



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA


Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Realización de ensayos tribológicos en seco y en húmedo
para estudiar el comportamiento de aleaciones base
cobalto

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Bermúdez Catalán, Ismael

Tutor/a: Rovira Cardete, Andrés

Cotutor/a externo: KLYATSKINA RUSINOVICH, ELIZAVETA

Director/a Experimental: BERMUDEZ CASTAÑEDA, ANGELA

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

RESUMEN

En este trabajo se ha investigado la variación del coeficiente de fricción (COF) en distintas condiciones en el ensayo de materiales metálicos para usos biomédicos. Para ello se ha empleado un tribómetro recíprocante que permite aplicar distintos valores de presión, así como de frecuencia y diferentes condiciones de las superficies.

El COF es un parámetro fundamental para describir el comportamiento tribológico de materiales y su obtención únicamente se puede hacer de forma experimental. Los valores obtenidos resultan de vital importancia en simulaciones numéricas de interés para el diseño de implantes médicos y la selección del metal más apropiado.

El trabajo ha consistido en la programación del tribómetro y realización de los ensayos. Posteriormente se ha realizado el postproceso y discusión de los resultados.

PALABRAS CLAVE: COF; ensayos de materiales; tribología; tribómetro; biomateriales.

RESUM

En aquest treball s'ha investigat la variació del coeficient de fricció (COF) en diferents condicions en l'assaig de materials metàl·lics per a usos biomèdics. Per a això, s'ha utilitzat un tribòmetre recíproc que permet aplicar diferents valors de pressió, així com de freqüència i diferents condicions de les superfícies.

El COF és un paràmetre fonamental per a descriure el comportament tribològic de materials i la seva obtenció únicament es pot fer de manera experimental. Els valors obtinguts resulten de vital importància en simulacions numèriques d'interès per al disseny d'implants mèdics i la selecció del metall més apropiat.

El treball ha consistit en la programació del tribòmetre i realització dels assajos. Posteriorment, s'ha realitzat el post procés i discussió dels resultats.

PARAULES CLAU: COF; assajos de materials; tribologia; tribòmetre; biomaterials.

ABSTRACT

In this work, the variation of the coefficient of friction (COF) under different conditions has been investigated in the testing of metallic materials for biomedical uses. For this purpose, a reciprocating tribometer has been used, which allows the application of different values of pressure, frequency, and surface conditions.

The COF is a fundamental parameter for describing the tribological behaviour of materials and it can only be obtained experimentally. The values obtained are of vital importance in numerical simulations of interest for the design of medical implants and the selection of the most appropriate metal.

The work consisted of programming the tribometer and carrying out the tests. Subsequently, the results were post-processed and discussed.

KEY WORDS: COF; materials testing; tribology; tribometer; biomaterials.

Índice

1. Memoria	5
1.1 Objetivo	5
1.2 Justificación	5
1.2.1 Justificación técnica	5
1.2.2 Justificación académica.....	5
1.3 Contexto.....	5
1.3.1 Superficie y deformaciones	5
1.3.2 Fricción.....	7
1.3.3 Desgaste	8
1.3.4 Muestras de CoCr.....	9
1.4 Descripción del montaje experimental	10
1.5 Resultados y Discusión.....	12
1.5.1 Ensayos en seco.....	12
1.5.2 Ensayos en húmedo.....	14
1.5.3 Discusión.....	15
1.6 Conclusiones	16
1.7 Anexo.....	16
2. Pliego de Condiciones	21
2.1 Materiales.....	21
2.2 Equipos	21
2.2.1 Preparación superficial.....	21
2.2.2 Realización de ensayos	23
2.3 Diseño de experimentos.....	24
2.4 Procedimiento de Ensayo.....	26
2.4.1 Preparación de la muestra	26
2.4.2 Ensayo en tribómetro	32
2.4.3 Postproceso.....	39
3. Presupuesto	40
4. Referencias	42

1. Memoria

1.1 Objetivo

El objetivo de este TFG es evaluar la variación del coeficiente de fricción (COF) en distintas condiciones en el ensayo de materiales metálicos para usos biomédicos. Para ello, se hará uso de un tribómetro reciprocante, en el cual, el material en cuestión será expuesto a diferentes condiciones de ensayo, en los que se variará la carga aplicada, la velocidad y el ambiente.

1.2 Justificación

1.2.1 Justificación técnica

Los biomateriales son diseñados con el fin de interactuar con los sistemas biológicos. Entre estos materiales se encuentran aleaciones metálicas como el CoCr, algunos polímeros como el PVC o el nylon, y cerámicas [1]. La ciencia que los estudia todavía está en desarrollo por lo que los modelos de predicción requieren de ensayos experimentales con los que extraer datos que sean útiles para poder realizar cálculos. Entre los parámetros necesarios se encuentra el coeficiente de fricción.

1.2.2 Justificación académica

Para obtener el título de Graduado en Ingeniería Mecánica, es obligatorio que el alumno presente un TFG, como se explica en la normativa marco TFG-TFM de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV).

1.3 Contexto

La tribología es la ciencia que se encarga del estudio de las situaciones en las que dos cuerpos que se encuentran en contacto interactúan entre sí, cuyo movimiento relativo provoca fricción y desgaste. Los ensayos tribológicos son el medio mediante el que se puede obtener información sobre esta interacción.

1.3.1 Superficie y deformaciones

Cuando las dos superficies están en contacto, dependiendo de la carga que se aplique y del movimiento realizado, se puede provocar dos tipos de deformaciones, elásticas y plásticas.

1.3.1.1 Deformación elástica

Según la teoría de Hertz, sobre la que se ha basado el Diseño de experimentos, se asume un contacto sin fricción ante superficies lisas con deformaciones pequeñas y elásticas [2,3]. Las ecuaciones de Hertz que sirven para calcular tanto el área real de contacto, como las presiones creadas en un sistema *ball-on-flat* (Figura 1), son las siguientes:

$$a = \left(\frac{1.5 R' F_n}{E'} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$P_{MAX} = \frac{3 F_n}{2 \pi a} \quad (2)$$

$$P_{AVERAGE} = \frac{F_n}{a * \pi} \quad (3)$$

a hace referencia al radio de la circunferencia de contacto; F_n es la F_{axial} de la Figura 1, siendo la fuerza normal; R' es el radio de curvatura reducido; P_{MAX} y $P_{AVERAGE}$ son las presiones de contacto creadas; E_i y ν_i son el módulo elástico y el coeficiente de Poisson respectivamente, propiedades mecánicas de los materiales; E' es el módulo elástico reducido.

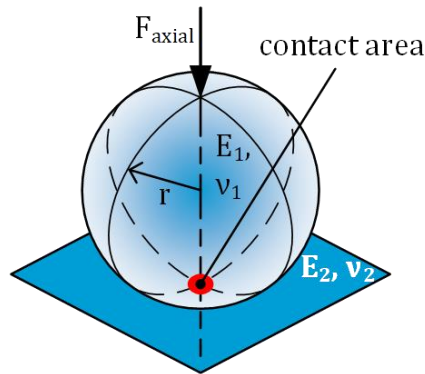


Figura 1 Deformación elástica de un sistema ball-on-flat [4].

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_X} + \frac{1}{R_Y} = \frac{1}{R_{AX}} + \frac{1}{R_{AY}} + \frac{1}{R_{BX}} + \frac{1}{R_{BY}} = \frac{1}{R_{AX}} + \frac{1}{R_{AY}} = \frac{2}{R_A} \quad (4)$$

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - \nu_A}{E_A} + \frac{1 - \nu_B}{E_B} \right) \rightarrow E' = 269,14 \text{ GPa} \quad (5)$$

1.3.1.2 Deformación plástica

Las superficies reales no son completamente lisas, sino que presentan rugosidades (Figura 2), por lo que no toda la superficie está en contacto, sino que solo lo están las asperezas. A causa de las altas presiones de contactos entre ellas, las mismas entrarán en deformación plástica.

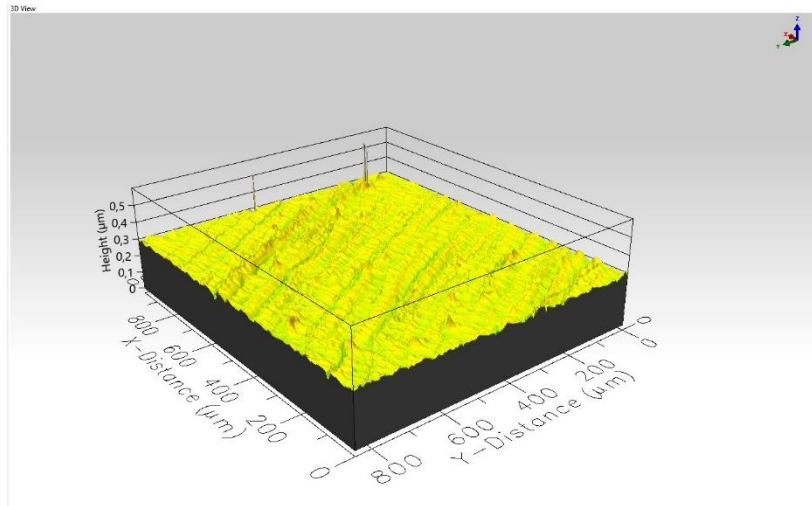


Figura 2 Perfilometría de la superficie de una de las muestras.

La dureza de la superficie de los materiales juega un papel importante en la tribología, ya que con ella se puede calcular el área real de contacto. En el presente trabajo, se ha escogido la alúmina para desgastar la muestra de CoCr, ya que es más dura que el metal. De esta forma se asegura que es la muestra el elemento desgastado y no la bola. Además, la alúmina es una cerámica inerte químicamente, esto es, ante su exposición en un medio ácido sus propiedades no se ven modificadas.

1.3.2 Fricción

Para comprender que se estudia se debe definir que es la fricción, también conocida como fuerza de rozamiento. Ésta es la fuerza opuesta al deslizamiento que aparece cuando hay un movimiento relativo entre dos cuerpos que se encuentran en contacto. Ésta es generada por las imperfecciones que presentan las dos superficies.

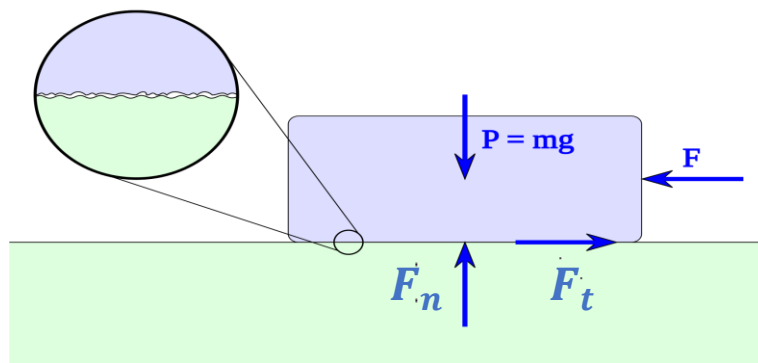


Figura 3 Sistema de dos cuerpos en contacto [5].

En [6] se explica el sistema tribológico descrito por el investigador Czicho, compuesto por cuatro elementos: los dos cuerpos en contacto, el ambiente y el lubricante. Además, la fricción depende de las fuerzas de contacto, así como del tipo de movimiento relativo y su velocidad.

La misma fuente confirma que en otras investigaciones respecto a este campo realizadas por Leonardo Da Vinci, Amonton y Coulomb concluyeron en tres reglas

generales de la fricción. Se trata de reglas y no leyes, ya que se dedujeron de observaciones realizadas a sistemas deslizantes compuestos por metales y cerámicas, no pudiendo ser aplicadas a ciertos polímeros. Las reglas son las siguientes [6]:

1. El coeficiente de rozamiento (COF), μ , es directamente proporcional a la carga aplicada.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (6)$$

2. Es independiente al área aparente de contacto.
3. Es prácticamente independiente a la velocidad de deslizamiento.

Se pueden diferenciar dos tipos de COF, estático (μ_s) y dinámico (μ_d). El primero hace referencia a la fuerza que se debe superar para que uno de los cuerpos se mueva, mientras que el segundo aparece cuando el cuerpo ya se encuentra en movimiento.

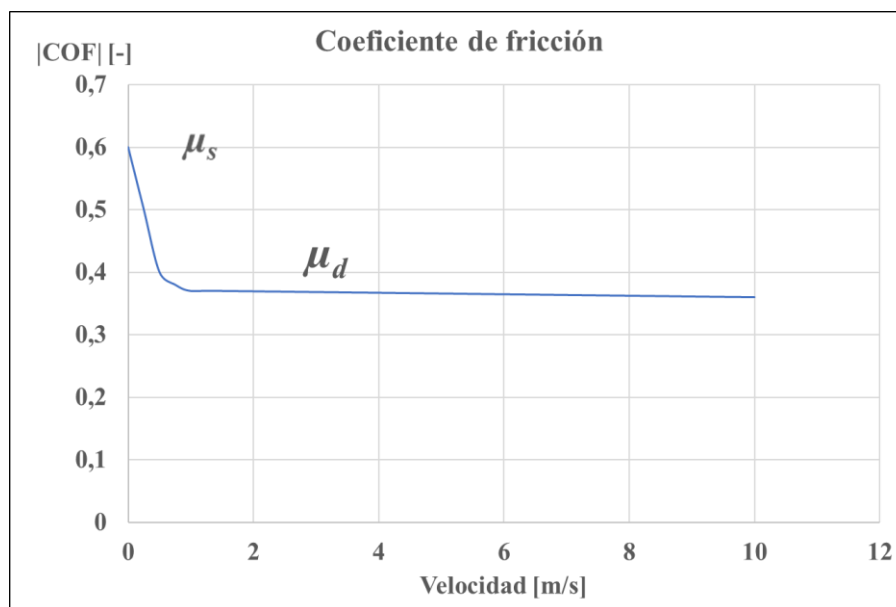


Figura 4 Gráfica del COF en un cuerpo que empieza en reposo.

Para superar la barrera creada por el rozamiento, es decir, para que el cuerpo empiece a desplazarse hay que aplicar una fuerza mayor a la que hay que aplicar cuando este ya está moviéndose. Esto se puede ver en la Figura 4, cuando el cuerpo se encuentra en reposo el valor del COF es mayor, se trata del μ_s , cuando el movimiento empieza, el COF tiende a un valor menor que el anterior, se trata del μ_d .

1.3.3 Desgaste

El desgaste se define como la pérdida progresiva de masa de la superficie de un material generada como resultado del movimiento relativo entre dos materiales en contacto [7]. Esto es, la eliminación de material de una superficie sólida a causa de una acción mecánica. La resistencia al desgaste no es una propiedad intrínseca de los materiales, sino que depende de cada sistema tribológico, de la dureza y de la tenacidad de los materiales.

Entre los diversos tipos de desgaste se encuentra el *ploughing*. Éste es provocado cuando entre las asperezas que se están deslizando, el desprendimiento del material no

es provocado por la deformación plástica. El pin (Figura 8) empuja el material de la zona de contacto, por lo que la deformación se acumula con el número de veces que el pin pasa por la zona, hasta que finalmente, la deformación acumulada localmente supera el umbral que el material puede soportar. En consecuencia, el material se desgasta [6].

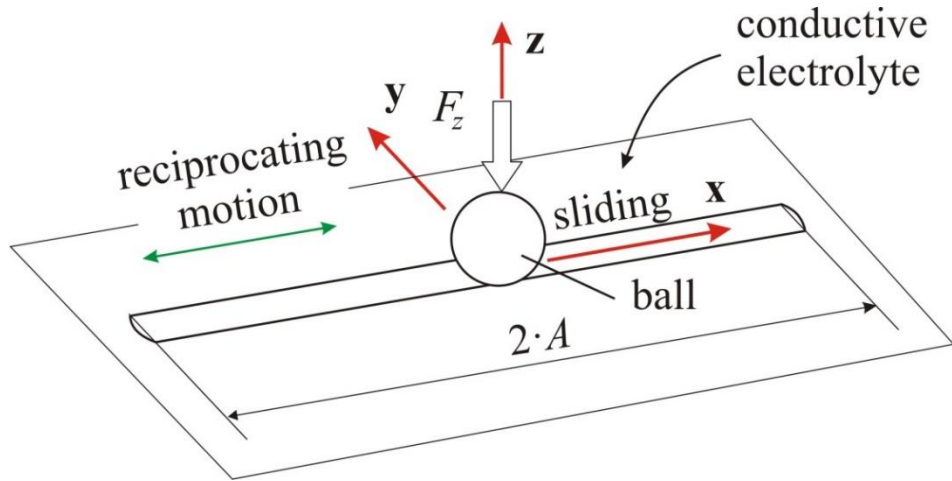


Figura 5 Esquema del movimiento realizado por el pin [8].

