



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

ANÁLISIS DE FRACTURA EN ÁLABES DE  
TURBOCOMPRESORES PARA MOTORES DIESEL

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial

AUTOR/A: Gimeno Ureña, Francesc

Tutor/a: Benavente Martínez, Rut

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

Universitat Politècnica de València

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL DISEÑO

**Trabajo de fin de grado:**  
**Análisis de fractura en álabes de**  
**turbocompresores para motores Diesel**

*Grado en Ingeniería Aeroespacial*

Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales

**AUTOR:** Francesc Gimeno Ureña

**TUTORA:** Rut Benavente Martínez

17 de julio de 2023



*No elegimos cómo empezamos en esta vida.  
La verdadera grandeza es qué hacemos con lo que nos toca - Sully*



## Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a la Universitat Politècnica de València, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño y el Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales por la oportunidad de estudiar y formarme en estas instituciones, y por dejarme llevar a cabo este proyecto.

Agradecer también a mi tutora Rut su energía, vitalidad, profesionalidad, dedicación e implicación en el proyecto, cualidades que se contagian, que motivan y que han hecho que trabajar en este proyecto con ella sea increíble.

Me gustaría agradecer también a mis padres, que me han dado todo cuando ni siquiera sabían de dónde sacarlo. Por sus sacrificios, por la educación y los valores de esfuerzo y sacrificio que me han dado, y por apoyarme cuando no lo merecía pero sí lo necesitaba.

No podía faltar el agradecimiento a esa persona tan especial. Doy gracias a la vida por haber puesto una persona así en mi camino, la cual me inspira y me da ganas de ser la mejor versión de mi mismo. Gracias por toda tu ayuda, tus consejos y tu apoyo incondicional.

Por último, me gustaría agradecer a mis amigos y toda la gente que ha aportado algo en mi vida. Gracias a vosotros soy la persona que soy.



## Resumen

En los últimos años, la preocupación por el futuro del planeta ha crecido exponencialmente, por lo que se están llevando a cabo infinidad de medidas para revertir la situación en todos los sectores. En particular, en el sector del transporte el principal reto que se afronta es la reducción de gases de efecto invernadero y contaminantes de los vehículos, ya sea mediante el uso de nuevas tecnologías, como nuevos motores o combustibles, o mediante la optimización de los vehículos actuales. Esto es posible gracias a la optimización de los procesos termodinámicos en el motor o la reducción del tamaño del mismo, manteniendo las mismas prestaciones. Debido a su papel fundamental en este tipo de medidas, el uso de la sobrealimentación en los motores ha crecido en los últimos años.

A su vez, resulta especialmente preocupante el aumento de los costes en el precio de los materiales, por lo que se debe prestar especial atención al aprovechamiento de toda la vida útil de los componentes. Por este motivo, la prevención de fallos y la mejora del comportamiento de los materiales es vital para llevar este objetivo a cabo. Además, la prevención de fallos resulta crítica en ciertos sectores, como el aeronáutico, sector en el que un fallo de un componente tan esencial como el sistema de sobrealimentación puede provocar la pérdida de prácticamente la totalidad de la potencia de la planta propulsiva.

En el siguiente Trabajo de Fin de Grado se ha realizado una revisión bibliográfica de la importancia de la sobrealimentación, las diferentes formas que tiene el sistema de integrarse en el vehículo, así como las partes principales que lo componen y los materiales con los que se fabrican. Además, se ha llevado a cabo una revisión de los principales mecanismos de fallo que se tienen en estos componentes, siendo los más importantes la fatiga y la fluencia. Se plantea a su vez una visión más práctica y aplicada a casos particulares de fallos, su causa y cómo se pueden prevenir.

Por último, se ha estudiado un caso particular en el que un turbogrupo dejó de funcionar al presentar una fractura en el rodete del compresor. Para hallar la causa de fallo, se le ha realizado una inspección visual, una caracterización microscópica y mecánica de la pieza y un estudio fractográfico, mediante el empleo de técnicas como Arquímedes, FESEM, EDX y microdurezas. Por último, se ha encontrado que la causa de la fractura es el impacto de un objeto extraño, y se plantean medidas para evitar que este tipo de fallos vuelva a suceder.

Palabras claves: fractura, álabe, turbogrupo, compresor, aluminio



## Resum

En els últims anys, la preocupació pel futur del planeta ha crescut exponencialment, motiu per el qual s'estan prenent infinitat de mesures per revertir la situació en tots els sectors. En particular, en el sector del transport, el principal repte que s'afronta és la reducció de gasos d'efecte hivernacle i contaminants dels vehicles, ja siga mitjançant l'ús de noves tecnologies com nous motors o combustibles, o mitjançant l'optimització dels vehicles actuals. Això és possible gràcies a l'optimització dels processos termodinàmics en el motor o la reducció de la seua grandària, mantenint les mateixes prestacions. A causa del seu paper fonamental en aquest tipus de mesures, l'ús de la sobrealimentació en els motors ha crescut en els últims anys.

De la mateixa manera, resulta especialment preocupant l'augment dels costos en el preu dels materials, pel que es deu prestar especial atenció a l'aprofitament de tota la vida útil dels components. Per aquest motiu, la prevenció de falles i la millora del comportament dels materials són vitals per a dur a terme aquest objectiu. A més, la prevenció de falles resulta crítica en certs sectors, com l'aeronàutic, sector en el qual un fall d'un component tan essencial com el sistema de sobrealimentació pot provocar la pèrdua de pràcticament tota la potència de la planta propulsora.

En el següent Treball de Fi de Grau s'ha realitzat una revisió bibliogràfica de la importància de la sobrealimentació, les diferents formes que té el sistema d'integrar-se en el vehicle, així com les parts principals que ho componen i els materials amb els quals es fabriquen. A més, s'ha dut a terme una revisió dels principals mecanismes de fall que es tenen en aquests components, sent els més importants la fatiga i la fluència. Es planteja al seu torn una visió més pràctica i aplicada a casos particulars de falls, la seua causa i com es poden previndre.

Finalment, s'ha estudiat un cas particular en el qual un turbogrup va deixar de funcionar en presentar una fractura en l'àlep del compressor. Per a trobar la causa del fall, se li ha realitzat una inspecció visual, una caracterització microscòpica i mecànica de la peça i un estudi fractogràfic, mitjançant l'ús de tècniques com Arquimedes, FESEM, EDX i microdureses. Finalment, s'ha trobat que la causa de la fractura és l'impacte d'un objecte estrany, i es plantegen mesures per a evitar que aquest tipus de fallades torne a succeir.

Paraules clau: fractura, àlep, turbogrup, compressor, alumini

## Abstract

In recent years, concern for the future of the planet has grown exponentially, leading to the implementation of countless measures to reverse the situation in all sectors. Particularly in the transportation sector, the main challenge being faced is the reduction of greenhouse gases and vehicle pollutants, either using new technologies, such as new engines or fuels, or through the optimization of existing vehicles. This is made possible by optimizing thermodynamic processes in the engine or reducing its size while maintaining the same performance. Due to its crucial role in such measures, the use of turbocharging in engines has increased in recent years.

At the same time, the rising costs of materials are a significant concern, making it essential to pay special attention to maximizing the lifespan of components. For this reason, preventing failures and improving material behaviour are vital to achieving this objective. Furthermore, failure prevention is critical in certain sectors, such as the aerospace industry, where a failure of an essential component like the turbocharging system can lead to a loss of nearly all propulsion power.

This Bachelor's thesis presents a literature review of the importance of turbocharging, the various ways the system can be integrated into the vehicle, the main components involved, and the materials used for their construction. Additionally, a review of the main failure mechanisms affecting these components has been conducted, with fatigue and creep being the most significant. Furthermore, a practical and applied perspective on specific failure cases, their causes, and prevention methods is discussed.

Lastly, a specific case study is conducted where a turbocharger stopped functioning due to a fracture in the impeller. To determine the cause of failure, a visual inspection, microstructural and mechanical characterization of the component, and fractographic study were conducted using techniques such as Archimedes' principle, FESEM, EDX and microhardness. Ultimately, it was found that the fracture was caused by the impact of a foreign object, and measures are proposed to prevent such failures from occurring again.

Keywords: fracture, impeller, turbocharger, compressor, aluminium



# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>7</b>
1.1. Motivación . . . . .	7
1.2. Objetivos . . . . .	9
<b>2. Marco teórico</b>	<b>11</b>
2.1. Justificación del uso de la sobrealimentación . . . . .	11
2.1.1. Importancia de la sobrealimentación en la aeronáutica . . . . .	12
2.2. Clasificación de los sistemas de sobrealimentación . . . . .	14
2.2.1. Método de accionamiento del compresor . . . . .	14
2.2.2. Tipo de compresor . . . . .	17
2.2.3. Configuración del sistema de sobrealimentación . . . . .	18
2.3. Partes de un turbogrupo y materiales . . . . .	20
2.3.1. Compresor . . . . .	21
2.3.2. Aleaciones de aluminio y su importancia . . . . .	23
2.3.2.1. Aleaciones de colada . . . . .	24
2.3.2.2. Aleaciones de forja . . . . .	26
2.3.2.3. Tratamiento térmico y endurecimiento . . . . .	28
<b>3. Fallos habituales en turbogrupos</b>	<b>33</b>
3.1. Mecanismos de fallo en materiales . . . . .	33
3.1.1. Fatiga . . . . .	33
3.1.2. Fluencia . . . . .	39
3.2. Síntomas, causas y prevención de los principales fallos . . . . .	42
3.2.1. Lubricación inadecuada . . . . .	42
3.2.2. Aceite contaminado . . . . .	44
3.2.3. Excesiva velocidad de rotación . . . . .	45
3.2.4. Daño por objetos extraños . . . . .	45
3.2.5. Fallo por bombeo . . . . .	46
<b>4. Caso práctico</b>	<b>49</b>
4.1. Pieza a examinar y problemas que presenta . . . . .	49
4.1.1. Hipótesis sobre causa de fallo . . . . .	51
4.2. Procedimiento experimental . . . . .	51

4.3. Análisis de la pieza . . . . .	53
4.3.1. Medida de la densidad del material del turbocompresor . . . . .	53
4.3.2. Análisis de la microestructura y composición del compresor . . . . .	55
4.3.3. Análisis de dureza del compresor . . . . .	61
4.4. Comprobación de la aleación del compresor . . . . .	64
4.4.1. Análisis de diferentes aleaciones de aluminio . . . . .	64
4.4.2. Determinación de la dureza de las probetas . . . . .	68
4.4.3. Comparación con los resultados del Punto 4.3 . . . . .	68
4.5. Análisis de la fractura del álabe . . . . .	69
4.5.1. Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) de la fractura	69
4.6. Mejoras a realizar y prevención de futuros fallos . . . . .	72
<b>5. Conclusiones</b>	<b>73</b>
5.1. Mejoras y trabajos futuros . . . . .	74
<b>6. Bibliografía</b>	<b>75</b>
<b>7. Pliego de condiciones</b>	<b>81</b>
7.1. Condiciones generales . . . . .	81
7.2. Condiciones particulares . . . . .	81
7.2.1. Condiciones técnicas . . . . .	81
7.2.1.1. Condiciones de los materiales . . . . .	81
7.2.1.2. Condiciones de ejecución . . . . .	82
7.2.1.3. Mantenimiento . . . . .	82
7.2.2. Condiciones facultativas . . . . .	82
7.2.3. Condiciones legales . . . . .	83
<b>8. Presupuesto</b>	<b>85</b>
8.1. Coste de equipos . . . . .	85
8.1.1. Amortización de los equipos . . . . .	85
8.2. Coste de la mano de obra . . . . .	86
8.3. Servicio técnicos . . . . .	87
8.4. Presupuesto completo . . . . .	88

## Índice de figuras

1.	ODS tratados en este trabajo [1]. . . . .	8
2.	Convair B-36 "Peacemaker"[3]. . . . .	13
3.	Intercooler instalado en un motor [5]. . . . .	14
4.	Ejemplo de compresor volumétrico que actúa como sobrealimentador [6]. . . . .	15
5.	Ejemplo de turbogrupo [7]. . . . .	15
6.	Ejemplo de sobrealimentador eléctrico [9]. . . . .	16
7.	Compresor volumétrico de tornillo [11]. . . . .	17
8.	Configuración single turbo [13]. . . . .	18
9.	Configuración twin turbo en aeronave [5]. . . . .	19
10.	Configuración twin scroll turbo [14]. . . . .	19
11.	Configuración VGT [17]. . . . .	20
12.	Conducto de entrada a compresor [21]. . . . .	21
13.	Rodete de compresor fabricado en aleación de aluminio [24]. . . . .	22
14.	Rodete de compresor hecho de material compuesto [25]. . . . .	22
15.	Difusor de un compresor de un turbogrupo [26]. . . . .	23
16.	Colector de un turbogrupo. . . . .	23
17.	Ejemplos de diferentes industrias en las que se usa aluminio [28]. . . . .	24
18.	Proceso de endurecimiento por precipitado [35]. . . . .	31
19.	Tabla de diferentes casos de ratio R [38]. . . . .	34
20.	Esquema de la fractura por fatiga [39]. . . . .	34
21.	Esquema de avance de grieta. . . . .	36
22.	Estrías de fatiga al microscopio. . . . .	36
23.	Marcas de playa apreciables en fractura. . . . .	37
24.	Diagrama S-N para diferentes aleaciones. . . . .	39
25.	Dependencia del alargamiento con la tensión y la temperatura [37]. . . . .	40
26.	Ejemplo de fluencia en álabe de turbina [42]. . . . .	40
27.	a) Alargamiento vs. tiempo y b) Tasa de alargamiento vs. alargamiento, ambos para ensayo de fluencia en laboratorio. . . . .	41
28.	Daño en compresor causado por impacto con carcasa [45]. . . . .	43
29.	Cambio de color en el eje debido a la fricción con el cojinete [45]. . . . .	43
30.	Daño en los álabes de la TGV [46]. . . . .	45
31.	Daño en compresor causado por impacto con objetos extraños [46]. . . . .	46

32.	Daños provocados en compresor axial causados por el fenómeno de bombeo [48]. . . . .	46
33.	Turbogruppo a examinar. . . . .	49
34.	a) Compresor montado en turbogruppo y b) Detalle de la fractura. . . . .	50
35.	a) Piezas tras desmontaje y b) Detalle de la TGV. . . . .	50
36.	Diagrama de flujo del procedimiento experimental del caso práctico. . . . .	52
37.	Diferentes elementos empleados en la medida de Arquímedes. . . . .	54
38.	a) Piezas obtenidas tras cortar el compresor y b) Parte del compresor de interés cortada y embutida. . . . .	55
39.	Desbastadora de laboratorio empleada. . . . .	55
40.	Pulidora del laboratorio empleada. . . . .	57
41.	Imagen del corte con microscopio. . . . .	57
42.	Equipo empleado en FESEM [52]. . . . .	58
43.	Microestructura del compresor. . . . .	59
44.	Mapa de composición de la Figura 43. . . . .	60
45.	Imagen en detalle de la microestructura del compresor. . . . .	60
46.	Mapa de composición de los principales elementos de la aleación de la Figura 45. . . . .	61
47.	Esquema de prueba de dureza Vickers [53]. . . . .	62
48.	Ejemplo de prueba de dureza Vickers. . . . .	62
49.	Microdurómetro empleado. . . . .	63
50.	a) Marcas de ensayo Vickers en uno de los álabes del rodete y b) Marca de ensayo Vickers en la parte central del rodete. . . . .	63
51.	Diferentes probetas de aluminio empleadas. . . . .	65
52.	Diferentes probetas de aluminio tras desbaste. . . . .	65
53.	Diferentes probetas de aluminio tras pulido. . . . .	66
54.	Aleación 2024 al a) 200x y b)400x. . . . .	66
55.	Aleación 2030 al a) 200x y b)400x. . . . .	66
56.	Aleación 5056 al a) 200x y b)400x. . . . .	67
57.	Aleación 6061 al a) 200x y b)400x. . . . .	67
58.	Aleación 6063 al a) 200x y b)400x. . . . .	67
59.	Aleación 7075 T6 al a) 200x y b)400x. . . . .	68
60.	Fractura completa obtenida mediante FESEM. . . . .	69
61.	Zona de impacto cerca del borde de salida. . . . .	70
62.	Granos de sepiolita mediante técnica FESEM. . . . .	70
63.	Puntos analizados mediante la técnica EDX. . . . .	71

---

64. Avance de grieta mediante técnica FESEM. . . . . 72



## Índice de tablas

1.	Aleaciones de aluminio de colada. . . . .	26
2.	Aleaciones de aluminio de forja. . . . .	27
3.	Tratamientos térmicos y sistema de designación para aleaciones de aluminio. . . . .	29
4.	Valores empleados en el cálculo de la densidad del compresor. . . . .	54
5.	Resultados de las pruebas de dureza realizadas al rodete. . . . .	64
6.	Valores obtenidos en las pruebas de dureza de las probetas. . . . .	68
7.	Coste unitario de los equipos. . . . .	85
8.	Coste total de los equipos utilizados. . . . .	86
9.	Coste unitario de la mano de obra. . . . .	87
10.	Coste total de la mano de obra. . . . .	87
11.	Coste unitario y total de los servicios técnicos. . . . .	88
12.	Coste total del Trabajo de Fin de Grado. . . . .	89

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

En los últimos años, la creciente preocupación por el futuro del planeta ha generado una mayor conciencia sobre la necesidad de tomar medidas concretas para revertir la situación en todos los sectores de la sociedad. Esta preocupación dio lugar a la conocida como Agenda 2030, la cual incluye a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), unos objetivos establecidos en 2015 por las Naciones Unidas con la intención de crear un futuro mejor y más sostenible para el planeta. Estos se componen de medidas y acciones a tomar con tal de satisfacer las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades [1].

Uno de los ámbitos más destacados en esta preocupación es el sector del transporte, el cual enfrenta el desafío primordial de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes de los vehículos. Para abordar este reto, se están explorando diversas soluciones, siendo una de estas la optimización de los vehículos y tecnologías actuales. Esta optimización implica la mejora de los procesos termodinámicos en el motor, así como la reducción del tamaño del mismo sin comprometer sus prestaciones. En este contexto, el uso de la sobrealimentación en los motores ha experimentado un crecimiento significativo, ya que desempeña un papel fundamental en el aumento de la eficiencia y la reducción de las emisiones contaminantes.

De la misma forma, el aumento de los costes en el precio de los materiales constituye una preocupación adicional en la industria. Por lo tanto, se hace necesario prestar una especial atención al aprovechamiento máximo de la vida útil de los componentes, con el fin de optimizar la eficiencia y minimizar los costes asociados con su mantenimiento y reemplazo. En este sentido, la prevención de fallos y la mejora del comportamiento de los materiales desempeñan un papel vital en la consecución de este objetivo.

En este contexto, los ODS relevantes incluyen el ODS 12 (Producción y consumo responsable) y el ODS 13 (Acción por el clima). En particular, el ODS 12 consiste en hacer el consumo y la producción sostenibles, y de desvincular el crecimiento económico de la degradación medioambiental, aumentar la eficiencia de recursos y promover estilos de vida sostenibles. En este trabajo, resulta especialmente importante la medida 12.5, la cual pretende reducir considerablemente la generación de desechos mediante actividades de prevención, reducción, reciclado y reutilización. De la misma forma, el ODS 13 pretende adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, e introducir esta preocupación como cuestión primordial en las políticas, estrategias y planes de países, empresas y sociedad civil.



Figura 1: ODS tratados en este trabajo [1].

En resumen, la motivación detrás de este Trabajo de Fin de Grado radica en la creciente preocupación por el futuro del planeta y la necesidad de reducir las emisiones contaminantes en el sector del transporte. El uso de la sobrealimentación en los motores se ha convertido en una estrategia clave para lograr este objetivo, pero también es crucial abordar los desafíos relacionados con los costes de los materiales y la optimización de la vida útil de los componentes. Mediante la revisión bibliográfica, el análisis de mecanismos de fallo y la propuesta de medidas preventivas, este trabajo se propone contribuir al avance en la comprensión y la solución de los fallos en los compresores de turbogrupos, promoviendo así un futuro más sostenible y eficiente en el sector del transporte.

## 1.2. Objetivos

El presente Trabajo de Fin de Grado tiene como primer objetivo una revisión bibliográfica de la importancia de la sobrealimentación, las diferentes formas que tiene el sistema de integrarse en el vehículo, así como las partes principales que lo componen y los materiales con los que se fabrican. Se tiene a su vez como objetivo realizar una revisión de los principales mecanismos de fallo que se tienen en estos componentes, y casos particulares de fallos, su causa y cómo se pueden prevenir. El tercer objetivo es encontrar la causa de fallo de un turbogrupo que dejó de funcionar al presentar una fractura en el rodete del compresor, mientras este se estaba ensayando.

Para alcanzar dichos objetivos, se ha dividido el trabajo en las siguientes etapas:

- Revisión bibliográfica sobre el uso de la sobrealimentación, la clasificación de estos sistemas y las partes habituales que los componen.
- Revisión de los mecanismos de fallo habituales en turbogrupos y fallos habituales en sus componentes.
- Caso de estudio:
  - Análisis de la pieza.
  - Comprobación de las hipótesis de composición mediante la comparación con otras aleaciones.
  - Inspección macroscópica y microscópica de la fractura.



## 2. Marco teórico

### 2.1. Justificación del uso de la sobrealimentación

En un motor de combustión interna alternativo, la potencia efectiva que este proporciona depende de los parámetros que se aprecian en la Ecuación 1:

$$N_e = PCI \eta_e \dot{m}_f = PCI \eta_e F \dot{m}_a \quad (1)$$

En esta, los términos que aparecen son:

- $N_e$ : potencia efectiva.
- $PCI$ : poder calorífico inferior.
- $\eta_e$ : rendimiento efectivo del motor.
- $\dot{m}_f$ : gasto másico de combustible.
- $F$ : dosado absoluto, el cual se define como  $\frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a}$ .

Si se asume que el combustible y el rendimiento efectivo es el mismo ( $PCI$  y  $\eta_e$  permanecen constante), y el dosado absoluto no va a cambiar a priori, se puede incrementar la potencia mediante un aumento del gasto másico ( $\dot{m}_a$ ) que admite el motor. Este, en el caso de ser un motor de 4 tiempos, depende de los parámetros que se aprecia en la Ecuación 2:

$$\dot{m}_a = \eta_v V_T \rho_a \frac{n}{2} \quad (2)$$

En este caso, los términos son:

- $\eta_v$ : rendimiento volumétrico.
- $V_T$ : volumen total, conocido también como cilindrada total del motor.
- $\rho_a$ : densidad del aire de admisión.
- $n$ : revoluciones a las que está operando el motor.

Para un rendimiento volumétrico, una cilindrada impuesta y el mismo régimen de giro, es decir, cuando el motor no cambia de tamaño ni de condiciones de operación, un aumento del gasto másico que estos trasiegan se consigue con un aumento de densidad.

