

Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

Análisis de la influencia de los parámetros de corte  
en el desgaste de superficies torneadas

Autora: Carmen Clara Rodríguez Ruiz

Tutora: Aida Estévez Urra

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación Escuela  
Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022





Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Análisis de la influencia de los parámetros de corte en el desgaste de superficies torneadas**

Autora:

Carmen Clara Rodríguez Ruiz

Tutora:

Aida Estévez Urra

Profesora Colaboradora

Dpto. Ingeniería Mecánica y Fabricación

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Grado: Análisis de la influencia de los parámetros de corte en el desgaste de superficies torneadas

Autora: Carmen Clara Rodríguez Ruiz

Tutora: Aida Estévez Urrea

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 202

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*



## AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, agradecer a mi familia, en especial a mi padre por haber sido mi inspiración para estudiar ingeniería y a mi madre por alentarme y motivarme en los momentos difíciles.

A mis amigos y compañeros que durante estos años han trabajado a mi lado y me han apoyado para llegar hasta aquí.

A mi tutora Aida Estévez Urra por inspirarme en todas las asignaturas de las que ha sido profesora, por ofrecerme este tema para el trabajo de fin de grado y por su ayuda a lo largo del mismo. A Manuel Sánchez y a Jesús Pinto por su tiempo y esmero a la hora del estudio práctico del trabajo.

Este estudio y trabajo experimental informa sobre el comportamiento de desgaste por deslizamiento de varias barras de acero durante un movimiento lineal mediante el uso de un tribómetro.

Tomando como punto de partida se estudia la fricción y el desgaste, a partir de estos, sus derivados mecanismos por: adhesión, abrasión, fatiga o erosión. Tras estudiar la tribología como ciencia se detallan las distintas metodologías de desgaste entre diferentes superficies y materiales. Cobra gran importancia tanto las superficies de contacto en el desgaste como la manera en las que interactúan, dando resultados diferentes aquellas de contacto puntual y aquellas de contacto lineal o superficial. Además, se contempla la diferencia de resultados según sean sistemas de contacto metálicos, cerámicos y poliméricos.

El estudio se divide en dos procesos: el primero es un proceso de mecanizado por el cual se obtiene las barras y un segundo proceso derivado para ejecutar los ensayos donde se evalúa la resistencia al desgaste mediante la pérdida de peso durante un estudio de tribología.

Las barras se fabricarán bajo ciertas condiciones mecánicas, que variarán de una barra a otra, siendo un total de seis barras con tres rugosidades superficiales diferentes. Las condiciones de corte son tomadas a partir de los parámetros de corte facilitados por la máquina de mecanizado, el torno, debido a las dimensiones de las barras y a los valores de rugosidad media aritmética previamente seleccionados.

Habrán ensayos bajo los cuales se aplicará un lubricante líquido a la barra para ver los efectos de este en los resultados. El desgaste por deslizamiento se simulará como un Pin-on-Disk, sin embargo, se utilizará un mecanismo de leva para transformar la rotación producida por el tribómetro en un movimiento lineal. De esta forma se logrará trabajar con un movimiento lineal. Las condiciones de funcionamiento en las que se realizarán las pruebas son: carga aplicada (30N), velocidad de deslizamiento (10 cm / s) y distancia de deslizamiento (42 m).

Los resultados muestran que para las barras en condiciones lubricadas hay un aumento en la pérdida de peso, también reflejará que, para una mayor rugosidad inicial de la superficie en condiciones secas, se obtendrán resultados de superficie más suaves.



## ABSTRACT

---

This research and experimental work reports sliding wear performances of various steel bars during a linear movement by the use of a tribo-tester.

Taking as a starting point, friction and wear are studied, from these, their derived effects by adhesion, abrasion, fatigue, or erosion. After studying tribology as a science, the different wear methodologies between different surfaces and materials are detailed. Both the contact surfaces in wear and the way in which they interact are of significant importance, giving different results those of punctual contact and those of linear or superficial contact. In addition, the difference in results is contemplated depending on whether they are metallic, ceramic, and polymeric contact systems.

The study is divided into two processes: one is a machining process by which the bars are obtained, and the other is a derived process to run the tests where wear resistance is evaluated through weight loss during a tribology study.

The bars will be fabricated under certain specific mechanical conditions that will vary from one bar to another, making it a total of six bars with three different surface roughness. The cutting conditions are taken from the cutting parameters provided by the machine, the lathe, the dimensions of the bars and the previously selected arithmetic mean roughness values.

There will be tests under which the bars will have a liquid lubricant applied to see the effects of a lubricant in the results. The sliding wear will be simulated as a Pin-on-Disk tribo-tester; however, a lever mechanism will be used to transform the rotation produced by the tribo-tester into a linear motion. This way it will be managed to work with a linear movement. The operating conditions under which the tests will take place are an applied load (30N), sliding speed (10cm/s) and sliding distance (42m).

The results show that for bars under lubricated conditions there is an increase in weight loss, it will also reflect that for higher initial surface roughness under dry conditions it will result in smoother surface outcomes.

## Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1	<i>Antecedentes.....</i>	<i>1</i>
1.2	<i>Objetivos.....</i>	<i>2</i>
1.3	<i>Tareas a realizar.....</i>	<i>3</i>
<b>2</b>	<b>Tribología.....</b>	<b>5</b>
2.1	<i>La Tribología como ciencia y el papel actual en la construcción de elementos de máquina .....</i>	<i>5</i>
2.2	<i>Fricción y desgaste.....</i>	<i>6</i>
2.3	<i>Mecanismo de desgaste.....</i>	<i>7</i>
2.3.1	<i>Abrasión.....</i>	<i>7</i>
2.3.2	<i>Desgaste por fatiga .....</i>	<i>9</i>
2.3.3	<i>Desgaste por erosión.....</i>	<i>9</i>
2.3.4	<i>Adhesión .....</i>	<i>10</i>
2.4	<i>Ensayo de desgaste .....</i>	<i>11</i>
2.4.1	<i>El efecto de la lubricación en el desgaste .....</i>	<i>13</i>
2.4.2	<i>Desgaste por deslizamiento en seco de metales. ....</i>	<i>14</i>
2.4.3	<i>El coeficiente de fricción durante el desgaste. ....</i>	<i>15</i>
2.5	<i>Casos de estudio de desgaste en diferentes materiales. ....</i>	<i>15</i>
2.5.1	<i>Desgaste adhesivo del acero AISI-SAE 1020. ....</i>	<i>16</i>
2.5.2	<i>Desgaste por deslizamiento en seco de aleación AA6061 reforzado con grafito.....</i>	<i>17</i>
2.5.3	<i>Desgaste por deslizamiento en seco de Wc-Co reforzado por pulverización de térmica de NiCrFeSiB HVOAF.....</i>	<i>18</i>
2.5.4	<i>Desgaste por deslizamiento en seco de aleación de Ti-6Al-4V procesada por fusión en lecho de polvo.....</i>	<i>18</i>
2.5.5	<i>Desgaste de contactos dopados con DLC (Diamond-like Carbon). ....</i>	<i>20</i>
2.5.6	<i>Desgaste por deslizamiento de polímeros.....</i>	<i>21</i>
2.5.7	<i>Desgaste por deslizamiento en seco de materiales cerámicos.....</i>	<i>23</i>
<b>3</b>	<b>Parte experimental .....</b>	<b>25</b>
3.1	<i>Probetas de ensayo.....</i>	<i>25</i>
	<i>Condiciones de mecanizado .....</i>	<i>27</i>
3.2	<i>Ensayo de desgaste .....</i>	<i>29</i>
	<i>Tribómetro.....</i>	<i>30</i>
	<i>Condiciones de ensayo .....</i>	<i>31</i>
	<i>Limpieza y pesaje de las probetas.....</i>	<i>33</i>
	<i>Aplicación de lubricante.....</i>	<i>34</i>
	<i>Procedimiento .....</i>	<i>34</i>
<b>4</b>	<b>Análisis de resultados .....</b>	<b>35</b>
4.1	<i>Variación de peso.....</i>	<i>35</i>

4.2	<i>Rugosidad superficial</i> .....	37
4.3	<i>Coefficiente de fricción</i> .....	40
4.4	<i>Análisis de la superficie ensayada mediante microscopía</i> .....	42
4.5	<i>Análisis estadístico</i> .....	43
<b>5</b>	<b>Conclusiones y trabajos futuros</b> .....	<b>45</b>
	<b>Referencias</b> .....	<b>47</b>
	<b>Anexo I</b> .....	<b>I</b>
	<i>Probeta 1-1</i> .....	<i>II</i>
	<i>Probeta 1-2</i> .....	<i>III</i>
	<i>Probeta 2-1</i> .....	<i>IV</i>
	<i>Probeta 2-2</i> .....	<i>V</i>
	<i>Probeta 3-1</i> .....	<i>VI</i>
	<i>Probeta 3-2</i> .....	<i>VII</i>
	<i>Probeta 4-1</i> .....	<i>VIII</i>
	<i>Probeta 4-2</i> .....	<i>IX</i>
	<i>Probeta 5-1</i> .....	<i>X</i>
	<i>Probeta 5-2</i> .....	<i>XI</i>
	<i>Probeta 6-1</i> .....	<i>XII</i>
	<i>Probeta 6-2</i> .....	<i>XIII</i>

## ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3.1 Características técnicas del torno empleado.....	26
Tabla 3.2 Características técnicas de la herramienta empleada.....	27
Tabla 3.3 Listado de avances a emplear y sus respectivas rugosidades teóricas.....	27
Tabla 3.4 Número de referencia de las probetas, las condiciones de ensayo y el avance.....	28
Tabla 3.5 Características técnicas del rugosímetro empleado.....	29
Tabla 3.6 Características técnicas del tribómetro.....	30
Tabla 3.7 Velocidades en cm/s y sus conversiones.....	32
Tabla 3.8 Condiciones de ensayo de desgaste.....	33
Tabla 4.1 Peso antes y después del ensayo de desgaste.....	36
Tabla 4.2 Resultados del rugosímetro antes del ensayo de desgaste (Ra).....	37
Tabla 4.3 Ra medida después del ensayo de desgaste.....	38
Tabla 4.4 Coeficiente de fricción promedio en valor absoluto registrado por el tribómetro.....	40

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Aplicaciones automotrices de recubrimientos DLC.....	6
Figura 2.2 Mecanismo de desgaste abrasivo.....	8
Figura 2.3 Desgaste por fatiga.....	9
Figura 2.2.4 Desgaste por erosión.....	9
Figura 2.5 Ejemplo de erosión frente al tiempo para acero 1020 a $30 \text{ ms}^{-1}$ y $70 \text{ ms}^{-1}$ .....	10
Figura 2.2.6 Mecanismo de desgaste adhesivo .....	10
Figura 2.2.7 Geometrías comúnmente empleadas en ensayos de desgaste .....	11
Figura 2.2.8 Configuraciones geométricas de prueba tribológica más utilizadas .....	12
Figura 2.2.9 Configuraciones de las máquinas de ensayo de abrasión con Pin.....	13
Figura 2.10 Regímenes de lubricación y desgaste en el deslizamiento lubricado de metales, en función de la relación entre el espesor de película y la rugosidad superficial, $\lambda$ .....	14
Figura 2.11 Resistencia al desgaste y tasa de desgaste frente a la fuerza nominal en un ensayo de desgaste por deslizamiento en seco de un pasador de latón $\alpha/\beta$ con plomo.....	14
Figura 2.12 Gráfica de la reducción de la fricción observada con frecuencia con la velocidad de deslizamiento para sólidos cristalinos .....	15
Figura 2.13 Gráfica de las tres influencias comunes de la presión de contacto sobre la fricción a) superficies limpias; b) superficies prácticas, con contaminantes; c) superficie de sustrato limpia tras el astillado del óxido de una superficie con óxido quebradizo, esto aumenta la adhesión local para causar coeficientes de fricción más altos.....	15
Figura 2.2.14 Curva de desgaste frente al tiempo para el acero AISI-SAE 1020.....	16
Figura 2.2.15 Curva de coeficiente de fricción frente al tiempo para el acero AISI-SAE 1020 .....	16
Figura 2.16 Efecto de la velocidad de deslizamiento en la tasa específica de desgaste de compuestos de aleación AA6061-Gr .....	17
Figura 2.17 Efecto de la fuerza nominal en la tasa específica de desgaste de compuestos de aleación AA6061-Gr.....	17
Figura 2.18 Coeficiente de fricción frente a la distancia recorrida para el ensayo de desgaste según el material de la bola: WC-Co y $\text{Al}_2\text{O}_3$ .....	18
Figura 2.19 Valores de la tasa de desgaste en función de la fuerza nominal .....	19
Figura 2.20 a) Prueba de desgaste por deslizamiento con fuerzas, campo de esfuerzo cortante - deformación ( $\tau$ - $\gamma$ ) que causa desgaste adhesivo, espesor de la capa de corte ( $h_{sh}$ ) y tensión de esfuerzo ( $\sigma_{ab}$ - $\epsilon_{ab}$ ) que causa desgaste abrasivo indicado b) Curvas de tensión-deformación de la aleación Ti-6Al-4V .....	19
Figura 2.21 Valores promedios del coeficiente de fricción del ensayo de desgaste Ti-DLC/Ti-DLC .....	20
Figura 2.22 Valores promedios del coeficiente de desgaste del ensayo de desgaste Ti-DLC/Ti-DLC .....	20
Figura 2.23 Diagrama esquemático que muestra la variación en la importancia de los mecanismos de abrasión y fatiga en polímeros según su módulo elástico y la rugosidad de la superficie de contacto .....	21
Figura 2.24 Tasa de desgaste del polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) que se desliza contra una superficie de acero, en función de la rugosidad de la superficie de acero .....	22
Figura 2.25 Volumen de desgaste de alúmina policristalina en función de la velocidad de deslizamiento para tres cargas diferentes en un ensayo de Ball-on-three-flats .....	23
Figura 3.1 Croquis de la probeta. Dimensiones en mm. ....	25
Figura 3.2 Medición de dureza en la probeta.....	26

Figura 3.3 Torno PINACHO L-1/165. ....	26
Figura 3.6 Montaje de la pieza en el torno. ....	28
Figura 3.7 Rugosímetro Mitutoyo del Centro Andaluz de Metrología. ....	29
Figura 3.8 Tribómetro. ....	30
Figura 3.9 Sujeciones. ....	31
Figura 3.10 Indentador y pesas del tribómetro. ....	32
Figura 3.11 Pesaje de la probeta. ....	33
Figura 3.12 Probeta lubricada en el tribómetro antes de ensayar. ....	34
Figura 4.1 Gráfica de pérdida de peso según el avance y uso de lubricante. ....	36
Figura 4.2 Probeta lubricada y probeta seca tras el ensayo de desgaste con tribómetro. ....	37
Figura 4.3 Huella en las probetas tras el ensayo de desgaste. ....	38
Figura 4.4 Comparación gráfica de la rugosidad superficial inicial y final según el avance de mecanizado y las condiciones de ensayo. ....	39
Figura 4.5 Gráfica de barras del coeficiente de fricción en valor absoluto según el avance y el uso de lubricante. ....	40
Figura 4.6 Gráfica del coeficiente de fricción absoluto frente a la distancia recorrida durante el ensayo de desgaste en seco y con lubricante de las probetas con avance de mecanizado 0.19 mm/rev. ....	41
Figura 4.7 Gráfica del coeficiente de fricción absoluto frente a la distancia recorrida durante el ensayo de desgaste en seco y con lubricante de las probetas con avance de mecanizado 0.24 mm/rev. ....	41
Figura 4.8 Gráfica del coeficiente de fricción absoluto frente a la distancia recorrida durante el ensayo de desgaste en seco y con lubricante de las probetas con avance de mecanizado 0.33 mm/rev. ....	42
Figura 4.9 Microscopio empleado para sacar las imágenes. ....	42
Figura 4.10 Diagrama de Pareto de la pérdida de masa. ....	43
Figura 4.11 Diagrama de efectos principales para la pérdida de masa. ....	44



# 1 INTRODUCCIÓN

---

Este capítulo es una introducción de los objetivos principales a abordar en el proyecto, así como un resumen recopilatorio del estudio previo realizado para llevar a cabo el trabajo experimental.

## 1.1 Antecedentes

A lo largo de los años se ha estudiado la importancia del desgaste y la fricción en la industria. En particular, se estudiaban las fuerzas en movimiento y la fricción como efecto. En el siglo XX, la reducción de la fricción ha sido una preocupación menor que el desgaste, pero la fricción fue importante en el siglo XVIII, cuando la tracción animal se aplicó más ampliamente y en el siglo XIX, cuando se desarrollaron los ferrocarriles.

Uno de los primeros en estudiar la fricción fue Leonardo Da Vinci (1452-1519) que descubrió la existencia de una relación entre la fuerza de fricción y el peso. Más adelante Guillaume Amontons (1663-1705), un científico e inventor francés, postuló que la fuerza que se opone al movimiento era independiente del tamaño del cuerpo, siendo está alrededor de un tercio del peso del cuerpo ( $F \sim W/3$ ). Amontons protestó sobre la poca importancia que se daba a la fricción en la industria, *“indeed among all those who have written on the subject of moving forces, there is probably not a single one who have given sufficient attention to the effect of friction in machines”*, (a pesar de todos los escritos sobre el tema de las fuerzas en movimiento, no existe ninguno enfocado a los efectos de la fricción en las máquinas). Por ello realizó una serie de experimentos con cobre, hierro, plomo y madera recubiertos con grasa de cerdo que dieron lugar a las leyes de fricción en seco de hoy. Amontons concluyó que la fricción era la colisión de las irregularidades de dos superficies (macroscópicas) [1].

Un siglo más tarde, y debido al conocimiento de las fuerzas de atracción entre superficies por las discusiones sobre las fuerzas gravitacionales y electrostáticas de la época, varios científicos profundizaron en teorías relevantes a la fricción de los cuerpos, entre ellos destacaron Euler, Coulomb, Samuel Vince y Leslie. Euler (1707-173) fue el primer científico en emplear el coeficiente de fricción y dotarlo de valor, remarcando la diferencia entre los coeficientes de fricción estáticos y dinámicos. Coulomb (1736-1806) corroboró las teorías de Amontons al definir el efecto de fricción como el entrelazamiento de asperezas y, que esté, era independiente de la superficie de contacto, aunque según él la adherencia no se podía considerar fricción. Samuel Vince (1749-1821) definió el coeficiente de fricción estático como el coeficiente de fricción cinemático más la adherencia ( $\mu_k = \mu_s + \text{adherencia}$ ). Por último, Leslie (1766-1832) consideró que la adhesión no podía tener efecto en una dirección paralela a la superficie ya que la adhesión era una fuerza perpendicular a la superficie [1].

A día de hoy se emplean las teorías de Amontons y Coulomb, siendo conocidas dentro de la mecánica y la física como la “fricción de Coulomb”.

En los años 30 se definió la fricción como un efecto debido a las fuerzas de atracción entre los cuerpos. W.B. Hardy manifestó que la fricción se debía a la atracción molecular que opera a través de una interfaz [1]. Mediante varios experimentos averiguó que el lubricante no alteraba la rugosidad superficial en funcionamiento, sino que reducía la fricción entre los cuerpos. Durante estos años también se hicieron progresos en los lubricantes, se desarrollaron aditivos químicos para mejorar la lubricación, se incorporaron el uso de grafito y  $\text{MoS}_3$  como aditivos populares para el aceite y para su uso como lubricante seco.

En 1839 se inventó el Babbitt, un material que se fue desarrollando hasta obtener varias aleaciones con características antiadherentes y antifricción además de ser capaces de mantener una película de aceite en sus superficies [2]. Es un material blando y fácil de dañar que sugiere ser una mala opción para su uso en

rodamientos, sin embargo, su estructura está compuesta por pequeños cristales duros dispersos en un metal más blando, dando lugar a un compuesto de matriz metálica. Es un material muy usado en cojinetes puesto que, al desgastarse, el metal blando se erosiona, descubriendo los pequeños cristales (la superficie de apoyo real) que crean caminos para el movimiento del lubricante. Una de las aleaciones de Babbitt emplea estaño como el material blando, al someterlo a fricción el estaño se derrite y funciona como lubricante, protegiendo el rodamiento del desgaste cuando hay ausencia de lubricante. Hasta mediados de los cincuenta, los cojinetes Babbitt de estaño por fundición eran comunes en las aplicaciones automotrices, ya que podían soportar las cargas aplicadas a en las bielas y cigüeñales del vehículo. Aunque ya no se usan los cojinetes de Babbitt, este sigue aplicándose como superficie de apoyo. Al proceso de colocación de una capa de metal Babbitt sobre una superficie se conoce como *Babbitting* y se emplea para proporcionar mayor capacidad de carga de choque y mejor amortiguación [3].

En 1966, Peter Jost, un ingeniero mecánico británico, presentó un reporte a la Reina Isabel II sobre el estado de la investigación y educación sobre la lubricación en el país, y como, el adecuado manejo de la fricción en sistemas mecánicos podía suponer un ahorro cercano a 5 billones de libras esterlinas por año en Reino Unido. Este impactante informe fomentó el estudio de la tribología en los centros de investigación de Reino Unido, Alemania y Estados Unidos [4].

Desde finales del siglo XX el término universalmente usado para referir a la ciencia que estudia estos fenómenos es denominado Tribología. La tribología por definición es la ciencia que estudia los fenómenos de superficie tales como la fricción, el desgaste y la lubricación. A su vez, es un campo que incluye varias áreas dentro de la ciencia: la mecánica de sólidos, la ciencia química, la ciencia y tecnología de materiales y la termodinámica entre otros. Lo que conlleva deducir que el estudio de la fricción y el desgaste no depende únicamente del tipo de material que se emplee sino también del proceso de fabricación bajo el que ha sido sometido, así como otros parámetros como serían la temperatura, el lubricante, la presión y las condiciones de su entorno.

A partir de la tribología, se evidencia que la velocidad de desgaste y el mecanismo de desgaste de un proceso está relacionado con la rugosidad superficial de los cuerpos en contacto y en movimiento. En el caso de los metales, la rugosidad superficial puede modificarse mediante el mecanizado según los valores de los parámetros de corte.

Debido a todos los estudios realizados en el pasado y al constante desarrollo de materiales resistentes al desgaste, la eficiencia de las máquinas en la industria ha mejorado por lo que: se pierde menor energía, supone un inferior coste de producción y uso, menor coste de mantenimiento, y mayor estabilidad y vida útil. No obstante, pese a los resultados obtenidos anteriormente, se debe recalcar la importancia de que el ámbito de estudio de la fricción y el desgaste siga en progreso, pues esto reportaría una mayor muestra comparativa y ayudaría en el desarrollo de los futuros estudios sobre este tema que puedan plantearse como respuesta a las disyuntivas obtenidas.

## 1.2 Objetivos

El objetivo fundamental del presente proyecto es analizar la influencia de las condiciones de corte en un proceso de torneado, en la resistencia al desgaste de la superficie mecanizada.

Se estudiará el mecanismo de desgaste con bola de las probetas mecanizadas tras someterlas a ensayos de desgaste bajo diferentes condiciones.

Como resultado de dichos ensayos se definirán las siguientes relaciones:

- La relación entre la resistencia al desgaste de una superficie lubricada y una superficie seca.
- La relación entre la resistencia al desgaste y la rugosidad superficial inicial de las probetas ensayadas.

- La relación de la pérdida de masa entre una superficie lubricada y una superficie seca tras el ensayo de desgaste.
- La relación de la pérdida de masa entre superficies con diferentes rugosidades superficiales tras el ensayo de desgaste.

### 1.3 Tareas a realizar

Primeramente, se fabricarán las 6 probetas objeto de estudio en el taller de mecanizado de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

Se definen los parámetros de corte según las recomendaciones de torneado para un acero de dureza  $180 \div 280$  HB. Los parámetros de corte de velocidad de corte y la profundidad de corte se mantendrán constantes siendo el avance el único parámetro que varíe de una probeta a otra, dada su influencia directa en el acabado superficial de las superficies mecanizadas [5]. Durante el proceso de mecanizado se utilizará la misma herramienta para todas las probetas. Luego se comparará la rugosidad superficial teórica con la rugosidad superficial medida de las probetas obtenidas tras el torneado.

El estudio experimental relacionado con el desgaste de las probetas se llevará a cabo en las instalaciones de laboratorio de Ingeniería Mecánica y Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, donde se dispone de un tribómetro necesario para los ensayos. Se definen los parámetros relacionados con los ensayos como son el tipo de indentador, el recorrido en la probeta, la velocidad de ensayo, la distancia total del ensayo y la fuerza aplicada.

La realización de los ensayos se hará según recomendaciones de la norma ASTM G132-96, *Standard Test Method for Pin Abrasion Testing* [5] que, aunque no coincide con el ensayo a realizar en este estudio, si permite estandarizar el ensayo lo máximo posible puesto que no hay ningún estudio previo sobre el desgaste con bola de una superficie torneada.



Como se define en los libros, el término *tribos* en griego significa rozamiento, por lo tanto, la palabra tribología al derivar de él, significa la ciencia y tecnología que estudia la interacción de superficies en movimiento relativo, es decir, que rozan, con la consecuencia de un desgaste y la presencia de la lubricación como elemento que evita o retarda dicho desgaste [6] [7].

En este capítulo se detallará el estado actual de la tribología, se estudiará la misma en mayor profundidad y se mostrarán ejemplos de aplicación de la tribología en la construcción de maquinaria. También se analizarán los mecanismos de desgaste y se comentará los procedimientos que deben llevarse a cabo para realizar un estudio tribológico.

### 2.1 La Tribología como ciencia y el papel actual en la construcción de elementos de máquina

La tribología es la ciencia que estudia la interacción entre superficies en movimiento y los problemas que pueden surgir entre ellas [6] [7] [8]. Kenneth C. Ludema postula que la tribología no es una ciencia por sí sola, sino el “arte aplicado” de otras ciencias como: la mecánica de fluidos, la elasticidad, la ciencia de los materiales, la dinámica, la termodinámica, entre otras [1]. La tribología se emplea para estudiar los siguientes campos:

- Desgaste debido al rozamiento entre dos superficies (desgaste adhesivo).
- Entrada de partículas al punto de contacto (desgaste entre dos cuerpos).
- Partículas que causan impacto en la superficie (erosión).
- Desprendimiento de la superficie (abrasión).
- Desgaste debido a la formación y colapso de burbujas de aire a altas presiones (cavitación).

