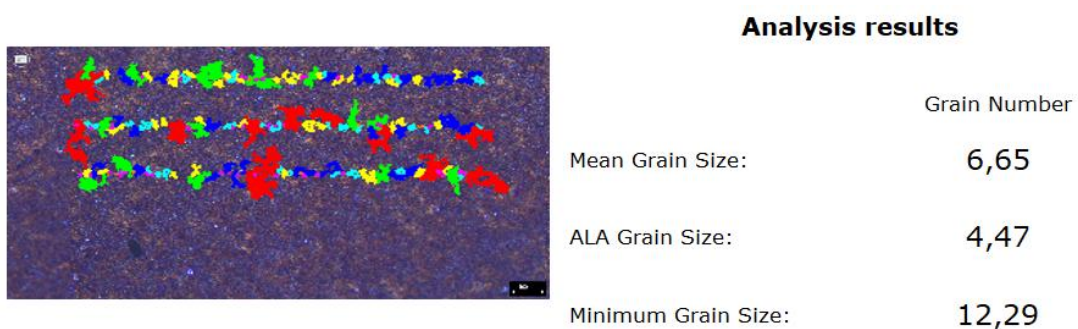


Figura 31. Análisis en el interior de la muestra.

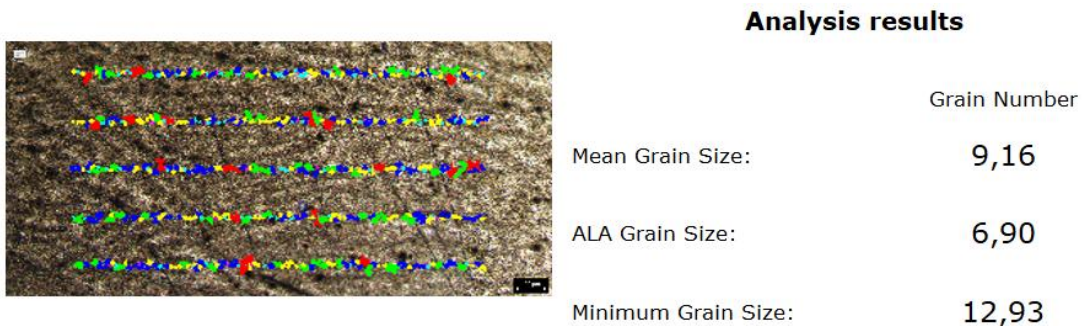


Figura 32. Análisis en el exterior de la muestra.

#### 4.4. Análisis estático

Una vez estudiado el material, pasamos a estudiar las sollicitaciones que afronta el palier durante su funcionamiento. En este caso, el análisis de la flecha máxima es un aspecto importante en el diseño y estudio de su comportamiento bajo carga. La flecha, que representa el desplazamiento máximo del palier debido a los esfuerzos de flexión, puede proporcionar información de gran valor sobre la rigidez del componente, la distribución de las tensiones y el comportamiento estructural del palier. La localización de la zona de máxima deformación es especialmente relevante en casos de fallos estructurales, como el ocurrido en el palier analizado.

Este apartado se centra en el cálculo y la identificación de la zona de mayor deflexión del palier, tomando en cuenta diversos factores como la distribución de las cargas y las condiciones de apoyo. Para este análisis, consideraremos el palier como una viga simple apoyada-empotrada, aplicando la carga correspondiente y utilizando la fórmula que aparece en la figura (33).

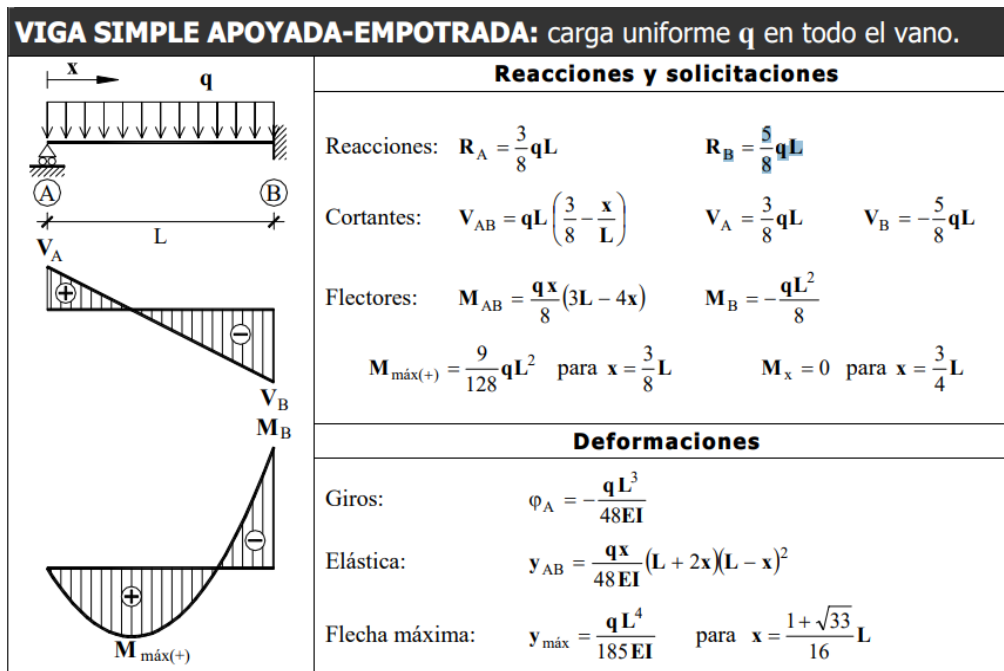


Figura 33. Prontuario viga simple apoyada-empotrada.

