



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Investigación de la variación del coeficiente de rozamiento  
en biomateriales en tribómetros recíprocos

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Mecánica

AUTOR/A: Gomis Navarro, Joan

Tutor/a: Rovira Cardete, Andrés

Cotutor/a externo: KLYATSKINA RUSINOVICH, ELIZAVETA

Director/a Experimental: BERMUDEZ CASTAÑEDA, ANGELA

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

# **UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA**

## **Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño**

### **INVESTIGACIÓN DE LA VARIACIÓN DEL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO EN BIOMATERIALES EN TRIBÓMETROS RECIPROCANTES**

**Trabajo Fin de Grado**

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**AUTOR/A: Joan Gomis Navarro**

**Tutor/a: Andrés Rovira Cardete**

**Primer tutor/a externo/a: Elizaveta Klyatskina Rusinovich**

**Director/a Experimental: Ángela Bermúdez Castañeda**

**CURSO ACADÉMICO: 2021-2022**



## RESUMEN

El objetivo de este trabajo es investigar la variación del coeficiente de fricción (COF) en distintas condiciones en el ensayo de materiales metálicos para usos biomédicos. Para ello se empleará un tribómetro recíprocante que permite aplicar distintos tipos de movimiento, así como distintos valores de presión y frecuencia.

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 diseño de implantes médicos y la selección del metal más apropiado.

El trabajo del estudiante consistirá en la programación del tribómetro y la realización de los ensayos. Posteriormente se realizará el tratamiento de los datos y la discusión de los resultados.

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



## RESUMEN

L'objectiu d'aquest treball és investigar la variació del coeficient de fricció (COF) en diferents condicions en l'assaig de materials metàl·lics per a fins biomèdics. Per a això s'utilitzarà un tribòmetre reciprocant que permetix aplicar diferents tipus de moviment, així com diferents valors de pressió i freqüència.

El COF és un paràmetre fonamental per a descriure el comportament tribològic de materials i la seua obtenció únicament es pot fer de forma experimental. Els valors obtinguts són molt importants en les simulacions numèriques d'interès per al disseny d'implants mèdics i la selecció del material més apropiat.

El treball de l'estudiant consistirà en la programació del tribòmetre i la realització dels assajos . Posteriorment es realitzarà el tractament de les dades i la discussió dels resultats.

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



## ABSTRACT

The aim of this work is to investigate the coefficient of friction's variation in different conditions in the testing of metallic materials for biomedical uses. For this purpose, it has been used a reciprocating tribometer which allows the application of several types of movement, as well as different values of pressure and frequency.

The COF is an essential parameter for describing the tribological behavior of materials and it only can be obtained experimentally. The values obtained are especially important in numerical simulations of interest for the design of medical implants and the selection of the most appropriate metal.

The work of the student consists in the tribometer programming and the performance of the tests. Subsequently the data treatment and the discussion of the results is going to be realized.

**KEYWORDS:** COF; materials testing, tribology, tribometer.



## Contenido

1 Memoria .....	7
1.1 Objetivo .....	7
1.2 Justificación .....	7
1.2.1 Justificación técnica .....	7
1.2.2 Justificación académica .....	7
1.3 Contexto .....	7
1.4 Tribología en contactos deslizantes .....	7
1.4.1 Contacto Elástico .....	7
1.4.2 Fricción .....	8
1.4.3 Desgaste .....	9
1.5 Ensayo tribológico en el laboratorio .....	10
1.6 Procesamiento de datos .....	11
1.6.1 Lectura de datos y cálculo del retraso .....	12
1.6.2 Estimación de la velocidad .....	16
1.6.3 Cálculo del coeficiente de fricción .....	17
1.6.4 Cálculo del volumen .....	21
1.7 Resultados y discusión .....	24
1.7.1 Coeficiente de rozamiento .....	24
1.7.2 Desgaste .....	26
1.8 Conclusiones .....	30
1.9 Referencias .....	31
1.10 Anexos .....	32
1.10.1 Tablas de rugosidad .....	32
1.10.2 Gráficas de rugosidad de las muestras .....	32
1.10.3 Código de MATLAB .....	35
1.10.4 Imágenes de las huellas producidas .....	53
1.10.5 Gráficas cof-velocidad y cof-posición .....	59
2 Pliego de condiciones .....	95
2.1 Materiales .....	95
2.2 Equipos .....	95



2.3 Procedimiento experimental.....	97
3 Presupuesto.....	99



# 1 Memoria

## 1.1 Objetivo

El objetivo de este trabajo es investigar la variación del coeficiente de fricción (COF) en distintas condiciones en el ensayo de materiales metálicos para usos biomédicos. Para ello se empleará un tribómetro recíprocante que permite aplicar distintos tipos de movimiento, así como distintos valores de presión y frecuencia.

