



**Universidad  
Europea**

**UNIVERSIDAD EUROPEA DE MADRID**

**ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO**

**ÁREA INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS**

**INDUSTRIALES**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**OPTIMIZACIÓN DE UNA BIELA DE MOTOR  
DIÉSEL DE CAMIÓN MEDIANTE ANÁLISIS  
FEM Y CRITERIOS DE EFICIENCIA**

**Alumno: D. LEOPOLDO MONEDERO TOLEDO**

**Director: D. JUAN JOSÉ BERTOL LORENZO**

**JULIO 2025**

**TÍTULO:** Optimización de una biela de motor diésel de camión mediante análisis FEM y criterios de eficiencia

**AUTOR:** LEOPOLDO MONEDERO TOLEDO

**DIRECTOR DEL PROYECTO:** JUAN JOSÉ BERTOL LORENZO

**FECHA:** 06 de Julio de 2025

## RESUMEN

Este Trabajo de Fin de Grado se centra en el rediseño optimizado de una biela de motor diésel de camión, con el objetivo de reducir su masa sin comprometer su resistencia mecánica ni su vida útil. La reducción del peso de componentes alternativos como la biela permite disminuir las fuerzas de inercia internas, lo que puede mejorar el rendimiento del motor, aumentar su eficiencia y reducir el consumo de combustible.

El proyecto contempla una fase de estudio comparativo de materiales, incluyendo alternativas tradicionales y sostenibles, y una fase de simulación estructural y de fatiga mediante el software ANSYS Workbench. Posteriormente, se realiza una optimización topológica para aligerar la geometría sin superar los límites de esfuerzo admisibles. Finalmente, se estima el impacto económico de aplicar este rediseño a nivel industrial, evaluando el ahorro potencial en producción y su viabilidad.

Los resultados obtenidos permiten validar una solución de diseño más eficiente y ligera, con un enfoque técnico innovador y alineado con las tendencias de sostenibilidad e ingeniería digital en el sector de la automoción.

**Palabras clave:** Biela, Motor diésel, Análisis por elementos finitos (FEM), Optimización topológica, Fatiga, Ingeniería sostenible.

## ABSTRACT

This Final Degree Project focuses on the optimized redesign of a diesel truck engine connecting rod, with the objective of reducing its weight without compromising mechanical strength or fatigue life. Lowering the mass of reciprocating components such as the connecting rod reduces internal inertial forces, potentially improving engine performance, increasing efficiency, and reducing fuel consumption.

The project includes a comparative study of materials, considering both traditional and sustainable alternatives, and a structural and fatigue simulation phase using ANSYS Workbench. Subsequently, a topology optimization process is applied to lighten the component while respecting allowable stress limits. Finally, the economic impact of implementing this redesign at an industrial scale is evaluated, estimating potential production savings and feasibility.

The results support a more efficient and lightweight design solution, with an innovative technical approach aligned with current trends in sustainability and digital engineering in the automotive sector.

**Key words:** Connecting rod, Diesel engine, Finite Element Analysis, Fatigue, Topology optimization, Sustainable engineering.

# Índice

<b>RESUMEN</b> .....	3
<b>ABSTRACT</b> .....	3
<b>Capítulo 1. INTRODUCCIÓN</b> .....	9
1.1 Contexto del proyecto y motivación.....	9
1.2 Objetivo general .....	10
1.3 Objetivos específicos .....	10
1.4 Metodología general.....	11
<b>Capítulo 2. MARCO TEÓRICO</b> .....	12
2.1 Funcionamiento, tipos, materiales y fabricación de la biela en motores diésel de camión	12
2.1.1 Función y solicitaciones mecánicas .....	12
2.1.2 Tipologías constructivas .....	13
2.1.3 Materiales empleados .....	13
2.1.4 Proceso de fabricación .....	14
2.2 Legislación, normativa y requisitos de homologación aplicables a la biela en motores diésel de camión .....	15
2.2.1 Legislación europea aplicable.....	15
2.2.2 Normas técnicas aplicables y ensayos exigibles.....	16
2.2.3 Correspondencia entre normativa técnica y simulaciones FEM aplicadas en el TFG	17
2.2.4 Implicaciones para la viabilidad del rediseño.....	18
2.3 Criterios de diseño mecánico de la biela .....	19
2.3.1 Cargas y condiciones operativas .....	19
2.3.2 Requisitos estructurales clave .....	19
2.3.3 Requisitos funcionales y productivos .....	20
2.4 Comportamiento a fatiga de componentes alternativos .....	21
2.4.1 Naturaleza del fenómeno de fatiga.....	21
2.4.2 Evaluación mediante simulación.....	21
2.5 Optimización estructural basada en selección de material.....	22

---

2.5.1	Objetos de la optimización .....	22
2.5.2	Alcance de la evaluación .....	22
<b>Capítulo 3.</b>	<b>ESTUDIO COMPARATIVO DE MATERIALES CANDIDATOS .....</b>	<b>23</b>
3.1	Justificación de la comparación entre materiales .....	24
3.2	Propiedades mecánicas y físicas de los materiales seleccionados .....	25
3.2.1	Acero de alta resistencia .....	25
3.2.2	Aluminio forjado (7075-T6) .....	25
3.2.3	Titanio forjado (Ti-6Al-4V) .....	26
3.3	Consideraciones de fabricación y procesado .....	27
3.3.1	Acero .....	27
3.3.2	Aluminio forjado (7075-T6) .....	27
3.3.3	Titanio forjado (Ti-6Al-4V) .....	27
3.4	Justificación del análisis estructural comparativo .....	28
3.5	Comparativa final de los materiales candidatos .....	29
<b>Capítulo 4.</b>	<b>Diseño geométrico de la biela mediante CAD (SolidWorks 2024) .....</b>	<b>30</b>
4.1	Objetivo del modelado CAD .....	30
4.2	Herramienta de diseño utilizada: SolidWorks 2024 .....	31
4.3	Consideraciones geométricas del diseño .....	31
4.4	Modelo tridimensional final de la biela .....	32
4.5	Plano técnico de fabricación .....	34
<b>Capítulo 5.</b>	<b>SIMULACIÓN ESTRUCTURAL DE LA BIELA MEDIANTE ANSYS WORKBENCH ..</b>	<b>35</b>
5.1	Importación del modelo CAD y configuración inicial .....	35
5.2	Definición de materiales en la biblioteca de ANSYS .....	36
5.2.1	Acero convencional (referencia) .....	36
5.2.2	Acero alta resistencia (martensítico) .....	36
5.2.3	Aluminio forjado (7075-T6 / 2618) .....	37
5.2.4	Titanio forjado (Ti-6Al-4V) .....	37
5.3	Ensayos estructurales definidos .....	38
5.3.1	Ensayo estático lineal .....	38
5.3.2	Análisis del Factor de Seguridad (FOS) .....	39
5.3.3	Ensayo de deformación total .....	40
5.3.4	Ensayo con carga axial .....	41
5.4	Simulación por material y análisis de resultados .....	42

---

5.4.1	Acero convencional .....	42
5.4.2	Acero alta resistencia .....	45
5.4.3	Aluminio forjado.....	48
5.4.4	Titanio forjado .....	51
5.5	Comparativa final de resultados.....	54
<b>Capítulo 6.</b>	<b>ESTUDIO ECONÓMICO COMPARATIVO .....</b>	<b>56</b>
6.1	Introducción.....	56
6.2	Metodología y parámetros económicos considerados .....	56
6.2.1	Coste directo de fabricación.....	56
6.2.2	Coste base de referencia: biela convencional.....	58
6.2.3	Ahorro por eficiencia energética derivada del aligeramiento.....	58
6.2.4	Ahorro operativo anual derivado del peso.....	59
6.2.5	Consideraciones fiscales (IRPF/Impuesto de Sociedades) .....	59
6.2.6	Cálculo del retorno de inversión (payback).....	59
6.2.7	Tasa Interna de Retorno (TIR) .....	60
6.3	Aplicación práctica: Mercedes-Benz Actros .....	61
6.4	Estructura del análisis en hoja de cálculo .....	62
6.5	Resumen de los resultados.....	63
<b>Capítulo 7.</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>66</b>
7.1	Conclusiones generales .....	66
7.2	Posibles mejores y futuras líneas de investigación.....	67
7.3	Reflexión final y valoración personal.....	69
<b>ANEXO 1.</b>	<b>ESTUDIO ECONÓMICO(EXCEL).....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>.....</b>	<b>72</b>

# Índice de Figuras

Figura 1. Modelo 3D de la biela (Vista 1) .....	32
Figura 2. Modelo 3D de la biela (Vista 2) .....	32
Figura 3. Modelo 3D de la biela (Vista 3) .....	33
Figura 4. Plano de la biela .....	34
Figura 5. Ensayo 1. Distribución de Tensiones. Acero Convencional .....	42
Figura 6. Ensayo 1. Factor de seguridad. Acero Convencional .....	42
Figura 7. Ensayo 1. Deformación Total. Acero Convencional .....	43
Figura 8. Ensayo 2. Distribución de Tensiones. Acero Convencional .....	43
Figura 9. Ensayo 2. Deformación Total. Acero Convencional .....	43
Figura 10. Ensayo 2. Factor de seguridad. Acero Convencional .....	44
Figura 11. Ensayo 1. Distribución de Tensiones. Acero alta resistencia .....	45
Figura 12. Ensayo 1. Factor de seguridad. Acero alta resistencia .....	45
Figura 13. Ensayo 1. Deformación total. Acero alta resistencia .....	46
Figura 14. Ensayo 2. Distribución de Tensiones. Acero alta resistencia .....	46
Figura 15. Ensayo 2. Deformación total. Acero alta resistencia .....	46
Figura 16. Ensayo 2. Factor de seguridad. Acero alta resistencia .....	47
Figura 17. Ensayo 1. Distribución de tensiones. Aluminio forjado .....	48
Figura 18. Ensayo 1. Factor de seguridad. Aluminio forjado .....	48
Figura 19. Ensayo 1. Deformación Total. Aluminio forjado .....	49
Figura 20. Ensayo 2. Distribución de tensiones. Aluminio forjado .....	49
Figura 21. Ensayo 2. Deformación total. Aluminio forjado .....	49
Figura 22. Ensayo 2. Factor de seguridad. Aluminio forjado .....	50
Figura 23. Ensayo 1. Distribución de tensiones. Titanio forjado .....	51
Figura 24. Ensayo 1. Factor de seguridad. Titanio forjado .....	51
Figura 25. Ensayo 1. Deformación total. Titanio forjado .....	52
Figura 26. Ensayo 2. Distribución de tensiones. Titanio forjado .....	52
Figura 27. Ensayo 2. Deformación total. Titanio forjado .....	52
Figura 28. Ensayo 2. Factor de seguridad. Titanio forjado .....	53
Figura 29. Gráfica comparación de Tensiones .....	55
Figura 30. Gráfica comparación factor de seguridad. ....	56
Figura 31. Gráfica costes totales .....	64
Figura 32. Gráfica ahorro a 5 años .....	64
Figura 33. Gráfica comparación entre materiales .....	65

---

# Índice de Tablas

Tabla 1. Correspondencia entre normativa técnica y simulaciones FEM aplicadas en ANSYS ...	17
Tabla 2. Comparativa técnica y económica de los materiales candidatos para la biela .....	29
Tabla 3. Tabla de propiedades del Acero convencional.....	36
Tabla 4. Tabla de propiedades del Acero martensítico/bainítico .....	36
Tabla 5. Tabla de propiedades del Aluminio forjado (7075-T6 / 2618) .....	37
Tabla 6. Tabla de propiedades del Titanio forjado (Ti-6Al-4V) .....	37
Tabla 7. Comparativa de resultados en los ensayos .....	54
Tabla 8. Tabla comparativa estudio económico .....	63
Tabla 9. Tabla comparativa del TIR para cada material .....	63

# Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Contexto del proyecto y motivación

En la industria del transporte por carretera, la mejora de la eficiencia energética y la reducción de emisiones son hoy en día objetivos prioritarios. Los vehículos industriales pesados, como los camiones de largo recorrido, consumen grandes cantidades de combustible debido a su masa, uso intensivo y ciclos de trabajo prolongados. Esto convierte a cada kilogramo ahorrado en el diseño de estos vehículos en una oportunidad directa para reducir consumo, emisiones y costes operativos.

Uno de los elementos más críticos en el rendimiento del motor es la biela, una pieza esencial en el sistema biela-manivela. Esta convierte el movimiento lineal del pistón en rotativo en el cigüeñal, y está sometida a cargas cíclicas muy elevadas de tracción y compresión en cada revolución del motor. Su peso influye directamente en las fuerzas de inercia generadas por las masas alternativas, lo que a su vez condiciona la vibración, el equilibrio dinámico, el desgaste de cojinetes, la eficiencia del ciclo y, en última instancia, la durabilidad y potencia específica del motor.

Los fabricantes de motores buscan continuamente aligerar este tipo de componentes para:

- Disminuir fuerzas de inercia internas, lo que reduce tensiones en el cigüeñal y en el bloque motor.
- Mejorar la eficiencia energética, ya que una menor masa móvil requiere menos energía para moverse.
- Permitir mayores regímenes de giro del motor, sin riesgo de fallo estructural.
- Reducir el desgaste por fatiga, al minimizar el rango de tensiones alternantes.
- Aumentar la vida útil del conjunto motor.
- Reducir costes de material y de mecanizado, especialmente en producciones en serie.

En este contexto, la combinación de tecnologías de diseño asistido por ordenador (CAD), simulación por elementos finitos (FEM) y optimización topológica, permite explorar diseños de bielas más eficientes, ligeros y sostenibles. Esta línea de trabajo se alinea también con las tendencias de sostenibilidad en la ingeniería, ya que permite evaluar nuevos materiales, minimizar residuos de fabricación y diseñar componentes adaptables a procesos como la fabricación aditiva (impresión 3D).

Este Trabajo de Fin de Grado se plantea dentro de este marco, como una propuesta técnica para rediseñar una biela de motor diésel de camión, mejorando su rendimiento mediante el uso de herramientas digitales avanzadas, análisis estructural y criterios de diseño sostenibles.

## 1.2 Objetivo general

Desarrollar el rediseño de una biela de motor diésel para camión mediante análisis estructural y optimización topológica, con el fin de reducir su masa sin comprometer su resistencia ni su vida útil, evaluando además el impacto técnico y económico de dicha mejora sobre el rendimiento del motor y el proceso de fabricación.

## 1.3 Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el funcionamiento mecánico de la biela en el contexto de un motor diésel de vehículo pesado, incluyendo los esfuerzos a los que está sometida en condiciones reales de trabajo.
- Estudiar diferentes materiales disponibles para la fabricación de bielas, evaluando su comportamiento mecánico (resistencia, rigidez, densidad), su coste y su sostenibilidad, y seleccionando los más adecuados para el rediseño.
- Modelar la biela en entorno CAD, replicando su geometría original a partir de datos de referencia, y aplicando simplificaciones justificadas para facilitar el análisis numérico sin perder validez técnica.
- Realizar simulaciones mediante ANSYS Workbench, evaluando el comportamiento estructural bajo carga estática máxima, localizando zonas críticas de concentración de tensiones, y determinando si el diseño original cumple con los requisitos mecánicos.
- Llevar a cabo un análisis por fatiga, simulando la carga cíclica a la que se somete la biela en cada ciclo motor, para estimar la vida útil del componente y predecir posibles puntos de fallo prematuro.
- Aplicar técnicas de optimización topológica para proponer un nuevo diseño que permita reducir masa en zonas no críticas, manteniendo los márgenes de seguridad estructural, con el objetivo de mejorar el rendimiento del motor y reducir costes de material.
- Comparar el diseño original con el diseño optimizado, cuantificando los beneficios en términos de reducción de masa, tensiones máximas, vida útil, viabilidad estructural y posibles efectos sobre el motor.
- Evaluar el impacto económico del rediseño, estimando el ahorro en consumo de material, mecanizado y producción en serie, así como el beneficio indirecto en términos de eficiencia energética del vehículo y reducción de emisiones.

## 1.4 Metodología general

El enfoque metodológico seguido en este proyecto se basa en la ingeniería asistida por ordenador, combinando herramientas de diseño 3D, simulación numérica por elementos finitos y métodos de optimización. La metodología se desarrolla en varias fases sucesivas:

- Revisión bibliográfica y técnica, para comprender el funcionamiento y las exigencias estructurales de una biela de motor diésel, así como los fundamentos del análisis por elementos finitos, el comportamiento a fatiga y la optimización topológica.
- Selección de materiales candidatos, considerando propiedades mecánicas (resistencia, módulo elástico, densidad), facilidad de fabricación, costes y sostenibilidad, comparando aceros forjados tradicionales con nuevas aleaciones ligeras o reciclables.
- Modelado CAD de la biela, basado en geometrías de referencia reales. Se creará una réplica simplificada, suficientemente precisa para realizar un análisis estructural válido.
- Análisis FEM en ANSYS, comenzando con un análisis estructural estático bajo condiciones de carga máxima. Este análisis permitirá localizar zonas con alta concentración de tensiones y comprobar si el diseño soporta las cargas previstas con un margen de seguridad adecuado.
- Optimización topológica, restringida por las condiciones de carga reales, con el objetivo de reducir peso sin exceder los valores admisibles de tensión. Se estudiarán posibles nuevas formas geométricas más eficientes estructuralmente.
- Evaluación de resultados, donde se analizarán y compararán las prestaciones del diseño original y del optimizado, tanto en términos mecánicos como económicos.
- Estudio técnico-económico, en el que se estimará el ahorro en costes de material, fabricación y operación del vehículo, en caso de aplicar este rediseño a gran escala.

Esta metodología permitirá obtener una propuesta de rediseño válida técnica y económicamente, con potencial aplicación real en la industria de automoción pesada.

## Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Funcionamiento, tipos, materiales y fabricación de la biela en motores diésel de camión

La biela es un componente esencial del sistema biela-manivela en los motores de combustión interna, cuya función principal consiste en transmitir el movimiento alternativo del pistón al cigüeñal, convirtiéndolo en un movimiento rotativo. Esta transferencia de energía, que ocurre de forma repetitiva y a alta velocidad, somete a la biela a condiciones de carga extremas, tanto por las presiones generadas durante la combustión como por las fuerzas inerciales asociadas al cambio de dirección del pistón.

