



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



**ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

**Departamento: Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación**

**Área de Conocimiento: Ingeniería de los Procesos de Fabricación**

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

**Análisis de la influencia de los parámetros de corte sobre el comportamiento a fatiga de piezas torneadas en seco de la aleación de titanio Ti6Al4V de uso aeronáutico.**

Grado en

Ingeniería mecánica

Autor: Andrea González García

Tutor: Sergio Martín Béjar

Cotutor: Francisco Javier Trujillo Vilches

MÁLAGA, noviembre de 2.022

# AGRADECIMIENTOS

A mi familia, en especial a mi padre, por su continuo apoyo y paciencia, y a mi mayor apoyo, mi hermana, por escuchar todas mis quejas y vivir este TFG casi con la misma intensidad que yo.

A mi tutor, Sergio, por guiarme y tener toda la paciencia del mundo conmigo.

A Manolo, por haberme ayudado siempre que lo he necesitado aun estando él ocupado.

Por último, a Sara, una gran amiga, la cual me ha ayudado y enseñado mucho durante la realización de este trabajo.

# RESUMEN

El objetivo principal de este trabajo es analizar de la influencia de los parámetros de corte sobre el comportamiento a fatiga de piezas torneadas en seco de la aleación de titanio Ti6Al4V de uso aeronáutico. Se ha elegido este tema debido a la importancia del estudio del comportamiento en fatiga de este material, el cual cada vez es más usado en aeronáutica, y al desconocimiento existente de su comportamiento, siendo la fatiga, por motivos de seguridad uno de los fenómenos más importantes a conocer.

Para la realización de este trabajo se han ensayado 48 probetas de Ti6Al4V, las cuales han sido mecanizadas con distintos valores de avance y velocidad de corte. Se ha realizado un control dimensional, estudio de la rugosidad superficial y desviaciones de redondez, rectitud y cilindridad antes de someterlas al ensayo de fatiga.

Una vez realizados todos los ensayos, se ha realizado una evaluación sobre la influencia de los distintos parámetros de corte tanto en las desviaciones como en el comportamiento a fatiga, para finalmente llegar extraer conclusiones, al igual que establecer posibles líneas futuras de estudio relacionadas con el tema de este trabajo.

Palabras clave: Ti6Al4V; Mecanizado; Torneado; Desviaciones geométricas; Desviaciones macrogeométricas; Desviaciones microgeométricas; Rugosidad; Redondez; Rectitud; Cilindridad; Fatiga rotativa; Integridad superficial; Parámetros de corte; Avance; Velocidad de corte.

# Índice general

## Índice

|  |    |
|--|----|
| Índice de tablas .....                                 | 8  |
| Índice de figuras .....                                | 9  |
| 1. Introducción .....                                  | 11 |
| 1.1. Introducción.....                                 | 12 |
| 1.2. Objetivos.....                                    | 13 |
| 2. Antecedentes.....                                   | 15 |
| 2.1. El mecanizado .....                               | 16 |
| 2.1.1. <i>Maquinabilidad</i> .....                     | 18 |
| 2.1.2. <i>Torneado</i> .....                           | 20 |
| 2.1.2.1. Parámetros de corte .....                     | 22 |
| 2.2. Integridad superficial .....                      | 24 |
| 2.2.1. <i>Desviaciones geométricas</i> .....           | 25 |
| 2.2.1.1. Desviaciones macrogeométricas.....            | 25 |
| 2.2.1.2. Desviaciones microgeométricas.....            | 29 |
| 2.2.2. <i>Comportamiento a fatiga</i> .....            | 30 |
| 2.3. Aleaciones de titanio. Ti6Al4V .....              | 32 |
| 2.3.1. <i>Maquinabilidad del Ti6Al4V</i> .....         | 36 |
| 2.4. Estado del arte .....                             | 36 |
| 3. Metodología experimental .....                      | 39 |
| 3.1. Introducción.....                                 | 40 |
| 3.2. Codificación de las probetas .....                | 40 |
| 3.3. Características geométricas de las probetas ..... | 42 |
| 3.4. Parámetros de corte .....                         | 43 |
| 3.5. Ensayos realizados .....                          | 43 |
| 3.5.1. Control dimensional .....                       | 43 |
| 3.5.2. Ensayo de desviaciones microgeométricas.....    | 46 |
| 3.5.3. Ensayo de desviaciones macrogeométricas .....   | 50 |
| 3.5.3.1. Desviaciones de redondez. ....                | 54 |
| 3.5.4. Ensayo de fatiga. ....                          | 57 |
| 4. Resultados y .....                                  | 63 |
| conclusiones.....                                      | 63 |
| 4.1. Introducción.....                                 | 64 |

---

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 4.2.   | Análisis del control dimensional. ....              | 64 |
| 4.3.   | Análisis de las desviaciones microgeométricas. .... | 66 |
| 4.4.   | Análisis de las desviaciones macrogeométricas. .... | 70 |
| 4.4.1. | Redondez .....                                      | 70 |
| 4.4.2. | Rectitud.....                                       | 74 |
| 4.4.3. | Cilindricidad .....                                 | 78 |
| 4.5.   | Análisis del comportamiento a fatiga.....           | 82 |
| 4.6.   | Conclusiones .....                                  | 88 |
| 4.7.   | Líneas futuras de investigación .....               | 89 |
| 5.     | Bibliografía .....                                  | 91 |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabla 1. Mecanizado: Primera clasificación.</b> .....   | 16 |
| <b>Tabla 2. Mecanizado: Segunda clasificación.</b> .....   | 16 |
| <b>Tabla 3. Mecanizado: Tercera clasificación.</b> .....   | 17 |
| <b>Tabla 4. Criterios de maquinabilidad [12].</b> .....  | 19 |
| <b>Tabla 5. Variables de entrada y salida.</b> .....   | 19 |
| <b>Tabla 6. Ventajas e inconvenientes del torneado.</b> .....  | 22 |
| <b>Tabla 7. Movimiento pieza-herramienta en torneado [6].</b> .....  | 23 |
| <b>Tabla 8. Propiedades y variables de la integridad superficial [13].</b> .....   | 25 |
| <b>Tabla 9. Desviaciones geométricas [28].</b> .....   | 27 |
| <b>Tabla 10. Desviaciones macrogeométricas [29], [30].</b> .....   | 28 |
| <b>Tabla 11. Propiedades químicas del Titanio</b> .....  | 33 |
| <b>Tabla 12. Tipos de elementos aleantes en aleaciones de titanio</b> .....  | 34 |
| <b>Tabla 13. Propiedades del Ti6Al4V[21]</b> .....   | 35 |
| <b>Tabla 14. Parámetro de corte utilizados en el mecanizado de las probetas.</b> .....   | 43 |
| <b>Tabla 15. Control geométrico de la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1.</b> .....                                     | 45 |
| <b>Tabla 16. Número de mediciones realizadas en la medidora de forma.</b> .....  | 53 |
| <b>Tabla 17. Ejemplo de tabla de control numérico de la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1.</b> .....                   | 65 |
| <b>Tabla 18. Diámetros medios en función de la zona y parámetros de corte.</b> .....   | 66 |
| <b>Tabla 19. Ejemplo de tabla de ensayo de rugosidad correspondiente a la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1.</b> ..... | 67 |
| <b>Tabla 20. Valores medios de Ra y Rz</b> .....   | 68 |
| <b>Tabla 21. Valores medios de RON.</b> .....  | 71 |
| <b>Tabla 22. Valores medios de STR.</b> .....  | 75 |
| <b>Tabla 23. Valores de CYL.</b> .....   | 79 |
| <b>Tabla 24. Valores medios de CYL en función de a y Vc.</b> .....   | 82 |
| <b>Tabla 25. Secciones de fractura plástica por fatiga para distintas Vc y a.</b> .....  | 84 |
| <b>Tabla 26. Valores medios de los resultados del ensayo de fatiga.</b> .....  | 85 |

## Índice de figuras

- Figura 1.** Proceso de torneado, movimientos de corte. 18
- Figura 2.** (a) Torno frontal. (b) Torno paralelo. (c) Torno vertical. (d) Torno multihusillos. 21
- Figura 3.** Operaciones de torneado [19]. 22
- Figura 4.** Movimientos de corte en un proceso de cilindrado [22]. 23
- Figura 5.** Desviaciones dimensionales. 26
- Figura 6.** Ejemplo de tolerancias geométricas. 29
- Figura 7.** Esquema de perfil primario [31]. 29
- Figura 8.** Fallo por fatiga. Etapas [33]. 31
- Figura 9.** Ejemplo de diagrama de Wöhler [35] . 32
- Figura 10.** Codificación de las probetas. 41
- Figura 11.** Ejemplo de código de nuestras probetas. 42
- Figura 12.** Esquema de la probeta y sus dimensiones. [13] 42
- Figura 13.** Zona empotrada, calibrada y apoyada de las probetas. 42
- Figura 14.** Esquema de las posiciones para el control geométrico 44
- Figura 15.** Micrómetro de exteriores usado para el control geométrico 44
- Figura 16. a)** Probeta colocada en el soporte. **b)** Soporte para la colocación de las probetas. 45
- Figura 17.** Soporte del sistema de avance del rugosímetro. 46
- Figura 18.** Calzos en V. 46
- Figura 19.** Ejemplo de gráfica de perfil de rugosidad correspondiente a la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1. 47
- Figura 20.** Configuración del programa SurfTest SJ USB Communication Tool. 48
- Figura 21.** Pantalla principal del programa SurfTest SJ USB Communication Tool. 48
- Figura 22.** Montaje rugosímetro. 49
- Figura 23. a)** Banda naranja, el palpador no está en contacto con la probeta. **b)** Banda azul, el palpador está en contacto con la probeta y se puede hacer la medición. 49
- Figura 24.** Ampliación del palpador y la probeta. 50
- Figura 25.** Marcas en la base y dorso de las probetas. 50
- Figura 26.** Medidora de forma ACCRETECH. 51
- Figura 27.** Plantilla para la medición de las desviaciones macrogeométricas. 52
- Figura 28.** Posiciones de medidas de redondez 53
- Figura 29.** Posición de las medidas de Rectitud. 53
- Figura 30.** Medición de la medidora de forma. 54
- Figura 31.** Método del círculo de mínimos cuadrados (LSC). 55
- Figura 32.** Tolerancias de rectitud [27][56]. 56
- Figura 33.** Tolerancia de cilindridad.[57] 57

- Figura 34.** Zonas modificadas antes del ensayo a fatiga. 57
- Figura 35.** Probeta final antes del ensayo a fatiga. 58
- Figura 36.** Colocación de la carga en el ensayo a fatiga. 58
- Figura 37.** Probeta colocada en la máquina de fatiga 59
- Figura 38.** Distancias para el cálculo de la tensión en fatiga 60
- Figura 39.** Grafica de Wohler del Ti6Al4V[59] 60
- Figura 40.** Probeta al finalizar el ensayo de fatiga 61
- Figura 41.** Ejemplo de fractografía de la probeta Ti6Al4V – L01 – B01 – 01CR05 – CN – V075 – A005 – P010 – R2. 61
- Figura 42.** Perfil de rugosidad de la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1. 67
- Figura 43.** Valores de Ra en función del avance. 68
- Figura 44.** Valores de Rz en función del avance. 69
- Figura 45.** Ejemplo de un perfil de redondez. 72
- Figura 46.** RON en función del avance, para  $V_c = 50$  m/min. 72
- Figura 47.** RON en función del avance, para  $V_c = 75$  m/min. 73
- Figura 48.** RON en función del avance, para  $V_c = 100$  m/min. 73
- Figura 49.** Ejemplo de perfil de rectitud. 76
- Figura 50.** STR en función del avance para  $V_c = 50$  m/min. 76
- Figura 51.** STR en función del avance para  $V_c = 75$  m/min. 77
- Figura 52.** STR en función del avance para  $V_c = 100$  m/min. 77
- Figura 53.** Ejemplo de perfil de cilindridad. 79
- Figura 54.** CYL en función del avance para  $V_c = 50$  m/min. 80
- Figura 55.** CYL en función del avance para  $V_c = 75$  m/min. 80
- Figura 56.** CYL en función del avance para  $V_c = 100$  m/min. 81
- Figura 57.** Valores medios de CYL en función del avance y  $V_c$ . 82
- Figura 58.** Caracterización de la sección de rotura plástica por fatiga. 83
- Figura 59.** Número de ciclos en función del avance para cada  $V_c$ . 86
- Figura 60.** Resultados de fatiga en función de la tensión y nº de ciclos. 87
- Figura 61.** Ejemplo de sección de rotura distinta a la teórica. Probeta Ti6Al4V - V100 – A020 – P010 – R1. 87

# 1. Introducción

## 1.1. Introducción

La industria aeronáutica se encarga del diseño, fabricación, mantenimiento y comercialización de distintos tipos de aeronaves que van desde aviación militar hasta vehículos pilotados de forma remota. Es una industria sobre la que existe un interés muy elevado debido a su importante papel en el transporte de personas y mercancía, al igual que debido al impacto económico que genera.

El sector aeronáutico es un sector que actualmente está sufriendo un gran crecimiento y expansión, teniendo de esta forma un gran impacto social y económico. Este impacto se debe entre otros a que es un sector muy competitivo, dado que se centra en un mercado internacional, y en el que se encuentra un elevado nivel tecnológico en la fabricación de productos.

Este sector requiere de trabajadores muy cualificados y de una enorme inversión inicial, lo cual produce un prolongado impacto económico, ya que, los empleados al estar altamente cualificados tendrán salarios elevados, y debido a la gran inversión se asegura demanda laboral a largo plazo.[1]

España es uno de los países con mayor relevancia en el sector aeronáutico, ocupando el puesto 5 a nivel europeo con relación al número trabajadores en el sector y al volumen de ventas.

El sector aeronáutico español ha crecido un 82.2% desde 2011, consiguiendo en 2020 una facturación de casi 11.5 mil millones de euros y habiendo empleado a más de 47.600 personas., suponiendo un 1.5% del PIB español y un 6.8% del PIB industrial español. La inversión realizada en I+D en este sector es entorno al 9% de su facturación. Las investigaciones realizadas en este sector, gracias a la inversión en I+D+i, proporcionan resultados que se utilizan también en otras industrias.[2]

Debido a la importancia crítica de la seguridad en este sector, ya que en caso de accidente los resultados suelen ser catastróficos, existen diferentes organizaciones encargadas de someter a las aeronaves a estrictos controles de seguridad para, de esta forma prevenir y reducir el número de accidentes. Dentro de los requisitos que tienen que cumplir se encuentra la solidez estructural, analizando de esta forma, la resistencia de los materiales y componentes utilizados frente a vibraciones, deterioro medioambiental, fatiga, etc. Siendo por lo tanto de suma importancia conocer el comportamiento de los materiales frente a este tipo de acciones y cargas.[3]

Por otro lado, actualmente el sector industrial debe cumplir con legislaciones medioambientales, las cuales cada vez son más exigentes. Uno de los factores que las empresas deben tener en cuenta es como deshacerse de vertidos, como lubricantes, y materiales sobrantes, correctamente, lo que supone un aumento de los costes de producción. Esto ha sido determinante ya que ha favorecido la tendencia a la fabricación de productos con mecanizado en seco, la cual reduce los costes de eliminación de vertidos, a la vez que hace posible la reutilización de viruta.[4]

Al eliminar los fluidos de corte las condiciones de corte son más agresivas, afectando a la integridad superficial de las piezas, afectando a desviaciones microgeométricas y microgeométricas.

En la industria aeronáutica se utilizan como materiales principales aleaciones ligeras, siendo las más usadas las de titanio y aluminio debido a la buena relación entre sus densidades y sus propiedades mecánicas. Dados los elevados requisitos de seguridad que deben cumplir las aeronaves estos materiales deben tener las propiedades físico-químicas, desviaciones geométricas y acabados superficiales adecuadas. Siendo el comportamiento a fatiga uno de los

factores más importantes a estudiar, ya que el fallo de un material a fatiga es un fallo catastrófico, el cual, en caso de producirse, sobre todo en un vuelo con pasajeros, generaría un gran número de víctimas.

Una vez se ha expuesto todo esto queda más que justificada la necesidad de realizar este Trabajo de Fin de Grado, en el cual se estudia la influencia de los parámetros de corte en el comportamiento a fatiga de piezas torneadas en seco de la aleación de titanio Ti6Al4V.

## 1.2. Objetivos

El objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es estudiar la influencia de los parámetros de corte sobre el comportamiento a fatiga de piezas torneadas en seco de la aleación de titanio Ti6Al4V. Uno de los factores que más afecta al comportamiento a fatiga es el acabado superficial, el cual es determinante en la generación y nucleación de microgrietas. Junto con el comportamiento a fatiga otros factores importantes que envuelven la integridad superficial son las desviaciones geométricas, estando estas divididas en desviaciones microgeométricas, rugosidad superficial y desviaciones macrogeométricas, como pueden ser la cilindridad, redondez o rectitud.

Los parámetros de corte son determinantes dentro de la integridad superficial, por ello se busca analizar cómo afectan estos a las desviaciones geométricas y mediante estas estudiar cómo influyen al comportamiento a fatiga para así poder determinar qué condiciones son las más idóneas a la hora de fabricar piezas que soporten mejor condiciones de servicio más desfavorables. El estudio se va a realizar sobre piezas mecanizadas en seco, ya que es la tendencia actual por motivos ambientales, siendo el proceso de fabricación más agresivo.

Nuestro objetivo principal es estudiar la influencia de los parámetros de corte sobre el comportamiento a fatiga, teniendo como objetivos secundarios los siguientes:

- Estudiar la influencia de los parámetros de corte sobre la rugosidad superficial
- Estudiar la influencia de los parámetros de corte sobre la desviación de redondez
- Estudiar la influencia de los parámetros de corte sobre la desviación de rectitud
- Estudiar la influencia de los parámetros de corte sobre la desviación de cilindridad

Para realizar el estudio adecuado de todos estos parámetros de influencia se establecerá una metodología experimental adecuada que permita, en la realización de futuras investigaciones, reproducir fácilmente los ensayos adaptándolos a diferentes variables de entrada.



# 2. Antecedentes

## 2.1. El mecanizado

El mecanizado consiste en uno o varios procesos de fabricación a partir de los cuales se puede obtener una pieza con unas características geométricas determinadas. Este proceso se basa en el arranque de material, en forma de viruta o partículas, y se lleva a cabo mediante máquinas-herramienta de uso manual o mediante control numérico [5]–[7].

El mecanizado se puede realizar en piezas de diversos materiales como son la madera o el plástico, siendo más común en materiales metálicos.

Existen distintas formas de clasificar los procesos de mecanizado, algunos ejemplos los encontramos en las tablas 1, 2 y 3 [5]–[7].

**Tabla 1. Mecanizado: Primera clasificación.**

| Tipo                   | Descripción  | Ejemplos                           |
|------------------------|--|------------------------------------|
| Con arranque de viruta | El material se elimina en forma de viruta, se utilizan herramientas con uno o varios filos de corte. | Torneado<br>Fresado<br>Taladrado   |
| Sin arranque de viruta | Consiste en “amasar” el material hasta conferirle la forma deseada.                                  | Laminación<br>Trefilado<br>Doblado |
| Por abrasión           | El material se elimina en forma de partículas.   | Bruñido<br>Rectificado             |

**Tabla 2. Mecanizado: Segunda clasificación.**

| Tipo                         | Descripción  |
|------------------------------|--|
| Manual                       | Es realizado manualmente por el operario, se usan herramientas elementales como la lima o sierra.  |
| Mediante máquina-herramienta | Se realiza mediante el uso de máquinas más o menos desarrolladas, en las cuales se pueden programar una o varias variables pudiendo llegar a ser el proceso totalmente automático. |

Tabla 3. Mecanizado: Tercera clasificación.

| Tipo            | Descripción   | Ejemplos   |
|-----------------|---|--|
| Convencional    | Procesos tradicionales de arranque de material. Puede ser por arranque de viruta o por abrasión.                  | Torneado<br>Fresado<br>Brochado<br>Mandrinado                      |
| No convencional | Mecanizados distintos al arranque de viruta y abrasión. Utiliza energía química, térmica o mecánica, entre otras. | Electroerosión<br>Ultrasonidos<br>Chorro de agua<br>Electroquímico |

Aunque se han considerado diversas tipologías de mecanizado, de forma general, se pueden considerar un conjunto de ventajas y de inconvenientes en el proceso de mecanizado, tales como [5], [6]:

Ventajas:

- Elevada precisión
- Bajas tolerancias
- Fácilmente automatizable
- Permite obtener gran variedad de formas y geometrías
- Acabados superficiales muy buenos
- Apto para gran variedad de materiales

Inconvenientes:

- Elevado coste y consumo de energía
- Produce mucho material sobrante, el cual puede ser difícil de reciclar
- La máquina herramienta limita el tamaño de las piezas que se producen
- En lotes muy grandes es poco económico

Dado que existen distintos tipos de máquinas herramientas, no todas son aptas para cualquier tipo de mecanizado. Su elección depende, entre otros, del tipo de pieza que se quiera obtener, y por tanto, de los movimientos relativos pieza-herramienta, movimientos de avance, corte y penetración.

Las máquinas herramientas se pueden clasificar según el movimiento de corte, en función del número de filos de la herramienta, de si el movimiento lo realiza la herramienta o la pieza, de si este es lineal, giratorio, o si son máquinas para mecanizados no convencionales.

En este TFG se analiza el comportamiento de piezas torneadas en seco, siendo el torneado un proceso de mecanizado realizado con herramientas de un filo, siendo el movimiento de corte giratorio y lo hace la pieza (figura 1).

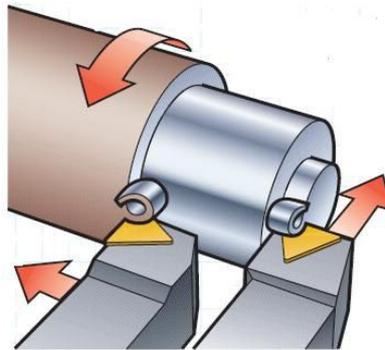


Figura 1. Proceso de torneado, movimientos de corte.

Otra forma de clasificar las maquinas herramientas es según el tipo de producción a la que se destinan [8]:

- **Convencionales:** destinadas a mecanizados generales como son el torno, fresadora, limadora, taladro, etc.
- **Específicas:** para procesos o piezas con características peculiares. Están muy automatizadas y son: brochadora, fresadora-punteadora, etc.
- **Automáticas:** mecanizados de medianas o grandes series de piezas. Están muy automatizadas, son, por ejemplo, tornos automáticos o fresadora de ciclos. Dentro de este grupo se encuentran las máquinas de control numérico.
- **Especiales:** mecanizado de grandes series de un solo tipo de pieza, suelen ser máquinas herramientas transfer.

Las máquinas herramientas tienen que cumplir unas condiciones mínimas para considerarse aptas para el mecanizado, como son [9], [10]:

- Exactitud a la hora de realizar el mecanizado
- Rigidez
- Amortiguamiento
- Seguridad. Estas condiciones vienen recogidas en el Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio [11].

### 2.1.1. Maquinabilidad

La maquinabilidad se define como la capacidad de un material para ser mecanizado. Un material se considera que tiene buena maquinabilidad cuando es fácil de mecanizar (tabla 4). Es importante puntualizar que no existe una única definición de maquinabilidad, aunque la mencionada anteriormente sea la más extendida.

Tabla 4. Criterios de maquinabilidad [12].

|                        | Buena maquinabilidad | Mala maquinabilidad                |
|------------------------|----------------------|------------------------------------|
| Vida de la herramienta | Larga, estable       | Corta, inestable                   |
| Temperatura de corte   | No demasiado alta    | Alta                               |
| Viruta                 | Fácil de controlar   | Continua, aparición de vibraciones |
| Resistencia al corte   | Baja                 | Alta                               |
| Acabado superficial    | Bueno                | Se forman rebabas con facilidad.   |
| Tiempo de maquinado    | Corto                | Largo                              |

Los procesos de mecanizado cuentan con un elevado número de variables de entrada y de salida (tabla 5). Las variables de entrada son aquellas que definimos antes de realizar la operación, mientras que las variables de salida son resultado de la operación y función de las variables de entrada. Debido a la gran cantidad de variables que intervienen, determinar de forma práctica la maquinabilidad de un material es una tarea intrincada.

Tabla 5. Variables de entrada y salida.

| VARIABLES DE ENTRADA                | VARIABLES DE SALIDA         |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Material de la pieza                | Desgaste de la herramienta  |
| Material de la herramienta de corte | Fuerzas y potencia de corte |
| Geometría de la herramienta         | Rozamiento                  |
| Máquina herramienta                 | Temperatura de corte        |
| Parámetros de corte                 | Acabado superficial         |
| Lubricación                         | Precisión dimensional       |
| Tipo de mecanizado                  | Vibraciones                 |

La maquinabilidad se estudia según los siguientes criterios y en función de las variables de salida [5], [6], [13]:

- Acabado superficial
- Tipo de viruta
- Temperatura, fuerza y potencia de corte
- Desgaste y vida de la herramienta

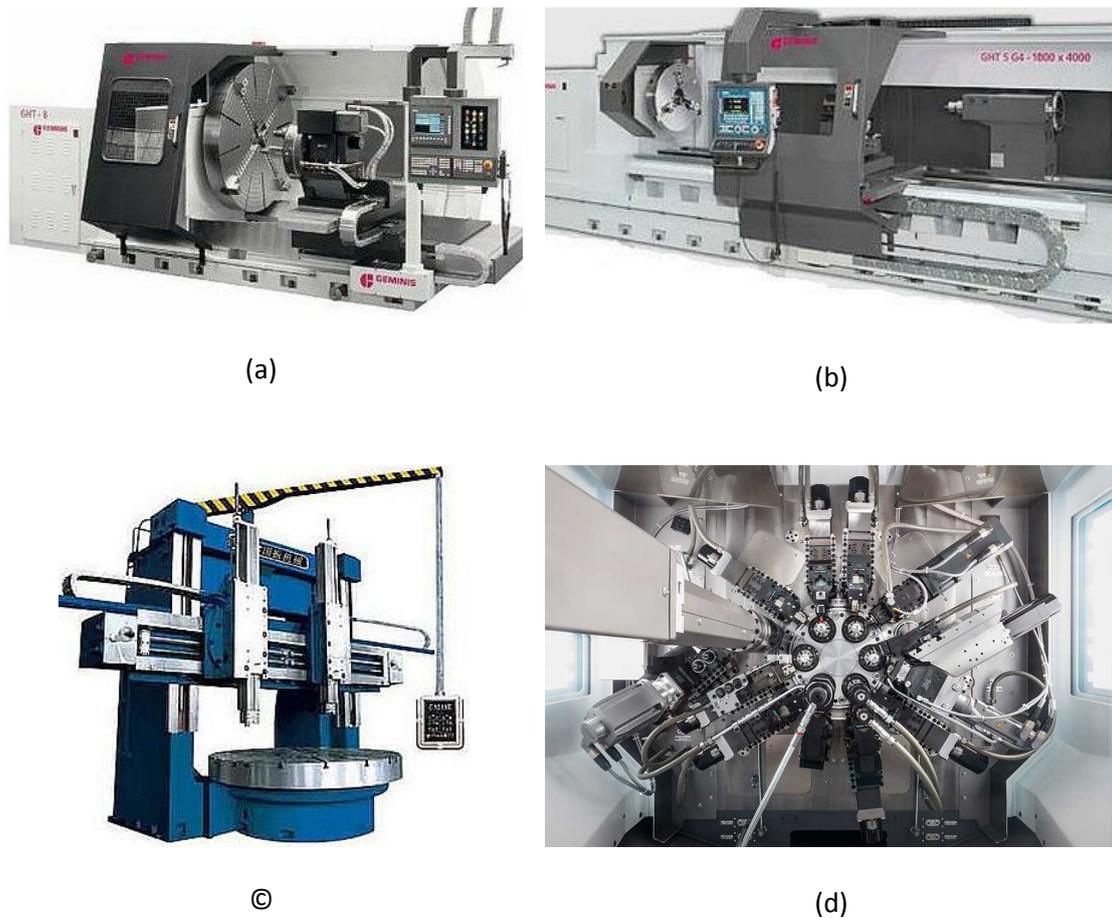
La maquinabilidad se puede medir en función del índice de maquinabilidad (IM), un valor dependiente de la vida de la herramienta. El IM de un material se obtiene al comparar la vida de la herramienta en el torneado del material que se estudia, con la vida de la herramienta al tornear un acero B1112 bajo las mismas condiciones. Estas condiciones son: velocidad de corte de 55 m/min y herramienta de acero rápido (HSS). El IM del acero B1112 es 1, de forma que dependiendo de si el valor obtenido por otro material es superior o inferior a la unidad, este tendrá mejor (será más fácil de mecanizar) o peor maquinabilidad respectivamente.