## 1.2 Justificación

### 1.2.1 Justificación técnica

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 diseño de implantes médicos y la selección del metal más apropiado.

El trabajo del estudiante consistirá en la programación del tribómetro y la realización de los ensayos. Posteriormente se realizará el tratamiento de los datos y la discusión de los resultados.

### 1.2.2 Justificación académica

Según la normativa marco de TFG-TFM de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), es obligatorio que el estudiante presente un trabajo final de grado para obtener el título de Graduado en Ingeniería Mecánica.

## 1.3 Contexto

Se dispone de una máquina, un tribómetro, el cual presenta varias problemáticas. El grupo de investigación quiere extraer unos datos y hacer una puesta a punto de la máquina en cuestión.

## 1.4 Tribología en contactos deslizantes

La tribología es la ciencia encargada del estudio de los fenómenos tecnológicos de desgaste, fricción y lubricación. El marco tribológico aparece cuando dos cuerpos se cargan y se mueven uno contra el otro.

Estos tres fenómenos tribológicos resultan de una compleja interacción entre las superficies de los cuerpos cuando existe movimiento relativo entre ellos e implica una interacción de factores físicos, químicos mecánicos y de materiales.

En este tipo de situaciones, las superficies en contacto pueden sufrir dos tipos de deformaciones dependiendo del tipo de tensiones predominantes. Deformación elástica, la cual es reversible y; si las cargas superan un umbral crítico, pueden aparecer también deformaciones plásticas permanentes.

Para la redacción de este apartado se ha consultado la referencia [3].

### 1.4.1 Contacto Elástico

Tanto la deformación elástica como la presión resultante del contacto entre superficies perfectamente lisas pueden ser determinadas por la teoría de Hertz. Según esta teoría [2], Hertz asume pequeñas deformaciones, deformaciones elásticas, que las superficies son lisas y que éste contacto se realiza sin fricción.

El radio del área de contacto entre ambas superficies se define, de acuerdo con la teoría de Hertz, como:

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

y se mide en metros.  $F_n$  es la fuerza normal [N],  $E'$  es el módulo reducido de Young [Pa] y  $R'$  es el radio reducido de curvatura [m]. La presión máxima de contacto (tensión de Hertz) se calcula como:

$$P_{\max} = 3 F_n / 2 \pi a^2 \quad (2)$$

y se mide en Pascales. El módulo reducido de Young se define como:

$$\frac{1}{E'} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1-\nu_A^2}{E_A} + \frac{1-\nu_B^2}{E_B} \right] \quad (3)$$

donde  $\nu_A$  y  $\nu_B$  son los coeficientes de Poisson de los cuerpos en contacto  $A$  y  $B$ , respectivamente, y  $E_A$  y  $E_B$  son los módulos de Young de los cuerpos en contacto  $A$  y  $B$ , respectivamente.

La Figura 1 representa el contacto bola plano según el modelo de Hertz.

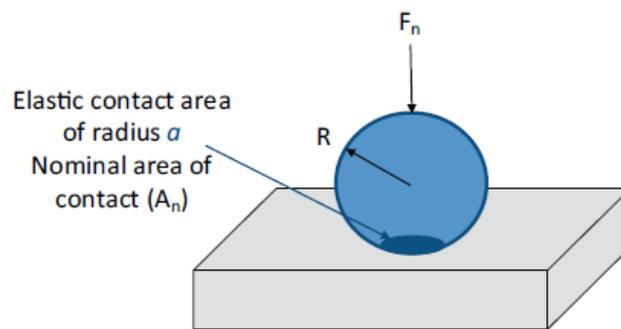


Figura 1. Contacto bola-plano [3].