Sin embargo, si lo que se pretende es mantener la misma potencia efectiva, los beneficios que se obtienen al aumentar la densidad del aire que entra en el motor puede cambiar notablemente. Si la

cilindrada no cambia, es decir, el motor tiene el mismo tamaño, un aumento de la densidad comportará un aumento del gasto másico, por lo que, para una misma potencia efectiva, el dosado disminuirá, y con ello, el gasto de combustible. Si por el contrario el gasto de combustible se mantiene constante, un aumento de la densidad comportará una disminución de la cilindrada del motor, haciendo que el motor sea de menor tamaño, con los beneficios que esto comporta. Por tanto, resulta evidente que un aumento de la densidad del aire que el motor admite trae consigo una serie de mejoras muy interesantes, ya sea reduciendo el tamaño del motor, el combustible consumido o aumentando la potencia que este desarrolla.

Dicho esto, la sobrealimentación de motores de combustión interna alternativos consiste en este aumento de la densidad del aire de admisión por medio de un aumento de la presión. Esta técnica es tan antigua como los propios motores de combustión interna alternativos o MCIA. Gottlieb Daimler en 1885 depositó una patente en la que advierte del beneficio de la compresión previa a la carga, mediante una bomba similar a la bomba de barrido de los motores de dos tiempos. También Rudolf Diesel consideró ya en 1896 los beneficios de la sobrealimentación en los motores que llevan su nombre y para ello instaló un compresor alternativo. A pesar de que el motor sobrealimentado consiguió aumentar la potencia respecto al motor de aspiración natural, se redujo el rendimiento térmico del motor. El impulsor de la sobrealimentación gracias a una turbina de escape fue el ingeniero de la empresa suiza Sulzer Brothers, Alfred Büchi. En 1905 propuso una patente de un motor sobrealimentado con un turbocompresor axial accionado con una turbina movida por los gases de escape. El motor, el compresor y la turbina estaban montados sobre el mismo eje. Más tarde el propio Büchi patentó el sistema de sobrealimentación con turbocompresor y turbina montados en un eje diferente al del motor [2].

### **2.1.1. Importancia de la sobrealimentación en la aeronáutica**

La aplicación de la sobrealimentación es especialmente importante en el campo aeronáutico. Como es de esperar, los motores alternativos que se instalaban en las aeronaves sufrían grandes pérdidas de potencia al aumentar la altitud, ya que la densidad se veía reducida enormemente, aproximadamente de un 40 % a 5 km de altitud y de un 67 % a 10 km. En un principio, esta disminución en la potencia se compensó con un aumento de la cilindrada del motor o con una mayor cantidad de motores instalados en la aeronave. Sin embargo, la sobrealimentación se extendió durante los años 30 del siglo pasado, debido a que no aumentaba considerablemente el peso de la aeronave, al contrario que el resto de medidas mencionadas. Para ilustrar la importancia de la sobrealimentación en este campo, en la Figura 2 se observa un B-36 Peacemaker, con 6 motores con 28 cilindros por motor debido a su gran tamaño. De no haber usado la sobrealimentación, la cantidad de cilindros que se tendrían que poner por motor

aumentaría a 90, más de 3 veces el número de cilindros que se tiene si se tiene sobrealimentación.

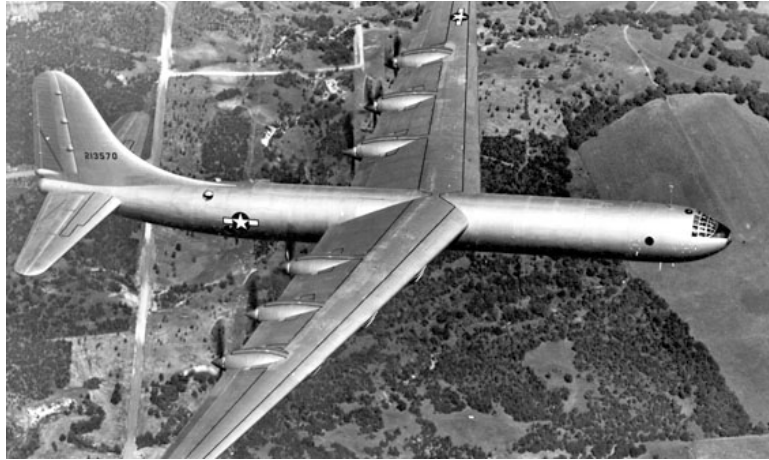


Figura 2: Convair B-36 "Peacemaker"[3].

Si se utiliza la sobrealimentación, se obtienen presiones similares a la atmosférica a nivel del mar, o incluso superiores, por lo que se reducen las pérdidas de potencia en altura. Cabe destacar también que esto comporta que, para tener presiones similares a la atmosférica una vez se ha ascendido, el sistema de sobrealimentación está sobredimensionado a nivel del mar. Esto implica adoptar varias medidas con la intención de que el motor no sufra daños al tener excesiva presión o temperatura, junto con un mayor requerimiento, en el cilindro a la hora de despegar. Esto se puede realizar gracias a un control de la cantidad de aire presurizado que entra al cilindro, ya que normalmente estos sistemas de sobrealimentación vienen con una válvula de alivio o *wastegate*, que evita que todo el aire a alta presión entre al cilindro, expulsándola fuera del mismo.

Sin embargo, la compresión del aire de admisión conduce a un aumento de la temperatura, debido a que este proceso no puede considerarse isoterma. Esto comporta un gran inconveniente: el aumento de la temperatura produce una disminución de la densidad, por lo que los beneficios que se pudieran obtener se ven drásticamente reducidos. Una manera de solucionar este problema, en algunos motores sobrealimentados, como el que se aprecia en la Figura 3, es usar un intercooler o intercambiador de calor, el cual refrigera el aire de sobrealimentación antes de entrar al motor. El uso del intercooler trae consigo otras mejoras, como una reducción de la carga térmica del motor y una disminución del riesgo de autoencendido en los motores que utilizan gasolina o de ciclo Otto, así como de las emisiones de óxidos de nitrógeno o NOx al estar trabajando a una menor temperatura si se compara con el caso en el que no se utiliza [4].



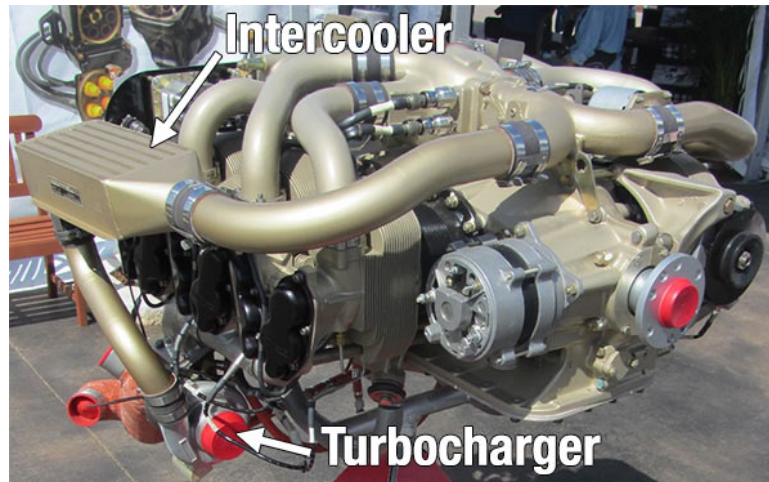


Figura 3: Intercooler instalado en un motor [5].

## 2.2. Clasificación de los sistemas de sobrealimentación

La clasificación de los sistemas de sobrealimentación puede realizarse según varios criterios, entre los que destacan:

- Método de accionamiento del compresor.
- Tipo de compresor.
- Configuración del sistema de sobrealimentación.

### 2.2.1. Método de accionamiento del compresor

La primera de estas clasificaciones es la que habitualmente se suele usar. Los principales tipos que se tienen son:

- **Sobrealimentación mecánica:** el compresor es movido por el propio motor gracias a un acoplamiento con el cigüeñal. Un posible ejemplo de este tipo de sistema se tiene en la Figura 4. Este sistema ganó popularidad durante la Segunda Guerra Mundial, debido a que eran más fáciles de fabricar y no se necesitaba de materiales exóticos en la zona de la turbina, lo que abarataba su coste. Sin embargo, al estar acoplado directamente con el cigüeñal, el consumo de combustible del vehículo aumentaba considerablemente. Este fue el motivo por el cual, a medida que el precio de los combustibles fósiles aumentaba, dejó de utilizarse tanto y se pasó a la turbosobrealimentación.

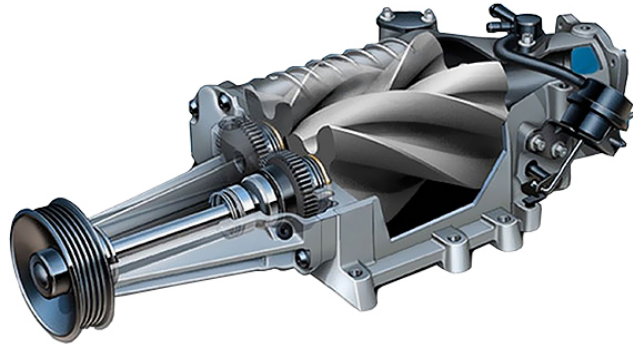


Figura 4: Ejemplo de compresor volumétrico que actúa como sobrealimentador [6].

- **Turbosobrealimentación:** el compresor es movido por una turbina que extrae energía de los gases de escape del motor. A este conjunto se le conoce como turbogrupo, y actualmente es la modalidad más extendida de sobrealimentación, debido a que recupera parte de la energía del escape, haciendo que el consumo no se vea enormemente afectado. Un ejemplo se tiene en la Figura 5.

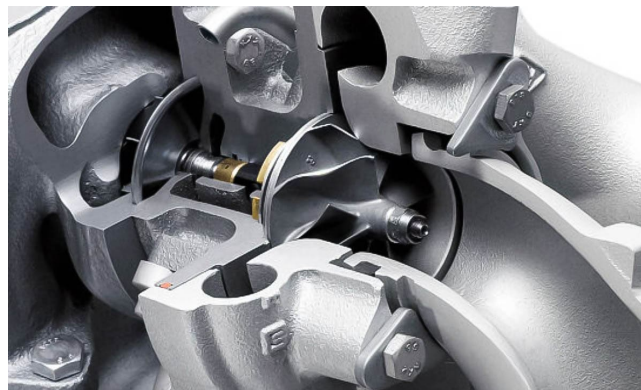


Figura 5: Ejemplo de turbogrupo [7].

- Sobrealimentación externa:** el compresor es movido por un motor distinto, como podría ser el caso de un motor eléctrico, apreciable en la Figura 6, los cuales están ganando bastante popularidad en los últimos años. En concreto, existe el concepto de turbosobrealimentador híbrido [8], en el cual no hay unión mecánica entre la turbina y el compresor. Esto se debe a que la turbina extrae energía de los gases de escape y esta se transforma y almacena en forma de energía eléctrica en una batería, mientras que el compresor utiliza esta energía para comprimir el aire. Esto permite que la turbina y el compresor giren a velocidades diferentes, lo que mitiga el problema del *turbolag*, ya que el compresor consigue aumentar el régimen de giro gracias a la batería.

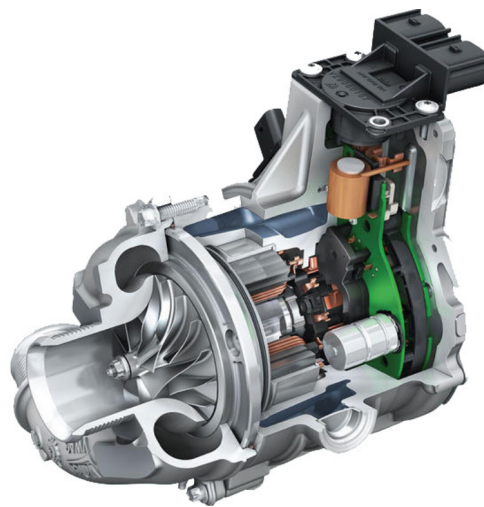


Figura 6: Ejemplo de sobrealimentador eléctrico [9].

Si se compara la sobrealimentación mecánica con la turbosobrealimentación, ya que ambos son los sistemas más utilizados y extendidos en la actualidad, se pueden apreciar ciertas diferencias o factores significativos. El rendimiento térmico en el caso de la turbosobrealimentación es más elevado que en el caso de la sobrealimentación mecánica, debido a que se recupera parte de la energía de los gases de escape como se ha comentado anteriormente. Sin embargo, tiene una desventaja muy importante: el acoplamiento entre compresor y motor alternativo, ya que el motor es una máquina de flujo pulsado, mientras que el turbogrupo es una máquina de flujo continuo. Además, durante las aceleraciones, se tiene un retraso conocido como *boost-lag* o *turbolag*. Esto se debe a que cuando se tiene el motor a bajas revoluciones, no hay suficiente gasto másico (presión) en el escape, por lo que el trabajo que la turbina puede extraer se ve limitado. Si se le demanda más potencia al motor, existirá un retraso desde que se presiona el acelerador hasta que se produce el aumento de gasto en el escape que permitirá extraer el trabajo a la turbina que necesita el compresor [10].

Este problema no se tiene cuando se utiliza sobrealimentación mecánica, ya que al tener un aco-

plamiento mecánico y no fluido-mecánico, al presionar el acelerador y aumentar las revoluciones, no existirá este retraso. Sin embargo, con los últimos avances que se han realizado en lo que respecta a los motores alternativos, tales como la inyección directa de gasolina, este tiempo de retraso se ha ido reduciendo significativamente. Dicho esto, este retraso sigue siendo un factor clave para los diferentes fabricantes de vehículos a la hora de elegir el sistema de sobrealimentación para los diferentes vehículos. Por ejemplo, algunos fabricantes optan por la turbosobrealimentación debido a su mejor eficiencia, como puede ser el caso de Mercedes-Benz y Mercedes-AMG. Esta compañía usó los sobrealimentadores mecánicos "Kompressor", en los vehículos C230K, C32 AMG, y S55 AMG, para pasar a los vehículos turbosobrealimentados, como es el caso de C250 y S65 AMG biturbo. Sin embargo, otros fabricantes, como ocurre con Audi y Jaguar, han optado por prescindir de la turbosobrealimentación en favor de la sobrealimentación mecánica, como se puede apreciar en los vehículos A6 de Audi y XF de Jaguar [8].

### 2.2.2. Tipo de compresor

Centrando ahora la atención en los dos criterios de clasificación restantes [2], una de las posibles opciones que se tiene son los compresores de desplazamiento positivo o volumétrico, los cuáles se suelen emplear en la sobrealimentación mecánica debido a que el régimen de giro óptimo del compresor es similar al del motor. Este tipo de compresores suelen ser rotativos, como el que se aprecia en la Figura 7, ya que para los motores en los que va instalado, los caudales y las presiones son relativamente bajas. Este tipo de compresores tiene además la característica de bajo nivel de ruido y vibraciones.

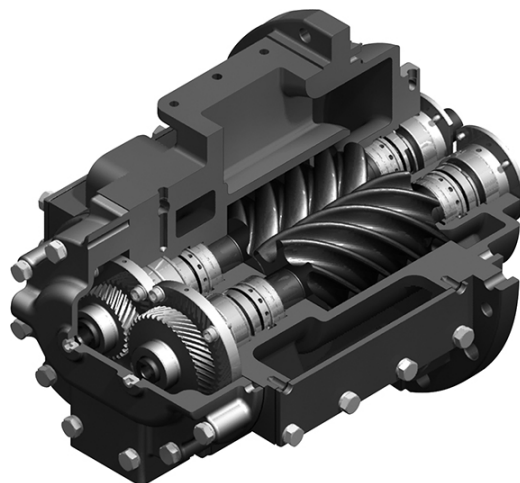


Figura 7: Compresor volumétrico de tornillo [11].

Otra posibilidad es la de turbocompresores, que se suelen utilizar cuando se está turbosobrealimentando, debido que estos suelen girar a velocidades mucho mayores si se compara con el régimen de giro del motor. Dentro de este tipo de compresores, se tienen compresores axiales, radiales o de flujo

según la dirección del flujo respecto al eje de giro. Al tratarse de máquinas de flujo continuo, este tipo de compresores logra aumentar la presión aportando energía cinética a la entrada del compresor, para posteriormente frenarlo y transformar esta energía aportada en entalpía.

### 2.2.3. Configuración del sistema de sobrealimentación

En función de la configuración del sistema de sobrealimentación, se distingue [12]:

- **Single-Turbo:** las principales ventajas que ofrece este tipo de configuración es su simplicidad, así como la facilidad de instalación en los motores. Sin embargo, tienen un rango de RPM óptimo bastante limitado, así como un mayor *turbolag* si se compara con otras configuraciones. En la Figura 8 se puede observar un ejemplo de este tipo de configuración.



Figura 8: Configuración single turbo [13].

- **Twin-Turbo:** en este caso, se usan 2 turbogrupos. Este tipo de configuración se suele utilizar cuando el motor tiene configuración en V (V6, V8), ya que de esta forma el motor queda simétrico y cada uno de los turbos se encarga de la mitad de los cilindros. Sin embargo, esta configuración no es la única, ya que podrían emplearse dos turbos diferentes (uno para bajas RPM y otro para altas RPM). Con esto conseguimos que el rango óptimo de RPM aumente considerablemente. Las desventajas principales que se presentan son el coste y la complejidad del sistema, si se compara con las siguientes tecnologías. Este tipo de configuración es bastante empleado en la aeronáutica, como se aprecia en la Figura 9, ya que se pueden obtener mayores presiones si se tiene la mitad de cilindros por turbogrupo. Además, resulta interesante el uso de esta configuración ya que un turbogrupo puede estar trabajando cuando la altitud es baja (y la densidad no ha caído considerablemente), mientras que el otro turbogrupo se utiliza cuando se está en altura.

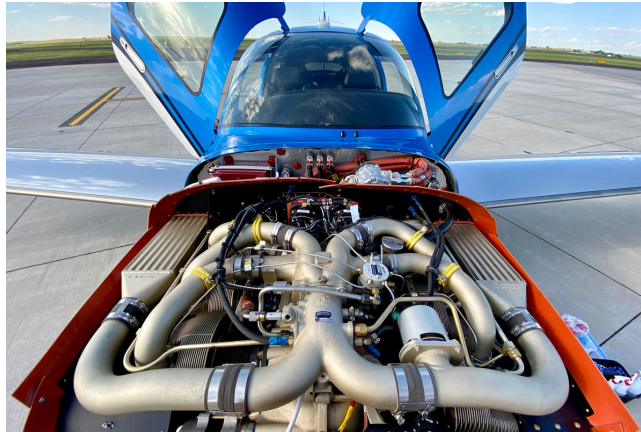


Figura 9: Configuración twin turbo en aeronave [5].

- Twin-Scroll Turbo:** en este caso, la salida del compresor se divide en 2 secciones, como se observa en la Figura 10, las cuales alimentarán a la mitad de los cilindros asociados a ese turbogrupo [4]. Esto resulta beneficioso puesto que se reduce la interacción entre la entrada de aire de un cilindro y el escape de otro, debido a la superposición de válvulas que pueda haber. De esta manera, se reduce la interacción entre los gases de escape y el aire de admisión y se mejorando la eficiencia en lo que a llenado de aire de cilindro se refiere. Sin embargo, la desventaja principal que se tiene es que se debe de mejorar el diseño en cuando a disposición de conductos, ya sean de admisión o escape, así como la complejidad que esto comporta.

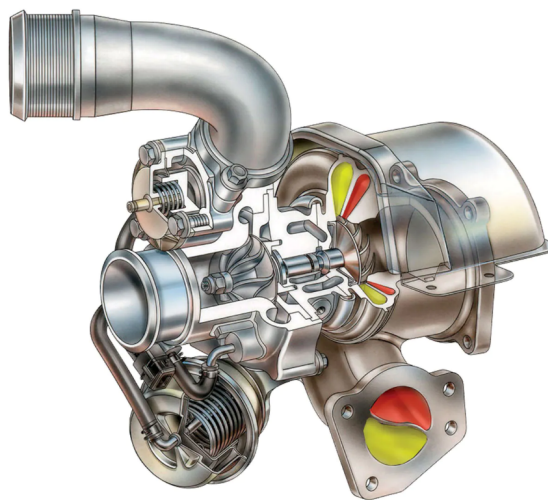


Figura 10: Configuración twin scroll turbo [14].

- Variable Geometry Turbo:** en los turbogrupos con turbina con geometría variable (TGV), como el que se observa en la Figura 11, los álabes de entrada de entrada a la turbina pueden moverse y cambiar la sección por la que circularan los gases [15]. Este cambio de sección permite acelerar los gases de escape en el momento de entrar a la turbina, por lo que la turbina puede

extraer más trabajo de los gases de escape, permitiendo que el turbogrupo trabaje en un rango similar de RPM a pesar de que el motor esté funcionando a bajas revoluciones. Además, esta configuración mejora la eficiencia del motor sin que aparezca el *turbolag* con tanta frecuencia [8]. El principal inconveniente de esta configuración es el coste de fabricación, ya que los materiales con los que se fabrican los álabes de la entrada a turbina tienen un alto coste debido a las temperaturas que deben soportar [16].



Figura 11: Configuración VGT [17].

### 2.3. Partes de un turbogrupo y materiales

Centrando la atención en las diferentes partes que tienen los turbogrupos [18], estas se pueden clasificar en 3 grupos:

- **Turbina:** Esta parte del turbogrupo extrae la energía de los gases de escape en trabajo útil, el cual será utilizado por el compresor para conseguir el aumento de densidad en el aire de admisión. Debido a esto, esta parte del turbogrupo debe soportar altas temperaturas y sollicitaciones, por los que los materiales empleados son diferentes a los que se utilizan en la parte del compresor [19]. Suele estar fabricada en super-aleaciones base Níquel [20], en concreto se suele usar con bastante frecuencia la aleación Incoel 713C, en conjunto con recubrimientos cerámicos, lo que permite trabajar con mayores temperaturas.
- **Compresor:** las diferentes partes y materiales se comentarán en el Punto 2.3.1.
- **Carcasa:** en función de si se trata de la carcasa de la turbina o la del compresor, los materiales varían enormemente. En el caso de la turbina, las temperaturas que se deben soportar son mucho mayores, además de ser resistentes a ambientes corrosivos y a fatiga térmica, por lo que se suele

emplear hierros forjados, en el caso de motores Diesel donde se tienen temperaturas menores en los gases de escape, o aceros forjados, en el caso de motores gasolina donde estas temperaturas de escape son mucho mayores [20]. En el caso de la carcasa de la zona del compresor, en esta no se tiene que soportar altas temperaturas, por lo que suelen estar fabricadas principalmente con materiales plásticos o aleaciones de aluminio, aunque en los últimos años se emplean otros materiales como materiales compuestos.

### 2.3.1. Compresor

En este caso, una parte del texto se ha dedicado a las diferentes partes que conforman un compresor, puesto que el caso práctico que se verá en el Punto 4 se centrará en esta parte del turbogrupo.

Las partes principales de un compresor de un turbogrupo son:

- **Entrada:** la entrada de aire al compresor suele ser un simple conducto, como el que se observa en la Figura 12, aunque pueden incluirse otros mecanismos como álabes guía, los cuales ayudan a generar un movimiento giratorio en el flujo con el fin de que se adapte mejor al rodete del compresor, o instrumentación como sensores de presión y temperatura para el control del turbogrupo.



Figura 12: Conducto de entrada a compresor [21].