En el caso de los motores diésel de camión, la relevancia de la biela se ve acentuada por la elevada relación de compresión que caracteriza a este tipo de motorizaciones, así como por su régimen de trabajo prolongado, su elevado par motor y las exigencias de fiabilidad en contextos operativos intensivos. La biela se encuentra así en el centro de una problemática técnica donde se combinan la resistencia mecánica, la vida útil a fatiga, el peso y el coste de producción como variables críticas del diseño.

Desde una perspectiva económica, la biela representa un elemento clave en la estructura de costes del motor. Aunque no es el componente más costoso de forma unitaria, su peso, material, proceso de fabricación y tasa de fallo asociada influyen directamente en el coste total de producción, mantenimiento y ciclo de vida del motor. Por ello, su optimización ya sea estructural, funcional o material presenta un potencial claro de reducción de costes industriales y mejora de la eficiencia operativa de los vehículos pesados. Esta justificación técnica-económica sustenta la elección del presente objeto de estudio.

#### 2.1.1 Función y solicitaciones mecánicas

Durante su funcionamiento, la biela está sometida a una combinación de fuerzas axiales alternantes de tracción y compresión, resultado del ciclo de combustión y de la inercia del pistón. Estas cargas generan tensiones que se concentran principalmente en la zona de transición entre el cuerpo de la biela y las cabezas superior (alojamiento del bulón) e inferior (alojamiento del muñón del cigüeñal). Adicionalmente, existen esfuerzos de flexión y cargas dinámicas asociadas al desequilibrio del conjunto móvil, que deben ser considerados en la fase de diseño estructural.

### 2.1.2 Tipologías constructivas

Existen varios tipos de bielas utilizadas en motores térmicos, diferenciadas por su diseño y su proceso de fabricación. En los motores diésel de camión se emplean fundamentalmente las siguientes:

- **Bielas partidas (convencionales):** formadas por un cuerpo y una tapa unidos mediante tornillos de alta resistencia. Son las más comunes en motores de gran tamaño por su facilidad de montaje y mantenimiento.
- **Bielas con fractura controlada (crack-split):** la unión entre el cuerpo y la tapa se realiza por una fractura inducida de forma controlada tras la forja. Esta técnica permite una superficie de contacto irregular que mejora el ajuste, la rigidez y reduce el coste de mecanizado. Es ampliamente utilizada por fabricantes como MAHLE o Scania en vehículos comerciales pesados (Mahle GmbH, 2018).
- **Bielas monobloque:** utilizadas principalmente en motores pequeños o de altas prestaciones, tienen menor aplicabilidad en camiones debido a sus limitaciones de montaje y mantenimiento.

### 2.1.3 Materiales empleados

Los requisitos que debe cumplir el material de la biela son exigentes: alta resistencia a la tracción y compresión, buen comportamiento a fatiga, estabilidad dimensional a elevadas temperaturas, y una densidad moderada que limite el peso del conjunto móvil. En la práctica, los materiales más utilizados en bielas para motores diésel de camión son los siguientes:

- **Aceros forjados de baja aleación:** como el 42CrMo4 o el 38MnVS6, tratados térmicamente (templado y revenido) para alcanzar resistencias superiores a 800 MPa. Son ampliamente utilizados por fabricantes como Cummins o Volvo por su fiabilidad, buen coste de fabricación y propiedades mecánicas adecuadas (Cummins Inc., 2021; Höganäs AB, 2020).
- **Fundiciones nodulares:** empleadas en motores de menor exigencia, con menor coste, pero peores propiedades frente a esfuerzos cíclicos.
- **Aleaciones de titanio:** utilizadas en aplicaciones de alto rendimiento, ofrecen gran resistencia con menor densidad, aunque su coste elevado y mayor dificultad de mecanizado limitan su aplicación en vehículos industriales.

En la industria de los vehículos pesados, la elección de aceros forjados responde a una combinación de rendimiento mecánico, coste por unidad y facilidad de integración en procesos industriales existentes, permitiendo el cumplimiento de normas de calidad y seguridad sin incurrir en sobrecostes.

#### **2.1.4 Proceso de fabricación**

El proceso de fabricación tradicional de una biela implica las siguientes etapas principales:

- Forja en caliente del acero, generalmente a temperaturas cercanas a los 1250 °C, para conformar la pieza con una orientación del grano interna favorable a los esfuerzos cíclicos.
- Mecanizado de precisión de los alojamientos del bulón y del muñón, así como del perfil externo y de los canales de lubricación interna.
- Tratamientos térmicos, como el templado y revenido, que aumentan la dureza superficial y la resistencia mecánica del material.
- Acabado superficial mediante rectificado o bruñido, que garantiza tolerancias dimensionales y mejora la resistencia a la fatiga superficial.
- Separación por fractura controlada (en el caso de bielas crack-split), seguida del montaje final mediante tornillería calibrada.

Este proceso permite obtener una biela con propiedades mecánicas altamente controladas, apta para soportar cargas extremas con una vida útil prolongada. Además, permite escalabilidad industrial, lo que reduce el coste por unidad en líneas de producción de alto volumen (Burgos, 2015).

## **2.2 Legislación, normativa y requisitos de homologación aplicables a la biela en motores diésel de camión**

La biela constituye un componente estructural clave del sistema de propulsión de los motores de combustión interna, especialmente en vehículos industriales pesados. Si bien no se trata de un elemento que requiera homologación individualizada en el marco legal europeo, forma parte del conjunto del motor, cuya conformidad debe demostrarse mediante ensayos que certifiquen su resistencia, fiabilidad y durabilidad bajo condiciones reales de funcionamiento.

En este sentido, los ensayos estructurales, de fatiga y de simulación por elementos finitos (FEM) que se abordarán en este Trabajo de Fin de Grado responden directamente a criterios normalizados, utilizados tanto por fabricantes como por laboratorios de verificación y agencias de certificación de motores.

### **2.2.1 Legislación europea aplicable**

El marco legal principal que regula la homologación de sistemas de propulsión en vehículos pesados en la Unión Europea es:

- **Reglamento (UE) 2018/858**, relativo a la homologación de tipo de vehículos y sus sistemas, componentes y unidades técnicas independientes.
- **Reglamento (UE) 2017/2400**, sobre la certificación de emisiones de CO<sub>2</sub> y consumo de combustible en vehículos pesados, que requiere simulaciones de rendimiento (VECTO) que consideran los componentes del motor.
- **Reglamento Delegado (UE) 2017/654**, que desarrolla el Reglamento 595/2009 en cuanto a requisitos técnicos de durabilidad del motor, resistencia estructural y comportamiento a largo plazo.

Dichas normas establecen que los fabricantes deben acreditar el rendimiento estructural y funcional del motor como sistema, incluyendo la durabilidad de sus componentes bajo condiciones térmicas, mecánicas y de carga alternante.

### 2.2.2 Normas técnicas aplicables y ensayos exigibles

Las normas internacionales de ensayo que son aplicables directa o indirectamente al diseño y control de calidad de una biela incluyen:

- **Ensayos estructurales:** ISO 6892-1: Ensayo de tracción a temperatura ambiente.

Aplicación en ANSYS: análisis estructural estático bajo carga máxima de compresión y tracción en la biela.

- **Ensayos de fatiga:**

ISO 1099: Ensayo de fatiga bajo carga axial controlada.

ISO 1143: Ensayo de fatiga por flexión rotativa.

Aplicación en ANSYS: análisis de fatiga multiaxial bajo cargas cíclicas alternantes simulando el ciclo motor (presión de combustión + inercia del pistón).

- **Ensayos de dureza:** ISO 6507 (Vickers) y ISO 6508 (Rockwell): Evaluación de tratamientos térmicos.

Aplicación indirecta: el material usado en la simulación incorpora las propiedades resultantes de estos ensayos.

- **Ensayos superficiales:** ISO 4287 / ISO 4288: Textura y rugosidad superficial.

Influencia en ANSYS: se justifica la necesidad de considerar concentraciones de tensión en zonas con radio reducido o cambios de sección (cuellos, agujeros, transiciones).

- **Ensayos no destructivos:** ISO 9934-1: Partículas magnéticas.

Relevancia: la simulación FEM permite identificar zonas con mayor riesgo de inicio de fisura, donde se recomienda aplicar END.

### 2.2.3 Correspondencia entre normativa técnica y simulaciones FEM aplicadas en el TFG

Con el objetivo de garantizar que el rediseño estructural de la biela propuesto en este trabajo cumpla con los requisitos técnicos establecidos por la normativa vigente, se han identificado una serie de normas internacionales de referencia cuya aplicación puede replicarse, en parte, a través de simulaciones mediante el método de los elementos finitos (FEM). Las herramientas de simulación avanzada, como las ofrecidas por ANSYS Workbench, permiten emular los principales ensayos mecánicos que tradicionalmente se realizan en laboratorio, facilitando así una primera validación virtual del diseño propuesto.

En la Tabla se presenta una correspondencia directa entre las normas técnicas identificadas, el tipo de ensayo que describen, el análisis equivalente que se llevará a cabo en ANSYS, y el objetivo específico que se persigue dentro del marco de este proyecto.

Tabla 1. Correspondencia entre normativa técnica y simulaciones FEM aplicadas en ANSYS

<b>Norma técnica</b>	<b>Tipo de ensayo normativo</b>	<b>Simulación en ANSYS</b>	<b>Objetivo en el TFG</b>
<i>ISO 6892-1:2019</i>	Ensayo de tracción a temperatura ambiente	Análisis estructural estático	Verificar la resistencia de la biela ante carga axial máxima
<i>ISO 1099:2017 / ISO 1143:2021</i>	Ensayo de fatiga axial / flexión rotativa	Análisis de fatiga multiaxial (carga cíclica)	Estimar la vida útil bajo condiciones reales de funcionamiento
<i>ISO 6507-1 / ISO 6508-1</i>	Ensayos de dureza Vickers / Rockwell	Propiedades del material integradas en simulación	Representar el efecto del tratamiento térmico sobre la respuesta mecánica
<i>ISO 4287 / ISO 4288</i>	Evaluación de rugosidad y geometría superficial	Identificación de concentraciones de tensión	Justificar rediseño en zonas críticas de transición o geometrías sensibles
<i>ISO 9934-1:2016</i>	Ensayo no destructivo por partículas magnéticas	Localización de zonas críticas en FEM	Identificar posibles puntos de iniciación de fisuras para inspección en prototipos
<i>Reglamento (UE) 2018/858</i>	Homologación de sistemas y componentes del vehículo	Validación estructural del componente dentro del motor	Garantizar conformidad técnica con requisitos de homologación industrial

---

#### **2.2.4 Implicaciones para la viabilidad del rediseño**

El cumplimiento de estos requisitos no es meramente normativo, sino que responde a criterios de seguridad, fiabilidad y viabilidad técnica. El rediseño estructural de la biela, tal y como se propone en este trabajo, deberá demostrar en ANSYS que:

- Soporta sin fallo las cargas máximas previstas.
- Presenta una vida útil aceptable bajo fatiga (superior a  $10^7$  ciclos).
- No genera tensiones elevadas por cambios de geometría.
- Puede integrarse sin comprometer la conformidad del motor con los requisitos de homologación establecidos en la UE.

Este enfoque refuerza la coherencia entre el diseño computacional, la validación normativa y la evaluación económica posterior, ya que solo un diseño que cumpla con los estándares estructurales y de durabilidad será susceptible de considerarse viable en términos productivos e industriales.

## **2.3 Criterios de diseño mecánico de la biela**

La biela constituye un elemento esencial del tren alternativo del motor, cuya función principal es transmitir las cargas generadas por la combustión desde el pistón al cigüeñal. Su diseño debe garantizar la integridad estructural bajo condiciones operativas extremadamente exigentes, que combinan cargas dinámicas, ciclos de alta frecuencia, y requisitos de rigidez y fiabilidad dimensional.

### **2.3.1 Cargas y condiciones operativas**

Durante cada ciclo del motor, la biela está sometida a:

- Cargas de compresión intensas en el momento de máxima presión de combustión, que pueden superar los 150 kN en motores de gran cilindrada.
- Fuerzas de tracción inerciales durante el retorno del pistón, especialmente críticas en el paso por el punto muerto superior.
- Flexiones secundarias y esfuerzos laterales, causados por desviaciones angulares y desplazamientos del bulón.

Estas sollicitaciones son alternantes, de alta frecuencia (dependiendo del régimen del motor), y pueden generar una acumulación de tensiones que favorecen fenómenos de fatiga de alto ciclo.

### **2.3.2 Requisitos estructurales clave**

Para resistir estas condiciones, la biela debe cumplir simultáneamente:

- Un límite elástico elevado, que evite la plastificación incluso en condiciones transitorias extremas.
- Una alta rigidez longitudinal, que limite la deformación axial y mantenga la alineación del conjunto móvil.
- Un buen comportamiento a fatiga, para soportar millones de ciclos sin nucleación de grietas.
- Una resistencia al pandeo en la zona de compresión, especialmente relevante en geometrías esbeltas.
- Un diseño libre de concentradores de tensión, garantizado por una geometría suave y continua, con transiciones bien diseñadas.

---

### 2.3.3 Requisitos funcionales y productivos

Además del rendimiento mecánico, el diseño de la biela debe considerar:

- La reducción de masa oscilante, que mejora la eficiencia del motor y disminuye las fuerzas de inercia sobre cojinetes y muñones.
- La compatibilidad geométrica con los alojamientos del cigüeñal y del pistón, ajustada con tolerancias estrictas.
- La fabricabilidad, que condiciona radios mínimos, rugosidades, y tratamientos térmicos o superficiales.
- La posibilidad de mantenimiento o sustitución, lo que afecta la forma de la cabeza partida y los métodos de fijación.

El equilibrio entre todos estos factores define un marco de referencia sobre el que evaluar distintas soluciones de diseño o selección de material.

## **2.4 Comportamiento a fatiga de componentes alternativos**

El fallo por fatiga es una de las principales causas de rotura en bielas de motores de combustión interna. Se trata de un proceso progresivo que, tras un número elevado de ciclos de carga variable, conduce a la iniciación de microfisuras, su propagación y, eventualmente, la fractura del componente.

### **2.4.1 Naturaleza del fenómeno de fatiga**

En la biela, la fatiga se manifiesta bajo tensiones alternantes que, aunque estén por debajo del límite elástico del material, son suficientes para inducir daños acumulativos. Este fenómeno se ve intensificado por:

- Concentraciones locales de tensión, como agujeros, radios de transición o cambios de sección.
- Condiciones superficiales adversas, que actúan como iniciadores de grieta.
- Presencia de microdefectos internos, típicos de algunos procesos de fabricación.
- Variaciones térmicas que generan tensiones adicionales durante la operación.

Dado que el motor funciona de forma continua a altos regímenes durante miles de horas, se estima que la biela debe superar fácilmente los  $10^8$  ciclos sin fallo estructural, lo que exige un diseño guiado por criterios de resistencia a fatiga de alto ciclo.

### **2.4.2 Evaluación mediante simulación**

En este trabajo, se empleará análisis por elementos finitos (FEM) para:

- Obtener la distribución de tensiones dinámicas bajo condiciones realistas de carga alternante.
- Identificar zonas críticas con mayor concentración de esfuerzo o sensibilidad geométrica.

Este enfoque permite simular el comportamiento a largo plazo del componente sin recurrir a ensayos destructivos iniciales, y proporciona una base objetiva para comparar alternativas de fabricación.

## **2.5 Optimización estructural basada en selección de material**

En el contexto del presente trabajo, la mejora del rendimiento estructural y funcional de la biela se abordará mediante la evaluación de diferentes materiales candidatos aplicados sobre una misma geometría base. Esta estrategia permite mantener constantes las variables geométricas, centrándose exclusivamente en el impacto que tiene el material en el comportamiento global del componente.

### **2.5.1 Objetos de la optimización**

El proceso de optimización estructural busca:

- Reducir la masa total del componente, disminuyendo así las fuerzas de inercia generadas y el desgaste sobre elementos acoplados.
- Mejorar la durabilidad a fatiga, incrementando la fiabilidad a largo plazo.
- Controlar los desplazamientos y deformaciones, manteniendo la rigidez necesaria para evitar flexiones o desequilibrios dinámicos.
- Evaluar la viabilidad técnica y económica del uso de materiales avanzados en sustitución del material convencional.

### **2.5.2 Alcance de la evaluación**

Los materiales por estudiar serán evaluados en términos de:

- Propiedades mecánicas fundamentales (límite elástico, módulo de elasticidad, resistencia a fatiga).
- Propiedades físicas relevantes (densidad, comportamiento térmico).
- Compatibilidad con procesos industriales existentes (forja, mecanizado, tratamientos).
- Impacto económico estimado, tanto en coste de material como de procesado.

En los siguientes capítulos, se desarrollará un estudio comparativo que permitirá determinar qué alternativa material presenta el mejor compromiso entre ligereza, resistencia y coste, sin necesidad de rediseñar completamente la geometría de la biela.

---

## Capítulo 3. ESTUDIO COMPARATIVO DE MATERIALES CANDIDATOS

El diseño de una biela está profundamente condicionado por el material empleado en su fabricación. La selección del material influye directamente en la resistencia estructural, la rigidez, la vida útil a fatiga, el peso y, en última instancia, en el rendimiento general del motor. Tradicionalmente, este componente se fabrica en aceros aleados forjados debido a su excelente comportamiento mecánico. Sin embargo, los avances en ingeniería de materiales y las exigencias actuales de eficiencia energética, sostenibilidad y rendimiento dinámico han abierto nuevas posibilidades.

Este capítulo presenta una comparación entre tres materiales candidatos, seleccionados por su potencial para mejorar la biela de un motor diésel de camión. Todos ellos ofrecen propiedades mecánicas avanzadas y han sido empleados o estudiados en aplicaciones de alto rendimiento. El objetivo es establecer una base objetiva para el análisis estructural y económico posterior, identificando cuál de ellos proporciona el mejor equilibrio entre resistencia, masa y viabilidad industrial.