La cuantificación del desgaste se consigue mediante la tasa de desgaste, que puede ser definida de diversas formas:

$$v_{wear} = \frac{Volumen_{Total}}{L} \left[\frac{mm^3}{m} \right] \quad (7)$$

$$v_{wear} = \frac{Volumen_{Total}}{Longitud F_n} \left[\frac{mm^3}{m N} \right] \quad (8)$$

$$v_{wear} = \frac{Volumen_{Total} H}{Longitud} [-] \quad (9)$$

Siendo H la dureza, en MPa, de la superficie más blanda, en este caso la muestra de CoCr.

1.3.4 Muestras de CoCr

Se trata de una aleación metálica compuesta por cobalto y cromo. Durante el siglo XX se estudiaron las diversas aplicaciones que podía tener, y se comprobó su utilidad en el sector médico, en especial en las prótesis e implantes dentales [9, 10]. Esto se debe a su alta resistencia al desgaste provocada por su resistencia a altas temperaturas, su alto punto de fusión y a su biocompatibilidad, reaccionando con los tejidos corporales para formar fuertes uniones. Entre otras de sus propiedades, se encuentra que esta aleación tiene una gran resistencia a la corrosión, debido a la creación de una capa protectora pasiva formada en gran parte por Cr_2O_3 .

A esta aleación se le puede añadir molibdeno, níquel o titanio, entre otros para modificar sus propiedades mecánicas. Aunque para el desarrollo de esta investigación se han escogido muestras de 70% cobalto y 30% cromo (Figura 22).

1.4 Descripción del montaje experimental

En este apartado se va a explicar el montaje o preparación del tribómetro para la fase experimental, en Procedimiento de Ensayo se explica el proceso a seguir para la realización de los ensayos.

Para iniciar con la preparación se deposita la muestra en el centro de la célula de carga y se pone encima la pieza de sujeción de esta, asegurando la fijación con tornillos.



Figura 6 Sujeción de la muestra.

El siguiente paso consiste en colocar al eje del tribómetro el pin junto con la bola de alúmina con la que se realizará el experimento. También, en este momento se añade la carga.

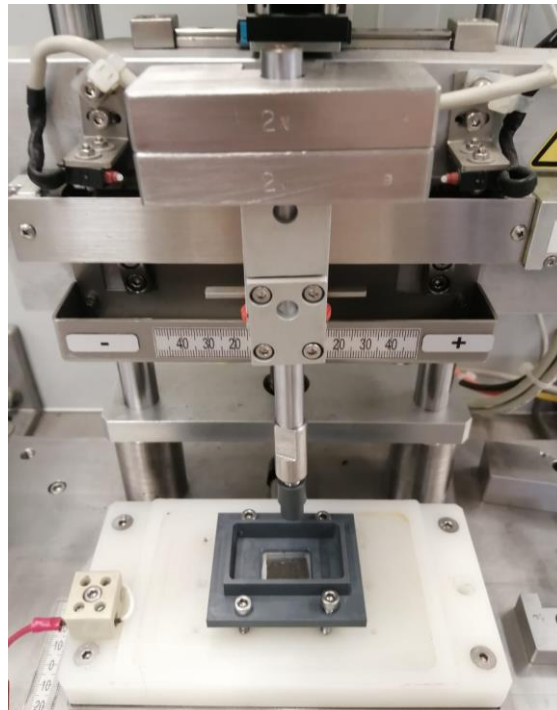


Figura 7 Sujeción de la muestra, y colocación de la carga y el pin con la bola.

Tras ello se pone en contacto la bola con la muestra cómo se observa en la siguiente figura.

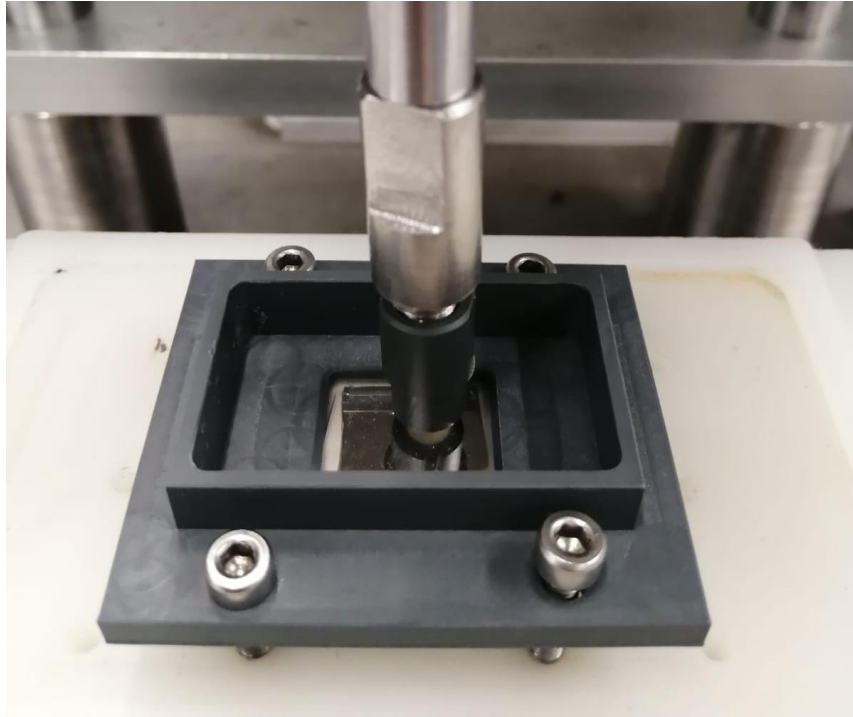


Figura 8 Contacto entre pin y muestra.

Tras estos pasos, se puede iniciar los ensayos en seco. El eje, encargado de realizar el movimiento, describe un desplazamiento recíprocante como el descrito en la Figura 5.

El montaje para los ensayos en ambiente húmedo se inicia de la misma forma que para los ensayos en seco, tan solo se han de añadir dos electrodos, el de trabajo y el de referencia como aparece en la Figura 9.

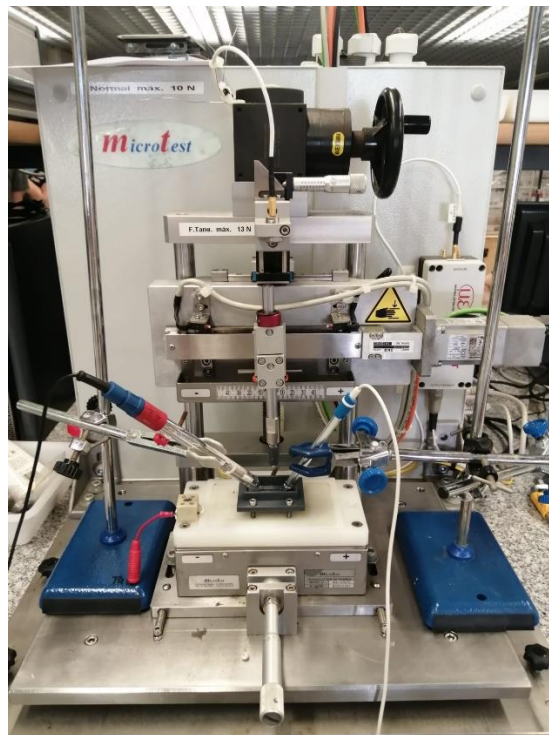


Figura 9 Montaje del tribómetro para los ensayos en húmedo.

1.5 Resultados y Discusión

1.5.1 Ensayos en seco

Como se explica en Diseño de experimentos se realizan tres ensayos con las mismas condiciones para estudiar la repetibilidad de estos y tener un mayor número de datos para poder efectuar un mejor análisis.

COF ensayos en seco			
Fn (N)	Frecuencia (Hz)		
	0,5	1	2
3,56	DRY1	DRY4	DRY7
5,56	DRY2	DRY5	DRY8
7,56	DRY3	DRY6	DRY9

Figura 10 Organización de los ensayos en seco.

En la Figura 10 se muestran las diferentes condiciones aplicadas a los ensayos y el respectivo nombre que cada uno de ellos recibe, puesto con el fin de diferenciarlos y hacer referencia a ellos de una forma sencilla.

Los resultados de este tipo de ensayos se han representado gráficas en las que se traza el coeficiente de fricción obtenido en cada uno de los tres experimentos de cada serie, en el eje de ordenadas o eje Y, respecto al tiempo, en el eje de abscisas o eje X.

En el ensayo se aplica una fuerza normal F_n mediante una carga constante. Se mide de forma continua la fuerza tangencial F_t que aparece en el contacto con una célula de carga. El valor del coeficiente de rozamiento se calcula según la ecuación (6).

En las distintas gráficas que se han obtenido experimentalmente aparece un desfase entre las distintas curvas medidas experimentalmente debido al registro de datos del sistema del tribómetro, pero no representa un problema para establecer los valores de COF.

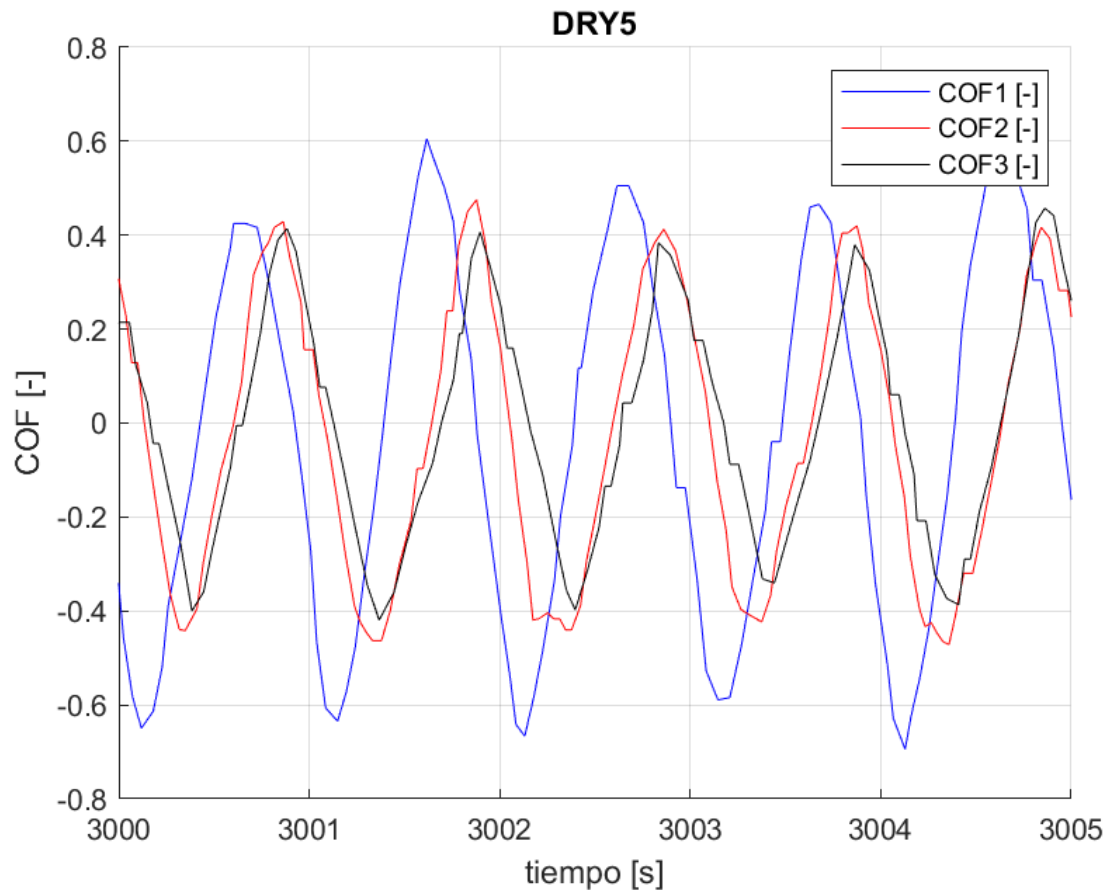


Figura 11 Representación del COF obtenido en los ensayos DRY 5.

En la Figura 11 se observa como el valor del COF varía entre valores positivos y negativos, describiendo una curva sinusoidal. Esto es debido al movimiento descrito por el tribómetro, específicamente, por su sentido. Al tratarse de un movimiento recíprocante, éste se realiza en dos sentidos, tomándose el alejamiento respecto al punto inicial como sentido positivo. Esto afecta directamente al COF por la F_t (6), de contraria al desplazamiento. De esta forma, cuando el eje del tribómetro esté alejándose del punto inicial, el COF tiene valores negativos, mientras que, al acercarse, tiene valores positivos. Respecto a los diferentes COF, estático y dinámico, en los ensayos experimentales no se puede diferenciar, ya que el estático aparece cuando la velocidad es nula.

- El resto de las gráficas han sido incluidas en el
- Anexo.

Ensayo	COF ₁ [-]	COF ₂ [-]	COF ₃ [-]	VALOR MEDIO	DESV. TÍPICA
DRY1	0,43	0,43	0,47	0,44	0,021
DRY2	0,42	0,45	0,48	0,45	0,030
DRY3	0,47	0,48	0,48	0,48	0,007
DRY4	0,48	0,48	0,45	0,47	0,018
DRY5	0,47	0,50	0,43	0,47	0,035
DRY6	0,55	0,50	0,51	0,52	0,025
DRY7	0,35*	0,15	0,13	0,21*	0,119*
DRY8	0,21	0,20	0,17	0,19	0,018
DRY9	0,11	0,14	0,09	0,11	0,024

Tabla 1 Valores obtenidos de COF medios para cada ensayo realizado

La Tabla 1 muestra el valor medio del COF, medido para el estado estacionario, junto a la desviación típica, calculada según las tres repeticiones realizadas. En el caso de DRY7, 2 Hz, 3,56 N, se tiene descartar el primero de los experimentos, ya que presenta un valor extraordinariamente alto si se compara con los otros dos experimentos. Por lo que se debe recalcular el valor medio y la desviación típica para DRY7 sin tener en cuenta dicho valor:

$$\text{Valor medio} = 0,1456 \mid \text{Desviación Típica} = 0,0010$$

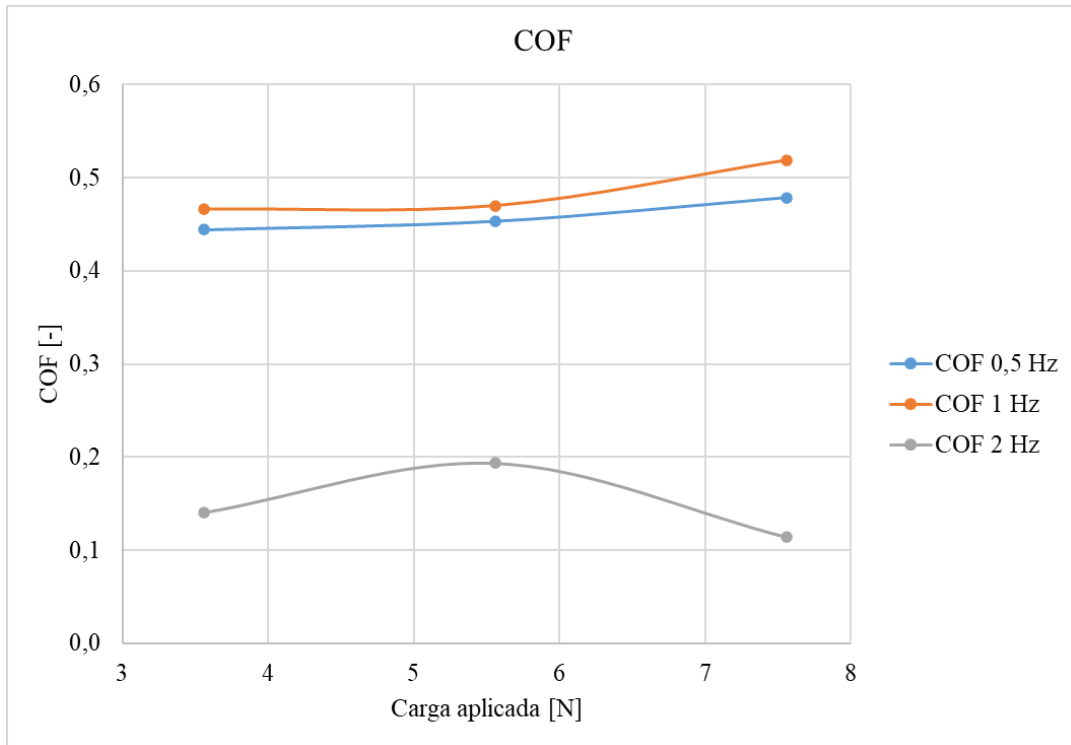


Figura 12 Gráfica en la que se representa la variación del valor medio del COF en función de la carga y la frecuencia aplicadas.