El IM no solo depende de la vida de la herramienta, sino que también depende de factores como la composición química, microestructura y dureza del material [14].

### *2.1.2. Torneado*

Se conoce como torneado al proceso de mecanizado por arranque de viruta empleado para obtener piezas de revolución. La máquina herramienta utilizada es el torno, pudiendo comenzar el proceso a partir de piezas en bruto o previamente mecanizadas. Existen varios tipos de tornos [15], [16], siendo algunos de los más comunes los siguientes (figura 2):

- **Torno frontal:** se utiliza para el mecanizado de piezas cortas y de gran diámetro.
- **Torno paralelo:** es la evolución directa de los tornos clásicos. Actualmente se usa para piezas de poca importancia.
- **Torno vertical:** torno con eje vertical, se usa para el mecanizado de piezas de grandes dimensiones difíciles de mecanizar en tornos paralelos.
- **Torno multihusillos:** torno automatizado que cuenta con varios husillos, permitiendo mecanizar distintas operaciones simultáneamente sobre la misma pieza. Se utiliza principalmente para la fabricación de piezas de mayores dimensiones.



**Figura 2.** (a) Torno frontal. (b) Torno paralelo. (c) Torno vertical. (d) Torno multihusillos.

En el torneado el movimiento de corte, el cual es rotativo, lo realiza la pieza mientras que el movimiento de avance, el cual es lineal, lo realiza la herramienta. En el torneado las herramientas son de un solo filo de corte. Las operaciones de torneado pueden ser de desbaste o de acabado.

Las operaciones de desbaste tienen el objetivo de eliminar la mayor cantidad de material en el menor número de pasadas posible. Por otro lado, las operaciones de acabado se realizan para alcanzar la precisión y el acabado superficial final de la pieza, para ello se utilizan unos parámetros de corte, de avance y penetración menores a los utilizados en desbaste.

En la tabla 6 podemos encontrar las principales ventajas e inconvenientes de las operaciones de torneado [17], [18].

Tabla 6. Ventajas e inconvenientes del torneado.

| Ventajas   | Inconvenientes   |
|--|--|
| <p>Elevada precisión</p> <p>Buen acabado superficial</p> <p>Control de la viruta sencillo</p> <p>Piezas de muy diferentes tamaños</p> <p>Amplia gama de materiales</p> | <p>Solo apto para piezas de revolución</p> <p>Elevado coste</p> <p>Considerable desgaste de la herramienta</p> |

Las herramientas utilizadas en el torneado pueden ser tanto enterizas como con plaquita y pueden contar o no con rompevirutas, que fuerza la rotura de la viruta evitando que se formen nidos que dificulten el mecanizado.

En la figura 3 se representan algunas de las posibles operaciones de torneado, la cuales pueden ser interiores o exteriores.

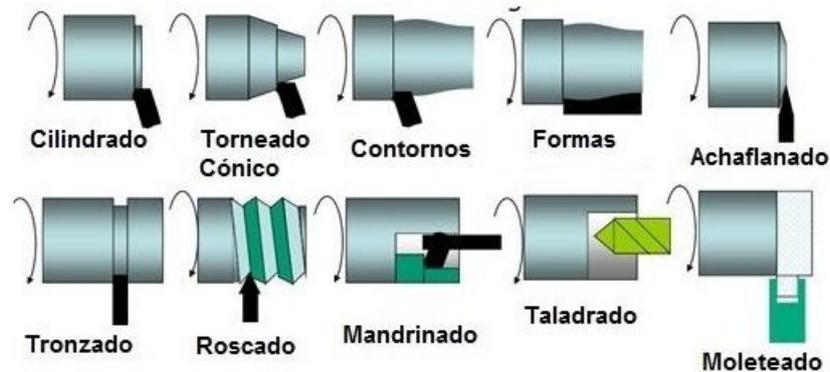


Figura 3. Operaciones de torneado [19].

### 2.1.2.1. Parámetros de corte

Al hablar de mecanizado debemos hablar del movimiento relativo pieza-herramienta, definiéndose tres tipos de movimientos relativos: movimiento de corte, movimiento de avance y movimiento de penetración [6], [20],[21]:

#### A. Movimiento de corte

Como bien indica su nombre es el encargado de producir el corte, y por tanto de separar la viruta de la pieza. Es un movimiento continuo que se realiza durante el corte. Es rotativo o rectilíneo y lo puede realizar tanto la pieza como la herramienta. Consume la mayor parte de la potencia disponible y se cuantifica a través de la velocidad de corte,  $V_c$ , la cual se mide en metros por minuto (m/min).

#### B. Movimiento de avance

Es el responsable de que siempre haya material a mecanizar. Al igual que el movimiento de corte, lo puede realizar tanto la pieza como la herramienta. Puede ser continuo o discontinuo y

se realiza durante el corte. Se cuantifica mediante la velocidad de avance,  $a$ , la cual se mide en milímetros por revolución (mm/rev).

### C. Movimiento de penetración

Es el encargado de asegurar el contacto entre la pieza y la herramienta. Se realiza antes de comenzar el corte. Determina la cantidad de material que se va a eliminar en cada pasada. Se cuantifica mediante la penetración,  $p$ , la cual se mide en milímetros (mm).

Si se está en una pasada de desbaste el valor de la penetración será mayor que si está en una pasada de acabado, ya que en desbaste se busca arrancar la mayor cantidad de material posible, mientras que en acabado el valor de la penetración estará limitado en función de la calidad superficial que se busque. La penetración no debe ser excesiva ya que valores muy altos provocan vibraciones que afectan negativamente a la calidad superficial.

En la tabla 7 se especifica el tipo de trayectoria, movimiento y quien lo realiza en función de los movimientos relativos pieza-herramienta en las operaciones de mecanizado. En la figura 4 se muestra un esquema de los movimientos de corte en un proceso de cilindrado.

Tabla 7. Movimiento pieza-herramienta en torneado [6].

|                    | M. Corte | M. avance   | M. Penetración |
|--------------------|----------|-------------|----------------|
| Pieza/Herramienta  | Pieza    | Herramienta | Herramienta    |
| Trayectoria        | Giro     | Lineal      | Lineal         |
| Tipo de movimiento | Continuo | Continuo    | Fijo           |

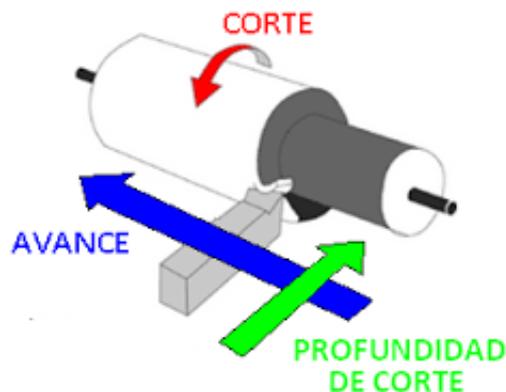


Figura 4. Movimientos de corte en un proceso de cilindrado [22].

Por otro lado, también se debe hablar de las distintas velocidades actuantes, siendo estas la velocidad de corte,  $V_c$ , y la velocidad de avance,  $a$ .

### A. Velocidad de corte, $V_c$ .

Es la velocidad lineal de la superficie exterior de la pieza que está en contacto con la herramienta, es decir, la velocidad a la que el filo de la herramienta mecaniza la pieza. Esta

velocidad no es constante a lo largo de todo el filo de la herramienta, siendo su valor máximo en los extremos y nulo en el centro.

Su valor es función de factores como el tipo y material de herramienta, material de la pieza, profundidad de corte o velocidad de avance. Se mide en m/min y se calcula siguiendo la siguiente ecuación (1) [17], [22]:

$$V_C = \pi * D * N \quad (1)$$

Siendo D el diámetro a mecanizar y N la velocidad a la que gira la pieza. Manteniéndose la velocidad de corte constante cuando estas variables lo sean.

La velocidad de corte es determinante en la vida de la herramienta, cuanto mayor sea la velocidad más rápido será el desgaste de la herramienta y peor será el acabado, a la vez que menor será el tiempo de mecanizado. En cambio si la velocidad es muy baja la fuerza producida no será suficiente para realizar el corte [22].

### **B. Velocidad de avance, a.**

Desplazamiento lineal que recorre la herramienta por cada vuelta que realiza la pieza. Es determinante en el tipo y calidad de acabado superficial que se obtiene tras el mecanizado, al igual que para determinar el tipo de viruta producida. Para pasadas de desbaste la velocidad será elevada mientras que para pasadas de acabado esta será menor para poder obtener así mejores acabados [17], [19].

La selección del tipo de herramienta se ve limitado por la velocidad de avance dado que las herramientas son aptas para un rango determinado de velocidades de avance, el cual depende del diámetro de la pieza, la profundidad y de la propia calidad de la herramienta [23].

Si la velocidad de avance es elevada, el tiempo de corte y el desgaste de la herramienta serán menores y habrá un mayor control de la viruta, a su vez, la rugosidad superficial y el riesgo de rotura de la herramienta serán mayores. En cambio si la velocidad de avance es baja la viruta será más larga, el desgaste de la herramienta, tiempo de mecanizado y coste del mecanizado serán mayores a expensas de un mejor acabado [23].

Las condiciones de trabajo cuando se aplican velocidades de corte elevadas a la vez que velocidades de avance bajas se ven favorecidas, obteniéndose una viruta segmentada.

El tipo de viruta que se genera es determinante para la disipación del calor generado durante el mecanizado, siendo por tanto clave la geometría de la herramienta. Cuanto mayor sea el ancho de la viruta y menor sea su espesor mayor es la superficie de contacto entre esta y el filo de corte, siendo menor el calor producido en el filo, pudiéndose utilizar una velocidad de corte mayor [24].

Para mecanizados en seco, la velocidad de avance y de corte son variables determinantes ya que son proporcionales a la temperatura de corte, y por tanto al desgaste de la herramienta, siendo fundamental elegir unos rangos de trabajo adecuados que hagan el proceso lo más eficiente posible [20], [21].

## **2.2. Integridad superficial**

El término integridad superficial fue definido por primera vez por Field y Kahles como la relación existente entre propiedades física y el comportamiento funcional de la superficie mecanizada [25].

Al igual que en el caso de la maquinabilidad, el concepto de integridad superficial ha sido definido en muchas ocasiones y de muy diversas formas. En nuestro caso seguiremos la definición aportada por A. Gómez Parra.

A. Gómez Parra entiende por integridad superficial el conjunto de propiedades que sufren modificaciones durante el mecanizado de la superficie de una pieza. Este identifica tres tipos de propiedades, que define en función de que variables se estudian, mostradas en la tabla 8 [13].

**Tabla 8. Propiedades y variables de la integridad superficial [13].**

| Propiedades Macrogeométricas | Propiedades Microgeométricas | Propiedades Físico-químicas |
|------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| Redondez                     | Rugosidad superficial        | Microdureza                 |
| Rectitud                     | Microgrietas                 | Deformación plástica        |
| Oscilación Radial            | Macrogrietas                 | Resistencia a fatiga        |
| Oscilación total             | Ondulación superficial       | Resistencia a tracción      |
| Concentricidad               | Partículas adheridas         | Resistencia a corrosión     |
| Cilindricidad                | Desgarros superficiales      | Transformaciones de fase    |

Por tanto, se entiende por integridad superficial aquellas propiedades de un material no relacionadas directamente con la geometría, como son la vida a fatiga, tensiones residuales o dureza superficial, las cuales determinan la apariencia, funcionalidad y vida útil de la pieza. No se debe confundir integridad superficial con el acabado superficial, el cual sí que describe características geométricas [13], [20].

Durante el mecanizado los cambios en las propiedades del material se producen en las capas exteriores. Son cambios en sus propiedades físicas, químicas y a nivel estructural. Todas las piezas obtenidas tendrán dimensiones reales distintas a las teóricas.

Dentro de las propiedades mencionadas en la tabla 8, a continuación, se desarrollan los aspectos relacionados con la resistencia a fatiga y desviaciones geométricas, tanto microgeométricas como macrogeométricas.

### 2.2.1. Desviaciones geométricas

Dentro de este apartado se van a desarrollar dos tipos de desviaciones geométricas:

- **Desviaciones macrogeométricas:** desviaciones de forma o tamaño relacionadas con la diferencia de forma o tamaño entre las dimensiones teóricas y las dimensiones reales de la pieza.
- **Desviaciones microgeométricas:** irregularidades superficiales de menor tamaño que forman el perfil de rugosidad.

Ambas se cuantifican en función de unas tolerancias impuestas, limitadas por la calidad requerida según el trabajo para el que esté destinada la pieza.

#### 2.2.1.1. Desviaciones macrogeométricas

Las desviaciones macrogeométricas, como ya se ha especificado, pueden ser de forma o de tamaño y se miden en función de dos tipos de tolerancias:

- **Tolerancias dimensionales:** son la diferencia entre la dimensión que se obtiene al medir una pieza y el valor teórico. Para que la pieza sea aceptada su valor debe estar dentro de un intervalo de valores máximos y mínimos impuesto según las exigencias dimensionales que deba cumplir esta (figura 5)[26].

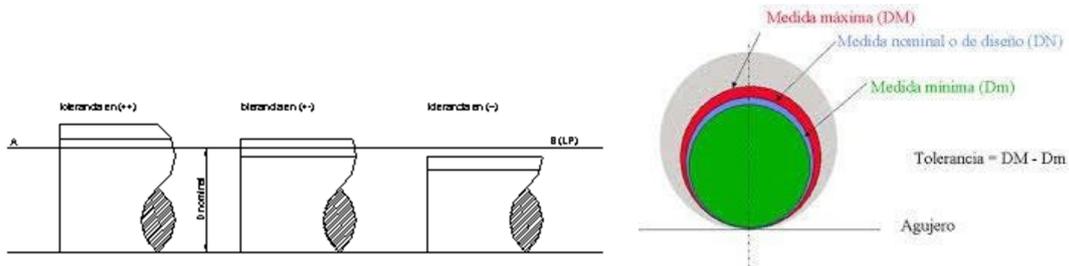


Figura 5. Desviaciones dimensionales.

- **Tolerancias geométricas:** establecen un intervalo de tolerancias dentro del cual debe estar contenido un elemento geométrico. Así, son producidas por el mal estado o imprecisión de la máquina-herramienta, por deformaciones en la pieza al fijarla en la máquina-herramienta, por dilataciones térmicas, etc. Son tolerancias de orientación, forma, localización o alabeo y sus valores se obtienen mediante palpadores o con referencias matemáticas de cálculo [27].

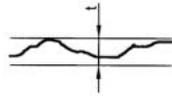
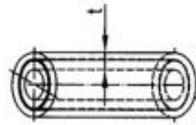
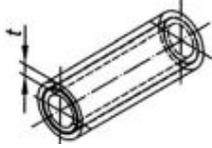
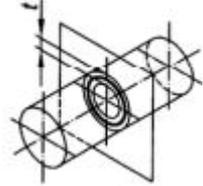
En la tabla 9 se representa una clasificación de los diferentes tipos de desviaciones geométricas.

Tabla 9. Desviaciones geométricas [28].

|   | Tipo de tolerancia | Características                | Símbolo           |    |
|---|--------------------|--------------------------------|-------------------|----|
| Elementos simples<br>(sin referencia)   | De forma           | Rectitud                       | —                 |    |
|   |                    | Planitud                       |                   |    |
|   |                    | Redondez                       |                   |    |
|   |                    | Cilindricidad                  |                   |    |
| Elementos simples o asociados           |                    | Forma de una línea             |                   |    |
|   |                    | Forma de una superficie        |                   |    |
| Elementos asociados<br>(con referencia) |                    | Orientación                    | Paralelismo       | // |
|   |                    |                                | Perpendicularidad | ⊥  |
|   | Inclinación        |                                |                   |    |
|   | Situación          | Posición                       | ⊕                 |    |
|   |                    | Concentricidad/<br>Coaxialidad |                   |    |
|   |                    | Simetría                       | ≡                 |    |
|   | Alabeo oscilación  | Alabeo radial                  |                   |    |
|   |                    | Alabeo axial                   |                   |    |

En la tabla 10 se definen más en profundidad algunas de las tolerancias geométricas representadas en la tabla 9.

Tabla 10. Desviaciones macrogeométricas [29], [30].

| Tipo de tolerancia | Nombre            | Definición   | Ejemplo   |
|--------------------|-------------------|--|---|
| De forma           | Redondez          | Diferencia entre los radios de las circunferencias que encierran la superficie que se está estudiando                  |    |
|                    | Rectitud          | Diferencia entre dos rectas paralelas en una dirección especificada que encierran la superficie que se está estudiando |    |
|                    | Cilindricidad     | Diferencia entre los radios de dos cilindros coaxiales que encierran el perfil que se estudia                          |    |
| Alabeo             | Oscilación total  | Variación radial máxima de dos cilindros coaxiales cuyos ejes coinciden con el de referencia                           |   |
|                    | Oscilación Radial | Variación radial entre dos círculos concéntricos cuyos ejes coinciden con el de referencia. Es a nivel de sección      |  |
| Situación          | Concentricidad    | Distancia máxima entre el centro del perfil obtenido y el centro del elemento de referencia                            |  |

Las desviaciones geométricas se indican con un rectángulo dividido en casillas, que contienen el símbolo correspondiente al tipo de tolerancia, el valor y una referencia si fuese necesario, unido a la pieza por medio de una flecha (figura 6) [27].

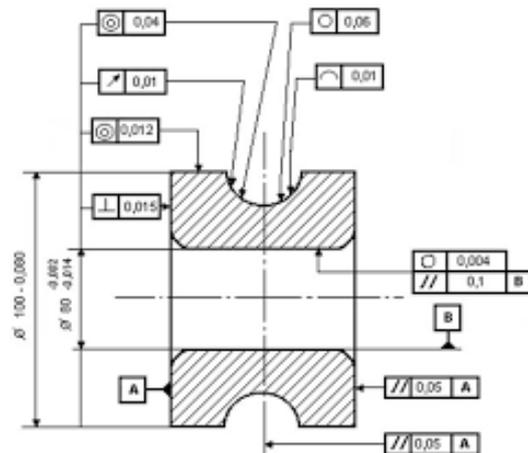


Figura 6. Ejemplo de tolerancias geométricas.

### 2.2.1.2. Desviaciones microgeométricas

Cuando se habla de desviaciones microgeométricas se refiere a ondulaciones, imperfecciones superficiales, desviaciones de forma, y especialmente de rugosidad superficial, la cual se caracteriza a través de la rugosidad media aritmética ( $R_a$ ). Se entiende por rugosidad las irregularidades superficiales en forma de surcos, huellas o marcas producidas durante el mecanizado [30].

Al estudiar el acabado superficial de una pieza se está analizando su textura superficial, definida como las desviaciones en la superficie geométrica que forman la topografía tridimensional de la superficie. La textura superficial es la suma de surcos, ondulaciones, rugosidad, imperfecciones superficiales y la propia forma de la pieza. Para estudiar el acabado superficial es necesario separar la rugosidad del resto de componentes [31].

- **Imperfecciones superficiales:** irregularidades producidas de manera involuntaria. Pueden ser protuberancias, hendiduras, imperfecciones mixtas, etc.
- **Surcos superficiales:** tienen su origen en el proceso de fabricación.
- **Perfil primario:** es la suma del perfil de rugosidad, perfil de ondulación y perfil de forma (figura 7). En él se evalúan los parámetros correspondientes a dicho perfil.



Figura 7. Esquema de perfil primario [31].

Como ya se ha mencionado, la rugosidad suele determinarse por medio del parámetro  $R_a$ , rugosidad media aritmética, que corresponde con la media aritmética de los valores absolutos de las desviaciones del perfil respecto de la línea media, en los límites de la longitud básica, es

decir, la longitud del perfil teniendo en cuenta como única irregularidad la rugosidad. Esta se calcula utilizando la ecuación (2) [30], [31].

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2)$$

Siendo 'l' la longitud de muestreo del perfil e 'y' la altura del perfil.

Otro parámetro también usado para caracterizar la calidad superficial es la rugosidad media cuadrática o máxima altura del perfil, Rz, que es la suma de la máxima altura de pico y la máxima profundidad de valle en la longitud del perfil que se está estudiando. Esta, a diferencia de Ra, sí que es sensible a las irregularidades puntuales, siendo más fiable a la hora de obtener valores de rugosidad [30], [31].

Para poder medir estas desviaciones se pueden usar tanto métodos o aparatos simples como puede ser el rugotest, o más complejos y tecnológicos como es la interferometría, microscopio focal o métodos de trazado lineal, integración superficial, etc.

La rugosidad superficial está influenciada por el material de la pieza, la herramienta de corte, las propiedades del mecanizado y el ambiente en el que se esté ejecutando. Esta, a su vez tiene una gran influencia en las propiedades físico- químicas y mecánicas, influenciando por tanto el comportamiento a fatiga, resistencia al desgaste, rozamiento y aspecto de la pieza [31].

Muchos académicos han estudiado la influencia de los parámetros de corte en la rugosidad superficial, y todos ellos coinciden en que la velocidad de avance es el más determinante, de forma que cuanto mayor es esta mayor es la rugosidad superficial, afectando negativamente a la pieza [13].

### 2.2.2. Comportamiento a fatiga

Uno de los factores más importantes a la hora de analizar el comportamiento de un material es la resistencia a fatiga, ya que el fallo por fatiga es un fallo repentino que se produce con valores de esfuerzos por debajo del límite de fluencia si el material es dúctil, o límite de fractura si el material es frágil. Es uno de los fallos más comunes en elementos de máquinas.

El fallo por fatiga se produce debido a la acción de esfuerzos fluctuantes a lo largo del tiempo, estos esfuerzos pueden ser:

- Cargas fluctuantes sobre elementos estáticos
- Cargas estáticas sobre elementos en movimiento

El mecanismo de fallo por fatiga está compuesto por tres etapas [32]:

- **Inicio de la grieta o nucleación:** se produce el inicio de una o varias microgrietas en las zonas de la pieza en las que se producen concentraciones de esfuerzos debidos a deformaciones plásticas o por la propia estructura interna del material. En la mayoría de materiales esta fase tiene lugar en la superficie.
- **Crecimiento de la grieta:** al generarse la grieta, la sección resistente se reduce, aumentando los esfuerzos; si estos son de tracción, provocan el crecimiento de la grieta; mientras que, si son de compresión, tienden a cerrarla.
- **Fractura:** conforme aumenta el tamaño de la grieta, el tamaño de la sección resistente se reduce hasta el punto en que no es capaz de soportar los esfuerzos, por lo que se produce una rotura súbita del material.

En la figura 8 se pueden apreciar las zonas correspondientes a las distintas etapas del fallo por fatiga.

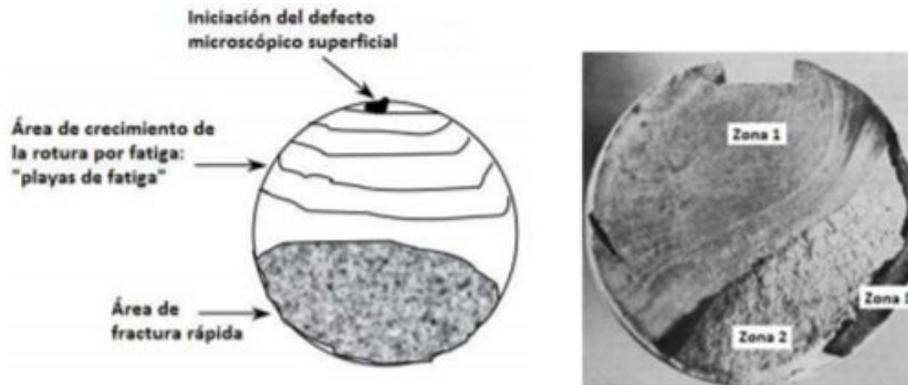


Figura 8. Fallo por fatiga. Etapas [33].

Como se ha dicho anteriormente, las operaciones de mecanizado afectan a la integridad superficial, siendo un factor influyente en la etapa de nucleación, siendo, por tanto, fundamental el estudio a fatiga del material.

La resistencia a fatiga se obtiene mediante ensayos de viga rotativa. Consisten en someter una probeta a un momento flector puro y hacerla girar sometiéndola a un esfuerzo alternativo al mantener constantes la dirección y sentido del momento. En estos ensayos se mide el número de ciclos que soporta la probeta hasta que rompe [32].

Las probetas usadas en estos ensayos son probetas normalizadas, de sección variable y con un muy buen acabado superficial. La sección de menor diámetro y más distanciada de la zona de aplicación de la carga será la sección crítica en la que se produzca la rotura. Cuanto mayor sea el esfuerzo alternativo al que está sometida la probeta menor será su vida a fatiga. El esfuerzo es proporcional al momento al que está sometida e inversamente proporcional a su diámetro crítico.

Generalmente en los ensayos de viga rotativa no se tienen en cuenta las discontinuidades geométricas del material, siendo necesario aplicar un factor de concentración de esfuerzos sobre la tensión obtenida para un determinado número de ciclos [34].

El factor de concentración de esfuerzos depende de [34]:

- Acabado superficial,  $k_a$
- Tamaño,  $k_b$ , y tipo de carga,  $k_c$
- Temperatura,  $k_d$
- Factores diversos,  $k_f$ , como son los esfuerzos residuales, tratamientos térmicos o la corrosión

Para poder determinar la vida a fatiga de un material, es necesario realizar un gran número de ensayos cuyos resultados se representan por medio de un diagrama tensión - número de ciclos (S-N) o diagrama de Wöhler. Los ensayos se realizan utilizando, inicialmente una carga ligeramente inferior al límite de rotura, siguiendo con un esfuerzo ligeramente menos al anterior y así sucesivamente, obteniéndose el diagrama S-N al representar, en escala logarítmica, la tendencia que presenta la nube de puntos que forman los resultados obtenidos. En el diagrama de Wöhler se diferencian varias zonas, zona de vida infinita y zona de vida finita. Se considera vida finita para un determinado esfuerzo, en materiales ferrosos, cuando el número de ciclos

que soporta es inferior a un millón de ciclos y vida infinita si se supera [35]. En la figura 9 se puede observar un diagrama de Wöhler a modo de ejemplo.