Mediante el uso de la tribología se puede optimizar la transmisión de potencia de una máquina controlando las fuerzas de rozamiento en actividades cíclicas y repetitivas o en movimientos de frenado o acelerado. Para ello es necesario minimizar las fuerzas de rozamiento (pérdidas de energía), el desgaste superficial de las piezas en contacto (alargando la vida útil de la máquina) y la fractura superficial.

El instrumento más usado para realizar un estudio tribológico es el tribómetro. Se creó en 1774 y desde entonces ha variado en diseño para asemejar sus funciones a las condiciones bajo las que se somete un material en un caso real. El tribómetro simula la fricción y el desgaste de diferentes casos variando los parámetros de carga, velocidad de desplazamiento, velocidad de giro, huella y distancia de recorrido.

Actualmente, se están introduciendo nuevas aplicaciones que involucran fibras naturales en compuestos poliméricos en diversas áreas, como en los materiales de construcción de viviendas, en aplicaciones industriales, en la fabricación de piezas de automóviles, en aplicaciones de cojinete y en aplicaciones estructurales y no estructurales entre otras [9]. Se están desarrollando recubrimientos superficiales que mejoran las propiedades superficiales de elementos en contacto, en particular, los recubrimientos de carbono tipo diamante (DLC) que están siendo los más prometedores para aplicaciones que involucran recubrimientos de lubricación límite (de los que se hablará más adelante) [10]. Los recubrimientos DLC se emplean en las industrias de manufactura, electrónica, óptica y de implantes biomecánicos. La figura 2.1 muestra algunos ejemplos del uso de DLC en la industria automotriz.

Por otra parte, la tribología no solo tiene un papel importante en la construcción de elementos de máquinas sino también en áreas como la biomimética, el diseño y fabricación de nuevos materiales, la formulación de lubricantes y la nanotecnología [4].



Figura 2.1 Aplicaciones automotrices de recubrimientos DLC. [10]

## 2.2 Fricción y desgaste

El desgaste se define como un mecanismo mecánico que toma lugar con el desplazamiento del material o desprendimiento de viruta tras someter un sólido a una carga y un movimiento relativo entre dos superficies sólidas en contacto [6] [11].

El desgaste puede ser el resultado de la fricción entre superficies. La fricción se define como la resistencia de un cuerpo al movimiento cuando esté se desplaza sobre el otro, o, en otras palabras, la pérdida gradual de energía cinética en situaciones donde dos o más cuerpos se mueven relativamente entre ellos [6] [11].

El contacto tribológico está relacionado con el comportamiento de todo el sistema, no solo del material. El desgaste y la fricción a menudo dependen críticamente la una de la otra según las condiciones de deslizamiento. Unas variaciones mínimas de las condiciones de ensayo pueden resultar en cambios radicales en el mecanismo dominante y la tasa de desgaste durante un ensayo. Por esta razón, es necesario estudiar previamente el mecanismo que se desea ensayar y, elegir con cuidado las condiciones que den lugar a ese mecanismo, monitorizando y controlando el ensayo [12].

La naturaleza y la tasa de desgaste queda controlada por tres factores:

- Los esfuerzos normales y de tracción, y el daño mecánico: típicamente provocan deformación plástica o fractura a nivel de aspereza o a un nivel mucho mayor.
- Los efectos térmicos: el trabajo por fricción se disipa en forma de calor. Si un mecanismo de desgaste toma lugar con temperaturas elevadas, éstas puede influenciar en las propiedades subsuperficiales del material, en la naturaleza del desgaste, y en la reacción química con su alrededor.
- Las interacciones y reacciones químicas entre superficies: siempre hay cierto efecto química con el ambiente, ya sea por absorción de átomos o por la reacción química de los cuerpos deslizantes al eliminar la capa superficial de la superficie de contacto (puede oxidarse).

Cada factor tendrá mayor o menor importancia en un sistema de desgaste según los materiales de los que estén compuestos los cuerpos, el proceso de fabricación de estos, la geometría de las piezas dentro del sistema, la presión de contacto, la velocidad de deslizamientos y el ambiente de trabajo. Cobrará gran importancia también, el uso de lubricante y el tipo que sea ya que favorecerá o en su contra, perjudicará las

reacciones químicas en el sistema.

Por lo tanto, la resistencia al desgaste y a la fricción son propiedades que determinan la confiabilidad y el tiempo de vida útil de los pares mecánicos en contacto en un sistema. Pueden afectar a la seguridad y a la calidad de vida. El desgaste de materiales como el titanio y el carbón pirolítico en las prótesis valvulares cardíacas, el UHMWPE (*Ultra-high-molecular-weight polyethylene*) en las articulaciones esqueléticas artificiales, o la porcelana en los empastes dentales, implican una disminución en la calidad de vida de las personas. Además, suponen un alto coste de pérdida de energía y material. El coste del desgaste en carreteras, aviones y camiones, entre otros, puede ocasionar accidentes. Hay pérdidas de energía indirecta al desechar un vehículo cuando únicamente hay algunas partes dañadas. Los costos de garantía por problemas de fricción y desgaste superan los costos de garantía combinados por todas las demás causas de "fallo" del producto en la industria automotriz y afines [1].

## 2.3 Mecanismo de desgaste

Existen varios mecanismos de desgaste, muchos bajo los que se emplea lubricantes de diferentes tipos para reducir la tasa de desgaste y con ello ampliar el tiempo de vida útil de los elementos de una máquina. Cada mecanismo tiene su particularidad y por lo tanto su proceso específico de estudio. Hay mecanismo que no implican una gran pérdida de material sino cambios en la función de deslizamiento o superficie en contacto de la máquina. El agarrotamiento o en inglés, *galling*, es uno de estos mecanismos y puede relacionarse con la rugosidad de la superficie debido a la alta tensión de cizallamiento local. Toma lugar en sistemas de deslizamiento en seco a bajas velocidades caracterizados por superficies severamente rugosas y con transferencia de grandes fragmentos de material. También puede ocurrir en sistemas lubricados donde la capa de lubricante se rompe. La estriación o el rayado (*scoring/scuffing*) puede deberse a alguna etapa de rugosidad severa de la superficie que aparece repentinamente en los sistemas lubricados, que provoca una alteración de la superficie sin pérdida de masa. En el caso de *scuffing*, la causa es debida a la falta de lubricante entre los dos cuerpos metálicos que produce cambios macroscópicos en la textura de la superficie. Para el caso de *scoring*, partículas abrasivas arañan la superficie del cuerpo produciendo surcos y arañazos en la dirección de deslizamiento.

Otros mecanismos de desgaste sí que implican una disminución del peso debido al roce de superficies. A continuación, se detallan algunos.

### 2.3.1 Abrasión

La abrasión se define como el desgaste de cualquier parte de un material más blando por la acción de fricción de partículas o protuberancias duras. El mecanismo dominante de eliminación de material es el microcorte, según se indica en la figura 2.2. Suele ocurrir en cuerpos cuya ratio de dureza es igual o superior a 1.3. La teoría del desgaste abrasivo supone que las partículas abrasivas dejan un área de desgaste con la misma forma que su sección transversal. Sobre la base de los esfuerzos de funcionamiento, se distinguen tres tipos de desgaste abrasivo:

- La abrasión por ranurado (impacto)
- La abrasión de alto esfuerzo (aplastamiento)
- La abrasión de bajo esfuerzo (deslizamiento) [13]

La abrasión por ranurado repetido puede desencadenar en desgaste por fatiga. A su vez, este tipo de abrasión se asemeja a la erosión, vista en la naturaleza donde los fluidos con partículas abrasivas desgastan las superficies como por ejemplo pasa en las rocas de los ríos.

La tasa de pérdida de material por abrasión depende de la forma (si es afilado o redondeado) y la orientación y la manera en la que se restringen las partículas de abrasivo (pueden estar sueltas o restringidas). Las partículas de abrasivo sueltas son mucho más comunes: rebotan, se deslizan, ruedan y cortan; y se les

denomina abrasión de tres cuerpos. Mientras que las partículas restringidas de abrasivo producen abrasión de dos cuerpos y un desgaste de diez veces el de las partículas sueltas en metales. Sin embargo, la abrasión de tres cuerpos tiene mayor efecto en materiales cerámicos y de cristal.

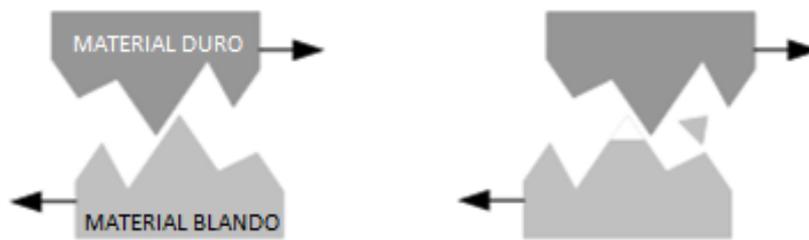


Figura 2.2 Mecanismo de desgaste abrasivo [14].

El lubricante en un mecanismo abrasivo suele mejorar la tasa de desgaste en comparación con el mecanismo en seco. Una abrasión lubricada lenta disminuye la fricción entre las partículas abrasivas y las superficies de contacto, permitiendo una mayor eliminación de materia de la superficie y menor asentamiento de partículas. Además, el lubricante reduce la tenacidad a la fractura de las partículas abrasivas, facilitando su fractura y la formación de bordes afilados.

En la industria minera y agrícola se da especial importancia al estudio de materiales resistentes a la abrasión. En las industrias de construcción es importante conocer previamente como actuará el material bajo condiciones abrasivas. La norma ASTM G75-07 “*Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)*” describe índices en los que se puede clasificar un material abrasivo [15]. Los índices son:

- Número de Miller: índice de la abrasividad relativa de las lechadas. Su objetivo principal es clasificar la abrasividad de las lechadas en términos de desgaste de un material de referencia estándar. [15]
- Número SAR (*Slurry abrasión response*): índice de la respuesta relativa a la abrasión de los materiales ensayados en cualquier lechada de interés particular. El número SAR es una forma generalizada del número de Miller aplicable a materiales distintos del material de referencia utilizado para la determinación del número de Miller. [15]

El daño por lechada en la muestra de material que se está probando es peor a medida que aumenta el número SAR, de la misma manera, a medida que aumenta el desgaste del bloque de referencia estándar, mayor es el valor del número de Miller. Estos índices son útiles para clasificar los materiales de construcción según su uso en sistemas de bombeo y equipos de manejo de fluidos para una lechada particular, y también para clasificar la abrasividad de varias lechadas frente a cualquier material de construcción seleccionado que no sea el material de referencia especificado para la determinación del número de Miller.

Un mismo material puede tener varios valores de número de Miller ya que estos no solo dependen del material sino también de la estructura cristalina (dureza), del tamaño y forma de las partículas, de las propiedades corrosivas de la lechada y de los materiales residuales contenidos en los sólidos. Por ejemplo, el cobre concentrado tiene los siguientes números de Miller: 19, 37, 58, 68, 111 y 128. Por lo tanto, la abrasividad de una lechada es una función de la concentración de sólidos en el líquido y lo anterior. Por último, bajo las mismas condiciones de ensayo, si el líquido de la lechada está compuesto por aceite, el número de Miller es inferior al número de Miller que si estuviera compuesto por agua.

Se concluye que un índice de desgaste específico bajo significa un mejor rendimiento del material, y una baja abrasividad implica una vida útil más prolongada.

### 2.3.2 Desgaste por fatiga

El desgaste por fatiga es la eliminación de partículas desprendidas por la fatiga, que surgen de las variaciones de tensión cíclica [14]. Toma lugar, cuando la carga aplicada es superior a la resistencia a la fatiga del material. Comienza por la formación de grietas en la superficie que van esparciéndose a la subsuperficie y pueden conectarse provocando la separación del material. Uno de los tipos de desgaste por fatiga es el *fretting*. Esta causado por el desplazamiento de dos superficies oscilando con pequeña amplitud. Las fuerza de fricción entre las superficies producen esfuerzos de compresión y fricción de manera alternada que resulta en la fatiga de la superficie y posterior. Otro tipo de desgaste por fatiga es el desgaste por fatiga de un recubrimiento, en este se propagan las grietas hasta la capa intermedia lo que resulta en la eliminación completa del recubrimiento [14].

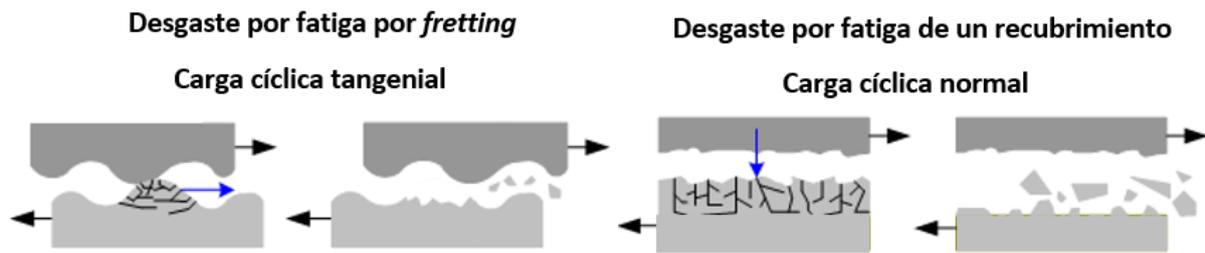


Figura 2.3 Desgaste por fatiga [14].

### 2.3.3 Desgaste por erosión.

El desgaste por erosión es similar al desgaste abrasivo, pero es causado por la interacción entre un sólido y un fluido o un fluido con partículas sólidas, como se aprecia en la figura 2.4.

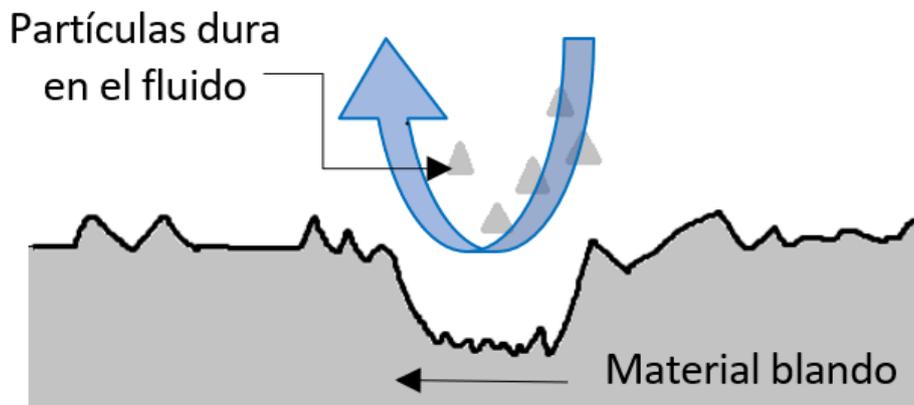


Figura 2.2.4 Desgaste por erosión [16].

La norma ASTM G76-07 "Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets" [17] detalla un ensayo de desgaste por erosión empleando un equipo especial de tipo boquilla de chorro que propulsa partículas sólidas a un espécimen. En él se describe la importancia de las dimensiones de la boquilla para trabajar con unas velocidades de partículas constantes y suficientemente elevadas. Cuanto más elevada es la velocidad las partículas, mayor la pérdida de masa y mayor el desgaste, como se aprecia en la figura 2.5, y cuya pendiente representa la tasa de erosión en estado estacionario. La uniformidad del ensayo es fundamental teniendo el mismo tamaño las partículas, misma humedad en el ensayo, y misma composición química. En los casos en los que se aplica un recubrimiento al espécimen es necesario estudiar la naturaleza de éste para asegurar que las características del material no cambian al realizarse la limpieza del espécimen, para su posterior pesado.

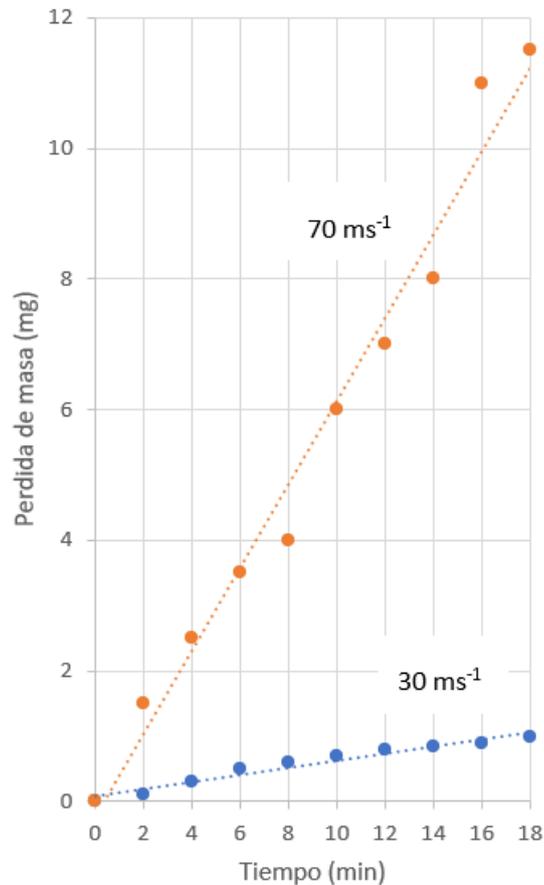


Figura 2.5 Ejemplo de erosión frente al tiempo para acero 1020 a 30 ms<sup>-1</sup> y 70 ms<sup>-1</sup> [17].

### 2.3.4 Adhesión

La adhesión es el mecanismo de desgaste por transferencia de material de una superficie a otra durante el movimiento relativo, debido a un proceso de soldadura en fase sólida por una alta fricción local que produce desgarramiento y fragmentación.

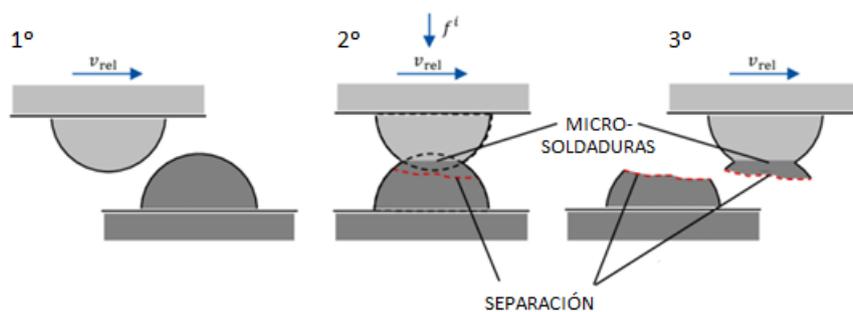


Figura 2.2.6 Mecanismo de desgaste adhesivo [12].

La teoría adhesiva del desgaste asume que la pérdida de material es causada por la soldadura de uniones ásperas que crean partículas de desgaste debido a la fractura del material más débil cerca de las uniones soldadas. Las partículas que se eliminan de una superficie se adhieren permanente o temporalmente a la otra superficie [1]. Sin embargo, si entre las superficies en contacto hay un lubricante, el efecto de soldadura disminuye.

En 1953, J.F. Archard publicó una ecuación basada únicamente en los métodos de la mecánica sólida, que se

aproxima al valor de la tasa de tiempo de desgaste debido a la adhesión, esta es la ecuación 2.1.

$$\psi = k \cdot \left( \frac{WV}{H} \right) = \left( \frac{N \cdot \frac{m}{s}}{Pa = \frac{N}{m^2}} \right) = \frac{m^3}{s} \quad (2.1)$$

Donde  $k$  es el coeficiente de desgaste (una constante),  $H$  es la dureza del material deslizante,  $W$  es la fuerza aplicada y  $V$  es la velocidad de deslizamiento de los cuerpos.

Esta ecuación no es adecuada para calcular dicho valor ya que el desgaste está relacionado con muchas más variables como son la temperatura, la rugosidad superficial de los cuerpos, la estructura interna del material, el lubricante empleado o la ausencia de este, entre otras. Por esta razón el valor de la constante  $k$  tiene un rango de valores muy amplio.

## 2.4 Ensayo de desgaste

Se ha visto en el apartado anterior los diferentes mecanismos de desgaste en la tribología. No obstante, una de las características más importantes en los ensayos de desgaste son las superficies que entran en contacto, y de qué manera interactúan. Por lo que es fundamental definir la geometría de los dos cuerpos en contacto y las condiciones de ensayo para conocer el mecanismo de desgaste predominante en el ensayo. En la Figura 2.7 se detallan las geometrías comúnmente empleadas en el desgaste por deslizamiento.

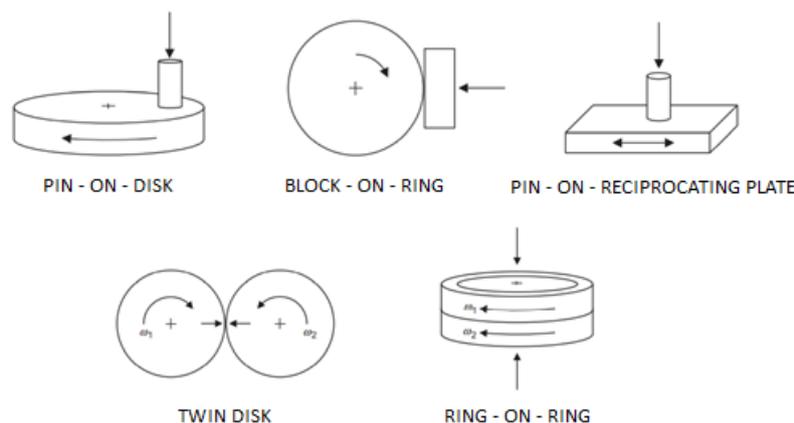


Figura 2.2.7 Geometrías comúnmente empleadas en ensayos de desgaste [18].

Es necesario recalcar que, en la mayoría de casos, el contacto entre superficies es asimétrico. Esto se debe a que la naturaleza de las condiciones de contacto experimentadas por un cuerpo no son las mismas que las experimentadas por el otro. En otras palabras, un cuerpo (suele ser el que aplica la fuerza, el indentador) sufrirá un contacto continuo en un único punto, el punto de contacto entre los dos cuerpos, mientras que el otro cuerpo sufrirá un contacto intermitente durante la trayectoria del indentador puesto que este se mueve. Como resultado cada cuerpo muestra distintos grados de desgaste incluso si ambos estuvieran fabricados con el mismo material, este es el caso de todos los métodos mostrados en la Figura 2.7 salvo los métodos *twin disk* y *ring-on-ring* cuyas superficies de contacto son simétricas [18].

Existen dos tipos de contacto en un ensayo tribológico, el contacto conforme y el *counterformal*.

**Contacto conforme:** toma lugar cuando la superficie de contacto nominal es extendida. Ejemplos de ello son todos los de la Figura 2.7 excepto el caso *block-on-ring*, y el de la Figura 2.8 c).

**Contacto *counterformal*:** el contacto es únicamente a lo largo de un punto (Figura 2.8 b) o de una línea (*block-on-ring* y Figura 2.8 a) y d)). En esos casos la presión de contacto inicial es mayor que la del contacto conforme y, durante el ensayo, el desgaste de la superficie hace incrementar el área de contacto nominal [18].

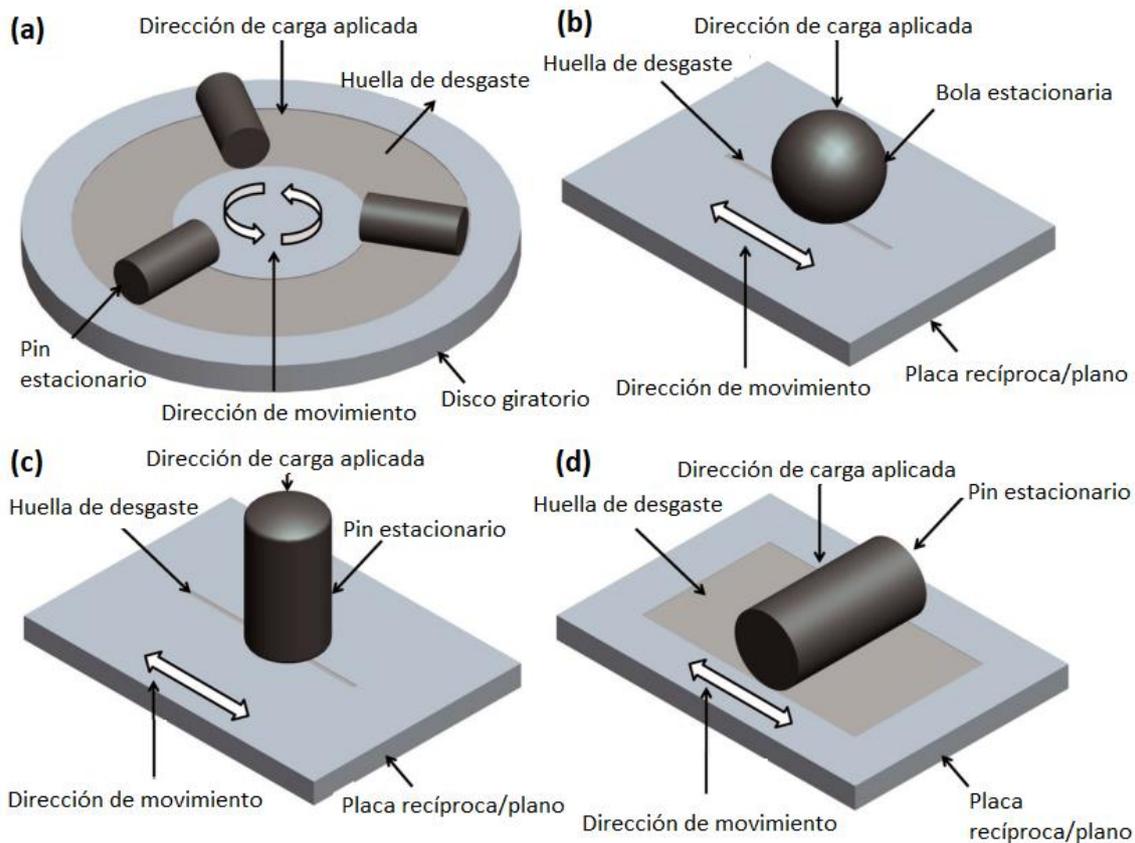


Figura 2.2.8 Configuraciones geométricas de prueba tribológica más utilizadas [10]:

- a) Pin-on-disk      b) Ball-on-plate      c) Pin-on-plate (vertical)      d) Pin-on-plate (horizontal)

Los resultados tribológicos de los ensayos Pin-on-disk de las figuras 2.7 y 2.8 no serán los mismos, aunque en ambos el mecanismo de desgaste sea el mismo. Pin-on-disk es uno de los ensayos de desgaste más empleados y uno de los ensayos más parecidos al ensayo realizado en este estudio. Se trata de un pasador, normalmente una bola o cilindro, que se presiona perpendicularmente a un disco giratorio creando una huella circular en este. Puede realizarse vertical o horizontalmente dando lugar a distintos resultados según la orientación. Este ensayo no suele ser abrasivo, únicamente si se emplea un disco con superficie de material abrasivo [19]. En el caso de Pin-on-disk se pueden hacer varios ensayos con diferentes resultados según el radio del disco, ya que los puntos locales de contacto del disco y el pasador estarán en contacto intermitente con mayor o menor frecuencia a partir del radio y la velocidad de giro.