### 3.1 Justificación de la comparación entre materiales

La selección del material de una biela no es una decisión aislada: impacta directamente en el rendimiento mecánico del motor, la durabilidad de sus componentes y la eficiencia global del vehículo. En motores de camión, donde los ciclos de carga son constantes y prolongados, el comportamiento estructural de la biela es crítico. El empleo de materiales más avanzados permite:

- Reducir las fuerzas de inercia en el movimiento alternativo, lo que mejora el equilibrio dinámico y disminuye el esfuerzo sobre los cojinetes del cigüeñal.
- Aumentar la eficiencia del motor, al permitir mayores regímenes de giro y reducir el consumo energético requerido para mover masas innecesarias.
- Incrementar la durabilidad del motor y reducir los costes de mantenimiento asociados a fatiga o fallo prematuro.
- Cumplir objetivos de sostenibilidad al reducir consumo y emisiones, alineándose con normativas europeas como Euro VI y futuras Euro VII.

Esta mejora puede abordarse mediante rediseño geométrico o cambio de material. En este TFG se adopta la segunda estrategia: mantener la geometría existente y analizar cómo se comporta la biela si se fabrica en diferentes materiales técnicamente viables, comparando resultados de simulaciones estructurales, fatiga y peso.

La comparación se enfoca en tres familias de materiales contrastadas:

- Acero martensítico/bainítico forjado, evolución del acero tradicional, pero con mejores propiedades a fatiga.
- Aluminio forjado (7075-T6 o 2618), con una densidad muy baja y alta resistencia específica.
- Titanio forjado (Ti-6Al-4V), material avanzado que ofrece alta resistencia, baja densidad y comportamiento superior a corrosión y fatiga.

### 3.2 Propiedades mecánicas y físicas de los materiales seleccionados

La selección de materiales se basa en sus propiedades fundamentales: resistencia estática, comportamiento a fatiga, densidad, rigidez (módulo elástico), y también en propiedades térmicas y económicas que pueden condicionar su aplicación real.

#### 3.2.1 Acero de alta resistencia

Estos aceros se caracterizan por:

- Alta resistencia a tracción (1100–1400 MPa).
- Excelente límite de fatiga (400–600 MPa) gracias a su microestructura endurecida por transformación.
- Buena rigidez (módulo elástico  $\approx$  210 GPa) que permite mantener la forma y limitar deformaciones.
- Son materiales bien conocidos y optimizados en la industria automotriz, con buenas propiedades metalúrgicas para la forja y tratamientos térmicos.

Sin embargo, su alta densidad ( $\approx$  7800 kg/m<sup>3</sup>) penaliza el comportamiento dinámico del conjunto. Aun así, representan la solución más madura y económica.

#### 3.2.2 Aluminio forjado (7075-T6)

Estas aleaciones de aluminio son empleadas en ingeniería aeronáutica y deportiva por su alta resistencia específica:

- Densidad baja ( $\approx$  2800 kg/m<sup>3</sup>), lo que reduce significativamente el peso de la biela.
- Resistencia mecánica moderada (resistencia a tracción 540–600 MPa; límite elástico 450–530 MPa).
- Límite de fatiga bajo (160–220 MPa), lo que requiere especial cuidado en el diseño y el estado superficial.
- Módulo de elasticidad reducido ( $\approx$  70 GPa), lo que implica mayor deformación bajo carga si no se compensa con mayor sección.

Su procesado térmico (T6 o T61) requiere control estricto para evitar pérdida de propiedades. Son materiales muy adecuados si se busca ligereza, pero su durabilidad estructural debe validarse cuidadosamente.

---

### 3.2.3 Titanio forjado (Ti-6Al-4V)

Es una de las aleaciones más utilizadas en la industria aeroespacial. Combina:

- Alta resistencia mecánica (950–1200 MPa).
- Buena fatiga (300–400 MPa), superior al aluminio.
- Densidad intermedia ( $\approx 4430 \text{ kg/m}^3$ ).
- Bajo módulo elástico ( $\approx 110 \text{ GPa}$ ).
- Excelente resistencia a la corrosión y al agrietamiento inducido por ambientes agresivos.

A pesar de estas ventajas, su principal limitación es el coste (25–35 €/kg) y la dificultad de mecanizado. Es un candidato excelente en cuanto a propiedades, pero su viabilidad industrial debe ser cuidadosamente evaluada.

### **3.3 Consideraciones de fabricación y procesado**

Además de las propiedades intrínsecas, un material debe ser viable en términos de fabricación industrial, tolerancias, y economía de procesos.

#### **3.3.1 Acero**

- Altamente forjable. Las tecnologías de forja en caliente están optimizadas para este material.
- Buena respuesta a tratamientos térmicos, como temple y revenido.
- Mecanizado preciso con costes bajos, buena tolerancia al desgaste de herramientas.
- Permite integración de tratamientos superficiales como nitruración, shot peening o recubrimientos.

El acero representa la solución con menor riesgo de implementación, compatible con líneas de producción existentes.

#### **3.3.2 Aluminio forjado (7075-T6)**

- Fácil de forjar y mecanizar, pero requiere control térmico postprocesado para evitar pérdida de propiedades.
- Menor resistencia térmica, puede requerir aislamiento o protección ante temperaturas elevadas.
- Su maquinabilidad es muy buena, pero sensible a la rugosidad superficial, lo que afecta su comportamiento a fatiga.
- Puede beneficiarse de anodizado o shot peening para mejorar la resistencia superficial.

Es un material atractivo para líneas de producción flexibles, donde la reducción de peso sea una prioridad.

#### **3.3.3 Titanio forjado (Ti-6Al-4V)**

- Difícil de forjar, requiere herramientas específicas y atmósferas controladas.
- Muy elevado desgaste de herramientas durante el mecanizado.
- Proceso lento y costoso, aunque los avances en tecnologías aditivas pueden abrir nuevas vías en el futuro.

Compatible con shot peening y tratamientos superficiales, pero la baja conductividad térmica puede generar tensiones internas si no se controla.

Su uso está justificado solo si se necesitan prestaciones mecánicas superiores, y si se acepta un coste de producción mucho más alto.

### **3.4 Justificación del análisis estructural comparativo**

El análisis estructural por elementos finitos permite cuantificar con precisión el efecto de cada material sobre:

- Tensiones máximas bajo carga axial, que deben estar por debajo del límite elástico del material.
- Distribución de tensiones, que puede concentrarse en zonas críticas (ojales, cambios de sección, cuello de unión).
- Deformación total del componente, especialmente sensible a materiales con bajo módulo elástico.
- Respuesta a fatiga, evaluando la vida útil esperada en ciclos alternantes.

Además, al mantener constante la geometría base y la condición de carga aplicada, se asegura que las diferencias observadas en el comportamiento estructural son debidas exclusivamente al material.

Esta metodología permite:

- Identificar zonas críticas de diseño en función del material.
- Determinar potencial de aligeramiento estructural.
- Comparar objetivamente el rendimiento técnico de cada propuesta.
- Servir como base para una evaluación económica racional, que se abordará en capítulos posteriores.

### 3.5 Comparativa final de los materiales candidatos

Con el objetivo de sintetizar los datos técnicos, económicos y de procesabilidad industrial presentados en los apartados anteriores, se ha elaborado una tabla comparativa que recoge los principales criterios de selección aplicados al contexto funcional de una biela de motor diésel.

Dicha tabla permite identificar de forma clara las fortalezas y limitaciones de cada material, estableciendo una base objetiva para la posterior evaluación mediante análisis por elementos finitos.

Tabla 2. Comparativa técnica y económica de los materiales candidatos para la biela

<b>Criterio</b>	<b>Acero alta resistencia</b>	<b>Aluminio forjado (7075-T6 / 2618)</b>	<b>Titanio forjado (Ti-6Al-4V)</b>
<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	7.800	2.800	4.430
<b>Límite elástico [MPa]</b>	900 – 1.200	450 – 530	880 – 1.100
<b>Resistencia a tracción [MPa]</b>	1.100 – 1.400	540 – 600	950 – 1.200
<b>Límite de fatiga [MPa]</b>	400 – 600	160 – 220	300 – 400
<b>Módulo elástico [GPa]</b>	200 – 210	70 – 72	110
<b>Forjabilidad</b>	Muy buena	Buena	Difícil
<b>Mecanizado</b>	Estándar, económico	Fácil	Costoso, desgaste de herramienta
<b>Tratamientos térmicos</b>	Comunes, muy controlados	Requiere control preciso	Requiere condiciones especiales
<b>Coste del material [€/kg]</b>	1,5 – 2,5	5 – 8	25 – 35
<b>Disponibilidad industrial</b>	Alta	Media	Limitada
<b>Resistencia a la corrosión</b>	Baja	Media	Alta
<b>Viabilidad económica</b>	Alta	Media	Baja
<b>Adecuación para aligeramiento</b>	Baja	Muy alta	Alta
<b>Aplicaciones típicas</b>	Camiones, maquinaria, OEM general	Motores deportivos, aeronáutica	Aeroespacial, competición, alto nivel

Fuente: Elaboración propia a partir de ASM Handbooks, MatWeb, European Aluminium Association, y fichas técnicas de fabricantes.

## Capítulo 4. Diseño geométrico de la biela mediante CAD (SolidWorks 2024)

La fase de modelado geométrico constituye un paso esencial para cualquier análisis estructural por elementos finitos (FEM), ya que define la base física sobre la que se aplicarán las condiciones de carga, materiales y restricciones. En el presente capítulo se detalla el proceso seguido para el diseño tridimensional de una biela de motor diésel para camión, utilizando el software SolidWorks 2024, ampliamente implantado en el sector de la ingeniería mecánica.

### 4.1 Objetivo del modelado CAD

El objetivo de este modelado es generar una geometría representativa y realista de una biela sometida a esfuerzos alternantes, apta para ser exportada al entorno de simulación ANSYS. El diseño busca respetar:

- Proporciones geométricas realistas, basadas en bielas industriales de motores de gran cilindrada (12–16 L).
- Zonas críticas bien definidas (ojales, vástago, hombros y pie), necesarias para evaluar la distribución de tensiones.
- Compatibilidad con operaciones FEM: simplificación de detalles innecesarios para análisis estructural (roscas, tolerancias, filetes no funcionales), pero manteniendo la integridad funcional del modelo.

## 4.2 Herramienta de diseño utilizada: SolidWorks 2024

El diseño se ha realizado en la versión SolidWorks 2024 Premium, que incorpora mejoras en rendimiento gráfico, capacidades de simulación preliminar y herramientas avanzadas de modelado paramétrico. Las principales funcionalidades utilizadas han sido:

- Sketch 2D para la generación de secciones principales.
- Operaciones de extrusión y revolución, para el cuerpo principal.
- Simetría y matriz de entidades para replicar zonas simétricas.
- Operaciones de vaciado (shell) en determinadas áreas para simular aligeramiento de masa.
- Control de cotas mediante cotas inteligentes (Smart Dimensions) y relaciones geométricas restringidas.

Se han establecido parámetros clave como:

- Diámetro del ojo superior (bulón): ~57 mm
- Diámetro del ojo inferior (cigüeñal): ~95 mm
- Longitud total de la biela: ~251 mm
- Ancho medio del vástago: ~30 mm
- Espesor variable adaptado a zonas críticas

Estos valores son representativos de una biela tipo para motores diésel de uso en camiones pesados (como los empleados en plataformas de Volvo, Scania o MAN).

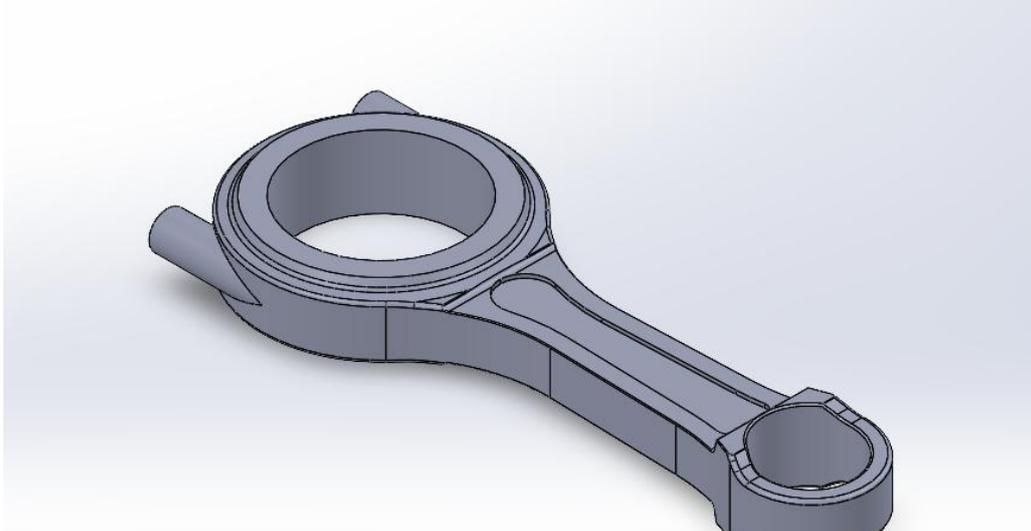
## 4.3 Consideraciones geométricas del diseño

Se han aplicado los siguientes criterios en el diseño:

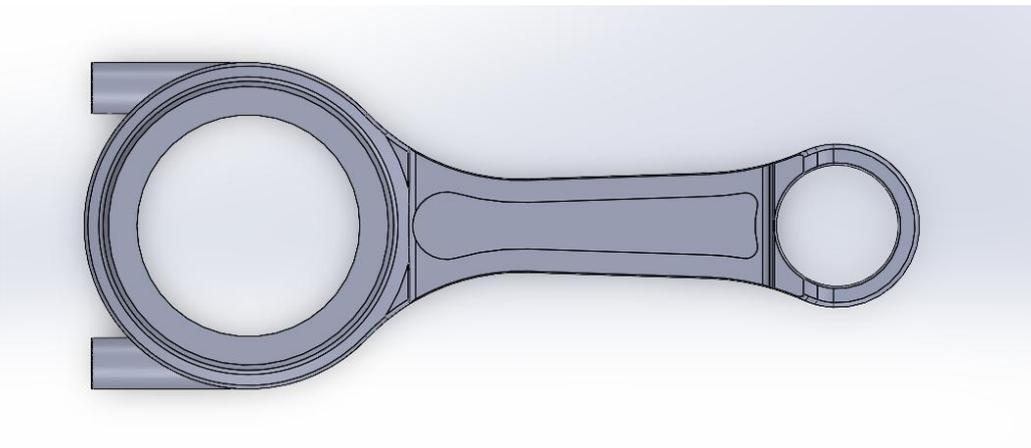
- Geometría simétrica respecto al eje longitudinal, para simplificar el mallado y los ensayos virtuales.
- Curvas suaves en las transiciones entre el cuerpo y los ojales, para evitar concentradores de tensión.
- Ojal partido en la cabeza inferior, con alojamiento previsto para tornillería (sin roscas modeladas).
- Agujeros pasantes modelados como cilíndricos simples, compatibles con cargas distribuidas en los análisis.

El modelo también está preparado para permitir variantes de simulación con ligeros ajustes de masa (mediante vaciados internos o rebajes laterales), pero se ha priorizado mantener una geometría base común para aplicar los tres materiales evaluados en el capítulo anterior.

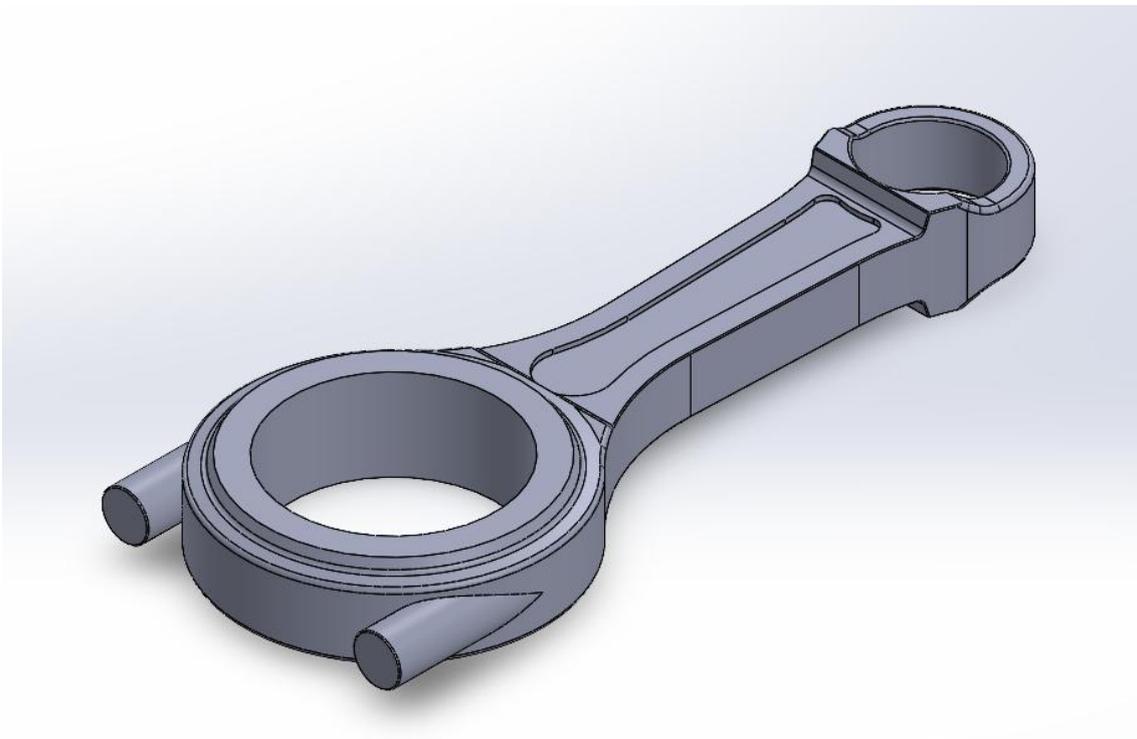
#### 4.4 Modelo tridimensional final de la biela



*Figura 1. Modelo 3D de la biela (Vista 1)*



*Figura 2. Modelo 3D de la biela (Vista 2)*



*Figura 3. Modelo 3D de la biela (Vista 3)*



## Capítulo 5. SIMULACIÓN ESTRUCTURAL DE LA BIELA MEDIANTE ANSYS WORKBENCH

El presente capítulo aborda el estudio del comportamiento mecánico de la biela modelada en CAD, mediante simulación por elementos finitos (FEM) utilizando el entorno ANSYS Workbench. Se analizará cómo responde la pieza ante sollicitaciones reales cuando se fabrica en distintos materiales candidatos, aplicando ensayos normativos e industriales que permitan evaluar de forma objetiva su idoneidad estructural.