Datos del palier:

Longitud ( $L$ ): 996.94 mm

Formula de la zona en la que se produce la flecha máxima es:  $x = \frac{1 + \sqrt{33}}{16}L$

Sustituyendo la longitud en la fórmula anterior, obtenemos que la flecha máxima se produce a una distancia de 420.24 mm del extremo donde se encuentran los dientes del engranaje. Sin embargo, la distancia en la que se ha producido la ruptura es de 283 mm, medida desde el extremo donde se encuentran los engranajes, tal como se observa en la figura (34). Esta distancia de ruptura se encuentra próxima a la ubicación de la flecha máxima, lo que indica que el fallo está relacionado, al menos parcialmente, con la zona de mayor deformación del palier. Sin embargo, la proximidad de la ruptura al extremo del componente sugiere que factores adicionales, como concentraciones de tensión localizadas o características del material en esa zona, pudieron haber influido en el inicio de la fractura.

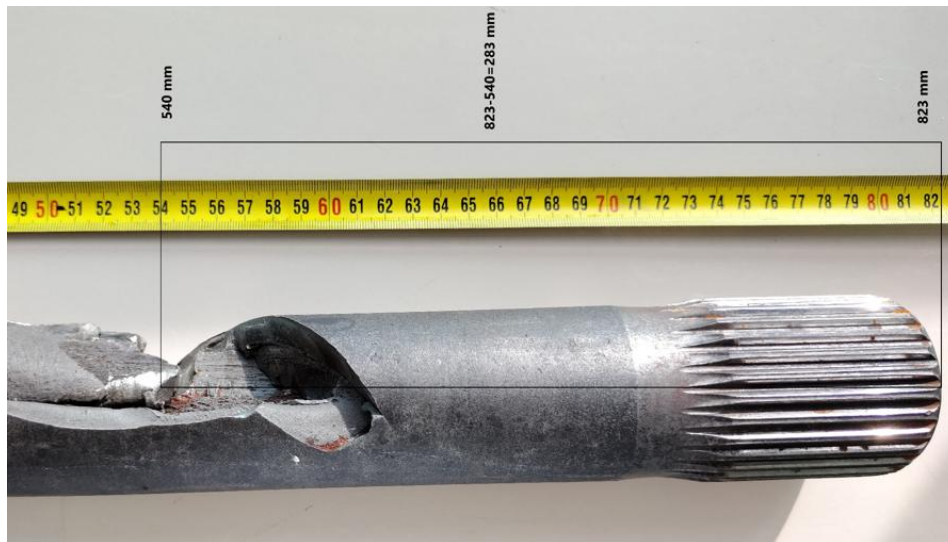


Figura 34. Distancia desde el extremo al punto de falla.

## 4.5. Modelado

El modelado y la simulación de la pieza se ha realizado con un software de diseño por computadora (CAD) concretamente SolidWorks, intentando simplificarla para reducir el cálculo computacional, pero procurando reproducir su geometría de la forma más precisa posible respecto al componente original. El objetivo principal de esta fase fue identificar las zonas con mayor concentración de tensiones a través del análisis realizado.

A continuación, se describen brevemente las principales etapas y herramientas empleadas:

1. Inicio del modelado desde el extremo del eje destinado a la sujeción, donde se añadió un saliente y los orificios para tornillos mediante una matriz circular (*figura (35)*).
2. Cuerpo principal del eje modelado con una extrusión cilíndrica uniforme desde el extremo inicial (*figura (36)*).
3. Zona dentada del engranaje modelada dibujando el perfil de un solo diente, al que posteriormente se aplicó una matriz circular para generar el dentado completo (*figura (37)*).
4. Agujeros y detalles de fijación, incluyendo un saliente adicional y un orificio cónico central, obtenidos con el comando de revolución
5. Acabado del modelo mediante operaciones de redondeo y chaflán para suavizar aristas y mejorar la precisión del diseño.

Este conjunto de operaciones permitió obtener un modelo que representa fielmente las proporciones y características del eje original, manteniendo un equilibrio entre detalle y simplificación computacional. Se incluirán las figuras correspondientes a los extremos del eje en los puntos mencionados, omitiendo

las referentes a la zona dentada del engranaje para no sobrecargar el contenido gráfico.

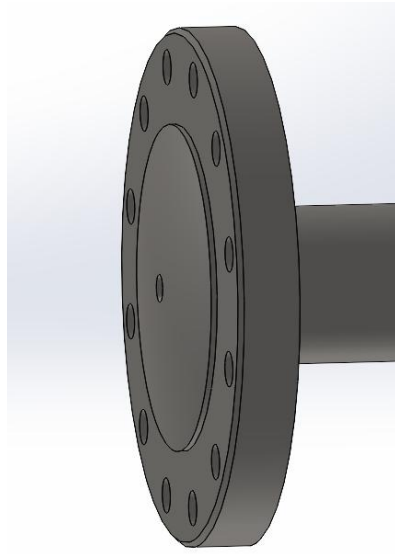


Figura 35. Extremo del eje con detalles de fijación y orificios.