En la norma G132-96 “*Standard Test Method for Pin Abrasion Testing*” se estudia el uso de pasadores sobre superficies abrasivas [5]. En la Figura 2.9 se muestra algunas configuraciones. La metodología y la obtención de resultados es similar al resto de ensayos con la particularidad de especificar el tipo de abrasivo empleado y asegurar que el trayecto del pasador sea siempre sobre abrasivo no usado.

El desgaste en los ensayos se mide de dos maneras. El más común es a partir de la medición de cambio de masa o volumen del espécimen pudiendo hacerse al principio y al final de cada ensayo, o varias veces durante el ensayo, deteniendo el tribómetro y asegurándose de colocar el espécimen en la posición exacta en la que estaba. La segunda manera es empleando un transductor de desplazamiento que mida continuamente la posición durante el ensayo y deduzca el desgaste a partir de la diferencia de dimensiones.

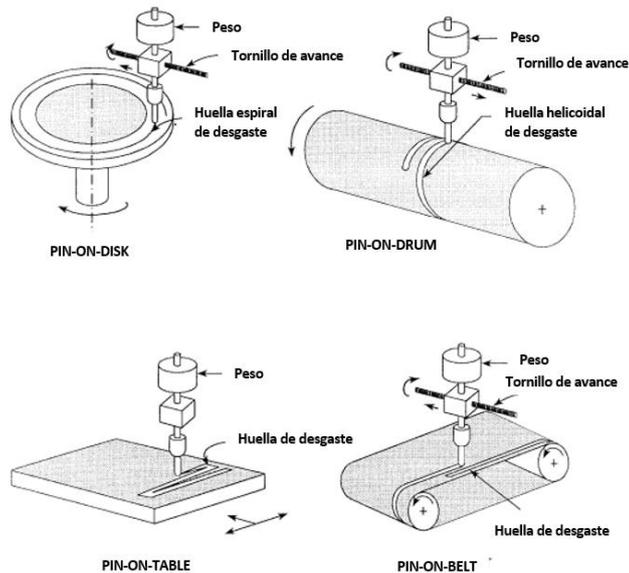


Figura 2.2.9 Configuraciones de las máquinas de ensayo de abrasión con Pin [5].

En todo ensayo de desgaste, la combinación de mecanismos de desgaste debe ser muy similar a cada uno de los diseños de producción, la prueba de prototipo, la prueba de subcomponentes y la prueba de banco. Al fin y al cabo, los ensayos de desgaste son pruebas que se realizan con la intención de asemejar lo máximo posible a un caso real de dos cuerpos dentro de una máquina. Obteniendo un modelo similar se puede saber los posibles fallos de las piezas en un futuro. K.C. Ludema expone en su libro que: “El principio de las pruebas de desgaste es el mismo, es decir, la combinación de mecanismos de desgaste debe ser muy similar en cada uno de los diseños de producción, la prueba de prototipo, la prueba de subcomponentes y la prueba de banco. Las tasas de desgaste de cada prueba en la jerarquía deben ser similares, las superficies desgastadas deben ser casi idénticas y los desechos de desgaste transferidos y sueltos deben contener el mismo rango de tamaños, formas y composición de partículas.” [1].

#### 2.4.1 El efecto de la lubricación en el desgaste

En el siglo XX, los científicos comenzaron a darle especial importancia a los efectos químicos de los lubricantes en el desgaste. Varios estudios se realizaron en sistemas de eje y rodamiento, siendo el metal más fuerte el rodamiento, donde se detallaban: las relaciones del desgaste con la fuente del lubricante, la historia de uso del lubricante, el material del que estaba hecho el cojinete y como habían sido fabricados. Durante los años veinte Hardy demostró varios efectos químicos en la lubricación y sugirió que un lubricante que contuviese aditivos activos se denominaría “lubricación límite”. Un sistema opera en el régimen límite si el coeficiente de fricción es cercano a 0.1 [18].

En los sistemas lubricados, el suministro de lubricante, la distribución de presión dentro de la película de lubricante y el espesor resultante son factores importantes. El lubricante en superficies de contacto metal-metal hace que disminuya la fricción, el desgaste, las pérdidas de energía y alarga la vida útil de los elementos en contacto. La temperatura en un ensayo lubricado cobra especial importancia ya que puede cambiar la viscosidad del lubricante [18].

En la figura 2.10 se muestra la relación entre el coeficiente de fricción y desgaste y, el ratio de los parámetros de rugosidad superficial y espesor de la película. Ian Hutching y Philip Shipway en su libro “Tribology” [12] señalan que, si la capa de fluido es elevada, bajo condiciones de lubricación hidrodinámica, como ocurre para  $\lambda > 3$  el coeficiente de desgaste es muy bajo puesto que las asperezas en superficies opuestas no entran en contacto. Del mismo modo, si  $\lambda < 3$  se produce algún contacto de asperezas que resulta en un mayor coeficiente de desgaste y de fricción.

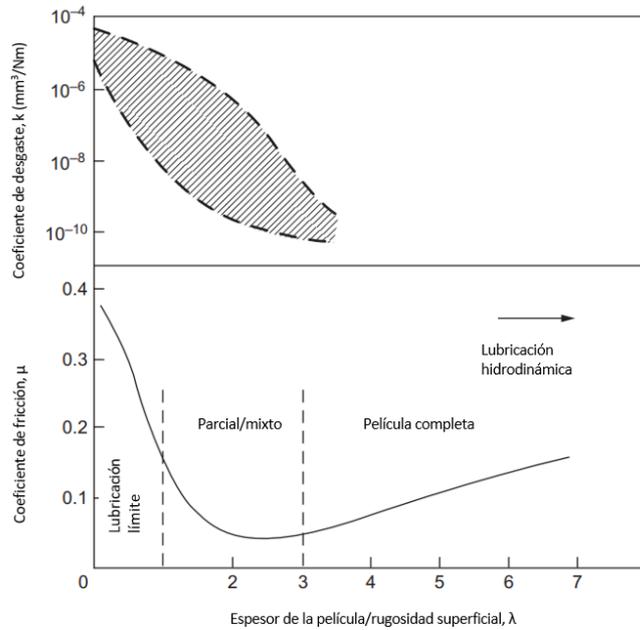


Figura 2.10 Regímenes de lubricación y desgaste en el deslizamiento lubricado de metales, en función de la relación entre el espesor de película y la rugosidad superficial,  $\lambda$  [18].

#### 2.4.2 Desgaste por deslizamiento en seco de metales.

Existen dos definiciones de desgaste en metales, desgaste leve y severo. El primero toma lugar en el régimen de desgaste con cargas bajas (*mild wear* en la figura 2.11) y se caracteriza por una baja tasa de desgaste, una morfología de superficie suave y una viruta compuesta de finas partículas de óxido. El desgaste severo ocurre bajo altas cargas (*severe wear*, en la figura 2.11), se caracteriza por una alta tasa de desgaste (normalmente entre 100 y mil veces superior a la del desgaste leve), una morfología superficial rugosa y una viruta compuesta de gruesas escamas metálicas. La transición entre desgaste leve a severo se debe a un cambio en la naturaleza del contacto durante el deslizamiento [18].

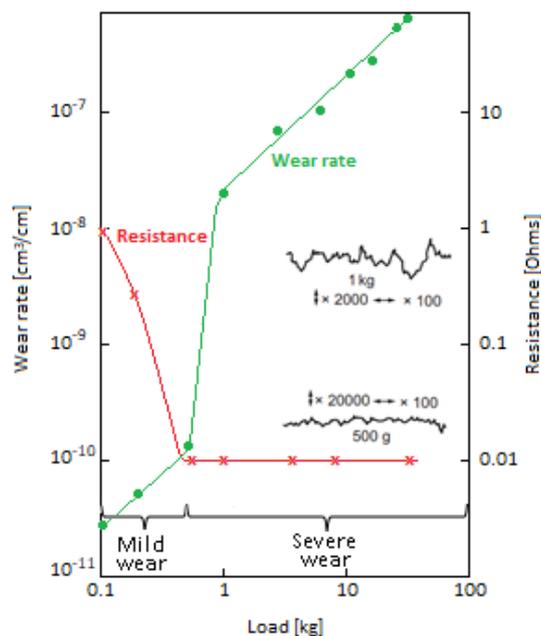


Figura 2.11 Resistencia al desgaste y tasa de desgaste frente a la fuerza nominal en un ensayo de desgaste por deslizamiento en seco de un pasador de latón  $\alpha/\beta$  con plomo [18].

### 2.4.3 El coeficiente de fricción durante el desgaste.

K.C. Ludema en su libro “*Friction, wear, lubrication: A Textbook in Tribology*” [1] postula que las variables que afectan al coeficiente de fricción son:

- La velocidad de deslizamiento, figura 2.12.

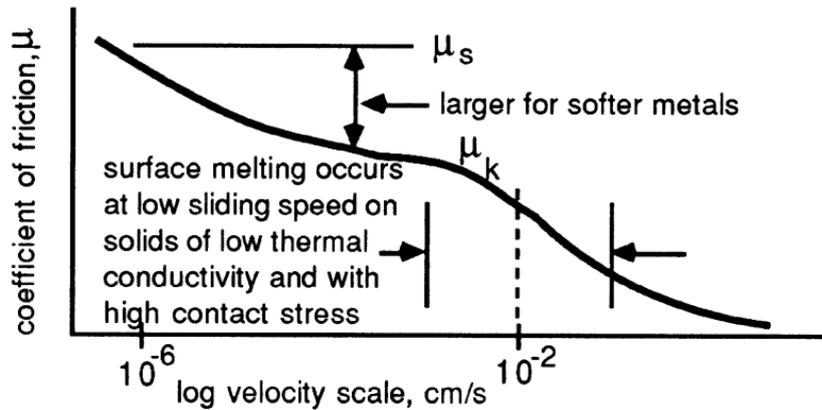


Figura 2.12 Gráfica de la reducción de la fricción observada con frecuencia con la velocidad de deslizamiento para sólidos cristalinos [1].

- La temperatura, aunque tiene poca importancia sobre los metales hasta que la temperatura es muy alta. La velocidad de oxidación del metal cambia el coeficiente de fricción.
- La velocidad de partida o inicial. Al comenzar un ensayo el coeficiente de fricción inicial es bajo.
- La carga aplicada o la presión de contacto, figura 2.13

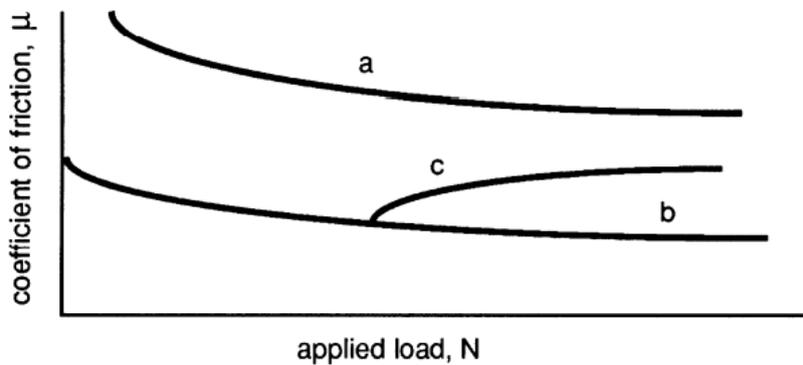


Figura 2.13 Gráfica de las tres influencias comunes de la presión de contacto sobre la fricción a) superficies limpias; b) superficies prácticas, con contaminantes; c) superficie de sustrato limpia tras el astillado del óxido de una superficie con óxido quebradizo, esto aumenta la adhesión local para causar coeficientes de fricción más altos [1].

- La rugosidad de la superficie que produce un mayor coeficiente de fricción en los sistemas con lubricación, especialmente con metales blandos.
- La tasa de desgaste, aunque solo es de interés en el rayado, en la estriación y en el agarrotamiento.

## 2.5 Casos de estudio de desgaste en diferentes materiales.

A continuación, se presentarán ejemplos de casos de estudio realizados en diferentes materiales y en diferentes condiciones de ensayo.

### 2.5.1 Desgaste adhesivo del acero AISI-SAE 1020.

Los profesores del departamento Metalúrgico de la Universidad Tecnológica de Pereira realizaron un estudio de desgaste adhesivo del acero AISI-SAE 1020 en un tribómetro de cilindros cruzados [8]. En el estudio se analizó el coeficiente de fricción y el desgaste, se midió la variación de masa y la rugosidad superficial inicial de las probetas. El coeficiente de fricción se determinó mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$V = K \left( \frac{FL}{H} \right) \quad (2.2)$$

siendo K el coeficiente de fricción, F la fuerza normal, L la longitud de deslizamiento, H la dureza del material y V el volumen total desgastado. Para el cálculo de este último parámetro se pesaron las probetas antes y después del ensayo.

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 2.14 y 2.15. Las funciones en ambas figuras están representadas en función del tiempo de ensayo. La figura 2.14 muestra como el desgaste del acero AINSI SAE 1020 tiene una pendiente constante por lo que depende directamente del tiempo de ensayo. La figura 2.15 muestra como el coeficiente de fricción comienza con un valor bajo que aumenta de manera abrupta en los primeros treinta minutos y que luego va nivelándose suavemente alrededor del valor de  $7.00 \times 10^{-3}$ .

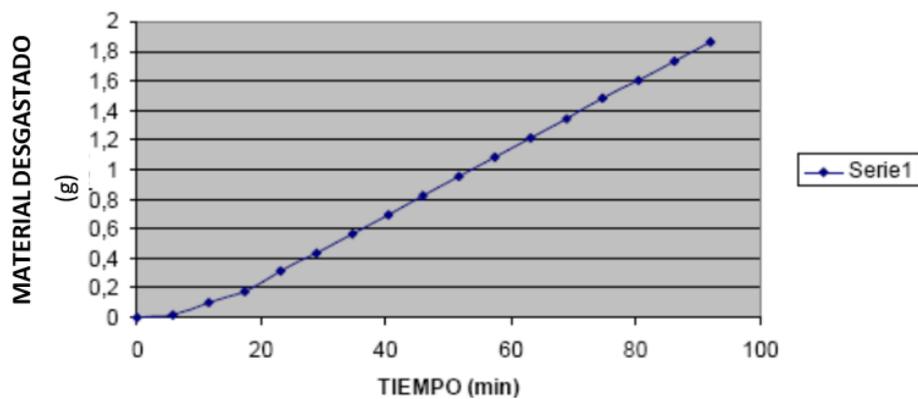


Figura 2.2.14 Curva de desgaste frente al tiempo para el acero AISI-SAE 1020 [8].

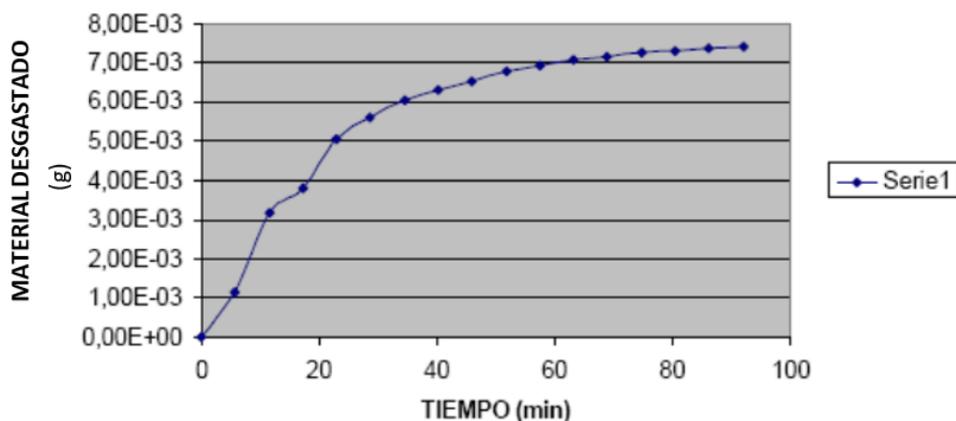


Figura 2.2.15 Curva de coeficiente de fricción frente al tiempo para el acero AISI-SAE 1020 [8].

Concluyeron que el primer estado de evolución del coeficiente de fricción (desgaste) depende de las características superficiales que presentaban las probetas y de los contaminantes que contuviese el material; que en el segundo estado de evolución del coeficiente de desgaste se presentaban valores máximos debido a que además de los contaminantes, la calidad de la superficie se vio notablemente disminuida por el continuo contacto metal-metal.

## 2.5.2 Desgaste por deslizamiento en seco de aleación AA6061 reforzado con grafito.

El grafito es una de las formas alotrópicas en las que se puede presentar el carbono en la naturaleza. Es mundialmente empleado como lubricante sólido debido a su microestructura laminar por lo que es de interés en la tribología ya que puede reducir el desgaste.

El artículo “*Sliding wear performance of graphite reinforced AA6061 alloy composites for rotor drum/disk application*” [20] postula que gracias al reforzado con grafito se ha podido demostrar una disminución en la tasa de desgaste de materiales como el aluminio. Declara que se debe a la estructura por capas del grafito que actúa como lubricante seco entre las superficies de contacto lo que aumenta la resistencia al desgaste y disminuye el coeficiente de fricción entre los materiales. El ensayo descrito es un Pin-on-disk, toma lugar a temperatura ambiente, en un radio de huella de 40 mm, bajo valores de fuerza entre 15 N y 55 N, velocidades de deslizamiento entre 0.5 m/s y 2.5 m/s y distancias de recorrido entre 200 m y 1000 m. En el ensayo se demuestra que un mayor porcentaje en peso de grafito no significa un mejor rendimiento del material. En la Figura 2.16 y en la Figura 2.17 se muestra que el porcentaje en peso de 7.5 de grafito en el compuesto de aleación de AA6061-Gr da unos valores inferiores de tasa específica de desgaste. Puede ser debido a la superior adhesión interfacial e interconexión entre AA6061-Gr que transfiere efectivamente las cargas mecánicas al refuerzo evitando fallas repentinas de los componentes cuando están cargados. El aumento la tasa específica de desgaste con el aumento de la velocidad de deslizamiento y fuerza nominal posiblemente se deba a una deformación de la subsuperficie con una tasa de tensión elevada. El incremento de tasa de deformación de la subsuperficie amplifica el área de contacto por fractura y fragmentación de las asperezas.

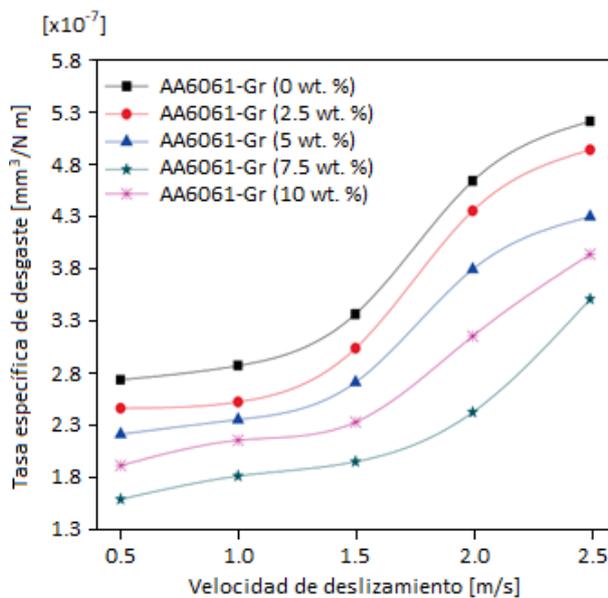


Figura 2.16 Efecto de la velocidad de deslizamiento en la tasa específica de desgaste de compuestos de aleación AA6061-Gr [20].

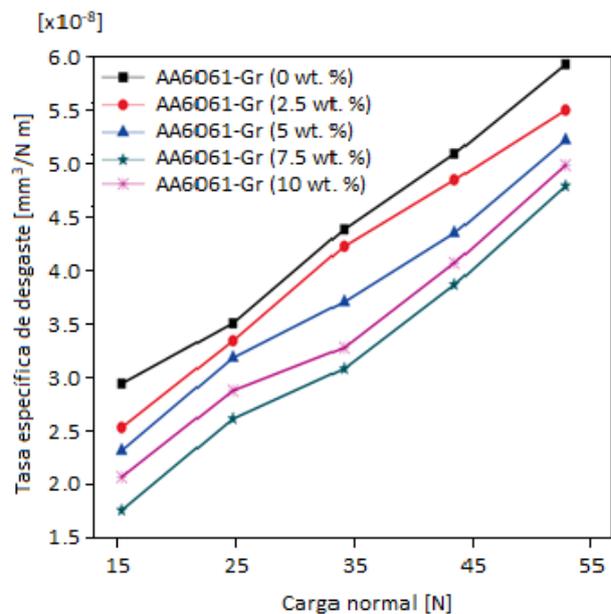


Figura 2.17 Efecto de la fuerza nominal en la tasa específica de desgaste de compuestos de aleación AA6061-Gr [20].

Mukesh concluye en el artículo que los compuestos de AA6061 reforzados con polvo de grafito exhiben una mejor resistencia al desgaste en comparación con la aleación pura bajo todas las cargas y velocidades de deslizamiento investigadas, y que la tasa de desgaste específica aumenta con el aumento de la velocidad de deslizamiento y fuerza nominal, independientemente de la composición de grafito en el compuesto [20].

### 2.5.3 Desgaste por deslizamiento en seco de Wc-Co reforzado por pulverización de térmica de NiCrFeSiB HVOAF.

Las aleaciones de NiCrSiB y NiCrFeSiB son materiales resistentes al desgaste, la corrosión y al calor por lo que son muy útiles en calderas de centrales eléctricas alimentadas con carbón o turbinas de gas. Sin embargo, tiene una baja dureza por lo que se suele emplear como recubrimiento en materiales más duros.

Al añadir NiCrSiB al Wc-Co mejoraron las propiedades de resistencia al desgaste por deslizamiento. Pulsford realizó un estudio llamado “*Sliding wear behaviour of WC-Co reinforced NiCrFeSiB HVOAF thermal spray coatings against WC-Co and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> counterbodies*” [21] que explica la metodología de la pulverización térmica HVOAF (High velocity oxy-air fuel) en materiales como el WC-Co y, como diferentes tasas de flujo de material proporcionan resultados distintos frente al desgaste en seco Ball-on-disk. El polvo compuesto del ensayo contiene 50 % de WC-Co y 50 % de NiCrFeSiB pulverizado en dos condiciones diferentes, con el caudal total de gas en la antorcha fijado en 500 L/min (NiSF\_HF) y 150 L/min (NiSF\_LF) para variar la microestructura de los recubrimientos. En la Figura 2.18 muestra que ambos recubrimientos (por NiSF\_HF y NiSF\_LF) se comportan de manera similar y como el coeficiente de fricción es superior para ambos recubrimientos cuando la bola es de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ya que esta se va desgastando más rápidamente que WC-Co, aumentando el área de contacto entre el recubrimiento y la bola y dando lugar a mayor desgaste por abrasión.

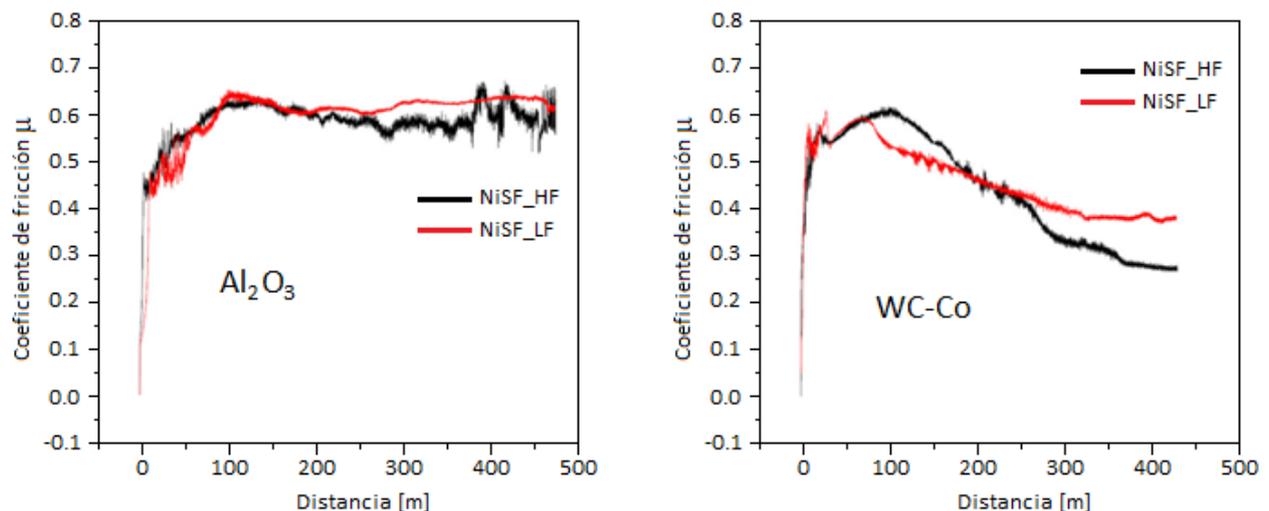


Figura 2.18 Coeficiente de fricción frente a la distancia recorrida para el ensayo de desgaste según el material de la bola: WC-Co y Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [21].