- **Rodete:** el componente principal de esta parte del turbogrupo, ya que se encarga de transferir el trabajo útil que viene dado por la turbina al aire de entrada. Esto se debe a que el rodete aumenta la energía del gas gracias a la energía cinética que el compresor transfiere al mismo debido a su movimiento giratorio. Debido a que no debe soportar altas temperaturas y a su baja densidad si se compara con otros metales, normalmente suele estar fabricado en aleaciones de aluminio [22] en el caso de motores de pequeño tamaño o aceros si son de mayor tamaño [23], como ocurre el caso de la Figura 34, donde se pueden observar también las diferentes partes que lo componen.





Figura 13: Rodete de compresor fabricado en aleación de aluminio [24].

Sin embargo, se está planteando el uso de materiales compuestos, como el caso de la Figura 14 [25], el cuál se trata de un rodete fabricado con fibra de carbono y aglutinante de ftalonitrilo, el cual tiene excelentes propiedades mecánicas y bajo peso. Adicionalmente, permitiría también mitigar los efectos del *turbolag* al tener menos inercia si se compara con los rodetes fabricados en aleaciones. Sin embargo, cabe destacar que podrían degradarse de una forma más rápida, debido a que las matrices suelen ser poliméricas.

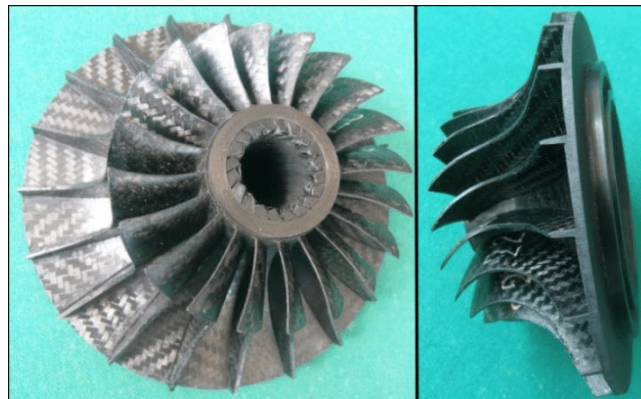


Figura 14: Rodete de compresor hecho de material compuesto [25].

- **Difusor:** otro de los componentes principales de los compresores, ya que el difusor tiene el papel de transformar la energía cinética que el rotor ha transferido al gas en un aumento de presión y temperatura. Observando la Figura 15, se puede ver que los álabes forman entre sí conductos divergente, lo que significa que el fluido reduce su velocidad, haciendo que el gas vea su presión y temperatura aumentadas.



Figura 15: Difusor de un compresor de un turbogrupo [26].

- **Colector:** la función principal del colector es reunir el aire comprimido por el difusor y trasladarlo a los conductos que lo llevarán al pistón. Este puede tomar muchas formas, aunque en turbogrupos la más habitual es la espiral, como se aprecia en la Figura 16.



Figura 16: Colector de un turbogrupo.

### 2.3.2. Aleaciones de aluminio y su importancia

Debido a su importancia y su uso extendido en la fabricación de varios componentes del compresor de los turbogrupos, es importante hacer un repaso en las diferentes familias de aluminio, así como en su tratamiento térmico en aquellas en las que se puede realizar. Las aleaciones de aluminio son una de las familias de materiales más importantes, versátiles y económicas en una gran variedad de ámbitos, debido principalmente a su baja densidad (aproximadamente una tercera parte del acero), y la gran resistencia de algunas aleaciones. Como se puede apreciar en la Figura 17, el uso de este tipo de metales en industrias tan variadas como la energética, la automovilística, la de construcción y la alimenticia resulta evidente. Además, y por los motivos ya mencionados, en la industria aeroespacial este tipo de material se lleva usando durante muchos años, como ocurre en aeronaves como el 747, 757 y 767, donde el 80 % de la aeronave estaba fabricada con ellas [27].

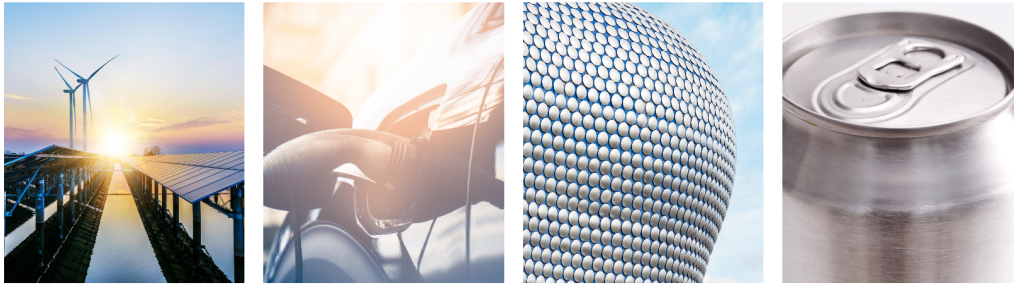


Figura 17: Ejemplos de diferentes industrias en las que se usa aluminio [28].

Además, las aleaciones de aluminio son especialmente interesantes debido a que resisten de forma pasiva la oxidación que sufren otros metales, como el acero, debido a que el oxígeno del aire se combina con el aluminio para crear una capa extremadamente delgada de óxido de aluminio. Esta capa, prácticamente invisible al ojo humano y que no cambia la coloración de la pieza, se queda completamente adherida, evitando así que el proceso de oxidación avance por todo el material [29]. Dicho esto, las aleaciones de aluminio resultan muy útiles en ambientes altamente corrosivos, como ambientes marinos o en depósitos de sustancias tales como combustibles, si se utilizan los aleantes correspondientes. Otro de los atractivos más importantes de las aleaciones de aluminio es su maquinabilidad, es decir, la facilidad con la que se puede trabajar y obtener formas complejas con ellas. Por lo que, este material se puede trabajar con prácticamente cualquier método (extrusión, colada, moldeo, forjado...)[30].

Dicho esto, dentro las aleaciones de aluminio se encuentran dos grandes grupos de aleaciones: aleaciones de forja y aleaciones de colada. La principal diferencia es que aleaciones de colada presentan más de 20-23 % de contenidos de aleantes en su composición, mientras que las aleaciones de forja tienen menos de un 3-5 %. Aunque parezca una diferencia menor, en las aleaciones de colada, al tener una mayor cantidad de aleantes, se pierde ductilidad, haciendo que sea el material se vuelve frágil. Por otro lado, las aleaciones de forja son más dúctiles, presentan mejores resistencias a corrosión, mejor conducción tanto térmica como eléctrica, y mejor resistencia. Por este motivo, estas aleaciones se suelen utilizar para aplicaciones donde se necesite extrudir o deformar el material a la hora de fabricar la pieza.[31]

### 2.3.2.1 Aleaciones de colada

Las aleaciones de forja se identifican con 4 números, con un separador decimal entre el tercer y cuarto dígito. Esto se debe a que los tres primeros dígitos indican los aleantes presentes en la aleación, mientras que el cuarto hace referencia a la forma de la pieza. Las diferentes familias que se tienen son [31]:

- **1xx.x**: se trata prácticamente de aluminio puro, por lo que presentan excelente resistencia a la

corrosión, buen mecanizado y buena soldabilidad. Se emplea normalmente para hacer hojas con filo o para contener materiales extremadamente corrosivos.

- **2xx.x**: el aleante principal es el cobre, aunque pueden presentar magnesio, manganeso o cromo. Son tratables térmicamente, por lo que consiguen la mejor resistencia entre el resto de las aleaciones de colada, especialmente a mayores temperaturas.
- **3xx.x**: los aleantes principales son silicio, cobre y magnesio, pudiendo tener también Ni o Be si es necesario. También son tratables térmicamente, tienen excelentes propiedades mecánicas y tenacidad a fractura, además se ser mecanizable.
- **4xx.x**: únicamente tienen silicio como aleante. Son tratables térmicamente, además de muy buena colabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión.
- **5xx.x**: el aleantes principal es el magnesio, y no son tratables térmicamente. Una vez son anodizadas, presentan un acabado superficial excelente, además de una gran resistencia a la corrosión.
- **7xx.x**: se tratan de aleaciones tratables térmicamente en las que el cinc es el principal aleante. La colabilidad de la aleación es baja, aunque tienen buena resistencia a la corrosión, estabilidad dimensional y maquinabilidad.
- **8xx.x**: son aleaciones tratables térmicamente en las que se pueden encontrar grandes cantidades de estaño, y cobre y níquel en menor proporción. Presentan poca resistencia, lo que hace que deriva en una maquinabilidad excelente.

A modo de resumen, se presenta en la Tabla 1 las diferentes familias de aleaciones de colada:

Tabla 1: Aleaciones de aluminio de colada.

Serie	Aleantes principales	Tratable térmicamente
1xx.x	No aleantes	No
2xx.x	Cu	Sí
3xx.x	Si, Mg, Cu	Sí
4xx.x	Si	Sí
5xx.x	Mg	No
7xx.x	Zn	Sí
8xx.x	Sn, Cu, Ni	Sí

### 2.3.2.2 Aleaciones de forja

Las aleaciones de forja también usan 4 dígitos para ser designadas, aunque en este caso no hay un separador decimal entre ellos. En este caso, el primer dígito indica el elemento de aleación principal o un grupo de elementos presentes en la aleación; el segundo indica modificaciones o variaciones en la composición de la aleación dentro de la clasificación general definida por el primer dígito, proporcionando así una diferenciación y refinamiento adicionales dentro de la serie de aleaciones; y el tercer y cuarto dígito no tienen un significado específico y se utilizan con fines de identificación para distinguir entre diferentes aleaciones en la misma serie [32]. Las principales familias que se tienen son [31]:

- **1xxx:** no se trata de aleaciones, ya que se componen al 99 % de aluminio. Tienen su uso en aplicaciones químicas y eléctricas, ya que son resistentes a la corrosión y es fácil de trabajar con ellos, debido a que son maleables. Se trata de un material no tratable térmicamente y fácilmente soldable mediante la mayoría de los métodos actuales.
- **2xxx:** el aleante principal es el cobre, aunque pueden tener magnesio en pequeñas cantidades. Una vez tratado térmicamente, presenta excelente resistencia, aunque debido a la presencia del cobre son propensos a corroerse.
- **3xxx:** el manganeso es el principal aleantes, lo que proporciona gran resistencia a la corrosión, estabilidad dimensional y capacidad de ser usado a altas temperaturas.
- **4xxx:** tienen al silicio como aleante principal, lo que reduce el punto de fusión sin sacrificar

ductilidad. Son empleados habitualmente como nexos de unión de diferentes tipos de aluminio. Puede tratarse térmicamente hasta cierto punto, pero en general no se suele llevar a cabo.

- **5xxx:** el principal aleante es el magnesio, teniendo pequeñas trazas de manganeso en algunas aleaciones. No son tratables térmicamente, tienen buena soldabilidad y excelente resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes marinos.
- **6xxx:** se usa magnesio y silicio como aleantes principales. El tratamiento térmico mejora su resistencia, y aunque no son tan robustos como los aluminio de las series 2xxx y 7xxx, presentan buena ductilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a la corrosión.
- **7xxx:** el cinc es el aleante principal de esta familia de aleaciones. Debido a esto, estos materiales tienen reducida fiabilidad y maquinabilidad, pero presenta unas propiedades mecánicas sublimes, sobrepasando en algunas ocasiones a algunos aceros.
- **8xxx:** presentan aleantes de todo tipo, los que permiten aumentar la temperatura de trabajo, reducir la densidad de la aleación, entre muchos otros ejemplos.

A modo de resumen, se presenta en la Tabla 2 las diferentes familias de aleaciones de colada:

Tabla 2: Aleaciones de aluminio de forja.

<b>Serie</b>	<b>Aleantes principales</b>	<b>Tratable térmicamente</b>
1xxx	99 % Al	No
2xxx	Cu	Sí
3xxx	Mn	No
4xxx	Si	Depende de la aleación
5xxx	Mg	No
6xxx	Mg, Si	Sí
7xxx	Zn	Sí
8xxx	Otros	Limitada

### **2.3.2.3 Tratamiento térmico y endurecimiento**

A fin de mejorar las propiedades mecánicas de las aleaciones de aluminio, se suelen aplicar dos procesos: endurecimiento por deformación y tratamientos térmicos. Un desglose completo de estos procesos se tiene en la Tabla 3:

Tabla 3: Tratamientos térmicos y sistema de designación para aleaciones de aluminio.

<i>Sufijo</i>	<i>Tratamiento y/o condición</i>		
F	Tal como se ha fabricado		
O	Recocido (aleaciones de forja únicamente)		
H	Endurecido por deformación	2do dígito	Dureza
H1	Endurecido por deformación	2	1/4 duro
H2	Endurecido por deformación y parcialmente recocido	4	1/2 duro
H3	Endurecido por deformación y estabilizado	6	3/4 duro
		8	Duro
		9	Extra duro
T	Tratado térmicamente hasta condición estable, excluyendo recocido (O)		
T1	Enfriado desde temperatura elevada de formación, seguido de un envejecimiento natural		
T2	Enfriado desde temperatura elevada de formación, trabajado en frío y envejecido naturalmente		
T3	Tratado térmicamente, templado, trabajado en frío y envejecido naturalmente		
T4	Tratado térmicamente, templado y envejecido naturalmente		
T5	Enfriado rápidamente desde temperatura elevada de formación y envejecido artificialmente		
T6	Tratado térmicamente, templado, trabajado en frío y envejecido artificialmente		
T7	Tratado térmicamente, templado y sobre-envejecido		
T8	Tratado térmicamente, templado, trabajado en frío y envejecido artificialmente		
T9	Tratado térmicamente, templado, envejecido artificialmente y trabajado en frío		
T10	Enfriado desde temperatura elevada de formación, trabajado en frío y envejecido artificialmente		
W	Templado no estable aplicado a aleaciones que envejecen espontáneamente a temperatura ambiente		



Los tratamientos térmicos en las aleaciones de aluminio pueden influir en propiedades como la resistencia, la ductilidad, la tenacidad a fractura, los esfuerzos internos del material y la resistencia a corrosión, entre otros. Los principales tratamientos que se le suelen aplicar a este tipo de aleaciones son:

- **Homogeneización:** el objetivo de la homogeneización es mejorar la capacidad de trabajar con el metal y sus propiedades mecánicas. Esto se consigue gracias a la disolución de los componentes que no se encuentran en equilibrio dentro de la microestructura, evitando así la presencia de compuestos frágiles y permitiendo una estructura homogénea en toda la pieza. Esto se consigue llevando la pieza a una temperatura comprendida entre la línea de solvus y la solidus, siendo en el caso del aluminio entre 450-600 °C. Normalmente, se suele realizar en todas las aleaciones de forja, ya sean o no tratables térmicamente, ya que mejora la distribución de aleantes y otros constituyentes en toda la microestructura [33].
- **Recocido:** se trata de un tratamiento térmico en el que la aleación se calienta a una temperatura específica, llamada temperatura de recocido (en el caso del aluminio, entre 250-450 °C) durante cierto tiempo. Posteriormente, se realiza un enfriamiento de forma controlada, lo que permite ablandar la aleación debido a una recristalización de la microestructura. Esto se aplica a diferentes aleaciones con la intención de hacer que trabajar con ellas sea más fácil. Suele aplicarse a piezas que han sido endurecidas por deformación, eliminando de esta forma las tensiones internas que pudieran quedar tras el endurecimiento.
- **Endurecimiento por precipitados:** consiste en la formación de precipitados de forma homogénea por toda la red cristalina, de forma que el movimiento de las dislocaciones queda limitado, endureciendo así la aleación. Consta de 3 fases [34]: la solubilización, el temple y el envejecimiento. Comenzando por la solubilización, a partir de la microestructura en equilibrio, se calienta la aleación a suficiente temperatura durante el tiempo necesario para producir una solución sólida sobresaturada, evitando que se formen fases distintas. En este punto, se le aplica un tratamiento de temple, con el objetivo de preservar la solución sólida sobresaturada a temperatura ambiente. Esto se consigue enfriando de forma brusca, no dando lugar al proceso de formación de fases, por lo que los aleantes quedan encerrados en las vacantes de la propia microestructura. Finalmente, se aplica un envejecimiento o maduración, el cual consiste en la formación de precipitados de forma homogénea por toda la microestructura, lo que aumenta notablemente la resistencia a tracción, el límite elástico o la estabilidad dimensional, entre otros. Este proceso tiene dos variantes: el envejecimiento natural, el cual ocurre a temperatura ambiente; y el envejecimiento artificial, el cual se consigue a temperaturas más elevadas, usualmente entre los 100-200 °C. El proceso completo de endurecimiento por precipitado puede apreciarse en la Figura 18:

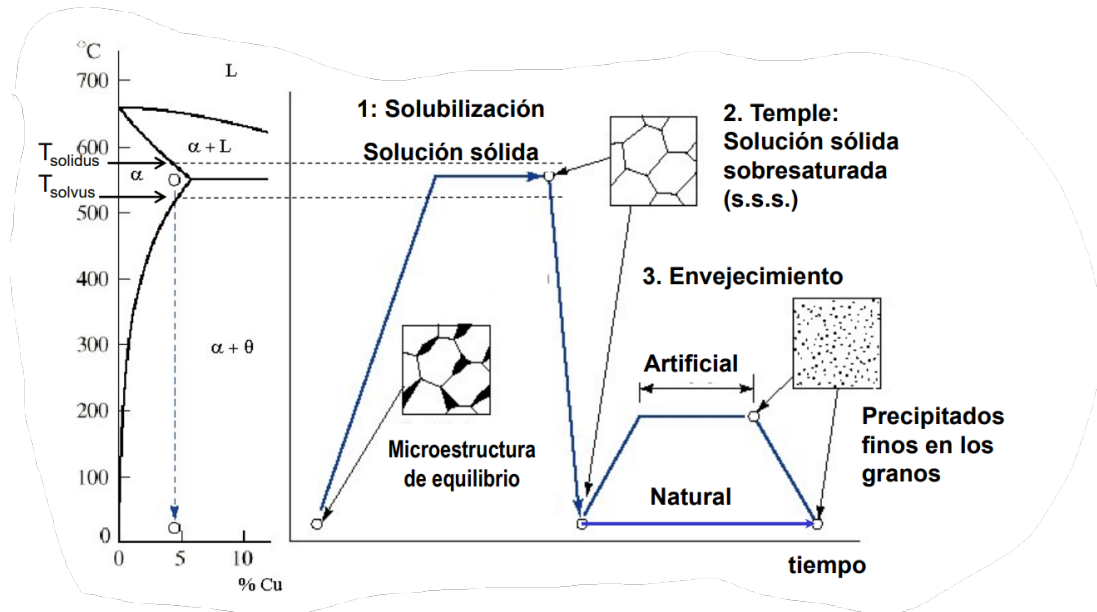


Figura 18: Proceso de endurecimiento por precipitado [35].



### 3. Fallos habituales en turbogrupos

#### 3.1. Mecanismos de fallo en materiales

En primer lugar, resulta interesante hacer un repaso sobre varios conceptos de ciencia de materiales y fracturas antes de comenzar con los principales fallos que se tienen en los turbogrupos. Para comenzar, se deben comentar los principales mecanismos por los cuales este tipo de elementos dejan de funcionar, pierden eficacia o fracturan. En particular, destacan la fatiga y la fluencia.

##### 3.1.1. Fatiga

En cuanto al primero de estos mecanismos, la fatiga es un proceso irreversible que ocurre cuando se somete a un material a un proceso cíclico de esfuerzos [36]. Estos esfuerzos suelen ser inferiores a la tensión máxima que soporta el material, incluso a veces inferiores al límite elástico. Además, las cargas cíclicas pueden ocurrir de diferentes formas, ya sea en cambios en la propia fuerza (aumento de velocidad de rotación provoca un aumento en la fuerza centrífuga que soporta el material) o cambios en las tensiones (aumento y descenso de la temperatura de trabajo).

Dicho, según el sentido de la tensión, se pueden determinar varios regímenes: por ejemplo, si cambia constantemente de tensión a compresión, se conoce como ciclo alterno; o si las tensiones son únicamente a compresión o a tensión, y lo que cambia es la amplitud y la frecuencia de estas, se conoce como tensiones pulsantes. Para caracterizar estos comportamientos, se hace necesario definir un parámetro adicional, llamado el ratio de tensiones, o simplemente llamado ratio R. Este se define de en la Ecuación 3:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3)$$

Con todo esto, y en función de las cargas que se tienen, se presenta en la Figura 19 los casos más importantes de cargas cíclicas y el valor de R asociado a las mismas. En esta tabla, también se ha definido  $\sigma_m$ , la cual viene dada por  $\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$  [37].

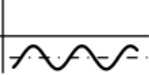
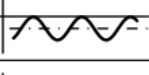
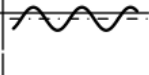
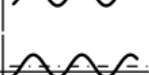
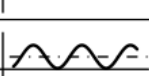
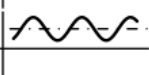
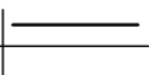

pulsating in compression	$\sigma > 0$ $\sigma < 0$		$\sigma_{\max} < 0$	$R > 1$
zero-to-compression	$\sigma > 0$ $\sigma < 0$		$\sigma_{\max} = 0$	$R = -\infty$
reversed	$\sigma > 0$ $\sigma < 0$		$\sigma_m < 0$	$-\infty < R < -1$
fully reversed	$\sigma > 0$ $\sigma < 0$		$\sigma_m = 0$	$R = -1$
reversed	$\sigma > 0$ $\sigma < 0$		$\sigma_m > 0$	$-1 < R < 0$
zero-to-tension	$\sigma > 0$ $\sigma < 0$		$\sigma_{\min} = 0$	$R = 0$
pulsating in tension	$\sigma > 0$ $\sigma < 0$		$\sigma_{\min} > 0$	$0 < R < 1$
static	$\sigma > 0$ $\sigma < 0$		$\sigma_{\min} = \sigma_{\max}$	$R = 1$

Figura 19: Tabla de diferentes casos de ratio R [38].

En el caso de los metales que han sufrido fatiga, la zona de la fractura tiene una apariencia muy característica. En la mayoría de casos, se puede apreciar 2 zonas: una zona con apariencia suave, y otra zona con fractura rugosa fruto de la fractura, como se observa en la Figura 20. Esto se debe a las diferentes fases que componen el proceso de fallo por fatiga, las cuales se discutirán a continuación.

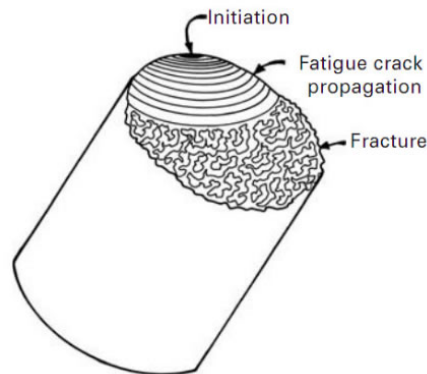


Figura 20: Esquema de la fractura por fatiga [39].

Las diferentes fases que se tienen en la fractura por fatiga son las siguientes [38]:

- Iniciación de la grieta:** en el caso de suponer un material perfecto, las grietas iniciales se forman por deformaciones plásticas locales, que generan dislocaciones sobre planos de deslizamiento, formando intrusiones y extrusiones superficiales [40]. Una vez creadas, las discontinuidades geométricas actúan como concentradores de tensiones, que provocan una grieta y daño inicial casi

imposible de detectar. También podrían estar causadas por otros factores, como defectos en el material, pequeñas marcas causadas en la fabricación de la pieza o el propio diseño de la misma, al no considerar comportamiento ideal. Estos defectos son insignificantes bajo cargas estáticas porque son menores que el tamaño crítico de grieta. Sin embargo, para cargas cíclicas, estos pequeños defectos pueden ser la causa de inicio de grieta, por lo que la resistencia a fatiga es un factor mucho más crítico.