El radio reducido de curvatura se calcula como:

$$\frac{1}{R'} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} = \frac{1}{R_{Ax}} + \frac{1}{R_{Ay}} = \frac{2}{R_A} \quad (4)$$

Estas son las ecuaciones de Hertz para calcular la presión de contacto y el área de contacto para la geometría *ball-on-flat*.

En este punto cabe destacar que, aunque la presión máxima de Hertz utilizada es mayor que el límite elástico del material CoCr, no plastificará por condiciones de presión hidrostática [2].

#### 1.4.2 Fricción

La fricción se define como la fuerza resistente relativa al movimiento entre dos sólidos en contacto cuando una fuerza tangencial externa es aplicada.

La fuerza de fricción no es una propiedad intrínseca de los materiales en contacto, sino más bien una respuesta del sistema en conjunto. Además, la fricción depende de parámetros como las fuerzas de contacto, el tipo de movimiento relativo y la velocidad de dicho movimiento.

La primera ley de la fricción postula que la fuerza de fricción es directamente proporcional a la fuerza aplicada. Gracias a ella podemos definir el coeficiente de fricción como la división entre la fuerza de fricción y la fuerza normal aplicada:

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (5)$$

donde  $F_t$  es la fuerza de fricción [N] y  $F_n$  es la fuerza normal aplicada [N].

La Figura 2 nos dice que la fuerza de fricción es directamente proporcional a la carga aplicada.

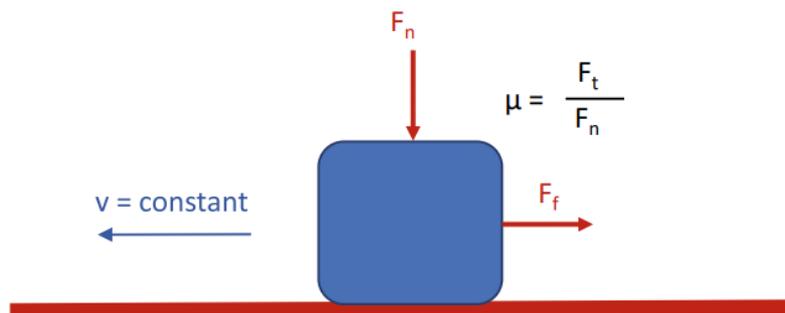


Figura 2. Definición del Coeficiente de Fricción [3]

### 1.4.3 Desgaste

El desgaste se define como la pérdida progresiva de material en la superficie de un cuerpo en contacto como resultado del movimiento relativo con otro cuerpo. También se puede definir como la eliminación de material de la superficie de un sólido debido al efecto de la acción mecánica. El desgaste puede aparecer en una amplia variedad de contactos y varía desde un único mecanismo a la combinación de muchos mecanismos de desgaste.

Al igual que la fricción, la resistencia al desgaste no es una propiedad intrínseca de los materiales, sino una respuesta del sistema en conjunto. No obstante, como el desgaste incluye la pérdida o desplazamiento del material; propiedades como la dureza, tensión de rotura o estabilidad química están más relacionadas con la resistencia al desgaste de ciertos sistemas tribológicos que con la respuesta a la fricción.

En este tipo de ensayos se utiliza un material inerte, muy duro y con alta resistencia al desgaste y el material base, un metal pasivo. Mediante el modelo de Archard [1] se describe el desgaste del material menos duro y asumimos que solamente sucede desgaste en este material.

Dado que el acabado de las muestras utilizadas para los ensayos es tipo espejo, se trata de una superficie lisa donde desliza la bola de alúmina. En este caso, el material en la zona de contacto es empujado por el indentador en movimiento (abrasión o arado). Como consecuencia, la deformación sigue acumulándose a medida que el material deformante realiza las pasadas. Finalmente, la deformación acumulada supera localmente el umbral crítico que el material puede soportar (*ratchetting threshold*). Llegado este caso, el material se rompe y genera partículas de desgaste a través de los mecanismos de abrasión (*ploughing*).

Para determinar el volumen de la huella en el desgaste por abrasión se utiliza el modelo de Archard [1]:

$$V_{tot} = K L F_n / H \quad (6)$$

donde  $V_{tot}$  es el volumen de desgaste perdido [ $\text{mm}^3$ ],  $K$  es el coeficiente de desgaste adimensional,  $L$  es la longitud de deslizamiento [ $\text{m}$ ],  $F_n$  es la fuerza normal [ $\text{N}$ ] y  $H$  es la dureza [ $\text{MPa}$ ] de la superficie más blanda, es decir, la del CoCr.