### 2.5.4 Desgaste por deslizamiento en seco de aleación de Ti-6Al-4V procesada por fusión en lecho de polvo.

Se ha demostrado que la tasa de desgaste no solo depende de la dureza y la resistencia a la corrosión sino también de la ductilidad del material. Las aleaciones de titanio tienen una gran resistencia a la fuerza y a la corrosión, una baja resistencia a la abrasión debido a su baja dureza, son dúctiles pero debido a su alta plasticidad y a su baja conductividad térmica son poco resistentes al desgaste por adhesión. Sin embargo, es muy usado en el procesado por fusión en lecho de polvo.

Hua Li et. al. estudia en el artículo “*Dry sliding wear performance and behaviour of powder bed fusion processed Ti-6Al-4V alloy*” [22] tres métodos en el que se puede fabricar Ti-6Al-4V y como varía la tasa de desgaste según la metodología. Los tres métodos son fusión de lecho de polvo por láser (LPBF), fusión de lecho de polvo por haz de electrones (EPBBF) y procesamiento convencional (CP). La figura 2.19 representa el efecto de estos métodos, la frecuencia o velocidad de deslizamiento y la fuerza nominal durante el ensayo en la tasa

de desgaste. Para los tres métodos se demuestra que la frecuencia no depende tanto en el desgaste como la fuerza nominal, cuanto mayor la fuerza nominal, mayor la tasa de desgaste, aunque no sea un aumento lineal.

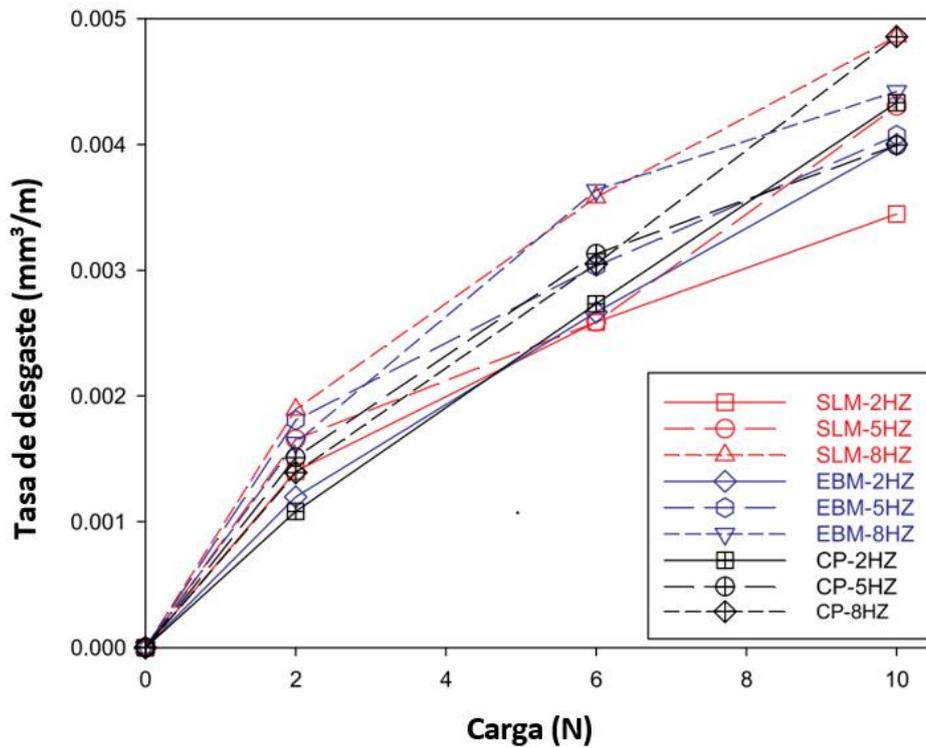


Figura 2.19 Valores de la tasa de desgaste en función de la fuerza nominal [22].

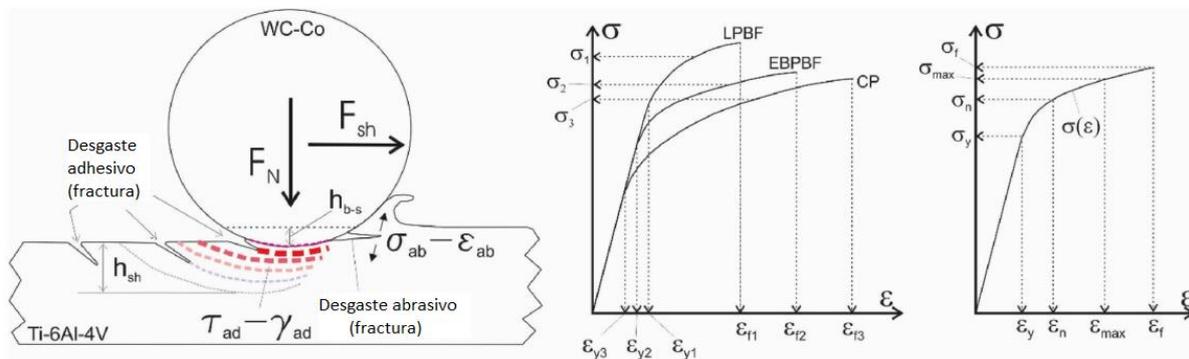


Figura 2.20

- Prueba de desgaste por deslizamiento con fuerzas, campo de esfuerzo cortante - deformación ( $\tau_{ad}$ - $\gamma_{ad}$ ) que causa desgaste adhesivo, espesor de la capa de corte ( $h_{sh}$ ) y tensión de esfuerzo ( $\sigma_{ab}$ - $\epsilon_{ab}$ ) que causa desgaste abrasivo indicado.
- Curvas de tensión-deformación de la aleación Ti-6Al-4V [22]

Pulsford postula que a pesar de apreciarse diferencias en los valores de dureza y microestructura los tres métodos (LPBF = alta dureza, EPBF = dureza media, CP = baja dureza) muestran valores de tasa de desgaste similares bajo las mismas condiciones de ensayo, por ello concluye que la tasa de desgaste no es inversamente proporcional a la dureza del material (ya que cada método da lugar a una dureza diferente de muestra) sino que está relacionada con la ductilidad del material puesto que un material más dúctil permite una mayor deformación sin fracturar ni pérdida por desgaste.

### 2.5.5 Desgaste de contactos dopados con DLC (Diamond-like Carbon).

Como se ha mencionado anteriormente DLC es un recubrimiento que está cobrando mayor importancia debido sus propiedades físicas. Aporta al material dopado de unos valores altos de dureza y resistencia al desgaste y un valor bajo de coeficiente de fricción. Los recubrimientos DLC se consideran químicamente inertes debido a su baja energía superficial, sin embargo, al dopar materiales metálicos y no metálicos con DLC puede aumentar sus energías superficiales y mejorar las interacciones con los lubricantes dando lugar a la formación de películas beneficiosas. También mejora la adhesión con el sustrato, la conductividad eléctrica, protege la superficie, evita la corrosión y la abrasión y disminuye las tensiones de compresión interna durante la deposición de los residuos de desgaste.

Zahid et.al. describe la posibilidad de mejorar el rendimiento tribológico de los recubrimientos DLC texturizando la superficie con depresiones [10]. Estas depresiones de diferentes orientaciones, tamaños y formas actúan como depósitos, suministran lubricante continuamente a las superficies en contacto evitando condiciones de inanición, atrapan residuos de desgaste tras el deslizamiento y evita el deterioro de la superficie por desgaste abrasivo.

Ouyang J.H. y Sasaki S. descubrieron que, con el aumento de la temperatura, los mecanismos de desgaste, en un sistema de titanio dopado de DLC, cambian del desgaste por pulido a la grafitización, la delaminación, la fractura frágil y la formación de películas en superficies estresadas tribológicamente. Por lo que se demostró que un aumento de la temperatura de ensayo resultaba en un desgaste acelerado y una fricción reducida [23].

A continuación, se muestra el caso de desgaste entre dos superficies de titanio dopado con DLC estudiado por Rehan Zahid et.al. [10]. Se compara el uso de dos tipos de lubricantes: aceites base y aceites formulados.

En las figuras 2.21 y 2.22, las gráficas muestran que no todos los lubricantes tienen la misma eficacia en la interacción de los dos cuerpos de Ti-DLC, obteniendo un mejor lubricado con el aceite base PAO (polialfaolefina) que muestra un menor de coeficiente de fricción y de coeficiente de desgaste en comparación con M (aceite mineral parafínico). Si se comparan los resultados de los aceites base y los formulados, en ambos casos el lubricante PAO muestra mejores resultados de desgaste aun con la adición de aditivos. En particular, entre los aditivos, MoDTC (ditiocarbamato de molibdeno) mostró un mejor rendimiento al mejorar aún más las características de fricción y desgaste de los recubrimientos Ti-DLC.

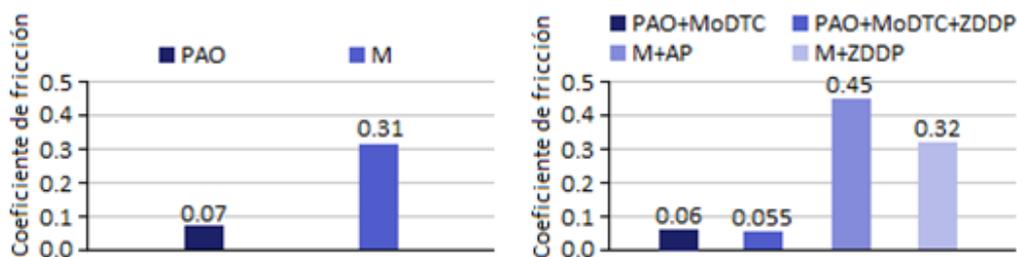


Figura 2.21 Valores promedio del coeficiente de fricción del ensayo de desgaste Ti-DLC/Ti-DLC [10].

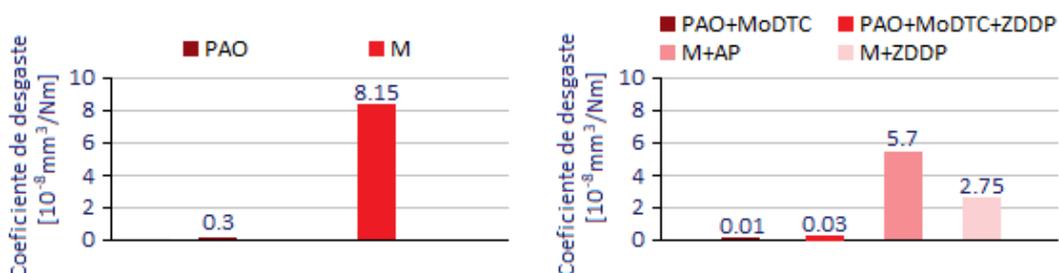


Figura 2.22 Valores promedio del coeficiente de desgaste del ensayo de desgaste Ti-DLC/Ti-DLC [10].

### 2.5.6 Desgaste por deslizamiento de polímeros.

El mecanismo de fricción en polímeros es similar al de los metales, excepto en el caso de politetrafluoroetileno (PTFE) a bajas velocidades [1]. El acabado superficial del material duro, al igual que en los metales, tiene una fuerte influencia en el mecanismo de desgaste resultante. Por ejemplo, si la superficie de contacto del material duro es lisa el mecanismo de desgaste predominante es el desgaste adhesivo que deforma la superficie del polímero. Por el contrario, si la superficie de contacto es rugosa la deformación del polímero alcanza profundidades mayores debido al desgaste abrasivo por deformación plástica o al crecimiento de grietas por fatiga [18]. Se denomina mecanismo de desgaste interfacial al mecanismo de desgaste que deforma únicamente la superficie, y mecanismo de desgaste cohesivo al que deforma la superficie y la subsuperficie del polímero.

- Mecanismo de desgaste cohesivo: se trata de una deformación causada por el paso de una protuberancia en la superficie de contacto sobre la superficie del polímero. La protuberancia puede ser: una aspereza de la superficie dura, una partícula del material más duro parcialmente incrustada en la superficie de contacto del material más blando, o restos del polímero transferidos a la superficie de contacto. Si la deformación resultante es plástica el mecanismo de desgaste es por abrasión, si la deformación es predominantemente elástica estará asociado al desgaste por fatiga. La figura 2.23 muestra como los polímeros con alto módulo elástico se desgastan por abrasión más que por fatiga y los polímeros con bajo modulo elástico, como los elastómeros, predominantemente se desgastan por fatiga. La fatiga es importante en polímeros más duros que deslizan contra superficies de contacto lisas. La deformación elástica tiene la particularidad de no mostrar grietas instantáneamente, sino que tras un numero de ciclos de contacto se desarrollan daños cumulativos que acaban convirtiéndose en grietas.

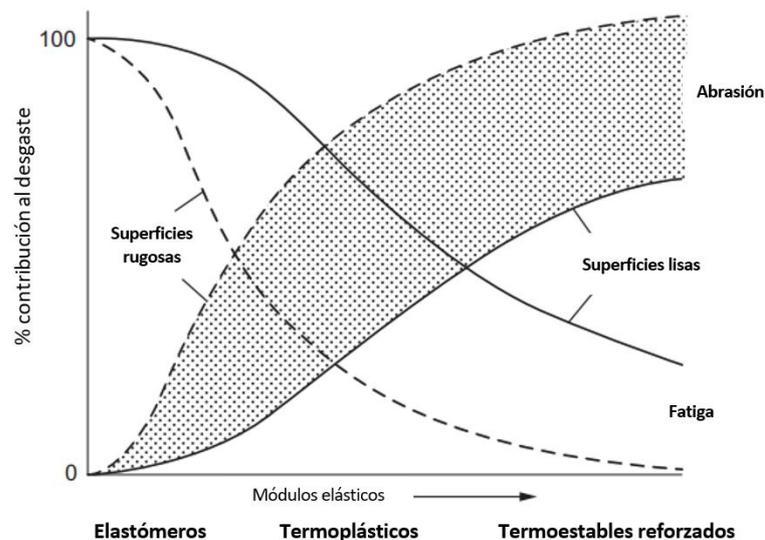


Figura 2.23 Diagrama esquemático que muestra la variación en la importancia de los mecanismos de abrasión y fatiga en polímeros según su módulo elástico y la rugosidad de la superficie de contacto [18].

- Mecanismo de desgaste interfacial: mecanismo cuya deformación solo afecta al nivel superficial del polímero. El proceso de desgaste más importante es el de adhesión, que ocurre solo cuando la superficie de contacto es lisa e implica la transferencia de polímero a la superficie de contacto más dura y su eliminación posterior como residuos de desgaste. No todos los polímeros muestran desgaste adhesivo por ser lisos, los termoestables por ejemplo únicamente se desgastan por fatiga o por abrasión.

La figura 2.24 muestra un ejemplo relacionando la rugosidad superficial y el factor de desgaste de un polímero. El valle de la figura hace referencia a la rugosidad superficial en la cual toma lugar la transición de un desgaste adhesivo a uno abrasivo de un polímero. Si la superficie del polímero es lisa, el desgaste de las superficies es

adhesivo e involucra la deformación de la capa superficial del polímero. Por el contrario, si el polímero tiene una superficie rugosa, las asperezas de éste, provocaran deformaciones superficiales de mayor profundidad y el desgaste es por abrasión [18].

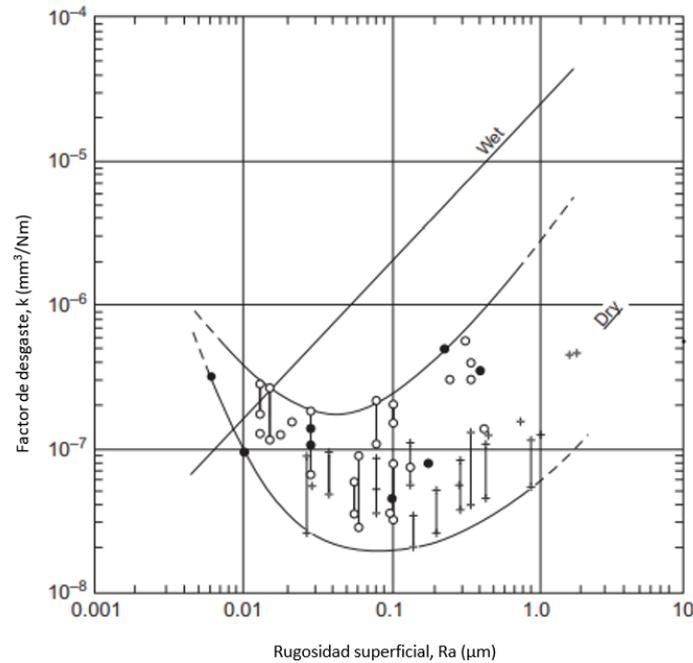


Figura 2.24 Tasa de desgaste del polietileno de ultra alto peso molecular (UHMWPE) que se desliza contra una superficie de acero, en función de la rugosidad de la superficie de acero [18].

A menudo se emplean polímeros en sistemas sin lubricación que deslizan contra materiales más duros, como en rodamientos y engranajes. Esto es debido a que el coeficiente de fricción de los polímeros es inferior al de los metales, siendo este entre 0,1 y 0,5 según el polímero [18].

En el caso de sistemas de desgaste lubricado con polímeros los efectos químicos y físicos del lubricante cobran mayor importancia que los efectos mecánicos. Lo que significa que un bajo coeficiente de fricción causado por el lubricante puede resultar en un mayor o menor desgaste según la interacción química y física entre el sistema y el lubricante. Los lubricantes límite, se adhieren mal a las superficies de baja energía de los polímeros y tienen poco efecto en la fricción y el desgaste de estos. Los lubricantes líquidos interactúan con los polímeros de varias formas, pueden provocar una mayor plasticidad de la superficie y reducir el desgaste, como el caso de los termoplásticos vítreos, o pueden causar agrietamiento por tensión en los mismos polímeros aumentando su desgaste, todo depende de la afinidad del lubricante y el polímero [18].

Existen varios tipos de máquinas de ensayo tribológico para polímeros, cuyo propósito es asemejar lo máximo posible a las condiciones de desgaste bajo las que estará sujeto el polímero en el caso real. A continuación, se detallan algunos tipos [9]:

- Rueda de goma de arena seca: El ensayo es abrasivo, aunque puede ser adhesivo si no se emplea arena. Este ensayo se aplica para comprobar el rendimiento de desgaste de bandas de rodadura, casquillos, cojinetes y bandas de neumáticos.
- Pin-on-drum: El ensayo es adhesivo, y únicamente es abrasivo si se cubre el tambor con papel abrasivo.
- Máquina tribo-lineal: Ensayo abrasivo si el recipiente de acero inoxidable está lleno de partículas abrasivas, de lo contrario el mecanismo de desgaste es adhesivo. La aplicación de esta prueba es simular sistemas de deslizamiento lineal, como sería paneles de ventanas, puertas, bisagras y cajones.
- Block-on-ring: Se suele simular para: comportamiento de desgaste por deslizamiento o rodadura de bandas de rodadura de neumáticos, poleas, árboles de levas y materiales de cojinetes.
- Pin-on-disc.

- Block-on-disc: Ensayo similar al Pin-on-disc que también se basa en la norma ASTM G99 y cuyo espécimen tiene las mismas dimensiones. El ensayo puede ser adhesivo y abrasivo sujeto al modo de deslizamiento en seco.

### 2.5.7 Desgaste por deslizamiento en seco de materiales cerámicos.

Los materiales cerámicos se diferencian de los materiales metálicos en la naturaleza de su enlace interatómico que conlleva una capacidad limitada a deformarse plásticamente. Tienen un coeficiente de fricción superior al de los metales por ello son materiales con mayor probabilidad de producir vibraciones severas del sistema.

El mecanismo de desgaste en los materiales cerámicos se centra en su comportamiento frágil. Al igual que los algunos metales se aprecia el desgaste leve y severo, figura 2.25. En general los materiales cerámicos en los ensayos de desgaste muestran una baja tasa de desgaste al comienzo del ensayo que aumenta significativamente a medida que pasa el tiempo probablemente por los ciclos de estrés térmico y terminan fracturando el material.

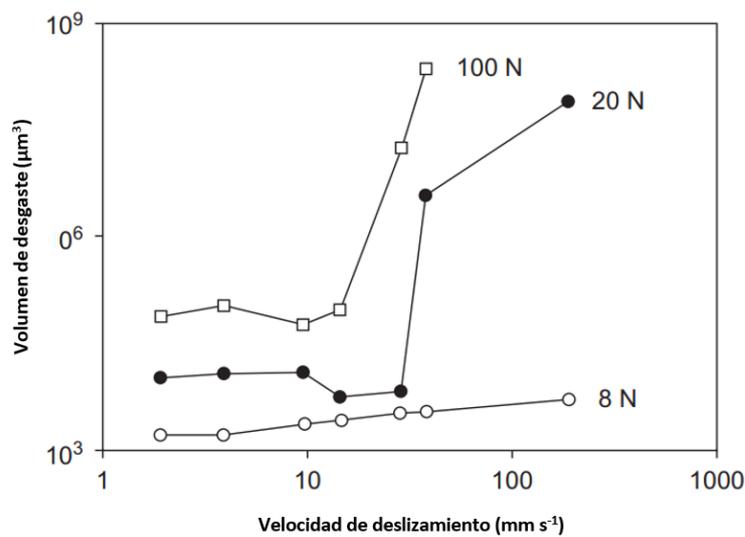


Figura 2.25 Volumen de desgaste de alúmina policristalina en función de la velocidad de deslizamiento para tres cargas diferentes en un ensayo de Ball-on-three-flats [18].



## 3 PARTE EXPERIMENTAL

Este capítulo detalla el procedimiento realizado durante el estudio. En primer lugar, se describirá el tipo de probeta empleada y sus dimensiones. Se detallarán las condiciones de ensayo tanto del mecanizado como del ensayo de desgaste, así como la maquinaria y el método empleado para la limpieza de las probetas. De esta manera se cumplirá el mínimo requerido para todo informe basado en el desgaste Pin-on-Disk o similar como es el caso, según dicta el artículo G99 de ASTM International: *“As a minimum, the report should specify material type, form, processing treatments, surface finish, and specimen preparation procedures. If appropriate, indentation hardness should be reported.”* [19].

### 3.1 Probetas de ensayo

El material seleccionado para este estudio es el acero de dureza 180-280 HB por la disponibilidad de este en el taller de mecanizado.

La geometría de la probeta no está definida según una norma, sino que está determinada por las dimensiones y colocación en el tribómetro.

La probeta es cilíndrica de diámetro 13 mm y longitud 82 mm, de ella sobresalen dos cilindros (uno a cada lado) de diámetro 9 mm y longitud 11 mm con pequeñas muescas, como se aprecia en la figura 3.1. Estos dos cilindros serán los puntos de sujeción de la probeta al tribómetro y las muescas serán puntos de fijación, así como puntos de referencia a la hora de girar la probeta y realizar las repeticiones. Las dimensiones de la probeta fueron elegidas de tal manera que está no colisionará con la bola del tribómetro antes de ensayar y que la bola pudiese reposar sobre la superficie de la probeta de manera equilibrada. Al igual que el diámetro, la longitud es tal que no sobresalga de la mesa del tribómetro ni dificulte el ensayo.

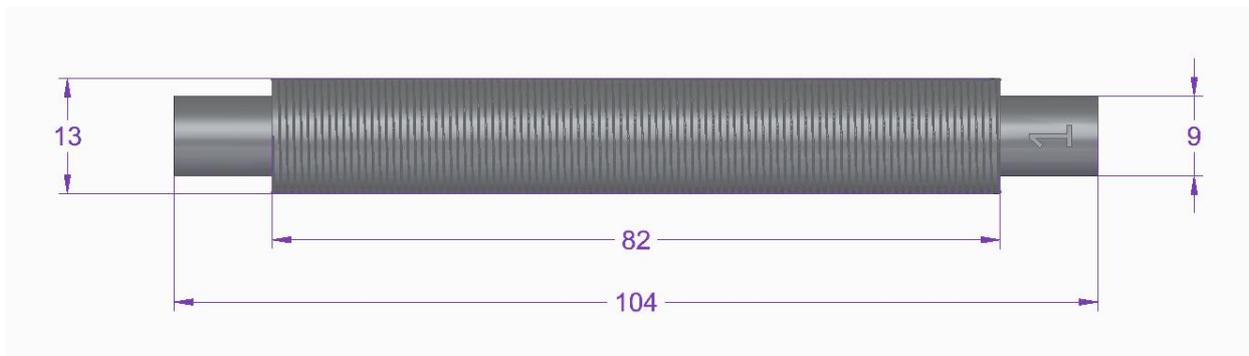


Figura 3.1 Croquis de la probeta. Dimensiones en mm.

Tras el mecanizado de la probeta (como se detallará en el apartado 3.3) se realizó la medición de dureza en un durómetro Rockwell, como se muestra en la Figura 3.2. La dureza se midió en tres puntos obteniéndose los valores de 32, 33 y 33.5. Debido a que en las ecuaciones de desgaste se emplean valores de HB, se realiza la conversión de dureza, cuyos valores son 171, 178 y 181.

Las probetas se fabrican mediante un cilindrado en el torno paralelo disponible en el taller de mecanizado del departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla. En la figura 3.3 se muestra dicho torno y en la tabla 3.1 sus características técnicas.



Figura 3.2 Medición de dureza en la probeta.