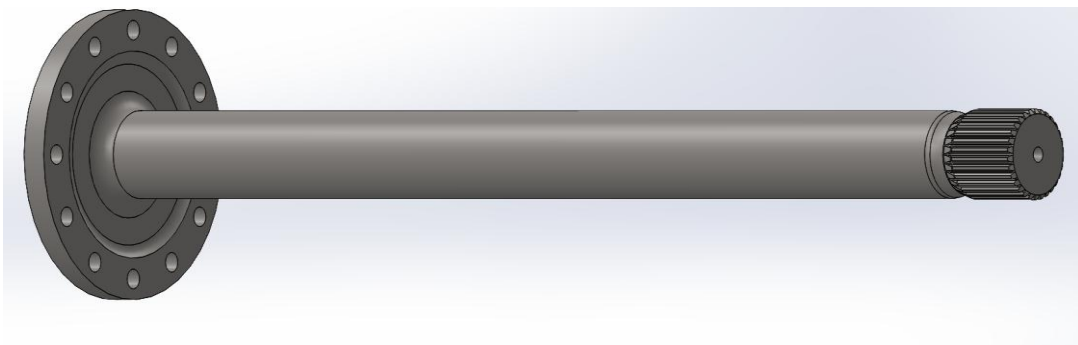


Figura 36. Modelado final de la pieza.

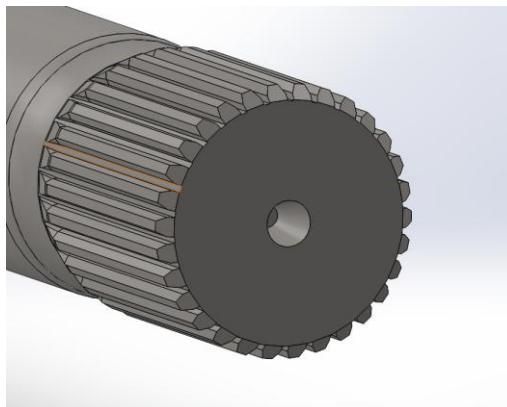


Figura 37. Modelado del dentado mediante perfil y matriz circular.

## 4.6. Simulación

En esta sección se detallarán los pasos seguidos para la elaboración de la simulación estática, que incluyen la asignación del material, la aplicación de cargas, la definición de las condiciones de contorno y la obtención de resultados.

1. **Tipo de estudio.** Se selecciona un estudio estático, ya que el objetivo es analizar el comportamiento del componente bajo cargas constantes. Este tipo de análisis permite observar la distribución de esfuerzos y deformaciones en condiciones de carga sostenida.
2. **Selección de material.** Se asigna el material AISI 4140 / 42CrMo4, habitual en la fabricación de palieres de camión, por su resistencia y dureza. Aunque no se sabe con exactitud el material original por lo que se ha elegido uno con propiedades mecánicas similares.
3. **Establecer el tipo de sujeciones.** Se definen las sujeciones teniendo en cuenta el funcionamiento real del palier. Para ello, se simula una fijación mediante tornillos y tuercas sobre una pared ficticia, como se muestra en las figuras (38).

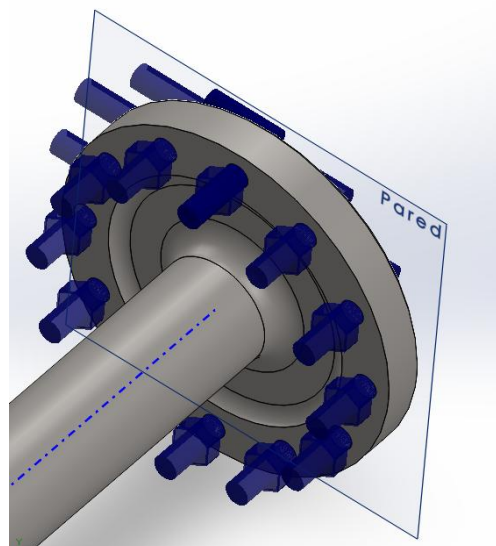


Figura 38. Vista final de la pieza con las sujeciones.

4. **Simplificación.** Se ha llevado a cabo una simplificación del modelo con el objetivo de obtener resultados óptimos. En este proceso, se han eliminado los engranajes y se ha simplificado la geometría en la zona del dentado donde se aplica el par. Esta simplificación permite que los cálculos sean más precisos y rápidos, sin afectar la fiabilidad de los resultados.

5. **Cargas externas.** Las cargas externas aplicadas en la simulación representan los esfuerzos reales que actúan sobre el palier durante el funcionamiento del vehículo. La carga principal es una fuerza de torsión, aplicada en la zona lisa donde normalmente se alojan los engranajes. Esta torsión máxima se ha estimado en 2100 Nm, teniendo en cuenta las condiciones de trabajo del conjunto motriz.

Para justificar esta carga, se ha utilizado la curva de par y potencia del motor MAN D2876 LF04, que equipa al modelo de camión correspondiente. En la figura (39) se muestra dicha curva, la cual permite conocer el par motor a distintas revoluciones. Es importante señalar que el par entregado por el motor no se transmite íntegramente al palier, ya que existen pérdidas por transmisión y una relación de reducción en la caja de cambios y el diferencial.