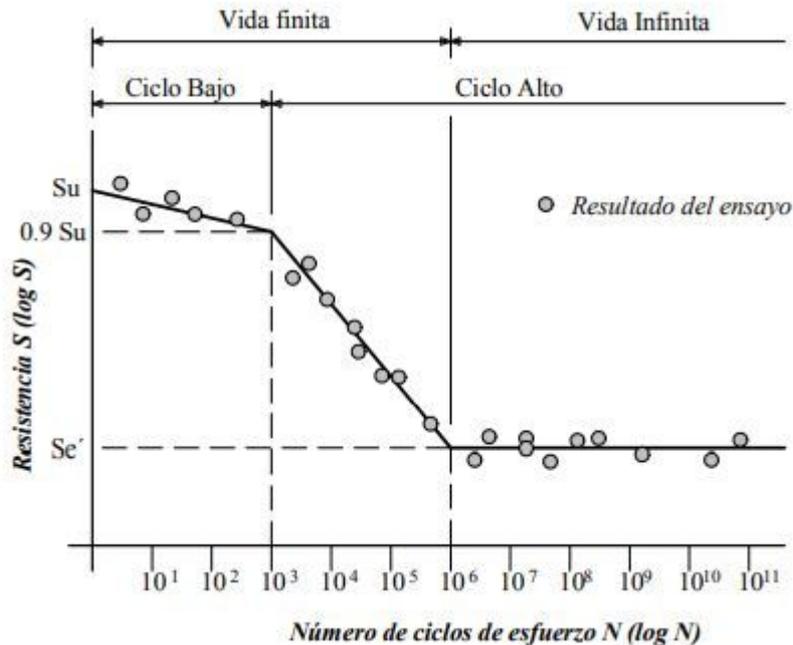


Figura 9. Ejemplo de diagrama de Wöhler [35].

### 2.3. Aleaciones de titanio. Ti6Al4V

El titanio fue descubierto por William Gregor en 1791, en Cornualles, Inglaterra. No fue hasta 1795 cuando Martin Heinrich Klaproth lo nombró titanio. Este es uno de los metales más abundantes en la Tierra.

Para obtener titanio puro este se debe extraer de los minerales que lo contienen, ya que no se encuentra en la naturaleza en estado libre. El titanio se puede someter a varios procesos de fabricación como son la fundición o forja. Lo más habitual es encontrarlo en forma de aleación, siendo la aleación Ti6Al4V la más usada, con más de un 50% del mercado de titanio, gracias a la excelente relación de su ductilidad, resistencia mecánica, resistencia a fatiga y tenacidad [36].

Entre las propiedades del titanio encontramos:

- Elevada resistencia mecánica
- Baja densidad, siendo sus aleaciones ligeras
- Muy buena resistencia a la corrosión tanto en medios acuosos como neutros y ácidos
- Elevada resistencia a la erosión
- Bajos coeficientes de conductividad eléctrica y dilatación térmica
- Metal no ferromagnético
- Buena tenacidad
- Excelente ductilidad
- Soporta altas temperaturas

Siendo estas propiedades las que hacen del titanio un material de uso competente en sectores como la medicina, aeronáutica, industria armamentística e incluso en la fabricación de contenedores de residuos radiactivos [8]. Dentro del sector de la aeronáutica se utilizan principalmente en el motor, tren de aterrizaje, turbinas y elementos de conexión entre alas y cuerpo del avión [37].

Las propiedades químicas del titanio se presentan en la tabla 11 [21], [38].

**Tabla 11. Propiedades químicas del Titanio**

| Titanio             |              |
|---------------------|--------------|
| Símbolo químico     | Ti           |
| Número atómico      | 22           |
| Valencia            | 2, 3, 4      |
| Estado de oxidación | + 4          |
| Electronegatividad  | 1.54         |
| Radio covalente     | 1.36 Å       |
| Radio iónico        | 0.68 Å       |
| Radio atómico       | 1.47 Å       |
| Masa atómica        | 47.867 g/mol |
| Densidad            | 4.507 g/ml   |
| Punto de ebullición | 3560 K       |
| Punto de fusión     | 1941 K       |

El titanio puro se puede encontrar en fase  $\alpha$ , una estructura hexagonal compacta, cuando la temperatura es inferior a 882°C, o en fase  $\beta$ , estructura cúbica centrada en el cuerpo, si la temperatura es superior a 882°C.

Las aleaciones de titanio pueden ser de tipo  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\alpha+\beta$ , siendo las aleaciones de tipo  $\alpha+\beta$  las más comunes, perteneciendo la aleación Ti6Al4V a este grupo y siendo, como se ha mencionado anteriormente, la aleación de titanio más usada comercialmente. A continuación, se exponen las características básicas de cada uno de estos tipos de aleaciones [21], [39].

- **Aleaciones de tipo  $\alpha$ :** formadas por un 5% de Al y un 2.5% de Sn. Elevada dureza y resistencia a fatiga, corrosión y oxidación.
- **Aleaciones de tipo  $\beta$ :** generalmente formadas por V y Mo, mantienen su estructura  $\beta$  a temperatura ambiente. Tienen elevada resistencia y son comúnmente usadas en componentes estructurales en aeronaves.
- **Aleaciones de tipo  $\alpha+\beta$ :** formadas por un 13% de V, 11% de Cr y un 3% de Al. Son aleaciones con buena ductilidad, tenacidad y resistencia a fatiga. Se obtienen con

elevada resistencia si se tratan térmicamente. A este grupo pertenece la aleación Ti6Al4V, la cual tiene baja conductividad térmica y módulo elástico y gran dureza.

Las aleaciones de titanio también se clasifican en función de si el tipo de elementos con los que se alea son estabilizantes, isomorfos, eutectoides o neutros, podemos ver una clasificación de estos en la tabla 12 [36], [38].

**Tabla 12. Tipos de elementos aleantes en aleaciones de titanio**

| Tipo de aleante           | Elemento químico  |
|---------------------------|---|
| $\alpha$ -estabilizadores | Aluminio (Al), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Carbono (C)  |
| $\beta$ -isomorfos        | Vanadio (V), Molibdeno (Mo), Niobio (Nb), Tantalio (Ta)                                       |
| $\beta$ -eutectoides      | Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Cromo (Cr), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Silicio (Si), Hidrógeno (H) |
| Neutros                   | Zinc (Zr), Estaño (Sn)  |

En la actualidad, el uso industrial de las aleaciones de titanio ha aumentado considerablemente, lo que se debe fundamentalmente al importante papel que está teniendo en la industria aeronáutica. De hecho, se prevé que su relevancia en esta industria siga aumentando.

Centrándonos en la aleación Ti6Al4V, como ya se ha mencionado, es una aleación de tipo  $\alpha + \beta$  cuyas propiedades físicas, químicas y mecánicas se muestran en la tabla 13:

Tabla 13. Propiedades del Ti6Al4V[21]

| Propiedades físicas  | Propiedades químicas  | Propiedades mecánicas  |
|--|---|--|
| Al [5 - 6.76] %<br>V [ 3.5 –4.5] %<br>C < 0.08 %<br>Fe < 0.25%<br>N <sub>2</sub> < 0.05 %<br>O <sub>2</sub> < 0.2%<br>H <sub>2</sub> < 0.015 %<br>Ti hasta llegar al 100 % | Densidad 4.42 g/cm <sup>3</sup><br>Punto de fusión 1922K<br>Calor específico 560 J/kg °C<br>Resistencia eléctrica 170 cm*Ω<br>Conductividad térmica 7.2 W/m*K<br>Coeficiente de dilatación 8.6* 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup> | Resistencia a tracción 896 MPa<br>Módulo elástico 827 MPa<br>Dureza Rockwell 36 RC<br>Ductilidad 10% |

La resistencia aumenta con la cantidad de O, N, Al o V, pero, por otro lado, cuando la cantidad de estos elementos disminuye aumentan propiedades como la ductilidad, tenacidad o resistencia a la corrosión.

La propia aleación Ti6Al4V se puede encontrar con distintas microestructuras en función del proceso térmico al que se le ha sometido. Pudiendo encontrar las siguientes [36], [40]–[44]:

- **Equiaxial:**
  - **En estado de recepción:** partiendo de la aleación homogeneizada y laminada, se somete a un proceso de recocido a una temperatura ligeramente inferior a 1000 °C y posteriormente a un enfriamiento lento. Se obtiene una estructura con fase α junto a formas angulosas correspondientes a fase β no transformada.
  - **Recocido:** partiendo del estado de recepción se somete a un proceso de recocido a 955 °C durante 1 hora y un enfriamiento en horno, produciéndose el crecimiento de los granos de fase α y la coalescencia de los de fase β.
- **Widmanstätten o laminar:**
  - **Microestructura fina:** estructura formada por colonias de fase α rodeadas por fase β retenida. Las láminas en fase α son finas debido a la gran velocidad de enfriamiento mientras que el tamaño de los granos de fase β se controla al realizar el recocido con una temperatura superior a la de transición de esta fase. Se obtiene tras un proceso de recocido a 1050 °C durante 10 minutos y un enfriamiento al aire.
  - **Microestructura gruesa:** estructura compuesta por fase α en forma de láminas, de mayor espesor que en las microestructuras finas, formando colonias. También cuenta con granos de fase β transformada de gran tamaño. Se obtiene tras un proceso de recocido a 1050 °C durante 30 minutos y un enfriamiento en horno.
- **Dúplex o bimodal:** La estructura cuenta con fase α en forma de granos equiaxiales (fase α primaria) y en forma laminar y con fase β laminar, de pequeño tamaño y que rodea las colonias de fase α laminar. Se obtiene tras un proceso de recocido a 970 °C durante 10 minutos y un enfriamiento al aire.

### 2.3.1. Maquinabilidad del Ti6Al4V

Como se ha mencionado anteriormente, la maquinabilidad es la capacidad de un material para ser mecanizado, esta se puede medir mediante el IM que depende de la vida de la herramienta, de la composición química, microestructura y dureza del material entre otros.

Las aleaciones de titanio son materiales con baja maquinabilidad debido a su mala conductividad térmica, a la gran afinidad química que tienen con los materiales de los que están fabricadas las herramientas y a la pequeña superficie de contacto herramienta – pieza durante el corte, lo cual supone unas tensiones elevadas en la punta de la herramienta.

Además de tener baja conductividad térmica, las aleaciones de titanio también tienen baja difusividad térmica a la vez que sus temperaturas de corte son elevadas produciendo un rápido desgaste de la herramienta [37], [45].

Dentro de las aleaciones de titanio podemos encontrar la aleación Ti54M, la cual, debido a su estructura de granos más finos y mayor cantidad de fase  $\beta$ , tiene mejor maquinabilidad que el Ti6Al4V, ambas producen una viruta segmentada, siendo causa de una mejor maquinabilidad frente a otras aleaciones con virutas con bandas de cizalladura adiabáticas, como son Ti17 o Ti555.3 [37].

## 2.4. Estado del arte

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos en distintos estudios sobre rugosidad superficial, desviaciones macrogeométricas y fatiga realizados sobre la aleación de titanio Ti6Al4V tras ser sometido a un proceso de torneado. Dado el gran interés en la industria aeronáutica por la aleación Ti6Al4V, actualmente se realizan continuas investigaciones y ensayos sobre este material, ya que hasta ahora el conocimiento sobre su comportamiento es escaso. Teniendo esto en cuenta, también se revisarán estudios sobre otros materiales de uso aeronáutico, al igual que investigaciones sobre Ti6Al4V en procesos de mecanizado distintos al torneado.

En un estudio realizado por D. Peng y colaboradores [46], donde se estudió el efecto del mecanizado sobre la rugosidad superficial de piezas de Ti6Al4V creadas mediante fabricación aditiva, se obtuvo como conclusión que cuanto mayor sea la rugosidad superficial de la pieza mayor será la reducción de su vida a fatiga, afectando de la misma forma el tamaño de las discontinuidades iniciales del material. En este estudio se analizaron 9 casos, en los que, en un primer ensayo, se sometieron a fatiga piezas tras realizarles previamente una serie de surcos de 0.03mm, y un segundo ensayo en el que se analizaron otros 9 casos en los que la profundidad de los surcos era de 0.254mm, mostrando los resultados la influencia de la rugosidad sobre la resistencia a fatiga de las piezas.

En un estudio realizado sobre la rugosidad superficial en piezas de distintas aleaciones de titanio sobre superficies torneadas curvilíneas realizado por A. Matras, W. Zebala, y M. Machno [47], se demuestra que la velocidad de corte tiene muy poca influencia sobre la rugosidad superficial, a la vez que muestra una clara influencia de la velocidad de avance y el ángulo de inclinación de la superficie. De forma que, al aumentar el avance, aumenta la rugosidad y disminuye la calidad superficial, no encontrándose una influencia importante de la velocidad de corte.

Al igual que en los estudios anteriormente mencionados, en [48] J. Gerez Miras obtiene en su estudio sobre las relaciones paramétricas en el acabado superficial en el torneado en seco del Ti6Al4V, que el parámetro más influyente sobre la rugosidad superficial es la velocidad de avance, teniendo la velocidad de corte una influencia mucho menor, sufriendo la rugosidad superficial un considerable aumento al aumentar la velocidad de avance, siendo por tanto peor

la calidad superficial. Estos mismo resultados fueron obtenidos por Sara Gómez en [20] en su estudio sobre la microdureza en piezas de Ti6Al4V torneadas en seco, y corroboraron los resultados del estudio de A. Matras[47].

S. Gómez obtuvo en su análisis sobre la influencia de los parámetros de corte en las desviaciones macrogeométricas [20] en probetas de Ti6Al4V, que tanto la velocidad de avance como la velocidad de corte no tienen una clara influencia sobre estas de forma generalizada, sin embargo, observó que sobre la rectitud y redondez la velocidad de corte tiene mayor influencia, aumentando las desviaciones cuanto mayor sea esta. En cuanto a la cilindridad y oscilación radial total para velocidad de corte media y alta, y avances medios, al aumentar la velocidad de avance disminuyen las desviaciones. Por último, en cuanto a la concentricidad no pudo encontrar ninguna relación entre los resultados y los parámetros de corte.

S. Martín Béjar en [13] realiza un análisis sobre la influencia de los parámetros de corte sobre las desviaciones micro y macro geométricas, al igual que sobre el comportamiento a fatiga, de probetas torneadas en seco de la aleación UNS A97075, aleación ligera muy utilizada en el sector aeronáutico al igual que nuestro material, Ti6Al4V. En el análisis realizado sobre las desviaciones macrogeométricas observó que, al igual que en los estudios realizados sobre nuestro material, el parámetro de mayor influencia tanto sobre Ra como Rz es la velocidad de avance. En cuanto a las desviaciones microgeométricas observó que al aumentar la velocidad de corte y de avance aumentan las desviaciones de cilindridad, rectitud, redondez y oscilación radial, mientras que, en el caso de la oscilación radial total, concentricidad y paralelismo no se observó una relación clara entre los resultados y estas.

Comparando los resultados obtenidos en los estudios realizados por S. Martín Béjar y S. Gómez se observa que los resultados sobre la rectitud, redondez y concentricidad coinciden, siendo de esperar que al aumentar la velocidad de avance aumenten las desviaciones de rectitud y redondez. En cuanto a la cilindridad y oscilación radial total estos no coinciden. Dado que las probetas que se van a analizar en este Trabajo de Fin de Grado son del mismo material que las del estudio de S. Gómez, se puede esperar que los resultados que se obtengan estén más cerca de los resultados obtenidos en [20] que los obtenidos en [13].

Por otro lado, C. Cabello en [30] realiza un análisis de las desviaciones micro y macro geométricas en procesos de torneado en seco de aleaciones de aluminio. Obtuvo como conclusión que tanto las desviaciones de redondez, concentricidad, planitud, cilindridad, rectitud, oscilación radial y oscilación radial total aumentan al aumentar la velocidad de avance, resultados coincidentes parcialmente con los obtenidos en [13] por S. Martín.

F. Sánchez realizó un estudio sobre el proceso de rectificado cilíndrico de la aleación aeronáutica UNS R56400 [49]. En este estudio obtuvo resultados sobre la redondez, rectitud y cilindridad, viéndose como tanto la redondez como la rectitud aumentaban con la velocidad de corte, sin embargo, no observo ninguna dependencia clara en el caso de la cilindridad.

Tras todos estos estudios realizado sobre aleaciones ligeras, se hace notable la falta de concordancia entre los resultados obtenidos, no estableciéndose una relación clara entre las desviaciones macrogeométricas y los parámetros de corte.

Un estudio realizado por K. Petatane I. Gutiérrez [50], donde se evaluó la influencia de la velocidad de avance y el acabado superficial sobre la vida a fatiga de probetas de aluminio 6061-T6, reveló que, a pesar de aumentar la rugosidad superficial, cuanto mayor es la velocidad de avance mayor es la vida a fatiga de la probeta, siendo a su vez menor la temperatura de mecanizado.

Por otro lado, S. Martín en [13], realizó un estudio sobre el comportamiento a fatiga de la aleación UNS A97075 al someterse a un proceso de torneado en seco, sacando como conclusión

principal que los parámetros que afectan negativamente a la resistencia a fatiga, conforme aumentan, son la velocidad de corte y el avance, siendo el factor más influyente la velocidad de corte, especialmente cuando el valor de la tensión cíclica es baja, siendo los parámetros de corte poco influyentes en fatiga para valores altos de tensión.

En el estudio realizado por D. Conde Álvarez sobre el análisis de la vida a fatiga de la aleación de aluminio UNS A97075 de uso aeronáutico en operaciones de torneado en seco [4], obtuvo como resultado que la vida a fatiga y tiempo de ensayo aumentaba con la repetibilidad del ensayo. A la vez que determinaba el avance como el parámetro de mayor influencia, el cual al aumentar reduce la vida a fatiga al aumentar las tensiones residuales del mecanizado, a la vez que también aumenta la rugosidad superficial favoreciendo la aparición de microgrietas.

Tras el estudio de todos estos análisis e investigaciones vemos que hay una amplia gama de estudios realizados en cuanto a la influencia de los parámetros de corte sobre las deformaciones microgeométricas y macrogeométricas, en cambio, en cuanto al estudio del comportamiento a fatiga la información es muy reducida. Todo esto mencionado recalca la necesidad de un análisis del comportamiento a fatiga y de cómo se ve influenciado según los parámetros de corte, siendo este el objetivo de este Trabajo de Fin de Grado.

# 3. Metodología experimental

### 3.1. Introducción

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado, como ya se ha mencionado anteriormente, es evaluar la influencia de los distintos parámetros de corte sobre el comportamiento a fatiga de piezas torneadas en seco de la aleación de Ti6Al4V de uso aeronáutico. Para lograr este objetivo se han planificado distintos ensayos mediante los cuales se va a realizar un control dimensional de las probetas a ensayar, se va a medir la rugosidad superficial, desviaciones macrogeométricas y finalmente se estudiará el comportamiento a fatiga de nuestras probetas. Por medio de estos ensayos obtendremos los datos necesarios para realizar un análisis adecuado de la influencia de los parámetros de corte sobre el comportamiento a fatiga.

En el presente capítulo se va a desarrollar la metodología experimental llevada a cabo a partir del equipamiento y material disponible. La metodología experimental que se realizará consta de las siguientes fases:

1. **Fase preparatoria.** En esta fase se reflejan todas las acciones previas a la realización de la parte experimental. Consiste en realizar una evaluación del estado del arte, determinando las áreas poco estudiadas relacionadas con nuestro trabajo, a la vez que obtenemos información sobre los resultados obtenidos en estudios similares, pudiendo así contrastar resultados. En esta fase también se planifican los ensayos a realizar teniendo en cuenta las distintas variables a analizar, el material seleccionado y equipos que serán usados.
2. **Ejecución de ensayos.** En esta fase se explican y desarrollan todos los ensayos realizados sobre las probetas, realizando un control de los resultados obtenidos. Siendo los ensayos realizados:
  - Control dimensional de las probetas
  - Ensayo de rugosidad superficial
  - Ensayo de desviaciones macrogeométricas
  - Ensayo de fatiga
3. **Análisis de los resultados.** Tras finalizar la fase experimental se realiza un análisis de los resultados obtenidos, a partir de las hojas de datos en las que se han reflejado todos los resultados obtenidos en los distintos ensayos para cada una de las probetas y según las distintas condiciones de corte. En este análisis se busca encontrar patrones de comportamiento que relacionen los distintos comportamientos en función de las condiciones de corte, desviaciones micro y macrogeométricas.
4. **Conclusiones y líneas futuras de trabajo.** Finalmente, tras realizar el análisis de los resultados obtenidos se exponen las conclusiones más relevantes como resultado de los objetivos establecidos al inicio de este Trabajo de Fin de Grado. Asimismo, se proponen posibles líneas futuras de estudio relacionadas con los resultados obtenidos y que puedan resultar de interés en investigaciones futuras.

### 3.2. Codificación de las probetas

Para poder identificar cada probeta sin lugar a equivocación, estas han sido provistas de un código único para cada una de ellas. De esta forma es posible identificar las condiciones y procedencia de cada probeta.

La codificación de nuestras probetas se divide en nueve partes, quedando un esquema de esta codificación representado en la figura 10. Por otro lado, en la figura 11 encontramos un ejemplo de la codificación de una de nuestras probetas.

|                |          |            |          |            |          |              |          |           |          |             |          |             |          |             |          |           |
|----------------|----------|------------|----------|------------|----------|--------------|----------|-----------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-------------|----------|-----------|
| <b>Ti6Al4V</b> | <b>_</b> | <b>LXX</b> | <b>_</b> | <b>BXX</b> | <b>_</b> | <b>XXCRY</b> | <b>_</b> | <b>XX</b> | <b>_</b> | <b>VXXX</b> | <b>_</b> | <b>AXXX</b> | <b>_</b> | <b>PXXX</b> | <b>_</b> | <b>RX</b> |
| <b>1</b>       |          | <b>2</b>   |          | <b>3</b>   |          | <b>4</b>     |          | <b>5</b>  |          | <b>6</b>    |          | <b>7</b>    |          | <b>8</b>    |          | <b>9</b>  |

Figura 10. Codificación de las probetas.

**1.Tipo de material.** Indica el tipo de material del que está hecha la probeta. En este caso todas las probetas son de la aleación de titanio de uso aeronáutico Ti6Al4V.

**2.Lote (LXX).** Se corresponde con el lote completo del material. En este caso todas las probetas se han fabricado con barras del mismo lote.

**3.Número de Barra (BXX).** Cada lote está compuesto por varias barras. Con este número se identifica de que barra proviene cada probeta. En nuestro caso las probetas se han fabricado a partir de cuatro barras.

**4.Número de caja de la herramienta y posición dentro de esta (XXCRY).** Cada caja de herramientas utilizada para el mecanizado de las probetas tiene un código compuesto por dos números, XX, mientras que el código YY representa la herramienta que se ha utilizado dentro de cada caja. Por último, el código CR indica que las herramientas que se han utilizado para el mecanizado son todas con recubrimiento.

**5.Filo de corte (XX).** Nos indica si para el mecanizado se ha utilizado el filo de la herramienta que cuenta con una marca realizada por el fabricante (CN) o si se ha realizado con el lado que no tiene huella (SN).

**6.Velocidad de corte (VXXX).** La V nos indica velocidad de corte, mientras que XXX se corresponde con el valor de la velocidad de corte con la que se ha mecanizado la probeta. Nuestros valores varían entre 50, 75 y 100 m/min.

**7.Avance (AXXX).** La A nos indica avance del mecanizado, XXX nos indica el valor de este medido en centésimas de mm/r. Siendo por ejemplo  $a = 0.05$  mm/rev (A005). Nuestros valores de avance varían entre 0.05, 0.10, 0.15 y 0.20 mm/rev.

**8.Profundidad de corte (PXXX).** La P nos indica la profundidad de mecanizado, mientras que XXX es el valor de esta medido en décimas de milímetro. En nuestro caso, en todas las probetas se ha utilizado una profundidad de corte de 1 mm (P010).

**9.Repeticiones de ensayo (RX).** Para realizar un estudio adecuado es necesario llevar a cabo varias repeticiones. En nuestro caso se han realizado 4.

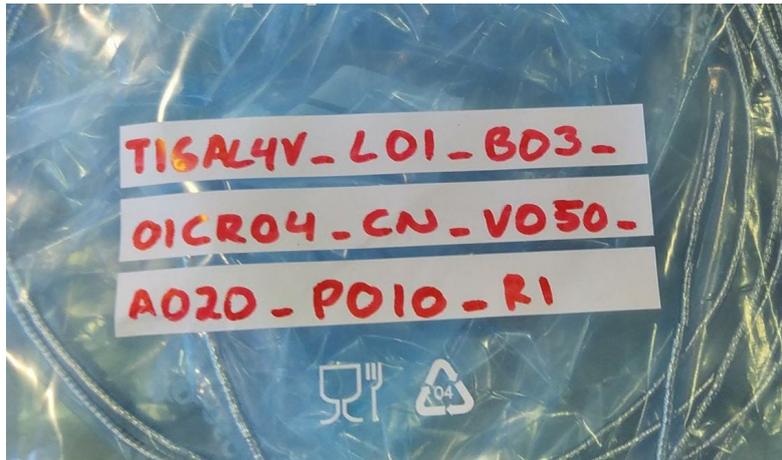


Figura 11. Ejemplo de código de nuestras probetas.

### 3.3. Características geométricas de las probetas

Para estudiar el comportamiento a fatiga de nuestro material se van a realizar ensayos de flexión rotativa. Siguiendo las indicaciones de la norma ISO 1143:2010 [51] se ha establecido la geometría adecuada para los ensayos a realizar, siendo nombrada por la norma como “Cylindrical smooth specimen”. Se ha elegido esta ya que es la que provoca una mayor tensión en la sección en la que se espera rompa la probeta. En la figura 12 se muestra un esquema de las dimensiones y geometría de las probetas.

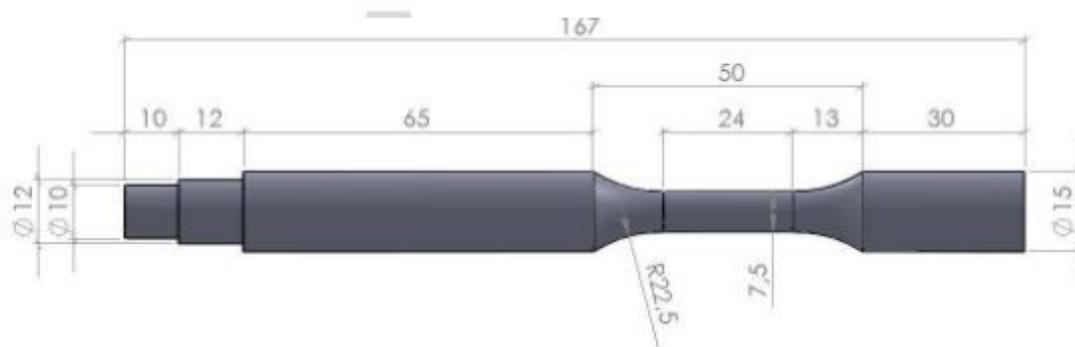


Figura 12. Esquema de la probeta y sus dimensiones. [13]

En cada probeta se diferencian tres zonas, zona empotrada, zona apoyada y zona calibrada, que se corresponden con las mostradas en la figura 13.



Figura 13. Zona empotrada, calibrada y apoyada de las probetas.

- **Zona empotrada**, es aquella que durante el mecanizado ha estado más próxima al plato de garras, el cual ha actuado como un empotramiento.
- **Zona apoyada**, es la zona de la probeta que se encuentra en el extremo opuesto a la zona empotrada y la cual ha estado en contacto con el contrapunto durante el mecanizado.
- **Zona calibrada**, se corresponde con la zona intermedia de la probeta, es la zona de menor diámetro y en la que se espera que se produzca la rotura por fatiga.

### 3.4. Parámetros de corte

Los parámetros de corte utilizados durante el mecanizado de las probetas en la pasada de acabado son los representados en la tabla 14.