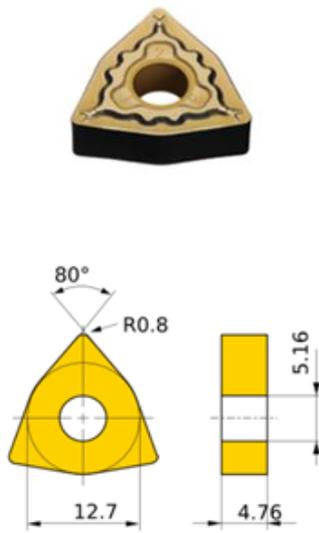
Figura 3.3 Torno PINACHO L-1/165.

Tabla 3.1 Características técnicas del torno empleado.

Fabricante	PINACHO	Potencia nominal		3 CV
Modelo	L-1/165	Distancia máxima entre sujeciones		700 mm
N.º de Serie	21604	Variador continuo de velocidad		NO
Características	Torno paralelo de manipulación manual			
Precisión	Longitud: 0.02 mm		Transversal: 0.02 mm	
Gama de revoluciones nominales (rpm)				
	60	220	860	
	92	360	1400	
	140	530	2000	
Gama de avances proporcionados para cilindrado (mm/rev)				
0.047	0.06	0.07	0.082	0.095
0.105	0.12	0.14	0.165	0.19
0.21	0.24	0.28	0.33	0.38
0.43	0.48	0.56	0.66	0.86

Como herramienta de corte se empleará una plaquita WNMG080408-MD UE-6020, cuyas características se indican en la tabla 3.2. La selección se basó en el material de la pieza y en las especificaciones de los parámetros de corte, que debían ser compatibles con el torno a emplear.

Tabla 3.2 Características técnicas de la herramienta empleada.



Número de artículo	WNMG080408-MP
Detalle	Plaquitas de corte trocoidales
Identificación de empresa	MI-Mitsubishi
Número de norma característica de materia	DIN4000-76
Ángulo de esquina de plaquita de corte	80°
Longitud del filo de corte	8.68 mm
Radio de esquina	0.8 mm
Rompe virutas, nombre del fabricante	MP
Nombre del material de corte del fabricante	UE6020
Recubrimiento/Superficie	TiN-Al2O3
Profundidad de corte	0.3 - 4.0 mm
Velocidad de corte	0.16 – 0.50 mm/rev

### Condiciones de mecanizado

Como se ha especificado antes, la resistencia al desgaste está muy vinculada a la calidad superficial de los elementos en contacto. Por ello, se han seleccionado tres valores de rugosidad media aritmética,  $R_a$ , que definan el acabado de las probetas objeto de estudio, teniendo en cuenta además los parámetros de funcionamiento del torno, específicamente lo referido a las condiciones de avance.

La relación entre acabado superficial, condiciones de corte y herramienta empleada, se pone de manifiesto a través de la ecuación 3.1.

$$Ra = \frac{f^2}{32r} \quad (3.1)$$

Donde  $f$  es el avance en mm/rev y  $r$ , el radio de la punta de la herramienta en mm.

Conociendo que la herramienta tiene un radio de punta de 0.8 mm, los avances recomendados por el fabricante de la plaquita, los avances disponibles en el torno, y el considerar tres valores de  $R_a$  distanciados entre sí, se determina realizar el mecanizado de las probetas en las condiciones planteadas en la tabla 3.3.

Las barras disponibles en el taller tenían un diámetro inicial de 30 mm, teniendo que realizar varias a pasadas de desbaste, y una pasada final de acabado de profundidad 0.5 mm, para conseguir la  $R_a$  requerida.

Tabla 3.3 Listado de avances a emplear y sus respectivas rugosidades teóricas.

N (rpm)	$a_p$ (mm)	Avance (mm/rev)	$R_a$ teórica ( $\mu\text{m}$ )
2 000	0.5	0.19	1.41
		0.24	2.25
		0.33	4.25

La probeta se coloca entre plato y punto según muestra la figura 3.4.



Figura 3.4 Montaje de la pieza en el torno.

Se fabricarán un total de 6 probetas, dos para cada condición de corte especificada, para estudiar el comportamiento de la resistencia al desgaste con y sin el uso de lubricante. Para diferenciarlas se marcarán con un punzón con numeración consecutiva. La designación de las probetas se acuerdo al tipo de ensayo, se muestran en la tabla 3.4, donde el primer número hace referencia al avance con el que se ha mecanizado la probeta, mientras que el segundo, se refiere a la repetición del ensayo.

Tabla 3.4 Número de referencia de las probetas, las condiciones de ensayo y el avance.

Probeta-ensayo	Tipo de ensayo	Avance de mecanizado (mm/rev)
1-1	Seco	0.19
1-2	Seco	0.19
2-1	Lubricado	0.19
2-2	Lubricado	0.19
3-1	Seco	0.24
3-2	Seco	0.24
4-1	Lubricado	0.24
4-2	Lubricado	0.24
5-1	Seco	0.33
5-2	Seco	0.33
6-1	Lubricado	0.33
6-2	Lubricado	0.33

### Medición de rugosidad superficial

La medición de rugosidad superficial es importante como punto de referencia a la hora de comparar los resultados del estudio, así como para ver la correspondencia de la rugosidad teórica con la real.

Para la medición de las rugosidades se empleó un rugosímetro de la marca Mitutoyo del Centro Andaluz de Metrología (figura 3.5), cuyas especificaciones se indican en la tabla 3.5.



Figura 3.5 Rugosímetro Mitutoyo del Centro Andaluz de Metrología.

Tabla 3.5 Características técnicas del rugosímetro empleado.

Fabricante	MITUTOYO		Número de código	178-961D				
Modelo	SURF TEST		Distancia máxima de recorrido	100 mm				
N.º de Serie	160107		Velocidad de medición	0.02-5mm/s				
Características	Rugosímetro de superficies con palpador mecánico							
Precisión de medida	0.75 mN							
Rango de medida ( $\mu\text{m}$ )	8		80		800			
Longitud de cut-off								
$\lambda_c$ (mm)	0.025	0.08	0.25	0.80	2.50	8.00	25.00	80.00
$\lambda_s$ ( $\mu\text{m}$ )	0.25	0.80	2.50	8.00	25.00	80.00	250.00	nona
$\lambda_f$ (mm)	0.08	0.25	0.80	2.50	8.00	25.00	80.00	none

### 3.2 Ensayo de desgaste

El ensayo de desgaste es el estudio principal sobre el que se basa el proyecto. En este apartado se explica detalladamente los equipos empleada, las condiciones a las cuales se debe realizar el ensayo y el procedimiento de ejecución del mismo, incluyendo la limpieza y pesaje de las probetas.

Los ensayos se realizaron a presión atmosférica, a temperatura ambiente, entre 20 °C y 25 °C, y a niveles de humedad entre 40 % y 60 %.

## Tribómetro

Para el ensayo de desgaste se emplea el tribómetro Microtest perteneciente al laboratorio de Ciencia de Materiales y Transportes de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, el cual se aprecia en la figura 3.6 y cuyas características técnicas se indican en la tabla 3.6.

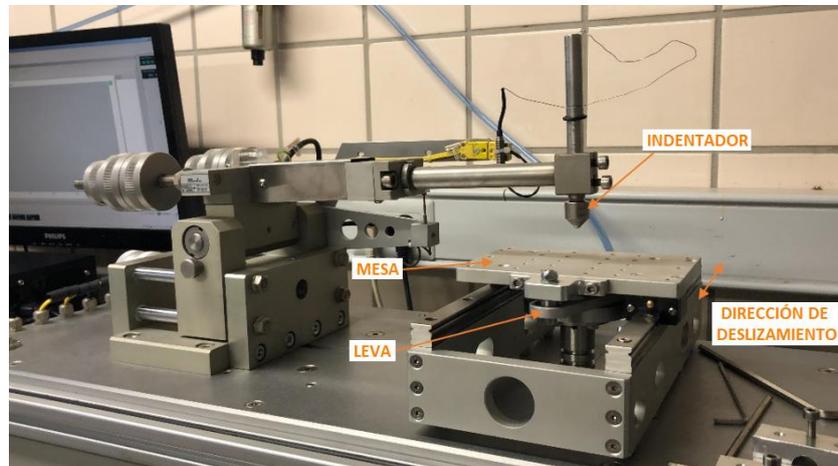


Figura 3.6 Tribómetro.

Tabla 3.6 Características técnicas del tribómetro.

Fabricante	MICROTEST
Modelo	SMT-A/0100
N.º de Serie	B0100-20
Rango de carga vertical	60 N
Cargas verticales	1x1N, 2x2N, 1x5N, 1x10N, 1x20N
Rango de carga horizontal (fricción)	200 N
Resolución de carga horizontal (fricción)	0.010 N
Máxima dimensión de la muestra	Φ 80 mm x 15 mm espesor
Velocidad de rotación	0 a 500
Diámetro bolas de contacto	3 y 6 mm
Velocidad eje Z	50mm/min
Dimensiones generales	800 x 700 x 530 mm
Rango desplazamiento posicionador	50 mm
Software	MT-4002

Se empleará un tribómetro tipo Pin-on-Disk dotado de un disco giratorio donde se colocaría el material bajo ensayo y un elemento tipo punzón con bola. Este mecanismo daría lugar a un movimiento rotatorio. Puesto que se desea un movimiento lineal, se le añadirá mediante el uso de un mecanismo de leva, una placa soporte donde se colocará la probeta a ensayar. De esta manera se obtiene un movimiento lineal a lo largo de la probeta.

El sistema es controlado por ordenador que, empleando el programa del fabricante se pueden registrar varios parámetros como son:

- Fuerza de rozamiento
- Coeficiente de rozamiento
- Desgaste
- Temperatura

Para el montaje de la probeta en la mesa, se diseñaron y fabricaron unos soportes como los mostrados en la figura 3.7. Los mismos permiten la colocación de la probeta garantizando una posición horizontal y sin movimientos durante el ensayo, además de evitar giros debido a los agujeros de fijación que hay en los extremos de las probetas a lo que se hizo referencia en el epígrafe 3.1.



Figura 3.7 Sujeciones.

### Condiciones de ensayo

La condiciones establecidas para la realización del ensayo, se mencionan a continuación:

- El indentador empleado es una bola de carburo de tungsteno (WC) de diámetro igual a 6 mm (figura 3.8).
- La fuerza del indentador (peso) es de 30 N. Se determinó esta fuerza a partir de los cálculos de presiones de contacto para los casos esfera-plano y esfera-esfera de la norma G132-96 [5], puesto que son los casos normalizados de mayor similitud al ensayo bajo estudio. Teniendo en cuenta que la presión recomendada por la norma es hasta 2.5 MPa, y calculando la fuerza, se obtienen valores no aplicables a este ensayo. Por lo que se considerará un valor de presión de 2,3 GPa del que se obtienen fuerzas de valor entre 25 N y 53 N según el modelo. A partir de estos datos, se compararán con las fuerzas disponibles en el tribómetro, que vienen dadas por las pesas con que cuenta el equipo (figura 3.8). En este caso, se llegó a la conclusión que 30 N satisfacía la norma y podía aplicarse en el tribómetro.
- El recorrido del indentador en la probeta se acortó a 40 mm. Inicialmente hubiera sido 50 mm, sin embargo, puesto que la herramienta es cónica, chocaba en los extremos con la sujeción empleada para fijar las probetas. La geometría de la herramienta no se tuvo en cuenta inicialmente, no obstante, el cambio

en la longitud del recorrido no afectará fundamentalmente a los resultados del estudio.

- Según de la norma G132-96 [5], la velocidad de desplazamiento del indentador debe de ser entre 1 y 10 cm/s y la velocidad de rotación debe estar entre 15 y 50 rpm. Como se ha mencionado, el tribómetro tiene una leva que hace recorrer, en una vuelta de disco, una doble carrera de la mesa (ver figura 3.6). Esto quiere decir que avanza 80 mm (la suma de 40mm de una primera pasada más 40 mm del retorno). Por lo tanto, la relación para estimar la velocidad en cm/s, pues es lo recomendado por la norma G132-96 [5], será según la ecuación 3.2.

$$v = D * \frac{rpm}{1000} = \frac{cm}{s} \quad (3.2)$$

En la Tabla 3.7 se muestra la relación y equivalencia de las velocidades con las que se ha trabajado, según las recomendaciones de la norma y las velocidades ajustadas al tribómetro y a su software de análisis.

Tabla 3.7 Velocidades en cm/s y sus conversiones.

Velocidad recomendada por la norma (cm/s)	Velocidad a introducir (m/min)	Velocidad de giro del tribómetro (rpm)
1	0.60	15
2	1.20	30
3	1.80	45
4	2.40	60
5	3.00	75
6	3.60	90
7	4.20	105
8	4.80	120
9	5.40	135
10	6.00	150

Se tomará el valor máximo recomendado, 10 cm/s, equivalente a 150 rpm de la máquina.



Figura 3.8 Indentador y pesas del tribómetro.

- El recorrido total de la herramienta durante el ensayo será de 42 m, por lo que, unido a la velocidad seleccionada, determina un tiempo de ensayo de 7 minutos.

En la tabla 3.8 se muestra un resumen de las condiciones de ensayo.

Tabla 3.8 Condiciones de ensayo de desgaste.

Peso (N)	30
Velocidad de giro (rpm)	75
Longitud de la huella (mm)	40
Material de la bola	WC
Diámetro de la bola (mm)	6
Longitud recorrida total (m)	42
Tiempo de ensayo total (min)	7
Longitud recorrida (m/min)	6

### Limpeza y pesaje de las probetas

La limpieza de las probetas y la bola es importante para eliminar cualquier residuo o componente que pueda alterar los resultados del ensayo. Por ello, antes y después de cada ensayo se realizará una limpieza de la probeta.

Primero, se limpiarán todas las probetas y la bola con alcohol. Luego se meterán en un baño de alcohol con ultrasonido durante cinco minutos. Después, se secarán con aire caliente y se dejarán aclimatar durante veinte minutos. De esta manera, se garantizará la ausencia de cualquier sustancia que pudiese contaminar la probeta y dar valores inciertos al analizar la huella.

Tras la limpieza de las probetas y la bola, se pesarán mediante la báscula mostrada en la figura 3.8 cuya apreciación es de 0.1 g, tal y como establece la norma G99 [19].



Figura 3.9 Pesaje de la probeta.

### Aplicación de lubricante

Al no estar normalizado el ensayo de desgaste de Pin-on-cylinder no hay ningún punto de referencia, por lo que se decidió emplear como lubricante un aceite base mineral sin clorinas. La elección del lubricante se debe a que este no reacciona químicamente con el acero de la probeta, es suficientemente viscoso para no derramarse del punto de contacto probeta-bola y suficientemente fluido para no oponerse al movimiento del tribómetro.

El método que se empleó para colocar el fluido de corte en la probeta fue mediante el uso de papel absorbente humedecido con el aceite. Se aplicó por medio de pequeños toquécitos hasta cubrir la zona del ensayo como se muestra en la Figura 3.9.



Figura 3.10 Probeta lubricada en el tribómetro antes de ensayar.

### Procedimiento

Durante el ensayo de desgaste se realizarán cuatro ensayos, dos en seco y dos con lubricación. Las probetas donde se realizarán los ensayos en seco serán las probetas que se han numerado con los números impares y los ensayos con lubricación serán las probetas pares (tabla 3.4). Para cada probeta se realizará una repetición girando esta probeta 90° con giro antihorario siempre desde el extremo con la numeración. De esta manera no hará falta señalar los ensayos originales de los repetidos.

En primer lugar, se limpiarán las probetas que vayan a ensayarse como se ha detallado en el epígrafe “Limpieza y pesaje de las probetas” y posteriormente se pesarán anotando los pesos tanto de las probetas como de la bola antes del ensayo.

A continuación, se realizará una prueba sin probeta, para garantizar el correcto funcionamiento del tribómetro y asegurar que se detiene una vez ha completado la longitud total a recorrer. El tribómetro debe finalizar el ensayo a los siete minutos, y no debe mostrar ninguna evolución en los datos recogidos por el software.

Seguidamente, se harán los ensayos en seco, con las probetas 1, 3 y 5, en ese orden. Tras finalizar el primer ensayo se volverá a limpiar, secar y pesar la probeta. Como ya se ha mencionado, para cada probeta se realizará una repetición, esto se hará desatornillando uno de los apoyos y aflojando el otro. De esta manera no se perderá tiempo en el montaje y se llegará a los mismos resultados. Luego se girará la probeta en sentido antihorario desde el extremo con el número tras haberla limpiado y pesado.

Por último, se procederá a realizar los ensayos con lubricante en las probetas 2, 4 y 6. Se aplicará el lubricante como dicta el apartado anterior y se repetirá nuevamente el proceso como se indica en el párrafo anterior.

Una vez finalizados los ensayos, se procede al procesamiento de los datos obtenidos para determinar el coeficiente de fricción mediante el empleo del software *Tribotester* de la versión 10.3 asociado al tribómetro. También se miden las rugosidades superficiales en las huellas obtenidas.

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan e interpretan los resultados obtenidos tras los ensayos realizados, tanto los referidos a la magnitud del desgaste como a la variación del peso y el acabado superficial. Para la magnitud del desgaste se presentan los resultados directos como los que han sido posible obtener por extrapolación mediante software.

### 4.1 Variación de peso

El desgaste está íntimamente ligado a la pérdida de volumen de material a partir de la ecuación de Archard (ecuación 4.1) [18]:

$$K = \frac{H \cdot V_s}{F \cdot L_s} \quad (4.1)$$

donde  $K$  es el coeficiente de desgaste,  $H$  es la dureza Brinell de la probeta,  $V_s$  es la pérdida de volumen total,  $F$  es la fuerza nominal y  $L_s$  es la distancia de deslizamiento total. La pérdida de volumen total se puede calcular a partir de la densidad del material de la probeta y la pérdida de masa. Como todos los parámetros a excepción de la pérdida de volumen se mantienen constantes, el desgaste está directamente relacionado a la variación de peso.

Antes y después de cada ensayo de desgaste se realizó la limpieza de las probetas como ya se ha detallado en el apartado 3.2 y posteriormente se registró los pesos de estas, así como los pesos de la bola empleada durante el ensayo.

En primer lugar, se aprecia que el peso de la bola es inalterable en este ensayo. Se puede deber a la dureza y material de la bola en comparación al de la probeta, a que la fuerza de aplicación durante el ensayo no es excesivamente elevada o a que el tiempo de ensayo es muy corto. En cualquier caso, este hecho es favorable para este estudio puesto que aísla las probetas como único foco de estudio (que es lo que se desea).

En segundo lugar, evaluando los pesos de la probeta, se ve una mayor pérdida de peso de las probetas que han sido lubricadas durante el ensayo de desgaste frente a las probetas que no han sido lubricadas. La Figura 4.3 muestra una representación gráfica de la pérdida de peso de las probetas según el avance de mecanizado y el uso de lubricante durante el ensayo.

A primera vista estos resultado pueden sorprender puesto que normalmente una superficie lubricada hace deslizar los sólidos en contacto, reduce el contacto metal-metal, absorbe la energía transferida en forma de calor y, por lo tanto, reduce el desgaste entre superficies. Sin embargo, otros autores en sus estudios han demostrado que este fenómeno es posible [10] [11].

Ian Hutching y Philip Shipway [12] enuncian la posibilidad de fenómenos de raspado con el uso de un lubricante. Este fenómeno puede ser el resultado de altas temperaturas en la superficie de contacto que provoca la ligera disolución del lubricante lo que resulta en la exposición de una fracción crítica de superficie desnuda y desprotegida [11]. En este estudio, esta no es la razón puesto que el tribómetro registró las temperaturas de ensayo que se mantuvieron constantes. Sin embargo, todos los estudios realizados con lubricante emplean un dosificador de lubricante continuo durante el ensayo, el cual no estaba equipado en el

tribómetro empleado en este estudio. En cambio, se empleó el lubricante únicamente al comienzo del ensayo.

Tabla 4.1 Peso antes y después del ensayo de desgaste.

Probeta-ensayo	Tipo de ensayo	Peso de la muestra (g)			Peso de la bola (g)	
		Inicial	Final	Pérdida de peso	Inicial	Final
1-1	Seco	87.3344	87.3338	0.0006	1.6960	1.6960
1-2	Seco	87.3338	87.3331	0.0007	1.6960	1.6960
2-1	Lubricado	88.7490	88.7478	0.0012	1.6960	1.6960
2-2	Lubricado	88.7478	88.7464	0.0014	1.6960	1.6960
3-1	Seco	89.9246	89.9257	0.0009	1.6960	1.6960
3-2	Seco	89.9237	89.9226	0.0011	1.6960	1.6960
4-1	Lubricado	89.0574	89.0558	0.0016	1.6960	1.6960
4-2	Lubricado	89.0558	89.0545	0.0013	1.6960	1.6960
5-1	Seco	89.3294	89.3285	0.0009	1.6960	1.6960
5-2	Seco	89.3285	89.3274	0.0011	1.6960	1.6960
6-1	Lubricado	89.4744	89.4731	0.0013	1.6960	1.6960
6-2	Lubricado	89.4731	89.4719	0.0012	1.6960	1.6960

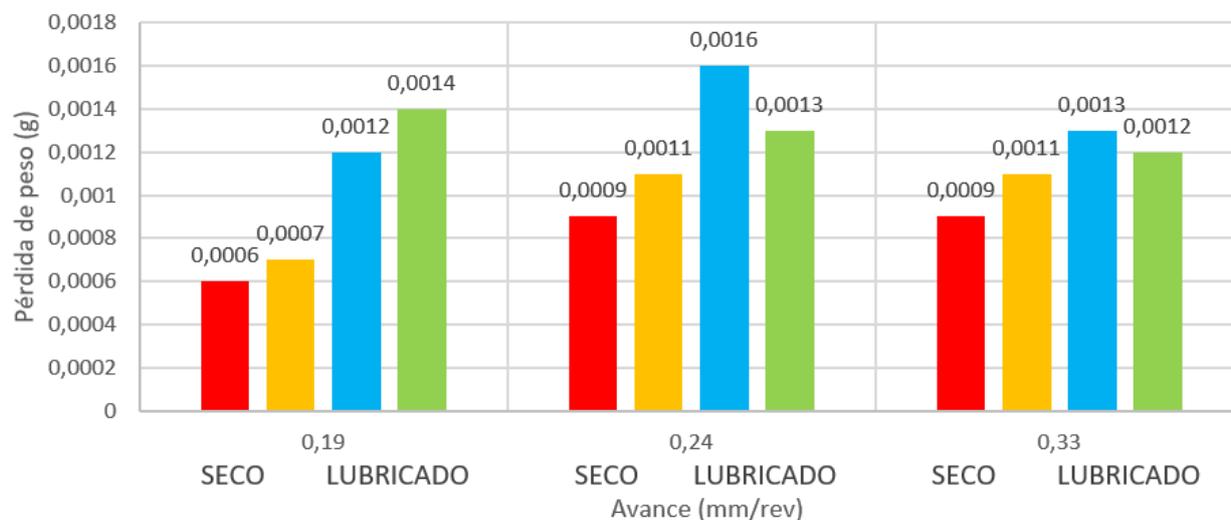


Figura 4.1 Gráfica de pérdida de peso según el avance y uso de lubricante.

Por lo tanto, al tratarse de un lubricante más viscoso, y únicamente aplicado al inicio del ensayo, las virutas desprendidas durante el ensayo quedan atrapadas en suspensión en el fluido de corte. Esta estanqueidad pudo mantener en suspensión todas las virutas de acero que se iban desprendiendo de la probeta al desgastarse, lo que resultó en varias virutas pequeñas que, junto al lubricante y la bola, crearon una lechada abrasiva que rayaba y desgastaba la superficie de la probeta, incluso más que si no hubiese lubricante. Como evidencia de ello está la Figura 4.2 donde se puede comparar la probeta lubricada que muestra una mancha grisácea en el aceite, las virutas formadas tras el ensayo de desgaste, y la probeta tras un ensayo de desgaste en seco, que únicamente se ve la huella formado por el desgaste.



Figura 4.2 Probeta lubricada y probeta seca tras el ensayo de desgaste con tribómetro.

## 4.2 Rugosidad superficial

La rugosidad superficial es la característica principal que se desea estudiar en este trabajo puesto que refleja claramente los distintos avances de mecanizado empleados en las probetas antes del ensayo de desgaste. Luego, una vez ensayadas las probetas, manifiesta las diferencias de ensayar unas superficies sometidas a diferentes avances y la influencia del lubricante.

Primero se estudiará las rugosidades superficiales después del mecanizado y antes del ensayo como se ilustra en la tabla 4.2. El rugosímetro midió los valores de rugosidad media aritmética, Ra. Se realizaron tres medidas de rugosidad en tres zonas diferentes de las probetas para obtener el valor más cercano al real. En la tabla 4.1-1 se muestra únicamente la media de los valores de Ra obtenidos.

Tabla 4.2 Resultados del rugosímetro antes del ensayo de desgaste (Ra).

Probeta	Avance (mm/rev)	Ra teórica ( $\mu\text{m}$ )	Ra medida ( $\mu\text{m}$ )
1	0,19	1,41	3,463
2	0,19	1,41	2,900
3	0,24	2,25	5,007
4	0,24	2,25	5,147
5	0,33	4,25	6,587
6	0,33	4,25	6,517

Como se puede apreciar las rugosidades medidas tras el mecanizado según la velocidad de avance no se corresponden a los valores de la rugosidad superficial teórica. Esto puede deberse a errores de fabricación en las probetas, a un radio de palpador demasiado grueso que no permitía el contacto con toda la superficie de la probeta, o en su defecto, el recorrido del palpador no fue exactamente a lo largo de la generatriz de la probeta. A pesar de diferir los resultados teóricos y reales, estas probetas siguen pudiéndose emplear como objeto de ensayo puesto que se aprecia una diferencia apreciable de rugosidad superficial entre las probetas

de diferentes avances y una similitud entre las mecanizadas al mismo avance.

Tras realizar el ensayo de desgaste se repitió la medición de la rugosidad superficial de cada probeta ensayada, midiendo en dos zonas de la huella. La huella producida por el indentador es muy estrecha por lo que dificulta la correcta medición de la rugosidad, como se puede apreciar en la figura 4.3.