En la Figura 12 se muestra la gráfica que relaciona la variación de los valores expuestos en la Tabla 1, representando el valor medio del COF en el eje de ordenadas, respecto al valor de la carga aplicada, en el eje de abscisas. Se comenta de forma detenida en apartado de la Discusión.

1.5.2 Ensayos en húmedo

Como se explica en el apartado Diseño de experimentos, se realizan dos ensayos tomando como referencia los resultados obtenidos por los investigadores de [7]. En este estudio se demostró que para unas condiciones definidas aplicadas para el ensayo de desgaste en medio húmedo la variación corriente eléctrica respecto al tiempo sigue la misma tendencia que la variación de COF respecto al tiempo. Se han realizado dos ensayos en el laboratorio en las mismas condiciones para comprobar su repetibilidad y detectar si el tribómetro presenta algún fallo al comparar los resultados obtenidos con los de otro artículo.

Estos ensayos reciben el nombre de WET1 y WET2, habiendo sido realizados ambos con las mismas condiciones: 5,6 N, 1 Hz, junto con un lubricante conformado por un 80% de glicerol y un 20% de ácido sulfúrico 0,5 M.

Para tratar los resultados, se ha representado una gráfica en las que se trazan los valores obtenidos de corriente y COF simultáneamente, respecto al tiempo.

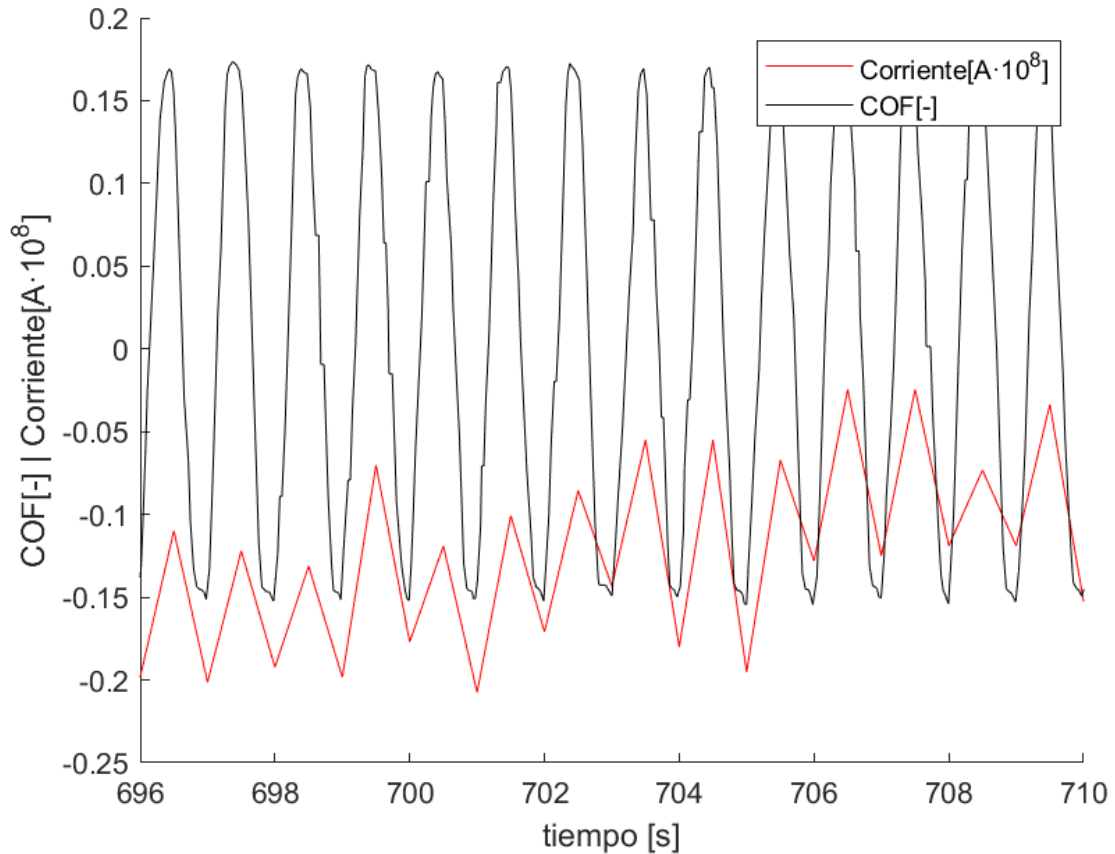


Figura 13 Representación del COF y la corriente respecto al tiempo.

1.5.3 Discusión

Respecto a los resultados que se han obtenido de los ensayos en seco, se debe remarcar la dificultad de diferenciar μ_s y μ_d experimentalmente, ya que el primero solo aparece cuando la velocidad es nula. Al no haber movimiento, la célula de carga no registra ningún valor de F_t , por lo que el valor del COF es 0.

Para las frecuencias bajas de 0.5 y 1 Hz los valores de COF estacionario se encuentran entre 0,42 y 0,52. Con el aumento de la carga aplicada se observa el incremento de los valores de COF. A mayor carga la tendencia a la deformación plástica del material se hace más pronunciada y el valor de COF crece. Aun así, cabe señalar que, en cuanto a los ensayos realizados a 0,5 Hz, en la Figura 12 se aprecia como el valor del COF en estado estacionario no varía significativamente para las cargas probadas, siendo los valores de COF registrados con las cargas de 3,56 N y 5,56 N muy próximos. Esto ocurre también con los ensayos realizados a 1 Hz, cuya tendencia es similar a los de 0,5 Hz. De nuevo, los valores de COF obtenidos para carga de 3,56 N y para 5,56 N son

casi iguales. En cambio, en los ensayos realizados a 2 Hz, no se ha obtenido una tendencia parecida a la del resto. Al aumentar la frecuencia a 2 Hz los valores del COF disminuyen para todas cargas aplicadas. Además, se ha registrado un máximo al aplicar la carga de 5,56 N, obteniendo valores similares de COF para 3,56 N y 7,56 N. La explicación a este fenómeno no se buscará en los trabajos futuros de laboratorio.

Respecto a la velocidad de deslizamiento, se observa en la Figura 12 como de 0,5 Hz a 1 Hz no hay diferencias significativas, mientras que, si se comparan los resultados de estos ensayos con los de 2 Hz, éste último presenta valores mucho menores.

En cuanto a lo que los ensayos en húmedo respectan, el objetivo de su realización era comparar los resultados hallados con los obtenidos por los investigadores en [7] para una disolución de 80% glicerol 20% H₂SO₄. En este estudio las curvas descritas por la corriente que atraviesa el medio y el COF siguen tendencias muy parecidas durante todo el experimento. En mí trabajo, como se aprecia en la Figura 13, ambas curvas siguen dinámicas similares, ya que tienen la misma frecuencia, encajando con lo visto en [7].

1.6 Conclusiones

Se ha conseguido realizar ensayos tribológicos de una aleación de cobalto con cromo contra una bola de alúmina sobre diversas condiciones, variando la carga aplicada y la frecuencia.

Tras el trabajo se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- Los resultados de COF obtenidos para 0,5 Hz y 1 Hz son muy similares, por lo que este aumento de frecuencia no produce cambios significativos. En cambio, cuando se aumenta la frecuencia a 2 Hz, los valores obtenidos son mucho menores.
- A bajas frecuencias, 0,5 Hz o 1 Hz, el COF sigue una tendencia similar a la carga aplicada, por lo que, a mayor carga se obtiene un mayor COF. Para los ensayos realizados a 2 Hz, esto no ocurre, sino que el valor del COF presenta un máximo en con la carga de 5,56N.
- Existe un grado alto de repetibilidad entre los resultados obtenidos de los ensayos en seco, por lo que el procedimiento seguido para su realización es fiable, en consecuencia, puede ser reproducido en ensayos de características similares.
- En lo relativo a los ensayos en húmedo, se ha comprobado que la medida de la corriente permite detectar la dinámica que aparece en el contacto entre la bola y el material a ensayar.
- La dinámica de repasivación del material ensayado en la disolución ácida es muy rápida, por lo que la curva de repasivación sucede casi de forma inmediata. Así, la frecuencia del movimiento de la bola, que se observa en la frecuencia de la curva del coeficiente de rozamiento, es la misma que la frecuencia de la señal de corriente eléctrica.

1.7 Anexo

En este anexo se exponen las gráficas obtenidas de los ensayos en seco.

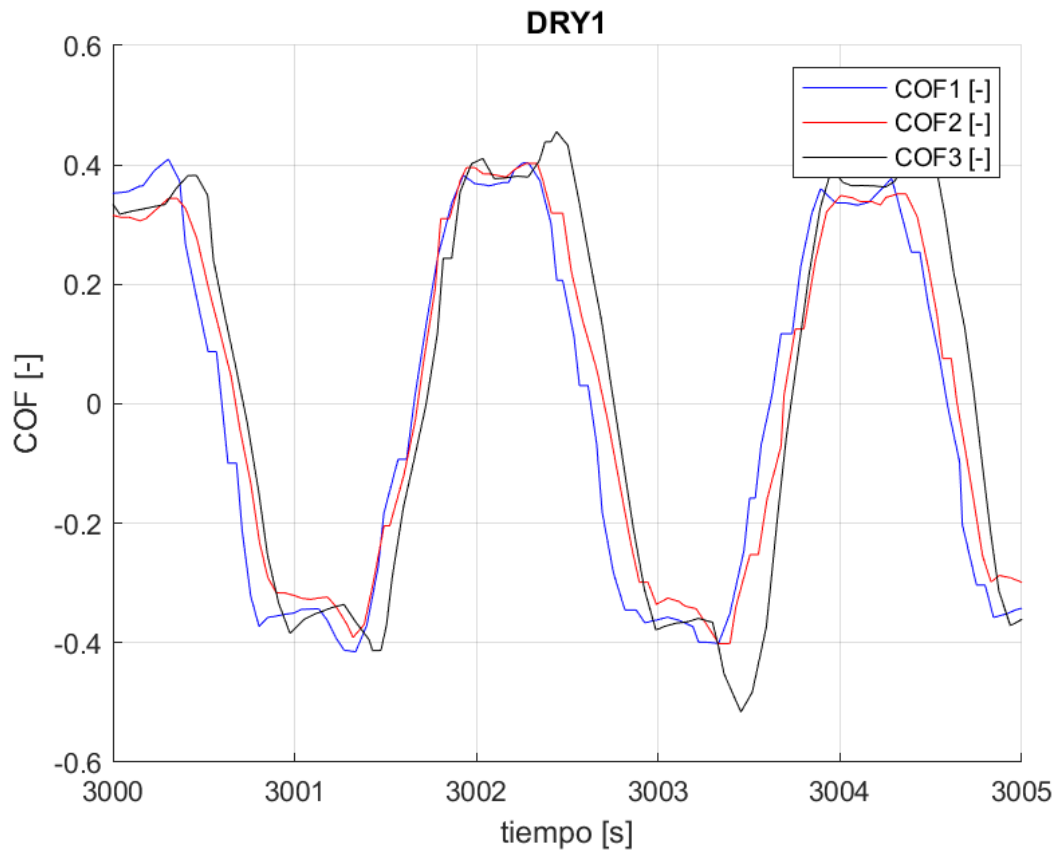


Figura 14 Representación del COF obtenido en los ensayos DRY 1.

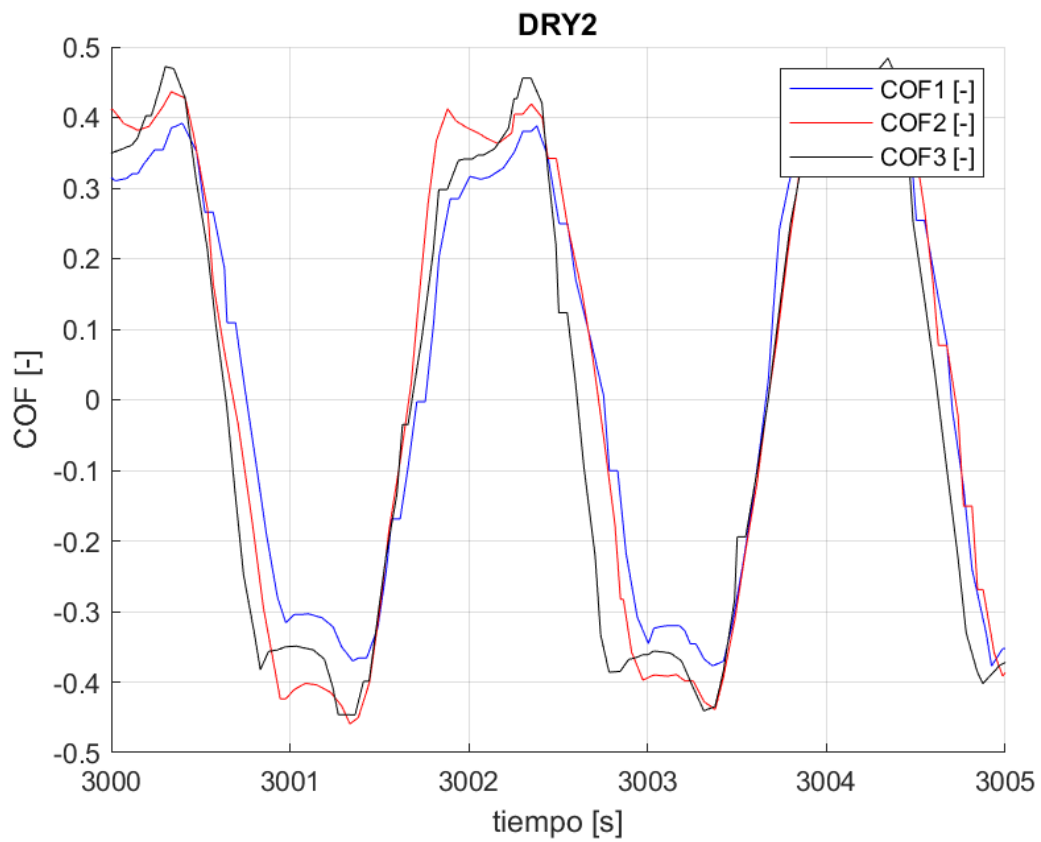


Figura 15 Representación del COF obtenido en los ensayos DRY 2

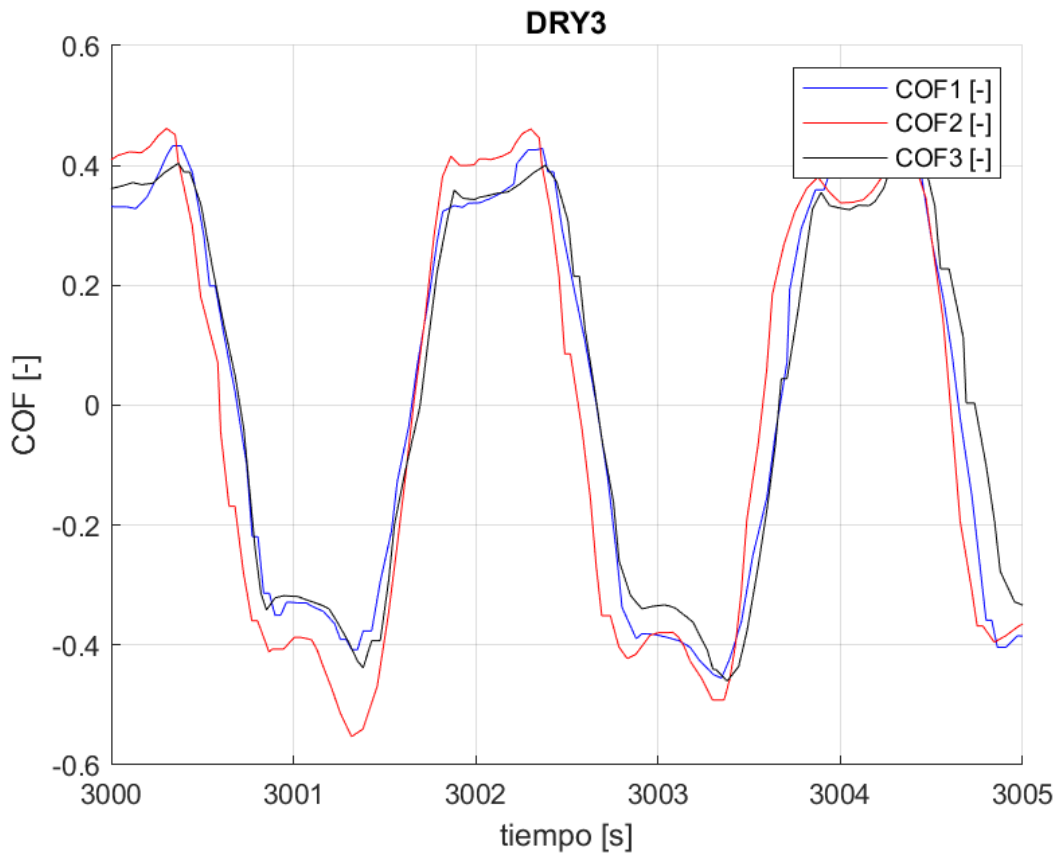


Figura 16 Representación del COF obtenido en los ensayos DRY 3.