Tabla 14. Parámetro de corte utilizados en el mecanizado de las probetas.

| Velocidad de corte, $V_c$<br>(m/min) | Avance, $a$ (mm/rev) | Profundidad de corte, $a_p$<br>(mm) |
|--------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| 50                                   | 0.05                 | 1                                   |
| 75                                   | 0.10                 |                                     |
| 100                                  | 0.15                 |                                     |
|                                      | 0.20                 |                                     |

### 3.5. Ensayos realizados

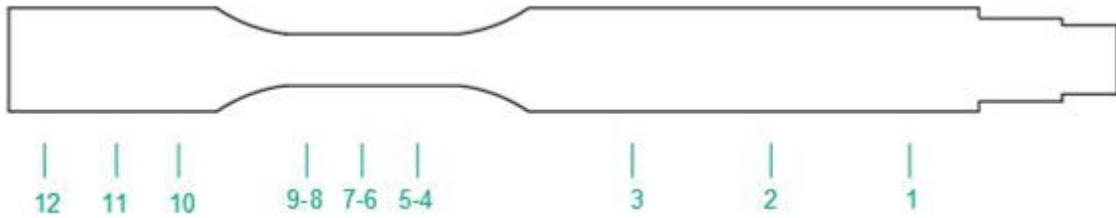
Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, para poder analizar el comportamiento a fatiga correctamente previamente se van a analizar las posibles desviaciones microgeométricas y macrogeométricas, al igual que se va a realizar un control dimensional de las probetas.

#### 3.5.1. Control dimensional

Una vez recibidas las probetas tras el mecanizado se realiza un control dimensional que consiste en medir el diámetro de la probeta en todas las zonas antes mencionadas, zona empotrada, apoyada y calibrada.

Las mediciones se realizarán a 9 alturas diferentes, 3 alturas en cada zona de la probeta, y en cada altura se tomarán 4 medidas girando unos grados las probetas, realizándose un total de 36 medidas.

En la figura 14 se encuentra un esquema de las distintas alturas en las que se realizarán las medidas. Estas no tienen una posición exacta adjudicada si no que se realizan de forma aproximada a las posiciones representadas en el esquema. Las medidas 1-3 se corresponde con la zona apoyada, las 4-9 a la zona calibrada y las medidas 10-12 se corresponden con la zona empotrada.



**Figura 14.** Esquema de las posiciones para el control geométrico

Las mediciones se realizarán con un micrómetro de exteriores con código identificativo 00134031. Cuenta con una resolución de 0.001mm y puede realizar medidas en un rango de 0-25 mm. En la figura 15 tenemos una foto del micrómetro usado.



**Figura 15.** Micrómetro de exteriores usado para el control geométrico

Las probetas serán colocadas en el soporte de forma vertical y sujetas por la zona empotrada, como se muestra en la figura 16



a)



b)

**Figura 16. a)** Probeta colocada en el soporte. **b)** Soporte para la colocación de las probetas.

En la tabla 15 encontramos un ejemplo de la tabla de datos utilizada para la toma y análisis del control geométrico de las probetas, siendo esta la correspondiente a la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1.

**Tabla 15. Control geométrico de la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1.**

|              | MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) |               |               |              |              |              |               |               |               |   |   |   |
|--------------|--------------------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---|---|---|
|              | 12                       | 11            | 10            | 9            | 8            | 7            | 6             | 5             | 4             | 3 | 2 | 1 |
| <b>M1</b>    | 15.101                   | 15.104        | 15.103        | 7.668        | 7.674        | 7.686        | 15.154        | 15.151        | 15.156        |   |   |   |
| <b>M2</b>    | 15.101                   | 15.105        | 15.107        | 7.660        | 7.670        | 7.732        | 15.151        | 15.156        | 15.159        |   |   |   |
| <b>M3</b>    | 15.102                   | 15.105        | 15.105        | 7.667        | 7.678        | 7.727        | 15.153        | 15.155        | 15.158        |   |   |   |
| <b>M4</b>    | 15.102                   | 15.103        | 15.106        | 7.673        | 7.665        | 7.747        | 15.150        | 15.155        | 15.160        |   |   |   |
| <b>Media</b> | <b>15.101</b>            | <b>15.104</b> | <b>15.105</b> | <b>7.667</b> | <b>7.672</b> | <b>7.723</b> | <b>15.152</b> | <b>15.154</b> | <b>15.158</b> |   |   |   |

Cada Mx se corresponde con la medida tomada en cada posición de giro de la probeta. Como ya se ha mencionado los valores 1-12 se corresponden con las distintas alturas a las que se toman las medidas, las cuales están representadas en la figura 14. Y los valores obtenidos con la media aritmética de las cuatro medidas realizadas en cada altura.

### 3.5.2. Ensayo de desviaciones microgeométricas

Este ensayo se ha realizado con el objetivo de obtener el perfil de rugosidad superficial de las distintas probetas, siendo los parámetros medidos la rugosidad media aritmética,  $R_a$ , y la máxima altura del perfil,  $R_z$ , debido a la gran influencia sobre la aparición y nucleación de grietas que estos tienen, siendo por tanto determinantes en el comportamiento a fatiga del material.

El rugosímetro utilizado para la obtención del perfil de rugosidad es el modelo SURFTEST SJ -210 de la marca MITUTOYO. El palpador del rugosímetro va conectado a un sistema de avance colocado sobre un soporte (figura 17) que permite variar su posición vertical y por tanto ajustar el contacto entre el palpador y la probeta. Las probetas irán apoyada sobre unos calzos en V (figura 18).



**Figura 17.** Soporte del sistema de avance del rugosímetro.

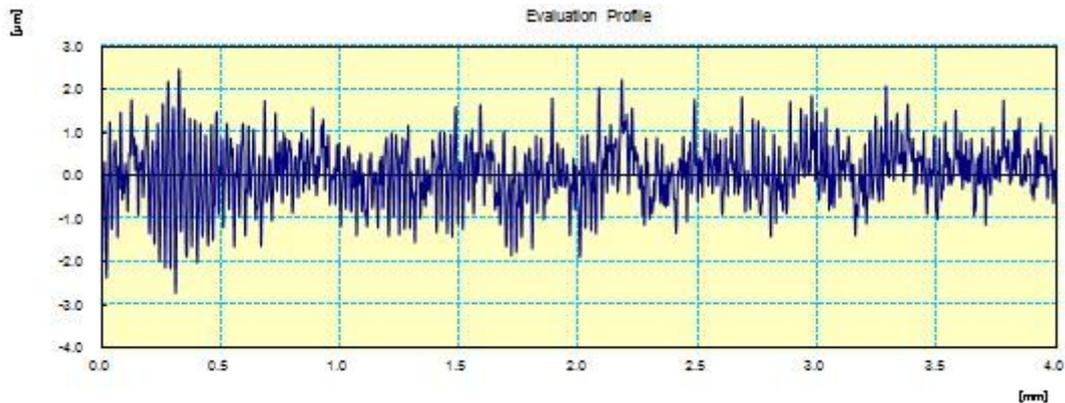


**Figura 18.** Calzos en V.

El palpador tiene una punta de diamante de radio  $2\ \mu\text{m}$ , siendo el ángulo de su punta de  $60^\circ$ . El sistema de avance al que va conectado el palpador está a su vez conectado con el rugosímetro.

portátil mediante un cable de extensión apto para este modelo, pudiendo a su vez conectarse el rugosímetro portátil a un ordenador mediante otro cable de conexión USB.

Utilizando el programa informático SurfTest SJ USB communication tool se pueden obtener las medidas del palpador, a la vez que configurar el rugosímetro. Este programa también proporciona la opción de obtener gráficas, a partir de un documento excel, de la rugosidad de las superficies medidas. Podemos observar un ejemplo de estas gráficas en la figura 19.



**Figura 19.** Ejemplo de gráfica de perfil de rugosidad correspondiente a la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1.

Para las mediciones de los ensayos se ha configurado el rugosímetro siguiendo la norma ISO 4287:1999 [52], una velocidad de medición de 0.5 mm/s, un perfil tipo R y un filtro de perfil de fase corregida de distribución Gaussiana. Se ha seleccionado una longitud de medida de 2.5  $\mu\text{m}$  ( $L_s$ ) y una longitud de contacto de 0.8 mm ( $L_c$ ). La configuración completa se observa en la figura 20, y en la figura 21 se tiene la pantalla principal del programa.

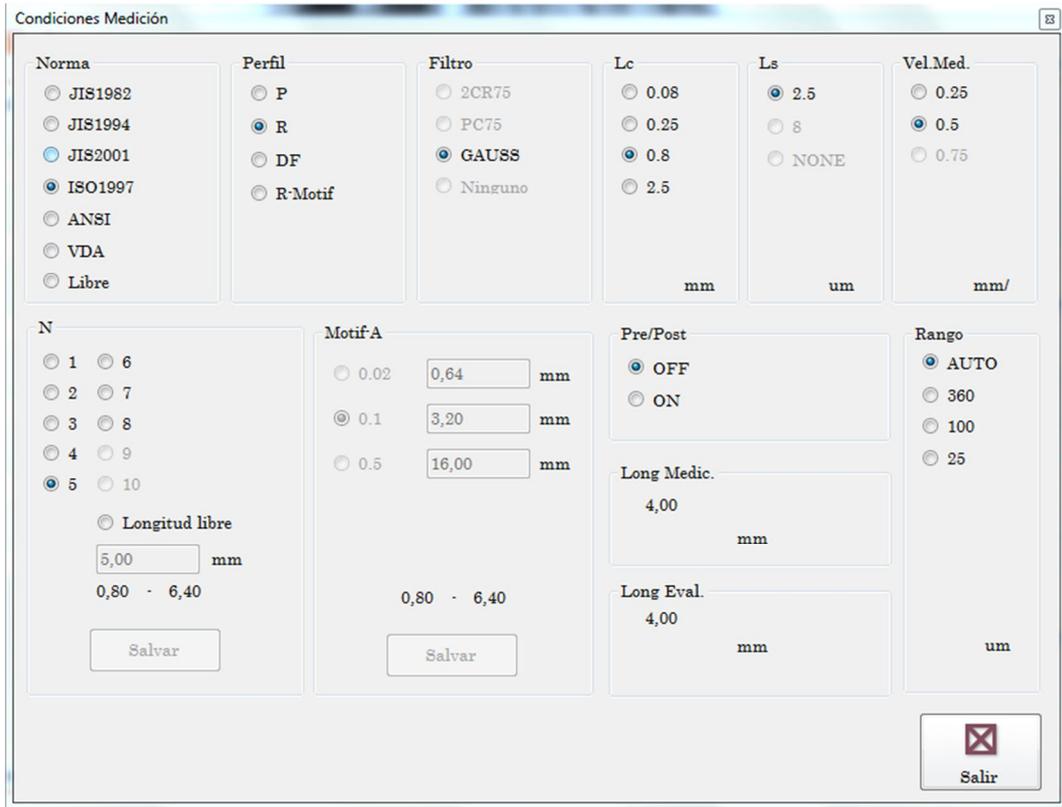


Figura 20. Configuración del programa SurfTest SJ USB Communication Tool.

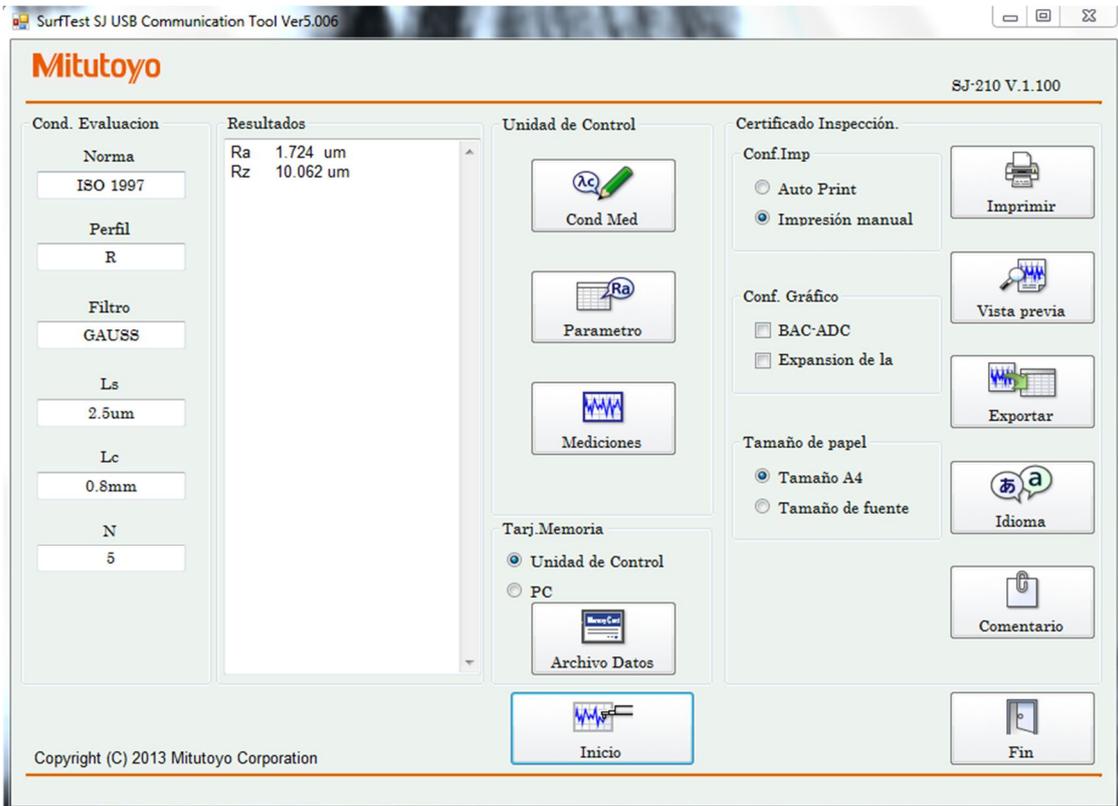


Figura 21. Pantalla principal del programa SurfTest SJ USB Communication Tool.

El montaje final del rugosímetro se puede observar en la figura 22, en la cual están indicados cada uno de los elementos que lo conforman.

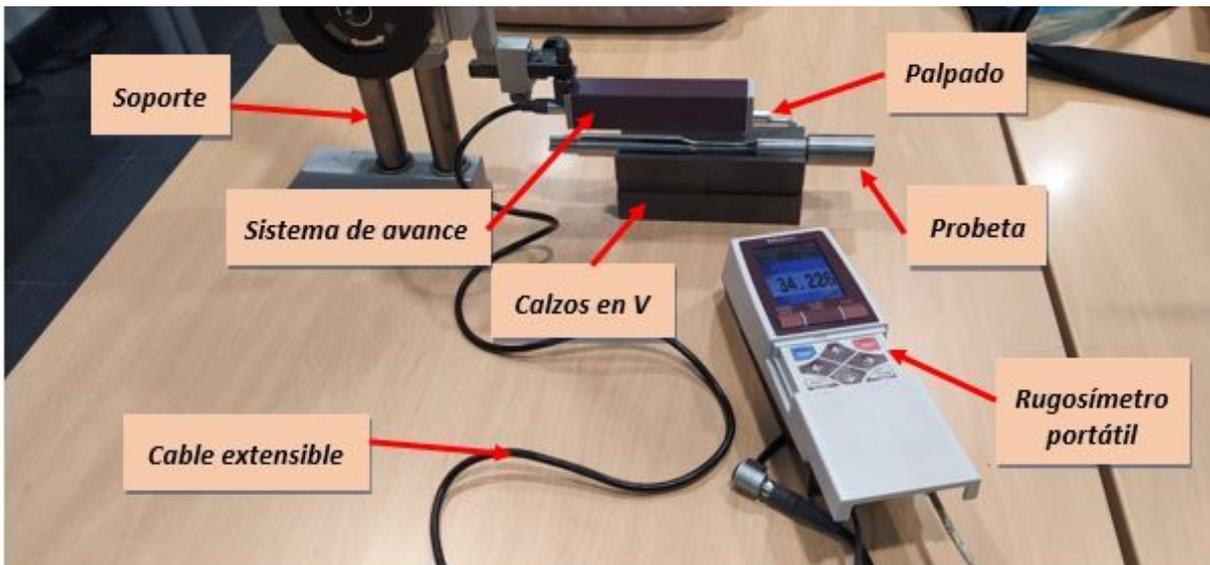


Figura 22. Montaje rugosímetro.

Una vez se ha configurado el rugosímetro se procede a la medición. Para ello se pone en contacto el palpador con la probeta ajustando su posición mediante el soporte. Para saber cuándo están en contacto observamos la pantalla del rugosímetro portátil. Inicialmente en la parte superior de la pantalla se puede observar una franja naranja, la cual indica que el palpador no está ajustado, esta banda se pondrá de color azul cuando el palpador esté bien colocado y listo para la medición (figura 23). En la figura 24 se tiene una imagen ampliada del palpador y la probeta.



a)



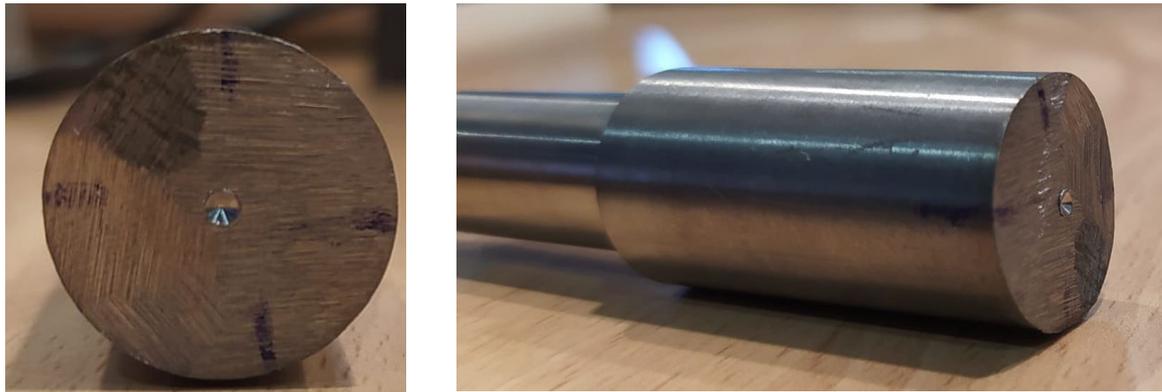
b)

Figura 23. a) Banda naranja, el palpador no está en contacto con la probeta. b) Banda azul, el palpador está en contacto con la probeta y se puede hacer la medición.



**Figura 24.** Ampliación del palpador y la probeta.

Las mediciones se harán en la zona empotrada y en la zona apoyada de las probetas. Teniendo lugar 4 mediciones en cada zona y en 4 generatrices distintas desfasadas aproximadamente 90 grados unas respecto de otras. Como guía se han realizado marcas en la base y dorso de las probetas indicando de forma aproximada los 90 grados (figura 25). Tomando como resultados de Ra y Rz la media de sus valores en las 4 generatrices.



**Figura 25.** Marcas en la base y dorso de las probetas.

### 3.5.3. Ensayo de desviaciones macrogeométricas

Al igual que con las desviaciones microgeométricas, también se va a estudiar la influencia de las desviaciones macrogeométricas en el comportamiento a fatiga del material. Por ello, en este Trabajo de Fin de Grado se van a estudiar las desviaciones macrogeométricas siguientes:

- Redondez (RON)
- Rectitud (STR)
- Cilindricidad (CYL)

Para el estudio de estas desviaciones se ha usado una medidora de forma de la marca ACCRETECH modelo RONDCOM NEX (Figura 26). Las mediciones se harán utilizando el software ACCTEE, en el que se ha creado una plantilla en la cual, a partir de las mediciones de redondez y rectitud, el software calcula el resto de las desviaciones macrogeométricas. En la figura 27 se

tiene una captura de la pantalla principal de la plantilla creada para realizar las mediciones y obtener los resultados.



**Figura 26.** Medidora de forma ACCRETECH.

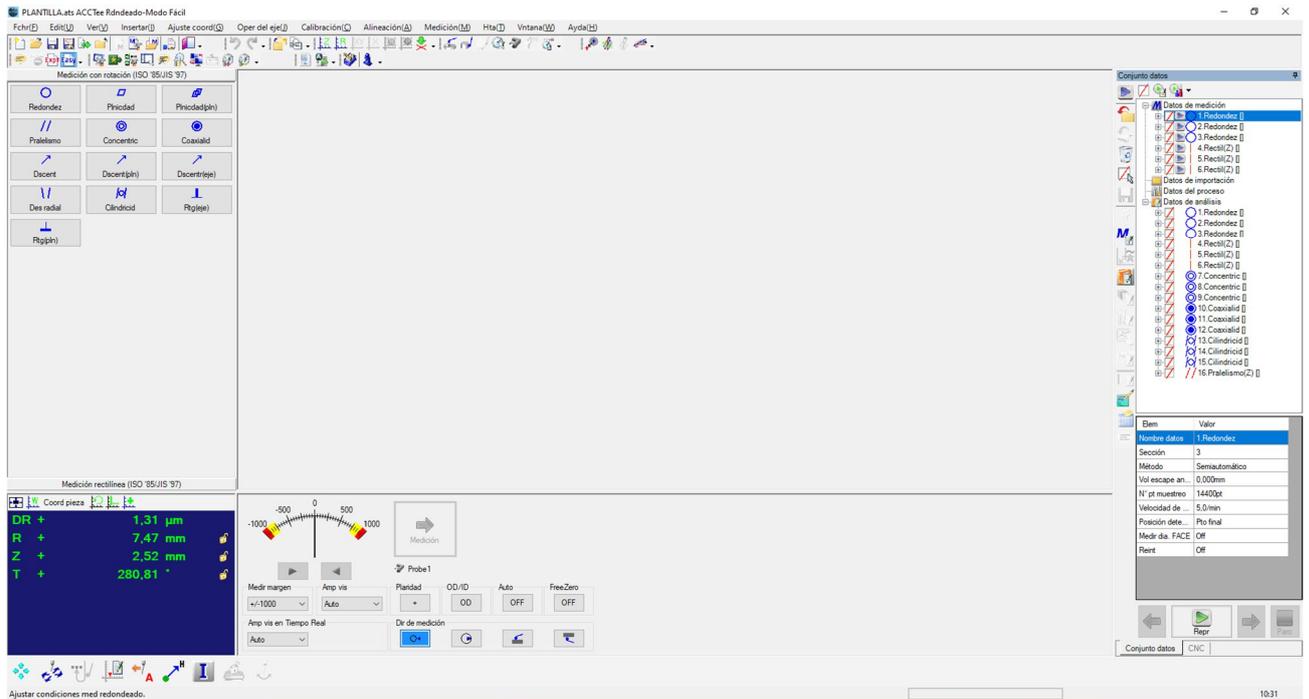


Figura 27. Plantilla para la medición de las desviaciones macrogeométricas.

La medidora de forma funciona por medio de un sistema de aire a compresión, de forma que para comenzar con las mediciones lo primero que se debe hacer es abrir la válvula de aire comprimido del taller que está conectada a la máquina, encender la máquina e iniciar el software ACCTEE.

Para cada probeta, antes de comenzar con las mediciones, se deben hacer una serie de ajustes. Una vez colocada la probeta en el plato de garras de la máquina se debe comprobar la posición del eje Z, haciendo que coincida su cero relativo con el extremo de la zona empotrada de la probeta más alejado de la zona calibrada. También se debe indicar el valor del radio de la probeta, en este caso 7.5 mm.

Una vez ajustado el eje Z e indicado el radio, se debe realizar un centrado y nivelado de la probeta alineando la inclinación de rotación por medio de los ejes TX, TY, CX y CY.

Como ya se ha mencionado, solo es necesario obtener las mediciones de rectitud y redondez ya que a partir de estas se obtienen los datos necesarios para calcular el resto de las desviaciones.

Las mediciones tendrán lugar en las tres zonas diferenciadas de las probetas, quedando reflejada en la tabla 16 la zona y número de tramos en los que se realizarán las medidas. En la figura 28 se observan las distintas posiciones de las mediciones de redondez y en la figura 29 las posiciones para las medidas de rectitud.

Tabla 16. Número de mediciones realizadas en la medidora de forma.

| Zona           | Redondez | Rectitud |
|----------------|----------|----------|
| Zona empotrada | 3        | 4        |
| Zona calibrada | 6        | 4        |
| Zona apoyada   | 6        | 8        |

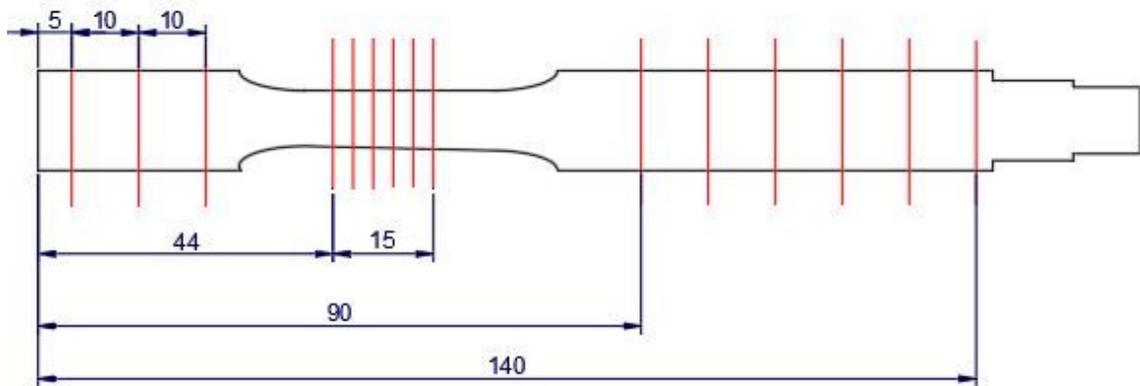


Figura 28. Posiciones de medidas de redondez

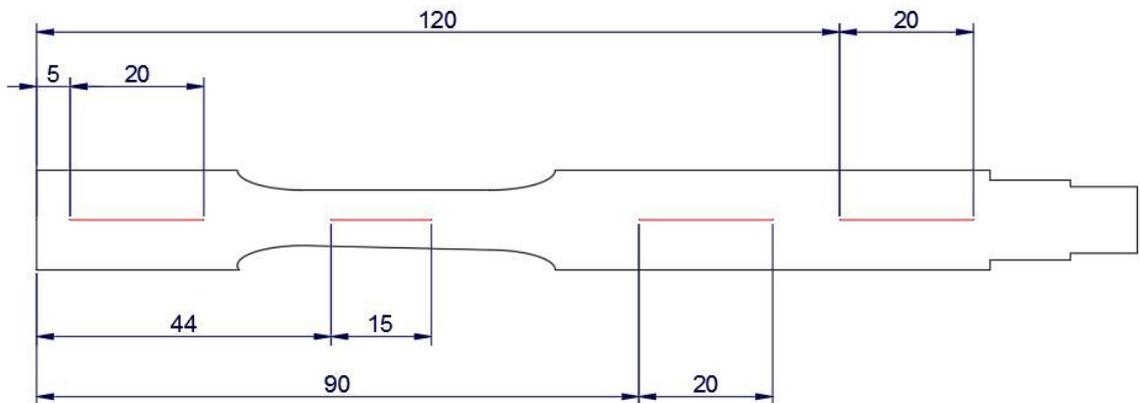


Figura 29. Posición de las medidas de Rectitud.

Como se muestra en la figura 28, durante el ensayo de redondez se harán un total de 15 mediciones, cada una de ellas se realiza manteniendo la posición en el eje Z y midiendo la desviación de forma diametral. En la zona empotrada se llevarán a cabo 3 medidas separadas 10 mm, estando la primera en  $Z = 5$  mm. En la zona calibrada habrá 6 mediciones separadas 3 mm, estando la primera en  $Z = 44$  mm. Por último, en la zona apoyada se realizarán otras 6 medidas, partiendo de  $Z = 90$  mm y separadas 10 mm.