### 1.5 Ensayo tribológico en el laboratorio

Se han realizado ensayos tribológicos en el laboratorio con el objetivo de obtener valores experimentales acerca del coeficiente de fricción. Los ensayos se han llevado a cabo mediante un tribómetro recíprocante del tipo *ball-on-flat* y, en cuanto a los materiales, se han utilizado condiciones estándar de comparación. El material base utilizado ha sido una aleación de CoCr (setenta por ciento de cobalto y treinta por ciento de cromo) contra una bola de alúmina (AlO) como material inerte. Esta aleación de CoCr se utiliza como material biocompatible para aplicaciones biomédicas. Ya que la resistencia al desgaste es una característica exigida en este tipo de aplicaciones, se ha elegido la alúmina gracias a sus propiedades inertes y su elevada dureza.

Se ha usado el tribómetro recíprocante de la marca *microtest* modelo *MTL/10/AT*, Figura 3.

Las muestras de CoCr (Figura 4) han sido preparadas superficialmente con el fin de realizar ensayos de manera correcta y fiable y donde no existan asperezas superficiales capaces de provocar valores erróneos del coeficiente de fricción (Tablas de rugosidad).



Figura 3. Tribómetro recíprocante MTL/10/AT de la marca *microtest*.



Figura 4. Muestras del material biocompatible CoCr utilizadas para los ensayos.

Los parámetros variables entre cada ensayo son la fuerza normal ( $F_n$ ) y la frecuencia ( $f$ ).

Ensayos en seco					
Ensayo	$F_n$ (N)	f (Hz)	A (mm)	Ciclos (-)	Pmax (Mpa)
Tipo 1	5,56	1	2,5	3600	1294
Tipo 2	3,56	1	2,5	3600	1115
Tipo 3	7,56	1	2,5	3600	1433
Tipo 4	5,56	0,5	2,5	1800	1294
Tipo 5	3,56	0,5	2,5	1800	1115
Tipo 6	7,56	0,5	2,5	1800	1433
Tipo 7	5,56	2	2,5	7200	1294
Tipo 8	3,56	2	2,5	7200	1115
Tipo 9	7,56	2	2,5	7200	1433

Tabla 1. Modelos de ensayo.

En la Tabla 1 se observan los parámetros característicos para cada modelo de ensayo. Como se puede observar, se han utilizado tres frecuencias y tres fuerzas normales diferentes. Con el fin de comprobar la repetitividad del sistema cada tipo de ensayo se repitió tres veces, lo que hace un total de veintisiete ensayos. La duración de cada ensayo es de una hora, independientemente de la frecuencia utilizada. Como resultado, obtenemos una huella cuya longitud es de 5 milímetros.

Otros parámetros de interés son el radio del área de contacto [mm] o la presión de contacto máxima [MPa]. En la Tabla 2 y Tabla 3 se exponen dichos parámetros.

Radius of Contact area (a) [mm]	
$F_n$ (N)	$R'= 3\text{mm}$
7,56	0,0502
5,56	0,0453
3,56	0,0390

Tabla 2. Valores del radio del área de contacto.

Max Contact Pressure (Pmax) [MPa]	
$F_n$ (N)	$R'= 3\text{mm}$
7,56	1433
5,56	1294
3,56	1115

Tabla 3. Valores de la presión máxima de contacto.

## 1.6 Procesamiento de datos

Para procesar los datos obtenidos con el tribómetro se ha utilizado el programa de *MATLAB*. Con este programa se ha pasado de los datos que nos aporta el tribómetro como la fuerza tangencial, posición o tiempo hasta llegar a graficar la relación entre el coeficiente de rozamiento y la velocidad.

Inicialmente el equipo de investigación se ha encontrado con unos problemas de sincronización de datos. Esta desincronización entre las señales originales de posición y fuerza tangencial es debida a problemas relacionados con el tribómetro utilizado. Por un lado, el tribómetro mide la señal correspondiente a la fuerza tangencial desde la célula de carga. La posición, en cambio, proviene desde el controlador del cabezal del tribómetro. El sistema de control no asegura la sincronización de ambas señales; por tanto, es necesario verificar si existe desfase entre ambas y compensarlo en los registros medidos.