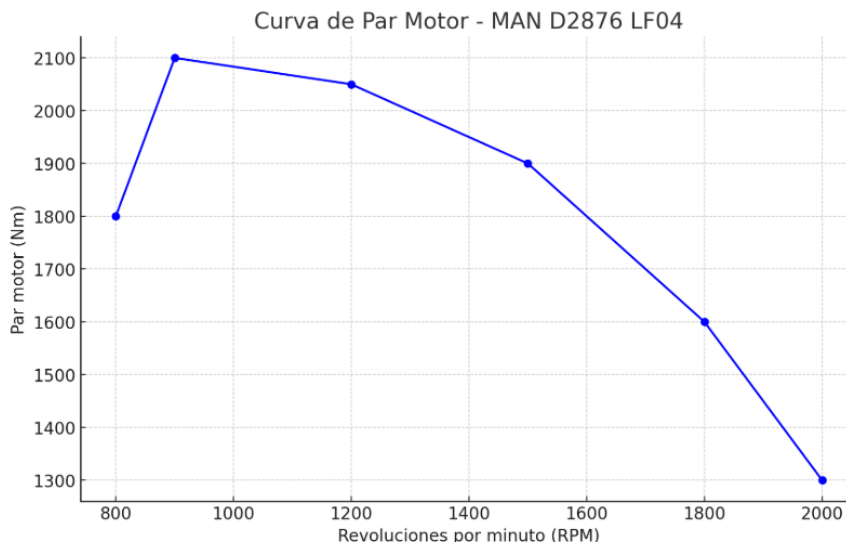


Figura 39. Curva de par y potencia del motor MAN D2876 LF04 [39].

Asimismo, se ha incluido la gravedad con un valor de  $9.81 \text{ m/s}^2$  que actúa sobre la pieza, y se ha considerado también la fuerza centrífuga, la cual se ha calculado teniendo en cuenta la velocidad de giro del palier, que en este caso es de  $26,91 \text{ rad/s}$ , este valor ha sido determinado por el tipo de motor en el que se instala este tipo de palier. La velocidad tomada de referencia es de  $50 \text{ km/h}$  y un radio total de rueda de  $536 \text{ mm}$ .

$$v = 50 \frac{\text{km}}{\text{h}}$$

$$r = 0.536 \text{ m}$$

$$w = \frac{50000}{3600} = 26,91 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

6. **Mallado.** Se ha realizado un mallado de densidad media de manera general, utilizando la función de control de mallado.
7. **Obtención de resultados.** Finalmente, se ejecuta el estudio para la obtención de los resultados de la simulación, obteniéndose la distribución de tensiones de Von Mises en el modelo. La tensión máxima registrada es de  $1,148 \times 10^2$  MPa (114,8 MPa). Esta distribución de tensiones puede observarse en la figura (40).

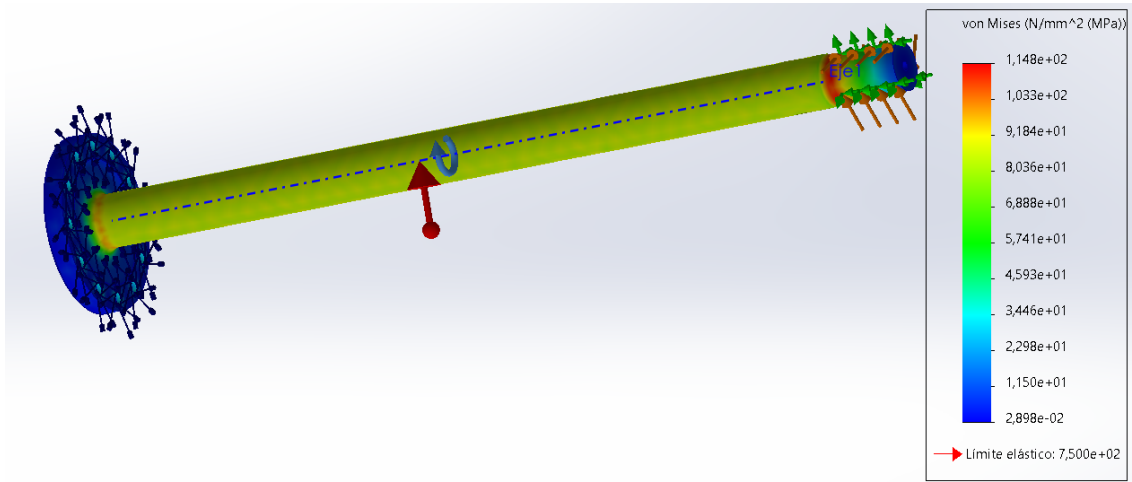


Figura 40. Obtención de resultados.

## Simulación de Fatiga

Además del análisis estático, se realiza un estudio de fatiga para evaluar la resistencia del palier bajo cargas cíclicas. Se configura un estudio específico de fatiga en SolidWorks, aplicando una carga alternante de torsión durante 1.000.000 de ciclos, con el objetivo de simular condiciones de uso intensivo a lo largo de su vida útil.

**Curva S-N.** Es conocida como curva de esfuerzos frente a número de ciclos, y es una herramienta fundamental en el análisis de fatiga de materiales. Esta curva representa la relación entre el esfuerzo de tensión aplicado a un material y el número de ciclos que el material puede soportar antes de fallar debido a la fatiga. En el eje S(MPa) se presenta la amplitud de la tensión alternante, mientras que en el eje N se muestra el número de ciclos hasta el fallo. A continuación, se muestra la figura (41) con la curva S-N del material 42CrMo4.