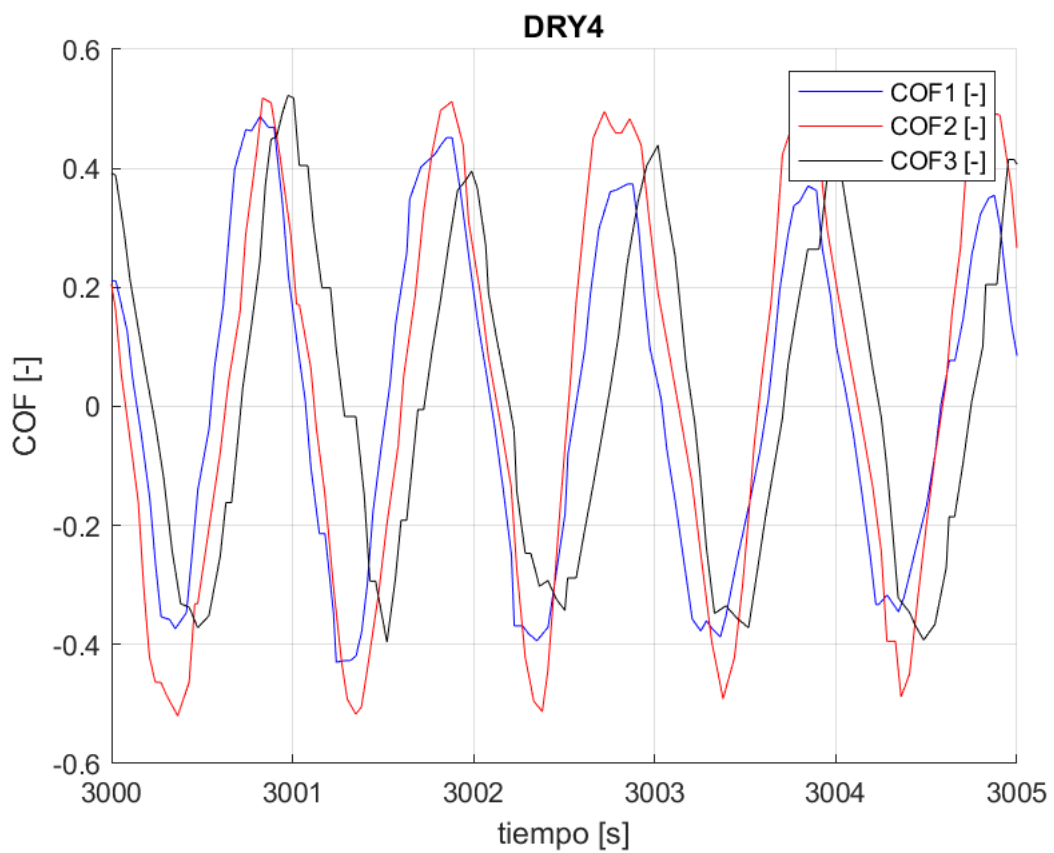


Figura 17 Representación del COF obtenido en los ensayos DRY 4.

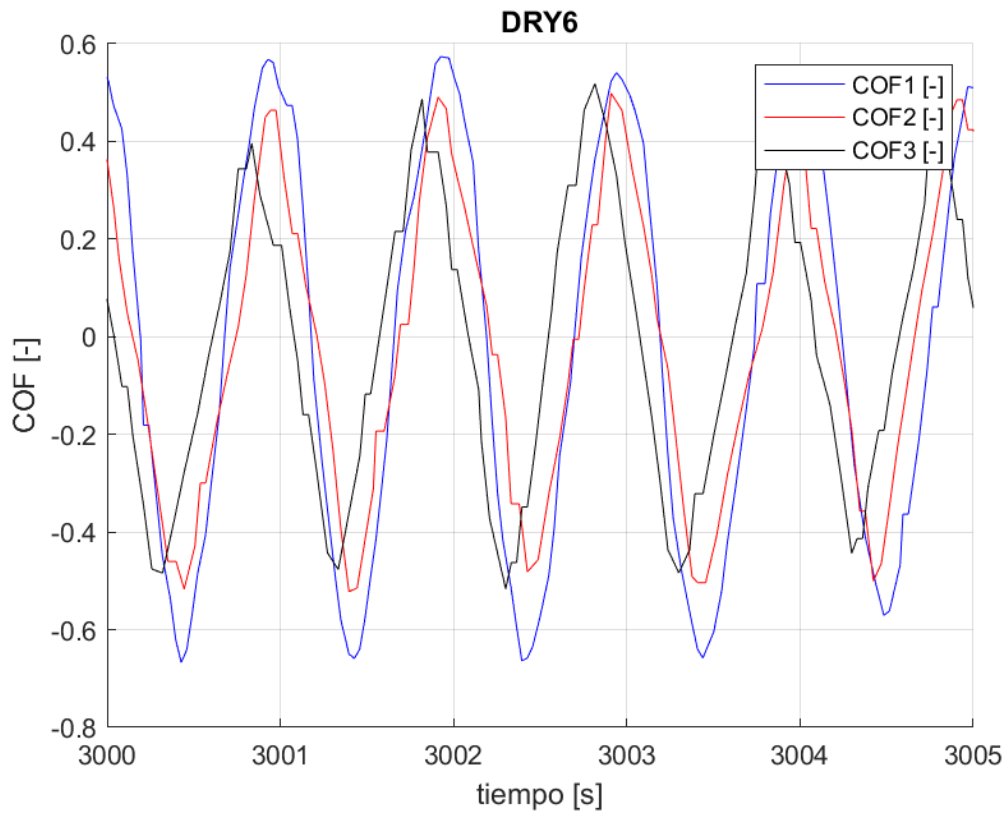


Figura 18 Representación del COF obtenido en los ensayos DRY 6.

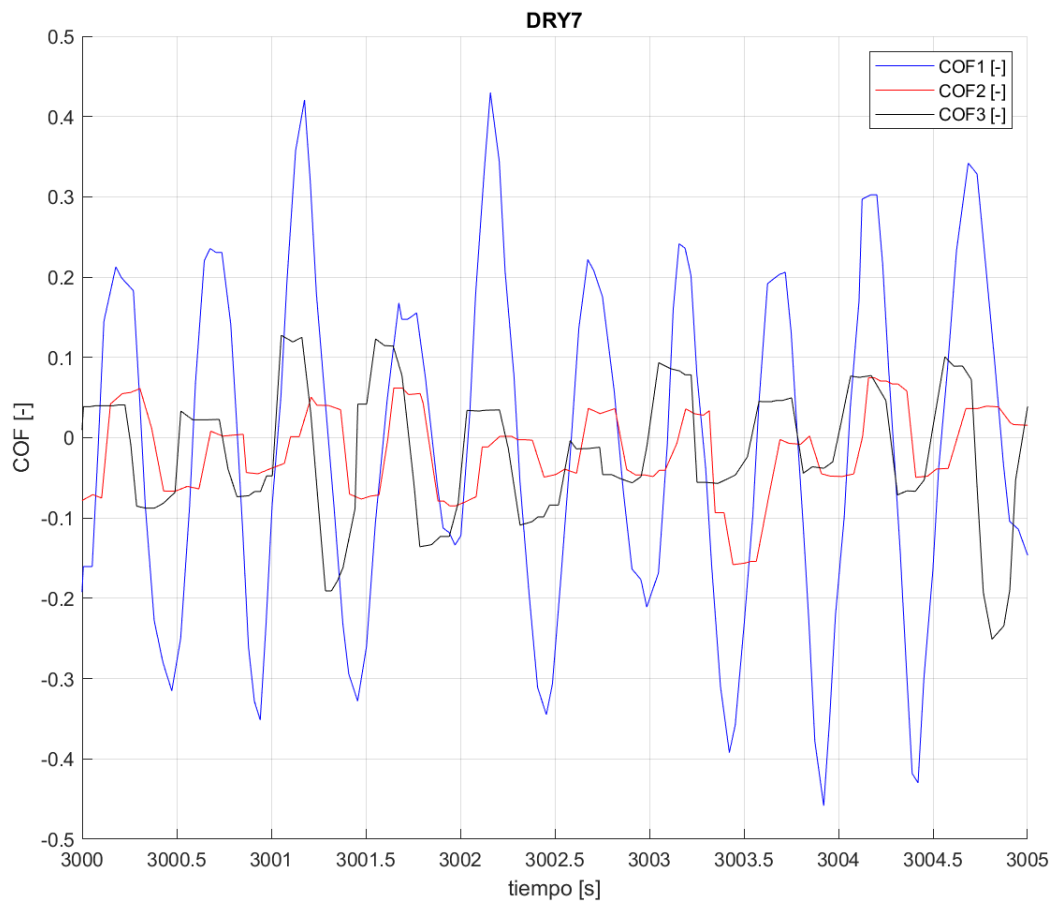


Figura 19 Representación del COF obtenido en los ensayos DRY 7.

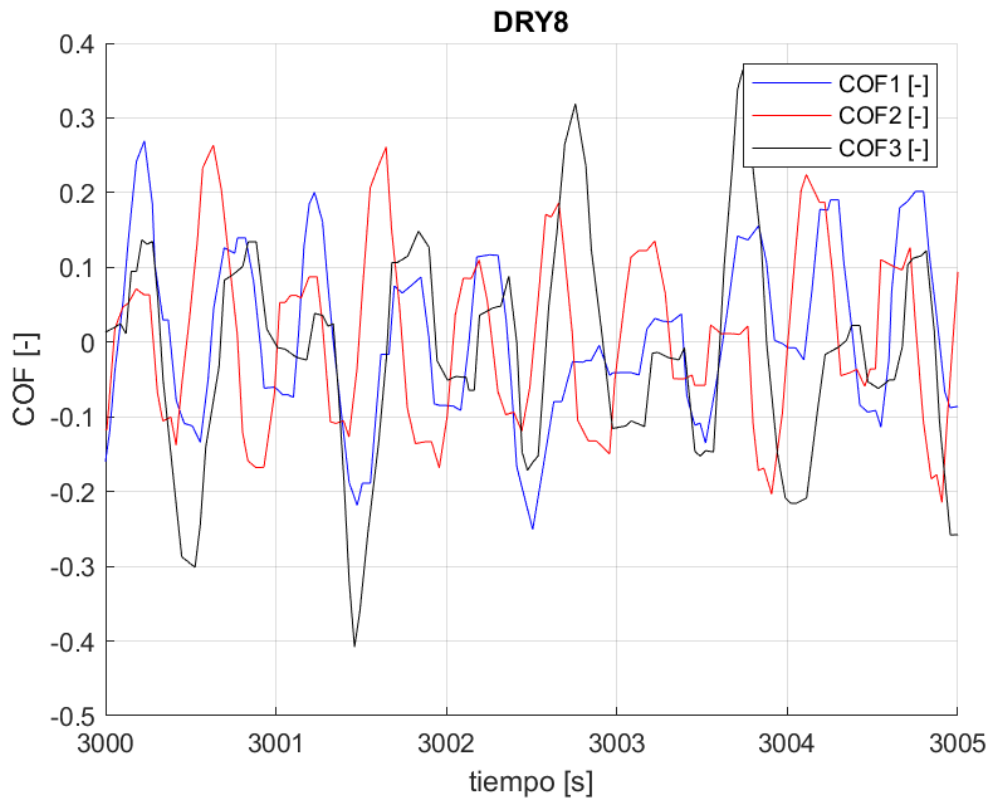


Figura 20 Representación del COF obtenido en los ensayos DRY 8.

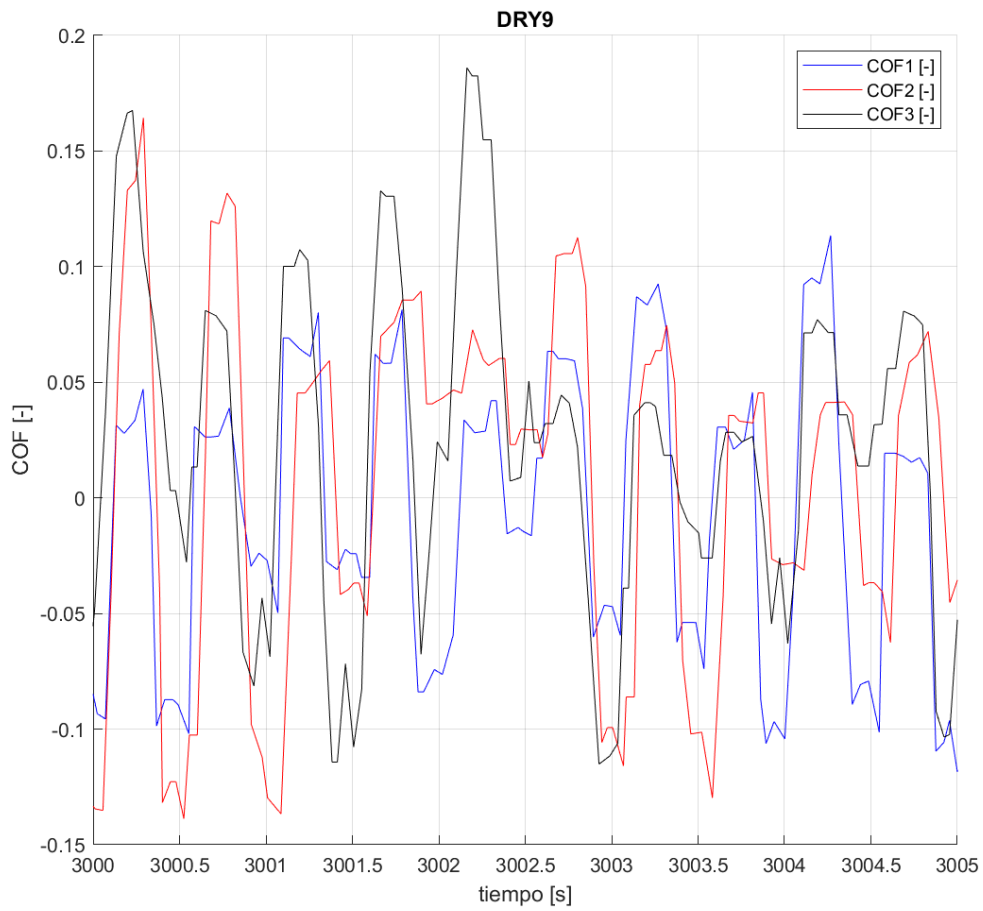


Figura 21 Representación del COF obtenido en los ensayos DRY 9.

2. Pliego de Condiciones

2.1 Materiales

El material seleccionado para las muestras con las que se han realizado los ensayos es una aleación metálica compuesta por un 70% de cobalto y el 30% restante de cromo (CoCr) usada comúnmente con fines biomédicos como se ha explicado en el apartado Muestras de CoCr. Éstas tienen una forma cilíndrica, cuyo diámetro y altura son 30 mm y 8 mm, respectivamente (Figura 22.a).

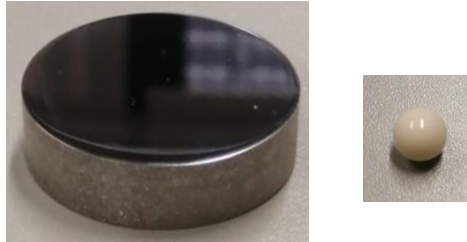


Figura 22.a. Muestra. b. Bola de alúmina de 6 mm.