Para ello, se sigue una metodología sistemática que comprende:

- La importación del modelo CAD al entorno de simulación.
- La configuración de la biblioteca de materiales con propiedades realistas.
- La definición detallada de los ensayos a realizar.
- La ejecución de simulaciones por material y análisis de resultados.

### 5.1 Importación del modelo CAD y configuración inicial

El modelo tridimensional de la biela, desarrollado en SolidWorks 2024, se ha exportado en formato .STEP para su integración directa en ANSYS. La importación se realiza en el módulo Geometry, donde se lleva a cabo una revisión del modelo para asegurar:

- Ausencia de errores topológicos.
- Conversión a sólido único.
- Eliminación de detalles no relevantes para el análisis estructural (roscas, logotipos, pequeños filetes).

Una vez validada la geometría, se definen las condiciones de contorno estándar:

- Fijación total del alojamiento del cigüeñal.
- Carga axial distribuida sobre el ojo del pistón ( $\approx 35\text{--}45$  kN).
- Material aplicado según el caso de simulación.
- Malla generada con refinamiento local en las zonas de transición y agujeros.

## 5.2 Definición de materiales en la biblioteca de ANSYS

Para garantizar la fidelidad de los resultados, se ha creado una biblioteca personalizada con los siguientes materiales:

### 5.2.1 Acero convencional (referencia)

Tabla 3. Tabla de propiedades del Acero convencional

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Densidad</i>	7.850	kg/m <sup>3</sup>
<i>Módulo de Young</i>	210	GPa
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0.30	—
<i>Límite elástico</i>	800	MPa
<i>Resistencia a tracción</i>	950	MPa
<i>Límite de fatiga</i>	350	MPa
<i>Conductividad térmica</i>	45	W/m·K
<i>Dilatación térmica</i>	12e-6	1/K

Elaboración propia a partir de ASM Handbook Vol. 1 (1990) y MatWeb (2024).

### 5.2.2 Acero alta resistencia (martensítico)

Tabla 4. Tabla de propiedades del Acero martensítico/bainítico

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Densidad</i>	7.800	kg/m <sup>3</sup>
<i>Módulo de Young</i>	205	GPa
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0.29	—
<i>Límite elástico</i>	1.200	MPa
<i>Resistencia a tracción</i>	1.400	MPa
<i>Límite de fatiga</i>	550	MPa
<i>Conductividad térmica</i>	35	W/m·K
<i>Dilatación térmica</i>	11.5e-6	1/K

Fuente: Elaboración propia a partir de ASM Handbook Vol. 1 (1990) y datos técnicos de fabricantes recogidos en MatWeb (2024).

### 5.2.3 Aluminio forjado (7075-T6 / 2618)

Tabla 5. Tabla de propiedades del Aluminio forjado (7075-T6 / 2618)

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Densidad</i>	2.800	kg/m <sup>3</sup>
<i>Módulo de Young</i>	71	GPa
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0.33	—
<i>Límite elástico</i>	505	MPa
<i>Resistencia a tracción</i>	570	MPa
<i>Límite de fatiga</i>	190	MPa
<i>Conductividad térmica</i>	130	W/m·K
<i>Dilatación térmica</i>	23.2e-6	1/K

Elaboración propia a partir de ASM Handbook Vol. 2 (2002) y European Aluminium Association (2023).

### 5.2.4 Titanio forjado (Ti-6Al-4V)

Tabla 6. Tabla de propiedades del Titanio forjado (Ti-6Al-4V)

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidad</i>
<i>Densidad</i>	4.430	kg/m <sup>3</sup>
<i>Módulo de Young</i>	110	GPa
<i>Coefficiente de Poisson</i>	0.34	—
<i>Límite elástico</i>	1.000	MPa
<i>Resistencia a tracción</i>	1.150	MPa
<i>Límite de fatiga</i>	380	MPa
<i>Conductividad térmica</i>	7	W/m·K
<i>Dilatación térmica</i>	8.6e-6	1/K

Elaboración propia a partir de ASM Handbook Vol. 2 (2002) y Carpenter Technology Corp. (2022).

### **5.3 Ensayos estructurales definidos**

En el marco de la simulación por elementos finitos (FEM), se han establecido cuatro tipos de análisis estructurales que permitirán evaluar el comportamiento mecánico de la biela bajo diferentes criterios de diseño y resistencia. Cada uno responde a un conjunto de objetivos concretos y está justificado por normativas de ingeniería y prácticas industriales.

#### **5.3.1 Ensayo estático lineal**

Este análisis permite determinar la distribución interna de tensiones en la biela cuando es sometida a su carga máxima de servicio, correspondiente al esfuerzo de compresión durante el ciclo de combustión del motor. Es el punto de partida esencial para evaluar la resistencia estructural del componente en condiciones de trabajo críticas.

##### **5.3.1.1 Configuración en ANSYS**

- Tipo de análisis: Static Structural.
- Carga aplicada: carga axial de compresión de 100 kN distribuida sobre el alojamiento del bulón.
- Condiciones de contorno: fijación total del ojo inferior (cigüeñal).
- Tipo de contacto: bonded o fricción ideal, entre caras internas.
- Mallado: elemento sólido de 2.º orden (SOLID187), con refinamiento local en zonas de transición.

##### **5.3.1.2 Variables obtenidas**

- Tensión de Von Mises ( $\sigma_{VM}$ ): indicador del criterio de rotura por fluencia.
- Zonas críticas: concentraciones de tensiones en cuello, zonas del pie o del vástago.
- Comparación con límite elástico: verificación si el material entra en régimen plástico.

##### **5.3.1.3 Justificación normativa**

Este ensayo responde a lo establecido en la norma UNE-EN ISO 6892-1, que regula el comportamiento de materiales metálicos ante carga estática.

### **5.3.2 Análisis del Factor de Seguridad (FOS)**

El análisis del factor de seguridad permite conocer en qué medida el componente se encuentra sobredimensionado o en riesgo de fallo frente a la carga aplicada. Se define como la relación entre el límite elástico del material y la tensión máxima inducida (según Von Mises).

#### **5.3.2.1 Configuración en ANSYS**

- Postproceso del resultado del análisis estático.
- Tipo de cálculo: automático por el solver con datos del límite elástico cargado en el material.
- Formato del resultado: mapa de colores con isovalores del FOS.

#### **5.3.2.2 Variables obtenidas**

- FOS mínimo: valor más bajo en la pieza; si  $FOS < 1$ , hay riesgo de plastificación.
- Distribución de reserva estructural: zonas con mayor o menor margen de resistencia.
- Interpretación crítica: un valor FOS entre 1.5 y 2.0 es considerado óptimo en automoción.

#### **5.3.2.3 Justificación técnica**

Este criterio se emplea en el diseño mecánico para establecer márgenes de seguridad frente a incertidumbres en la carga, defectos de fabricación o degradación por uso. Referencia habitual en el dimensionado de componentes en ingeniería estructural.

### **5.3.3 Ensayo de deformación total**

La deformación total mide la capacidad del componente de mantener su forma bajo carga sin comprometer su funcionalidad mecánica (alineación, acoplamiento, desplazamientos no deseados). Es clave en elementos sometidos a esfuerzos alternativos, donde el juego mecánico puede provocar desgaste prematuro.

#### **5.3.3.1 Configuración en ANSYS**

- Postproceso del análisis estático.
- Tipo de resultado: desplazamiento absoluto del nodo más alejado respecto a su posición original.
- Visualización: mapa de desplazamiento (en mm), normalmente amplificado.

#### **5.3.3.2 Variables obtenidas**

- Deformación máxima total: valor en mm que puede afectar al acoplamiento con otras piezas.
- Identificación de zonas con flexión excesiva.
- Comparación entre materiales en cuanto a rigidez (influida por el módulo de Young).

#### **5.3.3.3 Criterio de diseño habitual**

La deformación debe mantenerse en valores compatibles con las tolerancias funcionales del motor. Por norma general, se busca que los desplazamientos no superen los 0,1 mm en elementos críticos de ensamblaje o giro.

### **5.3.4 Ensayo con carga axial**

La evaluación mediante carga axial representa una alternativa viable cuando no se dispone de la curva S–N necesaria para realizar un análisis de fatiga clásico. Este tipo de ensayo permite estudiar la distribución de tensiones bajo sollicitación longitudinal, simulando de forma simplificada el efecto cíclico de la combustión sobre la biela. Aunque no predice la vida útil en ciclos, sí permite identificar zonas críticas y validar el diseño frente a cargas alternantes estimadas.

#### **5.3.4.1 Configuración en ANSYS:**

- Módulo activado: Static Structural
- Tipo de carga: Axial alternante ( $\pm 40$  kN) en el eje longitudinal de la biela (del bulón hacia el cigüeñal).
- Criterio de fallo: von Mises (deformación plástica equivalente).
- Simulación realizada tanto con carga de tracción como de compresión en escenarios separados.
- Condiciones de contorno: fijación del ojo superior (bulón), carga axial aplicada en el ojo inferior.

#### **5.3.4.2 Variables obtenidas:**

- Tensión máxima von Mises en cada caso (tracción y compresión).
- Mapa de distribución de esfuerzos para cada carga.
- Comparativa del factor de seguridad frente al límite elástico del material.
- Identificación de zonas más sensibles a fallo axial por acumulación de tensiones.
- Comparación del comportamiento estructural entre los tres materiales propuestos.

#### **5.3.4.3 Justificación normativa**

Este tipo de simulación se encuentra dentro del marco general de la validación estructural descrita en la norma UNE-EN ISO 6892-1:2020, que establece los procedimientos de ensayo mecánico a tracción en materiales metálicos. Aunque el ensayo no reproduce la fatiga de forma convencional, permite validar el rendimiento estructural frente a esfuerzos axiales alternantes como parte de una validación preliminar del diseño.

## 5.4 Simulación por material y análisis de resultados

Cada uno de los cuatro materiales se analizará individualmente, organizando los resultados en subapartados por tipo de ensayo:

### 5.4.1 Acero convencional

#### 5.4.1.1 Ensayo estático

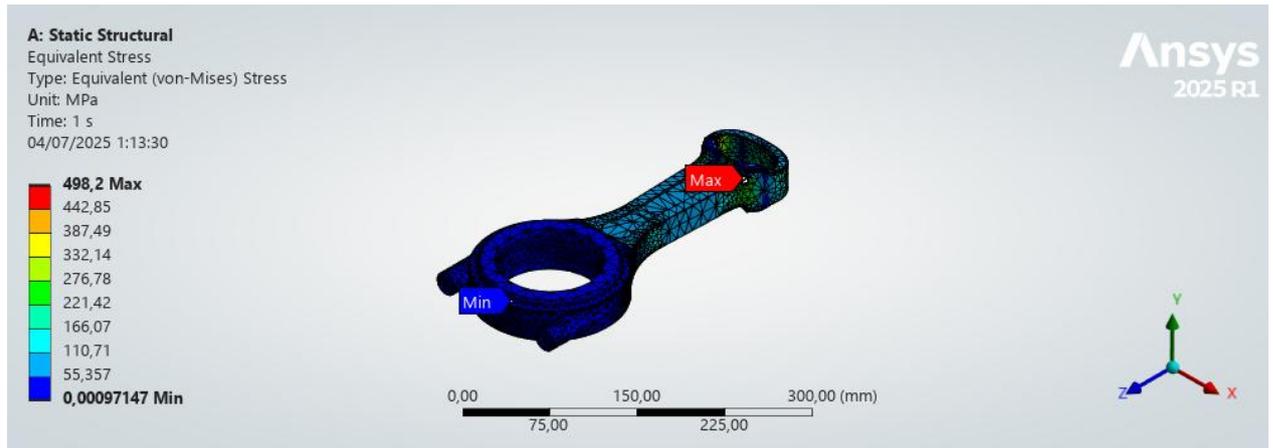


Figura 5. Ensayo 1. Distribución de Tensiones. Acero Convencional

#### 5.4.1.2 Factor de seguridad

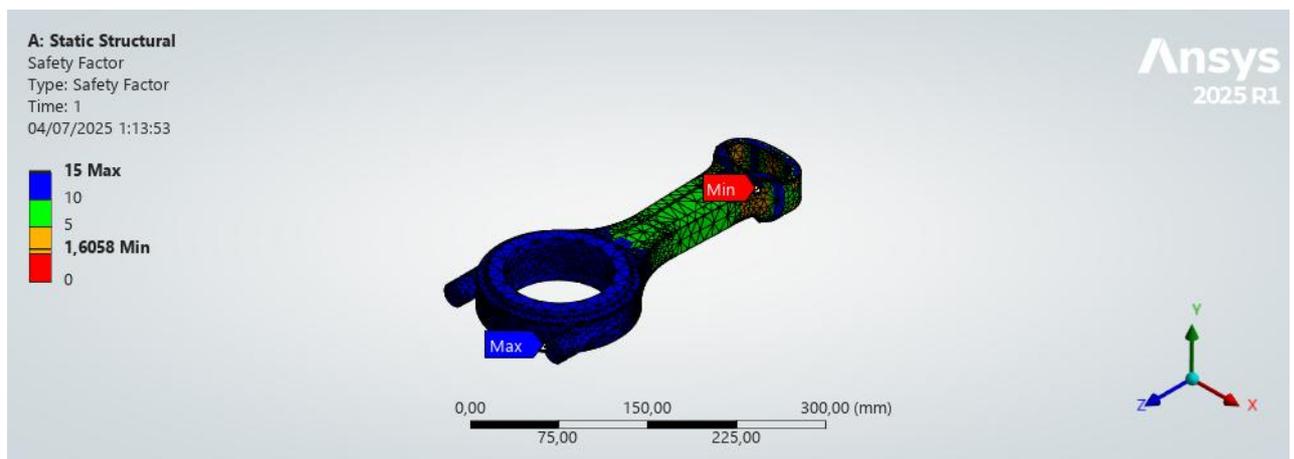


Figura 6. Ensayo 1. Factor de seguridad. Acero Convencional

### 5.4.1.3 Deformación total

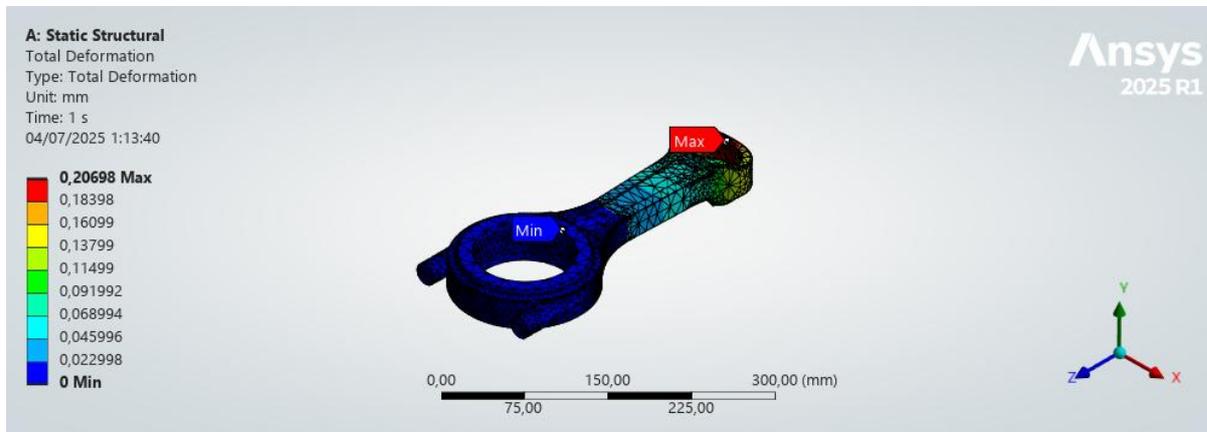


Figura 7. Ensayo 1. Deformación Total. Acero Convencional

### 5.4.1.4 Carga axial (Solo imágenes del ensayo de tracción)

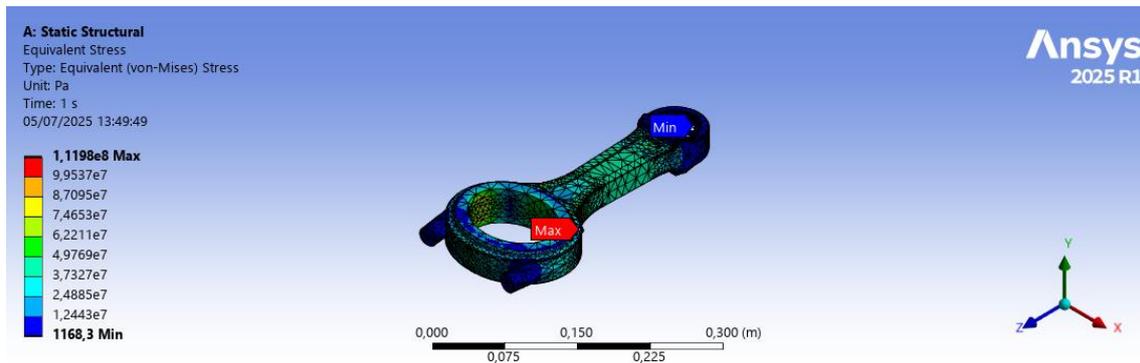


Figura 8. Ensayo 2. Distribución de Tensiones. Acero Convencional

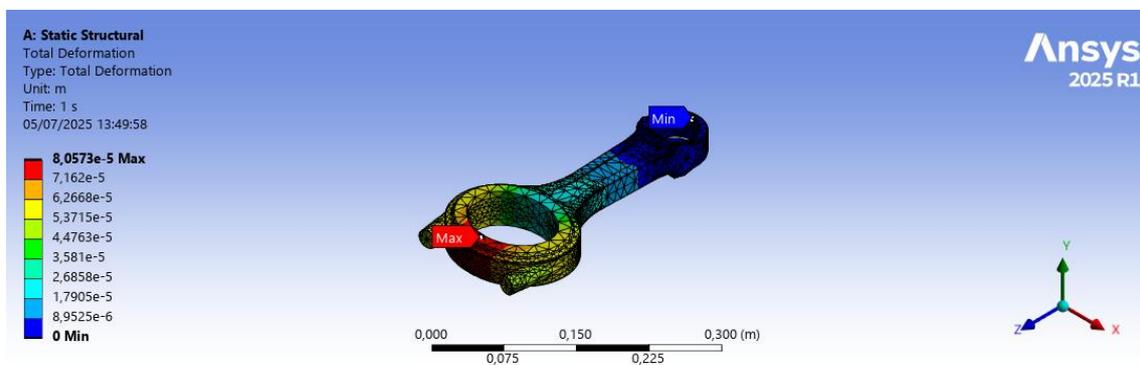
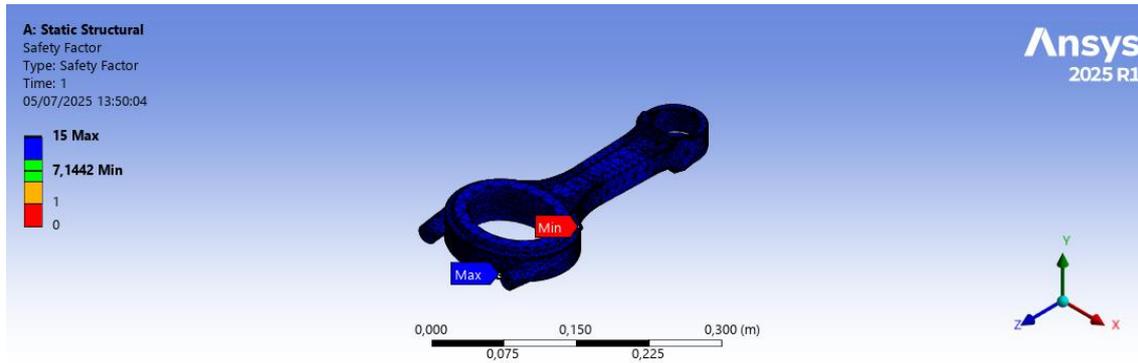