La iniciación y creación de la grieta es uno de los procesos que más tiempo necesita, lo que se traduce en un mayor número de ciclos, en especial en piezas con baja rugosidad que trabajan con tensiones muy inferiores al límite elástico. Además, cuanto mayor es la resistencia a la deformación plástica del material, más resistencia presenta frente al inicio de grieta. Esto se debe a que el movimiento de dislocaciones en este caso es bajo, lo que provoca que el componente esté trabajando en esta fase de la fractura por fatiga durante una gran cantidad de ciclos. Además, si la superficie de la pieza es endurecida por algún método, el movimiento de dislocaciones se ve reducido de mayor manera, haciendo que la vida a fatiga del componente aumente considerablemente. Esto resulta útil únicamente cuando la grieta comienza en la superficie del componente, ya que puede darse el caso de que inicie en el interior debido a algún defecto interno.

- **Propagación de la grieta:** como se observa en la Figura 21, debido a la concentración de tensiones que se tiene en la punta de la grieta al aplicar tensiones, se forma una zona plástica, provocando que la grieta se abra y avance. Cuando se dejan de aplicar tensiones, la grieta se cierra, pero debido a la deformación plástica que ha ocurrido con anterioridad en la punta de la grieta y a las tensiones residuales que se han formado, la grieta se cierra de nuevo.

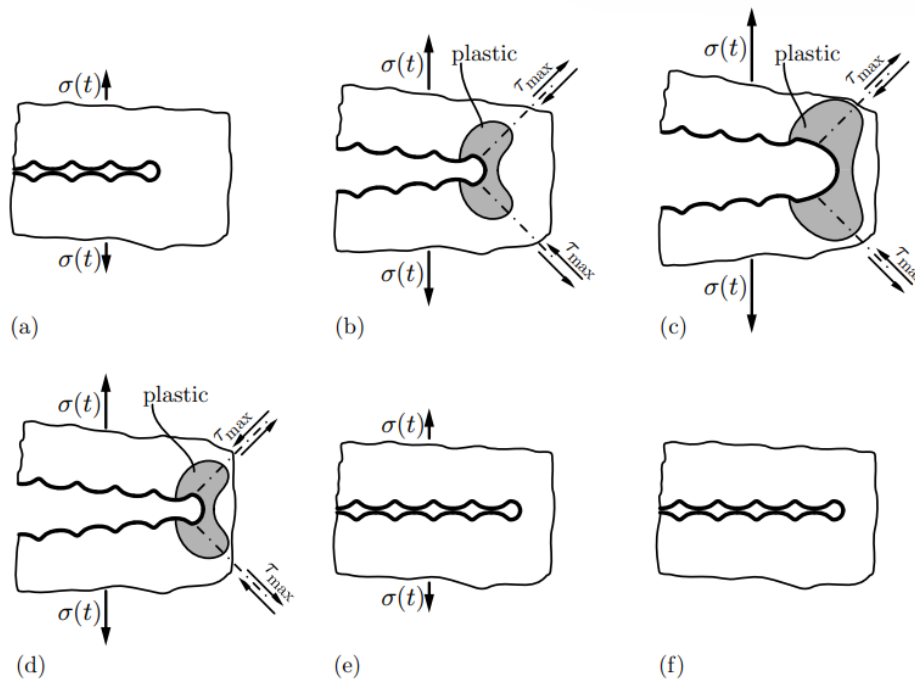


Figura 21: Esquema de avance de grieta.

Normalmente la propagaci3n de grieta se puede observar gracias a unas marcas en la superficie de borde de grano, llamadas estrías de fatiga, las cuales representan el avance de la grieta por ciclo. Cabe destacar que aunque cada marca representa un ciclo, no todos los ciclos producen marcas en la pieza. Macrosc3picamente no son apreciables, como se puede apreciar en la Figura 22, por lo que la superficie de avance de la grieta parece suave y no rugosa.

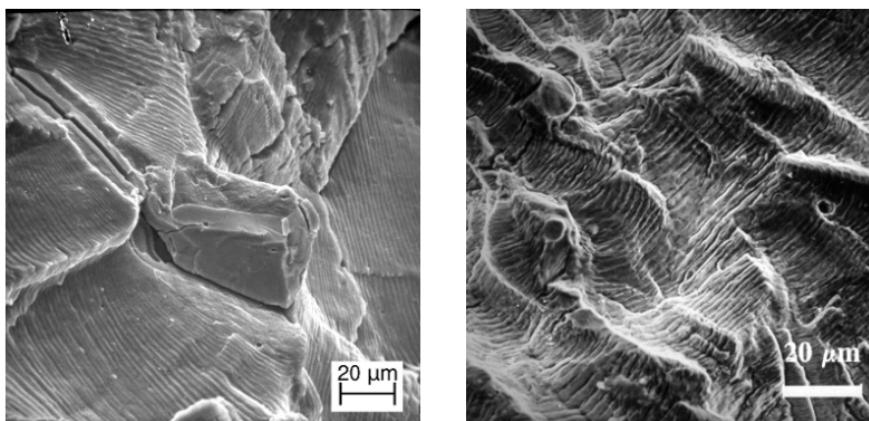


Figura 22: Estrías de fatiga al microscopio.

Sin embargo, en algunas piezas que han fracturado por fatiga, se pueden apreciar otras marcas, conocidas como marcas de playa, apreciables en la Figura 23. Estas se producen por cambios en las cargas a las que se somete la pieza cuando est1 trabajando, como por ejemplo un cambio en

las revoluciones del motor, o un tiempo en el que la máquina no está trabajando. Estas marcas suelen emplearse para conocer el punto en el que inició la grieta, como se aprecia en la parte inferior de la Figura 23.

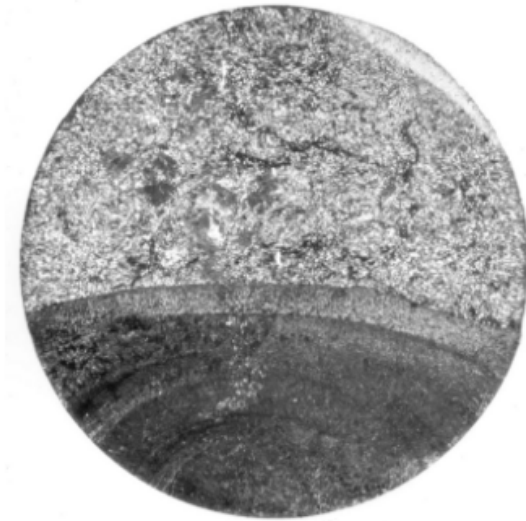


Figura 23: Marcas de playa apreciables en fractura.

La velocidad de crecimiento de grieta en esta etapa sigue una ley potencial, conocida como Ecuación de Paris, que relaciona la velocidad de avance de grieta con la variación del factor de intensidad de esfuerzos, como se observa en la Ecuación 4

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (4)$$

En esta, los parámetros que aparecen son:

- $\frac{da}{dN}$ : velocidad de avance de grieta en función de los ciclos.
- $\Delta K$ : variación del factor de intensidad de esfuerzos, cual se relaciona con las tensiones máxima y mínima ( $\Delta K \propto (\sigma_{max} - \sigma_{min})$ ). La ecuación completa del factor de intensidad de esfuerzo se indicará posteriormente en la Ecuación 6.
- C y m: constantes que dependen del material y se obtienen experimentalmente.

Gracias a esta ecuación, y una vez se ha detectado una grieta, se puede predecir la cantidad de ciclos que puede soportar antes de fracturar. Desarrollando la Ecuación 4, se llega a la Ecuación 5 [40], que permite calcular el número de ciclos para que una grieta crezca entre dos tamaños cualesquiera. Esto resulta muy útil en la industria, en especial al mantenimiento de piezas como álabes, ya que aunque se tenga una grieta, se puede seguir empleando, aprovechando al máximo la vida útil de la misma.



$$N = \int_{a_0}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K)^m} \quad (5)$$

Por último, es importante destacar que la propagación de grieta depende del tamaño de grano. Cuanto más grandes son los granos, la propagación de grieta es mucho menor, debido principalmente a que los bordes de grano son más grandes y menos numerosos. Además, los límites de grano pueden actuar como barreras para la propagación de grietas, ya que interrumpen la continuidad de la estructura atómica del material. Cabe destacar que, cuando una grieta encuentra un límite de grano, puede desviarse o ramificarse, cambiando su dirección de propagación. Este proceso de desviación y ramificación puede disipar energía e impedir el crecimiento de la grieta, además de reducir las posibles rutas para el crecimiento de las grietas, lo que dificulta la propagación de las mismas. Todo esto permite concluir que cuanto mayor sea el tamaño de grano, más lenta será la propagación de la grieta por el material.

- **Fractura final:** la última etapa de la fractura ocurre cuando el tamaño de grieta es mayor que el tamaño mínimo de grieta que soporta el material, provocando una fractura total de la pieza. Esto quiere decir que el factor de intensidad de tensiones iguala a la tenacidad a fractura del material, como se puede apreciar en la Ecuación 6:

$$K_I = \sigma\sqrt{\pi a}Y \quad (6)$$

En esta, se puede apreciar que el factor de intensidad de tensiones depende de:

- $Y$ : factor que tiene en cuenta la geometría de la pieza.
- $\sigma$ : tensiones a las que se somete a la pieza.
- $a$ : el tamaño de la grieta en fracturas superficiales, semi-tamaño de grieta en fracturas internas.

La apariencia de esta zona de la fractura es completamente diferente de la expuesta anteriormente, ya que se trata de una fractura dúctil, como se ha visto en la Figura 23.

Usualmente, en ingeniería se utiliza el conocido diagrama S-N, también conocido como diagrama de Wöhler, el cual representa las tensiones, que vienen dadas por  $S$  (*stress*), que un material es capaz de soportar un número  $N$  de ciclos. Esto permite definir la vida a fatiga,  $N$ , siendo este el número de ciclos necesarios para causar fallo en el material dadas una condiciones concretas, normalmente la tensión máxima y media, o la tensión media y la amplitud de la oscilación. También se puede definir la tensión de fatiga, que viene dada como la máxima tensión que un material es capaz de soportar dado un número concreto de ciclos sin que ocurra el fallo antes. Ambos valores puede obtenerse de gráficos similares a los de la Figura 24 [37]:

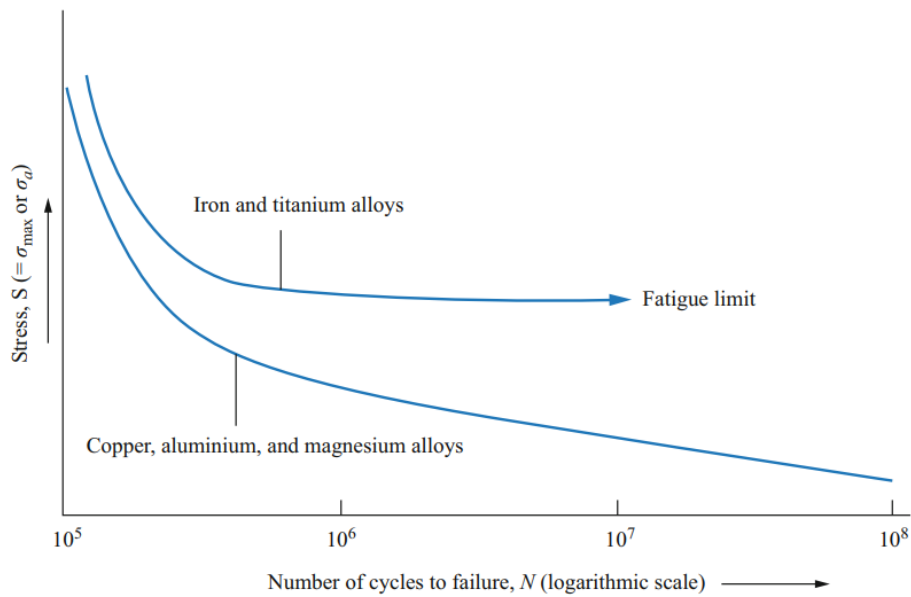


Figura 24: Diagrama S-N para diferentes aleaciones.

### 3.1.2. Fluencia

La fluencia se define como la deformación plástica dependiente del tiempo de un material cuando este se encuentra bajo una tensión constante a cierta temperatura. Este fenómeno ha sido altamente estudiado, ya que permite determinar la velocidad de deformación de una pieza cuando esta se expone a altas temperaturas, por lo que se pueden determinar los intervalos de revisión o mantenimiento con tal de evitar que se produzca un fallo repentino. Además, resulta de especial interés en la industria, ya que si se necesita trabajar con componentes que van a ser deformados, se puede estimar al temperatura de trabajo necesaria para obtener una velocidad de deformación determinada, lo que determinará la producción de ese componente en un intervalo de tiempo.

Dependiendo de la temperatura y de la tensión a la que se somete, diferentes procesos microscópicos ocurren y determinan el comportamiento a fluencia. En la Figura 25, se tiene la dependencia de la fluencia con las tensiones y la temperatura, en las cuales se puede ver que cuanto mayor sea la temperatura y la tensión, menor será el tiempo que transcurrirá hasta que la pieza falle.

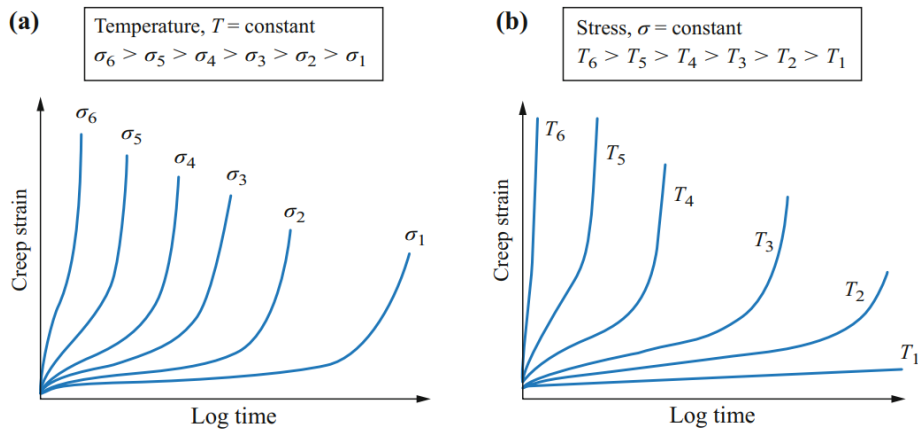


Figura 25: Dependencia del alargamiento con la tensión y la temperatura [37].

Resulta especialmente peligroso en componentes de turbomaquinaria y motores, ya que la fuerza centrípeta, combinada con altas temperaturas, puede provocar que algunos componentes se deformen y aparezcan grietas, como se observa en la Figura 26, y en el peor de los casos, impacten con las carcassas y se destruyan. Esto puede ocurrir en un rango de temperaturas muy amplio, en función de las características del material, siempre que el material se encuentre en estado sólido. Sin embargo, resulta especialmente importante el rango de temperaturas comprendido entre 0.4 y 0.9  $T_M$ , siendo  $T_M$  el punto de fusión del metal con el que se está trabajando [41].

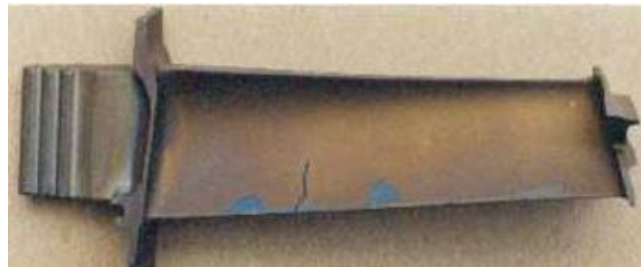


Figura 26: Ejemplo de fluencia en álabe de turbina [42].

En la Figura 27, se tiene la forma idealizada de la curva de alargamiento en un ensayo de fluencia para tensión y temperatura constante, junto con la pendiente de la misma. Se trata de la curva idealizada debido a que no se tienen en cuenta ciertos fenómenos, como el ambiente en el que se encuentra o posibles defectos en el material, los cuales juegan un papel crucial en este fenómeno. Además, esta forma se tiene únicamente cuando la microestructura del material no cambia, como ocurre en aleaciones simples. En esta se pueden apreciar 3 zonas claramente diferenciadas:

- **Fluencia primaria** (*Stage I* en las gráficas): tras el alargamiento inicial  $\epsilon_0$ , la tasa de alargamiento decrece rápidamente con el tiempo de forma logarítmica. Esto ocurre principalmente

porque el endurecimiento debido a los cambios en el número y disposición de las dislocaciones es mayor que el ablandamiento que se produce debido a las temperaturas.

- **Fluencia secundaria** (*Stage II* en las gráficas): esta fase se caracteriza por tener una tasa de alargamiento prácticamente constante, la cual se puede modelizar dando lugar a la Ecuación 7 [40], donde se establece que la velocidad de deformación depende de la tensión aplicada  $\sigma$  y de la temperatura, entre otros parámetros:

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^{\nu} e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (7)$$

Esto se debe a que se establece un balance entre el endurecimiento por deformación de la pieza y el ablandamiento de la misma causado por la temperatura. Este valor de la tasa de alargamiento se conoce como tasa mínima de fluencia, y es el parámetro más importante a la hora de diseñar piezas que estarán expuestas a este tipo de comportamiento. Los principales criterios que se suele usar para estos diseños es el siguiente [37]:

- La tensión que produce una tasa de alargamiento del 1 % en  $10^4$  h o un 0.0001 % por hora. Este se aplica a componentes cuya vida útil es de horas y se encuentran a altas temperaturas, como ocurre en los álabes de turbinas de aviación.
- La tensión que produce una tasa de alargamiento del 1 % en  $10^5$  h (11.5 años aproximadamente) o un 0.00001 % por hora. Este se aplica a componentes cuya vida útil es de años y se encuentran a altas temperaturas, como ocurre en los álabes de turbinas generadoras de electricidad.

- **Fluencia terciaria** (*Stage III* en las gráficas): se caracteriza por un aumento exponencial en la tasa de alargamiento, hasta que se produce el fallo de la pieza, principalmente por una disminución significativa de la sección de la probeta.

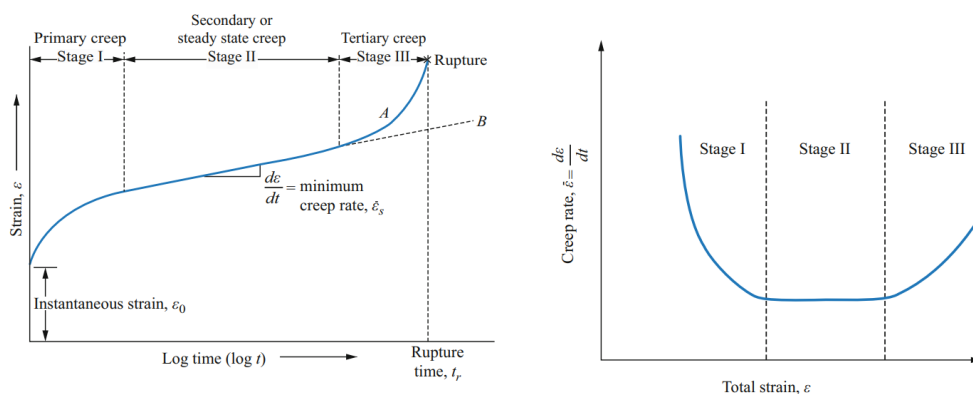


Figura 27: a) Alargamiento vs. tiempo y b) Tasa de alargamiento vs. alargamiento, ambos para ensayo de fluencia en laboratorio.

También resulta interesante hablar de los diferentes mecanismo que se pueden emplear para mejorar la resistencia a fluencia. Uno de los principales métodos que se puede emplear es el uso de materiales con alta energía de activación (temperatura de fusión), debido a que la formación de vacantes es menor, y por tanto, la difusión molecular se ve disminuida en gran medida.

### 3.2. Síntomas, causas y prevención de los principales fallos

Como se ha visto en el punto 2.3, el núcleo principal de un turbogrupo es el conjunto turbina-compresor, los cuáles se unen a través de un eje. En el caso de la turbina, esta se une al eje mediante una unión extremadamente rígida, utilizando normalmente técnicas tales como soldadura por fricción o soldadura láser. Por otro lado, el compresor se une al eje mediante un tornillo. Cabe destacar que ambas uniones deben de ser capaces de soportar grandes velocidades de rotación, puesto que para aplicaciones donde el turbogrupo es de reducido tamaño, tales como avionetas, el conjunto turbina-compresor puede alcanzar cerca de 300 000 rpm.

En términos de funcionalidad y durabilidad, el turbogrupo está diseñado para tener un vida útil igual a la del motor en el que está instalado. Sin embargo, en la práctica, esto no es habitual que suceda, puesto que el turbogrupo está expuesto a una serie de factores de riesgo [43] que pueden traer un fallo prematuro en diferentes partes del turbogrupo [44]. Dentro de estos fallos prematuros, las causas más habituales que los provocan son [45]:

1. Lubricación inadecuada.
2. Aceite contaminado.
3. Excesiva velocidad de rotación.
4. Daño por objetos extraños.

A continuación, se presentan cada uno de estos fallos, con los síntomas que permiten identificarlos, así como posibles causas y soluciones a los mismos.

#### 3.2.1. Lubricación inadecuada

La lubricación inadecuada es una de las causas más comunes en lo que a fallos de turbogrupos se refiere. Los principales síntomas que se tienen son:

- El compresor o la turbina impactan con la carcasa debido a daños en los rodetes [18], dejando marcas similares a las de la Figura 28. Además, si esto ocurre, no se tendrá balance de masas en la pieza, por lo que al rotar puede que los cojinetes fracturen y el turbogrupo deje de funcionar.



Figura 28: Daño en compresor causado por impacto con carcasa [45].

- El motor no ofrece suficiente potencia. Esto es debido a que, debido a la falta de lubricación, el conjunto turbina-compresor no puede girar a la máxima velocidad posible, por lo que la densidad del aire de admisión no aumenta todo lo que debería, haciendo que el motor pierda potencia.
- El vehículo emite humo negro. En relación a lo anterior, esto viene dado ya que el sistema electrónico del vehículo interpreta que se puede inyectar mayor cantidad de combustible debido a que está entrando más aire al motor. Si esto no ocurre, como se ha indicado en el punto anterior, se tendrá una mezcla rica en combustible, por lo que el humo emitido será negro debido a la concentración de hollín.
- El eje presenta una coloración especial, fruto de la fricción con el cojinete. Al no tener lubricación adecuada, la fricción puede provocar que se difunda material del cojinete al eje, como se puede ver en la Figura 29, o que incluso se quede soldado al mismo. En el peor de los casos, el eje se partirá y el turbogrupo quedará totalmente inutilizable.