Por otro lado, para la medición de la rectitud (figura 29) se han realizado 16 medidas en total, en 4 generatrices desfasadas  $90^\circ$  unas de otras. Tanto en la zona empotrada como calibrada se han realizado 4 mediciones, mientras que en la zona apoyada se han realizado 8. En la zona empotrada las medidas comienzan en  $Z = 5$  mm y tienen una longitud de 20 mm. Las medidas

de la zona calibrada tienen una longitud de 15 mm y comienzan en  $Z = 44$  mm. Por último, en la zona apoyada se han realizado 2 medidas por cada generatriz, ambas de 20 mm de longitud y situadas a  $Z = 90$  mm y  $Z = 120$  mm.

A pesar de estar todas estas operaciones programadas en el software para que se realicen de forma automática, es necesario situar el palpador de forma manual en la zona que se vaya a medir, aunque la máquina lo posiciona en el punto exacto de forma automática, ya que las zonas tienen distinto diámetro y es necesario que el palpador esté en contacto estrecho con la superficie de la probeta para que la medición se realice con éxito y sin errores (figura 30).



Figura 30. Medición de la medidora de forma.

#### 3.5.3.1. Desviaciones de redondez.

Como se ha definido anteriormente en la tabla 10, se entiende por redondez como la diferencia entre los radios de las circunferencias que encierran la superficie que se está estudiando.

Para la evaluación de la desviación de redondez existen los 4 métodos siguientes [53]:

- Círculo de mínimos cuadrados (LSC)
- Círculo de zona mínima (MZC)
- Mínimo círculo circunscrito (MCC)
- Máximo círculo inscrito (MIC)

De entre todos los métodos disponibles para el cálculo y obtención de las medidas de redondez el software ha utilizado el método del círculo de mínimos cuadrados (LSC) y lo ha aplicado en cada una de las secciones. Se ha seleccionado este método ya que es el que determina la Norma UNE-EN ISO 12181-1:2012. "Especificación geométrica de productos (GPS). Redondez. Parte 1:Vocabulario y parámetros de redondez" [54].

El método del círculo de mínimos cuadrados (LSC) consiste en ajustar un círculo al perfil medido, siendo este mínimo al hacer la suma de los cuadrados de los alejamientos máximos, es decir, del pico más alto ( $R_{max}$ ) y del valle más bajo ( $R_{min}$ ). Teniendo esto en cuenta, el valor de la redondez es igual a la diferencia entre estos alejamientos máximos [53]. En la figura 31 tenemos una representación del LSC.



**Figura 31.** Método del círculo de mínimos cuadrados (LSC).

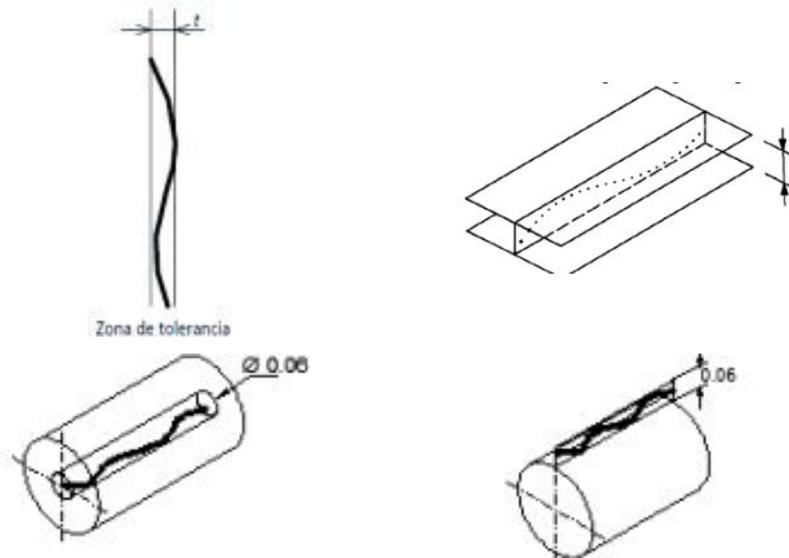
La redondez se ha medido en diferentes secciones de las probetas distribuidas en las tres zonas que componen la probeta. Para obtener el valor de la redondez para cada valor de avance y velocidad de corte, se tendrá un valor de redondez para cada una de las zonas y se calculará como la media de los valores obtenidos en sus secciones.

### 3.5.3.2. Desviaciones de rectitud.

En la tabla 10 se ha definido la rectitud (figura 32) como la diferencia entre dos rectas paralelas en una dirección especificada que encierran la superficie que se está estudiando, en este caso, la dirección es la del eje de la probeta.

Para la obtención de la rectitud el software utiliza la recta de ajuste de mínimos cuadrados, método reflejado en la norma UNE-EN ISO 12780-1. "Especificación geométrica de productos (GPS). Rectitud. Parte 1: Vocabulario y parámetros para la rectitud."

La rectitud se obtiene como la distancia del punto más alejado y del menos alejado de la línea de referencia de mínimos cuadrados y esta. Se entiende como línea de referencia de mínimos cuadrados como la línea obtenida al sumar los cuadrados de las desviaciones locales de rectitud y la cual es mínima [55].



**Figura 32.** Tolerancias de rectitud [27][56].

La rectitud se mide sobre una línea, siendo en este caso su valor la media de todos los valores obtenidos en cada generatriz.

Como ya se ha mencionado, en cada probeta se han realizado 16 medidas de rectitud, 4 en la zona empotrada, 4 en la zona calibrada y 8 medidas, 4 en 2 tramos diferentes, en la zona apoyada. A partir de estas mediciones el valor final de la rectitud para cada zona se ha calculado como el valor medio de los resultados proporcionados por la medidora de forma.

### 3.5.3.3. Desviaciones de cilindridad.

Esta tolerancia se define como la diferencia entre los radios de dos cilindros coaxiales que encierran el perfil que se estudia. Este tipo de tolerancia controla la superficie de un cilindro y se puede aplicar tanto a un agujero como a un eje [56].

En la cilindridad la tolerancia está limitada por dos cilindros separados una determinada distancia, debiendo estar la superficie real dentro de esta tolerancia (figura 33). Esta tolerancia se calcula a partir de la redondez y, por tanto, utilizando el método de ajuste por mínimos cuadrados, utilizándose los radios de los círculos inscritos máximo y mínimo de cada sección medida con respecto al eje, el cual se obtiene con la recta de ajuste de mínimos cuadrados de los centros de dichas circunferencias [20].

La obtención de la cilindridad viene definida por la norma UNE-EN ISO 12180-1:2012 “Especificación geométrica de productos (GPS). Cilindridad. Parte1: Vocabulario y parámetro para la forma de cilindridad.” [57]

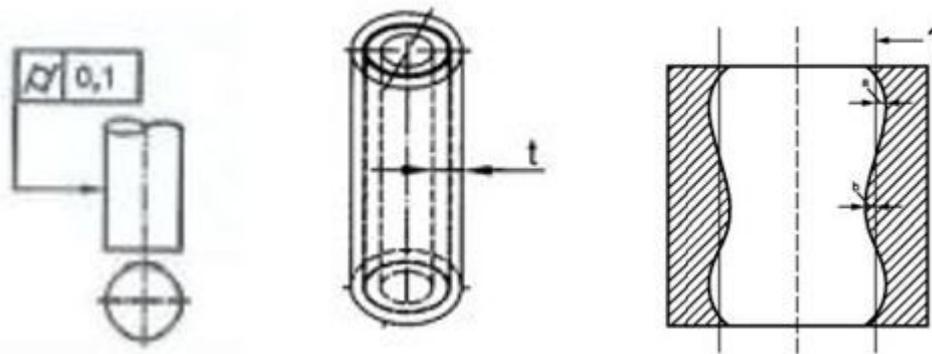


Figura 33. Tolerancia de cilindricidad.[57]

### 3.5.4. Ensayo de fatiga.

Este ensayo se ha realizado para evaluar el comportamiento de las probetas a fatiga en función de los diferentes parámetros de corte usados en el mecanizado de las probetas, teniendo en cuenta las desviaciones microgeométricas y macrogeométricas.

Las probetas se someterán a un ensayo de fatiga por flexión rotativa debido a que son elementos de revolución y a que el taller 25 de la Escuela de Ingenierías Industriales de Málaga cuenta con el equipamiento necesario para realizar este tipo de ensayos.

Antes de comenzar con los ensayos se ha tenido que realizar un mecanizado en la zona de la probeta donde se situará el rodamiento (figura 34) de la máquina para ajustar el diámetro a un valor ligeramente inferior a 12 mm, que es el valor correspondiente al diámetro interior del rodamiento. También se ha tenido que realizar una pequeña ranura en el extremo de la zona apoyada y se ha tenido que recortar el extremo opuesto para poder introducir el lado empotrado de la probeta en la máquina de fatiga. En la figura 35 se puede observar la forma final de las probetas antes de ser sometidas al ensayo de fatiga.



Figura 34. Zonas modificadas antes del ensayo a fatiga.



**Figura 35.** Probeta final antes del ensayo a fatiga.

La ranura se realiza para poder introducir un circlip y así evitar que el rodamiento se salga durante el ensayo. Esta se ha realizado a 2.5 mm de la zona donde irá el rodamiento y tiene una profundidad en torno a 0.8 mm.

Una vez que se tienen las probetas totalmente preparadas se procede al comienzo del ensayo, para ello primero se coloca la probeta en el sistema de giro, de forma que se introduce la parte empotrada en su totalidad en el portapinzas y se colocan el rodamiento y el circlip en sus respectivas zonas. Por último, antes de poner la máquina en marcha se coloca la carga, que actúa sobre la probeta a través del rodamiento, al cual va conectada como se puede observar en la figura 36. En la figura 37 se puede ver cómo queda la probeta una vez finalizada la preparación.



**Figura 36.** Colocación de la carga en el ensayo a fatiga.



**Figura 37.** Probeta colocada en la máquina de fatiga

La carga produce en la probeta un esfuerzo de flexión, quedando la zona superior de la probeta sometida a un esfuerzo de tracción y la inferior a uno de compresión, esto combinado con la rotación de la probeta genera el esfuerzo dinámico de flexión rotativa necesario para este ensayo de fatiga.

La rotura de la probeta se prevé que se produzca en la zona calibrada en el extremo opuesto a la zona apoyada, en la que está aplicada la carga. Esto se debe a que es el punto donde mayor es la tensión aplicada, considerando la probeta en esta situación como una viga empotrada con una carga aplicada en el extremo. La tensión aplicada depende del diámetro, la carga y la distancia a la carga. Esta tensión se calcula siguiendo la ecuación (3):

$$S = \frac{32*(L-x)*F}{\pi*d^3} \quad (3) [58]$$

Siendo:

S = Tensión producida por la carga (MPa)

L = longitud entre el punto de aplicación de la carga y el portapinzas (mm)

x = Distancia entre el portapinzas y la zona de donde se calcula la tensión (mm)

F = Carga aplicada (N)

d = Diámetro de la probeta en x (mm)

Dado que el diámetro es menor en la zona calibrada y la carga es constante durante el ensayo, tenemos que el valor de la tensión será máximo en la zona de menor diámetro y más alejada de la carga, siendo los valores teóricos L = 121 mm, d = 7.5 mm y x = 13 mm (figura 38).

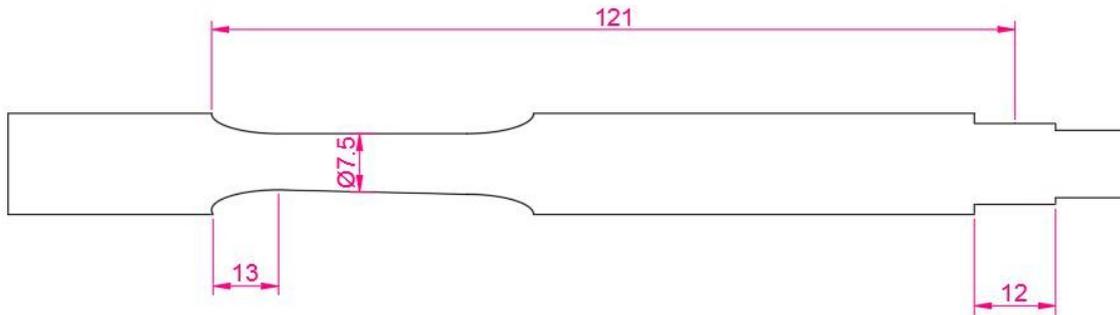


Figura 38. Distancias para el cálculo de la tensión en fatiga

Observando la gráfica teórica de Wohler de la aleación Ti6Al4V (figura 39), en la que se representan el número de ciclos en función de la tensión, se ha decidido utilizar como carga inicial 22 kg. Esto no implica que esta vaya a ser la carga final con la que se realicen todos los ensayos dado que es necesario ajustarla para que las probetas rompan con un número de ciclos suficiente que nos permitan analizar los resultados a la vez que tengan una duración no demasiado extensa, motivo por el cual se utilizara una velocidad de giro de 2800 rev/min.

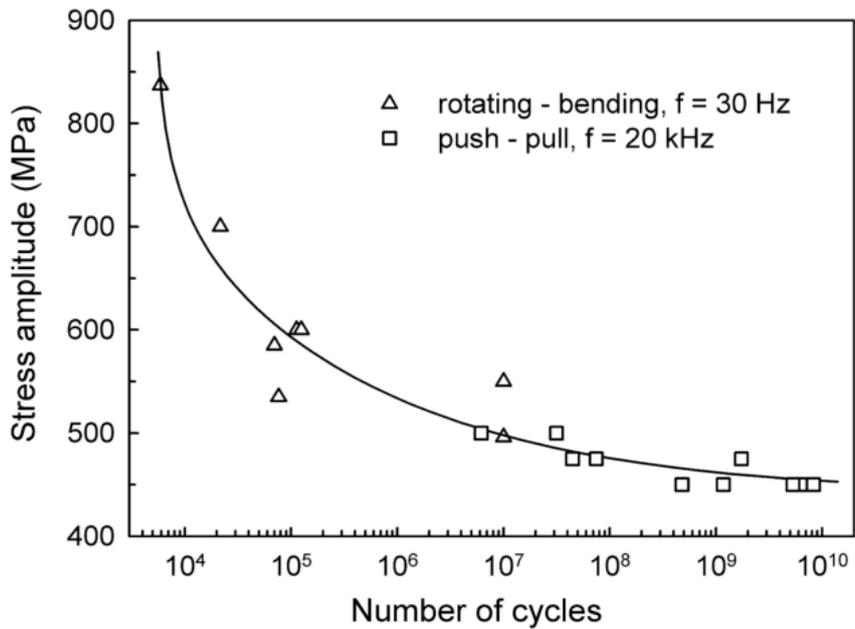
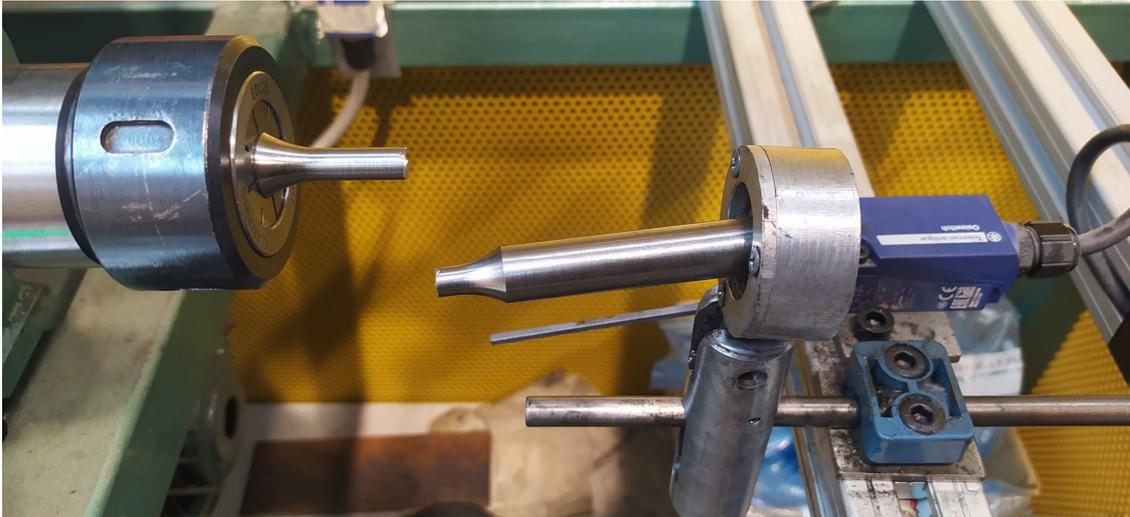


Figura 39. Grafica de Wohler del Ti6Al4V[59]

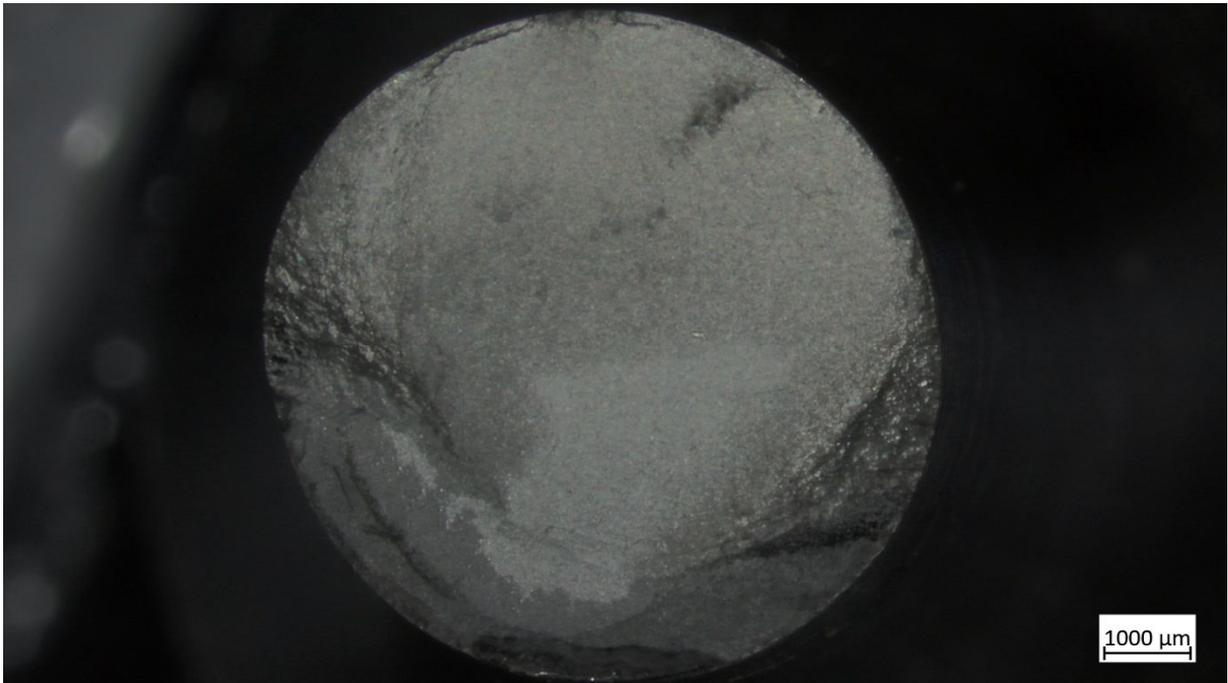
Una vez que este todo preparado se pone la máquina en marcha. Cuando la probeta rompa (figura 40) la máquina se parará de forma autónoma, ya que cuenta con un sistema de parada automático.



**Figura 40.** Probeta al finalizar el ensayo de fatiga

Se realizarán un total de 48 ensayos, con 4 series de probetas mecanizadas con 3 velocidades de corte diferentes ( $V_{c1} = 50$  m/min,  $V_{c2} = 75$  m/min,  $V_{c3} = 100$  m/min) y 4 avances distintos ( $a = 0.05$  mm/rev,  $a = 0.10$  mm/rev,  $a = 0.15$  mm/rev y  $a = 0.20$  mm/rev).

Para poder comenzar en ensayo con la siguiente probeta se debe anotar el número de ciclos a los que ha roto la probeta y a continuación desmontar la probeta rota y montar la nueva. Para finalizar, se tomarán imágenes de las secciones fracturadas (figura 41) para poder realizar un análisis fractográfico.



**Figura 41.** Ejemplo de fractografía de la probeta Ti6Al4V – L01 – B01 – 01CR05 – CN – V075 – A005 – P010 – R2.



# 4. Resultados y conclusiones

#### 4.1. Introducción.

En este apartado se van a exponer y analizar los resultados obtenidos de todos los ensayos realizados y expuestos en el apartado 3. Metodología Experimental.

El principal objetivo de este Trabajo de Fin de Grado es analizar el comportamiento a fatiga del Ti6Al4V sobre piezas torneadas en seco y con distintos parámetros de corte.

Inicialmente, se analizará si coinciden o no los valores reales de las dimensiones de las probetas con los valores teóricos y como afecta esto a la resistencia a fatiga.

A continuación, se analizarán los resultados obtenidos de las desviaciones microgeométricas y macrogeométricas. Como se ha mencionado en el apartado 2.4. Estado del Arte, ya se tienen referencias, de estudios previamente realizados sobre cómo estos pueden afectar al comportamiento a fatiga, siendo las desviaciones microgeométricas claramente determinantes en la resistencia a fatiga, mientras que de las desviaciones macrogeométricas no se tiene una influencia clara. Aprovechando estas referencias, analizaremos nuestros resultados y veremos si coinciden con o no con los resultados esperados.

Por último, se analizarán los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga y se estudiará como han podido afectar el resto de los parámetros analizados a estos resultados, intentando buscar posibles tendencias de comportamiento.

#### 4.2. Análisis del control dimensional.

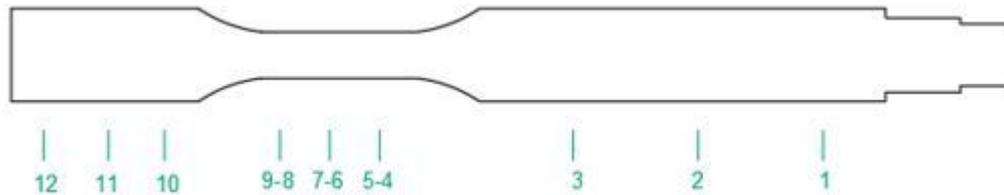
En este apartado se va a analizar la posible influencia que producen las variaciones en las dimensiones de las probetas, más específicamente los diámetros, respecto a los valores teóricos sobre el comportamiento a fatiga.

Como se ha mencionado anteriormente, la tensión aplicada sobre vigas sometidas a fatiga sigue la ecuación (3), siendo función del diámetro de la probeta, en concreto del diámetro en la zona calibrada, ya que es la zona en la que se supone que romperá la probeta. Debido a esta influencia se realizó un control dimensional el cual nos permite observar como en todas las probetas el diámetro de las distintas zonas difiere de los valores teóricos, 15 mm para las zonas empotrada y apoyada, y 7.5 mm para la zona calibrada.

En la tabla 17 se puede observar a modo de ejemplo una de las tablas usadas en la toma de datos del control numérico. Por simplificación se han calculado los valores medios de los diámetros de todas las secciones medidas.

Tabla 17. Ejemplo de tabla de control numérico de la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1.

| MEDIDA DE DIÁMETROS (mm) |               |               |               |              |   |              |              |   |               |               |               |   |
|--------------------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---|--------------|--------------|---|---------------|---------------|---------------|---|
|                          | 12            | 11            | 10            | 9            | 8 | 7            | 6            | 5 | 4             | 3             | 2             | 1 |
| M1                       | 15.101        | 15.104        | 15.103        | 7.668        |   | 7.674        | 7.686        |   | 15.154        | 15.151        | 15.156        |   |
| M2                       | 15.101        | 15.105        | 15.107        | 7.660        |   | 7.670        | 7.732        |   | 15.151        | 15.156        | 15.159        |   |
| M3                       | 15.102        | 15.105        | 15.105        | 7.667        |   | 7.678        | 7.727        |   | 15.153        | 15.155        | 15.158        |   |
| M4                       | 15.102        | 15.103        | 15.106        | 7.673        |   | 7.665        | 7.747        |   | 15.150        | 15.155        | 15.160        |   |
| Media                    | <b>15.101</b> | <b>15.104</b> | <b>15.105</b> | <b>7.667</b> |   | <b>7.672</b> | <b>7.723</b> |   | <b>15.152</b> | <b>15.154</b> | <b>15.158</b> |   |



Teniendo en cuenta que el diámetro es uno de los valores influyentes sobre el valor de la tensión aplicada y que en la ecuación que la determina este valor está elevado al cubo, es evidente que una pequeña variación puede provocar un cambio relevante en el valor de la tensión a la que realmente se está sometiendo la probeta y por tanto afectando al número de ciclos que la probeta aguantará. De forma que, manteniendo el resto de variable constantes, cuanto mayor sea el diámetro, menor será la tensión real a la que se está sometiendo la probeta, aguantando de esta forma más ciclos de los que aguantaría con el valor teórico. En la tabla 18 quedan recogidos los valores promedio de las diámetros en las distintas zonas de la probeta, en función del avance y la velocidad de corte.

Tabla 18. Diámetros medios en función de la zona y parámetros de corte.

| Vc (m/min) | a (mm/rev) | Diámetro medio |              |            |
|------------|------------|----------------|--------------|------------|
|            |            | Z. empotrada   | Z. calibrada | Z. apoyada |
| 50         | 0.05       | 15.103         | 7.687        | 15.155     |
|            | 0.10       | 15.125         | 7.733        | 15.176     |
|            | 0.15       | 15.121         | 7.729        | 15.167     |
|            | 0.20       | 15.154         | 7.738        | 15.190     |
| 75         | 0.05       | 15.138         | 7.786        | 15.186     |
|            | 0.10       | 15.139         | 7.815        | 15.186     |
|            | 0.15       | 15.133         | 7.784        | 15.169     |
|            | 0.20       | 15.157         | 7.764        | 15.189     |
| 100        | 0.05       | 15.241         | 7.836        | 15.181     |
|            | 0.10       | 15.323         | 7.985        | 15.218     |
|            | 0.15       | 15.253         | 7.890        | 15.220     |
|            | 0.20       | 15.264         | 7.870        | 15.188     |

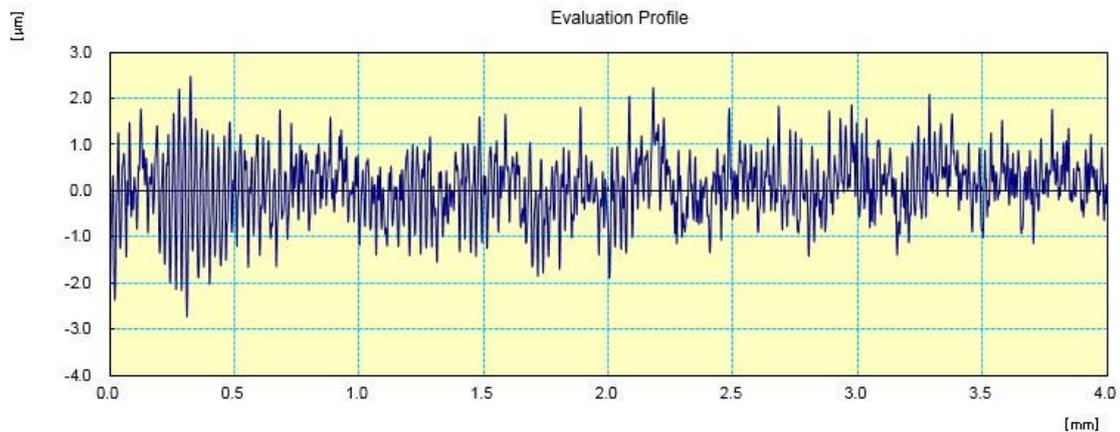
Analizando los valores de los diámetros medios se aprecia como los valores de los diámetros tienden a crecer conforme se aumenta tanto el valor del avance como la velocidad de corte. Obteniéndose los valores máximo para  $V_c = 100$  m/min. También se observa como los valores son superiores en la zona apoyada al compararlos con los de la zona empotrada, excepto para la máxima velocidad de corte.