En la Tabla 4.3 se recogen los datos de las rugosidades superficiales medidas en la huella. Como se puede ver se hicieron dos medidas de rugosidad superficial en dos zonas diferentes de la huella para así obtener un valor con mayor proximidad al valor real de la rugosidad superficial.



Figura 4.3 Huella en las probetas tras el ensayo de desgaste.

Tabla 4.3 Ra medida después del ensayo de desgaste.

Probeta-ensayo	Tipo de ensayo	Ra ( $\mu\text{m}$ )		Ra <sub>media</sub> ( $\mu\text{m}$ )
		1ª medida	2ª medida	
1-1	Seco	1,22	1,33	1,275
1-2	Seco	1,23	1,25	1,240
2-1	Lubricado	1,08	1,21	1,145
2-2	Lubricado	1,27	1,16	1,215
3-1	Seco	1,03	1,22	1,125
3-2	Seco	1,02	1,16	1,090
4-1	Lubricado	1,72	1,40	1,560
4-2	Lubricado	1,27	1,68	1,375
5-1	Seco	0,83	0,87	0,850
5-2	Seco	0,65	0,68	0,665
6-1	Lubricado	1,97	1,84	1,905
6-2	Lubricado	2,18	2,25	2,215

En la Figura 4.4, aparecen representados valores de Ra medidos antes y después del ensayo, apreciándose, una gran disminución en los valores de rugosidad superficial de las probetas tras ser ensayadas. Los valores

de rugosidad superficial final de las probetas mecanizadas con avances de 0.19 mm/rev son muy similares, independientemente del uso o no uso de lubricante, por lo que el mecanismo de desgaste no cambia con el lubricante. Para avances superiores como son 0.24 y 0.33 mm/rev existe una diferencia apreciable tras el uso de lubricante durante el ensayo de desgaste. En el subcapítulo anterior se comentó que, al haber lubricante, las virutas quedaban en suspensión dentro de este, produciendo una lechada abrasiva, por lo que el mecanismo de desgaste predominante era abrasivo. El desgaste por tres cuerpos que toma lugar en las probetas lubricadas desgasta, pero no suaviza notablemente la superficie.

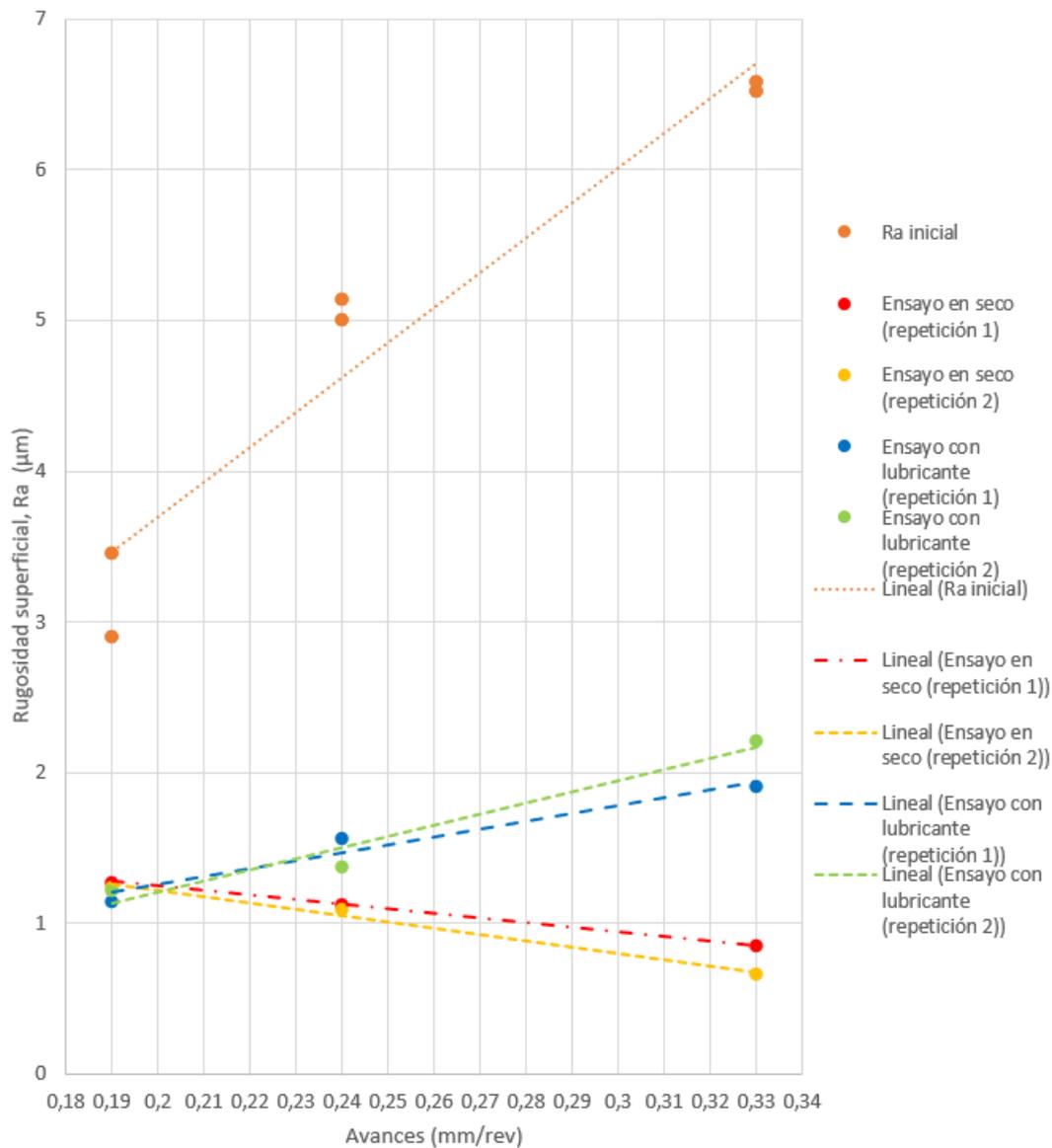


Figura 4.4 Comparación gráfica de la rugosidad superficial inicial y final según el avance de mecanizado y las condiciones de ensayo.

Comparando los resultados de pérdida de masa y rugosidad superficial es extraño ver una pérdida de masa reducida en comparación con el nivel de suavidad de la superficie de los ensayos sin lubricar. Sin embargo, como se ha comentado antes, Ra es la media entre picos y valles por lo que se puede entender que el material desgastado de la superficie de las probetas no ha sido expulsado, sino que se ha deformado plásticamente con el desgaste dando lugar a un mecanismo de adherencia entre las virutas creadas durante el desgaste y la

propia probeta. Con las rugosidades iniciales suponemos que cuanto mayor la velocidad de avance, mayor el valor de rugosidad superficial, por lo que mayor la diferencia de picos y valles. En los ensayos de desgaste en seco, los picos de material que se interponen con la bola se fracturan y dan lugar a las virutas, pero, al no haber lubricante, estas en vez de quedar suspendidas en el líquido se asientan en los valles superficiales de la probeta. A lo largo del ensayo, y con el movimiento cíclico de la bola, las virutas se adhieren al material con ayuda de la energía producida por la fricción de los cuerpos que se transfiere a la probeta y a las virutas. Esto no ocurre en los ensayos lubricados ya que el aceite tiene como función absorber dicha energía.

### 4.3 Coeficiente de fricción

El tribómetro empleado y el software asociado, registra el coeficiente de fricción durante el ensayo, cuyos valores absolutos, tras haber aplicado la función promedio, se muestran en la tabla 4.4, y aparecen representados en la figura 4.5.

Tabla 4.4 Coeficiente de fricción promedio en valor absoluto registrado por el tribómetro.

Probeta-ensayo	Tipo de ensayo	Coeficiente de fricción medio
1-1	Seco	0,06
1-2	Seco	0,06
2-1	Lubricado	0,03
2-2	Lubricado	0,05
3-1	Seco	0,05
3-2	Seco	0,06
4-1	Lubricado	0,04
4-2	Lubricado	0,02
5-1	Seco	0,05
5-2	Seco	0,07
6-1	Lubricado	0,02
6-2	Lubricado	0,02

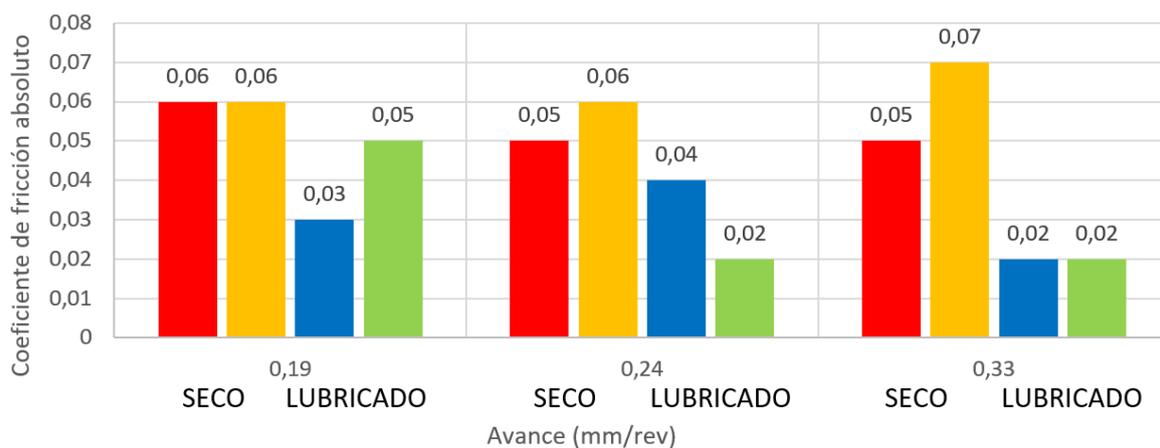


Figura 4.5 Gráfica de barras del coeficiente de fricción en valor absoluto según el avance y el uso de lubricante.

En las Figuras 4.8, 4.9 y 4.10 se representan los valores medidos en las seis probetas a lo largo de la longitud de trabajo, y sus respectivas repeticiones. Aunque la fiabilidad de la recolecta de datos es algo dubitativa por

los saltos de valores entre los mismos ensayos y sus repeticiones (por ejemplo, el salto de valores entre los ensayos 2-1 y 2-2 de la figura 4.6), la tendencia de valores de las gráficas es similares en mayor o menor grado a los mostrados en el capítulo 2 en la Figura 2.18.

Contrastando con los puntos señalados arriba, en todos los ensayos el coeficiente de fricción al comenzar el ensayo comienza siendo bajo y aproximadamente del mismo valor y, a medida que aumenta la distancia recorrida el coeficiente de fricción aumenta cuando se realiza en seco, y se mantiene más o menos constante cuando se emplea lubricación.

Teniendo en cuenta que las tendencias son correctas, se aprecia que para las probetas con avance de mecanizado 0.33 mm/rev, la diferencia de coeficiente de fricción a lo largo del ensayo entre la probeta lubricada y la probeta seca es enorme, al igual que su resultado final de rugosidad superficial, aunque esto no se aprecia igual para los casos de 0.19 mm/rev y 0.24 mm/rev.

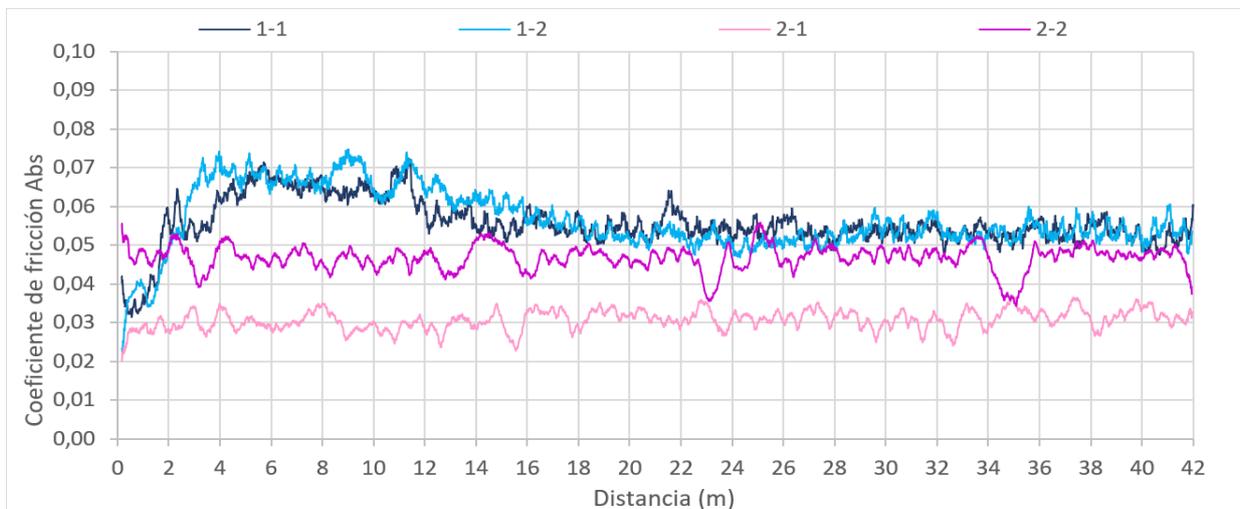


Figura 4.6 Gráfica del coeficiente de fricción absoluto frente a la distancia recorrida durante el ensayo de desgaste en seco y con lubricante de las probetas con avance de mecanizado 0.19 mm/rev.

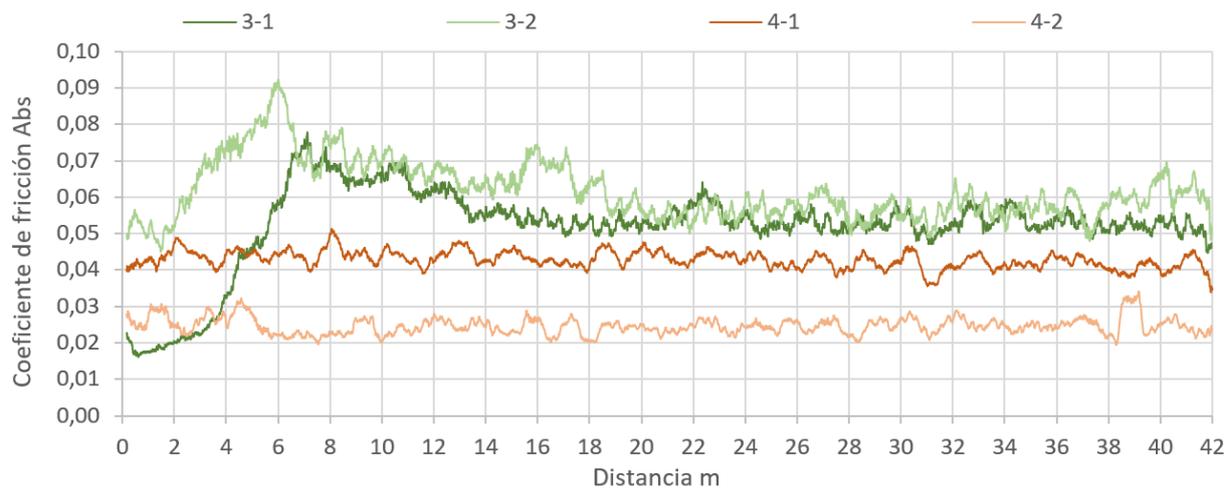


Figura 4.7 Gráfica del coeficiente de fricción absoluto frente a la distancia recorrida durante el ensayo de desgaste en seco y con lubricante de las probetas con avance de mecanizado 0.24 mm/rev.

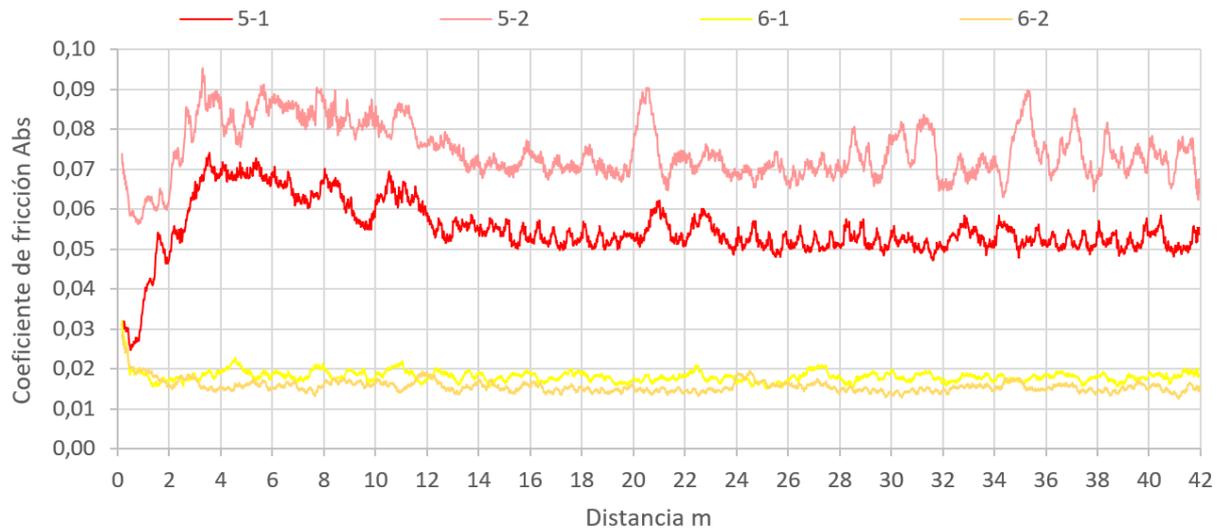


Figura 4.8 Gráfica del coeficiente de fricción absoluto frente a la distancia recorrida durante el ensayo de desgaste en seco y con lubricante de las probetas con avance de mecanizado 0.33 mm/rev.

#### 4.4 Análisis de la superficie ensayada mediante microscopía

Además del procesamiento y análisis del coeficiente de fricción y de las medidas de rugosidad, se analizaron mediante microscopía las huellas resultantes de los ensayos, como se muestra en la figura 4.9.

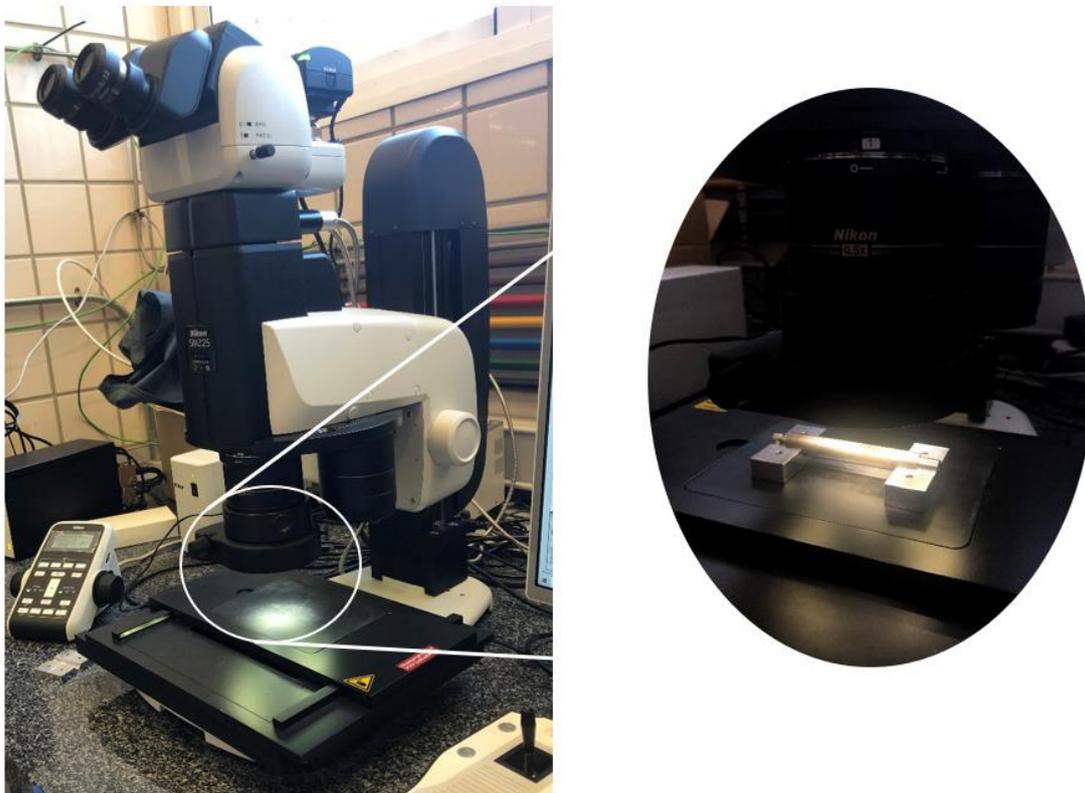


Figura 4.9 Microscopio empleado para sacar las imágenes.

En el Anexo I se muestran las fotografías de las huellas de todas las probetas ensayadas.

Las probetas ensayadas en seco (probetas 1, 3 y 5) muestran una huella larga y continua sin picos de material.

En cambio, las probetas lubricadas durante el ensayo de desgaste (probetas 2, 4 y 6) presentan varios picos de material que a medida que el avance de mecanizado de la probeta aumenta, las distancias horizontales entre los picos de material disminuyen dando lugar a una superficie más rugosa. Las fotografías, por lo tanto, corroboran los resultados obtenidos por el rugosímetro a excepción de las imágenes de las probetas 1, 3 y 5 en las que no se aprecia distinciones en las huellas, pero si se han registrado grandes diferencias de rugosidad superficial.

## 4.5 Análisis estadístico

En este apartado se estudia los resultados de los ensayos de desgaste tras trabajarlos con el programa Minitab, que permite obtener diagramas de Pareto que son muy útiles a la hora de determinar que afecta en mayor magnitud a los resultados del ensayo de desgaste, si el uso de lubricante o el avance de mecanizado. En este caso, el análisis fue similar al estudio de Mukesh [20] pero con otros factores como son la rugosidad y el uso de lubricación.

Con Minitab se obtienen gráficas como la mostrada en la figura 4.10, donde la línea vertical rayada representa el límite cuando los factores se vuelven estadísticamente significativos a un nivel de confianza del 95 % ( $\alpha = 0.05$ ).

Como se ha visto en los resultados planeados en los epígrafes anteriores, la pérdida de masa es lo que mejor ha permitido caracterizar al desgaste en estos ensayos, por lo que se ha realizado el diagrama de Pareto correspondiente (Figura 4.10). En ella existen dos factores, el avance empleado en el mecanizado (A) y el uso o no de lubricante (B). Si una barra supera el valor de la línea vertical roja de valor 2.262, el factor es significativo en la pérdida de masa durante el ensayo. A partir de la gráfica se concluye que el único factor significativo en el desgaste es el uso o no de lubricante y que el avance no es un factor representativo.

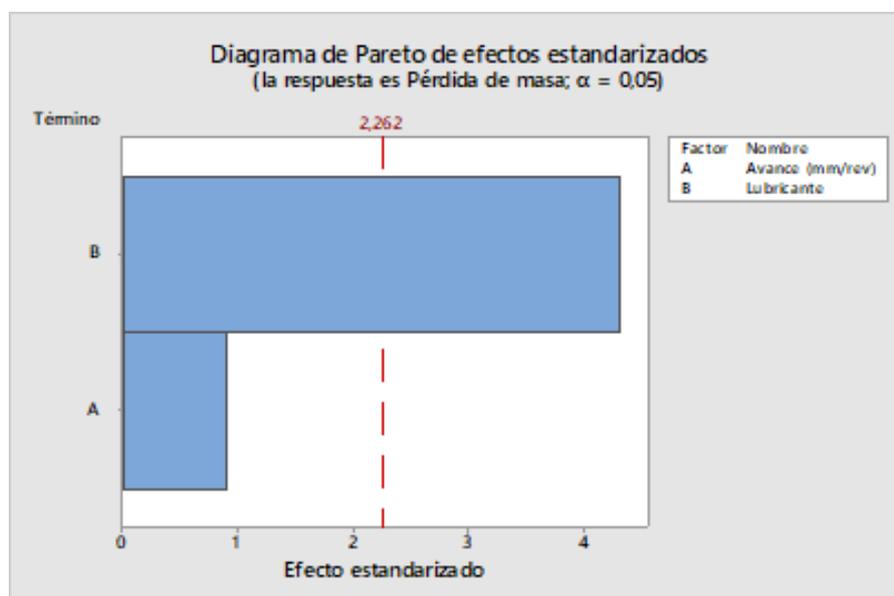


Figura 4.10 Diagrama de Pareto de la pérdida de masa.

A su vez se ha realizado un análisis de varianza (ANOVA) mediante el uso de una gráfica de efectos principales que muestra la interacción entre los factores del ensayo y determina si existe alguna tendencia en los resultados.

La gráfica de efectos principales sobre la pérdida de masa de una probeta bajo un ensayo de desgaste se muestra en la Figura 4.13. En ella se puede ver que el uso de lubricante significa una mayor pérdida de masa, por lo tanto, un mayor desgaste de la probeta. También se percibe que cuanto más pequeño es el valor de avance de mecanizado (0.19 mm/rev) menor la pérdida de peso y que en el avance de 0.24 mm/rev existe un pico máximo en el desgaste, dando a entender que las probetas mecanizadas a 0.24 mm/rev tendrán una vida útil más reducida que las torneadas a 0.33 mm/rev.