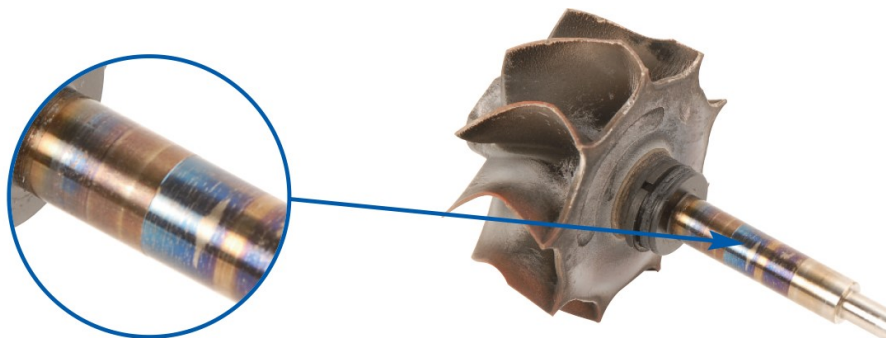


Figura 29: Cambio de color en el eje debido a la fricción con el cojinete [45].

Las principales causas para para la falta de lubricación en turbogrupos son:

- El nivel del aceite es demasiado bajo.

- El aceite no soporta las temperaturas de trabajo, dándose una carbonización del mismo, lo que puede obstruir las líneas del circuito de lubricación.
- El motor se suele apagar cuando está a temperaturas altas, por lo que el aceite se carboniza.
- El motor se suele llevar a altos regímenes de giro nada más arrancarse. Esto provoca que la película de aceite se rompa al no estar a la temperatura adecuada.
- La viscosidad del aceite no es la adecuada. Si es demasiado alta, el aceite tarda en llegar a los cojinetes, lo que no permite asegurar que se estén lubricando en todo momento.

Dicho esto, algunas posibles soluciones para solventar este tipo de problemas por falta de lubricación son:

- El motor se debe de calentar y enfriar correctamente.
- Se debe tener una cantidad de aceite suficiente.
- Solo se debe usar el aceite proporcionado por el fabricante, y cumplir con los tiempos de revisión y/o mantenimiento.

### **3.2.2. Aceite contaminado**

Hollín, arena, productos de la combustión, agua u otros objetos pueden contaminar el aceite. Aunque todas estas partículas son relativamente pequeñas en tamaño, pueden resultar críticas debido a las altas velocidades de rotación del turbogrupo. Los principales síntomas que presentará el vehículo serán:

- El juego que existe entre el cojinete y el eje puede aumentar debido a la presencia de las partículas en el aceite, provocando que el compresor y la turbina impacten con la carcasa, produciendo daños similares a los que se han comentado en el Punto 3.2.1.
- Si el aceite está muy contaminado, puede que alguna parte del circuito de lubricación se obstruya, dejando al turbogrupo sin aceite.
- Al estar el aceite contaminado, pueden encontrarse deposiciones de carbonilla o partículas sólidas en algunas partes del turbogrupo, como los cojines o el eje.

Dentro de las posibles causas, destaca superar los intervalos de mantenimiento, ya que si esto ocurre, el filtro de aceite puede no funcionar correctamente.

### 3.2.3. Excesiva velocidad de rotación

En el caso de que la velocidad de rotación sea excesiva, se pueden dar daños graves en el turbogrupo, especialmente en el compresor. Habitualmente, una excesiva velocidad de rotación implica que el motor está en un régimen de altas prestaciones, por lo que es de esperar que se tengan también altas temperaturas. Esto, unido a que el compresor está usualmente fabricado de aleaciones de aluminio, puede provocar el fenómeno de fluencia, ya que se une un aumento de las tensiones debido a la mayor velocidad de rotación con una mayor temperatura.

Los efectos que permiten identificar este tipo de fallos:

- Pequeñas indentaciones en la parte inferior del compresor, fruto del contacto con la carcasa.
- El compresor está deformado ya que aumenta su diámetro al deformarse.

Esto puede deberse a varios factores, entre los que destacan:

- Obstrucción de la entrada de la TGV, haciendo que se reduzca la sección y aumente la velocidad de entrada al compresor.
- El sistema de control está defectuoso.

### 3.2.4. Daño por objetos extraños

Si cuerpos extraños, tales como arena, partes metálicas o sedimentos, entran en el turbogrupo, el impacto con el grupo compresor-turbina puede resultar catastrófico debido a las altas velocidades de rotación. Entre los principales síntomas que permiten identificar que este daño se ha llevado a cabo, destacan:

- Los álabes de la TGV están dañados o doblados, como ocurre en la Figura 30.



Figura 30: Daño en los álabes de la TGV [46].



- Daño en algunos los álabes del compresor cerca de la sección de entrada, apreciable en la Figura 31.



Figura 31: Daño en compresor causado por impacto con objetos extraños [46].

La causa principal de este tipo de fallos es una fractura de alguna otra parte del motor (pistón por ejemplo) o que el filtro del aire no esté funcionando correctamente, lo cual se podría corregir mediante un cambio en el filtro del aire del vehículo o evitando que queden partes no selladas correctamente, especialmente en los conductos de admisión.

### 3.2.5. Fallo por bombeo

El bombeo es una oscilación axisimétrica del fluido a través del compresor, la cual se caracteriza por la aparición de inestabilidades al reducir el gasto másico o aumentar la relación de compresión en el propio compresor. Estas inestabilidades suelen verse reflejadas en oscilaciones de presión, e incluso inversiones de flujo (el aire comienza a salir por la entrada del compresor), lo que puede ser altamente destructivo, dañando los álabes e incluso arrancándolos, como se observa en la Figura 32 [47].

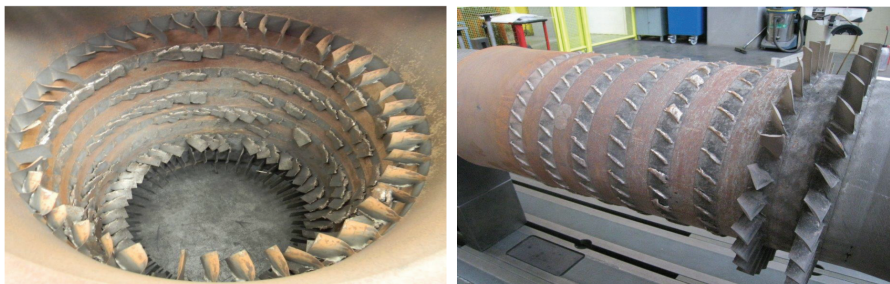


Figura 32: Daños provocados en compresor axial causados por el fenómeno de bombeo [48].

En función del grado y las características de estas oscilaciones, destacan los siguientes tipos de bombeo [49]:

- **Bombeo clásico:** se genera una oscilación de presión destacable aguas abajo del compresor. También es necesario destacar que es posible la inversión del flujo, y que se pueden generar pulsaciones capaces de dañar el compresor o alguna de sus partes. La frecuencia característica de este tipo de bombeo oscila entre los 6 y los 20 Hz.
- **Bombeo medio o suave:** se caracteriza por tener una frecuencia algo superior al bombeo clásico, siendo esta frecuencia propia del sistema en el que se tiene el compresor.
- **Bombeo profundo:** muy similar al bombeo clásico, pero más destructivo, ya que se aprecian vibraciones abruptas. Se caracteriza por tener frecuencias más bajas, alrededor de los 2-6 Hz.
- **Bombeo de mezcla:** se trata de una mezcla entre el fenómeno de desprendimiento de capa límite en perfiles de máquinas rotativas y el fenómeno de bombeo.



## 4. Caso práctico

En los Puntos 2 y 3, se ha explicado la importancia de la sobrealimentación en los vehículos, así como los diferentes componentes que presentan y fallos que se pueden encontrar. A continuación, se tratará un caso particular de un turbogrupo que presenta un fallo en el compresor.

### 4.1. Pieza a examinar y problemas que presenta

La pieza a analizar se encuentra en un turbogrupo de la marca BorgWarner, que dejó de funcionar mientras estaba instalado en un banco de ensayos. Este modelo de turbogrupo suele estar instalado en motores R9M, propio del modelo Megane del fabricante Renault [50]. El turbogrupo en cuestión se puede observar en la Figura 33:



Figura 33: Turbogruppo a examinar.

En la Figura 34 se puede observa en detalle la fractura que presenta:



(a)



(b)

Figura 34: a) Compresor montado en turbogrupo y b) Detalle de la fractura.

Si se realiza un desmontaje completo del turbogrupo, se puede apreciar que se trata de un turbogrupo con turbina de geometría variable [50], y que el compresor es la única causa aparente de fallo (Figura 35):



(a)



(b)

Figura 35: a) Piezas tras desmontaje y b) Detalle de la TGV.

#### 4.1.1. Hipótesis sobre causa de fallo

Tras la primera inspección macroscópica, se puede plantear varias hipótesis:

- Si se centra la atención el eje que une la turbina y el compresor, no se aprecian marcas de carbonización ni decoloración, como se ha explicado en el Punto 3, por lo que aparentemente el presente turbo no presenta ni aceite contaminado ni falta de lubricación.
- Únicamente uno de los álabes está fracturado, y aunque no puede descartarse a priori un fallo por fluencia, por el hecho que de tan sólo uno presente el fallo y no toda la corona, o al menos un mayor número de álabes, no se espera fallo por fluencia.
- Un fallo por impacto, sí que podría generar daño en uno de los álabes y no repercutir en los demás, por lo que un fallo por fractura frágil es viable.
- El turbogrupo es un sistema que trabaja a fatiga, pero se desconocen las horas de funcionamiento o el kilometraje del vehículo en el que se instaló, por lo que se podría esperar un fallo por fatiga.

#### 4.2. Procedimiento experimental

En la Figura 36 se muestra el esquema de trabajo que se va a realizar para tratar de determinar la causa de fallo.

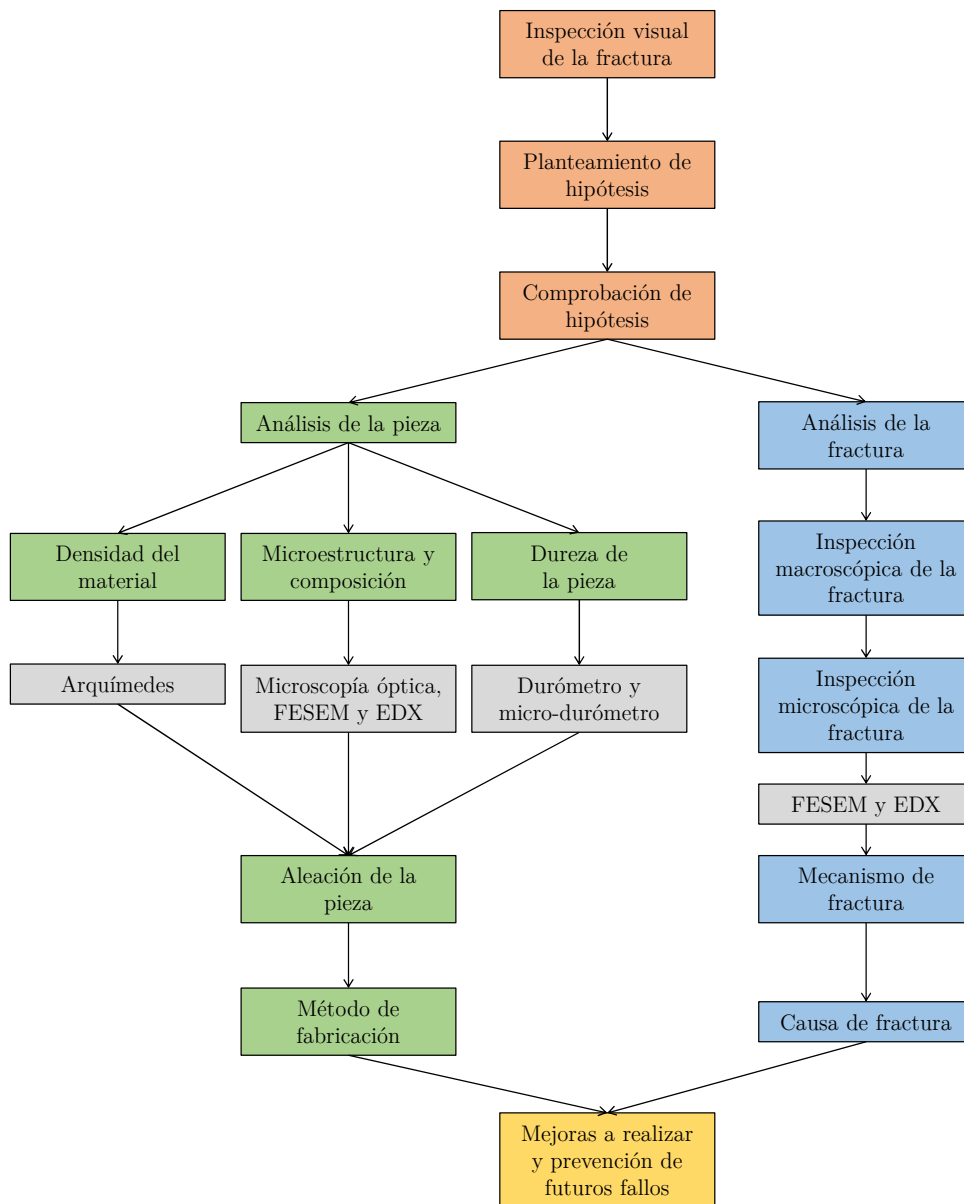


Figura 36: Diagrama de flujo del procedimiento experimental del caso práctico.

Se comenzará estudiando la pieza, sin considerar el fallo, para extraer la máxima información posible. Mediante el principio de Arquímedes se determinará la densidad de la pieza. La microestructura, así como la composición, se determinarán empleando microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) junto con detección de energía dispersiva de Rayos X (EDX). Las propiedades mecánicas se medirán mediante ensayos de dureza y microdureza. Con estos resultados, se podrá es-

tablecer la aleación del compresor, los posibles tratamientos térmicos a los que ha sido sometida, los métodos de fabricación, unión, ensamblaje...

El análisis de la fractura comenzará con una inspección visual, seguido de una caracterización microestructural mediante FESEM y EDX. Con los resultados obtenidos, se podrá determinar tanto el mecanismo de fractura como la causa de la misma.

Por último, y en vista de los resultados obtenidos en los diferentes ensayos, así como de las conclusiones obtenidas de los mismos, se plantearán una serie de mejoras a realizar, con tal de evitar que el fallo vuelva a producirse.

### **4.3. Análisis de la pieza**

Se desconoce la aleación con la que está fabricado el compresor del turbogruppo, un dato fundamental para estudiar la pieza. La única información que se tiene es que se trata de una pieza metálica poco densa. En primer lugar, y con la intención de descartar la mayor cantidad de aleaciones posibles, se mide la densidad del material, puesto que permitirá discernir si se trata de un acero, aluminio u otro material. Seguidamente, se realizará un análisis mediante microscopía óptica, seguido de un análisis mediante microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM), lo cual proporcionará información de la microestructura, así como su composición.

Tras esto, se le realizarán pruebas de dureza, para concretar la aleación con la que se está trabajando. Por último, se deberá de comprobar, mediante la comparación con otras aleaciones de aluminio conocidas a través de un análisis con microscopio, la familia a la que pertenece.

#### **4.3.1. Medida de la densidad del material del turbocompresor**

Para determinar la densidad de la pieza se usará el método de Arquímedes. Para ello, se pesa la pieza en seco y posteriormente se sumerge en un medio líquido conocido.

Para este ensayo, se utiliza por un kit para la determinación de la densidad Sartorius YDK01, en el que se utilizaron los elementos de la Figura 37:

1. Balanza.
2. Vaso analítico.
3. Soporte de barras.
4. Puente metálico.



5. Platillo de inmersión.

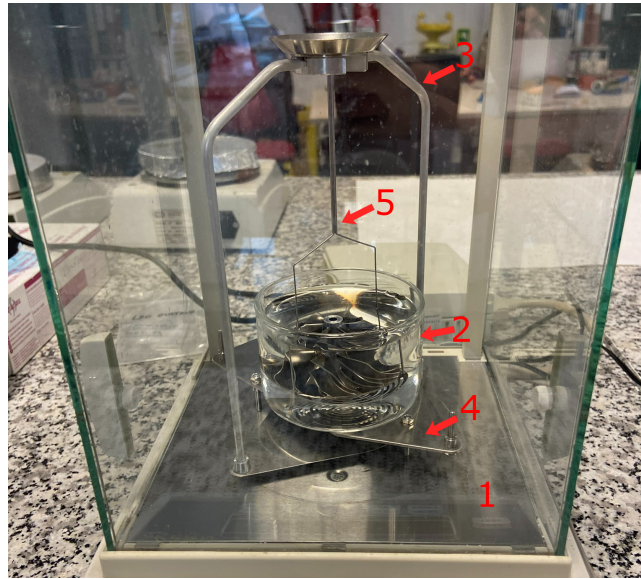


Figura 37: Diferentes elementos empleados en la medida de Arquímedes.

Es necesario limpiar previamente la muestra antes de sumergirla en el líquido (en este caso agua destilada), agitándola para que no queden burbujas y no se vea afectada la medida. Seguidamente, se introduce en el platillo de inmersión dentro del vaso analítico y se anota la medida que proporciona la balanza.. Seguidamente, se introduce en el platillo de inmersión dentro del vaso analítico y se anota la medida que proporciona la balanza.

Tras anotar el valor que proporciona la balanza, se utilizará la Ecuación (8) para obtener el valor de la densidad de la muestra. Las variables que intervienen son el peso obtenido al sumergir la pieza ( $W(fl)$ ) y en seco ( $W(a)$ ), y la densidad del líquido ( $\rho(fl)$ ) en el que se está sumergiendo.

$$\rho = \frac{W(a) \cdot \rho(fl)}{W(a) - W(fl)} \quad (8)$$

En el análisis, los valores obtenidos se muestran en la Tabla 4, junto con el valor de la densidad calculado con la ecuación (4).

Tabla 4: Valores empleados en el cálculo de la densidad del compresor.

$W(a)$ [g]	$W(fl)$ [g]	$\rho(fl)$ [ $\frac{g}{cm^3}$ ]	$\rho$ [ $\frac{g}{cm^3}$ ]
24.30	16.00	0.99	<b>2.90</b>

El bajo valor de la densidad obtenido descarta un gran número de familias metálicas. La densidad obtenida se aproxima a la del aluminio,  $2,7 \frac{g}{cm^3}$ , lo que se espera corroborar con análisis posteriores

### 4.3.2. Análisis de la microestructura y composición del compresor

#### Preparación metalográfica

Es siguiente paso es determinar la microestructura y composición, por lo que es necesario realizar una preparación metalográfica de la pieza. Mediante una tronzadora, se obtienen las piezas que se observan en la Figura 38. De esta manera, se extrae una parte representativa del rodete que no haya sido afectada por la fractura, la cuál se embute en resina transparente para facilitar su manipulación:



Figura 38: a) Piezas obtenidas tras cortar el compresor y b) Parte del compresor de interés cortada y embutida.

En primer lugar, se debe desbastar la zona de corte con diferentes papeles de lija SiC en una desbastadora de laboratorio LABOPOL-21, apreciable de la Figura 39:



Figura 39: Desbastadora de laboratorio empleada.

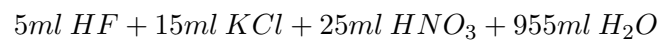
En este caso, se optó por usar papeles de 220, 500, 1000 y 4000. Para ello, se coloca la pieza embutida manteniendo la misma posición respecto a la desbastadora de laboratorio, sin moverla ni rotarla, hasta que toda la superficie tenga las marcas con la misma disposición y sin que se puedan apreciar las marcas del anterior desbaste. Este proceso es altamente delicado y se tiene que realizar sin viselar la muestra, puesto que si esto ocurriera, al realizar los análisis con el microscopio, se tendrían zonas con diferente enfoque, siendo cada vez más crítico cuanto mayores son los aumentos empleados. Una precaución a tener en cuenta es que, al estar desbastando con agua para no realizar modificaciones en la pieza debido al calor que se podría generar con la fricción, se debe de limpiar la muestra cada vez que se pretende realizar un análisis visual con el microscopio para ver si siguen quedando marcas del anterior desbaste. Para esto, se puede usar un papel de secado sin causar daños sobre la superficie sobre la que se está trabajando. Sin embargo, a partir de la lija de 4000, donde cualquier acción podría marcar y dañar esta superficie, será necesario aplicar un método diferente. Para ello, se sumerge la probeta en alcohol y se le aplica aire caliente con la ayuda de un secador, para que este se evapore rápidamente. Además, para los restos que puedan quedar, se secará la superficie con algodón blanco, puesto que este no la dañará.

Una vez se tiene la pieza desbastada, se procede al pulido de la misma. Para ello, se usará una pulidora de laboratorio LABOFORCE-3, apreciable en la Figura 40, la cual tiene diferencias apreciables respecto al equipo usado anteriormente. La primera de estas es que en este caso no se tiene un papel de lija, ya que se tiene un papel pulidor, por lo que se deberá aplicar un procedimiento diferente. En primer lugar, se selecciona una pasta abrasiva, lo cual nos dará el tamaño de las marcas que se podrán hacer en la muestra. Posteriormente, se aplica una pequeña cantidad de la pasta en el disco de pulido, seguida de líquido para pulido, y se comienza con el procedimiento. En este caso, en lugar de mantener la pieza en una misma orientación, y con la intención de conseguir una distribución homogénea de marcas, se procede a girar la pieza en sentido contrario al de giro de la pulidora, para atacar a toda la superficie por igual y tener marcas en todas las direcciones. En este caso es especialmente importante secar las muestras con algodón, puesto que tras el pulido la superficie de la pieza embutida es altamente sensible a cualquier acción y se producen marcas con facilidad.



Figura 40: Pulidora del laboratorio empleada.

En tercer lugar, para revelar la microestructura se le aplica un agente químico, en este caso Keller (triácida), ya que se presupone que se trata de una aleación de aluminio. Con este reactivo se consigue atacar la superficie pulida para evidenciar así la estructura. El Keller tiene la siguiente composición:



#### Microscopía óptica

Una vez realizada la preaparación metalográfica, se procede al análisis microestructural. Se comienza empleando un microscopio óptico y se obtienen imágenes de toda la superficie. Posteriormente, se unen para obtener un mapeado completo, el cuál puede observarse en la Figura 41:

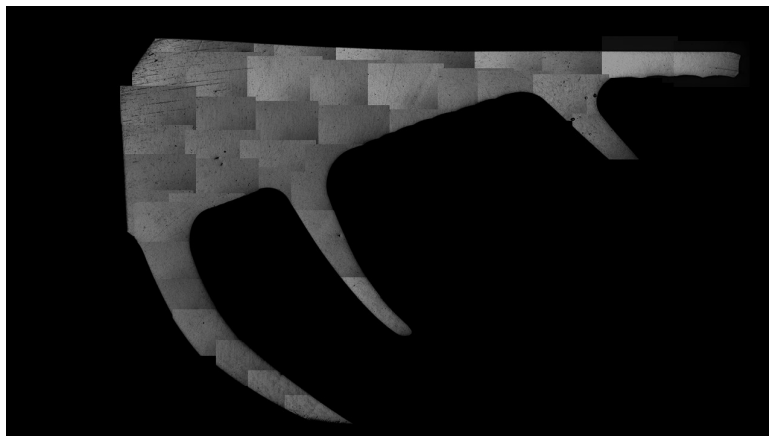


Figura 41: Imagen del corte con microscopio.