Figura 9. Ensayo 2. Deformación Total. Acero Convencional



*Figura 10. Ensayo 2. Factor de seguridad. Acero Convencional*

## 5.4.2 Acero alta resistencia

### 5.4.2.1 Ensayo estático

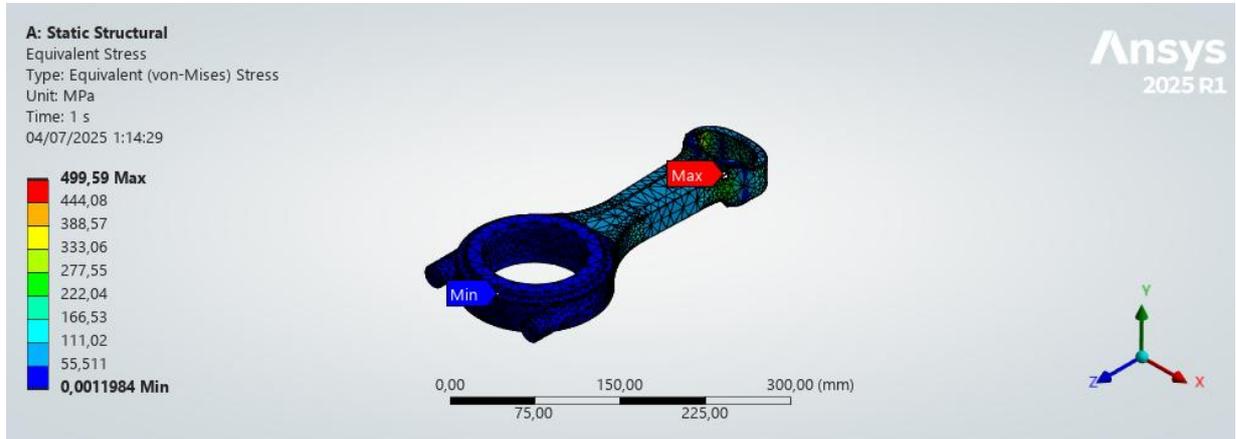


Figura 11. Ensayo 1. Distribución de Tensiones. Acero alta resistencia

### 5.4.2.2 Factor de seguridad

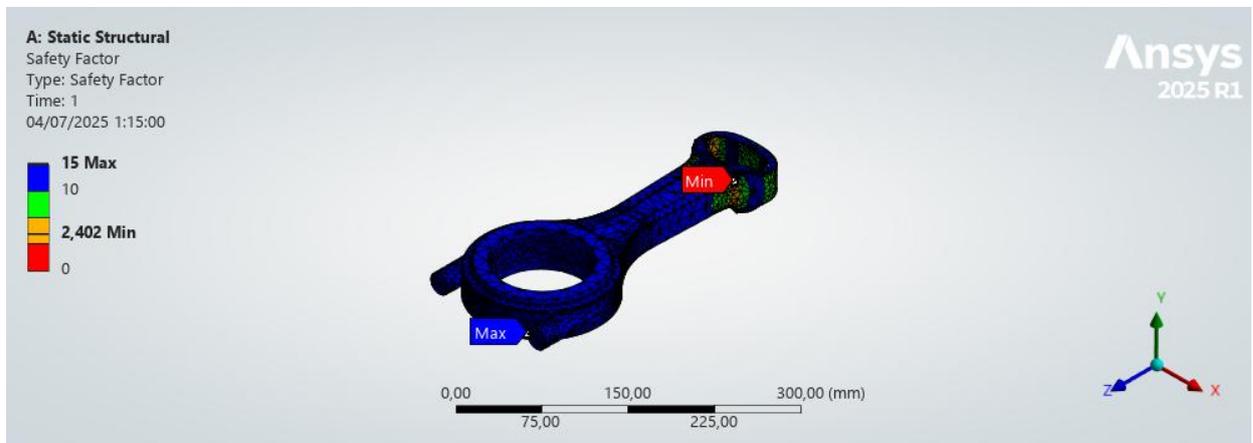


Figura 12. Ensayo 1. Factor de seguridad. Acero alta resistencia

### 5.4.2.3 Deformación total

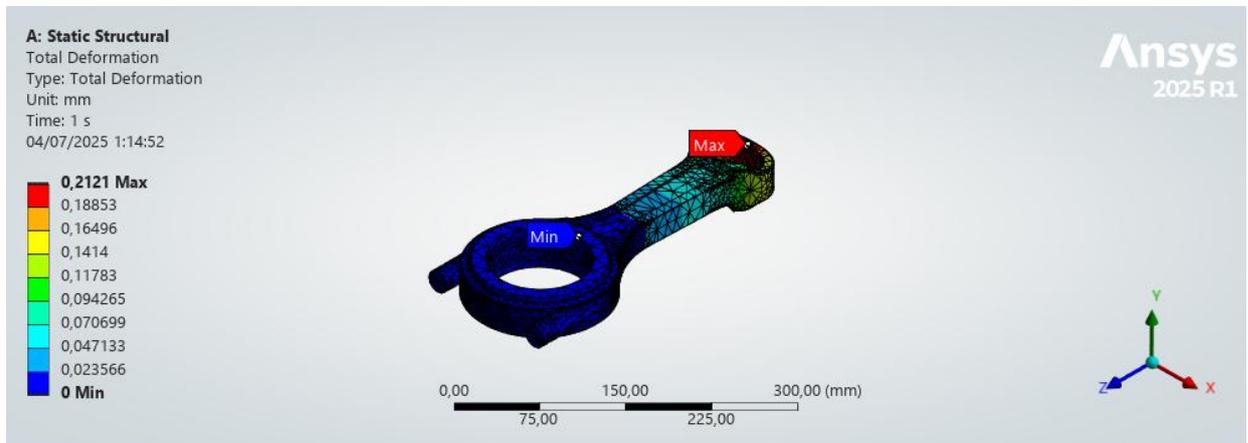


Figura 13. Ensayo 1. Deformación total. Acero alta resistencia

### 5.4.2.4 Carga Axial (Solo imágenes del ensayo de tracción)

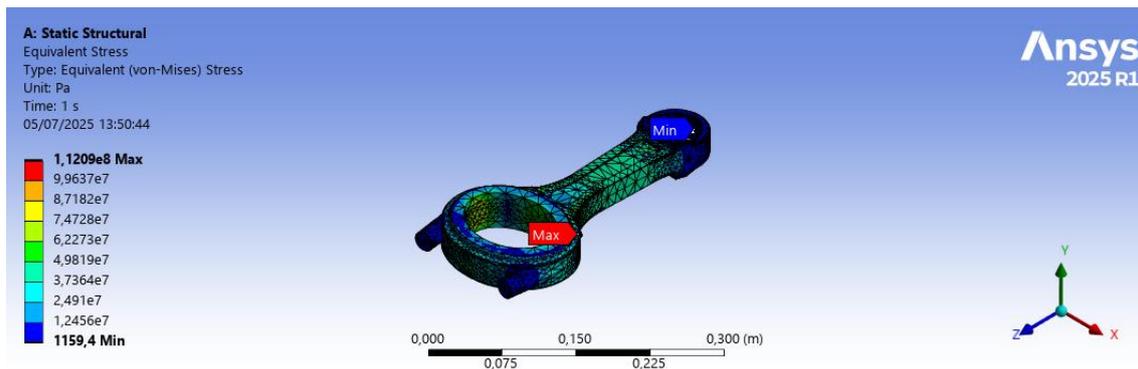


Figura 14. Ensayo 2. Distribución de Tensiones. Acero alta resistencia

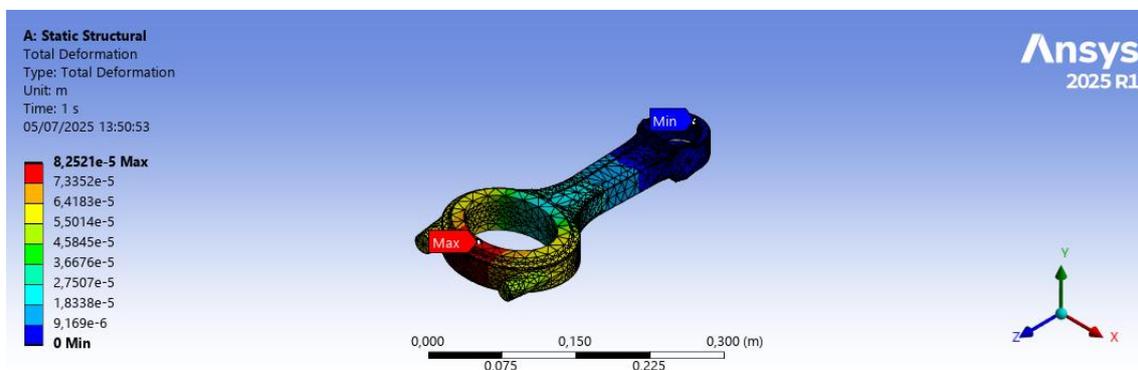


Figura 15. Ensayo 2. Deformación total. Acero alta resistencia

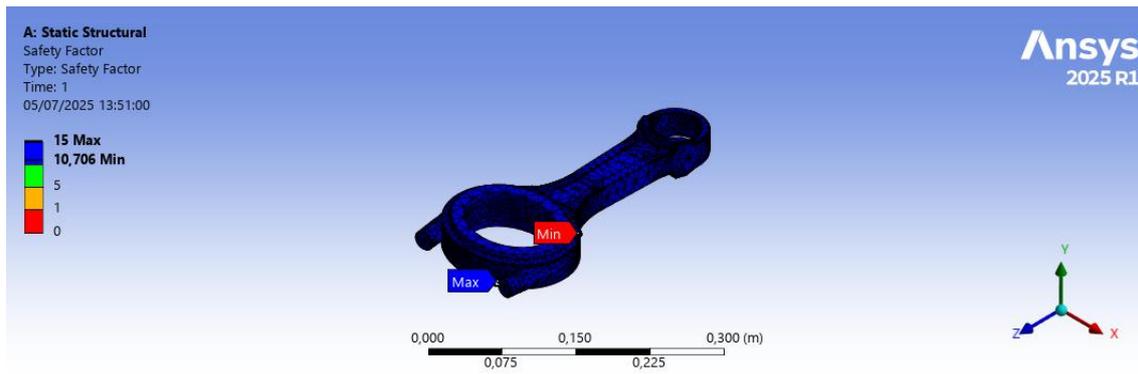


Figura 16. Ensayo 2. Factor de seguridad. Acero alta resistencia

### 5.4.3 Aluminio forjado

#### 5.4.3.1 Ensayo estático

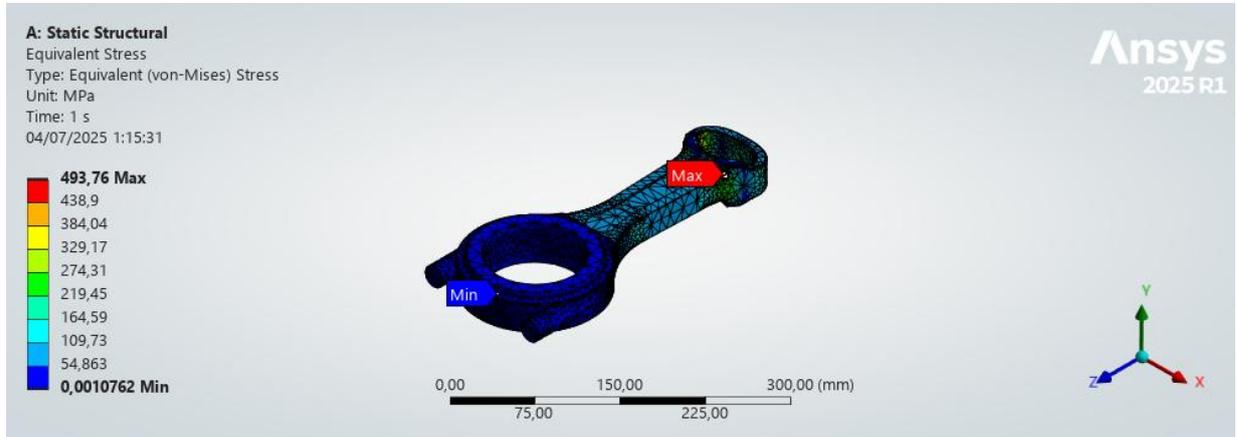


Figura 17. Ensayo 1. Distribución de tensiones. Aluminio forjado

#### 5.4.3.2 Factor de seguridad

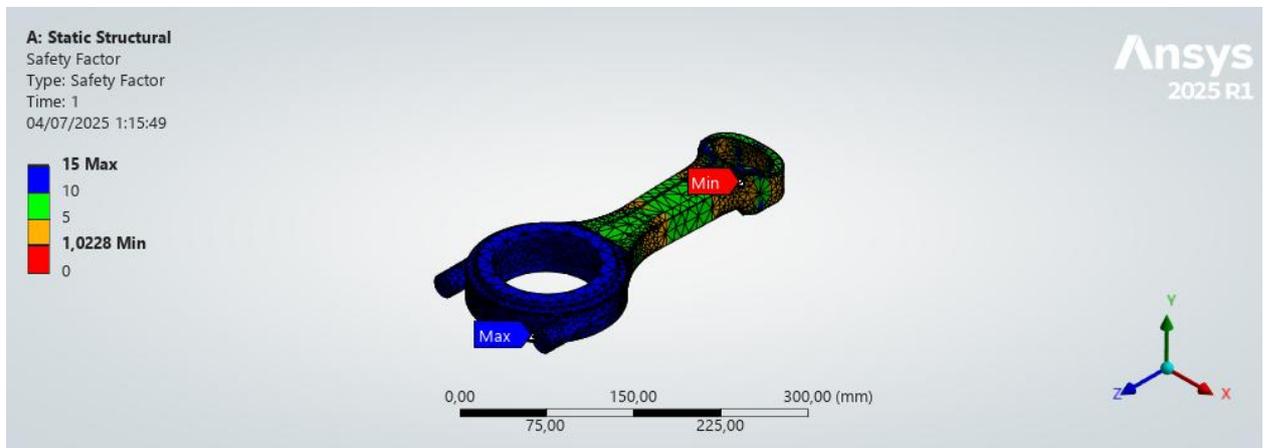


Figura 18. Ensayo 1. Factor de seguridad. Aluminio forjado

### 5.4.3.3 Deformación total

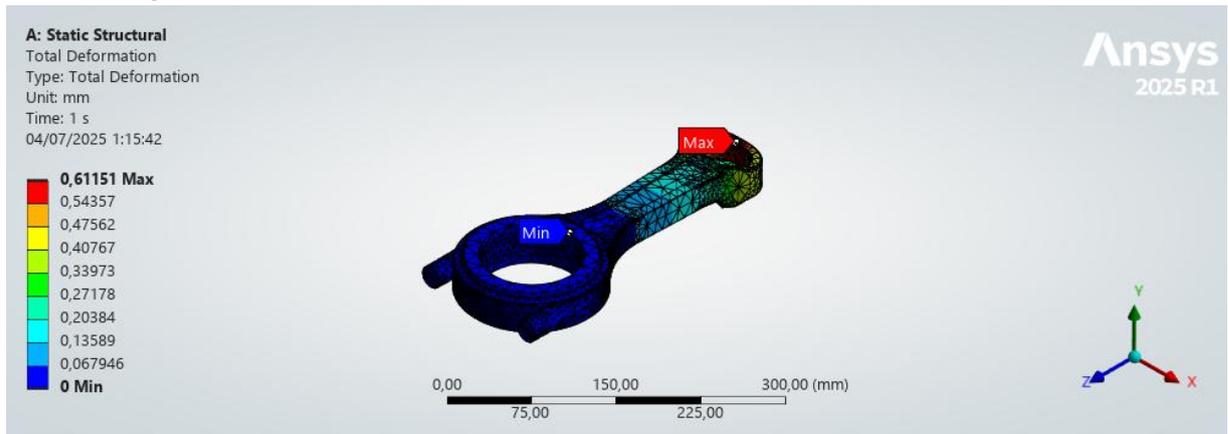


Figura 19. Ensayo 1. Deformación Total. Aluminio forjado

### 5.4.3.4 Carga axial (Solo imágenes del ensayo de tracción)

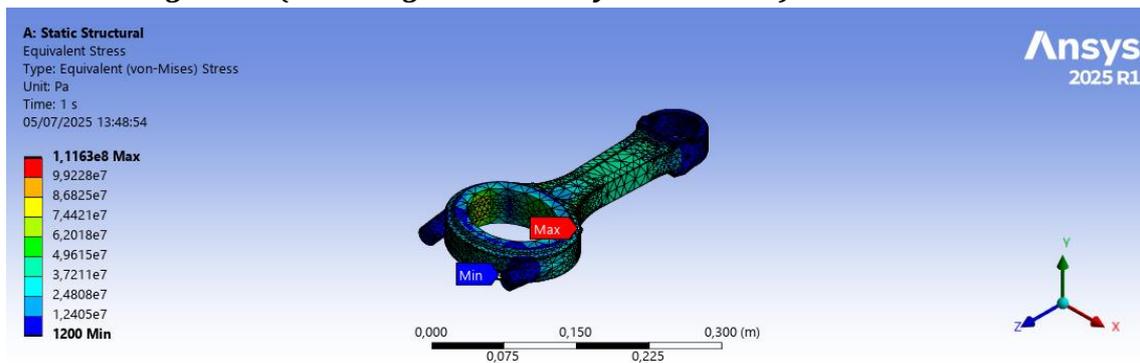


Figura 20. Ensayo 2. Distribución de tensiones. Aluminio forjado

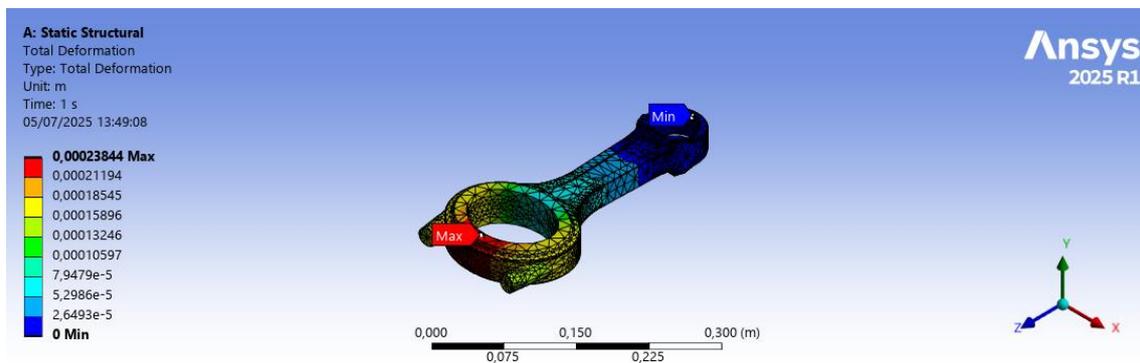
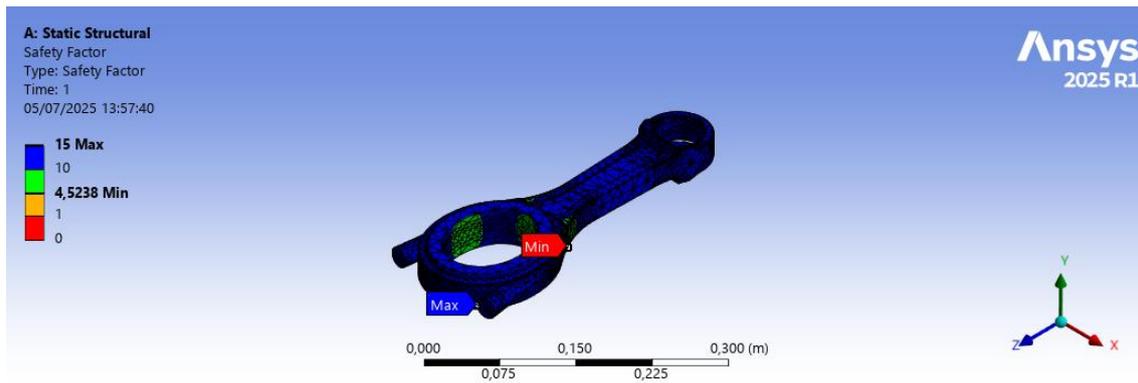


Figura 21. Ensayo 2. Deformación total. Aluminio forjado



*Figura 22. Ensayo 2. Factor de seguridad. Aluminio forjado*

## 5.4.4 Titanio forjado

### 5.4.4.1 Ensayo estático

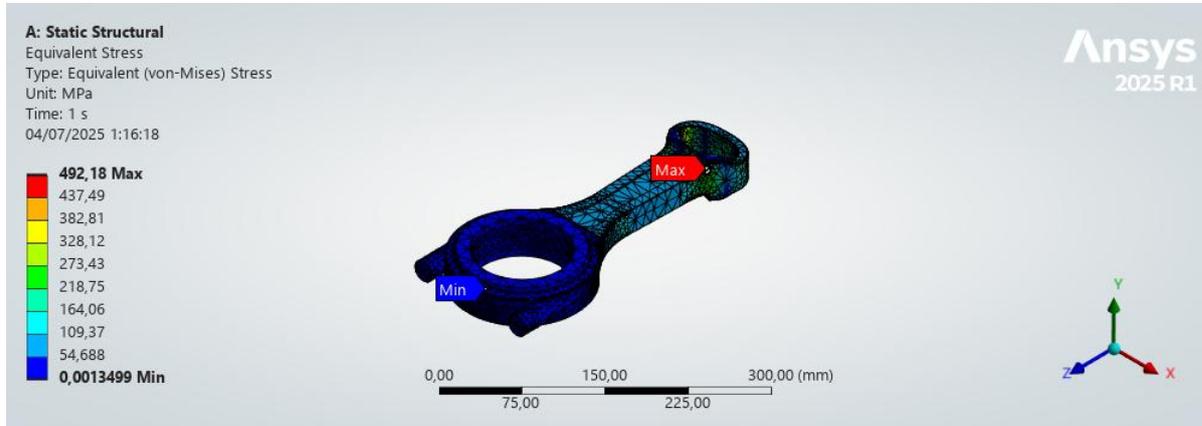


Figura 23. Ensayo 1. Distribución de tensiones. Titanio forjado

### 5.4.4.2 Factor de seguridad

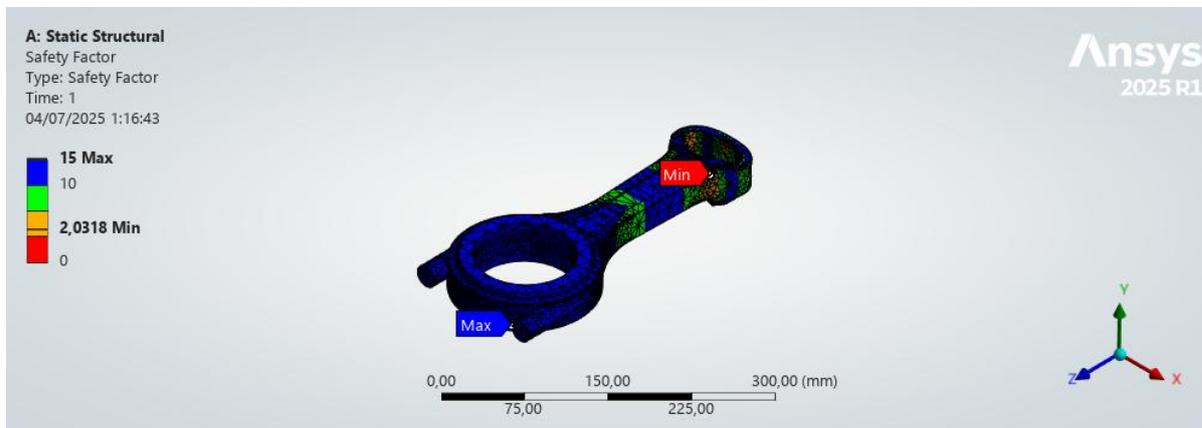


Figura 24. Ensayo 1. Factor de seguridad. Titanio forjado

### 5.4.4.3 Deformación total

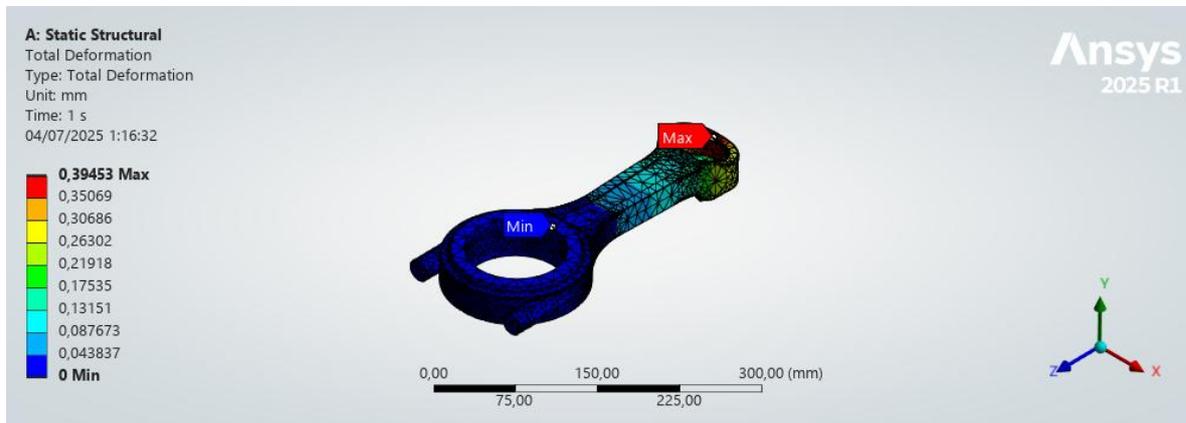


Figura 25. Ensayo 1. Deformación total. Titanio forjado

### 5.4.4.4 Carga axial (Solo imágenes del ensayo de tracción)

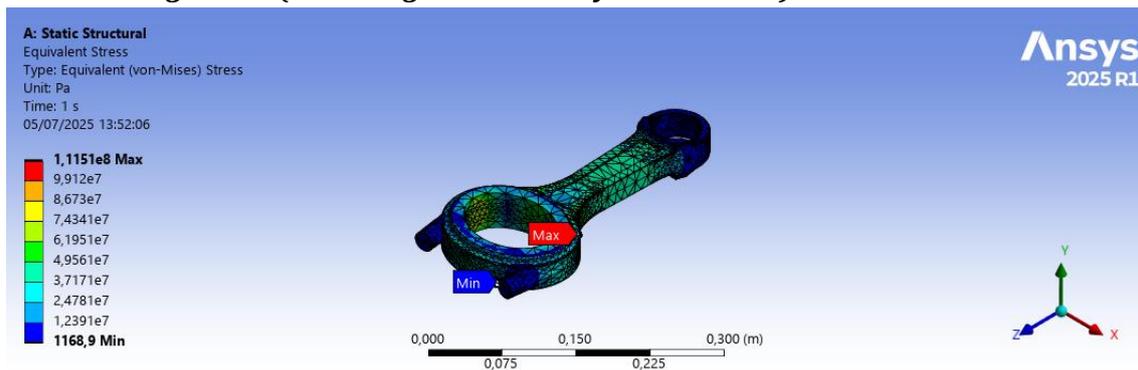


Figura 26. Ensayo 2. Distribución de tensiones. Titanio forjado

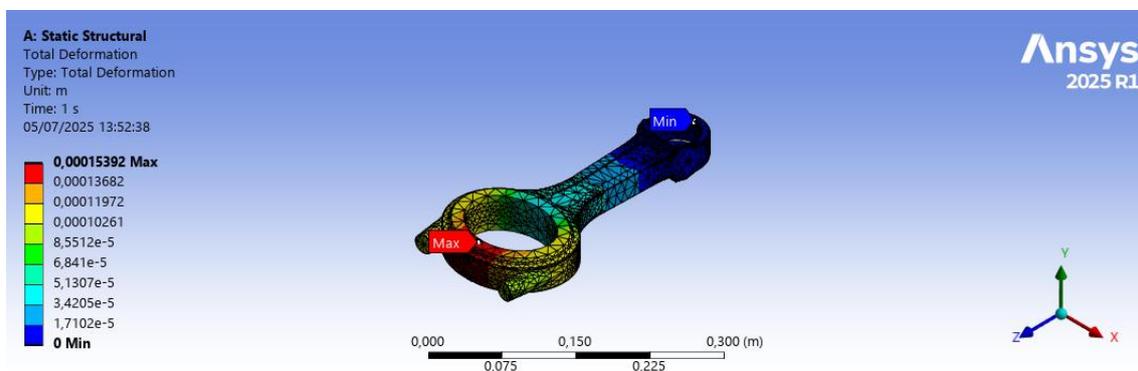


Figura 27. Ensayo 2. Deformación total. Titanio forjado

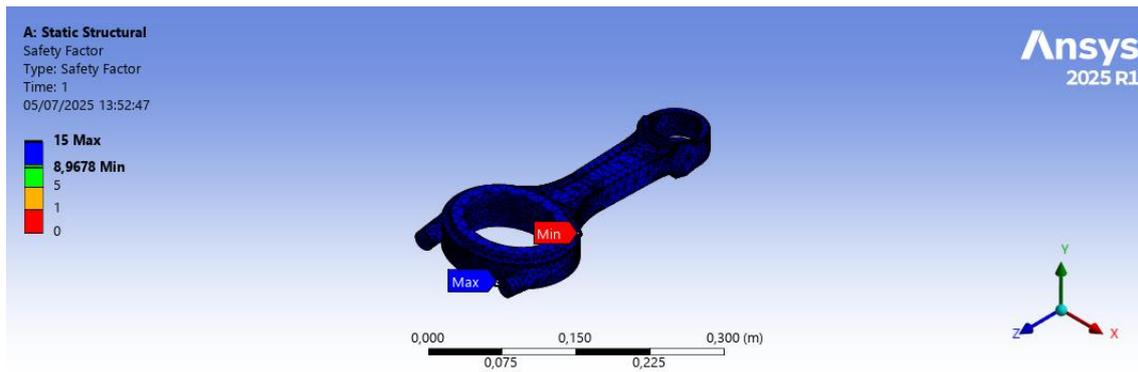


Figura 28. Ensayo 2. Factor de seguridad. Titanio forjado