Al aumentar los diámetros y mantenerse el resto de parámetros constante la tensión a la que se somete la probeta será menor de la teórica, como ya se ha mencionado anteriormente, y sin tener en cuenta la posible influencia de las desviaciones geométricas, sería de esperar que las probetas que han sido mecanizadas con parámetros de corte mayores, es decir, aquellas con mayor diámetro, aguanten más ciclos al ser sometidas a fatiga. Esto se cumplirá únicamente si la influencia de la variación de diámetro sobre el comportamiento a fatiga es mayor que la influencia de las desviaciones geométricas.

#### 4.3. Análisis de las desviaciones microgeométricas.

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos del ensayo de rugosidad superficial realizados sobre todas las probetas. En estos ensayos los parámetros medidos han sido la rugosidad media aritmética,  $R_a$ , y la máxima altura del perfil,  $R_z$ , en las zonas empotrada y apoyada. En la figura 42 se representa un perfil de rugosidad de las probetas, a modo de

ejemplo. Estos perfiles han sido proporcionados por el rugosímetro utilizado, pudiendo obtener uno para cada una de las medidas realizadas.



**Figura 42.** Perfil de rugosidad de la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1.

En la tabla 19 se tiene un ejemplo de la tabla que se ha utilizado para la toma de datos en los ensayos de rugosidad.

**Tabla 19.** Ejemplo de tabla de ensayo de rugosidad correspondiente a la probeta Ti6Al4V - L01 - B03 - 01CR01 – CN - V050 - A005 - P010 - R1.

|                 | Tramo 1 (T1) |              | Tramo 2 (T2) |              |
|-----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                 | Ra (µm)      | Rz (µm)      | Ra (µm)      | Rz (µm)      |
| <b>G1</b>       | 0.544        | 3.813        | 0.531        | 4.142        |
| <b>G2</b>       | 0.546        | 3.541        | 0.663        | 4.370        |
| <b>G3</b>       | 0.461        | 3.098        | 0.634        | 4.683        |
| <b>G4</b>       | 0.515        | 3.662        | 0.539        | 3.686        |
| <b>Promedio</b> | <b>0.517</b> | <b>3.529</b> | <b>0.584</b> | <b>4.220</b> |

T1 se corresponde con la zona empotrada de la probeta y T2 con la zona apoyada. De los valores relejados en estas tablas se utilizarán los valores promedios a la hora de realizar el análisis de resultados. En la tabla 20 se reflejan los valores promedio de todas las probetas, tanto en la zona empotrada como apoyada, en función de la velocidad de corte y el avance.

Tabla 20. Valores medios de Ra y Rz

| Vc (m/min) | a (mm/rev) | Ra ( $\mu\text{m}$ ) | Rz ( $\mu\text{m}$ ) |
|------------|------------|----------------------|----------------------|
| 50         | 0.05       | 0.745                | 4.713                |
|            | 0.10       | 0.967                | 6.034                |
|            | 0.15       | 1.229                | 7.870                |
|            | 0.20       | 1.456                | 7.947                |
| 75         | 0.05       | 0.766                | 4.882                |
|            | 0.10       | 0.914                | 5.727                |
|            | 0.15       | 1.422                | 7.819                |
|            | 0.20       | 1.705                | 9.018                |
| 100        | 0.05       | 0.611                | 4.093                |
|            | 0.10       | 1.537                | 7.789                |
|            | 0.15       | 1.631                | 8.607                |
|            | 0.20       | 2.148                | 9.519                |

En las figuras 43 y 44 tenemos la representación gráfica de los valores de la tabla 20, quedando reflejados los valores finales de Ra y Rz, en función de la velocidad de avance para cada uno de los valores de la velocidad de corte.

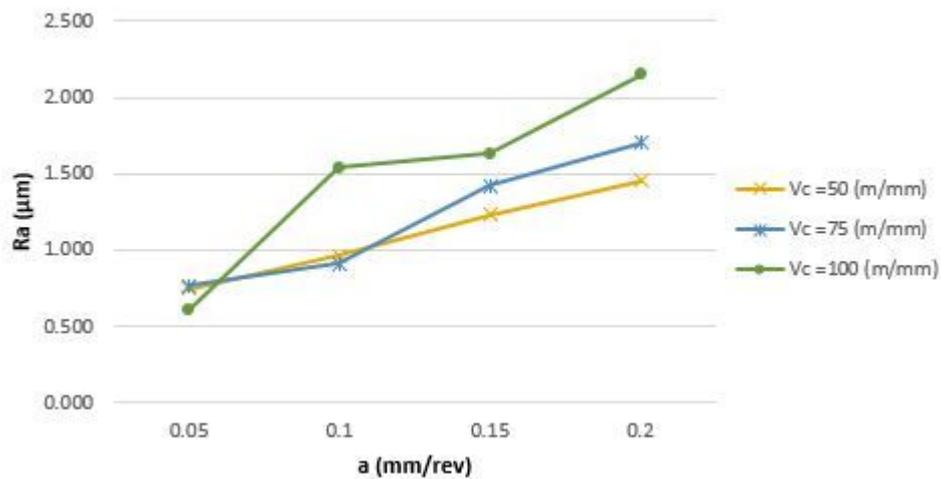


Figura 43. Valores de Ra en función del avance.

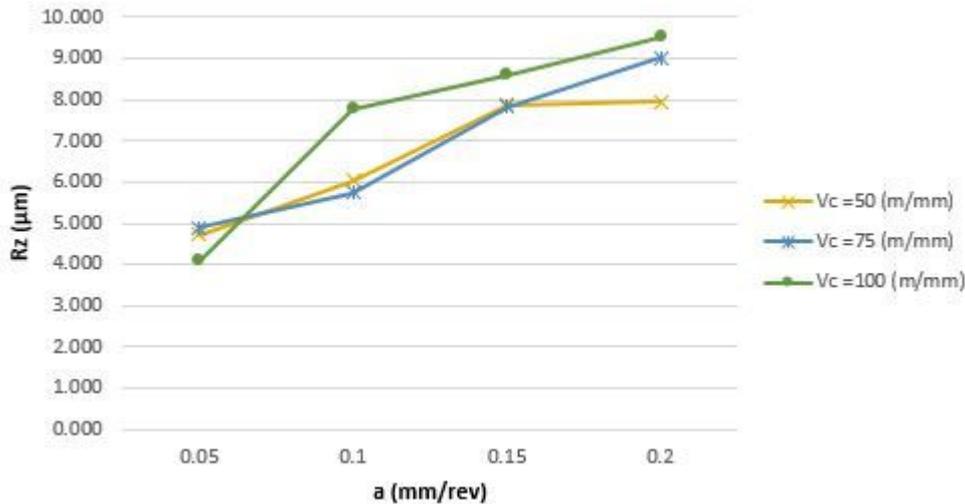


Figura 44. Valores de Rz en función del avance.

Se puede apreciar una tendencia al aumento de la rugosidad con el aumento de la velocidad de avance, siendo este el parámetro de mayor influencia, tanto de Ra como de Rz, y afectando de esta forma negativamente a la calidad superficial. Por otro lado, se puede observar cómo en el caso de las probetas mecanizadas con una  $V_c = 100$  m/min, a pesar de tener valores de rugosidad inferiores en  $a = 0.05$  mm/rev, su rugosidad es superior a las probetas mecanizadas con  $V_c = 75$  m/min y  $V_c = 50$  m/min para el resto de los valores de avance. En cambio, para  $V_c = 50$  m/min y  $V_c = 75$  m/min, tienen valores muy similares para  $a = 0.05$  mm/rev y  $a = 0.10$  mm/rev, pero para valores de  $a = 0.20$  mm/rev la rugosidad, tanto Ra como Rz, es mayor en el caso de  $V_c = 75$  m/min que en  $V_c = 50$  m/min.

Los resultados obtenidos nos indican que la velocidad de corte es un parámetro algo influyente en el caso de utilizar avances elevados, mientras que para valores de avance más pequeños la influencia de  $V_c$  no está tan clara. De esta forma se asegura que el valor de mayor influencia es el avance, lo cual confirman lo expuesto en el estado del arte, al concordar con los resultados obtenidos en otros estudios previamente realizados tanto sobre el Ti6Al4V como sobre otros materiales [13], [20], [30], [46]–[48], [50].

Los máximos valores de Ra y, por tanto el peor acabado superficial, se da para un avance de 0.20 mm/rev, siendo su valor mayor para una  $V_c = 100$  m/min. Mientras, el valor mínimo de Ra también se produce en para  $V_c = 100$  m/min y para un avance  $a = 0.05$  mm/rev. Siendo el aumento de los valores de Ra en  $a = 0.20$  mm/rev respecto a los valores en  $a = 0.05$  mm/rev, entre el doble, en el caso de  $V_c = 50$  m/min, y más de 3.5 veces superior, en el caso de  $V_c = 100$  m/min.

Por otro lado, Rz presenta un comportamiento similar a Ra, obteniéndose los valores máximos en  $a = 0.20$  mm/rev y los mínimos en  $a = 0.05$  mm/rev. Siendo para  $a = 0.20$  mm/rev, el valor de  $V_c = 75$  m/min ligeramente inferior al valor de  $V_c = 100$  m/min, quedando el valor de  $V_c = 50$  m/min por debajo de ambos. En el caso de Rz, los valores máximos son entre 1.7, en el caso de  $V_c = 50$  m/min, y, en  $V_c = 100$  m/min, 2.4 veces los valores mínimos.

#### 4.4. Análisis de las desviaciones macrogeométricas.

En este apartado se van a analizar los resultados obtenidos en el ensayo de desviaciones macrogeométricas. Para ello se van a analizar los resultados obtenidos sobre distintas deformaciones de forma. Analizando la posible influencia de los parámetros de corte sobre los resultados obtenidos.

Las deformaciones que se van a analizar son las expuestas en la Metodología Experimental, que son: redondez (RON), rectitud (STR) y cilindridad (CYL). Todas ellas se han estudiado en la zona empotrada, calibrada y apoyada. Se han obtenidos resultados de varias secciones de cada zona, y al igual que en las desviaciones microgeométricas, las desviaciones macrogeométricas también se analizarán usando los valores medios.

Los resultados se han obtenido a partir de la medidora de forma, la cual, como ya se ha explicado, ha calculado el resto de las desviaciones a partir de la redondez y rectitud.

##### 4.4.1. Redondez

En la tabla 21 quedan reflejados los valores medios obtenidos en la medición de la redondez, en función de la velocidad de corte, avance y zona de la probeta en la que se han medido. Para el estudio de redondez se analizaron 15 secciones distintas, 3 en la zona empotrada y 6 tanto en la zona calibrada como apoyada, pudiendo observarse en la figura 28 las posiciones exactas de las secciones.

Tabla 21. Valores medios de RON.

| Vc (m/min) | a (mm/rev) | RON ( $\mu\text{m}$ ) |           |         |
|------------|------------|-----------------------|-----------|---------|
|            |            | Empotrada             | Calibrada | Apoyada |
| 50         | 0.05       | 2.56                  | 4.84      | 4.23    |
|            | 0.10       | 5.05                  | 5.42      | 6.83    |
|            | 0.15       | 5.20                  | 5.85      | 6.28    |
|            | 0.20       | 4.81                  | 5.39      | 5.44    |
| 75         | 0.05       | 3.82                  | 5.05      | 4.09    |
|            | 0.10       | 6.20                  | 8.25      | 8.20    |
|            | 0.15       | 2.84                  | 4.69      | 6.52    |
|            | 0.20       | 3.44                  | 9.27      | 7.88    |
| 100        | 0.05       | 4.79                  | 5.15      | 3.95    |
|            | 0.10       | 3.18                  | 4.56      | 6.77    |
|            | 0.15       | 2.99                  | 6.61      | 4.81    |
|            | 0.20       | 5.33                  | 7.28      | 6.01    |

Analizando los valores de la tabla 21, independientemente de la zona estudiada se aprecia como para velocidades de corte elevadas,  $V_c = 100$  m/min, los valores de RON son muy dispersos, no mostrando una tendencia clara, mientras que, para velocidades de corte bajas,  $V_c = 50$  m/min, los valores tienden a aumentar para avances bajos e intermedios, bajando para avances elevados,  $a = 0.20$  mm/rev. Para  $V_c = 75$  m/min, RON también aumenta para  $a = 0.10$  mm/rev, para volver a aumentar al incrementar el avance, volviendo a disminuir para el avance máximo estudiado,  $a = 0.20$  mm/rev. Obteniéndose valores mayores para  $V_c$  intermedia. En la figura 45 se muestra un gráfico proporcionado por la medidora de forma, en el que se representa el perfil de redondez de diferentes secciones.

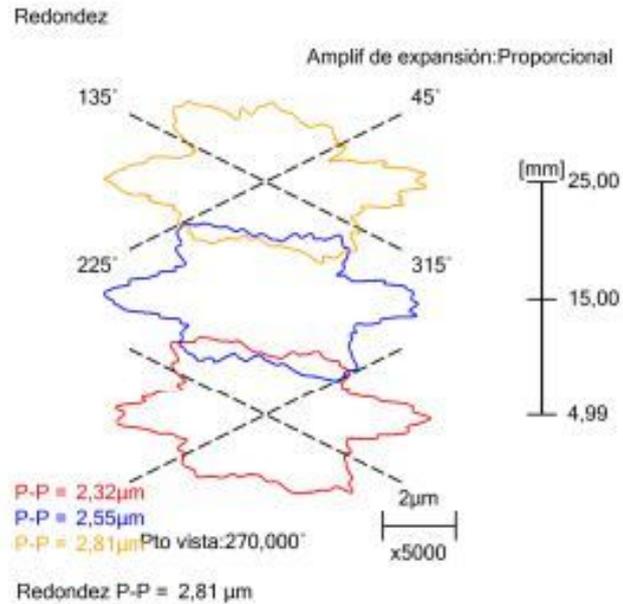


Figura 45. Ejemplo de un perfil de redondez.

En las figuras 46, 47 y 48 se representan los valores de RON calculados para cada zona de la probeta en función de los parámetros de corte.

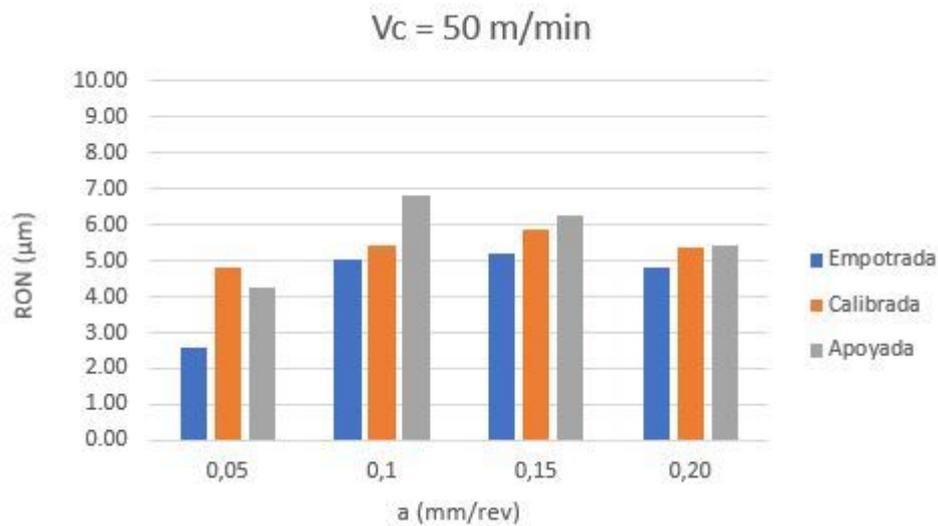
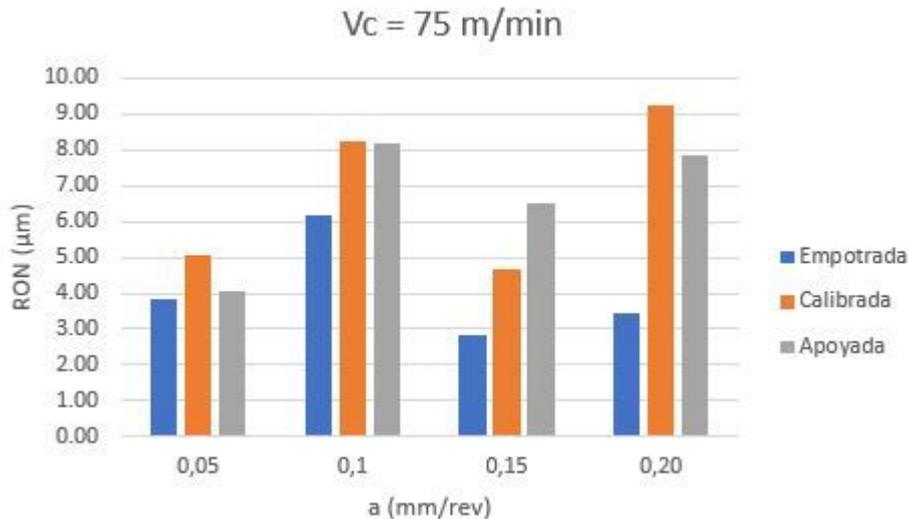


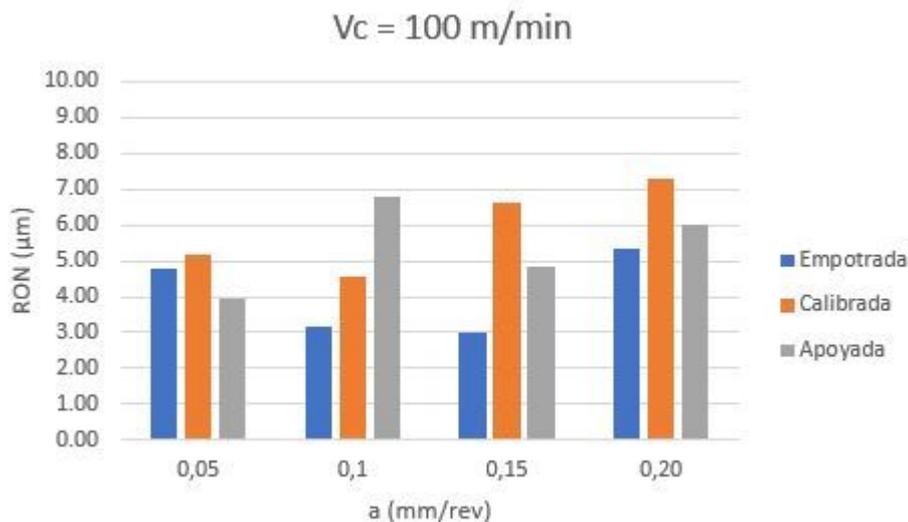
Figura 46. RON en función del avance, para  $V_c = 50$  m/min.

En la figura 46 se observa como los valores de redondez, en el caso de  $V_c = 50$  m/min, son siempre menores en la zona empotrada, mientras que a partir de  $a = 0.10$  mm/rev los valores de RON en la zona calibrada son menores que los de la zona apoya, disminuyendo la diferencia entre estos, conforme aumenta el valor del avance, llegando a ser prácticamente iguales para  $a = 0.20$  mm/rev. El valor mínimo se alcanza en la zona empotrada para un  $a = 0.05$  mm/rev y el máximo en la zona apoyada para  $a = 0.10$  mm/rev. A pesar de estar el valor máximo de RON en  $a = 0.10$  mm/rev, se puede observar una tendencia a aumentar su valor hasta  $a = 0.15$  mm/rev, volviendo a disminuir al seguir aumentando el avance.



**Figura 47.** RON en función del avance, para  $V_c = 75 \text{ m/min}$ .

En la figura 47 se observa los valores de RON para  $V_c = 75 \text{ m/min}$ . Al igual que para  $V_c = 50 \text{ m/min}$  se tiene que los valores de RON en la zona calibrada son inferiores a los obtenidos en la zona calibrada y apoyada. También se observa, como a diferencia de los resultados en  $V_c = 50 \text{ m/min}$ , en este caso los valores de RON en la zona calibrada son superiores a los de la zona apoyada, excepto para  $a = 0,15 \text{ mm/rev}$  y siendo prácticamente iguales para  $a = 0,10 \text{ mm/rev}$ . En este caso, el valor máximo se tiene para  $a = 0,20 \text{ mm/rev}$  en la zona calibrada, y el valor mínimo en  $a = 0,15 \text{ mm/rev}$  en la zona empotrada. Coincidiendo con los resultados para  $V_c = 50 \text{ m/min}$ , tenemos que los valores de RON aumentan hasta  $a = 0,10 \text{ mm/rev}$ , sin embargo, después vuelven a disminuir en  $a = 0,15 \text{ mm/rev}$  y a aumenta en  $a = 0,20 \text{ mm/rev}$ .



**Figura 48.** RON en función del avance, para  $V_c = 100 \text{ m/min}$ .

Por último, en la figura 48 se representan los valores de RON para  $V_c = 100 \text{ m/min}$ , en esta figura, al igual que en las correspondientes a  $V_c = 50 \text{ m/min}$  y  $V_c = 75 \text{ m/min}$ , se tiene que los valores de RON para cada valor de avance son menores en la zona empotrada, excepto, en este caso, en  $a = 0,05 \text{ mm/rev}$ , siendo menor en la zona apoyada. La desviación de redondez es mayor en la zona calibrada, excepto en  $a = 0,10 \text{ mm/rev}$  donde es mayor en la zona apoyada. En el caso de  $V_c = 100 \text{ m/min}$ , no se aprecia una tendencia clara de comportamiento, dado que en el caso

de la zona empotrada los valores tienden a disminuir conforme aumenta el avance, aumentando en  $a = 0.20$  mm/rev, en el caso de la zona calibrada disminuyen, volviendo a aumentar con el avance a partir de  $a = 0.10$  mm/rev. Para la zona apoyada los valores son dispersos, no mostrando una tendencia clara.

Comparando las tres gráficas se puede observar que las desviaciones de redondez en la zona empotrada son menores que en la zona calibrada y apoyada, independientemente de los parámetros de corte. Independientemente del avance los valores de RON en la zona apoyada y calibrada no tienen una superioridad clara uno respecto de otro, siendo en el caso de  $V_c = 50$  m/min y  $V_c = 100$  m/min mayores en la zona calibrada, mientras que para  $V_c = 75$  m/min los valores en la zona apoyada son superiores a los de la zona calibrada.

Se puede observar como para  $V_c = 50$  m/min y  $V_c = 100$  m/min los valores de RON máximos y mínimos en cada zona y en toda la probeta, varían menos que en el caso de  $V_c = 75$  m/min, donde los valores sufren una gran variación entre los distintos valores de avance.

Como conclusión se puede decir que, para valores de velocidad de corte bajos,  $V_c = 50$  m/min, y altos,  $V_c = 100$  m/min, los valores de RON son más estables en función de la zona de la probeta. Mientras que, para valores intermedios,  $V_c = 75$  m/min, varían mucho en función del avance utilizado. También se puede decir que, para valores de avance pequeños, hasta  $a = 0.10$  mm/rev, y velocidades de corte no elevadas, inferiores a 20 m/min, los valores de RON tienden a aumentar. Mientras que los valores de RON para avances intermedios, entre  $a = 0.10$  mm/rev y  $a = 0.15$  mm/rev, tienden a disminuir. Siendo por tanto la velocidad de corte un parámetro más determinante en cuanto a las desviaciones de redondez, no observándose una tendencia clara en función del avance.

El análisis sobre la influencia de la velocidad de corte sobre la redondez se asimilan a los resultados obtenidos por Sara Gómez en [20], donde estudió la influencia de los parámetros de corte en las desviaciones macrogeométricas sobre probetas torneadas en seco de Ti6Al4V. Llegando a concluir que para obtener valores más óptimos de RON es necesario emplear tanto un avance como una velocidad de corte baja.

Los resultados también coinciden con los obtenidos por Sergio Martín Béjar en [13], donde hace el mismo análisis pero sobre probetas de la aleación de aluminio UNS A97075, este llegó a la conclusión de que el parámetro de mayor influencia es la velocidad de corte, siendo el avance por si solo un parámetro poco determinante.

#### 4.4.2. Rectitud

En la tabla 22 quedan reflejados los valores medios de rectitud obtenidos, en función de los parámetros de corte y la zona de la probeta en la que se han medido. Para el estudio de rectitud se tomaron medidas en 16 tramos distintos, 4 en la zona empotrada, 4 en la zona calibrada y 8 en la zona apoyada, pudiendo observarse en la figura 29 la posición exacta de cada tramo.

Tabla 22. Valores medios de STR.

| Vc (m/min) | a (mm/rev) | STR ( $\mu\text{m}$ ) |           |         |
|------------|------------|-----------------------|-----------|---------|
|            |            | Empotrada             | Calibrada | Apoyada |
| 50         | 0.05       | 7.89                  | 9.34      | 10.57   |
|            | 0.10       | 13.41                 | 16.78     | 12.37   |
|            | 0.15       | 7.89                  | 9.22      | 8.27    |
|            | 0.20       | 6.62                  | 8.02      | 7.95    |
| 75         | 0.05       | 9.34                  | 15.42     | 4.08    |
|            | 0.10       | 4.48                  | 11.31     | 9.34    |
|            | 0.15       | 4.24                  | 6.32      | 5.92    |
|            | 0.20       | 8.09                  | 9.31      | 9.89    |
| 100        | 0.05       | 8.68                  | 13.35     | 3.83    |
|            | 0.10       | 15.32                 | 10.85     | 13.35   |
|            | 0.15       | 6.68                  | 9.07      | 8.05    |
|            | 0.20       | 13.89                 | 10.04     | 13.72   |

Analizando los valores medios reflejados en la tabla 22, se puede observar cómo independientemente de la zona de la probeta, para  $V_c = 50$  m/min, los valores de STR tienden a disminuir con avances elevados,  $a = 0.20$  mm/rev, mientras que, para velocidades de corte superiores,  $V_c = 75$  m/min y  $V_c = 100$  m/min, los valores vuelven a aumentar a partir de  $a = 0.15$  mm/rev.

En la figura 49 se representa una de las gráficas proporcionadas por la medidora de forma en la que se representa un ejemplo del perfil de rectitud de los diferentes tramos estudiados en una de las zonas de la probeta.

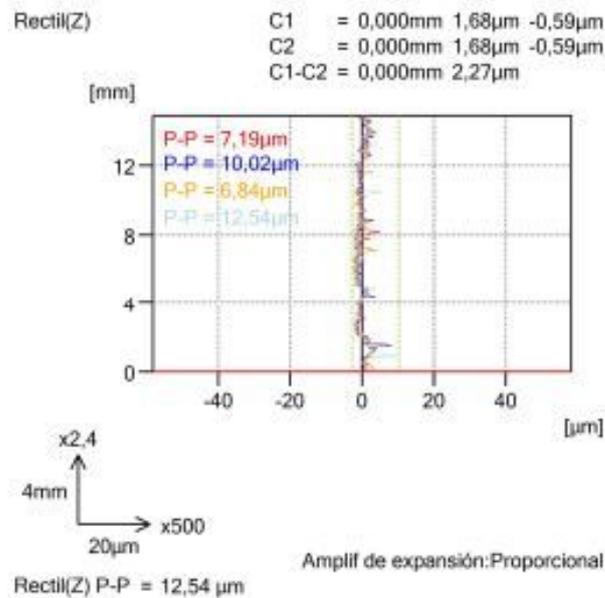


Figura 49. Ejemplo de perfil de rectitud.