Como se puede apreciar en la Figura 41, no hay una diferencia en la microestructura, ni se aprecian signos de unión, entre los álabes y la parte central del compresor, por lo que se puede concluir que se

trata de una sola pieza. A pesar de que el mapeado se observan zonas con brillo y contraste diferente, sí que permite observar cómo la pieza es un continuo, ya que no hay ningún indicio de unión entre los álabes y la parte central del compresor, ni signos de soldaduras ni uniones mecánicas entre los diferentes componentes.

### Microscopía electrónica

La caracterización microestructural se realizó con microscopía electrónica de barrido de campo, o FESEM. El funcionamiento de esta técnica se basa en el barrido de la superficie a examinar mediante un haz de electrones mientras que en un monitor se visualiza cierta información en función de los detectores disponibles, permitiendo así aumentos muy superiores si se compara con los microscopios tradicionales [51]. Además, el instrumento con el que se realizó la prueba contaba con un detector de energía dispersiva de Rayos X (EDX), lo que permite el uso de una técnica que se conoce como Microanálisis por EDX. Esta se basa en la recepción de los Rayos X procedentes de cada uno de los puntos de la superficie sobre los que pasa el haz de electrones. Como la energía que se dispersa de los Rayos X es característica de cada elemento químico, proporciona información analítica cualitativa y cuantitativa de los puntos seleccionados en la superficie de la muestra. Gracias a esta técnica, se compararán los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en la Sección 4.3 con los obtenidos mediante el Microanálisis por EDX. El equipo empleado en la prueba es el modelo Ultra 55 de la marca Zeiss, apreciable en la Figura 42:



Figura 42: Equipo empleado en FESEM [52].

En la Figuras 43 se puede observar la microestructura de la aleación. Se observa una microestructura bimodal, formada por una matriz de granos equiaxiales (gris oscuro), homogéneos de aproximadamente  $30 \mu m$  con ordenación aleatoria, sin crecimiento preferente. Sobre esa matriz se encuentran

precipitados de geometría alargada (gris claro) con un tamaño de aproximadamente  $5 \mu m$  longitudinalmente, y  $1 \mu m$  en dirección radial. Estos precipitados sí que se distribuyen en una dirección preferente, la cual podría ser debido a la preparación metalográfica. También se observan zonas con poros debido al arranque de esta fase gris clara.

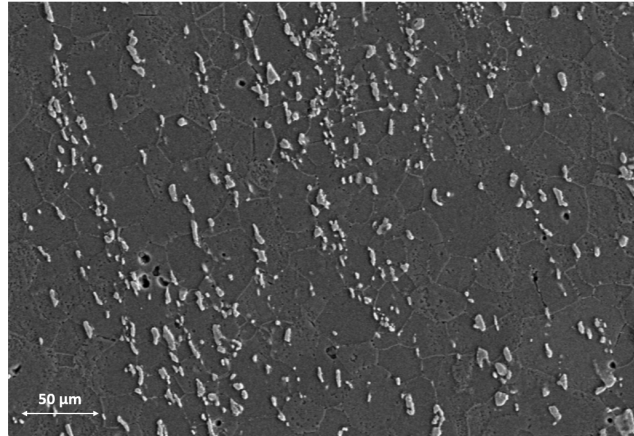


Figura 43: Microestructura del compresor.

En el mapa composición obtenido mediante EDX, se muestra una aleación de aluminio aleada con Mg, Cu, Si, Fe y Ni. Se corrobora que es una aleación de aluminio, y los alentos Cu y Mg podrían indicar que se trata de la serie 2000. En el análisis que Moreira [22] realiza al fallo sufrido en compresor de un turbogrupo, la aleación del compresor es un AA2618 T652. Esta aleación presenta una composición de Cu  $\approx 2.3\%$ , Fe  $\approx 1.0\%$ , Mg  $\approx 1.5\%$ , Ni  $\approx 1.1\%$ , Si  $\approx 0.2\%$ , y al igual que en el caso que aquí se trata, la microestructura está compuesta por una matriz con precipitados de geometría alargada de composición  $Al_9FeNi$ .

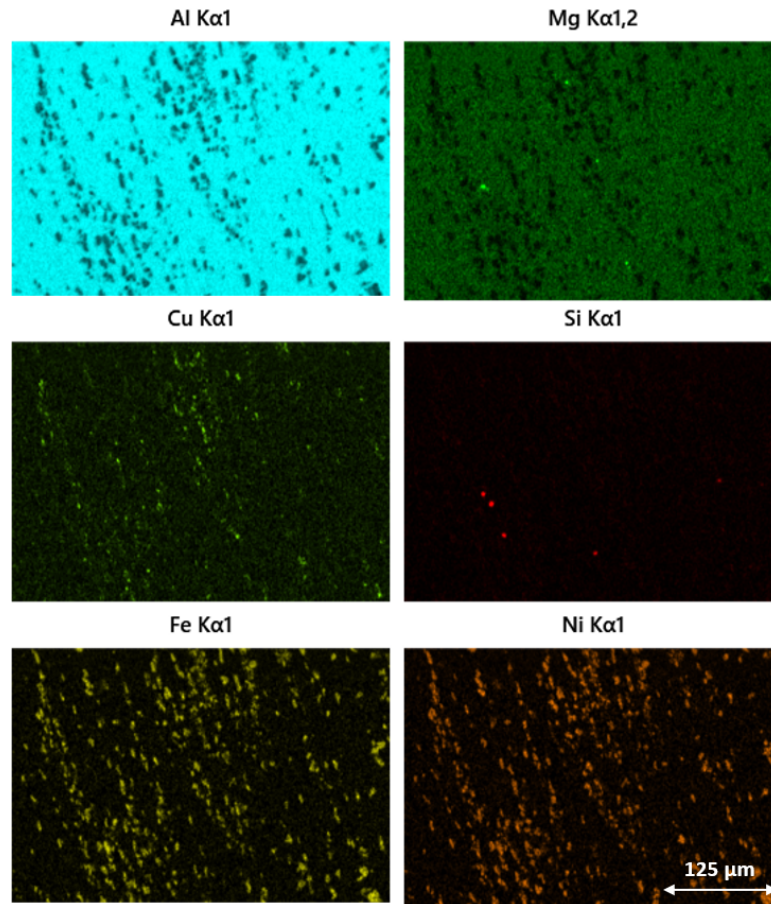


Figura 44: Mapa de composición de la Figura 43.

En Figuras 45 y 46 se puede observar la microestructura y mapa composicional con mayores aumentos. Se observa como el arranque de precipitados es mayor en borde de grano que en el centro del mismo. La composición de los precipitados (Fe y Ni mayoritariamente) parece indicar que al igual que en el caso de Moreira [22] se trata de una aleación de aluminio de la serie 2000.

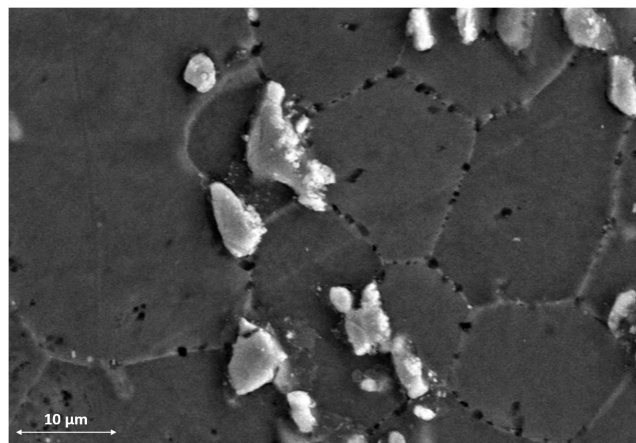


Figura 45: Imagen en detalle de la microestructura del compresor.

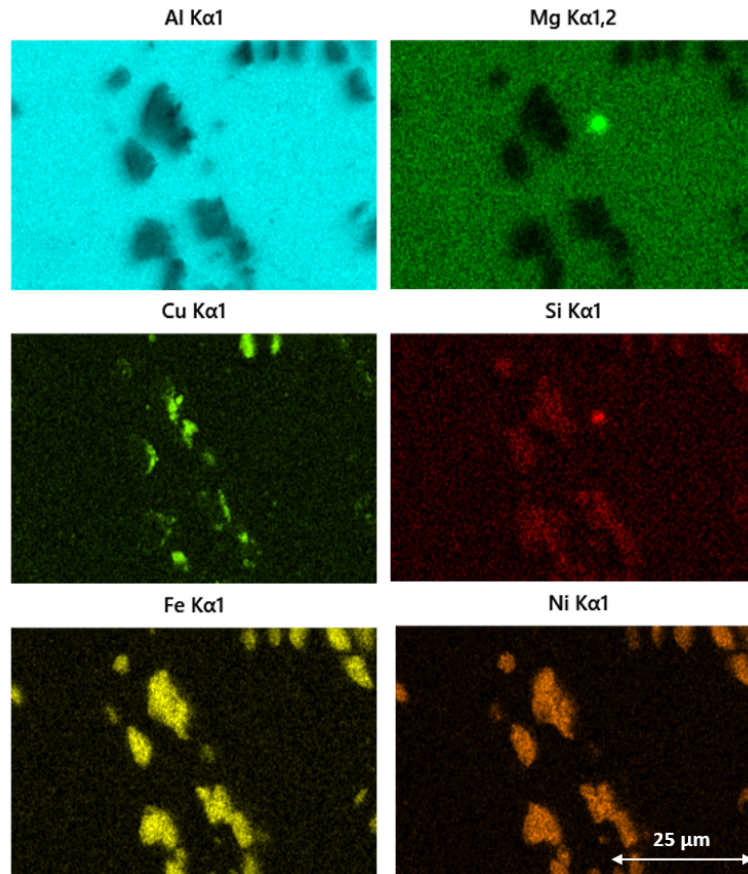


Figura 46: Mapa de composición de los principales elementos de la aleación de la Figura 45.

### 4.3.3. Análisis de dureza del compresor

Una vez se realizó una inspección visual del corte, se procede a realizar un ensayo de dureza Vickers con intención de hallar la dureza de la pieza. En el ensayo Vickers se emplea como elemento indentador una pirámide regular de diamante, de base cuadrada, cuyas caras laterales forman un ángulo de  $136^\circ$ , como se puede ver en la Figura 47. En la penetración del indentador contra la probeta, éste dejará una impresión cuadrada sobre el material de la probeta, que resulta más fácil de medir (más precisa) en este tipo de ensayo.



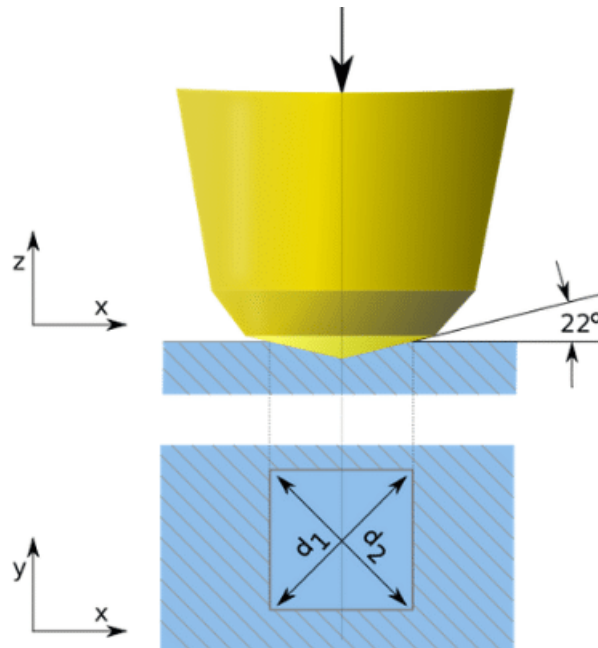


Figura 47: Esquema de prueba de dureza Vickers [53].

La carga completa se aplica normalmente durante 10 a 15 segundos. Las dos diagonales de la hendidura que queda en la superficie del material tras la retirada de la carga se miden con un microscopio y se calcula la dureza de la probeta, quedando un resultado similar al de la Figura 48.

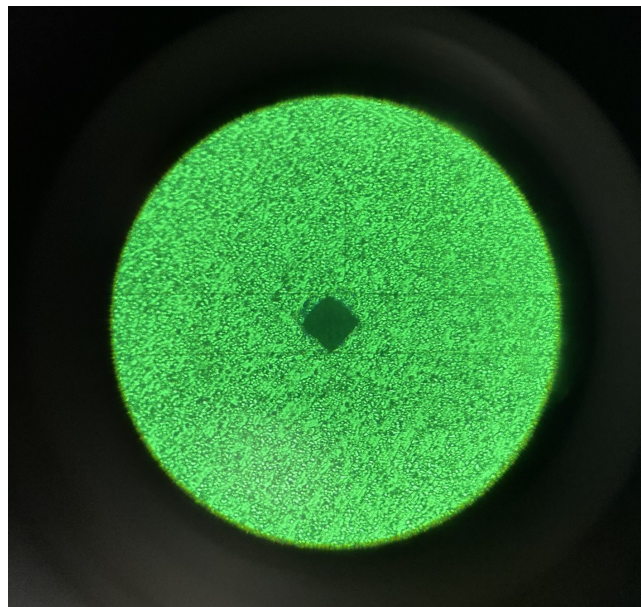


Figura 48: Ejemplo de prueba de dureza Vickers.

El instrumento utilizado para realizar esta caracterización mecánica ha sido un microdurometro automatizado de la empresa Shimadzu, en concreto el modelo HMV-20 de la Figura 49. Con este modelo, además de poder hacer la microindentación sobre la probeta, se puede observar el resultado,

porque además cuenta con un microscopio óptico conectado a un ordenador para que también sea posible señalar el lugar exacto donde realizar la medición.

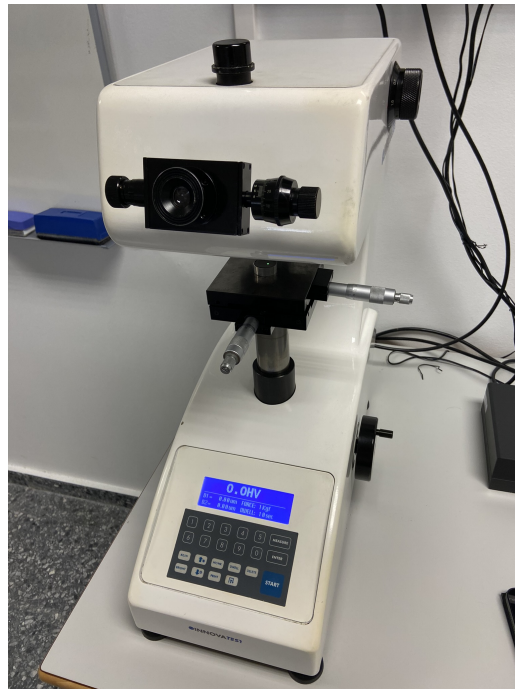
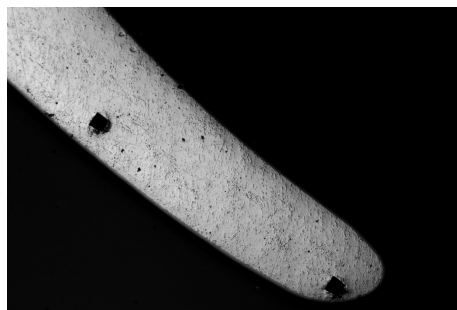


Figura 49: Microdurómetro empleado.

Pasando ya al ensayo de microdureza que se le realizó a la pieza embutida, cabe destacar que se realizaron ensayos en diferentes partes de la misma. Esto se debe a que se pretendió comprobar si la parte central y los álabes tenían unas propiedades diferentes, y por tanto, estaban fabricadas de aleaciones diferentes y posteriormente unidas. Dicho esto, se realizaron 10 ensayos en la parte central en diferentes localizaciones, y 5 ensayos en cada uno de los álabes. En la Figura 50, se pueden apreciar las marcas que se realizaron en los álabes y la parte central del rodete:



(a)



(b)

Figura 50: a) Marcas de ensayo Vickers en uno de los álabes del rodete y b) Marca de ensayo Vickers en la parte central del rodete.

Los resultados de dureza Vickers obtenidos en los diferentes ensayos, juntos con la desviación

estándar asociada a los mismos, se pueden apreciar en la Tabla 5 :

Tabla 5: Resultados de las pruebas de dureza realizadas al rodete.

Zona del álabe	Dureza (HV)
Parte central	142.0 ± 6.0
Álabe 1	135.1 ± 4.1
Álabe 2	138.4 ± 4.8
Álabe 3	141.7 ± 2.7

Como se puede apreciar, los resultados de durezas obtenidos en la parte central del rodete y los álabes no se diferencian de forma significativa, por lo que se puede concluir que no están fabricadas en diferentes aleaciones y unidas posteriormente, como se ha planteado en el Punto 4.3.2. Los resultados obtenidos concuerdan con los calculados de Moreira [22], siendo estos 142–166 HB. A pesar de que las escalas de dureza no son las mismas, para los valores obtenidos son muy similares [54].

Finalmente, y en vista de las diferentes conclusiones extraídas de los ensayos y pruebas que se han realizado, se puede afirmar que la aleación con la que se ha fabricado el compresor pertenece a la serie 2000.

#### 4.4. Comprobación de la aleación del compresor

##### 4.4.1. Análisis de diferentes aleaciones de aluminio

Para corroborar los resultados obtenidos en el Punto 4.3, se procede a realizar diferentes pruebas. La primera de estas es el análisis microestructural mediante microscopio de varias probetas. Con esta técnica, se podrá conocer tanto la microestructura del metal como, en el caso del aluminio, si tiene o no precipitados, así como su forma, tamaño y color, lo que indicará si ha sido o no endurecido por envejecimiento natural y artificial y el tipo de aleantes empleados, entre otras cosas.

En primer lugar, será necesario contar con muestras de diferentes aleaciones de aluminio para poder comparar la muestra extraída del compresor con las mismas y poder identificar más fácilmente el tipo o la familia de aleaciones a la cuál pertenece. Para ello, se contará con las siguientes aleaciones, apreciables todas ellas en la Figura 51:

- Aleación 2024 (1 en la Figura).

- Aleación 2030 (2 en la Figura).
- Aleación 5056 (3 en la Figura).
- Aleación 6061 (4 en la Figura).
- Aleación 6063 (5 en la Figura).
- Aleación 7075 T6 (6 en la Figura).

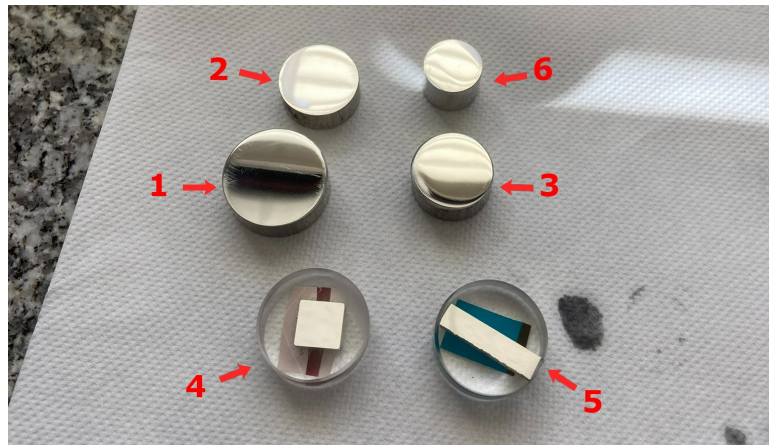


Figura 51: Diferentes probetas de aluminio empleadas.

El resultado del desbaste, el cual sigue el mismo procedimiento que se ha explicado en el Punto 4.3.2, de todas las probetas se puede apreciar en la Figura 52:

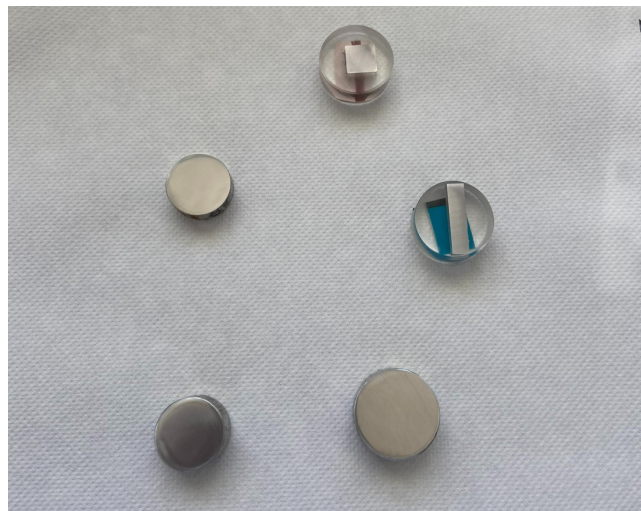


Figura 52: Diferentes probetas de aluminio tras desbaste.

De la misma forma, el resultado que se obtuvo tras el pulido de las probetas se aprecia en la Figura 53:

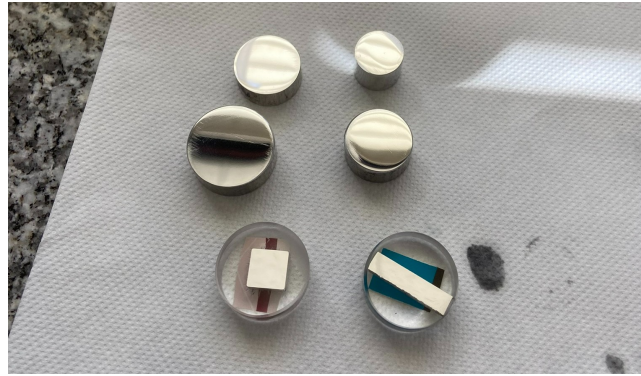
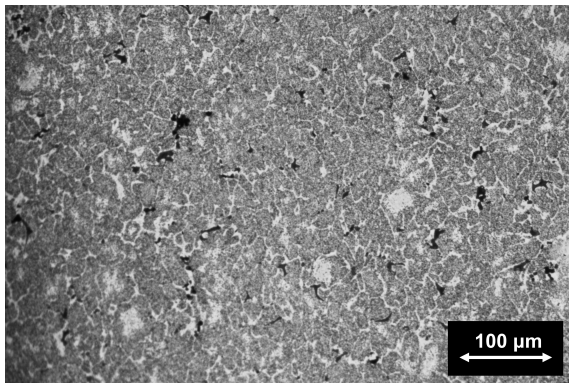
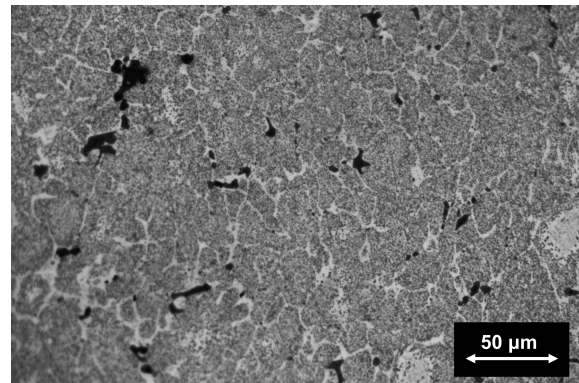


Figura 53: Diferentes probetas de aluminio tras pulido.