Respecto al material encargado de desgastar la muestra, se trata de una bola de alúmina 96% (Al_2O_3) de 6mm de diámetro (Figura 22.b).

2.2 Equipos

Para la realización de los ensayos se puede diferenciar dos tipos de quipos, los que han sido empleados en la preparación superficial y los utilizados en la realización de ensayos. En el primer grupo encontramos la desbastadora, el limpiador ultrasónico o el perfilómetro, mientras que en el segundo se encuentra el tribómetro y el potenciómetro

2.2.1 Preparación superficial



Figura 23. Desbastadora



Figura 24. Limpiador ultrasónico.

2.2.1.1 Desbastadora

La pulidora empleada ha sido la *GP-1B Grinder Pulisher* (Figura 23). En ella se pueden emplear lijas de desbaste y pulido. Cuenta con un grifo de agua que actúa como refrigerador, y con un selector de velocidad.

2.2.1.2 Limpiador ultrasónico

Se ha empleado el limpiador ultrasónico *Elmasonic S 30 H* (Figura 24) con el fin de eliminar restos de material tras realizar numerosos ensayos sobre la misma muestra.

2.2.1.3 Perfilómetro

El perfilómetro usado ha sido el *Filmetrics Profilm3D* (Figura 25). Sus funciones han permitido determinar la rugosidad de la superficie de las muestras con el fin de que todas estuvieran en el mismo rango durante el proceso de preparación de estas. También se ha empleado tras la realización de los ensayos para obtener una mayor información sobre estos.



Figura 25 Perfilómetro



Figura 26 Potenciostato

2.2.2 Realización de ensayos

2.2.2.1 Potenciostato

El potenciostato utilizado es el *Autolab* (Figura 26), dispositivo que permite medir parámetros eléctricos como el OCP (*Open Circuit Potential*) o la corriente en función del tiempo durante la realización de un experimento. Ha sido empleado para el seguimiento de la corriente en los ensayos en húmedo.

2.2.2.2 Tribómetro

El *Microtest MTL/10/AT*, Figura 29, ha sido el tribómetro empleado. En este caso se trata de un tribómetro recíprocante que trabaja con el llamado *ball-on-flat* (Figura 1 y Figura 5). Con este dispositivo se puede ajustar la carga, la frecuencia con la que se realiza el movimiento, el número de ciclos y, además permite realizar 3 movimientos diferentes:

- Lineal: se inserta una coordenada y el eje del tribómetro, en el que se encuentra la bola (pin), se posiciona en ella.
- Sinusoidal: tras ajustar la frecuencia, el número de ciclos y el desfase, el tribómetro describe un movimiento recíprocante que cesa al llegar al número de ciclos especificados previamente. Recibe este nombre ya que la posición respecto al tiempo en una gráfica representa una función senoidal (Figura 27).
- Trapezoidal: tras el ajuste de la frecuencia y el número de ciclos, este modo permite añadir un periodo de parada que se realiza cada vez que el movimiento cambia de sentido. De forma similar al senoidal, al representar la posición respecto al tiempo se describe una función trapezoidal (Figura 28).

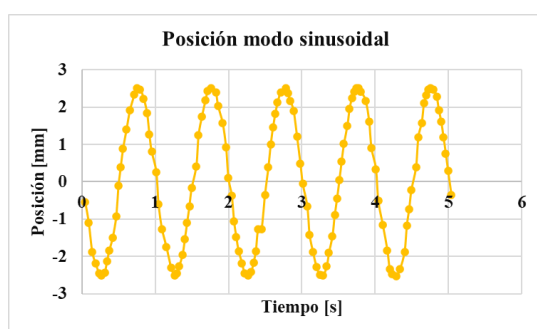


Figura 27 Gráfica modo sinusoidal

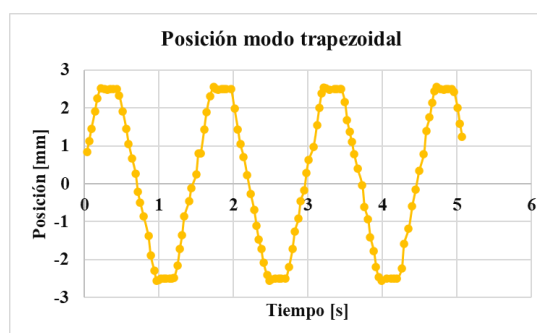


Figura 28 Gráfica modo trapezoidal



Figura 29 Tribómetro.

2.3 Diseño de experimentos

El diseño de la fase experimental empezó por determinar el diámetro de la bola de desgaste. Ante dos diámetros de bola posibles, una de 6 mm y otra de 3 mm, se puso como criterio escoger aquella que creara unas presiones de contacto inferiores según la teoría de Hertz explicada anteriormente en el apartado Superficie y deformaciones.

Material	Módulo Elástico, E (GPa)	Coefficiente de Poisson	Radio (mm)
Alúmina 96%	310	0,22	3 o 6
CoCr	210	0,29	∞

Tabla 2. Propiedades mecánicas y geométricas de los materiales utilizados.

Para comprender mejor los siguientes cálculos, cada vez que un parámetro de las ecuaciones haga referencia a la alúmina, tendrá una A como subíndice, mientras que para la aleación metálica CoCr, tendrá una B. Así mismo, para hacer referencia a los resultados de las bolas, estos tendrán como subíndices un 3 o 6 respectivamente.

Como la muestra de CoCr es una superficie plana se toma su radio como infinito por ello los términos de la que hacen referencia a su radio son despreciados. Además, al haber dos radios de bola de alúmina se obtienen dos resultados diferentes. Para la bola de 3 mm obtenemos que el radio reducido (4) es de 1,5 mm, y para la de 6 mm es de 3,0 mm

Con el objetivo es saber cuál de las dos bolas genera una menor presión máxima de contacto se ha escogido una fuerza normal (F_n) arbitraria, en este caso 10 N, una fuerza un poco mayor a las usadas en los ensayos.

Radio	Semieje circunferencia contacto (m)
R'_3	0,0437
R'_6	0,0551

Tabla 3 Valores obtenidos para los diversos radios reducidos

	a_3	a_6
P_{MAX} (MPa)	2500	1573

Tabla 4 Valores de presión máxima obtenidos para los radios de las circunferencias de contacto.

	a_3	a_6
$P_{AVERAGE}$ (MPa)	1667	1048

Tabla 5 Valores de presión media para los radios de las circunferencias de contacto

Como se observa en los resultados obtenidos, las presiones de contacto obtenidas para la bola más pequeña son mayores que las obtenidas para la grande, por lo que, atendiendo al criterio de selección impuesto, se escogió la bola de 6 mm de diámetro.

Como el tribómetro permite variar la fuerza aplicada se pensó que para los ensayos en seco se podía aplicar tres fuerzas y tres frecuencias diferentes con las que realizarlos para así asegurarnos una mayor cantidad de datos con la que realizar las conclusiones. °

Para escoger las fuerzas, primero se tuvo en cuenta dos factores, el peso del eje del tribómetro descargado, 1,56 N, y las posibles combinaciones que se podía hacer, ya que se disponía de cuatro pesos diferentes: uno de 5 N, dos de 2 N y uno de 1 N. Como objetivo se pudo obtener presiones máximas del orden de 1 GPa. Haciendo uso de la ecuación 2, se obtuvieron los siguientes resultados tras probar con varios pesos diferentes:

F_n (N)	2,56	3,56	5,56	7,56	9,56
P_{MAX} (MPa)	999	1115	1294	1433	1550

Tabla 6 Valores obtenidos para las cargas.

Finalmente se escogieron los siguientes pesos: 3,56 N, 5,56 N y 7,56 N.

Respecto a la frecuencia, primero se dictaminó la duración de los ensayos en 1 hora. Consecutivamente, de forma arbitraria se decidió usar frecuencias de 0,5 Hz, 1 Hz y 2 Hz, de esta forma ya teníamos el número de ciclos totales para cada ensayo: 1800, 3600 y 7200 respectivamente.

Una vez determinadas las fuerzas y frecuencias a emplear, se obtuvo la tabla representada en la Figura 10, en la que se representa los diferentes tipos de ensayos en seco a realizar. Por cada tipo se realizaron tres ensayos diferentes, es decir, un total de 27 experimentos en seco fueron ejecutados.

En lo que respecta a los ensayos en un ambiente húmedo, su objetivo ha sido ayudar a descubrir si el tribómetro empleado presenta algún fallo. En [7] se emplean el CoCrMo y la alúmina expuestos a un ambiente húmedo compuesto por ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,5 M y glicerol.

En ensayos previos se ha comprobado que existe repetibilidad por lo que para determinar si el tribómetro presenta errores se ha planteado la realización de dos ensayos en húmedo de características similares a las del artículo mencionado para después comparar los resultados.

En dicho artículo se emplean disoluciones con varios porcentajes de ácido sulfúrico: 100%, 60%, 40%, 20% y 5%. Por lo que, se decidió de forma arbitraria que los dos ensayos serían realizados con un 20% de ácido sulfúrico. Respecto a la carga, se escogió 5,56 N ya que en el artículo los ensayos habían sido realizados con 5,6 N.

2.4 Procedimiento de Ensayo

2.4.1 Preparación de la muestra

Para la realización de los ensayos se ha dispuesto de 6 muestras diferentes. En cuanto a la preparación de las muestras se refiere, se ha tenido que seguir la rutina que se expone a continuación.

El primer paso consiste en desbastar la muestra, para ello se hace uso de una pulidora metalúrgica, como la mostrada en la Figura 23, y de lijas en forma de disco de diversos tamaños de grano (Figura 30 y Figura 31). Esta máquina tiene un funcionamiento sencillo: tiene un plato circular, que gira sobre su eje, sobre el que se apoya el disco de lija. Una vez apoyado el disco hay que poner en marcha el movimiento del plato pulsando el botón *Run* y abrir el grifo que tiene la máquina incorporada cuya función es refrigerar la superficie de contacto. A continuación, se debe presionar energéticamente la cara de la muestra sobre la que se realizan los ensayos contra la lija, al cabo de un determinado periodo de tiempo, se retira la muestra, se cierra el grifo y se pulsa el botón *Stop* para detener el movimiento del plato.

El desbaste tiene como objetivo eliminar el material necesario de la superficie hasta que las marcas de los ensayos realizados previamente desaparezcan. Como ya se ha comentado, se han empleado discos de diversos tamaños de grano, empezando siempre por el más grande para quitar la mayor cantidad de material posible, en este caso el disco de 500 granos (Figura 30).



Figura 30 Lija de 500 granos



Figura 31 Lija de 1000 granos

Cuando las marcas hayan desaparecido, se cambia el disco de 500 granos por el de 1000 granos (Figura 31), la cara de la muestra estará rayada. Es importante que tras cada cambio de lija, al presionar la muestra contra la lija, la muestra se posiciona de manera que las rayas ocasionadas por la lija anterior queden en perpendicular al movimiento del disco, es decir, se gire 90° respecto a cómo se haya dispuesto en el desbaste anterior. Se cambia de lija una vez las marcas que haya causado el anterior disco no sean perceptibles visualmente. Los siguientes discos usados han sido los de 2400 y 4000 granos.

El paso siguiente al desbaste es el pulido, para el que se ha empleado el mismo equipo pero con unos discos diferentes a los usados anteriormente, que no requieren de la refrigeración por agua sino que se aplica un poco de aceite industrial sobre ellos. El pulido se divide en dos pasos, en el primero de ellos se gasta el disco de la Figura 32 sobre el que se ha de aplicar un poco de pasta de diamante de 1 µm y tras ello, el aceite mencionado. Tras unos pocos minutos presionando, cuando hayan desaparecido las marcas del último disco de lija, se pasa al siguiente disco (Figura 33), sobre el que se aplica una pasta de diamante de 0,25 µm y el aceite industrial. Cuando la cara trabajada presente efecto espejo se dará por concluido el pulido.



Figura 32 Primer disco de pulido.



Figura 33 Segundo disco de pulido.

Tras el pulido, se procede a quitar la grasa e impurezas de la superficie de la muestra. Para ello, primero se dispone de unas gotas de detergente sobre la misma y suavemente con la yema del dedo se expande por ella. Posteriormente, se aplica un chorro de agua para eliminar el detergente.

El próximo paso consiste en sumergir la muestra en un cuenco con una disolución de etanol al 96%. Tras la sumersión, se seca la muestra con la ayuda de un paño de papel y el secador.

Para finalizar la preparación de las muestras, estas tienen que pasar por el perfilómetro donde se comprueba que la rugosidad media aritmética (R_a) de la superficie en tres zonas diferentes de la muestra es aceptable, con el fin de asegurar que todos los ensayos parten de condiciones lo más similares posibles. Para hacer uso de este equipo se ha de seguir las siguientes instrucciones:

- Una vez esté encendido el ordenador, se puede encender el perfilómetro, tras ello se abre el programa *Profilm* con el que se controlará. Al abrirlo, el perfilómetro hará un proceso de calibrado automático. Al acabar se puede ya posicionar la muestra en la plataforma del equipo.
- Ahora toca enfocar la superficie y establecer el barrido a realizar por el equipo, mediante los botones *Scan Bottom* y *Scan Top*. Este paso es importante ya que un recorrido muy grande o corto puede causar que no se lea bien la superficie teniendo que repetirlo. Con fin de evitar dicho problema, tras varias pruebas se estableció el recorrido en aproximadamente 0,185 mm.

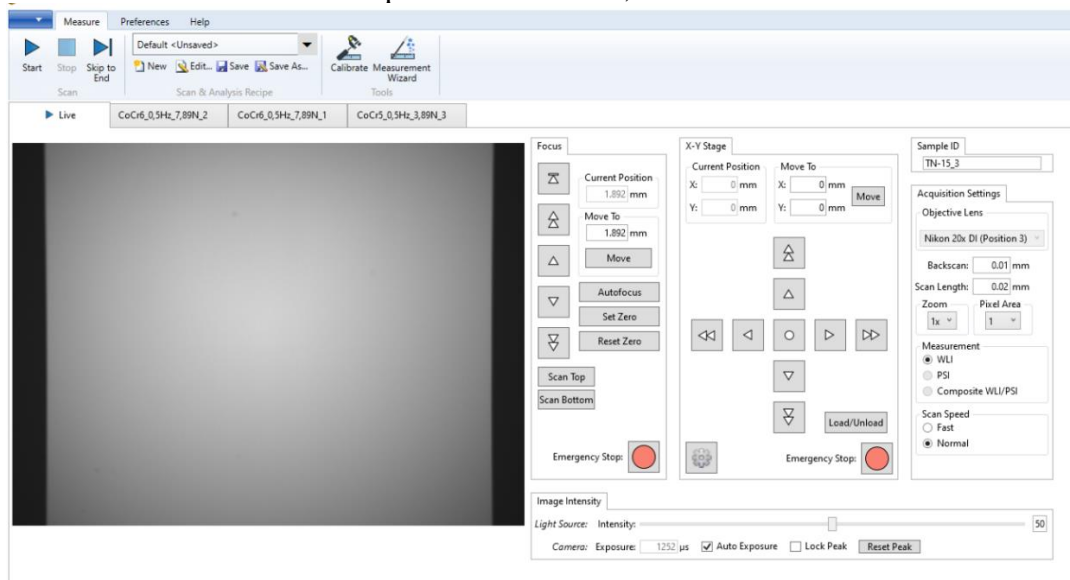


Figura 34 Primera pantalla del programa Profilm.