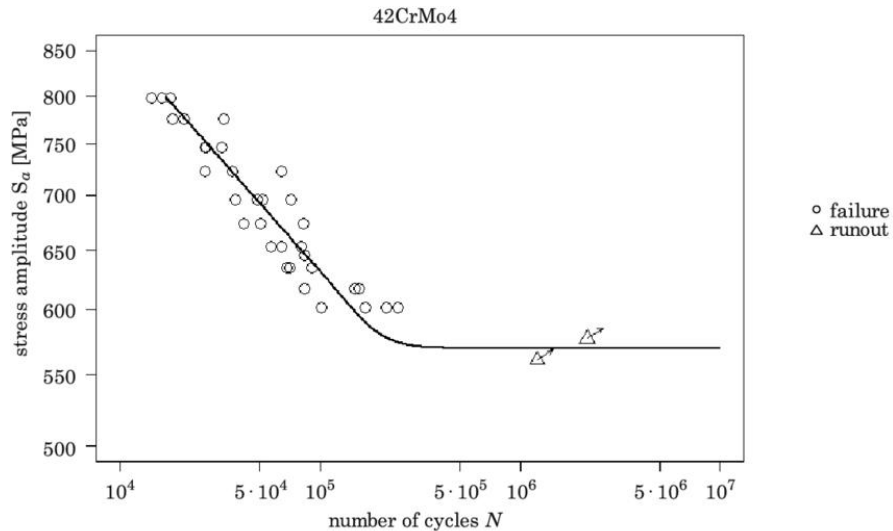


Figura 41. Curva S-N del 42CrMo4 [40].

**Obtención de resultados.** Finalmente, se ejecuta el estudio para obtener los resultados de simulación de fatiga. Estos resultados permiten evaluar cómo se comportará el palier frente a cargas cíclicas a lo largo del tiempo.

Tras ejecutar el estudio de fatiga, se obtienen los resultados principales: el porcentaje de daño acumulado y la vida útil estimada del palier. Ambos resultados indican un buen comportamiento frente a cargas cíclicas.

En la figura (42) se muestra el mapa de daño por fatiga, donde toda la pieza aparece en color azul, lo que indica un daño acumulado nulo o muy bajo en las condiciones simuladas.

En la figura (43) se representa la vida útil estimada, también con un color azul uniforme, esto significa que la pieza resiste completamente el número de ciclos analizado, sin indicios de fallo por fatiga.

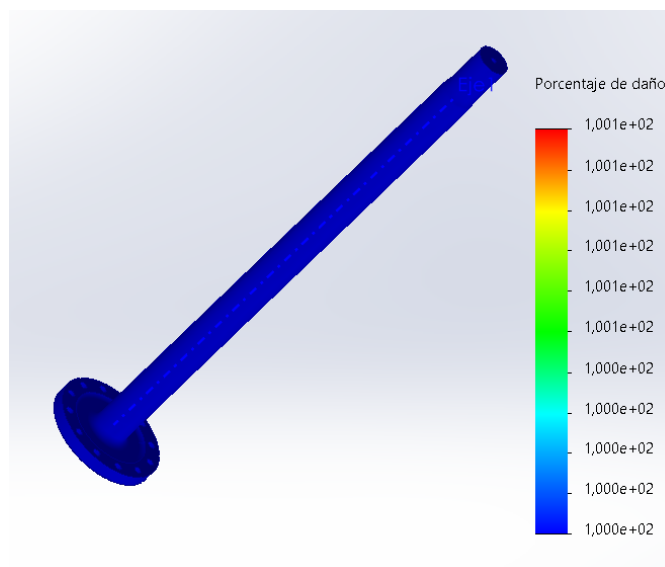


Figura 42. Resultado del porcentaje de daño.

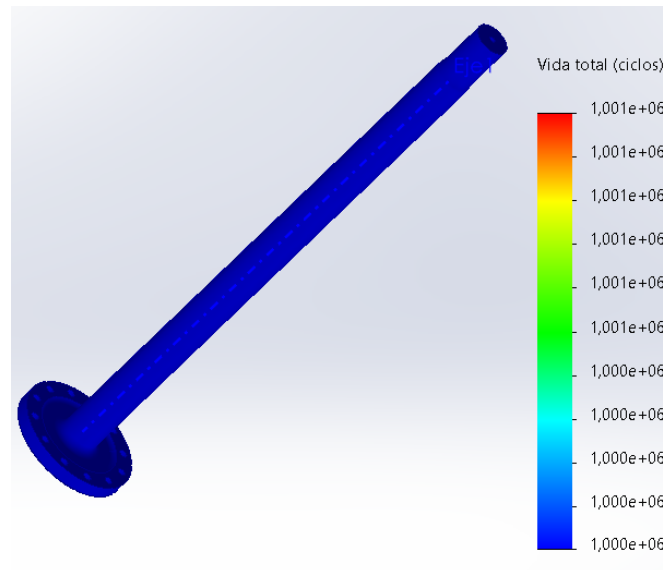


Figura 43. Resultado de la vida total (ciclos).

#### 4.7. Interpretación y discusión de resultados

En primer lugar, durante la inspección del material se observó que la superficie del palier presenta dos zonas diferenciadas, lo que llevó a formular una hipótesis inicial: ¿se trata de un mismo material con tratamiento térmico superficial o de materiales distintos? Para comprobarlo, se realizó un ensayo de dureza Vickers el cual sus resultados mostraban que la dureza disminuye progresivamente a medida que se avanza desde el exterior hacia el centro del material. Esta variación es coherente con un tratamiento térmico superficial como la cementación que se aplica para aumentar la resistencia en la zona exterior del componente. Los resultados se pueden observar en las gráficas presentadas en el apartado 4.3.1.