Finalmente, los resultados obtenidos para las 6 probetas se observan en las Figuras 54, 55, 56, 57, 58 y 59. Estas imágenes están obtenidas en 200 y 400 aumentos:

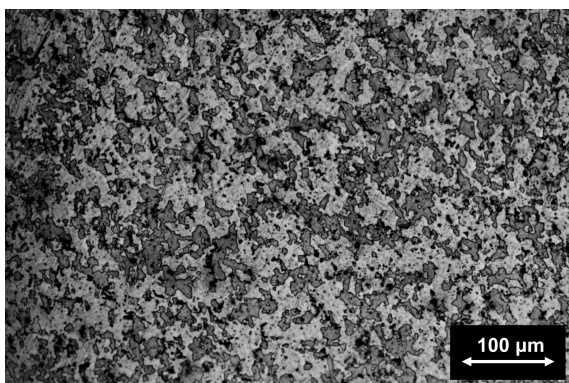


(a)

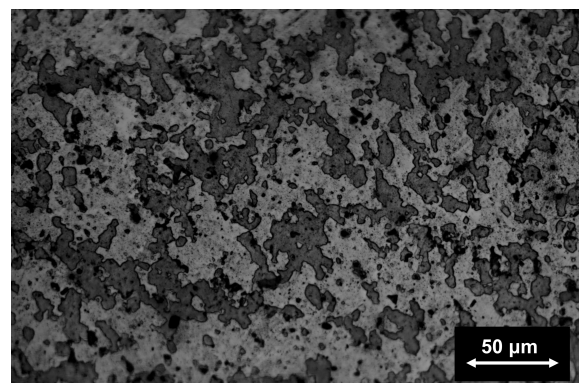


(b)

Figura 54: Aleación 2024 al a) 200x y b)400x.

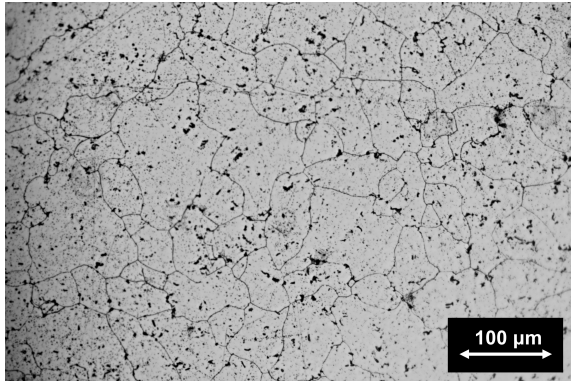


(a)

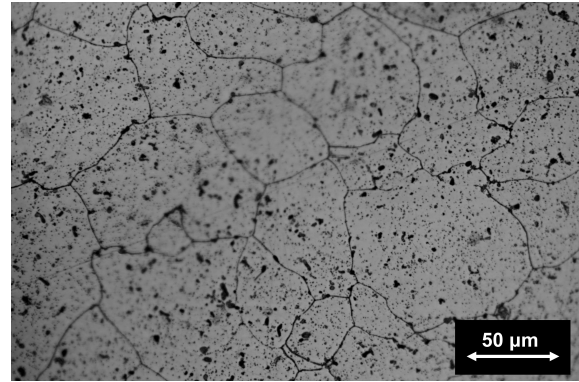


(b)

Figura 55: Aleación 2030 al a) 200x y b)400x.

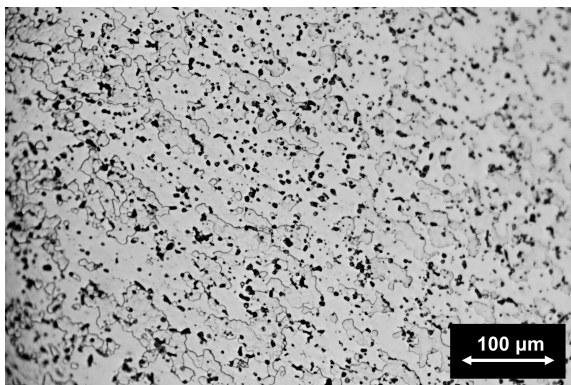


(a)

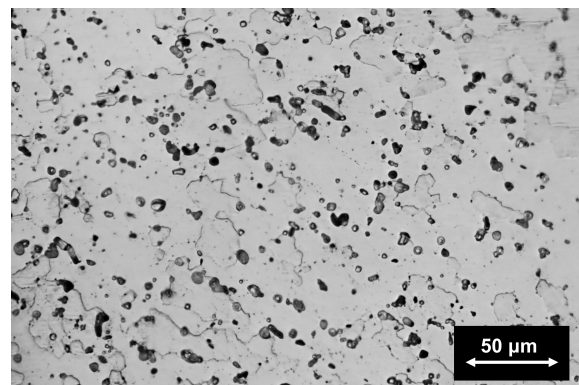


(b)

Figura 56: Aleación 5056 al a) 200x y b)400x.

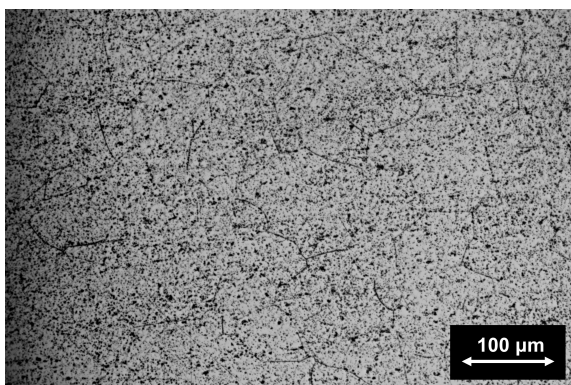


(a)

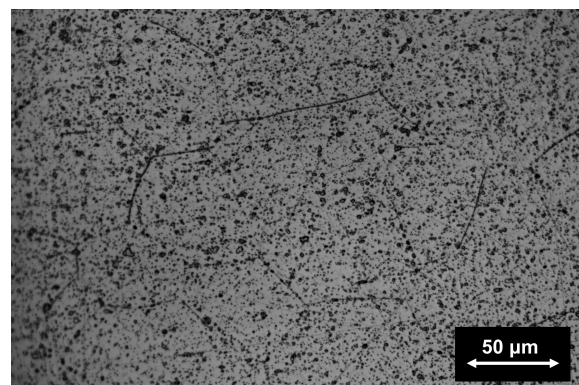


(b)

Figura 57: Aleación 6061 al a) 200x y b)400x.



(a)



(b)

Figura 58: Aleación 6063 al a) 200x y b)400x.

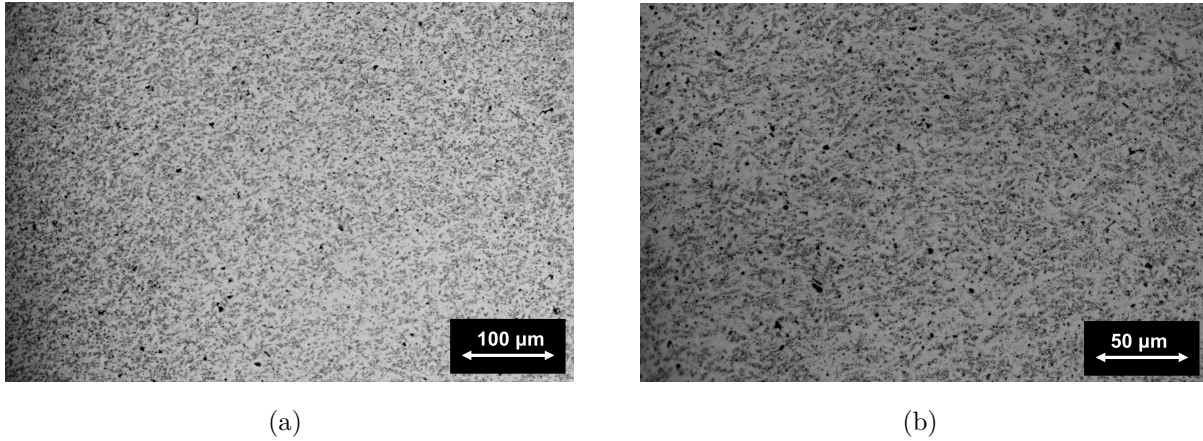


Figura 59: Aleación 7075 T6 al a) 200x y b)400x.

#### 4.4.2. Determinación de la dureza de las probetas

A modo de comprobar las propiedades de las probetas, y usar estos valores para comparar con los resultados obtenidos para el compresor, se procede a realizar pruebas de dureza para las diferentes aleaciones. En este caso, se ha optado por la prueba de dureza Vickers (HV), realizando 5 ensayos en diferentes partes de la probeta, por si se ha endurecido más por la parte exterior que en el centro de la misma, para cada una de las escalas.

Tras analizar los valores obtenidos, y descartar los valores anómalos, los resultados obtenidos se aprecian en la Tabla 6:

Tabla 6: Valores obtenidos en las pruebas de dureza de las probetas.

Aleación	2024	2030	5056	6061	6063	7075 T6
HV	150	129	97	100	85	157

#### 4.4.3. Comparación con los resultados del Punto 4.3

En vista de los resultados de las pruebas de dureza del Punto 4.4.2, así como de las imágenes obtenidas mediante microscopía en el Punto 4.4.1, se puede confirmar que las conclusiones obtenidas sobre la familia de aleaciones a la que pertenecía el compresor en el Punto 4.3 son correctas. Cabe destacar la diferencia que se tiene, tanto en las durezas como en la microestructura, siendo esto provocado por algún cambio en la cantidad de aleantes, así como en el tratamiento térmico que se le ha podido aplicar a la pieza.

## 4.5. Análisis de la fractura del álabe

### 4.5.1. Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo (FESEM) de la fractura

La inspección macroscópica no aporta información de la fractura, por lo que se procede a la inspección microscópica. Usando la misma técnica que en el Punto 4.3.2, se puede evaluar con mayor detalle el fallo producido en el alabe. En la Figura 60, se muestra toda la zona de la fractura del álabe:

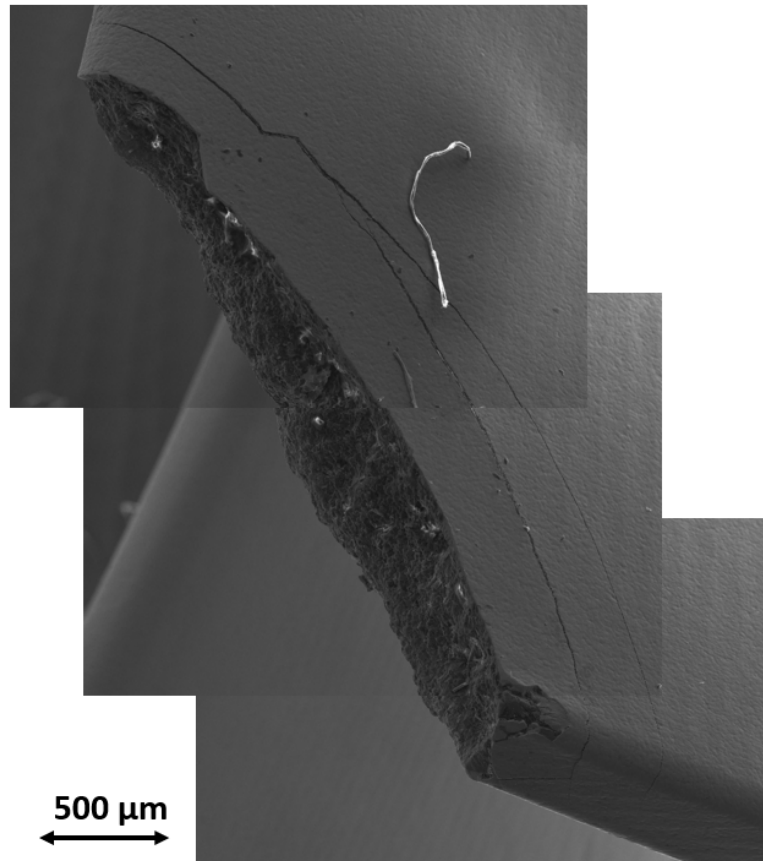


Figura 60: Fractura completa obtenida mediante FESEM.

Como se puede apreciar, se trata de una fractura frágil, ya que no presenta deformación plástica aparente ni desgarros en el material a pesar de la ductilidad que tienen las aleaciones de aluminio. Sin embargo, sí que se tiene una zona más afectada, probablemente siendo esta la zona donde se inició la fractura. También se puede apreciar la presencia de dos grietas paralelas a la zona de fractura.

La Figura 61 muestra en detalle la zona del inicio de las grietas, cerca del borde de salida del álabe. La morfología de esta zona parece indicar que se ha producido un impacto de un objetivo sobre ella.



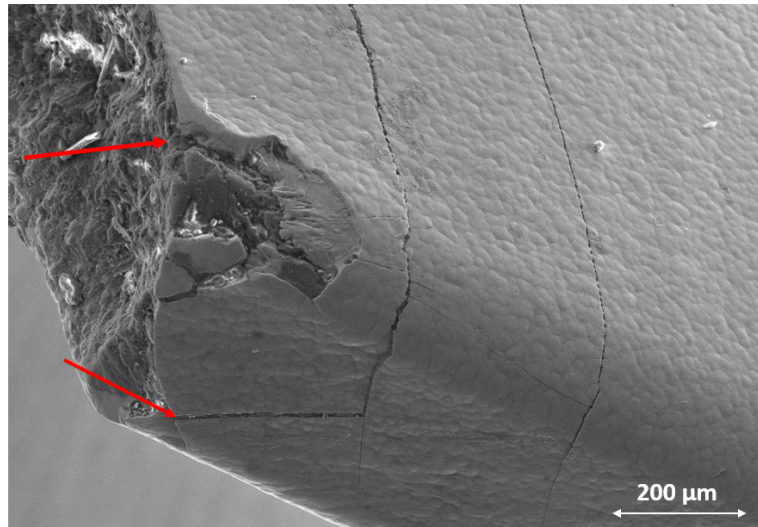


Figura 61: Zona de impacto cerca del borde de salida.

El fallo se produjo cuando el turbogrupo se encontraba en el banco de ensayos del taller. En estos bancos de ensayos es habitual encontrar sepiolita granulada. La sepiolita es un mineral, formado principalmente por oxígeno, silicio y magnesio, que actúa como absorbente universal cuando se tiene en polvo debido a la gran porosidad que presenta el polvo. Por este motivo, es altamente utilizada en talleres e industria ya que permite limpiar fácilmente manchas de aceites y grasas, de una manera muy asequible debido a su bajo precio. En la Figura 62 se pueden observar estos granos con detalle gracias a la técnica FESEM:

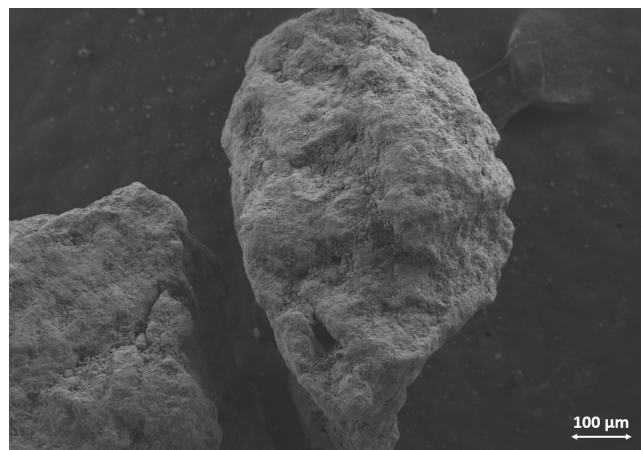


Figura 62: Granos de sepiolita mediante técnica FESEM.

El tamaño de grano de la sepiolita es de  $500 \mu m$ , por lo que encaja la hipótesis de que la fractura se haya producido al impactar un grano de sepiolita con el álabe cuando este estaba siendo ensayado a una velocidad cercana a las 100 000 rpm. Por eso, tan solo uno de los álabes presenta fractura. Es posible que se haya producido transferencia de materia durante el impacto, por ello se realizó un

análisis EDX en la central del impacto, como se muestra en la Figura 63.

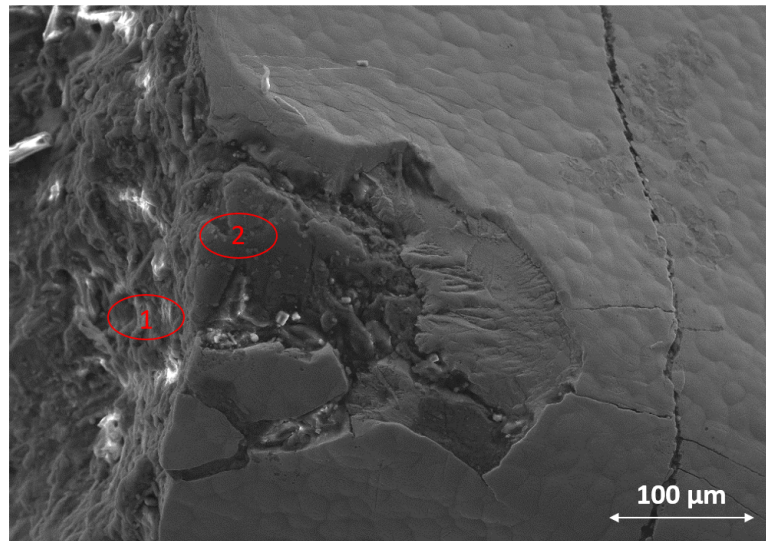


Figura 63: Puntos analizados mediante la técnica EDX.

El análisis obtenido en la zona 1 muestra un 96.21 % de aluminio, 1.55 % de cobre y 1.41 de magnesio, sin embargo, el análisis realizado en la zona 2 muestra un 74.76 % de aluminio, 0.96 % de magnesio, 3.72 % de cobre, 3.03 % de silicio y 3.87 % de oxígeno. A la vista de estos resultados, se puede concluir que la sepiolita impactó en el borde del álabe produciendo su rotura.

En la Figura 64, se aprecia claramente como la grieta avanza de manera intragranular, rompiendo los granos superficiales. La diferente tonalidad de estos granos respecto a la obtenida en el interior de la fractura hace pensar que el álabe tiene un recubrimiento, es por ello, que se realiza un análisis EDS a la zona marcada. El resultado revela un 85 % de Ni y un 7.6 % de P, siendo el restante C y O, lo que indica que la pieza ha sido níquelada. Probablemente, debido al contenido de fósforo, el recubrimiento se ha depositado químicamente. Estos recubrimientos de níquel buscan mejorar el comportamiento a fluencia de las piezas, al ser una familia de aleaciones que soporta mejor las altas temperaturas. Gracias a este, se reduce considerablemente el alargamiento que puede sufrir la pieza debido al fenómeno de fluencia, evitando de esta forma un impacto con la carcasa cuando se lleva el motor a altas cargas, como se ha indicado en el Punto 3.2.

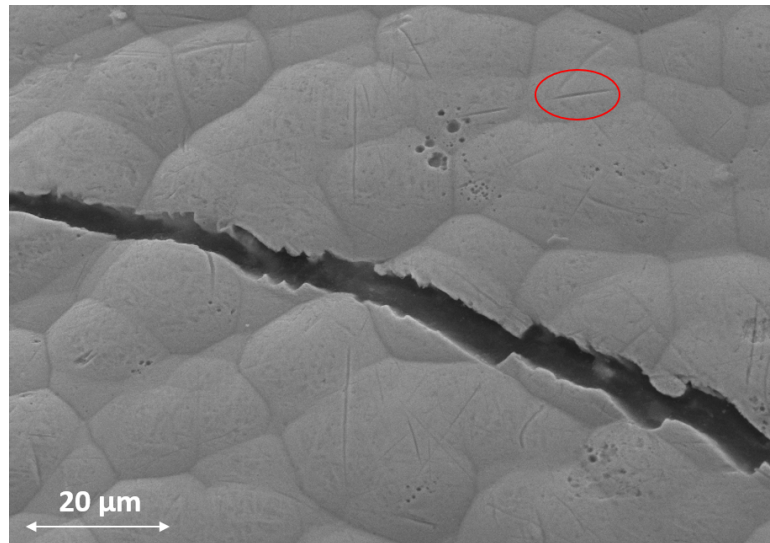


Figura 64: Avance de grieta mediante técnica FESEM.

#### 4.6. Mejoras a realizar y prevención de futuros fallos

En vista de lo expuesto, se plantean ciertas mejoras con tal de mejorar el comportamiento de esta pieza. La fractura fue causada por impacto de objeto extraño, siendo esta una causa poco habitual en estos componentes debido a que el aire de admisión se filtra previo a ser introducido en este componente. Al no ser habitual, las medidas que se pueden tomar para evitar que se puedan dar son muy limitadas, y no aseguran resultados, por lo que focalizar esfuerzo, tiempo y dinero en su prevención no resulta útil.

Dicho esto, al haber fallado esta pieza en el banco de ensayo, se pueden plantear ciertas mejoras a realizar, tanto en la preparación del ensayo como en la instalación. La primera de estas es el uso de una sepiolita de menor gramaje, ya que si se tiene un menor tamaño de grano, el daño que puede causar es mucho menor al tener una menor energía en el momento del impacto contra la pieza.

La segunda de las medidas que se plantea es el uso del banco a una menor carga durante cierto tiempo. Esto permitirá, en caso de que algún objeto extraño no se haya filtrado correctamente, que impacte contra el turbogruppo cuando este esté girando a un régimen de giro mucho menor, lo que evitará que el impacto cause una fractura o daños similares al turbogruppo.

Por último, se plantea una revisión y cambio del filtro de aire con mayor frecuencia, ya que la sepiolita podría haberse introducido en el turbogruppo debido a un mal filtrado del aire.

## 5. Conclusiones

La preocupación creciente por el futuro del planeta y la necesidad de reducir las emisiones contaminantes en el sector del transporte han llevado a una mayor conciencia sobre la importancia de adoptar medidas sostenibles. En este contexto, este Trabajo de Fin de Grado se ha centrado en contribuir a este propósito mediante la revisión y análisis de estrategias para optimizar la eficiencia de los vehículos y reducir su impacto ambiental. La optimización de los vehículos y tecnologías actuales, particularmente mediante el uso de la sobrealimentación en los motores, ha surgido como una solución clave para enfrentar los desafíos de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes. Además, se ha enfatizado la importancia de aprovechar al máximo la vida útil de estos componentes para optimizar la eficiencia y minimizar los costes asociados con su mantenimiento y reemplazo mediante un estudio de los principales fallos en estos componentes.

Los objetivos específicos del trabajo se han centrado en realizar una revisión bibliográfica exhaustiva sobre la sobrealimentación y sus aplicaciones en el sector del transporte, así como en analizar los principales mecanismos de fallo en los compresores de turbogrupos. Gracias a esta revisión, se ha analizado un caso de estudio, en el que se ha buscado determinar la causa de fallo de un turbogrupo que presentó una fractura en el rodete del compresor durante su ensayo. De este caso se han extraído las siguientes conclusiones:

- Se ha determinado que la aleación del compresor pertenece a la serie 2000.
- La causa de la fractura del álabe es por objetos extraños, al impactar un grano de sepiolita en el álabe.

Con estas conclusiones, se plantean las siguientes medidas con tal de evitar que el fallo vuelva a darse:

- Uso de una sepiolita de menor gramaje para evitar un fallo catastrófico al impactar con el turbogrupo.
- Trabajar con el banco de ensayos a menor carga durante cierto tiempo para que en el caso de que haya alguna partícula el régimen de giro del compresor sea menor.
- Revisiones y cambios más frecuentes del filtro de admisión.