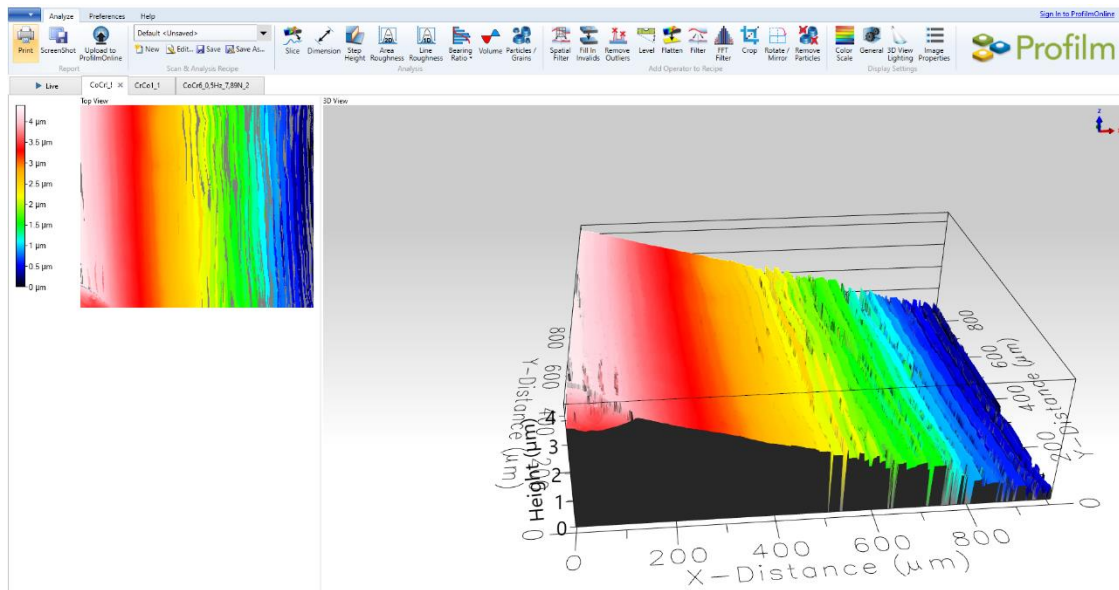


Figura 35 Pantalla principal del programa Profilm.

- Tras el barrido una nueva pantalla aparecerá en la que habrá una figura en 3D de la sección escaneada. Lo primero que se ha de hacer es nivelar mediante la función *Level*. Para ello se dibuja un triángulo equilátero en la zona que tenga menos imperfecciones.

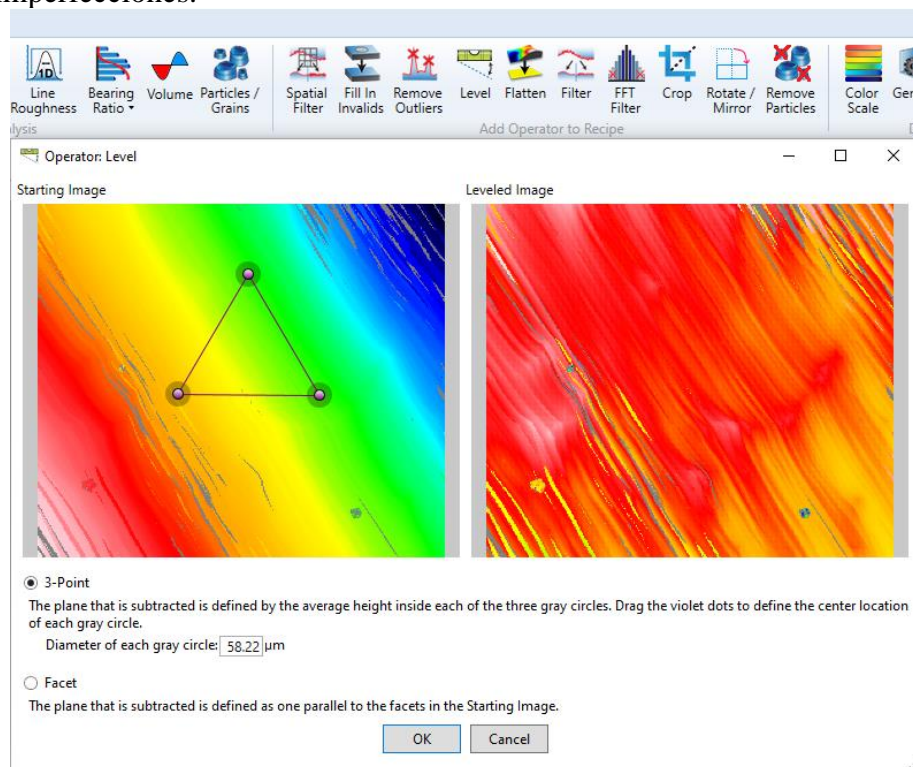


Figura 36 Función Level.

- Una vez se haya nivelado, se hace uso de las funciones *Fill In Invalids* y *Remove Outliers*. Con esto, los píxeles que no se hayan escaneado serán eliminados.

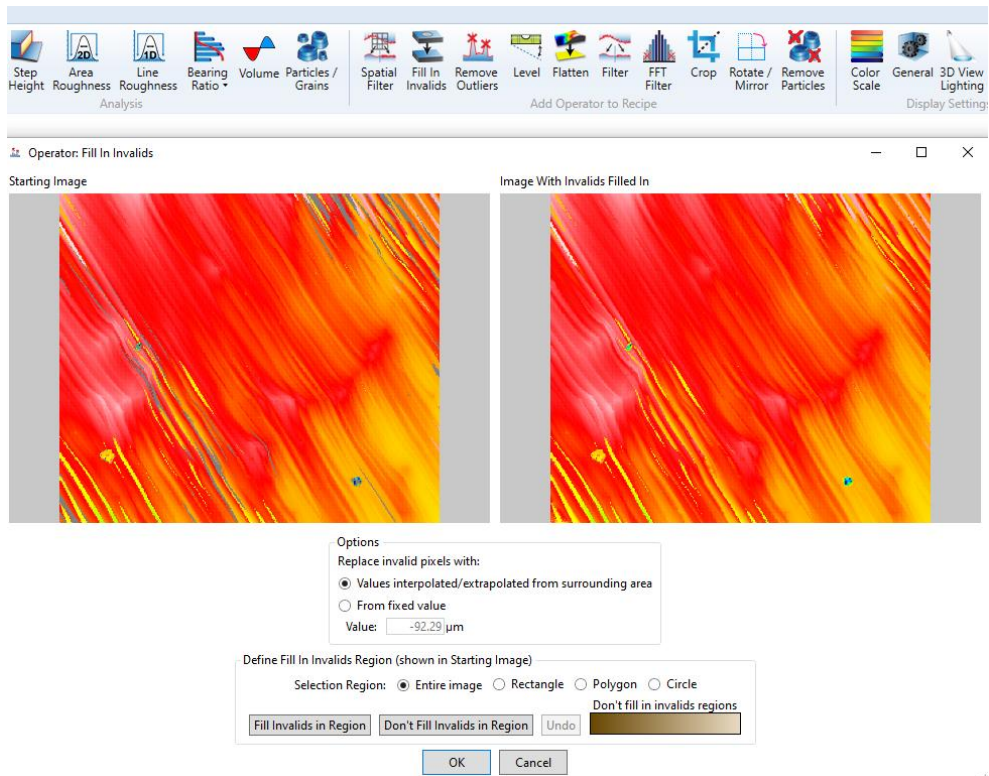


Figura 37 Función Fill In Invalids.

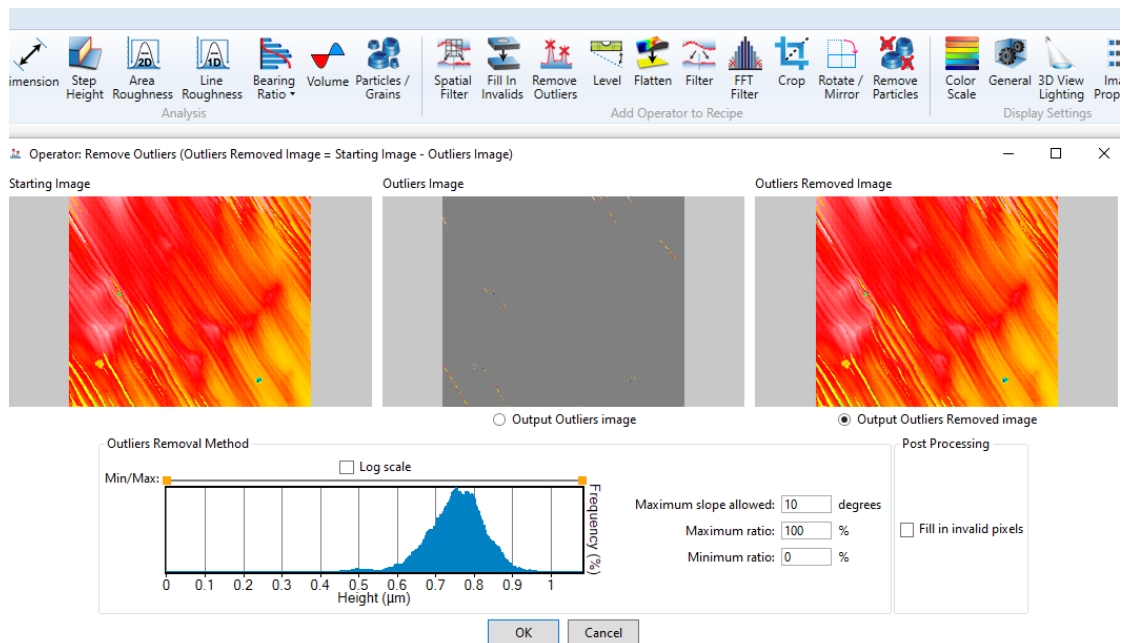


Figura 38 Función Remove Outliers.

- Con la función *Filters*, seleccionando *Output Roughness image* se consigue aplicar un filtro que elimina la ondulación de la superficie para mostrar solo su rugosidad.

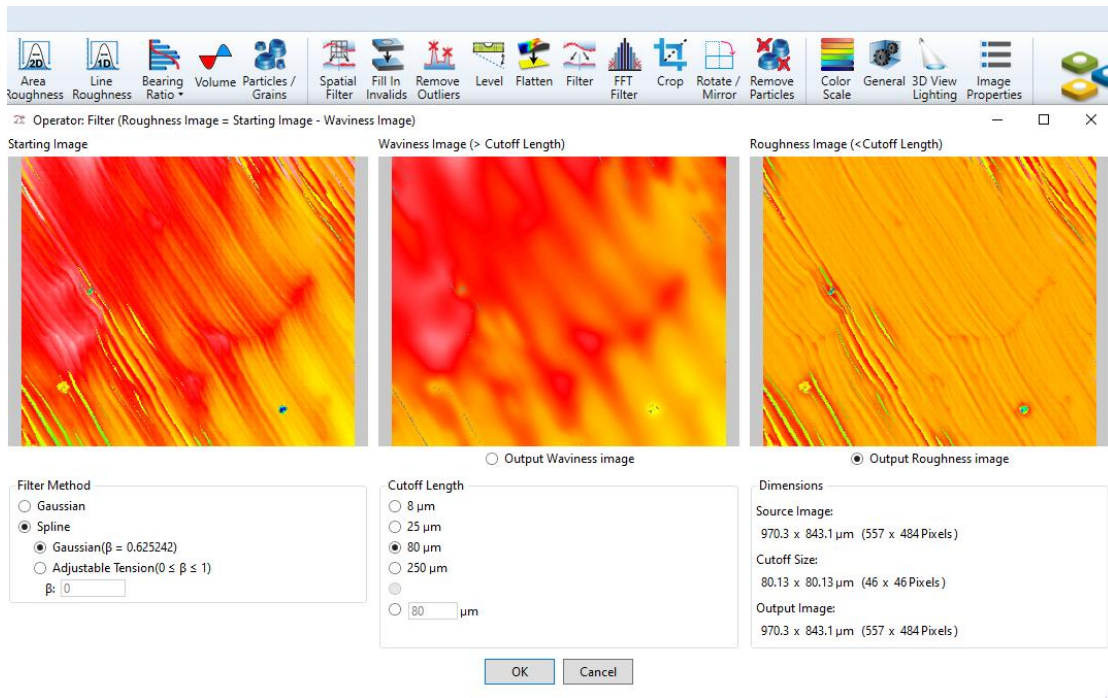


Figura 39 Función Filters.

- Con la función *Line Roughness*, al mover los dos puntos marcados que se ven en la Figura 40 se posibilita medir la rugosidad de la sección deseada, buscando medidas razonables y fiables.

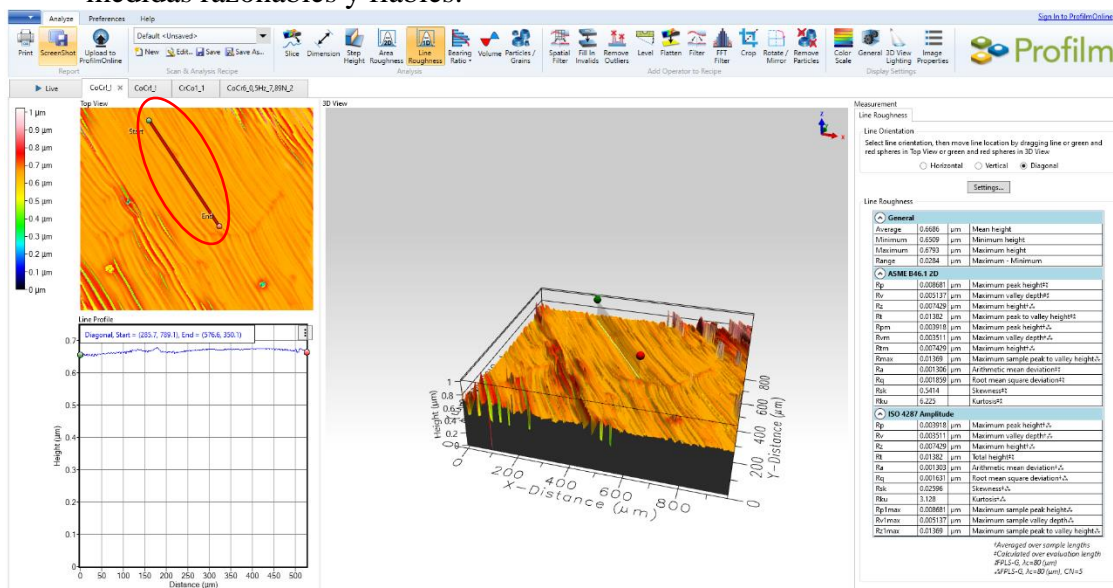


Figura 40 Función Line Roughness.

- Tras ello, mediante la función *Export data* se puede guardar los datos obtenidos en una hoja de Excel para más tarde ser comparados.

En caso de que las rugosidades medidas en las tres zonas sean del mismo orden, se dará por válida la muestra, por lo que se podrán realizar ensayos sobre ella.

2.4.2 Ensayo en tribómetro

Cuando la muestra ya está preparada, empieza la fase experimental, en la que se diferencian dos tipos de ensayos: en seco y en húmedo.

2.4.2.1 Ensayos en seco

Para los ensayos en seco se han seguido los siguientes pasos. Primero se procede a posicionar y sujetar la muestra sobre la célula de carga que se observa en la Figura 29. Para ello se requiere de un molde especial que se pone encima de la muestra., como el que aparece en la Figura 6 preparado para este tribómetro El molde tiene cuatro agujeros a través de los que se ponen unos tornillos que asegurarán la perfecta sujeción de la pieza. Tras ello, se dispone la bola de alúmina dentro de su soporte y este se enrosca en el eje del tribómetro. Llegado el momento de aplicar la carga sobre el eje, cabe explicar que, al realizar un ensayo de prueba, se determinó que el programa con el que se realizan y controlan los experimentos ya tenía en cuenta el peso de este, 1,56 N. Por lo que, a la hora de poner la carga habrá que poner 1,56 N menos que con los que se va a realizar el ensayo. Esto es, en caso de trabajar con los de 5,56 N, habrá que cargar el eje con 4 N.



Figura 41 Eje del tribómetro cargado.



Figura 42 Centralita del tribómetro.

Con el ordenador encendido, se encienden la centralita del tribómetro (Figura 42) y después el propio tribómetro, hecho esto se puede iniciar el programa *Microtest-Control de Ensayos* con el que se controla el equipo.



Figura 43 Pantalla principal del programa Control de Ensayos

Para que se pueda realizar cualquier movimiento se ha de pulsar el botón *Motor*. Tras esto, haciendo uso del modo lineal previamente explicado, e introduciendo la posición y la velocidad se puede posicionar el eje en cualquier punto dentro de un rango de 78,4mm, que va desde -39,2 mm a +39,2 mm. En los ensayos, siempre se partía desde la posición 0mm. Una vez hecho esto se puede quitar la placa que sujeta el eje del tribómetro para que la bola (pin) y la muestra estren en contacto.