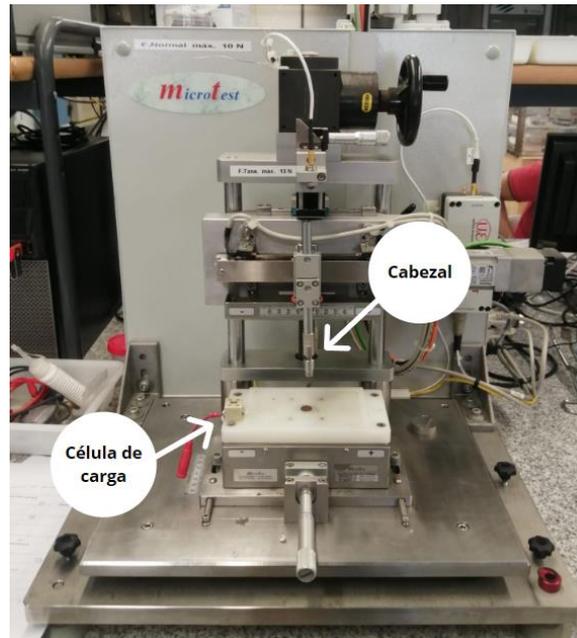


Figura 5. Partes del tribómetro.

### 1.6.1 Lectura de datos y cálculo del retraso

Tras terminar el ensayo, el software del tribómetro genera un archivo Excel donde se pueden observar datos de posición, tiempo o fuerza tangencial como se muestra en la Tabla 4.

Fuerza [N]	Posición [mm]	Tiempo [s]
-6,185	-2,416	0,046
-6,309	-3,010	0,109
-6,425	-3,451	0,171
-6,526	-3,487	0,234
-6,456	-3,077	0,312
-6,329	-2,376	0,374
-6,201	-1,481	0,421
-5,985	-0,515	0,483
-5,742	0,340	0,530

Tabla 4. Ejemplo de los datos aportados por el tribómetro.

Una vez obtenidos los archivos de Excel, se abren dentro del programa MATLAB y se procesan a través de funciones creadas, las cuales se presentan en el anexo. Mediante la función *obtener\_tau*, el archivo de Excel es leído y se obtiene una gráfica donde se pueden ver tanto coeficiente de fricción como posición del pin a lo largo del tiempo. Como entradas, tiene el fichero de Excel y la frecuencia y fuerza normal utilizadas para el ensayo. Esta función tiene dos objetivos. Por un lado, observar si existe un retraso entre el coeficiente de fricción y la posición del indentador. Este retraso lo llamamos *tau*. El orden de magnitud de este retraso es de centésimas de segundo. La Figura 6 es un ejemplo de ensayo donde se puede ver el retraso comentado.