Tras aplicar el ataque químico a la superficie de la probeta y realizar el análisis metalográfico tanto en el interior como en el exterior de la muestra, mediante el uso del microscopio óptico y su software de análisis, se observó una diferencia significativa en el tamaño del grano. En concreto, el tamaño de grano en la zona exterior es considerablemente más fino que en el interior, lo cual es característico de piezas sometidas a un endurecimiento termoquímico como la cementación.

Este análisis confirma que el material es el mismo en toda la sección del palier, pero que ha sido sometido a un tratamiento térmico superficial, destinado a mejorar las propiedades mecánicas de la capa exterior especialmente su resistencia al desgaste. Los resultados detallados de este estudio se reflejan en las figuras del punto 4.3.2. La diferencia observada en el tamaño de grano entre el núcleo y la superficie refuerza esta hipótesis y permite descartar la presencia de materiales distintos en la composición del palier.

No obstante, no puede afirmarse con certeza si la superficie ha sido modificada mediante tratamientos químicos como cementación o nitruración, ya que no se ha realizado un análisis químico específico (por ejemplo, mediante SEM-EDX) que permita verificar posibles cambios en la composición superficial del material.

En segundo lugar, se procedió al cálculo del punto donde se produciría la flecha máxima en el palier. Para ello, se utilizaron las fórmulas del prontuario correspondientes al caso de una viga simple con un extremo empotrado y el otro apoyado. Aplicando dicha fórmula y considerando la longitud total del palier se obtuvo que la flecha máxima se produce a una distancia de 420,24 mm desde el extremo donde se encuentran los engranajes.

Sin embargo, al comparar este resultado con el punto donde se ha producido la fractura real del palier, se observa que esta se encuentra a 283 mm desde ese mismo extremo. Por tanto, se concluye que la zona de máxima deformación no coincide con la zona de rotura, lo que sugiere que el fallo no se ha producido exclusivamente por flexión, sino que podrían haber influido otros factores como los esfuerzos de torsión, concentraciones de tensiones o imperfecciones internas.

En tercer lugar, tras realizar el modelado del palier y llevar a cabo la simulación en SolidWorks, se aplicaron todas las cargas externas importantes, se introdujeron las condiciones de contorno, y se definieron tanto las simplificaciones geométricas necesarias como el mallado adecuado para garantizar la precisión del análisis.

Una vez ejecutado el estudio, se obtuvieron una serie de resultados significativos que se presentan en el apartado 4.6. Entre ellos destaca una tensión máxima de Von Mises de 114.8 MPa, localizada en una zona de redondeo próxima al engranaje, tal como se muestra en la figura (44) y figura (45). No obstante, esta tensión no debe considerarse representativa, ya que se encuentra cerca del área de aplicación de la carga, donde es habitual que se generen concentraciones locales debido tanto a la geometría como al propio modo de aplicación de la carga. Sin embargo, no se detectan tensiones elevadas en la zona donde se ha producido la rotura real del palier, lo que sugiere que la fractura no fue causada por una concentración de tensiones debida a la torsión en esa zona específica.

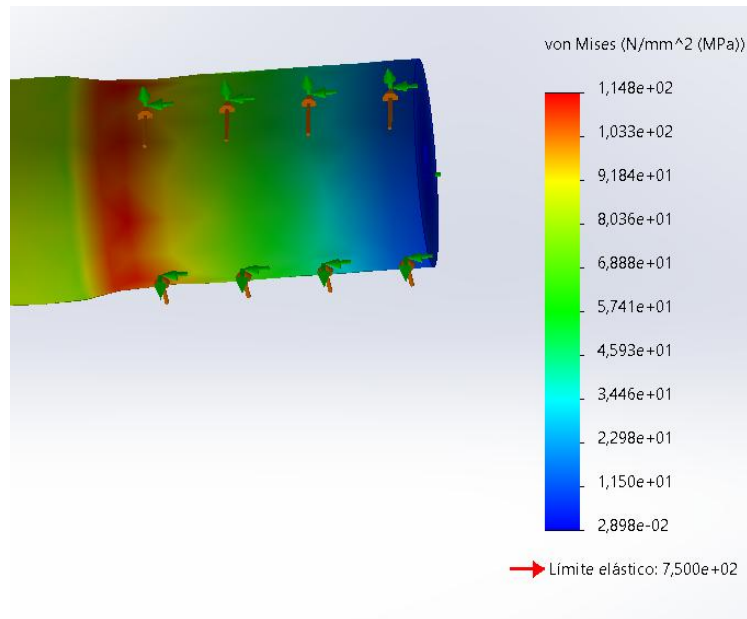


Figura 44. Zona 1 de máxima tensión de Von Mises.

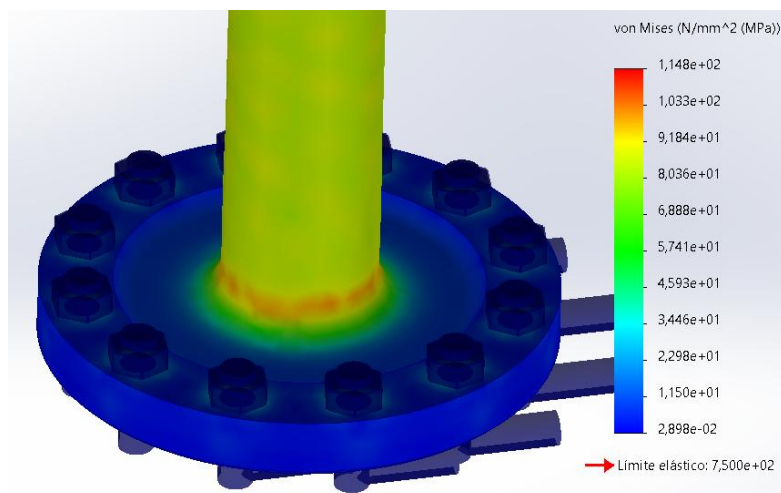


Figura 45. Zona 2 de máxima tensión de Von Mises.