## 5.5 Comparativa final de resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en los dos ensayos realizados sobre la biela en el módulo Static Structural de ANSYS 2024. El primer ensayo simula la carga de trabajo real de la biela, aplicando una fuerza de compresión de 100 kN sobre el ojo superior (bulón), reproduciendo la acción del ciclo de combustión en el motor.

El segundo ensayo corresponde a una simulación axial alternante, con cargas de  $\pm 40$  kN aplicadas en el ojo inferior (zona del cigüeñal), con el ojo superior fijo. Este segundo análisis, aunque simplificado, permite evaluar el comportamiento estructural de la biela bajo esfuerzos cíclicos en tracción y compresión. Dado que se trata de una geometría simétrica sometida a carga axial pura, y el análisis se ha realizado en el dominio lineal estático, los resultados obtenidos para tracción y compresión resultan prácticamente equivalentes. Por tanto, en la tabla que sigue se ha optado por representar solo una de las dos simulaciones para cada material en el ensayo 2, reduciendo la repetición de datos.

Tabla 7. Comparativa de resultados en los ensayos

<b>Material</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Carga aplicada [kN]</b>	<b>Tensión máx. (von Mises) [MPa]</b>	<b>Factor de Seguridad (FOS)</b>
Acero AR	Ensayo 1	100 (Compresión)	499,6	2,4
Acero AR	Ensayo 2	$\pm 40$ (Axial)	120	10,7
Aluminio 7075-T6	Ensayo 1	100 (Compresión)	493,76	1,02
Aluminio 7075-T6	Ensayo 2	$\pm 40$ (Axial)	111	4,52
Titanio Ti-6Al-4V	Ensayo 1	100 (Compresión)	492,18	2,03
Titanio Ti-6Al-4V	Ensayo 2	$\pm 40$ (Axial)	111	8,96

Los resultados obtenidos en los dos ensayos muestran un comportamiento claramente diferenciado según el tipo de carga aplicada. En el ensayo 1 (carga de compresión de 100 kN en el ojo superior), los materiales alcanzan tensiones máximas cercanas a los 500 MPa, con factores de seguridad moderados, lo que indica que la geometría actual de la biela está altamente optimizada para este tipo de carga real de trabajo. En especial, se observa cómo el aluminio presenta el FOS más ajustado (1,02), lo que refuerza la idea de que el diseño está llevado al límite bajo esta sollicitación.

Por el contrario, en el ensayo 2 (carga axial alternante de  $\pm 40$  kN), los resultados muestran valores de tensión considerablemente más bajos y factores de seguridad muy elevados (FOS entre 4,52 y 10,7), lo que sugiere que existe margen de mejora geométrica en estas condiciones. En particular, se podrían realizar optimizaciones locales para aligerar ciertas zonas de la pieza sin comprometer su resistencia estructural frente a cargas axiales, mejorando así la eficiencia estructural global.

En conjunto, el análisis revela que la geometría está diseñada específicamente para soportar cargas de combustión, mientras que las cargas axiales alternantes no suponen un riesgo estructural relevante en su configuración actual. Esto abre la puerta a futuras iteraciones del diseño enfocadas en reducir peso y mejorar la eficiencia mecánica, especialmente si se opta por materiales más ligeros como el aluminio o el titanio.