Por tanto, este Trabajo de Fin de Grado ha abordado de manera significativa las preocupaciones actuales relacionadas con el cambio climático y la sostenibilidad en el sector del transporte. La combinación de la revisión bibliográfica y el análisis de mecanismos de fallo ha proporcionado una visión

integral para comprender la importancia de la sobrealimentación y el rendimiento de sus componentes. Con un enfoque en los ODS pertinentes, este trabajo contribuye al esfuerzo global de crear un futuro más sostenible y responsable para las generaciones presentes y futuras.

### **5.1. Mejoras y trabajos futuros**

Como posibles mejoras de este trabajo y trabajos futuros, se plantea la posibilidad de un estudio más exhaustivo de fallos en compresores de turbogrupos mediante casos prácticos. También resultaría interesante realizar estudios sobre materiales y fallos en la turbina, ya que es un componente que presenta modos de fallo completamente diferentes, causados principalmente por altas temperaturas, ambientes corrosivos y sobrecargas.

Un enfoque que complementaría este trabajo es el uso de simulaciones, especialmente mediante elementos finitos (FEM). Gracias a estas herramientas, se pueden estudiar de una forma muy completa los esfuerzos a los que se ven sometidos estos componentes. De la misma forma, estas herramientas permiten plantear un rediseño de las mismas y comprobar su viabilidad, lo que podría aplicar al rodete para hacerlo más resistente a impacto por objeto extraños.

## 6. Bibliografía

- [1] Organización de las Naciones Unidas. *Objetivos y metas de Desarrollo Sostenible*. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/#>.
- [2] F. Payri y J.R. Serrano. «Motores de combustión interna alternativos». En: Universitat Politècnica de València, 2011. Cap. Sobrealimentación, págs. 272-322.
- [3] Marty Staggs. *History of Turbocharging*. 2011. URL: <https://www.turbosmart.com/news/history-of-turbocharging/>.
- [4] A. Kuzstelan et al. «A Review of Novel Turbocharger Concepts for Enhancements in Energy Efficiency». En: *International Journal of Thermal and Environmental Engineering* 2 (2 dic. de 2010), págs. 75-82. ISSN: 19237308. DOI: 10.5383/ijtee.02.02.003.
- [5] Colin Cutler. *How a turbocharger works*. 2023. URL: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/how-an-aircraft-turbocharger-system-works-on-aircraft-high-alt/>.
- [6] Michael Fernie. *What Do Supercharger Capacity Ratings Actually Mean?* 2016. URL: <https://www.carthrottle.com/post/what-do-supercharger-capacity-ratings-actually-mean/>.
- [7] Diego López Donaire. *El turbo, ese gran invento (Parte I)*. 2021. URL: <https://www.actualidadmotor.com/el-turbo-ese-gran-invento-parte-i/>.
- [8] Alusine Barrie et al. «A STUDY OF TURBOCHARGER AND ITS APPLICATIONS». En: (2013).
- [9] Jesse Crosse. *Under the skin: Why electric superchargers are gaining ground*. 2019. URL: <https://www.autocar.co.uk/opinion/technology/under-skin-why-electric-superchargers-are-gaining-ground>.
- [10] Mohd Muqem et al. «Turbocharging of Diesel Engine for Improving Performance and Exhaust Emissions: A Review». En: *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)* e-ISSN 12 (4), págs. 22-29. DOI: 10.9790/1684-12432229. URL: [www.iosrjournals.org](http://www.iosrjournals.org).
- [11] TMI. *Screw compressors: Operation and Maintenance*. 2015. URL: <https://www.turbomachinerymag.com/view/screw-compressors-operation-and-maintenance>.
- [12] Vijay Tharad. *6 DIFFERENT TYPES OF TURBOCHARGER*. 2018. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/6-different-types-turbocharger-vijay-tharad/>.

- [13] FullThrottle. *Full Throttle Speed 1000+HP Street Car Single Turbo Package - Stage 2 (VS Racing)*. 2023. URL: <https://fullthrottlespeed.com/products/full-throttle-speed-1000-hp-street-car-single-turbo-package-stage-2-vs-racing>.
- [14] David Pratte. *A Look At Twin Scroll Turbo System Design - Divide And Conquer?* 2009. URL: <https://www.motortrend.com/how-to/modp-0906-twin-scroll-turbo-system-design/>.
- [15] S. Dasgupta, P. Sarmah y P. P. Borthakur. «Application of variable geometry turbine turbochargers to gasoline engines-A review». En: vol. 943. IOP Publishing Ltd, nov. de 2020. DOI: 10.1088/1757-899X/943/1/012010.
- [16] Apostolos Pesiridis et al. «Material Selection for Dynamic Variable Geometry Turbocharger Flow Control Application». En: *Journal of Automotive Engineering and Technologies* 4 (2015), págs. 68-81. ISSN: 2146-9067. URL: [www.academicpaper.org](http://www.academicpaper.org).
- [17] Cecile Pera. *VGT Turbo for Gasoline Engines*. 2021. URL: <https://www.oroovel.net/insights/vgt-turbo>.
- [18] Edgar J Gunter. *FAILURE ANALYSIS OF 2 LITER ENGINE TURBOCHARGERS*. URL: <https://dyrobes.com>.
- [19] P W Schilke. *Advanced Gas Turbine Materials and Coatings*. 1995.
- [20] Hiroshi Yamagata. «11 - The turbocharger and the exhaust manifold». En: *The Science and Technology of Materials in Automotive Engines*. Ed. por Hiroshi Yamagata. Woodhead Publishing, 2005, págs. 248-260. ISBN: 978-1-85573-742-6. DOI: <https://doi.org/10.1533/9781845690854.248>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781855737426500117>.
- [21] JSTuned. *VW GTI Turbocharger Inlet Pipe*. 2022. URL: <https://jst-performance.com/products/afe-15-19-vw-gti-turbocharger-inlet-pipe-red>.
- [22] M. F. Moreira. «Failure analysis in aluminium turbocharger wheels». En: *Engineering Failure Analysis* 61 (mar. de 2016), págs. 108-118. ISSN: 13506307. DOI: 10.1016/j.engfailanal.2015.11.024.
- [23] N Sathishkumar et al. «Design and Analysis of an Impeller of a Turbocharger». En: *International Journal of Research and Review (ijrrjournal.com)* 7 (2020), pág. 4. ISSN: 2454-2237.
- [24] Mohd Fahrul Hassan et al. «Simulation on the Performance of a Driven Fan Made by Polyester/Epoxy interpenetrate polymer network (IPN)». En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 226 (ago. de 2017), pág. 012017. DOI: 10.1088/1757-899X/226/1/012017.

- [25] L A Martynyuk et al. «The study of the applicability of polymer composite materials for the manufacture of the impeller of a centrifugal compressor». IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1060/1/012026>.
- [26] VMS Group. *Diffuser For Turbocharger NR20/R Ship engine Spare parts*. 2023. URL: <https://vms.dk/recon-parts/compressor-diffuser-p-n-52-p8-24-16/>.
- [27] Krishnan K. Sankaran y Rajiv S. Mishra. «Aluminum Alloys». En: Elsevier, 2017, págs. 57-176. DOI: 10.1016/B978-0-12-812068-2.00004-7. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128120682000047>.
- [28] European Aluminum. *Aluminum in Use*. 2021. URL: <https://european-aluminium.eu/about-aluminium/aluminium-in-use/>.
- [29] J.R. Davis. «Aluminum and Aluminum Alloys Introduction and Overview». En: *ASM International* (2001). DOI: 10.1361/autb2001p351. URL: [www.asminternational.org](http://www.asminternational.org).
- [30] Joel J y M Anthony Xavier. *Aluminium Alloy Composites and its Machinability studies; A Review*. 2018, págs. 13556-13562. URL: [www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853](http://www.sciencedirect.comwww.materialstoday.com/proceedings2214-7853).
- [31] Vijay Kumar Thakur. *Advances in Processing of Lightweight Metal Alloys and Composites*. Springer, 2023, págs. 77-80.
- [32] Fast Radius. *Decoding the aluminum alloy numbering system*. 2021. URL: <https://www.fastradius.com/resources/decoding-aluminum-alloy-numbering/%5C#:~:text=The%5C%20wrought%5C%20aluminum%5C%20series%5C%20names,specific%5C%20alloys%5C%20in%5C%20the%5C%20series>.
- [33] Palanisamy Shanmugasundaram y Arne K. Dahle. «Heat Treatment of Aluminum Alloys». En: *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* (2018). DOI: 10.1016/B978-0-12-803581-8.03374-9. URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128035818033749>.
- [34] Mariola Roldán Galán. «Técnicas de Obtención de Grano Metalográfico en el Rango Milimétrico y Micrométrico Mediante Diversos Tratamientos Térmicos y Mecánicos». En: 2007. Cap. Capítulo 1: Tratamientos térmicos en el Aluminio.
- [35] David Jerónimo Busquets Mataix. *Tema 4: Aleaciones de aluminio*. 2021.
- [36] Qianfan Xin. «Diesel Engine System Design». En: Woodhead Publishing, 2013. Cap. 2 - Durability and reliability in diesel engine system design, págs. 113-202.



- [37] Amit Bhaduri. *Mechanical Properties and Working of Metals and Alloys*. Vol. 264. Springer, 2018. ISBN: 978-981-10-7208-6. URL: <http://www.springer.com/series/856>.
- [38] Joachim Roesler, Harald Harders y Martin Baeker. *Mechanical Behaviour of Engineering Materials*. Springer, 2007. ISBN: 978-3-8351-0008-4.
- [39] Aceros Levinson. *Fracturas por fatiga*. 2017. URL: <https://www.aceroslevinson.com/2017/03/fracturas-por-fatiga/>.
- [40] DIMM - Departamento de Ingeniería Mecánica y de Materiales. *Comportamiento de materiales en aplicaciones industriales: modos de fallo*.
- [41] D. McLean. «The physics of high temperature creep in metals». En: (1966).
- [42] Sundar. *What is Creep and Stress Rupture Of Metals?* 2022. URL: [https://extrudesign.com/what-is-creep-and-stress-rupture-of-metals/?expand\\_article=1](https://extrudesign.com/what-is-creep-and-stress-rupture-of-metals/?expand_article=1).
- [43] Ahmed Farhan et al. *Analyzing Failure Modes of Turbochargers for Engine-based Power Plants*. 2022.
- [44] «Fault tree analysis and failure diagnosis of marine diesel engine turbocharger system». En: *Journal of Marine Science and Engineering* 8 (12 dic. de 2020), págs. 1-19. ISSN: 20771312. DOI: 10.3390/jmse8121004.
- [45] MAHLE. *Turbocharger: Damage profiles, causes, and prevention*. Brochure. URL: <https://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-north-america/pdfs-&-thumbnails/catalogs-and-literature/turbochargers/turbo-damage-brochure-mo-2-612.pdf>.
- [46] Bradley Iger. *Turbocharger Damage: The Most Common Causes And How To Avoid Them*. 2017. URL: <https://www.engine-labs.com/engine-tech/power-adders/turbocharger-damage-common-causes-avoid/>.
- [47] Jan Tommy Gravdahl y Olav Egeland. *Centrifugal Compressor Surge and Speed Control*. 1999, pág. 567.
- [48] Fisher Controls International LLC. *Increased Plant Availability Through Proper Anti-Surge Valve Selection*. Inf. téc. 2017.
- [49] AO. Tiseira. «Caracterización experimental y modelado de bombeo en compresores centrífugos de sobrealimentación». En: (2008). URL: <http://hdl.handle.net/10251/1974>.
- [50] MotorReviewer. *Renault R9M 1.6 dCi 130 Engine Specs, Problems & Reliability*. 2022. URL: [https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine\\_id=51](https://www.motorreviewer.com/engine.php?engine_id=51).

- [51] Universidad Politécnica de Valencia. *Microscopía electrónica de barrido de emisión de campo*. 2020. URL: <https://www.upv.es/entidades/SME/info/859071normalc.html#:~:text=El%5C%20microscopio%5C%20electr%5C%C3%5CB3nico%5C%20de%5C%20barrido,rango%5C%20de%5C%20energ%5C%C3%5C%ADa%5C%20mucho%5C%20mayor>.
- [52] Universidad Politécnica de Valencia. *Microscopio Electrónico de Barrido de Emisión de Campo (FESEM)*. 2020. URL: <https://www.upv.es/entidades/SME/info/854395normalc.html>.
- [53] Infinitia Industrial Consulting. *Ensayo de dureza Vickers: ¿En qué consiste?* 2021. URL: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/ensayo-dureza-vickers/>.
- [54] Stahlhandel Gröditz GmbH. *Hardness comparison table*. URL: <https://www.stahlportal.com/en/hardness-comparison-table/>.



## 7. Pliego de condiciones

En el presente pliego de condiciones se recopilan los aspectos referentes a las condiciones facultativas, técnicas y legales relativas al desarrollo de este Trabajo Final de Grado. Las condiciones económicas no serán consideradas debido a las características de este trabajo.

### 7.1. Condiciones generales

En este proyecto se observarán en todo momento durante su ejecución las siguientes normas y reglamentos:

- Directiva 2006/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo relativa a las máquinas.
- Ley 31/1995, de 8 de noviembre, de prevención de Riesgos Laborales.
- Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo.
- Real Decreto 1644/2008, de 10 de octubre, por el que se establecen las normas para la comercialización y puesta en servicio de las máquinas.

#### Normas UNE

- Norma UNE 100-011-91: Climatización. La ventilación para una calidad aceptable del aire en la climatización de los locales.

### 7.2. Condiciones particulares

#### 7.2.1. Condiciones técnicas

##### 7.2.1.1 Condiciones de los materiales

###### Embutidora Struers Labo-Press-3

El nivel de ruido de la máquina es de 60 dB a una distancia de 1 metro, medidos cuando el motor está en funcionamiento.

###### Desbastadora Labopol-21

El nivel de ruido de la máquina es de 58 dB a una distancia de 1 metro, medidos cuando la máquina está en funcionamiento.

###### Pulidora Laboforce-3

El nivel de ruido de la máquina es de 60 dB a una distancia de 0.25 metros, medidos cuando la máquina está en funcionamiento.

### 7.2.1.2 Condiciones de ejecución

#### Desbastadora Labopol-21

Procedimiento explicado en el Punto 4.3.2.

#### Pulidora Laboforce-3

Procedimiento explicado en el Punto 4.3.2.

### 7.2.1.3 Mantenimiento

#### Embutidora Struers Labo-Press-3

- Mantenimiento diario: Limpiar las superficies accesibles con un paño húmedo
- Mantenimiento mensual: Después de embutir, la resina curada debe limpiarse de inmediato, para evitar dañar la máquina.

#### Desbastadora Labopol-21

- Mantenimiento diario: Limpiar las superficies inferiores al papel de lija con papel, con tal de eliminar los restos metálicos y de resina que hayan podido quedar.

#### Pulidora Laboforce-3

- Retirar el disco de pulido una vez finalizado y limpiar con agua y jabón todas las superficies para eliminar los restos de pasta de pulido que haya podido quedar.

### 7.2.2. Condiciones facultativas

El promotor de este Proyecto Final de Grado es el Departamento de Ingeniería Mecánica y de los Materiales, entidad perteneciente a la Universitat Politècnica de València, representado por Rut Benavente Martínez.

El proyectista es Francesc Gimeno Ureña, alumno del Grado de Ingeniería Aeroespacial. Este está condicionado a cumplir con las siguientes obligaciones:

- Desarrollar el proyecto cumpliendo la legislación vigente relativa a los derechos de autor.
- Cumplir la normativa en relación con los trabajos de fin de grado impuesta por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño y la Universitat Politècnica de Valencia.
- Usar el equipo y material de laboratorio cumpliendo la normativa y protocolos de seguridad especificados.

- Ejecutar los procedimientos que las promotoras del proyecto consideren necesarias para un desarrollo correcto del proyecto.
- Comunicar a las promotoras la evolución del proyecto periódicamente y cuando estas lo requieran.
- Reformular las condiciones iniciales del proyecto siempre y cuando las promotoras lo recomienden.
- Colaborar en la resolución de problemas que se puedan dar a lo largo del desarrollo del proyecto.

### **7.2.3. Condiciones legales**

Este Trabajo Final de Grado debe llevarse a cabo cumpliendo con la normativa establecida en el Real Decreto Legislativo 1/996, del 12 de abril, del Ministerio de Cultura, por el que se aprueba la Ley de Propiedad Intelectual. En esta se regulan y clarifican las disposiciones legales sobre la materia B.O.E 22/4/1996. A su vez, se deben cumplir en este proyecto con sus cambios posteriores.

Específicamente deben satisfacerse las condiciones del artículo 32, en el que se expone las condiciones referentes a la citación de fragmentos de obras ajenas, debiendo tener la misma fines docentes o de investigación exclusivamente y haciéndose siempre sobre obras ya divulgadas. De esta forma, los derechos de autor de cada fuente citada en la bibliografía de este Trabajo Final de Grado son reconocidas, además de las marcas registradas que se mencionan en el mismo.



## 8. Presupuesto

Es presente presupuesto pretende cuantificar el coste que ha implicado llevar a cabo este Trabajo de Fin de Grado. Con este fin, se ha adecuado el método de cálculo de los costes a las características específicas de un trabajo de este tipo.

### 8.1. Coste de equipos

#### 8.1.1. Amortización de los equipos

Como norma general, el coeficiente anual de amortización máximo para la maquinaria es de un 12%, es decir, aproximadamente 8 años hasta conseguir la amortización total del equipo. Para los equipos electrónicos, este coeficiente es de un 20% como máximo, por lo que el equipo se amortiza totalmente en 5 años.

Tabla 7: Coste unitario de los equipos.

COSTES UNITARIOS DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS					
Ref.	Descripción	Precio Equipo (€)	Amort. (años)	Uso (h/año)	Coste (€/h)
1.1	Balanza analítica Sartorius YDK01	8000.00	8.3	502	1.92
1.2	Embutidora Struers Labo-Press-3	33000.00	8.3	753	5.28
1.3	Pulidora Labo-Force 3	6000.00	8.3	825	0.87
1.4	Desbastadora Labo-Pol-21	6000.00	8.3	730	0.99
1.5	Microdurómetro HVM-20	6590.00	8.3	780	1.02
1.6	Ordenador personal	1440.00	5	3650	0.08



Tabla 8: Coste total de los equipos utilizados.

COSTES PARCIALES DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS					
Ref.	Descripción	UDS.	Cantidad	Coste (€/h)	Coste parcial (€)
1.1	Balanza analítica Sartorius YDK01	h	2	1.92	3.84
1.2	Embutidora Struers Labo-Press-3	h	1	5.28	5.28
1.3	Pulidora Labo-Force 3	h	4	0.87	3.48
1.4	Desbastadora Labo-Pol-21	h	5	0.99	4.95
1.5	Microdurómetro HVM-20	h	4	1.02	4.08
1.6	Ordenador personal	h	1000	0.08	80.00
<b>COSTE TOTAL DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS</b>					<b>101.63</b>

## 8.2. Coste de la mano de obra

El coste unitario de la mano de obra se ha obtenido a través del documento de recomendaciones de elaboración de presupuestos en actividades de I+D+I de la UPV. El desarrollo de este proyecto no hubiera sido posible sin la colaboración de la tutora de este trabajo y el técnico de laboratorio. Por ello, también se consideran en el presupuesto. La duración estimada del desarrollo es de 300 h, ya que el trabajo representa una carga de 12 ECTS, equivaliendo cada ECTS a 25 h de trabajo.

Tabla 9: Coste unitario de la mano de obra.

COSTE UNITARIO DE LA MANO DE OBRA				
Ref.	Descripción	Coste total (€/año)	Jornada (h/año)	Coste (€/h)
2.1	Ingeniero Aeroespacial	41400.00	1840	22.50
2.2	Técnico de laboratorio	38824.00	1840	21.10
2.3	Profesor y Doctor Titular	74520.00	1840	40.50

Tabla 10: Coste total de la mano de obra.

COSTE UNITARIO DE LA MANO DE OBRA					
Ref.	Descripción	UDS	Cantidad	Coste (€/h)	Coste Parcial
2.1	Ingeniero Aeroespacial	h	300	22.50	6750.00
2.2	Técnico de laboratorio	h	5	21.10	105.50
2.3	Profesor y Doctor Titular	h	50	40.50	2025.00
<b>COSTE TOTAL DE LA MANO DE OBRA</b>					<b>8880.50</b>

### 8.3. Servicio técnicos

El ensayo de microscopía de barrido de emisión de campo y detección de energía dispersiva de Rayos X son servicios técnicos contratados.

Tabla 11: Coste unitario y total de los servicios técnicos.

COSTE UNITARIO DE LOS SERVICIOS TÉCNICOS		
Ref.	Descripción	Coste (€/h)
3.1	Hora en el servicio de FESEM	25.00
3.2	Hora en el servicio de detección de energía dispersiva de Rayos X	25.00

COSTE PARCIAL DE LOS SERVICIOS TÉCNICOS					
Ref.	Descripción	UDS	Cantidad	Coste (€/h)	Coste parcial (€)
3.1	Hora en el servicio de FESEM	h	6	25.00	150.00
3.2	Hora en el servicio de detección de energía dispersiva de Rayos X	h	3	25.00	75.00
COSTE TOTAL DE LOS SERVICIOS TÉCNICOS					225

#### 8.4. Presupuesto completo

Una vez calculados los costes a lo largo del proyecto, se calculan los siguientes costes para obtener el coste final de este Trabajo de Fin de Grado:

1. **Presupuesto de Ejecución Material (PEM):** el Presupuesto de Ejecución Material se corresponde con el sumatorio de los costes definidos anteriormente: equipos, mano de obra y servicios técnicos contratados.
2. **Presupuesto de Ejecución por Contrata (PEC):** el Presupuesto de Ejecución por Contrata consiste en la suma del Presupuesto de Ejecución Material, los gastos generales, y el beneficio industrial. Dada la naturaleza académica del proyecto, se prescinde de la parte del beneficio industrial, y se establecen unos gastos generales del 15% del PEM para el mantenimiento de las instalaciones del departamento, personal administrativo, etc.
3. **Presupuesto Base de Licitación:** el Presupuesto Base de Licitación se forma al añadir el Impuesto al Valor Añadido al Presupuesto de Ejecución por contrata. El IVA correspondiente a las actividades de investigación y desarrollo experimental en ciencias naturales y técnicas es del 21%.

Dicho esto, los costes son:

Tabla 12: Coste total del Trabajo de Fin de Grado.

Ref.	Descripción	Coste (€)
E	Equipos utilizados	101.63
MO	Mano de obra	8880.50
ST	Servicios técnicos	225.00
Presupuesto de Ejecución Material		<b>9207.13</b>

Presupuesto de Ejecución Material	9207.13
Gastos generales (15 %)	1381.07
Presupuesto de Ejecución por Contrata	<b>10588.20</b>

Presupuesto de Ejecución por Contrata	10588.20
IVA (21 %)	2223.52
Presupuesto Base de Licitación	<b>12811.72</b>

De esta forma, el coste total del proyecto, es decir, el Presupuesto Base de Licitación, asciende a la cuantía de **DOCE MIL OCHOCIENTOS ONCE EUROS Y SETENTA Y DOS CÉNTI-MOS (12811.72 €)**