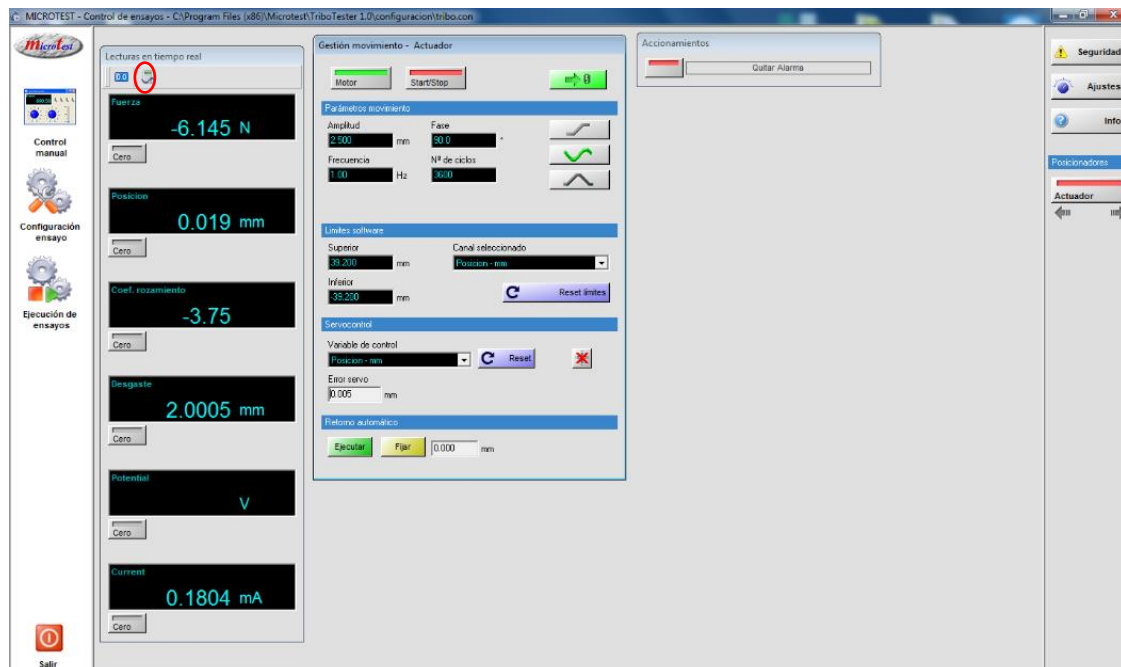


Figura 44 Configuración del modo sinusoidal

El paso siguiente es configurar el movimiento de tipo sinusoidal con el que se realizan todos los ensayos. Para ello se han de introducir los parámetros: amplitud, fase, número de ciclos, frecuencia y fuerza. Respecto a los dos primeros, estos siempre serán

2,5 mm y 90° respectivamente. Los ensayos están pensados para ser todos de 5 mm y la fase es por un motivo de espacio y seguridad, de esta forma el tribómetro trabaja en la parte izquierda respecto a la posición inicial y no choca con la sujeción. El resto de los parámetros, dependerán del tipo de ensayo a realizar, explicados en el apartado Diseño de experimentos. Como se ha explicado anteriormente, el tribómetro tiene en cuenta el peso del eje, por lo que al insertar el valor de la fuerza habrá que hacer como con la carga aplicada. Esto es, en caso de realizar un ensayo de 5,56 N habrá que poner 4 N (Figura 45).

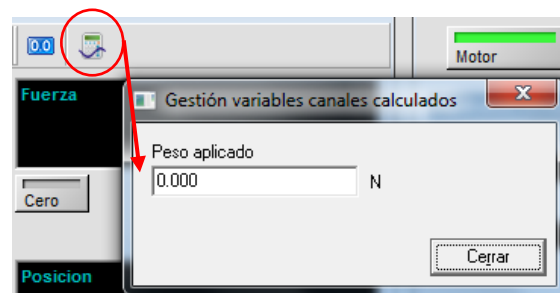


Figura 45 Configuración el peso aplicado

Lo siguiente es pulsar en *Configuración ensayo*, para darle nombre a los archivos que van a ser creados y para guardar los parámetros establecidos, para ello cuando se le haya asignado un nombre, se pulsa *Salvar parámetros*.

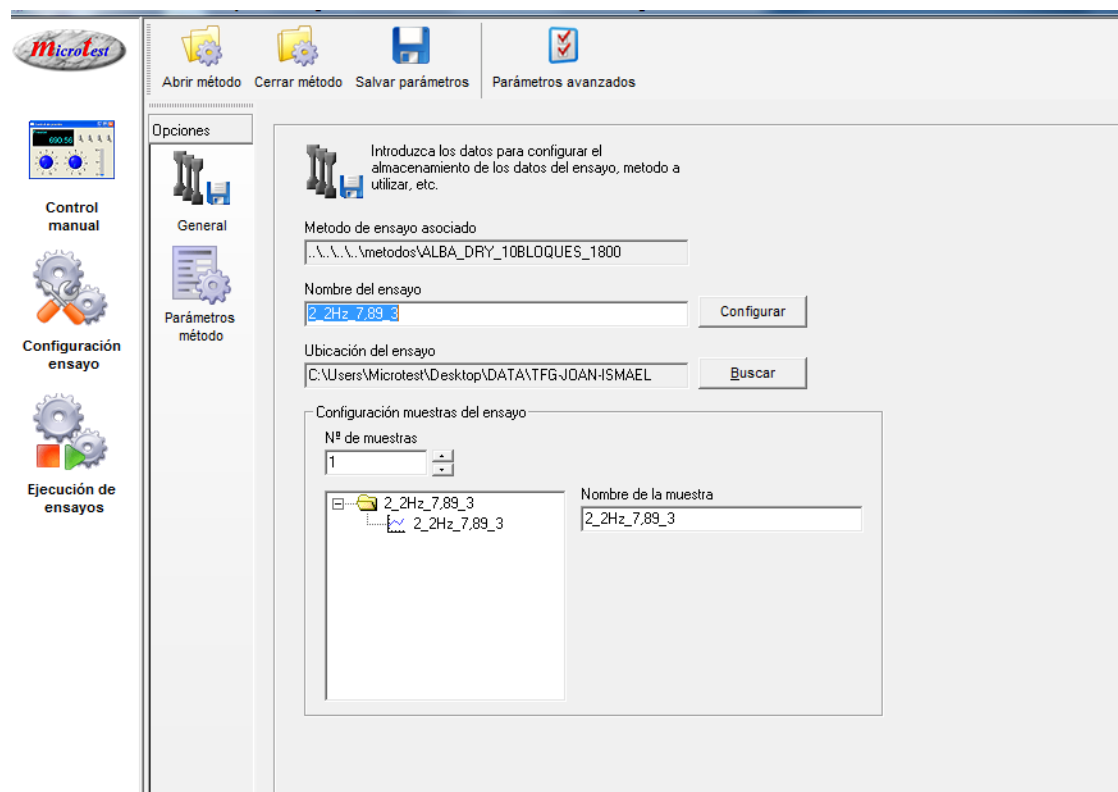


Figura 46 Pantalla de Configuración ensayo

Ahora, hay que ir a *Ejecución de ensayos* y darle a *Adquisición*, marcado en rojo, para que el programa recopile la información del ensayo. Si no se acciona este botón y se realiza el ensayo, toca repetirlo.

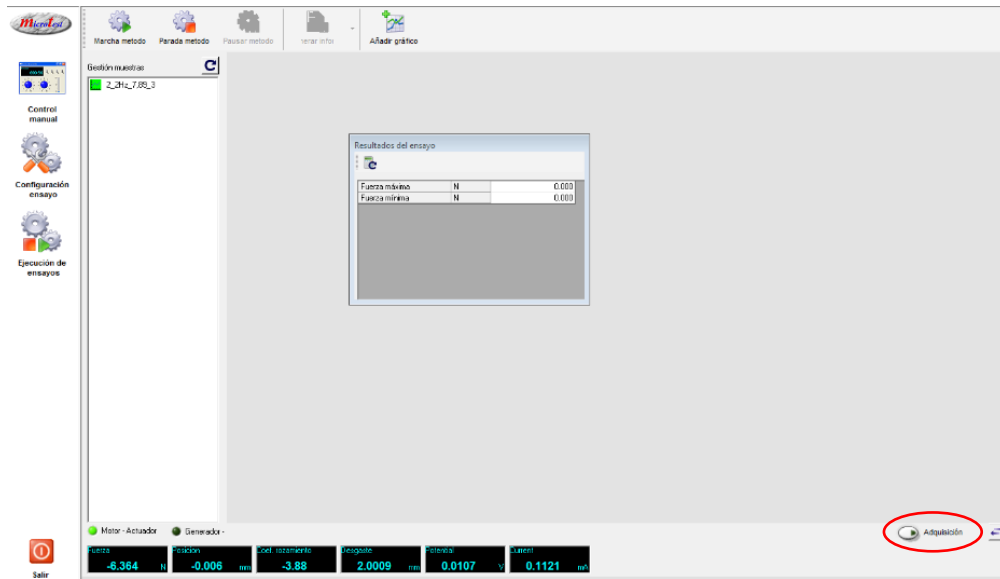


Figura 47 Pantalla Ejecución de ensayos.

Por último, se vuelve a la pantalla principal (Figura 43) y acciona el *Start/Stop*, que se encuentra al lado de *Motor*. De esta forma se da comienzo al ensayo. Al finalizar el ensayo se pulsa *Motor*, para apagarlo. Se levanta el eje del tribómetro con la bola para finalizar el contacto y se pone el seguro para dejarlo tendido en el aire. Además, se accede al programa *Microtest-Análisis de datos*, con el que mediante el botón *Exportar informe a ASCII*, marcado en rojo, se podrá exportar a Excel los datos obtenidos durante el ensayo.

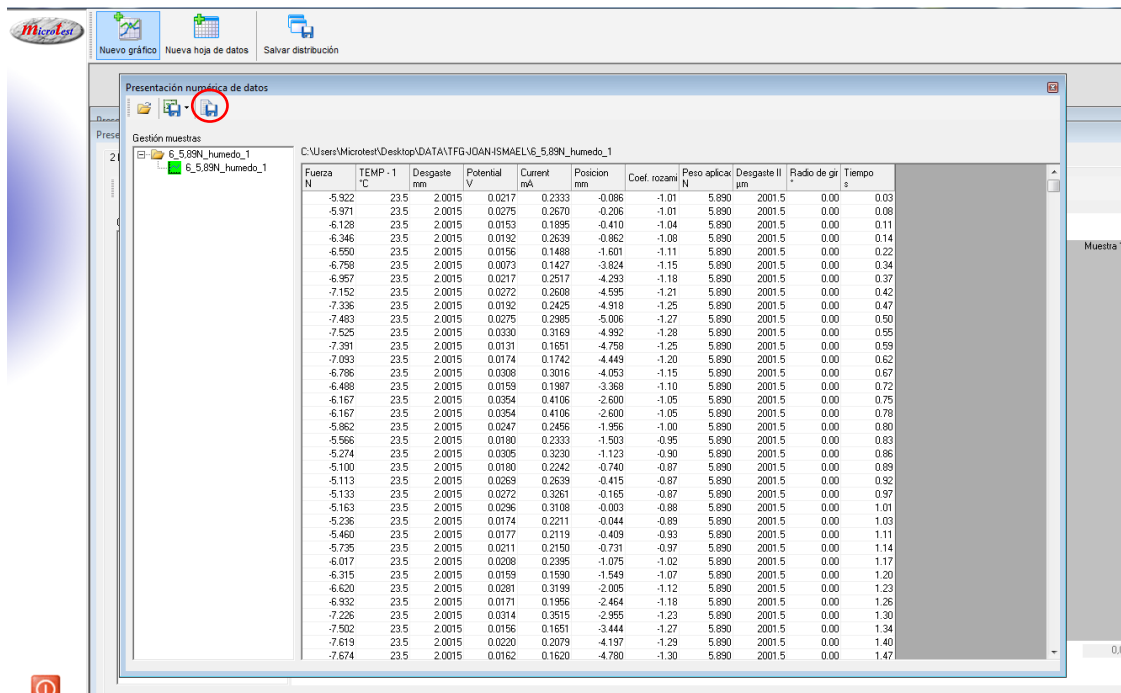


Figura 48 Programa Análisis de datos.

En caso de querer continuar haciendo ensayos, se desplaza la célula de carga sobre la que se encuentra la muestra para asegurarnos que el ensayo anterior no interfiere con el siguiente. Para ello se usa el micrómetro incrustado al tribómetro que permite el movimiento de la placa (Figura 49).



Figura 49 Micrómetro.

Posteriormente, se procede a girar la bola de alúmina para que el nuevo ensayo se realice con una parte de la bola que no haya sido desgastada anteriormente. Y solo falta introducir los nuevos parámetros y volver a seguir todos los pasos mencionados a partir del encendido del motor. En caso de no querer realizar más ensayos, se apaga primero el tribómetro y después su centralita. Se retiran la carga y la bola del eje del tribómetro, y se quita la sujeción de la muestra. Finalmente, se procede a guardar todo el material utilizado en su respectivo sitio.

Respecto a la vida útil de bolas y muestras, las primeras se han cambiado cada dos ensayos. En cuanto a las muestras, en un principio se cambiaban cada tres ensayos, pero se comprendió que cabían muchos más ensayos por lo que finalmente se han cambiado cada cinco o seis.

2.4.2.2 Ensayos en húmedo

Para los ensayos en húmedo la preparación del tribómetro es similar. Pero en este caso, una vez preparados y acoplados el eje con la bola y la carga (4 N), con la muestra sujeta, se añaden dos electrodos al montaje.



Figura 50 Montaje de los ensayos en húmedo.

Se trata de un primer electrodo de cloruro de plata que actúa como el electrodo de referencia, posicionado a la izquierda de la figura anterior. Mientras que el segundo actúa como electrodo de trabajo, situado a la derecha. Estos sirven para medir la corriente y tensión que circulan por el ambiente creado. Es importante que durante su colocación se consiga que estos estén en suspensión sin llegar a tocar ni la muestra ni la sujeción.

El siguiente paso consiste en crear el ambiente que como ya se ha comentado, se trata de una solución de glicerol (80%) y ácido sulfúrico 0,5 M (20%). Con la ayuda de varias pipetas y una jeringuilla se prepara una solución de 10 ml. Una vez realizada, esta se deposita sobre la muestra, asegurando que ambos electrodos quedan sumergidos en el ambiente. Llegados a este punto se enciende el *Autolab* y se realiza el conexionado pertinente de los electrodos al mismo. Con el programa *Nova 2.4.1* se configura el *Autolab*, pulsando sobre *Import procedure* se podrá seleccionar el procedimiento a seguir.

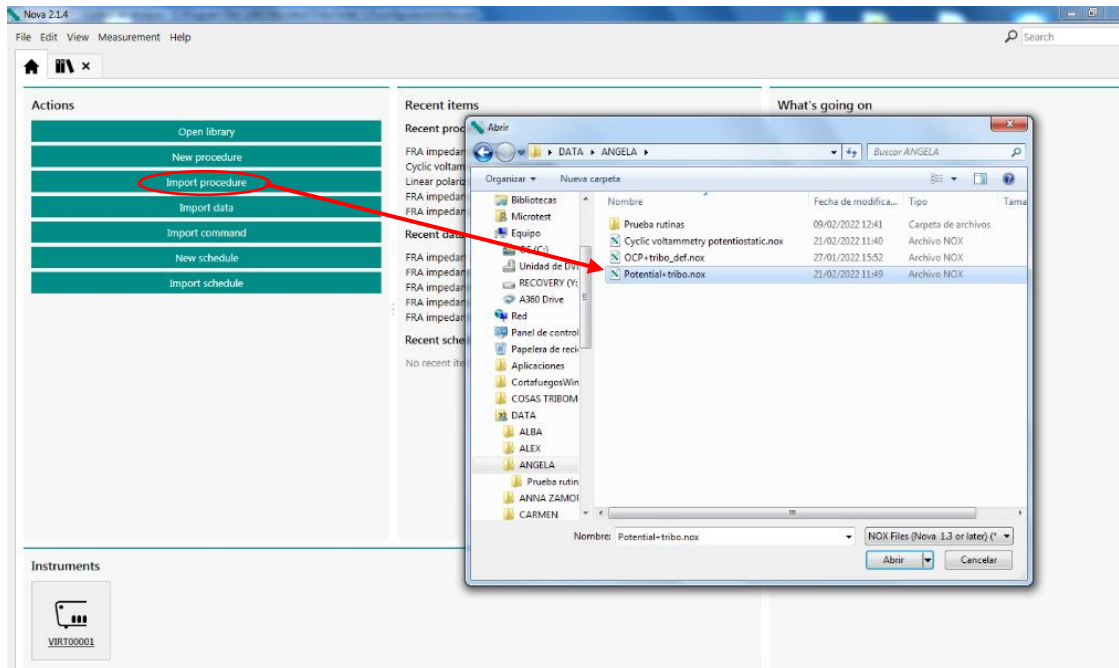


Figura 51 Nova 2.4.1 selección de procedimiento

Tras ello nos el programa nos lleva a una nueva pantalla, en la que se configura la medición del OCP durante 600 segundos y posteriormente, la tensión y corriente en función del tiempo durante otros 5200 segundos. Dentro de este último periodo se realizará el ensayo con el tribómetro.