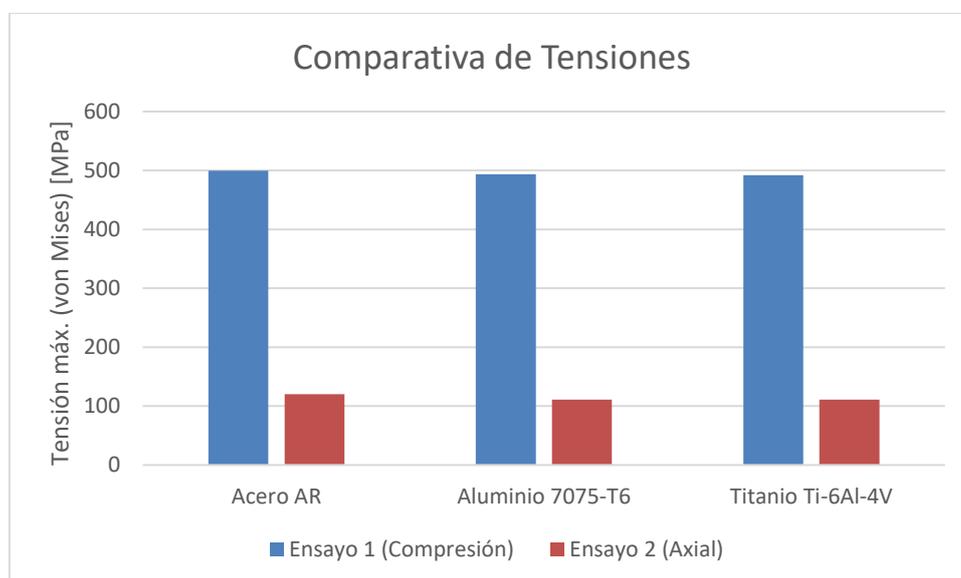


Figura 29. Gráfica comparación de Tensiones

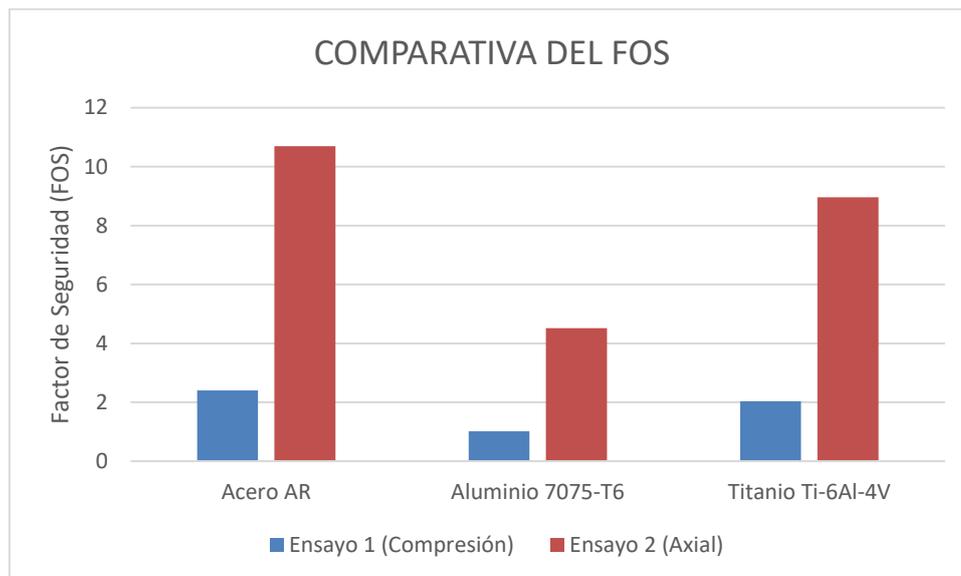


Figura 30. Gráfica comparación factor de seguridad.

## Capítulo 6. ESTUDIO ECONÓMICO COMPARATIVO

### 6.1 Introducción

La innovación en el diseño mecánico debe ser acompañada por una evaluación económica rigurosa que asegure la viabilidad industrial de las soluciones propuestas. En este capítulo se lleva a cabo un estudio económico comparativo de distintos materiales aplicados a una biela de motor diésel de camión. El análisis tiene en cuenta tanto el coste directo de fabricación como el impacto económico acumulado a lo largo del ciclo de vida del componente, asociado principalmente a la reducción de masa y su influencia sobre la eficiencia energética del vehículo.

Como caso práctico, se toma como referencia un camión Mercedes-Benz Actros 1845 LS, ampliamente utilizado en el transporte de larga distancia en Europa. Esta elección permite proyectar el análisis sobre un entorno realista y cuantificable.

### 6.2 Metodología y parámetros económicos considerados

El análisis económico se ha estructurado en distintos niveles

#### 6.2.1 Coste directo de fabricación

Para cada material, se calculó el coste unitario por biela considerando:

- Precio de adquisición por kilogramo del material en bruto.
- Masa estimada de la biela en dicho material.

- Coste del mecanizado por unidad, que depende directamente de la maquinabilidad del material.

$$\textit{Coste total unidad} = (\textit{Precio kg} \times \textit{Masa biela}) + \textit{Coste mecanizado}$$

El resultado se extrapola al conjunto de seis bielas por motor, tal como se monta en el motor OM 471 LA del camión Actros.

### 6.2.2 Coste base de referencia: biela convencional

Para establecer una comparación sólida, se define una biela de acero convencional como base de referencia económica. Su coste medio de fabricación se estima en:

- Precio acero: 1.50 €/kg
- Masa estimada: 3.5 kg
- Mecanizado: 10 €/unidad

$$C_{unidad} = (1.50 \times 3.5) + 10 = 15.25 \text{ €} \Rightarrow C_{motor} = 6 \times 15.25 = 91.50 \text{ €}$$

Este coste será la base para calcular porcentajes de sobrecoste o ahorro por cada material alternativo:

$$\% \text{ Cambio} = \left( \frac{C_{material} - 91.5}{91.5} \right) \times 100$$

### 6.2.3 Ahorro por eficiencia energética derivada del aligeramiento

La reducción de masa tiene un impacto directo sobre la eficiencia del motor, reduciendo las fuerzas inerciales alternantes. Se estima un factor de mejora del consumo de aproximadamente un 0.25 % por cada 10 kg aligerados.

- Para cada material se calcula:
- Ahorro de masa respecto al acero convencional
- Mejora teórica de eficiencia (%)
- Ahorro proyectado de combustible (€/5 años)

$$\text{Ahorro por eficiencia} = \Delta m \times f_{ef}$$

Donde:

- Consumo medio = 30 L/100 km
- Kilometraje total = 600,000 km
- Coste gasoil = 1.50 €/L
- 180,000 L  $\times$  1.50 € = 270,000 €

#### 6.2.4 Ahorro operativo anual derivado del peso

Además del consumo, se calcula un ahorro operativo directo anual estimado, en base al peso reducido y un factor medio de ahorro de 7.5 €/kg·año, aplicable a flotas de transporte.

$$\text{Ahorro anual} = \Delta \text{masa} \times 7.5$$

El ahorro acumulado se actualiza considerando un IPC medio del 4 % anual.

$$\text{Ahorro 5 años (con IPC)} = \sum_{i=1}^5 A \times (1 + 0.04)^i$$

#### 6.2.5 Consideraciones fiscales (IRPF/Impuesto de Sociedades)

Si el estudio se plantea desde una empresa transportista, los costes de operación son deducibles. Por tanto, el ahorro operativo genera un beneficio fiscal indirecto al reducir la base imponible del impuesto de sociedades.

$$\text{Ahorro fiscal adicional} = \text{Ahorro operativo} \times \text{Tipo impositivo}$$

Si se asume un tipo medio del 25 %, el ahorro real total aumentaría en esa proporción.

#### 6.2.6 Cálculo del retorno de inversión (payback)

Por último, se calcula el número de años necesarios para amortizar el sobrecoste inicial mediante el ahorro operativo anual:

$$T. \text{ amortización (años)} = \frac{\text{Sobrecoste respecto a acero}}{\text{Ahorro anual estimado}}$$

Este indicador es clave para decidir la implementación en función del horizonte temporal del vehículo.

### 6.2.7 Tasa Interna de Retorno (TIR)

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es un indicador financiero utilizado para evaluar la rentabilidad de una inversión a lo largo del tiempo. Representa el tipo de interés o rendimiento porcentual anual que iguala a cero el Valor Actual Neto (VAN) de una serie de flujos de caja esperados. En otras palabras, la TIR es la tasa de descuento que hace que el valor presente de los beneficios futuros generados por una inversión sea igual al coste inicial de la misma.

Matemáticamente, se define como la solución a la siguiente ecuación:

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{F_t}{(1 + TIR)^t}$$

Una TIR superior al coste del capital o a indicadores económicos como el IPC indica una inversión rentable. En este proyecto, la TIR se utiliza para valorar si el sobrecoste de fabricación de las bielas con materiales alternativos (acero de alta resistencia, aluminio y titanio forjados) se compensa con los ahorros generados durante la vida útil estimada del vehículo (5 años en servicio).

---

### 6.3 Aplicación práctica: Mercedes-Benz Actros

Modelo de referencia:

- Motor: OM 471 LA
- N.º bielas: 6
- Consumo medio: 30 L/100 km
- Km anuales: 120,000
- Duración análisis: 5 años (600,000 km)

$$Consumo\ total = 180,000\ L$$

$$C_{combustible} = 270,000\text{€}$$

La masa aligerada por cambiar de material influye en ese coste final a través de mejoras del 0.1 – 1 %.

---

## **6.4 Estructura del análisis en hoja de cálculo**

Se propone una hija Excel estructurada en:

Por material:

- Datos básicos (precio, masa, mecanizado)
- Coste total por motor
- Ahorro de masa
- Ahorro operativo anual
- Ahorro 5 años (con IPC)
- Ahorro en combustible
- Ahorro fiscal adicional
- Tiempo de amortización

## 6.5 Resumen de los resultados.

Tabla 8. Tabla comparativa estudio económico

TABLA COMPARATIVA GLOBAL							
Material	Coste Total	Ahorro masa (Kg)	Eficiencia (%)	Ahorro combustible (€/5a)	Ahorro operativo 5a + IPC	Ahorro fiscal	Amortización (años)
ACERO CONVENCIONAL	100,35 €	0,00	0	0,00 €	0,00 €	0,00 €	---
ACERO A.R.	138,83 €	0,17	0,04%	115,43 €	7,22 €	1,81 €	30,00
ALUMINIO FORJADO	141,57 €	17,31	4,33%	11.681,42 €	731,12 €	182,78 €	0,32
TITANIO FORJADO	487,53 €	11,72	2,93%	7.911,27 €	495,16 €	123,79 €	4,40

Tabla 9. Tabla comparativa del TIR para cada material

Año	ACERO AR	Año	ALUMINIO	Año	TITANIO
	Flujo de caja		Flujo de caja		Flujo de caja
0	-138,83 €	0	-141,57 €	0	-487,53 €
1	1,62 €	1	163,54 €	1	110,76 €
2	1,63 €	2	164,89 €	2	111,67 €
3	1,64 €	3	166,29 €	3	112,62 €
4	1,66 €	4	167,75 €	4	113,61 €
5	1,67 €	5	169,27 €	5	114,64 €
TIR	-53%	TIR	114%	TIR	4,99%

Tras aplicar la metodología de cálculo de la Tasa Interna de Retorno (TIR) a cada uno de los materiales alternativos, se observa una diferencia significativa en cuanto a su rentabilidad económica. El aluminio forjado presenta un resultado claramente favorable, con una TIR del 114 %. Este valor refleja un retorno económico altamente atractivo, ya que su ahorro operativo y fiscal compensa sobradamente el ligero sobrecoste inicial de implantación, convirtiéndolo en la opción más rentable del estudio. En el caso del titanio forjado, pese a su excelente comportamiento mecánico, el elevado coste inicial que implica su utilización reduce considerablemente la rentabilidad del proyecto, arrojando una TIR del 4,99 %, apenas por encima del valor medio del IPC, lo que lo convierte en una opción poco atractiva para aplicaciones estándar. Finalmente, el acero de alta resistencia (AR), aunque técnicamente válido, no presenta ninguna mejora significativa en términos económicos: su TIR negativa del -53 % pone de manifiesto que el ahorro generado es insuficiente para justificar siquiera su pequeño sobrecoste, resultando, por tanto, en una opción ineficiente desde el punto de vista financiero. Esta comparativa permite concluir que, si bien todos los materiales son viables a nivel estructural, solo el aluminio forjado alcanza un equilibrio óptimo entre rendimiento y coste a lo largo de la vida útil del vehículo.

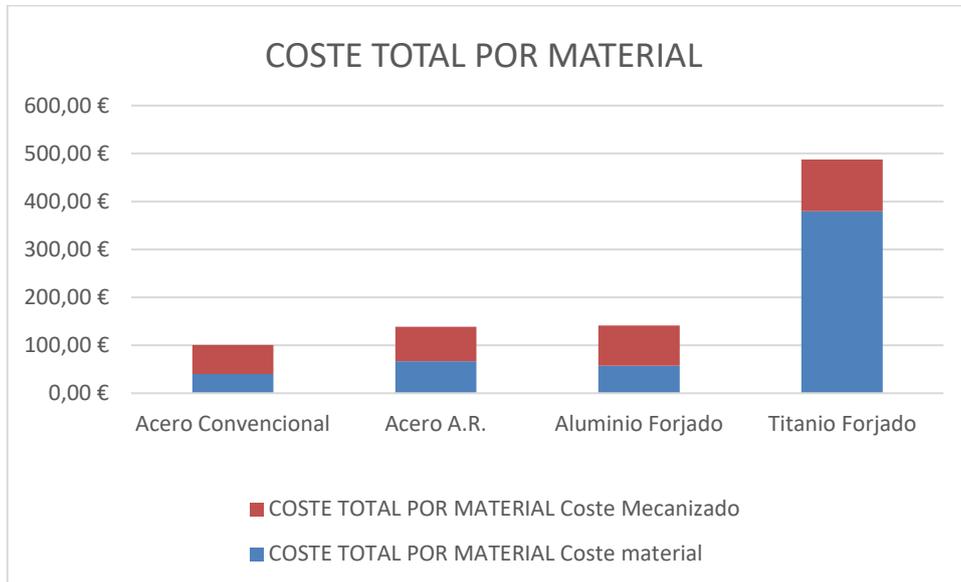


Figura 31. Gráfica costes totales

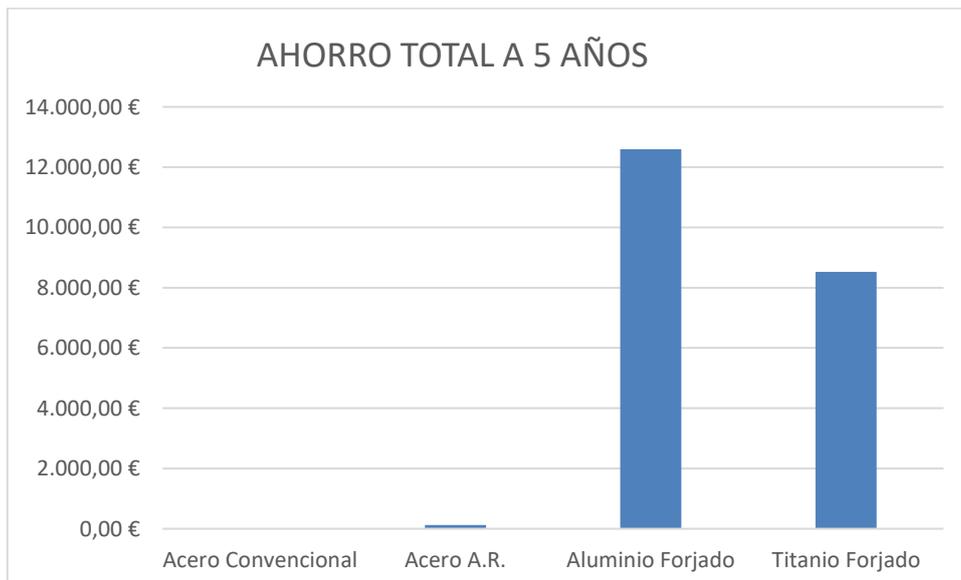


Figura 32. Gráfica ahorro a 5 años

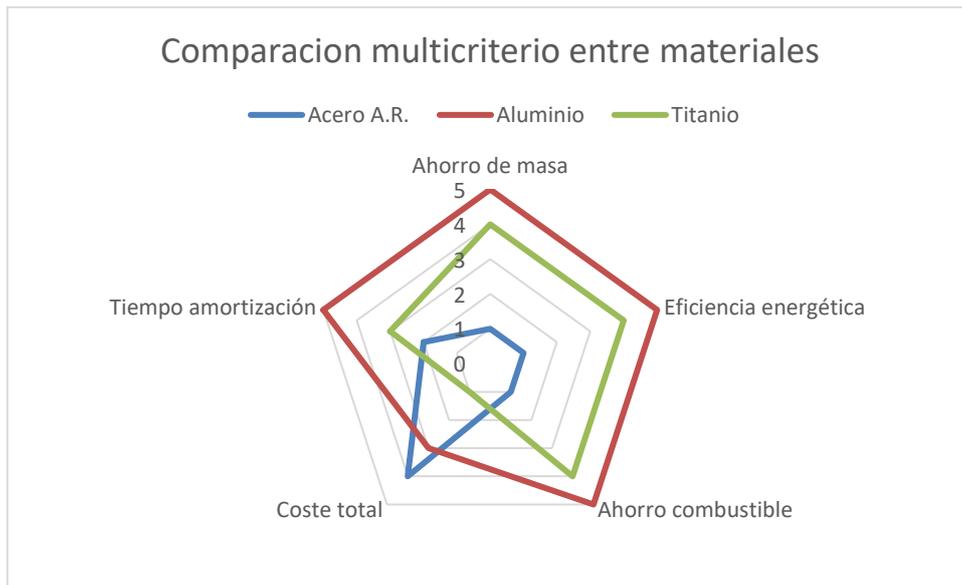


Figura 33. Gráfica comparación entre materiales

## Capítulo 7. CONCLUSIONES

### 7.1 Conclusiones generales

A lo largo del presente trabajo se ha desarrollado un análisis detallado del comportamiento de una biela de camión bajo diferentes condiciones de carga, utilizando herramientas de diseño y simulación como SolidWorks y ANSYS Workbench 2024. Los ensayos realizados, ajustados a los requisitos normativos establecidos, han permitido evaluar la viabilidad estructural de la pieza utilizando tres materiales alternativos: acero martensítico de alta resistencia, aluminio forjado (serie 7000/2600) y titanio Ti-6Al-4V.

Durante la fase de simulación, se ha podido estudiar el comportamiento mecánico de la biela con cada uno de estos materiales, observando la distribución de tensiones mediante los ensayos definidos. A lo largo del proceso, se ha mejorado geoméricamente la pieza, retirando o añadiendo material en zonas estratégicas, optimizando así su rigidez y resistencia global. En todos los casos, los materiales propuestos han logrado superar satisfactoriamente los ensayos estáticos según normativa, confirmando su viabilidad conceptual para el componente analizado.