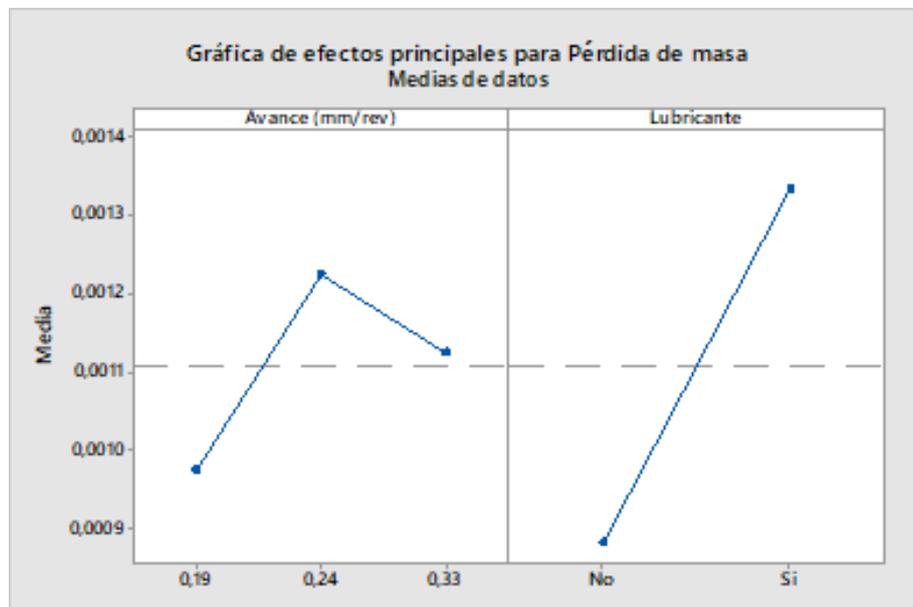


Figura 4.11 Diagrama de efectos principales para la pérdida de masa.

## 5 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

K.C. Ludema define que es posible identificar el tipo de desgaste a partir del comportamiento del sistema en el laboratorio, observando la superficie deslizante en acción, sintiendo la vibración y examinando el lubricante, la superficie desgastada y los restos de desgaste. Durante la realización de los ensayos objeto del presente estudio, pudo apreciarse la presencia constante de una vibración en las seis probetas que, aunque no visible, sí sonora. En las probetas ensayadas en seco se apreciaba un nivel de ruido más elevado en comparación con aquellas con lubricación. Las seis probetas en cada ensayo deslizaban de la misma manera y no se vio ninguna diferencia aparente. Por último, las probetas lubricadas mostraban una gran capa de restos de desgaste, fino y no muy brillante, aun flotando en el lubricante. A simple vista, no había diferencia entre los seis ensayos lubricados.

A partir de la práctica y el análisis de resultados se pueden destacar las siguientes conclusiones para los ensayos de desgaste lineales con bola en probetas de diferentes rugosidades superficiales:

- Se ha mostrado una mayor influencia del uso de lubricante en el desgaste de las probetas independientemente de los parámetros de rugosidad superficial inicial, pero un peor acabado superficial de las mismas.
- Las condiciones de ensayo en seco dan resultados favorables en el desgaste de las probetas cuanto mayor es el avance de mecanizado.
- La adición de lubricante en las probetas durante el ensayo de desgaste reduce los coeficientes de fricción, siendo estos mayores en las probetas con Ra menores.
- Los sonidos de vibración durante el ensayo quedan relacionados con el coeficiente de fricción. Las probetas ensayadas en seco daban mayores coeficiente de fricción durante el ensayo de desgaste y, a su vez producían un mayor ruido por vibración del sistema. Esta energía acumulada por la fricción de los cuerpos daba lugar a sonido y vibración del equipo.
- El desgaste de las probetas quedó reflejado en la pérdida de masa cuyos resultados quedan inalterados por la rugosidad superficial inicial, pero sí afectados por el uso de lubricante dando mayores valores de pérdida de peso, las probetas ensayadas con lubricante.

Debido a los resultados, el procedimiento, la vibración y los restos en el lubricante de viruta eliminada en el ensayo, se puede plantear que todos los ensayos han sido bajo un mecanismo de desgaste abrasivo de tres cuerpos ya que no quedaron restos de material en el indentador; pero, con cierto grado de adhesión entre las virutas y las probeta en los ensayos de desgaste en seco.

Durante la realización de los ensayos se han detectado algunas cuestiones que pueden ser de utilidad en estudios posteriores y que se relacionan a continuación:

- Uso de rugosímetro 3D: debido a la fina huella, el resultado de las rugosidades puede no ser exacto. Al emplear un rugosímetro perfilómetro 3D es posible obtener unos valores de Ra de mayor precisión. También se pueden obtener valores horizontales de la rugosidad que puede ser de interés.
- Se recomienda introducir como variables de ensayo diferentes valores de fuerza nominal y de velocidad de recorrido para comprobar el factor dominante en el desgaste de probetas de diferentes rugosidades superficiales.
- Calibración adecuadamente del programa software del tribómetro antes de cada ensayo. A pesar de tener un equipo que registraba tanto el desgaste, la fuerza tangencial como el coeficiente de fricción algunos de los resultados finales eran incoherentes y por falta de tiempo no pudieron repetirse.

- Realizar ensayos con diferentes lubricantes y con otras formas de aplicación para ver que influencia esto pudiera tener.
- Estudio microscópico de la composición del lubricante tras el ensayo de desgaste para evaluar el tamaño, la forma y la cantidad de virutas en suspensión.
- Estudio de la microestructura y la dureza del material en la superficie de las probetas antes y después de cada ensayo.
- Emplear técnicas de microscopía más avanzadas para evaluar el perfil completo de la huella obtenida tras los ensayos.

## REFERENCIAS

---

- [1] K. C. Ludema, Friction, wear, lubrication: a textebok in tribology, Boca Ratón: Florida CRC Press, 1996.
- [2] A. Hellemans and B. Bunch, The Timetables of Science, Simon & Schuster, 1988.
- [3] Admin, "Overview of Babbitting; Canada Metal North America CMNA," 4 November 2016. [Online]. Available: <https://www.canadametal.com/overview-of-babbitting/>.
- [4] J. F. S. MARÍN and A. T. BETANCUR, "SciELO: Tribología: pasado, presente y futuro," [Online]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-77992015000200001](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992015000200001).
- [5] A. G132-96, "G 132 - 96: Standard Test Method for Pin Abrasion Testing," ASTM International.
- [6] J. L. T. R. and L. A. C. M., "Diseño y Construcción de un Tribometro de Cilindros Cruzados, Bajo Norma Técnica ASTM G83-96," Universidad Tecnologica de Pereira, 2008.
- [7] S. Baez, "Evaluación del desgaste adhesivo de recubrimientos metálicos duros depositados por procesos de soldadura, con un tribometro de cilindros cruzados," III Congreso Internacional de Materiales, 2003.
- [8] J. L. T. R., O. F. H. C. and L. C. F. G., "Evaluación del Desgaste Adhesivo del Acero AINSI-SAE 1020," Scientia e Technia, Universidad Tecnologica de Pereira, 2007.
- [9] U. Nirmal, J. Hashim and S. Lau, "TESTING METHODS IN TRIBOLOGY OF POLYMERIC COMPOSITES," Faculty of Engineering and Technology, Multimedia University, Melaka, 2011.
- [10] R. Zahid, H. H. Masjuki, M. Varman, R. A. Mufti, M. A. Kalam and M. Gulzar, "Effect of Lubricant Formulations on the Tribological Performance of Self-Mated Doped DLC Contacts: a review," Springer Science+Business Media , New York, 2015.
- [11] I. Hutchings, "Tribology," Edward Arnold, 1992.
- [12] I. Hutchings and P. Shipway, Tribology (Second Edition) Friction and Wear of Engineering Materials, Elsevier Ltd., 2017.
- [13] C. Kajdas, S. Harvey and E. Wilusz, Encyclopedia of tribology, the Netherlands: Elsevier Science Publisher B.V., 1990.
- [14] D. D. Kopeliovich, "SubsTech:Mechanisms of wear," [Online]. Available: [https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms\\_of\\_wear](https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=mechanisms_of_wear).
- [15] "G 75 - 07: Standard Test Method for Determination of Slurry Abrasivity (Miller Number) and Slurry Abrasion Response of Materials (SAR Number)," ASTM International, 2008.
- [16] "¿Qué es el desgaste por erosión? Definición," [Online]. Available: <https://material-properties.org/es/que-es-el-desgaste-por-erosion-definicion/>.

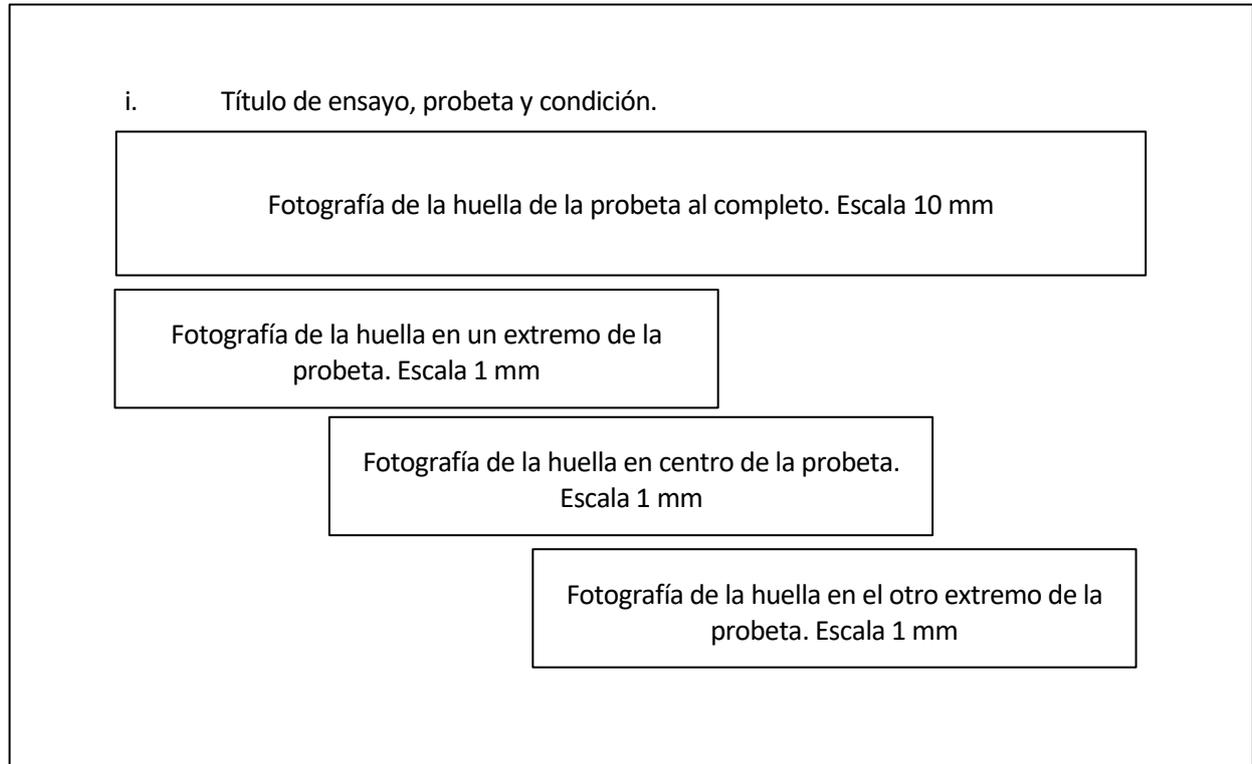
- [17] "G 76 - 07: Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets," ASTM International, 2008.
- [18] I. Hutching and P. Shipway, "Sliding wear," in *Tribology*, Elsevier Ltd., 2017.
- [19] A. G99, "G 99: Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus," ASTM International, 2000.
- [20] M. Kumar and A. Kumar, "Sliding wear performance of graphite reinforced AA6061 alloy composites for rotor drum/disk application," Elsevier Ltd., 2019.
- [21] J. Pulsford, F. Venturi, S. Kamnis and T. Hussain, "Sliding wear behaviour of WC-Co reinforced NiCrFeSiB HVOAF thermal spray coatings against WC-Co and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> counterbodies," Elsevier Ltd., 2020.
- [22] H. Li, M. Ramenazi and Z. W. Chen, "Dry sliding wear performance and behaviour of powder bed fusion processed Ti-6Al-4V alloy," Elsevier B.V., 2019.
- [23] J.-H. Ouyang, S. Sasaki, T. Murakami, Y. Zhou and J. Zhang, "Mechanical and unlubricated tribological properties of titanium-containing diamond-like carbon coatings," Elsevier, 2009.

# ANEXO I

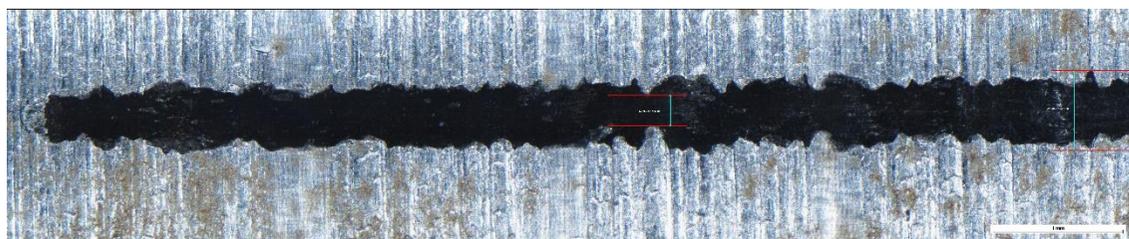
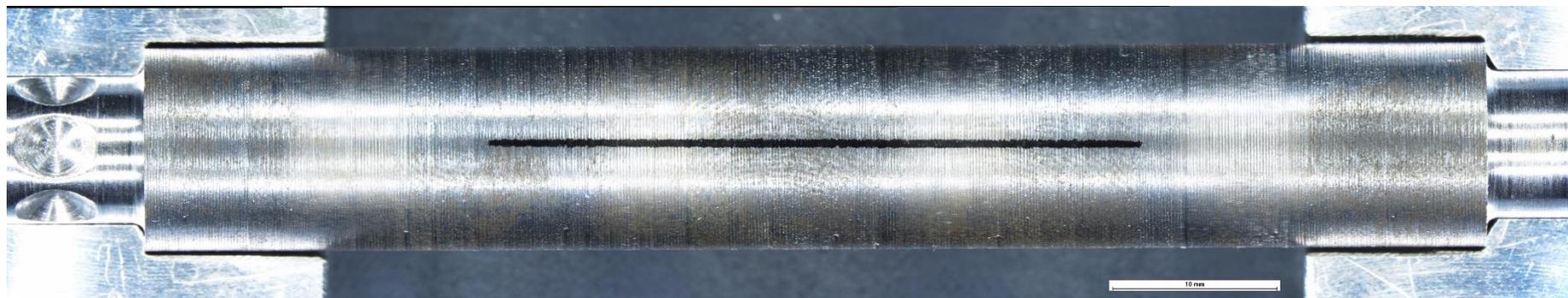
---

El Anexo I contiene todas las fotografías tomadas a las probetas empleando un microscopio. En cada subcapítulo se muestra cuatro imágenes: imagen completa de la probeta y tres imágenes a cada extremo de la huella y en el centro de esta.

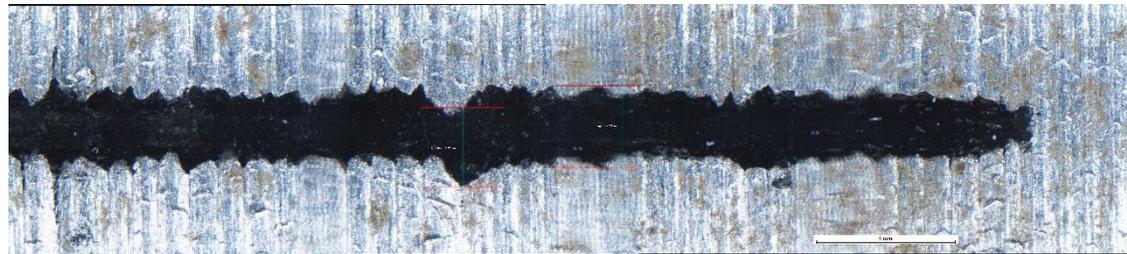
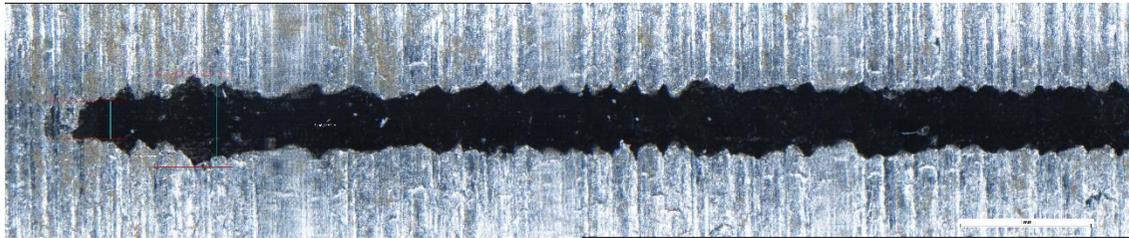
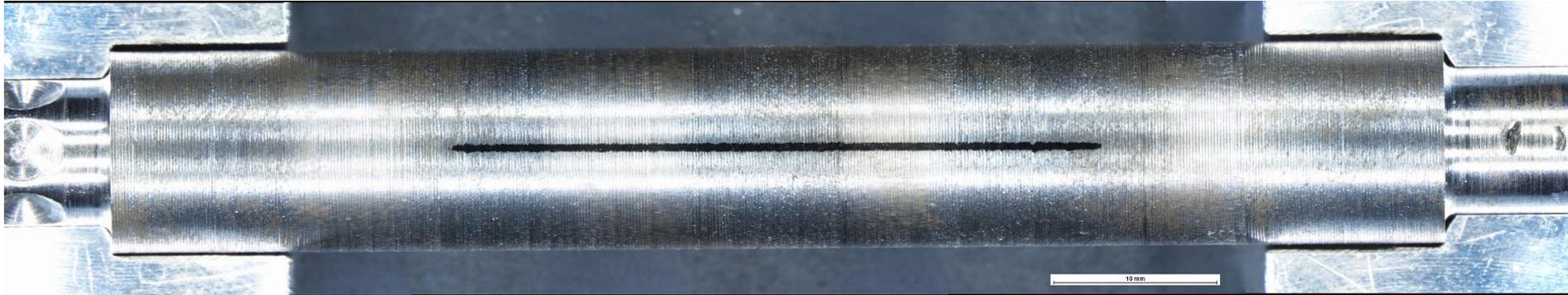
La disposición será la siguiente:



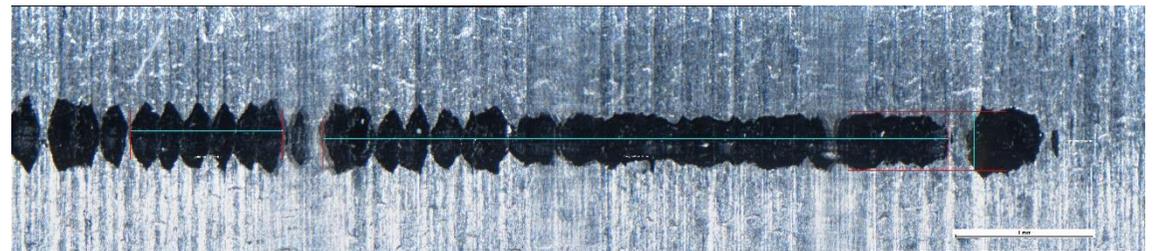
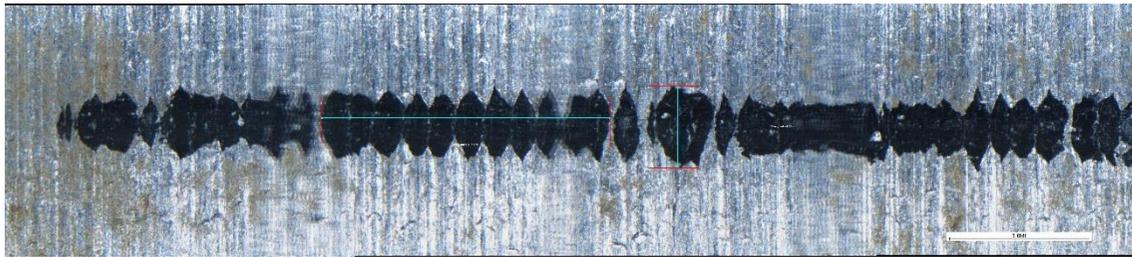
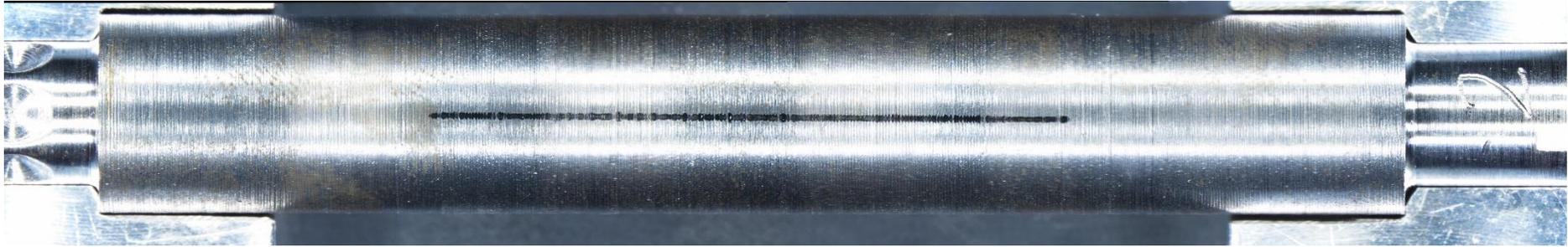
Probeta 1-1.



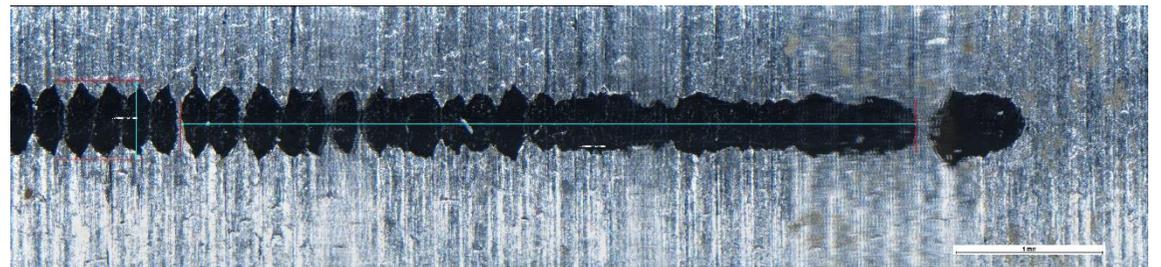
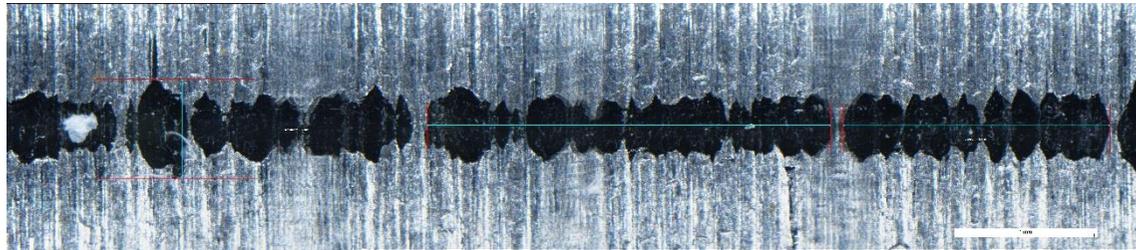
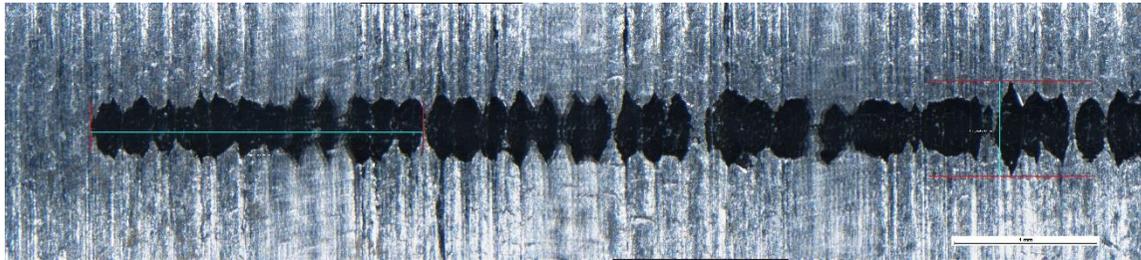
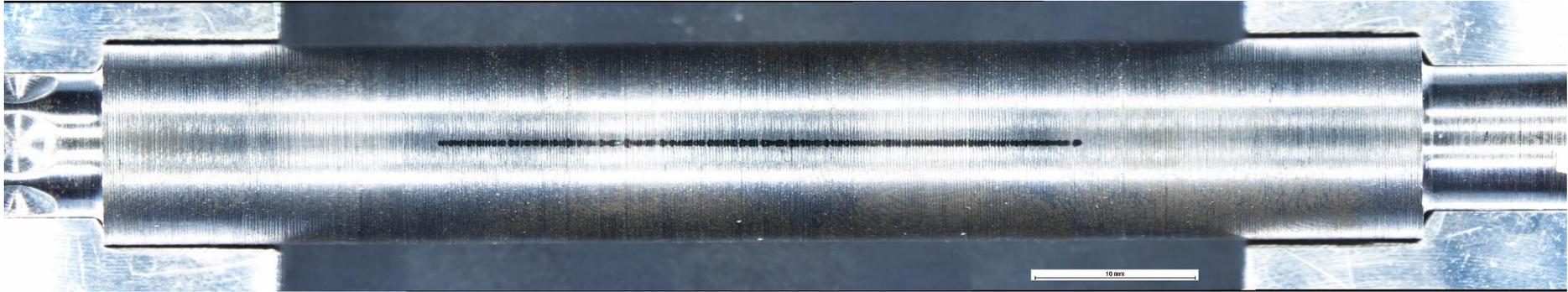
Probeta 1-2.