En las figuras 50, 51 y 52 se representan los valores de STR en función del avance para las distintas velocidades de corte utilizadas.

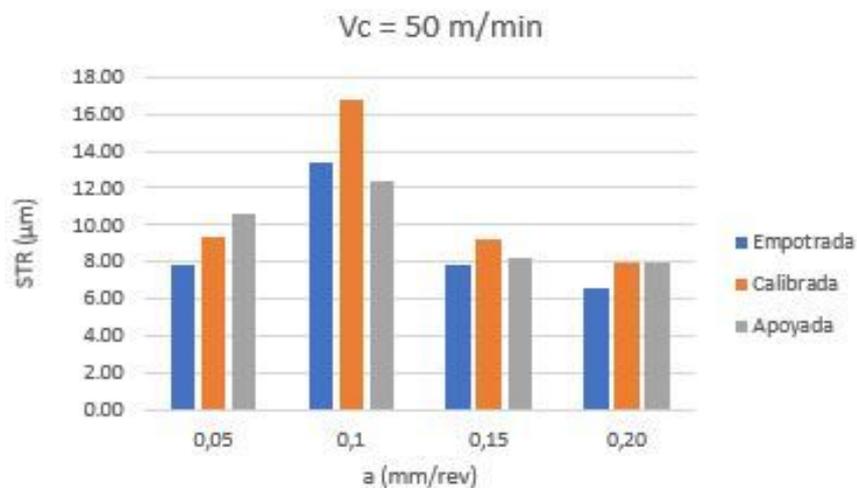
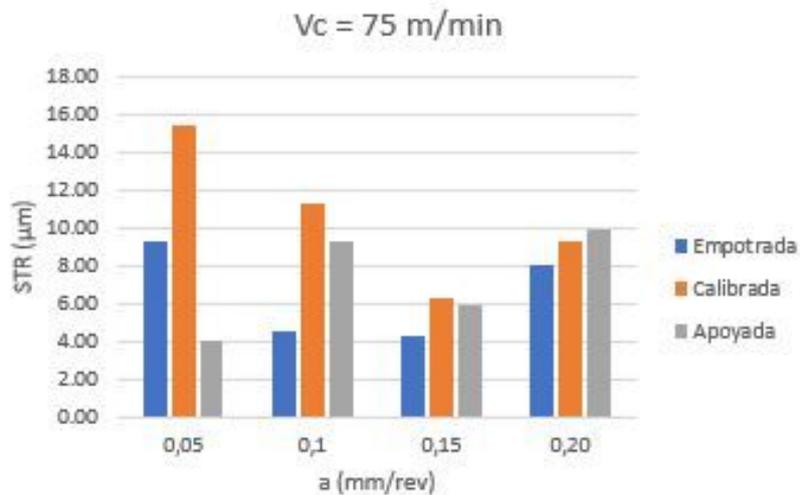


Figura 50. STR en función del avance para  $V_c = 50$  m/min.

En la figura 50 se representan los valores de STR para  $V_c = 50$  m/min en función del avance. Los valores de STR en la zona empotrada y apoyada son menores que los de la zona calibrada para avances entre 0.10 mm/rev y 0.20 mm/rev, en cambio, para  $a = 0.05$  mm/rev el valor de STR en la zona apoyada supera al de la zona calibrada.

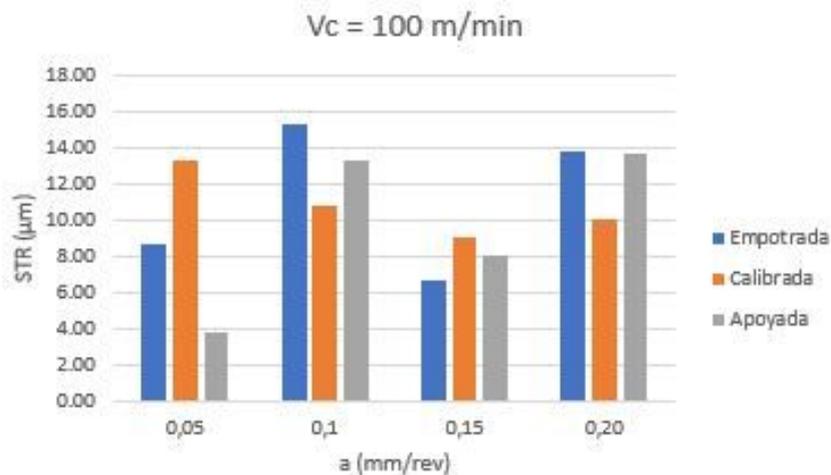
Conforme aumenta el avance disminuye la diferencia de los valores de STR entre la zona empotrada y apoyada, excepto para  $a = 0.20$  mm/rev donde la diferencia aumenta. También se observa como para  $V_c = 50$  m/min los valores de STR aumentan hasta  $a = 0.10$  mm/rev, valor a partir del cual al aumentar el avance disminuye STR. Produciéndose las máximas desviaciones de STR para  $a = 0.10$  mm/rev, tanto a nivel de la probeta completa como como por zonas. El valor máximo de STR se produce en  $a = 0.10$  mm/rev en la zona calibrada, y el mínimo en  $a = 0.20$  mm/rev en la zona empotrada. Todo esto nos indica la influencia que tiene el avance sobre las desviaciones de rectitud al mantener constante la  $V_c$ .



**Figura 51.** STR en función del avance para  $V_c = 75 \text{ m/min}$ .

En la figura 51 se representan los valores de STR para  $V_c = 75 \text{ m/min}$  en función del avance. Se puede observar cómo los valores de STR son máximos en la zona calibrada excepto para  $a = 0,20 \text{ mm/rev}$ , zona en la que la zona apoyada tiene valores superiores. Algo similar pasa con la zona empotrada, ya que es la zona que tiene menores valores de STR para valores intermedios y altos de avance, [ $a = 0,10 \text{ mm/rev} - a = 0,20 \text{ mm/rev}$ ].

Se observa como conforme aumenta el avance los valores de STR en la zona empotrada y calibrada disminuyen hasta  $a = 0,15 \text{ mm/rev}$ , valor a partir del cual vuelve a aumentar. De esta forma, el valor máximo de STR para estas zonas se producen en  $a = 0,05 \text{ mm/rev}$  y los mínimos en  $a = 0,15 \text{ mm/rev}$ . En cambio, la zona apoyada no muestra una tendencia fija en función del avance, teniendo su máximo en  $a = 0,20 \text{ mm/rev}$  y su mínimo en  $a = 0,05 \text{ mm/rev}$ .



**Figura 52.** STR en función del avance para  $V_c = 100 \text{ m/min}$ .

En la figura 52 se representan los valores de STR en función del avance para  $V_c = 100 \text{ m/min}$ . En esta gráfica, al igual que en las gráficas de  $V_c = 50 \text{ m/min}$  y  $V_c = 75 \text{ m/min}$ , para avances entre  $0,10 \text{ mm/rev}$  y  $a = 0,20 \text{ mm/rev}$  el valor de STR disminuye. En este, se observa como STR en la zona calibrada tiende a disminuir su valor, mientras que los valores en las zonas empotrada y apoyada no tienen una tendencia determinada al variar el avance. Los valores mínimos los encontramos en el caso de la zona empotrada y calibrada en  $a = 0,15 \text{ mm/rev}$ , y en la zona

apoyada en  $a = 0.05$  mm/rev. Estando el valor máximo total en  $a = 0.10$  mm/rev en la zona empotrada, y el mínimo en  $a = 0.05$  mm/rev en la zona apoyada.

Analizando los resultados representados en las figuras 50, 51 y 52 se observa como independientemente de  $V_c$  la tendencia de los valores de STR para avances entre  $a = 0.10$  mm/rev y  $a = 0.15$  mm/rev, es disminuir. Por otro lado, se observa como para las velocidades de corte mínima y máxima estudiadas,  $V_c = 50$  m/min y  $V_c = 100$  m/min, la tendencia general para valores de avance bajos,  $a = 0.05 - 0.10$  mm/rev, los valores de STR aumentan. Del mismo modo, para velocidades de corte intermedias y altas,  $V_c = 75$  m/min y  $V_c = 100$  m/min, junto con avances elevados, por encima de  $a = 0.15$  mm/rev la tendencia de STR también es aumentar.

También se observa como la dispersión de valores es menor para el valor de avance  $a = 0.15$  mm/rev.

Se observa como los valores de STR para  $V_c = 50$  m/min y  $V_c = 75$  m/min son mayores en la zona calibrada, mientras que, para valores de corte altos,  $V_c = 100$  m/min, las desviaciones en la zona calibrada son más estables, disminuyendo su valor con el aumento del avance. El valor máximo de STR se encuentra en la zona calibrada y para una  $V_c = 50$  m/min y  $a = 0.10$  mm/rev, y el mínimo, y más óptimo, se encuentra en la zona apoyada y para  $V_c = 100$  m/min y  $a = 0.05$  mm/rev.

En este caso, a diferencia de lo que ocurre con las desviaciones de redondez, el parámetro de mayor influencia es el avance, pues como ya se ha mencionado, independientemente de  $V_c$ , STR tiene tendencias muy claras sobre todo para valores de avance intermedios, entre  $a = 0.10$  mm/rev y  $a = 0.15$  mm/rev. Por otro lado, la velocidad de corte también tiene influencia, solo analizándola junto al avance, sobre STR pues conforme aumenta  $V_c$  los valores de STR para avances superiores a  $a = 0.15$  mm/rev, tienden a crecer.

#### 4.4.3. Cilindricidad

En la tabla 23 se exponen los resultados de cilindricidad obtenidos a partir de la medidora de forma, en función de las condiciones de corte y la zona de la probeta. Los valores de cilindricidad los ha calculado el software a partir de las mediciones de redondez y rectitud.

En la figura 53 se expone una de las gráficas proporcionadas por la medidora de forma en la que se representa el perfil de cilindricidad en una de las zonas medida de la probeta.

Tabla 23. Valores de CYL.

| Vc (m/min) | a (mm/rev) | CYL ( $\mu\text{m}$ ) |           |         |
|------------|------------|-----------------------|-----------|---------|
|            |            | Empotrada             | Calibrada | Apoyada |
| 50         | 0.05       | 5.68                  | 21.58     | 11.29   |
|            | 0.10       | 18.74                 | 18.00     | 12.48   |
|            | 0.15       | 10.34                 | 15.33     | 17.68   |
|            | 0.20       | 8.90                  | 22.41     | 11.13   |
| 75         | 0.05       | 8.74                  | 16.71     | 17.27   |
|            | 0.10       | 18.04                 | 28.89     | 23.13   |
|            | 0.15       | 7.79                  | 18.65     | 12.45   |
|            | 0.20       | 8.88                  | 22.61     | 21.27   |
| 100        | 0.05       | 25.29                 | 32.69     | 12.69   |
|            | 0.10       | 19.44                 | 16.08     | 23.47   |
|            | 0.15       | 22.12                 | 17.80     | 10.63   |
|            | 0.20       | 35.34                 | 13.51     | 30.79   |

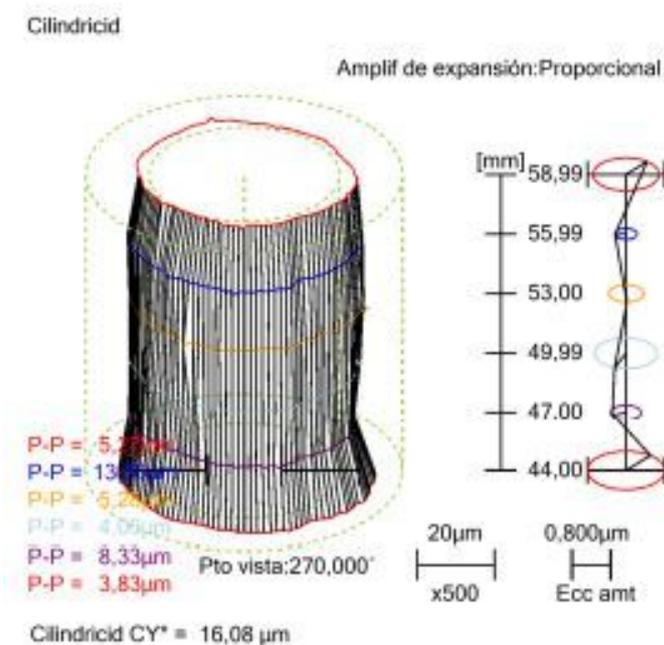
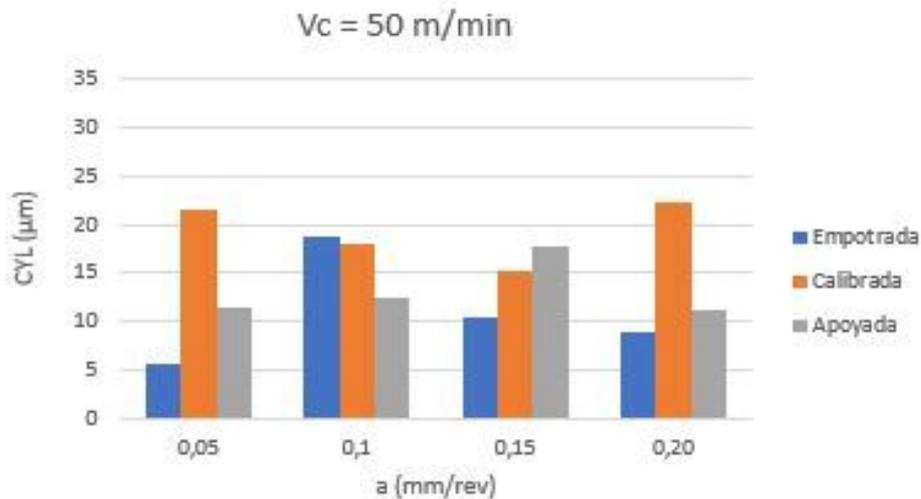


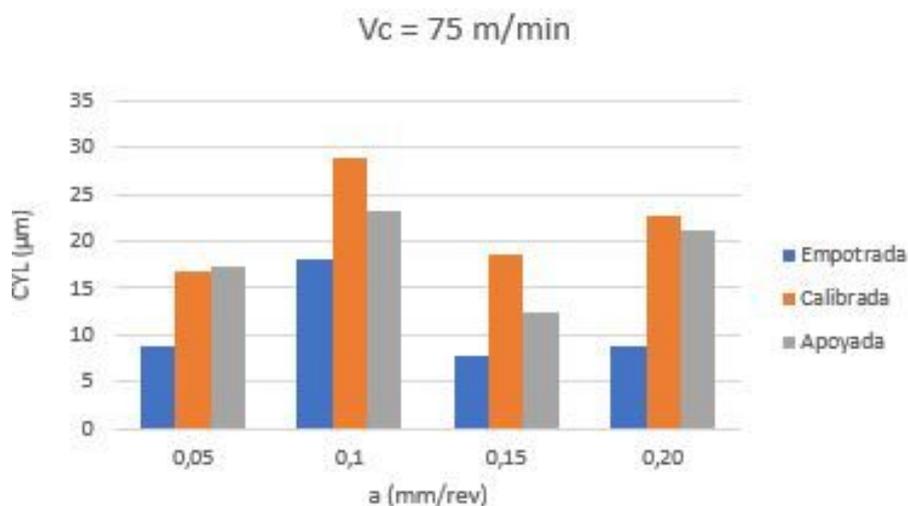
Figura 53. Ejemplo de perfil de cilindruidad.

En las figuras 54, 55 y 56 se representan los valores de CYL en cada zona de las probetas en función del avance y para cada velocidad de corte utilizada.



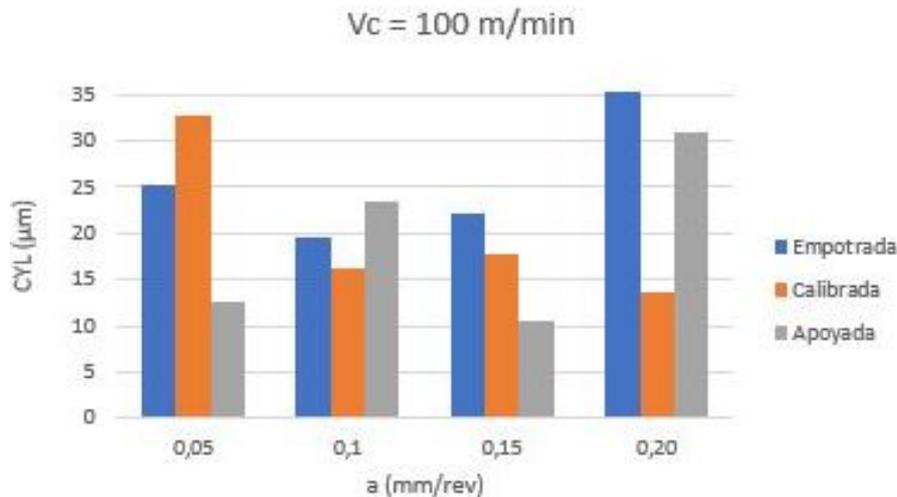
**Figura 54.** CYL en función del avance para Vc = 50 m/min.

En la figura 54 se representan los valores de CYL en función del avance para Vc = 50 m/min. Se puede observar cómo los valores de CYL en la zona calibrada tienden a ser superiores que los valores en las zonas empotrada y apoyada. Teniendo, en el caso de la zona empotrada, su máximo en a = 0.10 mm/rev y su mínimo en a = 0.05 mm/rev, la zona calibrada tiene su máximo en a = 0.20 mm/rev y su mínimo en a = 0.15 mm/rev, la zona apoyada tiene su máximo en a = 0.15 mm/rev y su mínimo en a = 0.20 mm/rev. En el caso de la zona calibrada va a disminuir CYL al aumentar el avance hasta a = 0.15 mm/rev, para avances mayores CYL vuelve a aumentar. En el caso de la zona empotrada, los valores de CYL tienden a disminuir con forme aumenta el avance, a partir de valores de a = 0.10 mm/rev. Siendo el caso de la zona apoyada, el caso opuesto a lo que ocurre en la zona calibrada, de forma que CYL aumenta hasta valores de a = 0.15 mm/rev, disminuyendo al aumentar el avance. De esta forma, no se aprecia una tendencia en función del avance al comparar las tendencias de comportamiento de las distintas zonas de la probeta.



**Figura 55.** CYL en función del avance para Vc = 75 m/min.

En la figura 55 se representan los valores de CYL para  $V_c = 75$  m/min en función del avance. En esta gráfica se puede observar cómo independientemente de la zona analizada, todos los valores máximos se consiguen para un avance  $a = 0.10$  mm/rev. Teniendo una clara tendencia en función del valor del avance de forma que los valores de CYL aumentan, siendo máximos, hasta  $a = 0.10$  mm/rev, disminuyendo hasta  $a = 0.15$  mm/rev, volviendo a aumentar para  $a = 0.20$  mm/rev. De esta forma se tiene el valor mínimo para  $a = 0.15$  mm/rev en la zona empotrada.



**Figura 56.** CYL en función del avance para  $V_c = 100$  m/min.

En la figura 56 se representan los valores de CYL en función del avance para  $V_c = 100$  m/min. Se puede observar cómo tanto la zona empotrada como calibrada tienden a disminuir su valor de CYL hasta  $a = 0.10$  mm/rev, aumentando con el avance hasta  $a = 0.15$  mm/rev. El valor máximo de CYL se consigue para valores de avance elevados,  $a = 0.20$  mm/rev y en la zona empotrada. Consiguiéndose el valor mínimo en la zona apoyada para  $a = 0.15$  mm/rev.

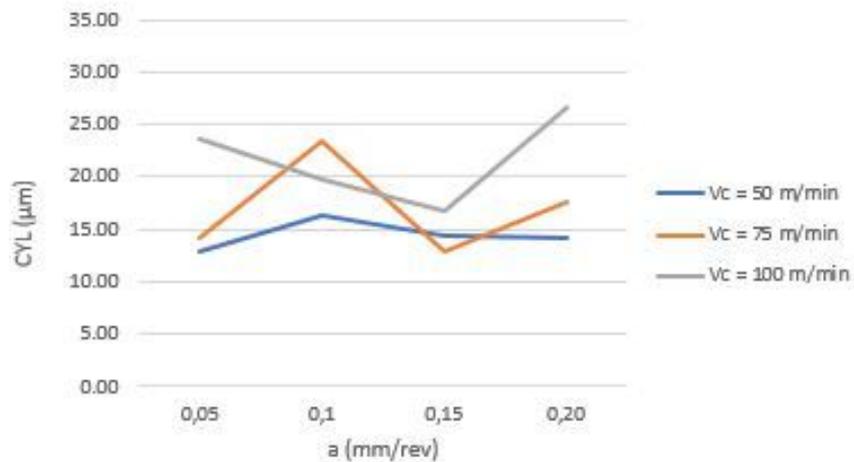
Al comparar las figuras 54, 55 y 56 se observa como para velocidades de corte muy elevadas los valores de CYL se hacen máximos en la zona empotrada y mínimos en la zona calibrada, siendo mínimos para  $V_c = 50$  m/min y  $V_c = 75$  m/min en la zona empotrada y máximos en la zona calibrada. De esta forma, la influencia de la velocidad de corte sobre la cilindridad en las distintas zonas de la probeta es más significativa. En cambio, no se observa una tendencia en los valores de CYL en función del avance.

Se tiene que los valores óptimos y, por tanto, mínimos, de cilindridad se obtienen en la zona empotrada para  $V_c = 50$  m/min y  $a = 0.05$  mm/rev, teniéndose el peor resultado también en la zona empotrada, pero para  $V_c = 100$  m/min y  $a = 0.20$  mm/rev. Esto implica que conforme aumenta tanto la velocidad de corte como el avance empeoran las desviaciones de cilindridad, siendo un factor a tener en cuenta las distintas zonas de la probeta.

Por último, para realizar un análisis de los resultados sin tener en cuenta las zonas de la probeta se ha calculado la media de los valores de CYL, los cuales quedan reflejados en la tabla 24 y representados en la figura 57.

Tabla 24. Valores medios de CYL en función de  $a$  y  $V_c$ .

| $a$ (mm/rev)      | 0.05  | 0.10  | 0.15  | 0.20  |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|
| $V_c = 50$ m/min  | 12.85 | 16.41 | 14.45 | 14.15 |
| $V_c = 75$ m/min  | 14.24 | 23.35 | 12.96 | 17.59 |
| $V_c = 100$ m/min | 23.56 | 19.66 | 16.85 | 26.55 |

Figura 57. Valores medios de CYL en función del avance y  $V_c$ .

Analizando los resultados expuestos en la figura 57 se ve como los valores de CYL tienden a ser mayores cuanto mayor es la velocidad de corte. Por otro lado, se puede observar como para  $V_c = 75$  m/min y  $V_c = 100$  m/min y avances elevados  $a = 0.15$  mm/rev y  $a = 0.20$  mm/rev, CYL aumenta, mientras que para valores intermedios de avance (0.10 mm/rev - 0.15 mm/rev) CYL baja, independientemente de la velocidad de corte. En el análisis de los valores medios, independientemente de las zonas de la probeta se tiene que el valor óptimo se consigue para  $a = 0.05$  mm/rev y  $V_c = 50$  m/min. Obteniéndose el peor resultado para  $V_c = 100$  m/min y  $a = 0.20$  mm/rev.

Se puede decir que el factor más influyente sobre la cilindridad es la velocidad de corte, y en el caso del avance, si se analiza dependientemente de  $V_c$ , tenemos que para valores elevados de avance y  $V_c$  se obtienen peores resultados, a la vez que para valores bajos de ambos parámetros tenemos mejores resultados de cilindridad.

#### 4.5. Análisis del comportamiento a fatiga.

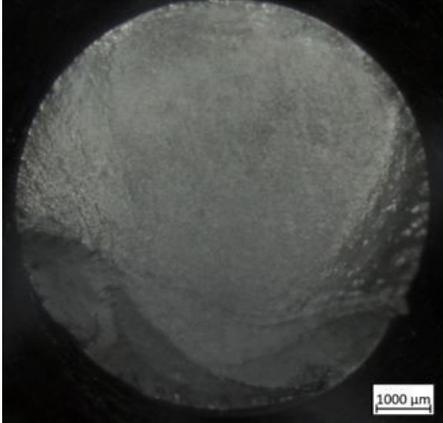
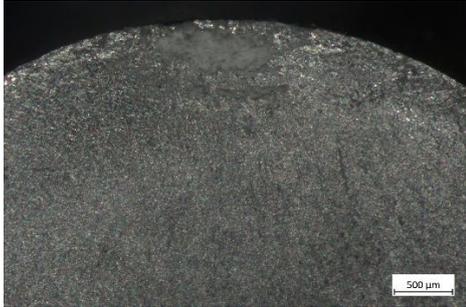
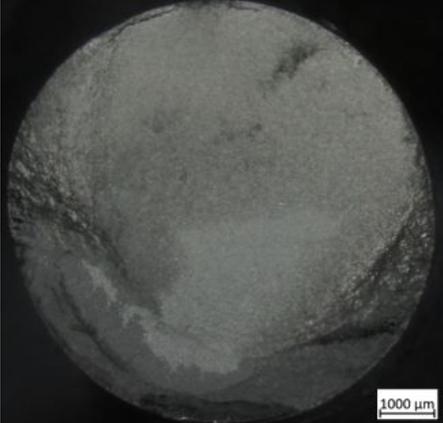
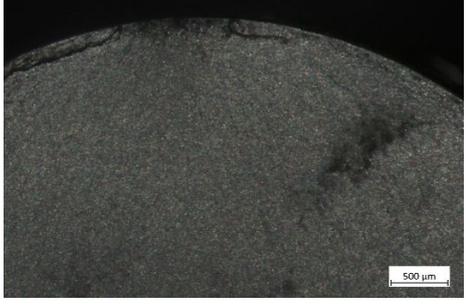
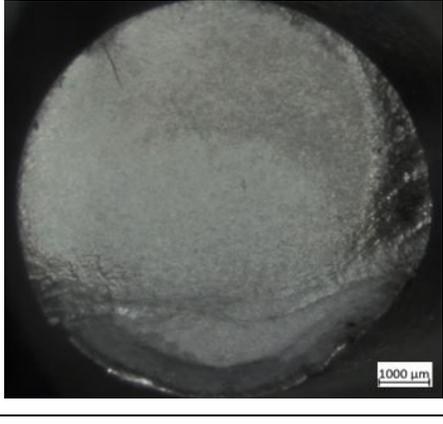
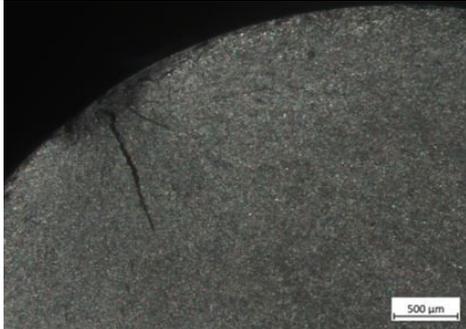
En este apartado se va a desarrollar el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo de fatiga. Dentro del análisis de fatiga se ha realizado un análisis fractográfico de las secciones de las probetas tras la rotura. De cada sección se han tomado dos imágenes, una de la sección completa y otra ampliando la zona donde se ha producido el inicio de grieta. En las imágenes correspondientes a las secciones completas se pueden diferenciar las 3 zonas características (inicio de grieta, crecimiento de grieta y zona de rotura plástica) de la rotura plástica por fatiga (figura 58).