Del análisis comparativo, puede concluirse que el titanio es el material que presenta un comportamiento mecánico superior, seguido por el acero de alta resistencia y, en último lugar, el aluminio. No obstante, estos resultados deben entenderse como una aproximación conceptual, ya que, en caso necesario, es siempre posible ajustar la geometría de la pieza para adaptar su comportamiento a un material específico.

La segunda parte del estudio se ha centrado en el análisis económico asociado a la implementación de cada uno de los materiales. Para ello, se ha planteado una proyección a cinco años, considerando valores de mercado reales y aplicando indicadores económicos como el IPC y ciertas variables fiscales. Esta decisión responde a un enfoque realista: cinco años es el periodo medio de explotación de una cabeza tractora en una empresa de transporte de mercancías antes de su renovación. En este contexto, los vehículos pasan a manos de empresas medianas o pequeñas, y así sucesivamente, completando ciclos de uso típicos en el sector.

Los resultados económicos obtenidos muestran que el aluminio forjado se posiciona como la opción más eficiente en cuanto a ahorro global, a pesar de sus limitaciones estructurales relativas. Por el contrario, el titanio, aunque sobresaliente en comportamiento mecánico, presenta un sobrecoste elevado difícil de amortizar en este escenario. En el caso del acero de alta resistencia, si bien sus resultados estructurales son correctos, su nivel de innovación respecto al acero convencional es limitado, mostrando diferencias modestas frente a la solución actualmente empleada.

Por todo ello, el aluminio forjado se presenta como el material más atractivo en el conjunto del estudio. No obstante, su aplicación directa en líneas de producción requiere una reingeniería de procesos, factor que escapa al alcance del presente trabajo, pero que sin duda merece ser objeto de futuros desarrollos.

## **7.2 Posibles mejores y futuras líneas de investigación.**

A partir del desarrollo y resultados de este trabajo, se identifican diversas líneas de mejora que podrían aplicarse para ampliar, refinar o escalar los resultados obtenidos. Estas propuestas se agrupan en función de su naturaleza técnica, experimental o económica, y se presentan como posibles ampliaciones futuras para consolidar la viabilidad del rediseño de la biela en un entorno real de aplicación.

Una primera vía de mejora se centra en la incorporación de herramientas de optimización topológica, que permiten identificar regiones de la pieza en las que puede eliminarse material sin comprometer la resistencia estructural. Este enfoque, combinado con los ensayos realizados, podría conducir a un diseño aún más eficiente en términos de masa, contribuyendo así a un mayor ahorro energético y a una mejor respuesta dinámica del motor. La implementación de esta técnica, ampliamente utilizada en sectores como la automoción y la aeronáutica, representaría un avance significativo sobre la geometría propuesta.

Asimismo, se considera relevante incluir en futuros análisis una simulación termo-mecánica acoplada, que tenga en cuenta la influencia de las variaciones térmicas internas del motor sobre la resistencia de la biela. Dado que los ciclos térmicos afectan directamente a la expansión dimensional, su estudio aportaría una aproximación más realista al entorno de trabajo de la pieza.

A pesar de la robustez de los resultados obtenidos mediante herramientas CAE, una validación experimental supondría un refuerzo esencial a las conclusiones del trabajo. En este sentido, se propone la fabricación de prototipos funcionales de la biela en cada uno de los materiales analizados, utilizando procesos reales de forja, mecanizado o impresión metálica, en función del material. Esta acción permitiría contrastar los resultados de simulación con datos empíricos obtenidos en bancos de prueba.

Complementariamente, la realización de ensayos reales de carga axial y rotura bajo condiciones controladas permitiría ajustar y verificar los factores de seguridad obtenidos mediante simulación. Esta correlación experimental-simulación es fundamental para garantizar la fiabilidad del diseño en aplicaciones reales y para obtener certificaciones normativas más exigentes.

En relación con la viabilidad del cambio de material en un entorno de producción, se considera esencial abordar un estudio de impacto en los procesos de fabricación, especialmente en el caso del aluminio forjado. Su adopción requeriría modificar líneas de forja, herramientas, y parámetros de mecanizado, así como adaptaciones en procesos de soldadura o control de calidad. Estimar estos costes de reingeniería permitiría valorar con mayor precisión la inversión necesaria para una transición industrial completa.

Asimismo, se propone un estudio de amortización a gran escala, considerando distintos volúmenes de producción y escenarios de flota. Este enfoque permitiría determinar si la implementación de un nuevo material resulta rentable en empresas de distinto tamaño

---

(fabricantes de componentes, flotas privadas, OEMs) o si su aplicación debe reservarse a sectores de altas prestaciones como competición o transporte especializado.

En cuanto al análisis económico, una mejora interesante sería la aplicación de un análisis de sensibilidad, que permita evaluar cómo afectan variables como el coste energético, el precio del material o la evolución del IPC a lo largo del tiempo sobre la rentabilidad de cada material. Este análisis ayudaría a anticipar escenarios adversos y a ofrecer un marco más robusto para la toma de decisiones empresariales.

Por otro lado, una línea de desarrollo con gran proyección es la realización de un análisis del ciclo de vida (LCA). Esta herramienta evaluaría la huella de carbono de cada material desde su extracción hasta su reciclado, aportando una dimensión medioambiental clave para el sector del transporte, cada vez más regulado por normativas de sostenibilidad. Esta aproximación permitiría integrar criterios técnicos, económicos y ecológicos en una única evaluación multicriterio.

---

### **7.3 Reflexión final y valoración personal**

El presente trabajo nace de una vinculación personal y profesional con el sector del vehículo industrial, un ámbito altamente especializado donde los márgenes de mejora suelen ser muy limitados. Esta particularidad se debe, en gran medida, a la estrecha interdependencia entre cliente y proveedor, que conforman una cadena productiva y operativa donde cada eslabón alimenta al siguiente, generando una dinámica cerrada y muy optimizada en sus procesos.

Precisamente por ello, el desafío ha consistido en identificar elementos aparentemente secundarios, pero con potencial para generar un impacto real. En este caso, la biela se ha presentado como una oportunidad tangible: una pieza crítica pero muchas veces estandarizada, cuyo rediseño estructural y material puede aportar beneficios significativos tanto en términos técnicos como económicos.

A lo largo del desarrollo del proyecto, no solo se ha confirmado la viabilidad de introducir materiales innovadores, sino también la posibilidad de repensar su fabricación y gestión económica bajo nuevas perspectivas. Este trabajo pretende ser un primer paso dentro de una posible línea de investigación más amplia, orientada al análisis y mejora de otros componentes clave del motor y del sistema de propulsión, donde la ingeniería aplicada pueda seguir generando valor añadido incluso en sectores tan maduros como el transporte pesado.

## ANEXO 1. ESTUDIO ECONÓMICO(EXCEL)

	A	B	C	D	E	F	G	
1	<b>ACERO ALTA RESISTENCIA</b>				<b>CÁLCULOS</b>			
2	Masa por biela(Kg)	4,46			Masa total de las 6 bielas (Kg)	26,73		
3	Precio por Kg	2,50 €			Coste total por unidad	23,14 €		
4	Coste mecanizado	12,00 €			Coste total por las 6 bielas	138,83 €		
5					Sobrecoste respecto a acero convencional	38,47 €		
6					Ahorro en masa total (Kg)	0,171		
7					Mejora de la eficiencia energética	0,04%		
8					Ahorro en consumo de combustible (€/5 años)	115,43 €		
9					Ahorro operativo anual (por reducción de peso)	1,28 €	/año	
10					Ahorro operativo acumulado (5 años, con IPC)	7,22 €		
11					Ahorro fiscal adicional	1,81 €		
12					Tiempo de amortización (años)	30,00		

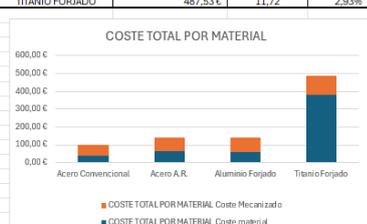
	A	B	C	D	E	F	G	
1	<b>ALUMINIO FORJADO</b>				<b>CÁLCULOS</b>			
2	Masa por biela(Kg)	1,60			Masa total de las 6 bielas (Kg)	9,60		
3	Precio por Kg	6,00 €			Coste total por unidad	23,60 €		
4	Coste mecanizado	14,00 €			Coste total por las 6 bielas	141,57 €		
5					Sobrecoste respecto a acero convencional	41,22 €		
6					Ahorro en masa total (Kg)	17,31		
7					Mejora de la eficiencia energética	4%		
8					Ahorro en consumo de combustible (€/5 años)	11.681,42 €		
9					Ahorro operativo anual (por reducción de peso)	129,79 €	/año	
10					Ahorro operativo acumulado (5 años, con IPC)	731,12 €		
11					Ahorro fiscal adicional	182,78 €		
12					Tiempo de amortización (años)	0.32		

	A	B	C	D	E	F	G	
1	<b>TITANIO FORJADO</b>				<b>CÁLCULOS</b>			
2	Masa por biela(Kg)	2,53			Masa total de las 6 bielas (Kg)	15,18		
3	Precio por Kg	25,00 €			Coste total por unidad	81,26 €		
4	Coste mecanizado	18,00 €			Coste total por las 6 bielas	487,53 €		
5					Sobrecoste respecto a acero convencional	387,18 €		
6					Ahorro en masa total (Kg)	11,72		
7					Mejora de la eficiencia energética	2,93%		
8					Ahorro en consumo de combustible (€/5 años)	7.911,27 €		
9					Ahorro operativo anual (por reducción de peso)	87,90 €	/año	
10					Ahorro operativo acumulado (5 años, con IPC)	495,16 €		
11					Ahorro fiscal adicional	123,79 €		
12					Tiempo de amortización (años)	4,40		

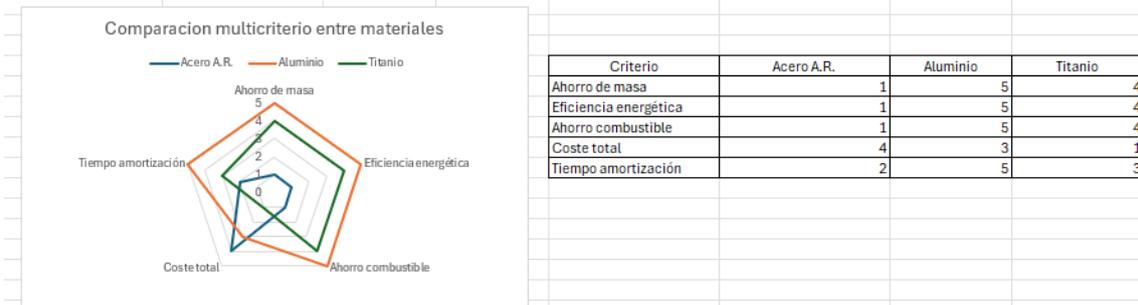
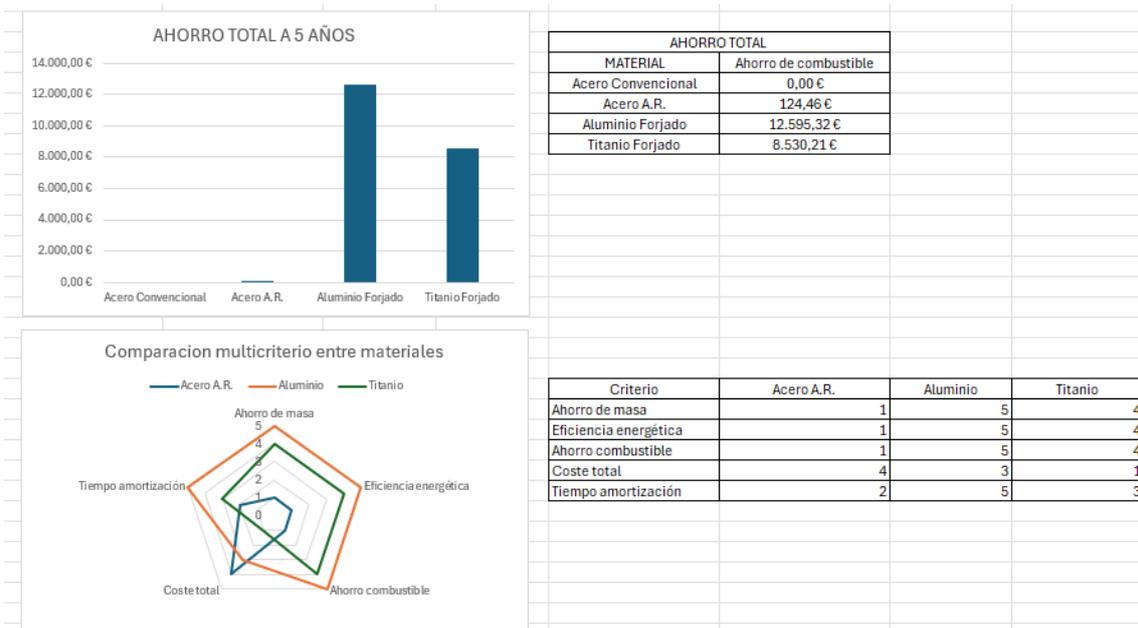
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	<b>PARÁMETROS GENERALES</b>										
2	Nº de bielas	6									
3	Coste de combustible 5 años	270.000,00 €									
4	Factor de eficiencia por kg ahorrado	0,0025									
5	Factor ahorro operativo (€/kg año)	7,5									
6	Duración del análisis (años)	5									
7	IPC medio anual estimado	4%									
8	IRPF/Impuesto de sociedades estimado	25%									
9	Masa base acero(Kg)	4,48									
10	Precio acero	1,50 €									
11	Mecanizado acero	10,00 €									
12	Coste total base	100,35 €									
13											
14											
15											
16											
17											
18											
19											
20											
21											
22											
23											

TABLA COMPARATIVA GLOBAL							
Material	Coste Total	Ahorro masa (Kg)	Eficiencia (%)	Ahorro combustible (€/5a)	Ahorro operativo 5a + IPC	Ahorro fiscal	Amortización (años)
ACERO CONVENCIONAL	100,35 €	0,00	0	0,00 €	0,00 €	0,00 €	---
ACERO A.R.	138,83 €	0,17	0,04%	115,43 €	7,22 €	1,81 €	30,00
ALUMINIO FORJADO	141,57 €	17,31	4,33%	11.681,42 €	731,12 €	182,78 €	0,32
TITANIO FORJADO	487,53 €	11,72	2,93%	7.911,27 €	495,16 €	123,79 €	4,40

COSTE TOTAL POR MATERIAL		
Material	Coste material	Coste Mecanizado
Acero Convencional	40,35 €	60,00 €
Acero A.R.	66,83 €	72,00 €
Aluminio Forjado	57,57 €	84,00 €
Titanio Forjado	379,53 €	108,00 €



M	N	O	P	Q	R	S
	<b>ACERO AR</b>		<b>ALUMINIO</b>		<b>TITANIO</b>	
	Año	Flujo de caja	Año	Flujo de caja	Año	Flujo de caja
	0	-138,83 €	0	-141,57 €	0	-487,53 €
	1	1,62 €	1	163,54 €	1	110,76 €
	2	1,63 €	2	164,89 €	2	111,67 €
	3	1,64 €	3	166,29 €	3	112,62 €
	4	1,66 €	4	167,75 €	4	113,61 €
	5	1,67 €	5	169,27 €	5	114,64 €
	TIR	-53%	TIR	114%	TIR	4,99%

## BIBLIOGRAFÍA

Burgos, L. (2015). Procesos de fabricación aplicados a componentes de motor. *Revista Ingeniería Mecánica*, 32(4), 45–52.

Cummins Inc. (2021). Heavy-Duty Engine Design Overview. <https://www.cummins.com>

Höganäs AB. (2020). Powder Metallurgy vs Forged Steel in Connecting Rods – Whitepaper. <https://www.hoganas.com>

Mahle GmbH. (2018). *Technik für den Motor: Connecting Rods*. Stuttgart: MAHLE Group.

John Deere Power Systems. (2019). *Diesel Engine Fundamentals Manual*. Moline, IL: John Deere.

Asociación Española de Normalización (UNE). (2019). UNE-EN ISO 6892-1:2019. Materiales metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente. UNE.

Asociación Española de Normalización (UNE). (2017). UNE-EN ISO 1099:2017. Materiales metálicos. Ensayo de fatiga axial. UNE.

Asociación Española de Normalización (UNE). (2016). UNE-EN ISO 9934-1:2016. Ensayos no destructivos. Ensayo por partículas magnéticas. Parte 1: Principios generales. UNE.

Asociación Española de Normalización (UNE). (2005). UNE-EN ISO 4287:2005. Especificaciones geométricas de productos (GPS). Estructura de la superficie: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros de la textura. UNE.

European Union. (2018). Regulation (EU) 2018/858 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the approval and market surveillance of motor vehicles and their trailers, and of systems, components and separate technical units intended for such vehicles. *Official Journal of the European Union*.

Budynas, R. G., & Nisbett, J. K. (2015). *Shigley's Mechanical Engineering Design* (10th ed.). McGraw-Hill Education.

Norton, R. L. (2020). *Machine Design: An Integrated Approach* (6th ed.). Pearson.

Suresh, S. (1998). *Fatigue of Materials* (2nd ed.). Cambridge University Press.

Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., & Fuchs, H. O. (2000). *Metal Fatigue in Engineering* (2nd ed.). Wiley.

ASM International. (2002). *ASM Handbook: Volume 2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*. ASM International.

ASM International. (1990). *ASM Handbook: Volume 1 - Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys*. ASM International.

European Aluminium Association (EAA). (2023). *Aluminium in Automotive Engineering: Technical Guide*. Retrieved from <https://www.alueurope.eu/>

MatWeb, LLC. (2024). Material Property Data. Retrieved from <https://www.matweb.com>

Ti-6Al-4V datasheet. (2022). Titanium Alloy Grade 5 – Mechanical Properties and Applications. Carpenter Technology Corporation. Retrieved from <https://www.carpentertechnology.com/>

Mahle Group. (2021). Lightweight Design in Powertrain Components: Connecting Rods and Pistons. Technical White Paper.

Norton, R. L. (2020). Machine Design: An Integrated Approach (6th ed.). Pearson Education.

Suresh, S. (1998). Fatigue of Materials (2nd ed.). Cambridge University Press.