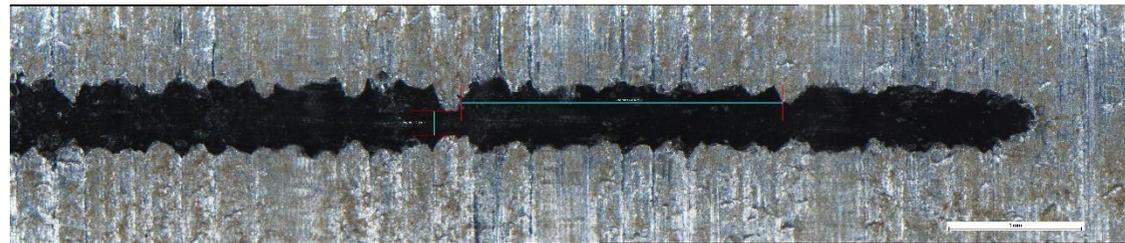
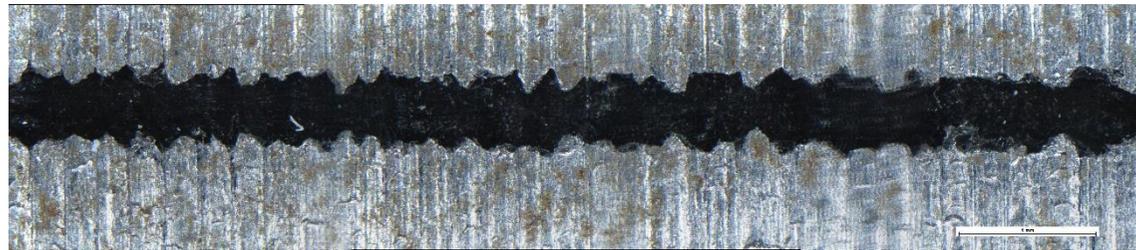
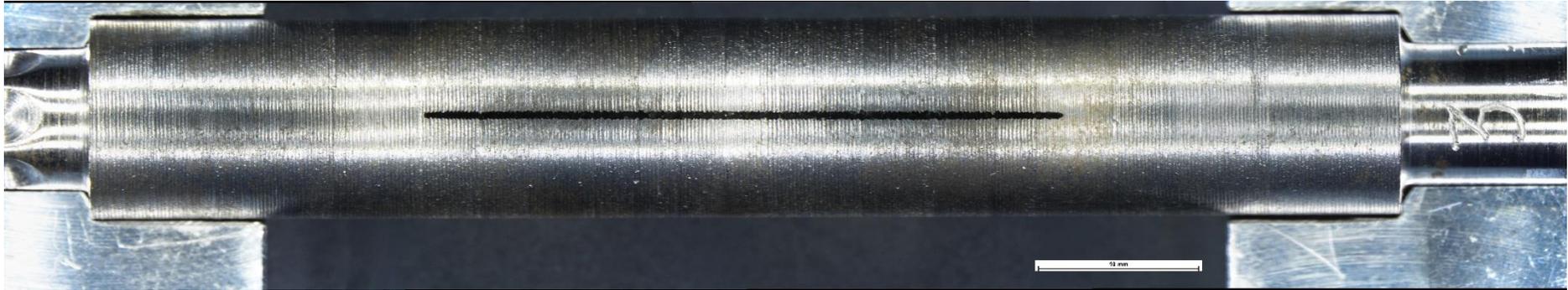
Probeta 2-1.



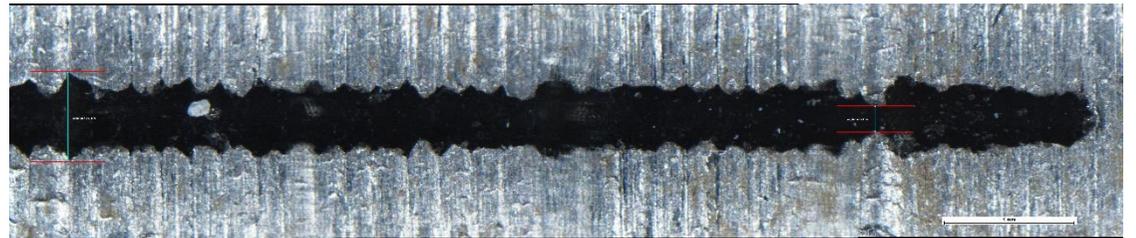
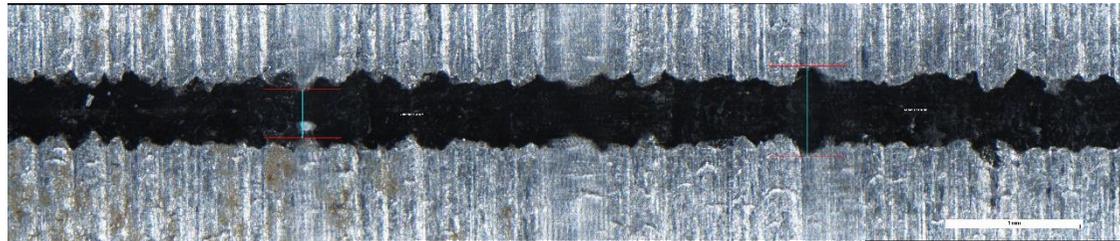
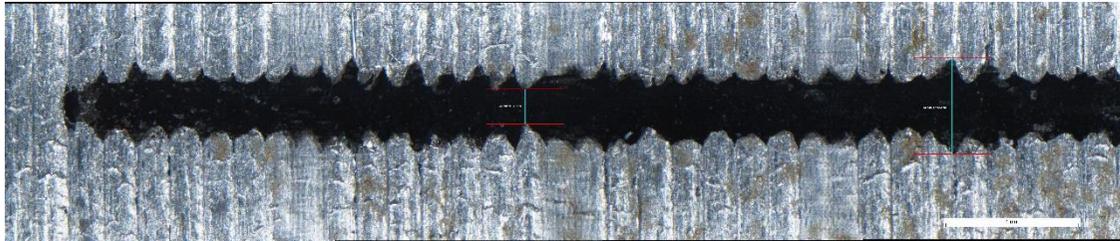
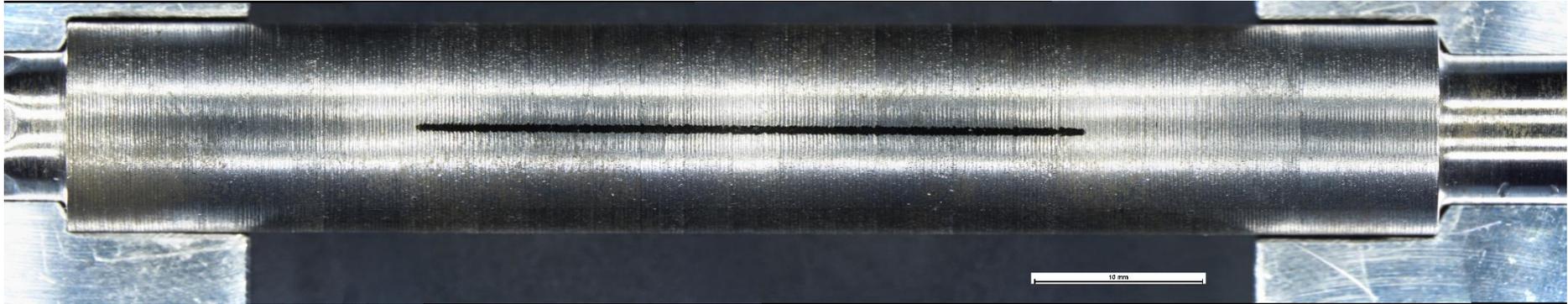
Probeta 2-2.



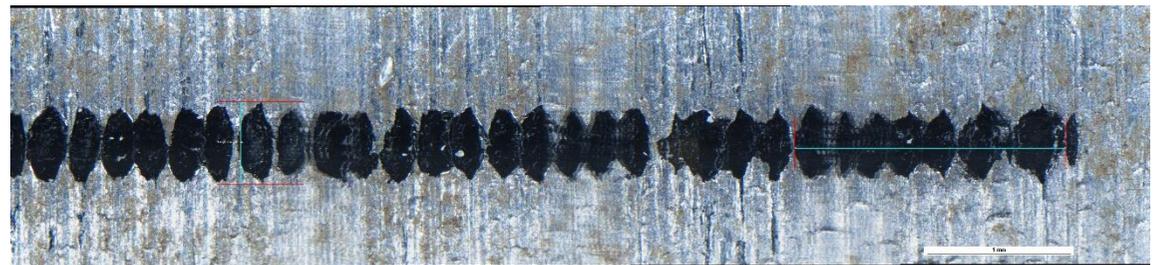
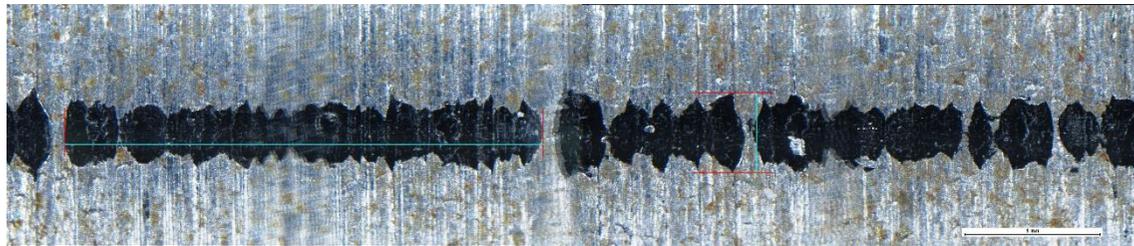
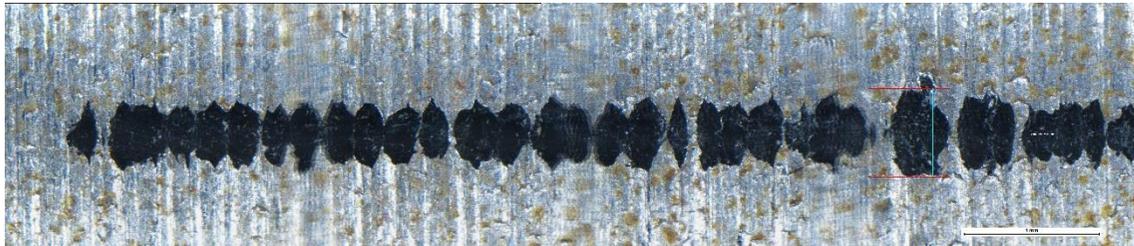
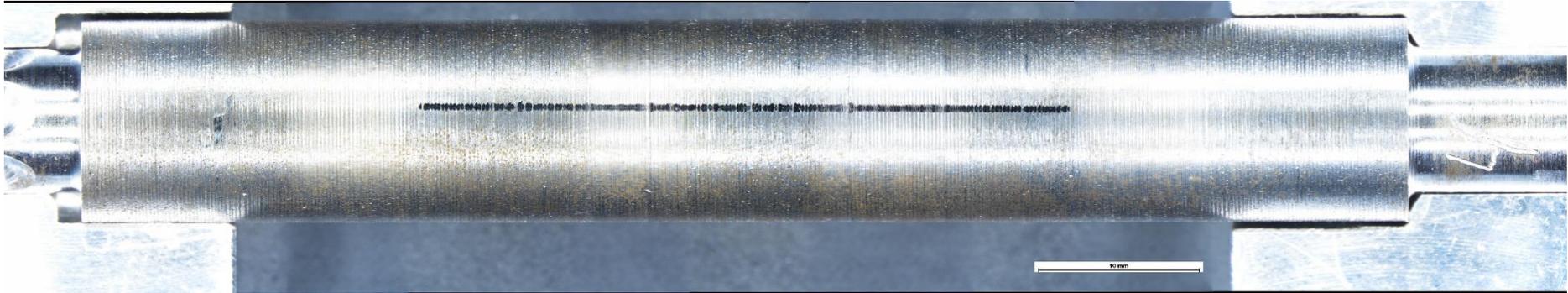
Probeta 3-1.



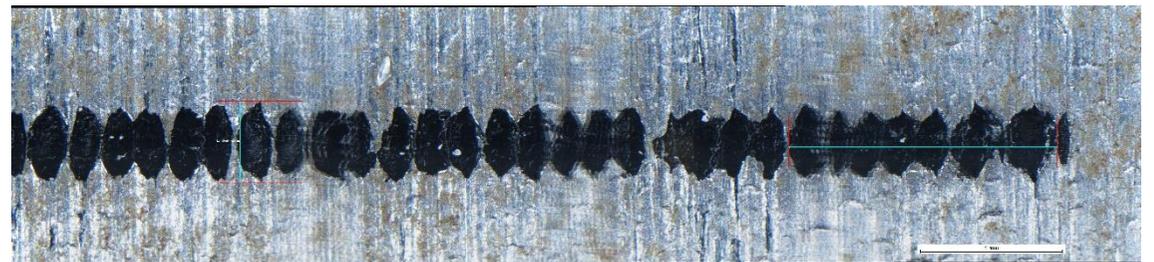
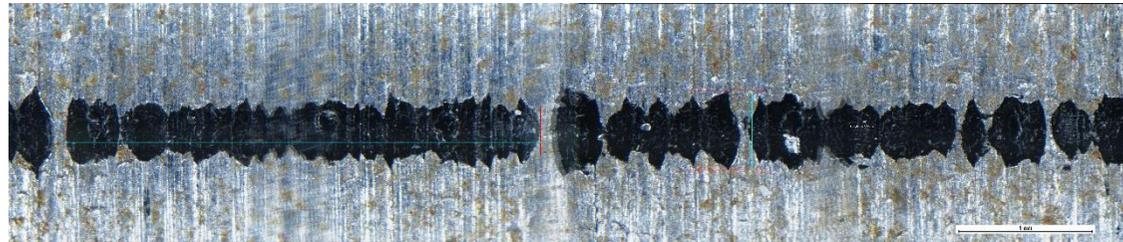
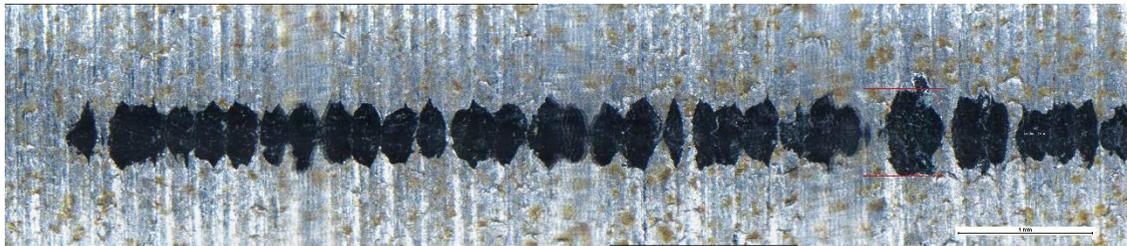
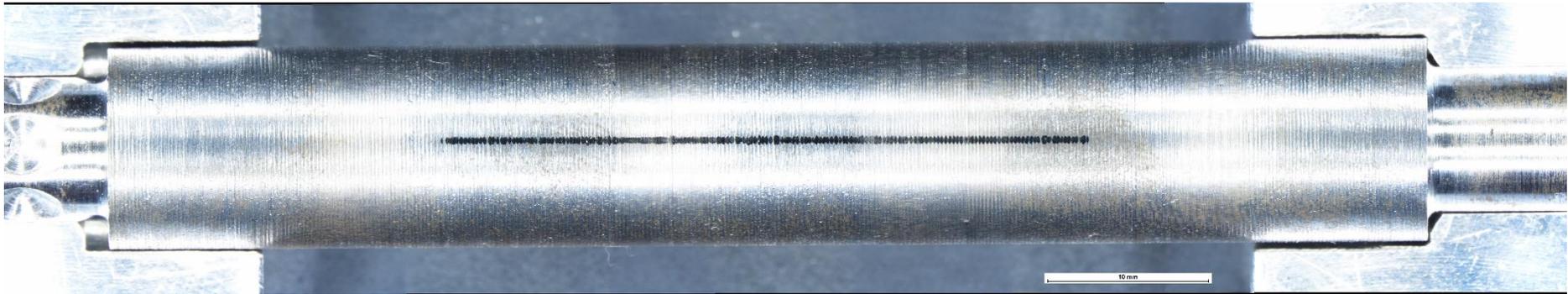
Probeta 3-2.



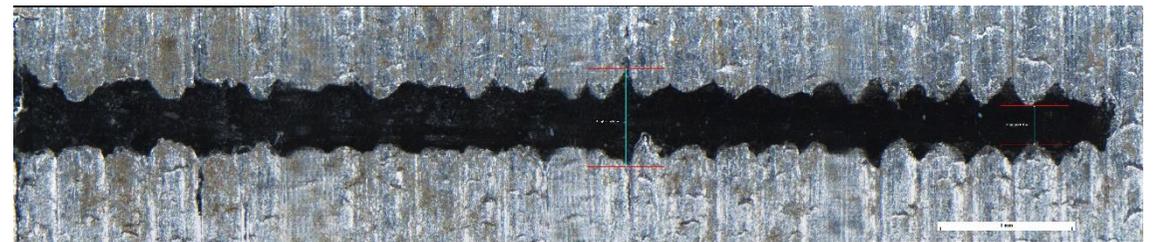
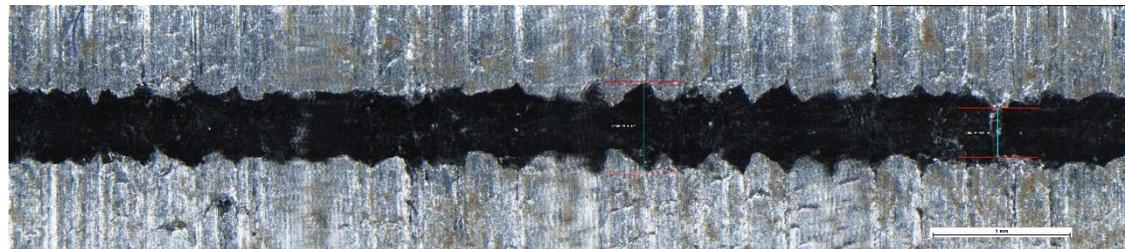
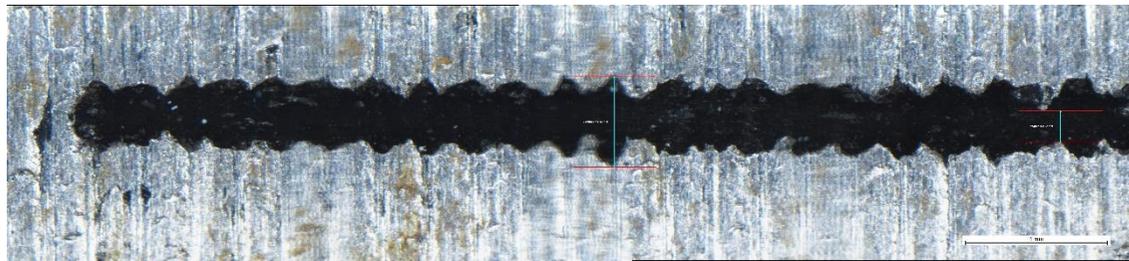
Probeta 4-1.



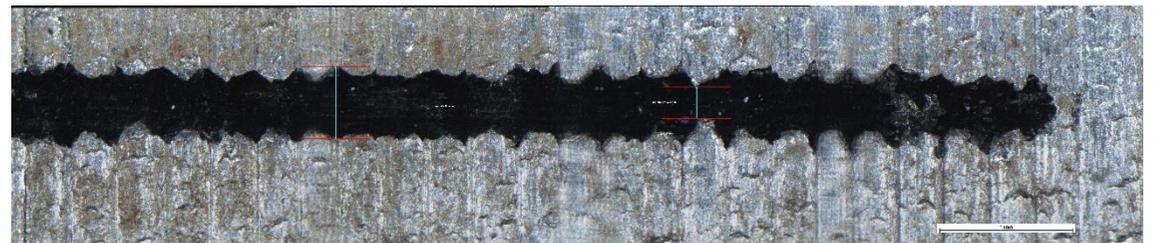
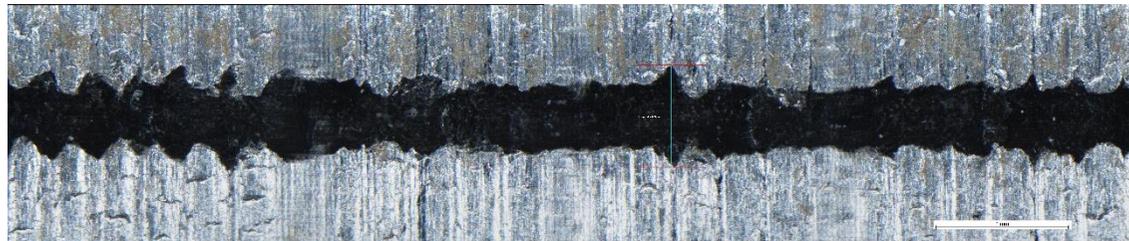
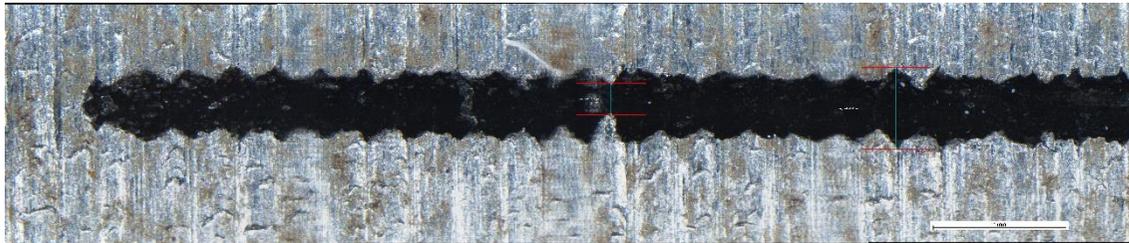
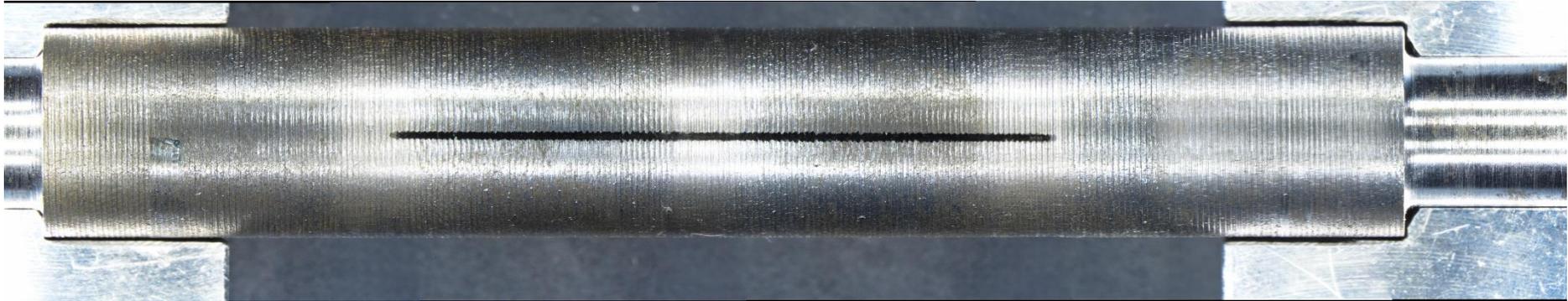
Probeta 4-2.



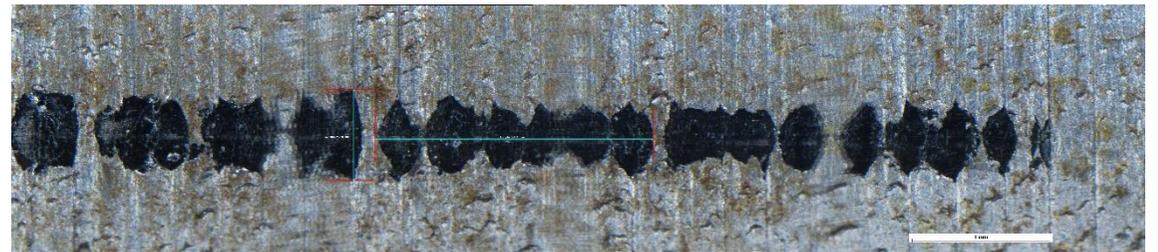
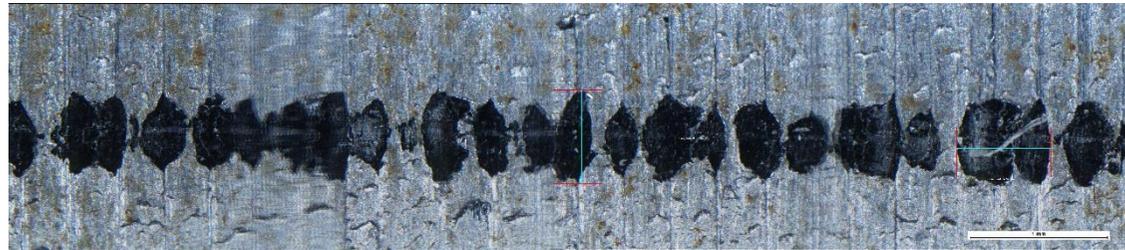
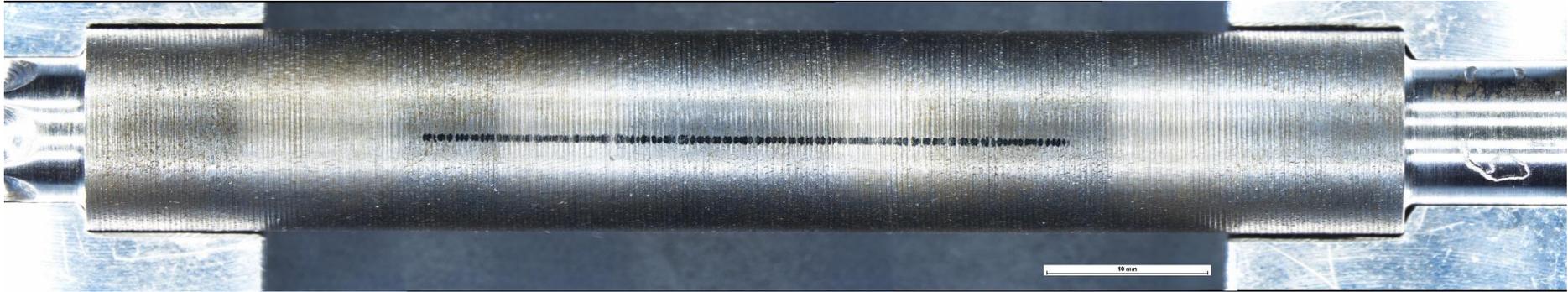
Probeta 5-1.



Probeta 5-2.



Probeta 6-1.



Probeta 6-2.