Para concluir el análisis, se llevó a cabo una simulación de fatiga en la que se evaluó el comportamiento del palier frente a cargas cíclicas. Los resultados muestran que, bajo las condiciones de carga y uso establecidas en el modelo, la pieza no presenta daño por fatiga ni una reducción significativa de su vida útil.

El fallo real de la pieza podría explicarse por una combinación de esfuerzos de flexión, un par de torsión elevado y algún posible defecto interno no detectado, cuya existencia no se ha podido debido a la situación de la pieza que se encuentra totalmente rota.

## 5. Conclusiones

Este estudio ha permitido realizar una evaluación exhaustiva del fallo producido en un palier de camión, combinando observaciones experimentales, ensayos mecánicos y simulaciones numéricas. Inicialmente, los resultados del ensayo de dureza Vickers revelaron una variación progresiva desde el exterior hacia el interior, lo que indicaba la aplicación de un tratamiento termoquímico superficial tipo cementación, comúnmente utilizado para mejorar la resistencia al desgaste en la superficie de piezas sometidas a esfuerzos repetitivos. Este hallazgo fue confirmado mediante análisis metalográfico, donde se observó una clara diferencia en el tamaño del grano, demostrando que el material era homogéneo, pero con propiedades mecánicas diferenciadas por un endurecimiento en la capa exterior.

Por otro lado, el análisis estático permitió calcular la flecha máxima teórica bajo carga, situada en torno a los 420 mm, aunque la fractura real se localizó en una zona distinta, concretamente a 283 mm del extremo. Esta discrepancia apunta a que la rotura no se debió únicamente a flexión o torsión regulares, sino que intervinieron factores adicionales, como esfuerzos de fatiga acumulada, concentraciones de tensión y posibles defectos internos no detectados visualmente.

La simulación de fatiga confirmó que, en condiciones normales de funcionamiento, el palier no debería haber fallado, ya que no se evidenciaron daños significativos ni reducción en la vida útil esperada. Sin embargo, esta simulación no contemplaba la situación particular en la que ocurrió el fallo: el camión circulaba con el diferencial bloqueado, y tras perder tracción en una de las ruedas al patinar sobre hojas, todo el par de torsión fue transmitido a la otra rueda, la cual estaba conectada al palier que terminó rompiendo. Esta transferencia repentina e intensa de par torsional generó un pico de esfuerzo muy superior al considerado en la simulación, lo que, combinado con un posible defecto interno y la presencia de esfuerzos flexionales, originó una concentración crítica de tensiones que precipitó la fractura.

En conjunto, los datos obtenidos permiten concluir que la rotura fue el resultado de una combinación de factores mecánicos extremos y una posible imperfección en el material, lo que pone de manifiesto la importancia de un control de calidad exhaustivo durante la fabricación y el tratamiento térmico, así como de contemplar condiciones límite en el diseño de componentes sometidos a esfuerzos variables y situaciones imprevistas.

## 6. Referencias Bibliográficas

- [1] Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Brown, T. H. (2020). Standard Handbook of Machine Design.
- [2] Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2020). Mechanical Engineering Design.
- [3] Manual técnico de transmisión de vehículos pesados. ZF Friedrichshafen AG.
- [4] Frost, N. E., Marsh, K. J., & Pook, L. P. (1999). Metal Fatigue. Dover Publications.
- [5] Davis, J. R. (Ed.). (2004). Handbook of Materials for Product Design. ASM International.
- [6] Prakash, J., Gupta, M., & Kumar, R. (2014). Mechanical properties of case-hardened steels. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(8), 2783-2792.
- [7] Feng, X., Li, S., & Zhang, W. (2018). Influence of heat treatment on the surface hardness and microstructure of bearing steels. *Journal of Heat Treatment and Materials*, 35(4), 125-131
- [8] Sahoo, S. K., & Sharma, A. K. (2013). Elastic properties of materials used in automotive shafts. *Materials Science and Engineering*, 340(1), 015020.
- [9] Referencia: Callister, W. D. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. Wiley.
- [10] Referencia: Schaffer, J. E., & Moser, R. L. (2004). The Hall-Petch relationship in steel. *Materials Science and Engineering*, 380(1), 115-120.
- [11] Referencia: Mills, K. C. (2002). *Elements of the Heat Treatment of Steel*. Springer.
- [12] Ricardo D. López et al. / *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI Vol. 7 No. Especial 2 (2019) 81–87*
- [13] González, M. (2016). *Tratamientos térmicos y sus aplicaciones en la industria automotriz*. Editorial Académica Española.
- [14] Fernández, J. (2009). *Tratamientos térmicos de los aceros: teoría y práctica*. Editorial Díaz de Santos.
- [15] Ruiz, A., & Sánchez, R. (2017). *Tratamientos térmicos de acero: Cementado y otros procesos*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [16] Martín, F., & Gómez, L. (2014). *Nitruración: Un tratamiento térmico para mejorar la resistencia de los aceros*. Editorial Marcombo.
- [17] Álvarez, F., & Castro, J. (2018). *Endurecimiento por inducción: Fundamentos y aplicaciones en la industria automotriz*. Editorial McGraw-Hill.