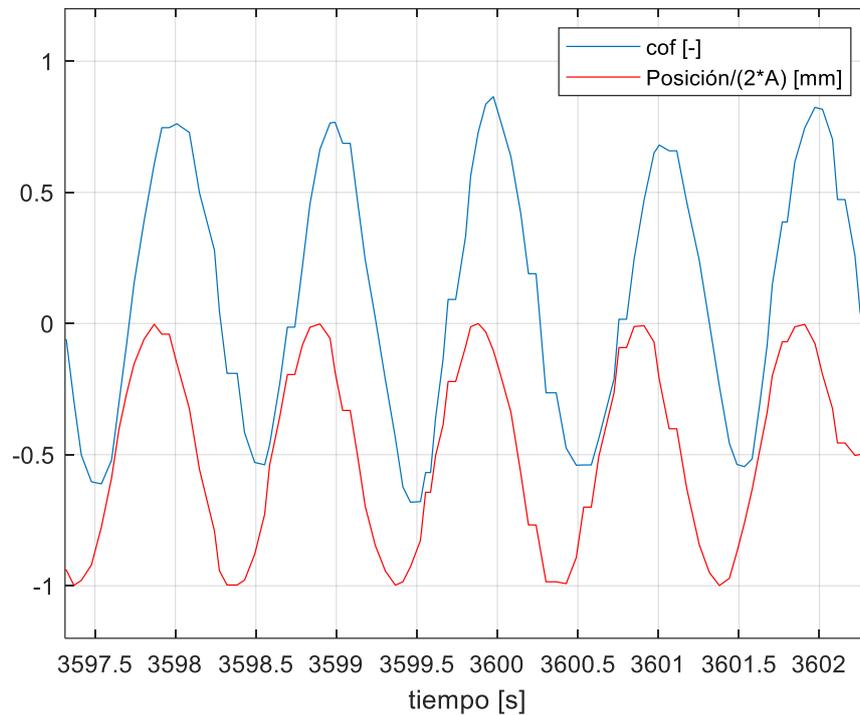


Figura 6. Gráfica generada por la función obtener\_tau.

Se quiere investigar la relación del cof con la velocidad. Puesto que el movimiento es sinusoidal, se puede ajustar una función coseno a la posición y obtener la derivada analítica para representar la velocidad. Para favorecer el tratamiento automático de los ensayos realizados, se opta por usar la función de referencia “coseno”. Se define un desfase  $\phi_0$  que permite expresar la posición como:

$$Y_s = A \cos(\omega t + \phi_0) \quad (7)$$

La Figura 7 es un ejemplo de ensayo donde las funciones no se corresponden con la función coseno.

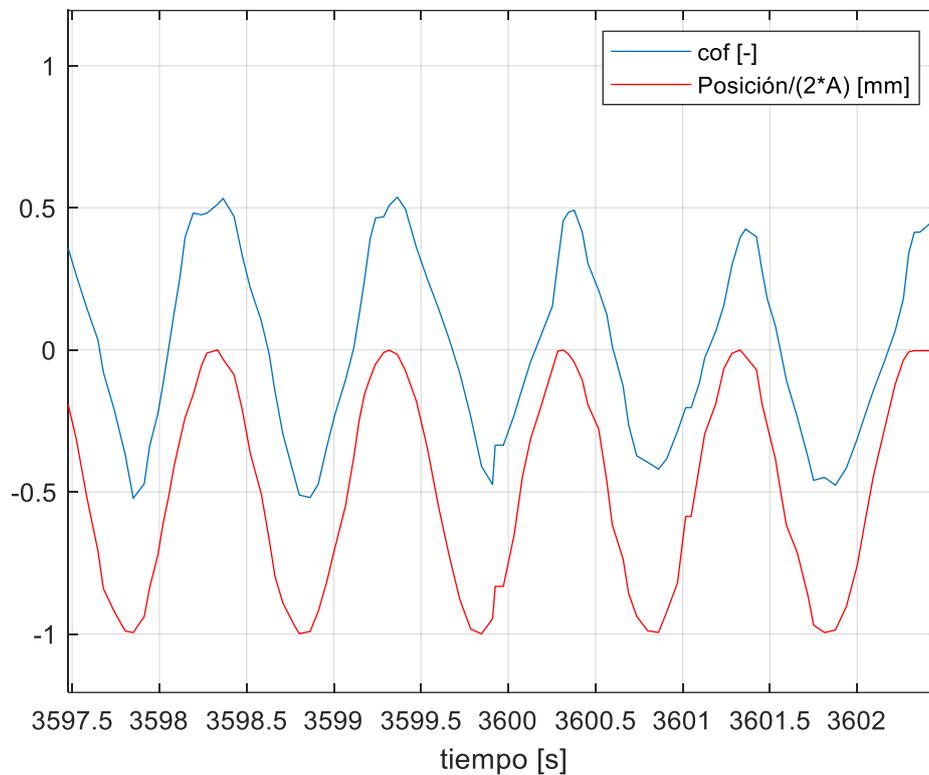


Figura 7. Gráfica generada por la función *obtener\_tau*.

Más tarde se ha empleado la función *comprobamos*. Como entradas, tiene la matriz de datos proveniente del archivo Excel, el retraso  $\tau$ ,  $\phi_0$  y la frecuencia y fuerza normal empleadas para el ensayo. El objetivo de esta función, por una parte, es comprobar que con el retraso  $\tau$  ha permitido que el  $\text{cof}$  y la posición no estén retrasadas entre sí. Por otra parte, nos da una gráfica de la posición donde se debe comprobar que gracias al factor  $\phi_0$ , ésta está coordinada perfectamente con el tiempo. A continuación, la Figura 8 y la Figura 9 muestran ejemplos de las gráficas que nos devuelve esta función.