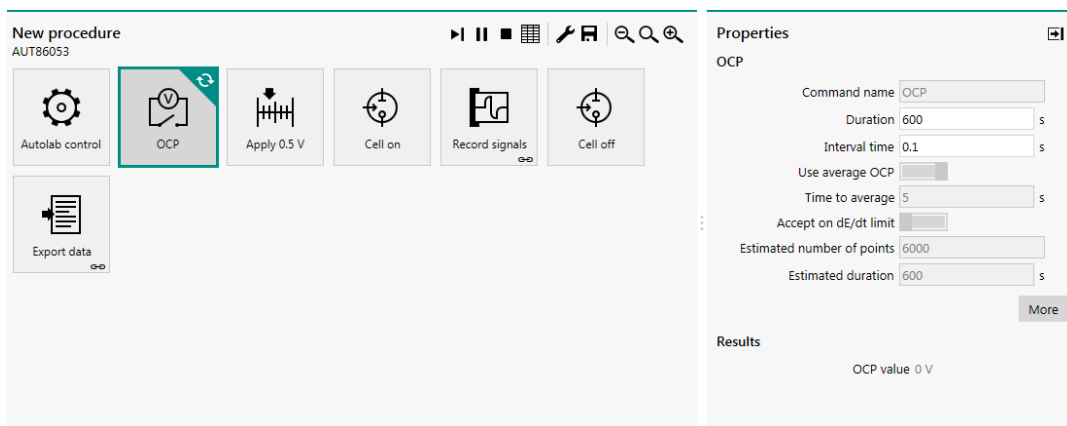


Figura 52 Nova2.4.1 configuración OCP

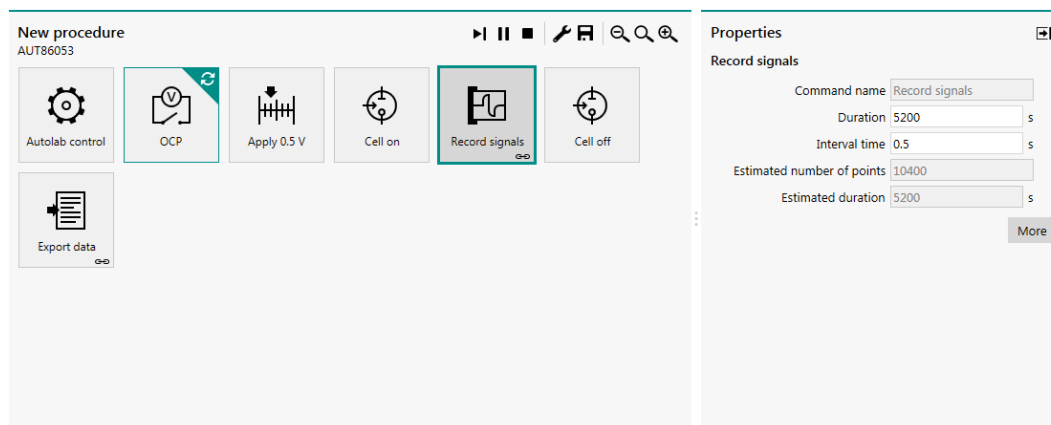


Figura 53 Nova 2.4.1 selección del tiempo de medición.

Con el tribómetro ya listo y los parámetros incluidos en el programa *Microtest-Control de ensayos*: modo sinusoidal, 1Hz, fase 90°, 3600 ciclos, 2,5 mm de amplitud y 4 N de carga; al finalizar el OCP, se pulsa el *Start/Stop* para que el tribómetro empiece con el ensayo.

Cuando pasan 5200 segundos, *Autolab* ya ha recogido los datos requeridos por lo que se procede a guardar las gráficas y resultados obtenidos para poder ser estudiados posteriormente. Para ello, se pulsa en *File → Save as...* herramienta con la que se puede elegir donde y con que nombre guardar el archivo.

Tras el primer ensayo, se apaga el potencióstato, si se desmonta sin estar este apagado se anodiza la muestra. Se desmontan ambos electrodos y se limpian con agua destilada. La solución se quita con la ayuda de una pipeta y respecto a la muestra y su sujeción, se desmontan y se limpian con agua destilada. Cuando todo esté seco, se realiza el segundo ensayo habiendo cambiado de muestra, la bola de alúmina y habiendo realizado una nueva solución, igual a la anterior.

2.4.3 Postproceso

Una vez realizado el ensayo se pasa al postproceso, en el que la muestra vuelve a pasar por el perfilómetro. En este caso, en vez de medir la rugosidad media aritmética (R_a) de la superficie en tres zonas diferentes, el objetivo será escanear la zona desgastada por el tribómetro, huella, conocida también como *wear track*. Los pasos que realizar son los siguientes:

- Una vez esté encendido el ordenador, se puede encender el perfilómetro, tras ello se abre el programa *Profilm* con el que se controlará. Al abrirlo, el perfilómetro hará un proceso de calibrado automático. Al acabar se puede ya posicionar la muestra en la plataforma del equipo.
- Ahora toca enfocar sobre la *wear track*, el barrido a realizar tiene que ser mucho más grande que el realizado anteriormente para que se escanee todo bien.
- Cuando aparezca la nueva pantalla tras el barrido, se nivela mediante la función *Level* para después aplicar la función *Remove invalid pixels*.

Hecho esto se obtiene la figura en 3D de la *wear track* (Figura 54), pudiendo realizar estudios posteriores sobre la misma como obtener el volumen de material eliminado, útil para el cálculo de la tasa de desgaste o *wear rate* (ecuaciones 7, 8 y 9).

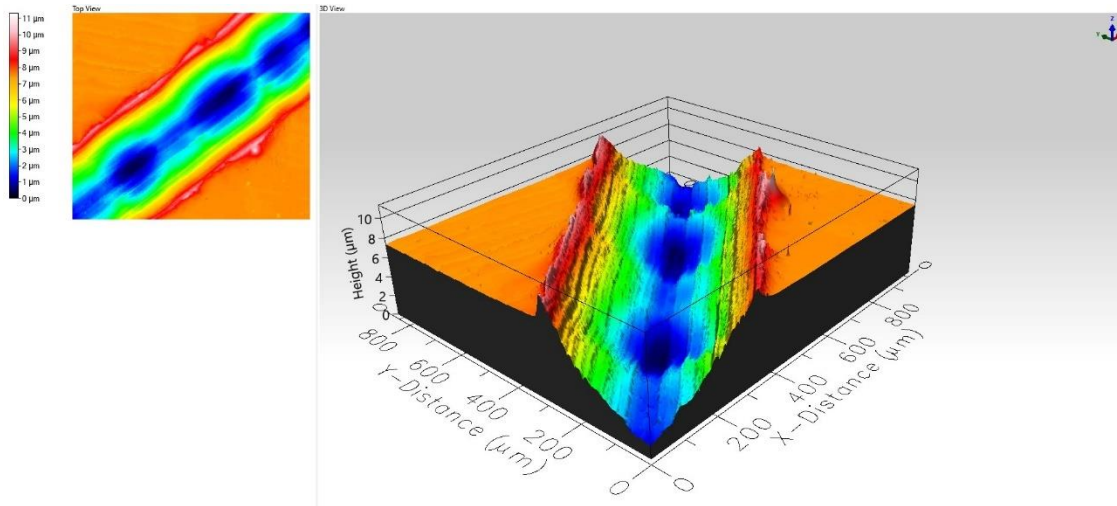


Figura 54 Ejemplo de perfilometría postproceso.

Para obtener el volumen se comprende la zona desgastada como parte de un cilindro, por lo que el volumen es el resultado de multiplicar el área por su longitud. Siendo z , la profundidad, y , la anchura, y L , la longitud.

$$\text{Volumen} = \int_y^{y_F} z(y) dy L = \sum_{i=1}^N z_i \Delta y L \quad (10)$$

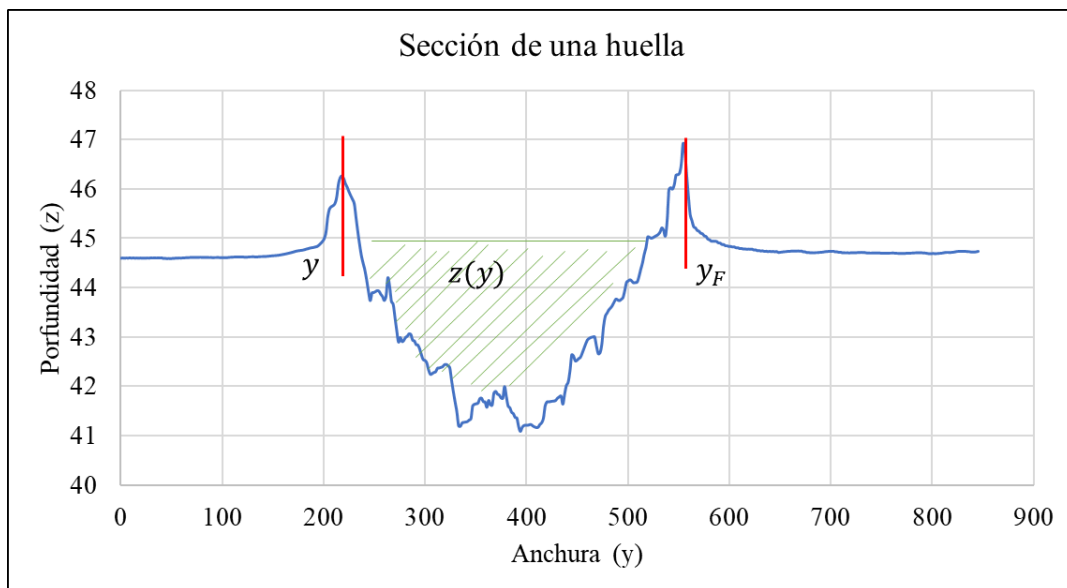


Figura 55 Sección de una huella perteneciente a DRY4.

3. Presupuesto

En este apartado se va a realizar el presupuesto necesario para llevar a cabo el proyecto. Cabe remarcar que se trata de un coste aproximado, al tratarse de materiales y equipo de laboratorio es difícil encontrar los precios exactos de los mismos.

Para el cálculo del coste de los equipos que se han empleado, se han considerado los siguientes puntos: su amortización como constante, dos meses de uso para cada uno de ellos y su valor residual como nulo. Respecto a la amortización, se ha considerado una vida útil para el tribómetro y perfilómetro de 10 años, y para el resto de los equipos, de 15 años. Teniendo en cuenta el tipo de amortización y los dos meses de uso por equipo, se ha dividido cada cuota anual en 12, para así obtener el gasto de estos.

Respecto a los gastos generales, como serían los costes de electricidad, limpieza y mantenimiento del laboratorio, se ha tomado un 12% respecto al total del presupuesto.

Ud.	Descripción	Precio sin IVA (€)	IVA (€)	Precio con IVA (€)	Cantidad	Precio TOTAL (€)
ud.	Probetas CoCr	50,00 €	10,50 €	60,50 €	6	363,00 €
ud.	Bola de alúmina de 6 mm de diámetro	30,00 €	6,30 €	36,30 €	1	36,30 €
ud.	Bote 1L de Glicerol 99%	11,56 €	2,43 €	13,99 €	15	209,85 €
ud.	Bote de 1L de Etanol 96%	16,52 €	3,47 €	19,99 €	1	19,99 €
ud.	Bote de 0,8L de ácido sulfúrico 0,5 M	7,20 €	1,51 €	8,71 €	1	8,71 €
ud.	Jeringuilla de pasta de diamante para pulido de 0,25 µm	23,19 €	4,87 €	28,06 €	1	28,06 €
ud.	Jeringuilla de pasta de diamante para pulido de 1 µm	23,83 €	5,00 €	28,83 €	1	28,83 €
ud.	Disco de lija SiC de 500 granos	1,25 €	0,26 €	1,51 €	1	1,51 €
ud.	Disco de lija SiC de 1000 granos	1,25 €	0,26 €	1,51 €	1	1,51 €
ud.	Disco de lija SiC de 2400 granos	1,25 €	0,26 €	1,51 €	1	1,51 €
ud.	Disco de lija SiC de 4000 granos	1,25 €	0,26 €	1,51 €	1	1,51 €
ud.	Paño para pulido de 0,25 µm	20,00 €	4,20 €	24,20 €	1	24,20 €
ud.	Electrodo de referencia Ag/AgCl	215,00 €	45,15 €	260,15 €	1	260,15 €
ud.	Electrodo auxiliar de Platino	240,00 €	50,40 €	290,40 €	1	290,40 €
L	Agua destilada	4,10 €	0,86 €	4,96 €	0,5	2,48 €
TOTAL						1.278,02 €

Figura 56 Tabla con el precio total de los materiales empleados.

MANO DE OBRA		Precio (€)	Cantidad	Precio (€)
Ud.	Descripción			
h.	Oficial de laboratorio	30,00 €	300	9.000,00 €
TOTAL				9.000,00 €

Figura 57 Tabla con el precio de la mano de obra.

Ud.	Descripción	Cuota mensual(€)	Cantidad	Precio (€)
mes	Tribómetro	125,00 €	2	250,00 €
mes	Potenciostato	53,10 €	2	106,21 €
mes	Limpiador Ultrasónico	6,87 €	2	13,74 €
mes	Perfilómetro	139,58 €	2	279,17 €
mes	Desbastadora	4,14 €	2	8,28 €
TOTAL				657,39 €

Figura 58 Tabla con el coste total del uso de los equipos.

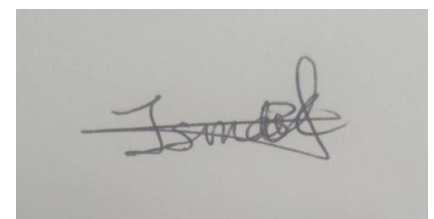
Descripción	Importe(€)
Materiales	1.278,02 €
Mano de obra	9.000,00 €
Equipo empleado	657,39 €
Gastos generales	1.312,25 €
TOTAL	12.247,66 €

Figura 59 Presupuesto total del proyecto.

El presupuesto total asciendo a la cantidad de 12247,66 €.

4. Referencias

- [1] Kiradzhyska, D. D., & Mantcheva, R. D. (2019). Overview of biocompatible materials and their use in medicine. *Folia Med (Plovdiv)*, 61(1), 34-40.
- [2] Hertz, H. (1882). Ueber die Berührung fester elastischer Körper.
- [3] Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). *Tribology: friction and wear of engineering materials*. Butterworth-Heinemann.
- [4] <https://www.jpe-innovations.com/precision-point/hertz-contact-practical-implementations/> Accedido 9-junio-2022
- [5] <https://es.wikipedia.org/wiki/Fricci%C3%B3n#:~:text=La%20fuerza%20de%20fricci%C3%B3n%20es,entre%20las%20superficies%20en%20contacto> Accedido 9-junio-2022.
- [6] Munoz, A. I., Espallargas, N., & Mischler, S. (2020). *Tribocorrosion*. Cham (Switzerland): Springer International Publishing.
- [7] Cao, S., & Mischler, S. (2020). Tribocorrosion of a CoCrMo alloy in sulfuric acid-glycerol mixtures. *Wear*, 458.
- [8] Rovira, A., Dalmau-Borrás, A., Roda-Buch, A., Cardona, S.C., Navarro-Laboulais, J., Igual-Muñoz, A. Numerical model of the wear of an AISI316L under tribocorrosion conditions in a reciprocating tribometer. Krakow, 9-13 sep. 2018. Eurocorr 2018.
- [9] Hyslop, D. J. S.; Abdelkader, A. M.; Cox, A.; Fray, D. J. Electrochemical Synthesis of a Biomedically Important Co-Cr Alloy. *Acta Materialia*. 2010, 58, 3124-3130.ç
- [10] Tarzia, V., Bottio, T., Testolin, L., & Gerosa, G. (2007). Extended (31 years) durability of a Starr-Edwards prosthesis in mitral position. *Interactive cardiovascular and thoracic surgery*, 6(4), 570-571.

A rectangular box containing a handwritten signature in black ink. The signature is stylized and appears to be 'J. S. M.' or similar, with a horizontal line drawn through the middle of the letters.