- [18] DW Induction Heater. (n.d.). 10 FAQs about induction hardening. Recuperado de <https://es.dw-inductionheater.com/10-faqs-about-induction-hardening.html>
- [19] Montiel, F. J., & García, J. L. (2018). Método de elementos finitos aplicado al diseño mecánico. Madrid: Ediciones Universidad Politécnica.
- [20] González, L. F., & Hernández, R. P. (2021). Introducción al método de elementos finitos en la ingeniería. Barcelona: Editorial Hispano-europea.
- [21] Martínez, J. P., & López, R. F. (2020). Técnicas avanzadas de mallado en elementos finitos. Sevilla: Editorial Andaluza de Ingeniería.
- [22] CHGRUPO3. (s.f.). Microscopio vertical Leica DM4 M. <https://www.chgrupo3.com/producto/microscopio-vertical-leica-dm4-m/>
- [23] TECNIMETAL. (s.f.). Pulidora para metales TEKNIPOL DOUBLE DISC IM. DirectIndustry. <https://www.directindustry.es/prod/tecnimetal/product-102725-2391141.html>
- [24] Woge, O. G., Ortiz, G. G., González-Morán, C. O., Guadalupe, J., Hernández, M., & Chau, A. L." Análisis de tensión y desarrollo de una guía en MATLAB aplicada a una estructura de exoesqueleto mediante el criterio de Von Mises". (2022)
- [25] Santos, E., Yenque D., J., Rojas L., O., & Rosales U., V. (2001). Acerca del ensayo de dureza. Notas Científicas. Recuperado de [[https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol4\\_2/a13.pdf](https://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/publicaciones/indata/vol4_2/a13.pdf)]
- [26] Pastrana, B., Cabezón, G., & Cristina, A. (2021)." Laboratorio virtual de ensayos mecánicos de materiales de interés industrial". Universidad de Valladolid.
- [27] Reyna Olivares, G. (s.f.). Manual de prácticas de análisis metalográfico. Recuperado de [https://siic.ceti.mx/recursos/DAC\\_Evidencias/Guillermo%20Reinosa%20Olivares%20Manual/Manual%20de%20Practicas%20Analisis%20Metalografico.pdf](https://siic.ceti.mx/recursos/DAC_Evidencias/Guillermo%20Reinosa%20Olivares%20Manual/Manual%20de%20Practicas%20Analisis%20Metalografico.pdf)
- [28] Angwar Mukhojin, Sri Nugroho, Ismoyo Haryanto, "Failure Analysis of Rear Axle Shaft Dump Truck Capacity 7.5 Ton" Published in International Research Journal of Innovations in Engineering and Technology - IRJIET, Volume 7, Issue 2, pp 56-61, February 2023. Article DOI <https://doi.org/10.47001/IRJIET/2023.702008>
- [29] Sah, H. P. (2023). Failure analysis of rear axle shaft of a heavy-duty truck [Figure 1, Drive Axle Assembly]. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Drive-Axle-Assembly\\_fig1\\_380952187](https://www.researchgate.net/figure/Drive-Axle-Assembly_fig1_380952187)

- [30] Autopartes UHV. (s.f.). Productos - Diferenciales, transmisiones y ejes. <https://www.autopartesuhv.com/productosddt.html>
- [31] Truck1. (s.f.). Palier Volvo FH4. <https://www.truck1.bo/piezas-de-recambio/palieres/volvo-fh4-a5329906.html>
- [32] Elices, M., & Llorca, J. (2002). Mecánica de materiales. Volumen II: Comportamiento y propiedades de los materiales estructurales. Ediciones ETSII - Universidad Politécnica de Madrid.
- [33] Díaz, C., & Rodríguez, P. (2020). Impacto de las cargas dinámicas en la durabilidad de componentes de vehículos pesados. *Revista de Ingeniería de Vehículos*, 45(2), 120-135. <https://doi.org/10.1234/revistaingevveh.2020.45.2.120>
- [34] Truck1. (s.f.). Palier Volvo FH4. Truck1 Bolivia. <https://www.truck1.bo/piezas-de-recambio/palieres/volvo-fh4-a5329906.html>
- [35] Universidad de Málaga. (s.f.). Elasticidad y resistencia de materiales: Torsión en perfiles circulares y no circulares [Apuntes de clase]. Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, Universidad de Málaga.
- [36] LABTESA. (2024). Análisis de causa de falla. <https://labtesa.com.ar/site/wp-content/uploads/2024/04/labtesa-analisis-de-causa-de-falla.pdf>
- [37] López, R. D., Maldonado, A., López, C. E., Guzmán, J. E., & García, M. A. (s.f.). Efecto del tamaño de grano austenítico en el comportamiento mecánico para los aceros AISI 1045 y 4140. Instituto Tecnológico de Cd. Victoria.
- [38] Asociación Española de Normalización. (2024). UNE-EN ISO 6507-1:2024. Materiales metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo (ISO 6507-1:2023). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0072919>
- [39] MAN Truck & Bus. (n.d.). Technical data: D2876 LF04 engine. MAN Engines. Retrieved from <https://www.man.eu>
- [40] Strzelecki, P., Sempruch, J., & Tomaszewski, T. (2017). Analysis of selected mathematical models of high-cycle S-N characteristics. *Technical Sciences*, 20. <https://doi.org/10.31648/ts.5424>