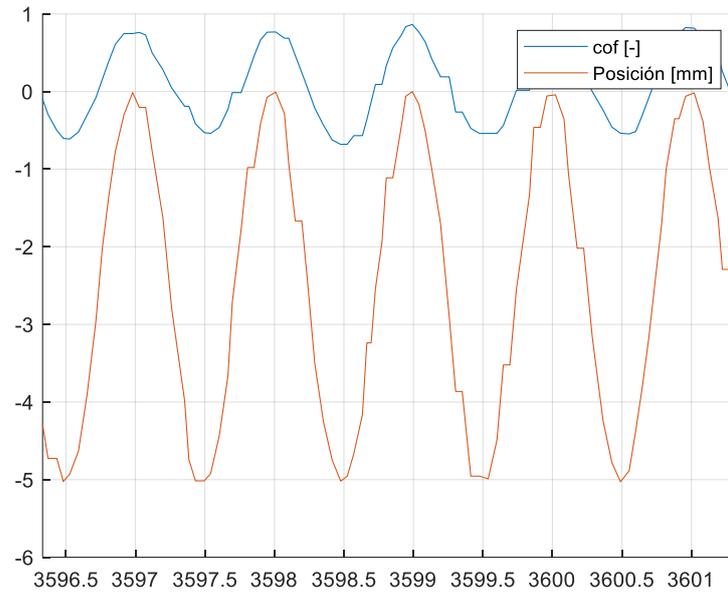


Figura 8. Cof y posición coordinados adecuadamente.

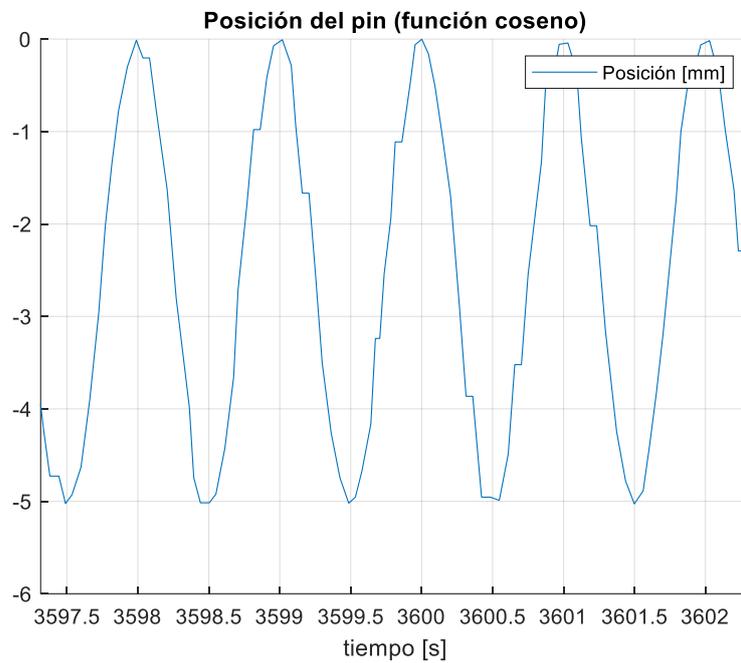


Figura 9. Gráfico para observar la sincronización de la posición y el tiempo gracias a  $\phi_0$ .

Una vez definidas las variables  $\tau$  y  $\phi_0$  se emplea la función `procesa_cof`.

### 1.6.2 Estimación de la velocidad

El coeficiente de rozamiento (cof) depende, principalmente, de la velocidad. Para ello se ha ajustado una función ( $Y_s$ ) a la posición medida. La estimación de la velocidad se ha realizado derivando analíticamente la función de posición  $Y_s$ .

$$Y_s = A \cos(\omega t + \text{phi}0) \quad (8)$$

$$V_s = -A \omega \sin(\omega t + \text{phi}0) \quad (9)$$

$$\omega = 2 \pi f \quad (10)$$

donde  $Y_s$  es la posición del indentador [mm],  $A$  es la amplitud del movimiento [mm],  $\omega$  es la velocidad angular [rad/s],  $t$  es el tiempo transcurrido medido por el tribómetro [s],  $\text{phi}0$  es la variable utilizada para ajustar la posición a la función coseno [rad] y  $f$  es la frecuencia utilizada para el ensayo [Hz].