**Figura 58.** Caracterización de la sección de rotura plástica por fatiga.

A continuación, en la tabla 25 se exponen las imágenes correspondientes a las secciones de 3 probetas, cada una de ellas mecanizada con una velocidad de corte diferente y sometidas todas ellas a la misma carga en el ensayo de fatiga.

Tabla 25. Secciones de fractura plástica por fatiga para distintas  $V_c$  y  $a$ .

| X10   | X30  | Parámetros de corte  |
|---|--|--|
|    |    | $V_c = 50$<br>m/min<br>$a = 0.20$<br>mm/rev<br>$p = 1$ mm  |
|   |   | $V_c = 75$<br>m/min<br>$a = 0.05$<br>mm/rev<br>$p = 1$ mm  |
|  |  | $V_c = 100$<br>m/min<br>$a = 0.20$<br>mm/rev<br>$p = 1$ mm |

Se puede observar en las imágenes de las secciones completas, X10, como estas son muy similares, siendo la extensión de superficie de cada zona muy similar en todas ellas, esto se debe a que la carga se ha mantenido constante. Si la carga aumentase, la zona de rotura plástica aumentaría su superficie, ya que para una mayor carga la sección de material necesaria para soportarla es mayor. Se observa también como se produce un único punto de inicio de grieta, que tiene lugar en la superficie, a partir del cual se produce el crecimiento, reduciéndose la

sección que soporta la carga hasta que ya no es capaz de aguantar el esfuerzo y se produce la rotura plástica.

Si se comparan las imágenes correspondientes a la zona de iniciación de grieta, X30, para las distintas velocidades de corte se puede observar cómo conforme aumenta  $V_c$  se hace más clara la zona de iniciación de grieta.

En los ensayos de fatiga se ha aplicado una carga de 24 kg aplicados en la zona del rodamiento, una vez finalizado el ensayo de cada probeta se ha anotado el número de ciclos en el que se ha producido la rotura y se ha medido la distancia  $X$  en la que se encuentra la sección de rotura (ecuación 3). Ya que se han ensayado 4 series, en la tabla 26 se recogen los valores medios del número de ciclos al que han roto las probetas para cada combinación de parámetros de corte.

**Tabla 26. Valores medios de los resultados del ensayo de fatiga.**

| <b>Vc (m/min)</b> | <b>a (mm/rev)</b> | <b>Media</b> |
|-------------------|-------------------|--------------|
| <b>50</b>         | <b>0.05</b>       | 1285996      |
|                   | <b>0.10</b>       | 1885862      |
|                   | <b>0.15</b>       | 142116       |
|                   | <b>0.20</b>       | 231524       |
| <b>75</b>         | <b>0.05</b>       | 1476263      |
|                   | <b>0.10</b>       | 960936       |
|                   | <b>0.15</b>       | 968249       |
|                   | <b>0.20</b>       | 218039       |
| <b>100</b>        | <b>0.05</b>       | 1110536      |
|                   | <b>0.10</b>       | 1010422      |
|                   | <b>0.15</b>       | 311336       |
|                   | <b>0.20</b>       | 513891       |

Para analizar de forma más clara los resultados obtenidos, en la figura 59 se han representado el número de ciclos junto con los parámetros de corte.

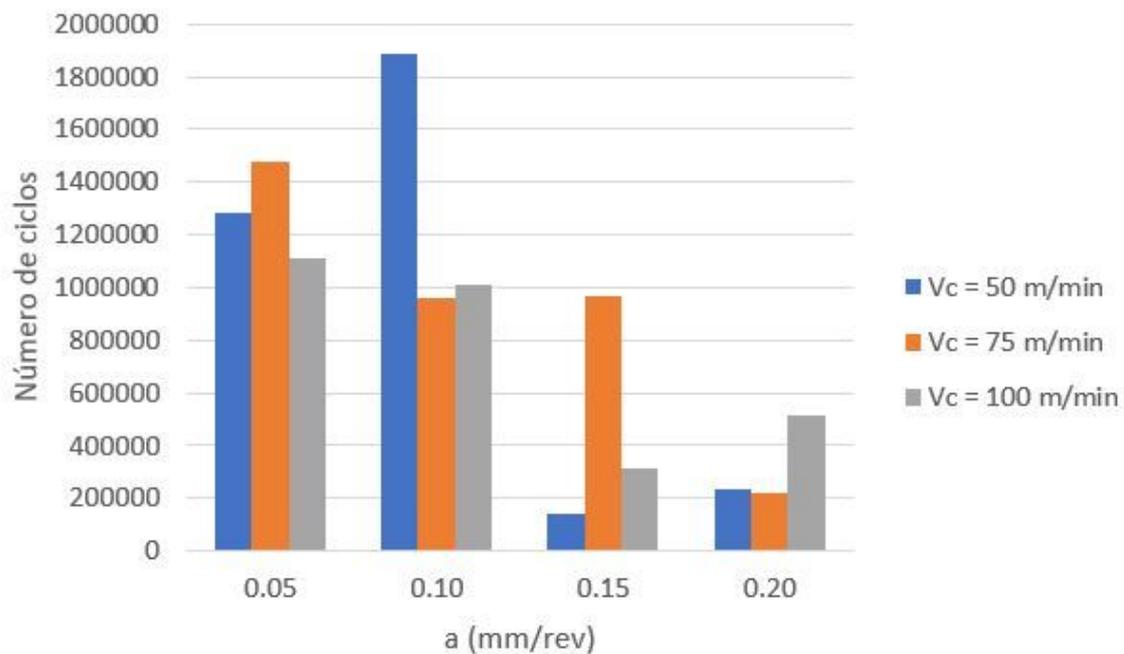


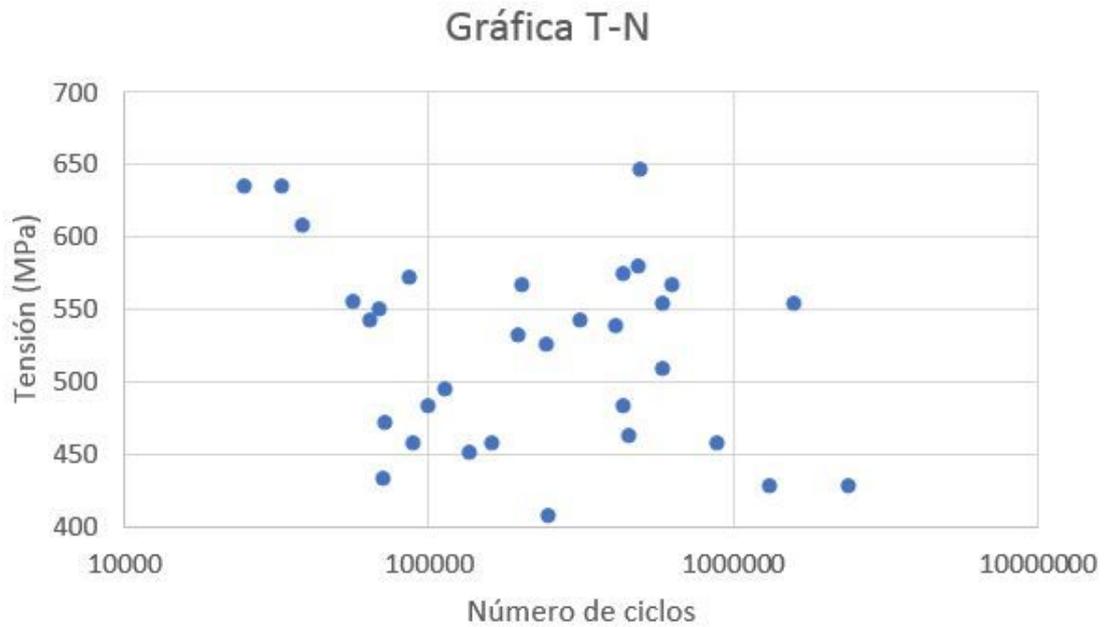
Figura 59. Número de ciclos en función del avance para cada Vc.

En la figura 59 se observa claramente como el parámetro de mayor influencia es el avance, siendo la influencia de Vc poco significativa. La influencia del avance se muestra de forma que, para avances bajos,  $a = 0.05$  mm/rev y  $a = 0.10$  mm/rev, el número de ciclos que soportan las probetas es considerablemente mayor al que soportan para valores de avance elevados,  $a = 0.15$  mm/rev y  $a = 0.20$  mm/rev. También se observa como para  $V_c = 50$  m/min se produce el descenso más brusco del número de ciclos, dándose entre los valores de avance  $a = 0.10$  mm/rev y  $a = 0.15$  mm/rev, correspondiéndose con los valores máximo y mínimo de número de ciclos que han soportado las probetas.

Estos resultados concuerdan con los esperados, ya que para avances elevados la rugosidad superficial es superior, aumentando el número de irregularidades superficiales, lo cual favorece el inicio y nucleación de microgrietas en la superficie, lugar donde, como se ha visto en el análisis fractográfico, se produce la nucleación de microgrietas en el caso del Ti6Al4V, afectando negativamente al comportamiento a fatiga.

En la figura 60 se representa los resultados obtenidos en los ensayos, representando cada punto una probeta diferente, en función de la tensión y el número de ciclos que han soportado las probetas. A la hora de representar estos valores, en el cálculo de la tensión se ha tenido en cuenta la distancia real  $x$  (ecuación 3) a la que ha roto la probeta, al igual que el diámetro medio de la zona calibrada de la probeta. La variación de la distancia  $x$  afecta de forma que cuanto mayor es, menor es la tensión real a la que está sometida la probeta, viéndose afectado también el número de ciclos soportado.

El hecho de que haya probetas que no rompan en  $x = 13$  mm (figura 61), que es el valor que proporciona la posición en la que se debería encontrar la sección crítica, es decir, la sección sometida a un mayor momento flector se debe a la posible presencia de micro entallas en la sección en la que han roto o a que la propia estructura interna del material en esa zona es más propensa a la iniciación de grietas.



**Figura 60.** Resultados de fatiga en función de la tensión y nº de ciclos.



**Figura 61.** Ejemplo de sección de rotura distinta a la teórica. Probeta Ti6Al4V - V100 – A020 – P010 – R1.

La teoría dice que para valores altos de tensión el número de ciclos es bajo, de forma que a la vez que se va reduciendo  $T$  aumenta el número de ciclos que soporta la probeta, siguiendo una tendencia exponencial negativa (figura 39). En cambio, al observar la figura 60 vemos como esto solo se cumple parcialmente, viéndose como para valores de tensión elevados,  $T > 600$  MPa, el número de ciclos es bajo, aumentando al bajar la tensión. Para tensiones por debajo de los 600 MPa la nube de puntos está muy dispersa, lo cual se puede justificar teniendo en cuenta que a la hora de hacer la representación no se han tenido en cuenta los parámetros de corte, los cuales, como ya se ha expuesto, influyen en los resultados, sobre todo el avance. Al igual que también afecta que la sección de rotura real en algunas probetas no coincida con la sección de rotura teórica, como ya se ha mencionado, rompiendo las probetas antes.

## 4.6. Conclusiones

En este apartado se van a exponer las conclusiones que se han obtenido tras realizar el análisis de los resultados obtenidos en los distintos ensayos realizados. Las principales conclusiones obtenidas son:

1. Tras realizar el control dimensional de las probetas se ve la influencia de los parámetros de corte sobre las dimensiones de estas, de forma que cuanto mayores son los parámetros, tanto de avance como la velocidad de corte, mayores son las variaciones entre el diámetro teórico y el diámetro real.
2. El estudio de las desviaciones microgeométricas se ha llevado a cabo estudiando los parámetros Ra y Rz. De este estudio se ha obtenido como conclusión la mayor influencia del avance sobre la rugosidad superficial, tanto sobre Ra como sobre Rz, de forma que cuanto mayor sea su valor mayor será la rugosidad y, por tanto, peor calidad superficial habrá.
3. El estudio de las desviaciones microgeométricas también mostro influencia de la velocidad de corte sobre la rugosidad superficial, tanto en Ra como en Rz, aunque menor que la influencia del avance. Cuanto mayor es la velocidad de corte mayor es la rugosidad.
4. Los resultados del estudio de desviaciones microgeométricas coinciden con los resultados obtenidos en estudios previamente realizados.
5. En el estudio de las desviaciones macrogeométricas se ha obtenido como conclusión que ni el avance ni la velocidad de corte producen una tendencia clara sobre las desviaciones estudiadas (redondez, rectitud y cilindridad), no existiendo una influencia clara de los parámetros de corte sobre estas de forma generalizada. Un factor a tener en cuenta es la zona en la que se estudian estas desviaciones.
6. En la desviación de redondez, a pesar de no existir una tendencia clara, se tiene que el parámetro de mayor influencia es la velocidad de corte, mientras que el comportamiento según el avance fluctúa mucho, al aumentar la velocidad de corte se puede apreciar un aumento de las desviaciones de redondez. De esta forma, los valores óptimos de RON se obtienen con un avance y velocidad de corte baja. Siendo las desviaciones mayores en la zona calibrada.
7. En el caso de las desviaciones de rectitud el parámetro de mayor influencia es el avance, el cual muestra tendencias de comportamiento mucho más claras que la velocidad de corte, la cual también tiene influencia, pero solo es notable si la analizamos junto a valores de avance. Los valores máximos de rectitud se obtienen para valores de avance intermedios, mientras que tanto para avances pequeños y elevados, las desviaciones disminuyen.
8. En cuanto a la cilindridad tenemos que el parámetro más influyente es la velocidad de corte, al igual que en el caso de la redondez. En este caso, al aumentar la velocidad de corte, junto con el aumento del avance, se obtienen mayores valores de CYL y por tanto peor calidad superficial, obteniéndose buenos resultados con valores bajos.
9. Al no haber actualmente muchos estudios realizados sobre las desviaciones macrogeométricas en la aleación de titanio Ti6Al4V no se han podido corroborar de forma adecuada los resultados obtenidos con los de otros estudios. Sin embargo, se han comparado con el estudio realizado por S. Gómez [20], coincidiendo únicamente los resultados sobre redondez.

10. Se han realizado ensayos de fatiga rotativa sobre las probetas de Ti6Al4V mecanizadas con distintos parámetros de corte para analizar la influencia de estos sobre el comportamiento a fatiga del material, aplicando una carga constante de 24 kg.
11. Se ha realizado un análisis fractográfico en el que se ha mostrado la sección de fractura por rotura plástica debida a fatiga, en la cual se muestra un único punto de inicio de grieta, el cual se produce en la superficie, y como conforme aumenta la  $V_c$  este punto se diferencia de forma más clara. También se observa como las sección independientemente de los parámetros de corte son muy parecidas en cuanto a la extensión de cada zona diferenciada en el proceso de rotura plástica.
12. De los resultados obtenidos en los ensayos de fatiga se tiene que el parámetro de corte más influyente es el avance, ya que es el parámetro que más influye en la rugosidad superficial. Cuando mayor es el avance, mayor es la rugosidad, aumentando el número de irregularidades superficiales, viéndose favorecido el inicio de microgrietas, fase inicial de la rotura plástica por fatiga, y por tanto, reduciéndose el número de ciclos soportados por la probeta.
13. Sin tener en cuenta los parámetros de corte, se ha observado que los resultados obtenidos en fatiga son muy dispersos, lo cual era de esperar debido al comportamiento algo aleatorio que han presentado otros materiales en estos mismos ensayos [13].

#### 4.7. Líneas futuras de investigación

Una vez analizados los resultados y expuestas las conclusiones se va a proponer a continuación un conjunto de líneas futuras de investigación con las que se ampliaría el tema tratado en este trabajo.

- Realizar un análisis más profundo sobre la influencia de las desviaciones macrogeométricas en aleaciones de Ti6Al4V en función de los parámetros de corte.
- Estudiar la influencia de una gama más amplia de desviaciones macrogeométricas.
- Estudiar el efecto sobre las distintas desviaciones micro y macrogeométricas con una mayor variedad de parámetros de corte
- Estudiar el comportamiento a fatiga y la influencia sobre este a partir de probetas mecanizadas con una mayor variedad de  $V_c$  y  $a$ .
- Ampliar el estudio en fatiga realizando los ensayos con distintas cargas aplicadas.



# 5. Bibliografía

- 
- [1] «El sector aeronáutico, en expansión y crecimiento – Mindtech Vigo». [En línea]. Disponible en: <https://mindtechvigo.com/el-sector-aeronautico-expansion-y-crecimiento/>.
- [2] «Sector Aeroespacial en España». [En línea]. Disponible en: <https://www.investinspain.org/es/sectores/aeroespacial>.
- [3] TEDAE, «Guía para la evaluación de la seguridad del producto en la industria aeronáutica y de defensa».
- [4] D. C. Álvarez, «Trabajo Fin de Máster Análisis de la vida a fatiga de la aleación de Aluminio UNS A97075 de uso aeronáutico en operaciones de torneado en seco», 2018.
- [5] «¿Qué es el mecanizado? Origen y características - ferrosplanes». [En línea]. Disponible en: <https://ferrosplanes.com/que-es-mecanizado/>.
- [6] *Tema 1 Introducción a los procesos de Mecanizado*. Apuntes de la asignatura Tecnología de fabricación, UMA, 2019.
- [7] «TIPOS DE MECANIZADO, CONCEPTOS GENERALES». [En línea]. Disponible en: <https://www.inter2000mecanizados.com/post/tipos-de-mecanizado-conceptos-generales>.
- [8] F. Torre Crespo y A. Pujadas Ginjaume, «Ejecución de procesos de mecanizado, conformado y montaje», 2005.
- [9] «Seguridad y salud en el uso de maquinaria y herramientas». [http://www.fremm.es/portal/pagina/4223/Seguridad\\_y\\_salud\\_en\\_el\\_uso\\_de\\_maquinaria\\_y\\_herramientas.html](http://www.fremm.es/portal/pagina/4223/Seguridad_y_salud_en_el_uso_de_maquinaria_y_herramientas.html) (accedido abr. 14, 2022).
- [10] U. Del país Vasco, «VIRUTA TEMA 16: Máquinas - Herramienta ( I ): Funciones , tipos y arquitecturas», n.º I, pp. 1-17.
- [11] E. M. de la Presidencia., «Real Decreto 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen las Disposiciones mínimas de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo.», *Boletín Of. del Estado*, vol. 188, pp. 43620-43629, 1997.
- [12] «Maquinabilidad Mitsubishi». <http://carbide.mmc.co.jp/permanent/courses/130/machinability.html> (accedido abr. 17, 2022).
- [13] S. Martín Bejar, «Análisis Paramétrico del comportamiento a fatiga de piezas torneadas en seco de la aleación UNS A97075 (Al-Zn)», 2020, [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10630/19470>.
- [14] F. C. Narvaez y C. R. Monroy, «Una metodología para el estudio de la maquinabilidad de aleaciones de aluminio-cobre», *Excell. Eng. to Enhanc. a Countrys Product. July 22 to 24, 2014 Guayaquil, Ecuador*, pp. 1-8, 2014, [En línea]. Disponible en: <http://oa.upm.es/36749/>.
- [15] «MECANIZADO CON TORNO MULTIHUSILLOS». <https://www.inter2000mecanizados.com/post/mecanizado-con-tornomultihusillos> (accedido abr. 30, 2022).

- [16] «Torneado — IMH». <https://www.imh.eus/es/imh/comunicacion/docu-libre/procesos-fabricacion/mecanizado/arranque-de-viruta/torneado> (accedido abr. 30, 2022).
- [17] *Tema 8.- Aspectos tecnológicos del torneado*. Apuntes de la asignatura Tecnología de fabricación, UMA, 2019.
- [18] «Mecanicas Mecal | ¿Qué es el torneado?». <https://www.mecaniasmecal.com/2019/03/29/que-es-el-torneado/> (accedido abr. 30, 2022).
- [19] «Fundamentos de los Procesos de Mecanizado». <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn38.html> (accedido abr. 30, 2022).
- [20] S. Gómez Montañez, «Análisis de la influencia de los parámetros de corte sobre la microdureza en piezas torneadas en seco de la aleación de titanio Ti6Al4V», UMA, 2021.
- [21] Y. Sánchez Hernández, «Metodología para la caracterización del mecanizado de aleaciones ligeras de uso aeronáutico a través del análisis de la viruta», 2017, [En línea]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/10630/16255>.
- [22] «3. PROCESOS DE TORNEADO 3.1. Introducción», pp. 12-23.
- [23] «7 parámetros de corte del torneado: - F8aguerolopeztorno». <https://sites.google.com/site/f8aguerolopeztorno/7-parametros-de-corte-del-torneado> (accedido abr. 30, 2022).
- [24] «La última tecnología de torneado para piezas de titanio». [https://metalpartss.com/spain/La\\_ultima\\_tecnolog\\_a\\_de\\_torneado\\_para\\_piezas\\_de\\_titanio/](https://metalpartss.com/spain/La_ultima_tecnolog_a_de_torneado_para_piezas_de_titanio/) (accedido may 01, 2022).
- [25] «Caracterización de la integridad de las superficies maquinadas a altas velocidades en el acero 40XHMA». [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1815-59442013000200002](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442013000200002) (accedido may 02, 2022).
- [26] F. J. Trujillo Vilches, «Tema 12 Tolerancias dimensionales».
- [27] D. F. J. Trujillo Vilches, «Tema 14 Tolerancias Geométricas».
- [28] «TIPOS DE TOLERANCIAS GEOMÉTRICAS | ENRIQUE CARBAJAL - Academia.edu». [https://www.academia.edu/23822968/TIPOS\\_DE\\_TOLERANCIAS\\_GEOMÉTRICAS](https://www.academia.edu/23822968/TIPOS_DE_TOLERANCIAS_GEOMÉTRICAS) (accedido may 02, 2022).
- [29] G. A. B Asignatura y E. Y. Gráfica Diseño, «PRIMER CURSO DE INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL. ELECTRÓNICA Tolerancias geométricas», pp. 1-11, 1991, [En línea]. Disponible en: [http://www.upct.es/~deg/Antonio\\_Guillamon/pdf/Tolerancias\\_geometricas.pdf](http://www.upct.es/~deg/Antonio_Guillamon/pdf/Tolerancias_geometricas.pdf).
- [30] C. C. Palma, «ANÁLISIS DE LAS DESVIACIONES GEOMÉTRICAS ORIGINADAS EN PROCESOS DE TORNEADO EN SECO DE ALEACIONES DE ALUMINIO DE USO AERONÁUTICO», UMA, 2019.
- [31] D. F. J. Trujillo Vilches, «Tema 15 Rugosidad Superficial».

- [32] F. Luis y G. Moncayo, «Tema 3. fallo por fatiga (1)», en *Apuntes de la asignatura Cálculo y diseño de maqui*, 2020.
- [33] «N° 41: Proyecto por fatiga | Construcción en Acero». <https://www.construccionenacero.com/blog/ndeg-41-proyecto-por-fatiga> (accedido may 03, 2022).
- [34] F. Luis y G. Moncayo, «Tema 3. Fallo por fatiga. (2)», en *Apuntes de la asignatura Cálculo y diseño de maqui*, 2020.
- [35] F. G. Vacas, A. Pérez, D. Blanca, y A. S. Mata, «Área de Ingeniería Mecánica».
- [36] «Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico». <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/aleaciones-de-titanio> (accedido abr. 21, 2022).
- [37] «Mecanizado de aleaciones de titanio empleadas en aeronáutica ->». <https://www.interempresas.net/Subcontratacion-Servicios/Articulos/112422-Mecanizado-de-aleaciones-de-titanio-empleadas-en-aeronautica.html?R=102661> (accedido abr. 29, 2022).
- [38] «Titanio (Ti) Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente». <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/ti.htm> (accedido abr. 22, 2022).
- [39]: . «Materiales Unidad 6 :Metales y aleaciones no ferrosas Titanio y sus aleaciones», .
- [40] «Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico». <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/ti6al4v-e> (accedido abr. 28, 2022).
- [41] «Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico». <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/ti6al4v-r> (accedido abr. 28, 2022).
- [42] «Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico». <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/ti6al4v-g> (accedido abr. 28, 2022).
- [43] «Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico». <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/ti6al4v-f> (accedido abr. 28, 2022).
- [44] «Proyecto de Innovación Atlas Metalográfico». <https://www.ucm.es/atlasmetalografico/ti6al4v-d> (accedido abr. 28, 2022).
- [45] «Causas de mala maquinabilidad de la aleación de titanio\_». [https://metalpartss.com/spain/Causas\\_de\\_mala\\_maquinabilidad\\_de\\_la\\_aleaci\\_n\\_de\\_titanio/](https://metalpartss.com/spain/Causas_de_mala_maquinabilidad_de_la_aleaci_n_de_titanio/) (accedido abr. 29, 2022).
- [46] D. Peng *et al.*, «A Numerical Study into the Effect of Machining on the Interaction between Surface Roughness and Surface Breaking Defects on the Durability of WAAM Ti-6Al-4V Parts», vol. 12, p. 1121, 2022, doi: 10.3390/met12071121.
- [47] A. Matras, W. Zebala, y M. Machno, «Research and method of roughness prediction of a curvilinear surface after titanium alloy turning», *Materials (Basel)*, vol. 12, n.º 3, 2019, doi: 10.3390/ma12030502.
- [48] J. Gerez Miras, «Estudio del torneado en seco de la aleación ti6al4v. Relaciones paramétricas para el acabado superficial - Universidad de Cádiz», 2014. <https://produccioncientifica.uca.es/documentos/5f88ea4729995259ef2904c3> (accedido jul. 05, 2022).

- [49] F. Sánchez Artola, «Estudio del proceso de rectificado cilíndrico de la aleación aeronáutica UNS R56400», 2017, [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10498/19411>.
- [50] K. Petatan, I. Gutiérrez, A. Abúndez, J. Mayén, y A. Balnco, «Efecto de la velocidad de avance en torneado CNC en seco y el acabado superficial en la vida a fatiga de una aleación de aluminio 6061-T6», *Jorn. Cienc. y Tecnol. Apl.*, vol. 4, n.º February 2022, pp. 235-240, 2021.
- [51] «ISO 1143:2010 Metallic materials — Rotating bar bending fatigue testing», vol. 2010, 2010.
- [52] U. Iso, «UNE-EN ISO 4287:1999. Especificación geométrica de productos (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Términos, definiciones y parámetros del estado superficial.», 1999.
- [53] E. Pedroza Rodriguez y L. V. Jaramillo Cruz, «DISEÑO DE UN SISTEMA PARA MEDIR LA CIRCULARIDAD DE UNA PIEZA EN LA OPERACIÓN DE CILINDRADO», vol. 66, pp. 37-39, 2012.
- [54] A. E. de Normalización, «Norma UNE-EN ISO 12181-1:2012. Especificación geométrica de productos (GPS). Redondez. Parte 1:Vocabulacio y parámetros de redondez.», 2012.
- [55] A. E. de Normalización, «UNE-EN ISO 12780-1. Especificación geométrica de productos (GPS). Rectitud. Parte 1: Vocabulario y parámetros para la rectitud.», 2012.
- [56] N. En, «Tolerancias Geométricas», 2012.
- [57] A. E. de Normalización, «UNE-EN ISO 12180-1:2012. Especificación geométrica de productos (GPS). Cilindricidad. Parte1: Vocabulario y parámetro para la forma de cilindridad.», 2012.
- [58] F. García y A. Pérez de la Blanca, «Formulario I», en *Apuntes de la asignatura Cálculo y diseño de maquinas*, 2018.
- [59] «SN curve of Ti6Al4V alloy. | Download Scientific Diagram». [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/figure/SN-curve-of-Ti6Al4V-alloy\\_fig2\\_285384606](https://www.researchgate.net/figure/SN-curve-of-Ti6Al4V-alloy_fig2_285384606).