Esta estimación se realiza dentro de la función *procesa\_cof*. Además, esta función nos proporciona varias gráficas. En las primeras se pueden observar tanto cof y posición medida como la velocidad y posición estimadas. En las dos siguientes veremos la relación obtenida entre el cof y la velocidad y la relación entre el cof y la posición para cada ensayo.

Las siguientes gráficas son un ejemplo de las que nos proporciona la función *procesa\_cof* para el ensayo 3 de 1Hz y 5.56N:

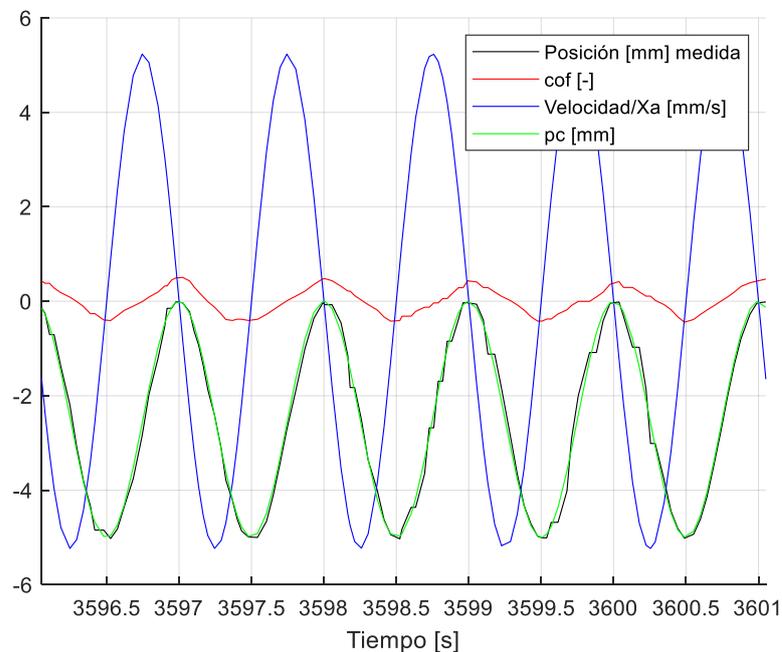


Figura 10. Gráfica acerca de la posición medida y la calculada, la velocidad y el cof; obtenida mediante *procesa\_cof*.

En la gráfica de la Figura 10 se pueden observar cuatro variables diferentes. La posición medida hace referencia a los valores de posición que nos ha proporcionado el propio tribómetro. El cof, como se ha dicho anteriormente, proviene de la relación entre la fuerza normal y la fuerza tangencial. La primera de estas es un valor conocido y

constante; la segunda, proviene del tribómetro al igual que la posición medida. Como se puede observar, tanto la posición medida como el cof presentan ciertas discontinuidades debidas a la falta de precisión en la adquisición de datos. Las dos variables restantes, la velocidad ( $V_s$ ) y la posición calculada ( $Y_s$ ), provienen de estimar el movimiento del identador como un movimiento sinusoidal (8) cuya amplitud y frecuencia es conocida.

### 1.6.3 Cálculo del coeficiente de fricción

Como se puede observar, en la Figura 11 el coeficiente de fricción alcanza valores máximos cuando la velocidad es nula (Zona A), en el momento en el que el cabezal lleva a un extremo y cambia de sentido. Cuando la velocidad es máxima, en cambio, existe un cambio de signo del cof (Zona B), en el momento en el que el cabezal está justo en el centro entre los dos extremos. Éste pasa por cero y cerca de este valor surgen unos problemas de sensibilidad en la célula de carga. Este cambio de signo del coeficiente de fricción se debe al cambio de signo en la aceleración (segunda ley de Newton). En la Figura 12 se puede observar esto gráficamente.

$$F = -m * a \quad (11)$$

donde  $F$  es la fuerza [N],  $m$  es la masa [kg] y  $a$  es la aceleración [ $m/s^2$ ].

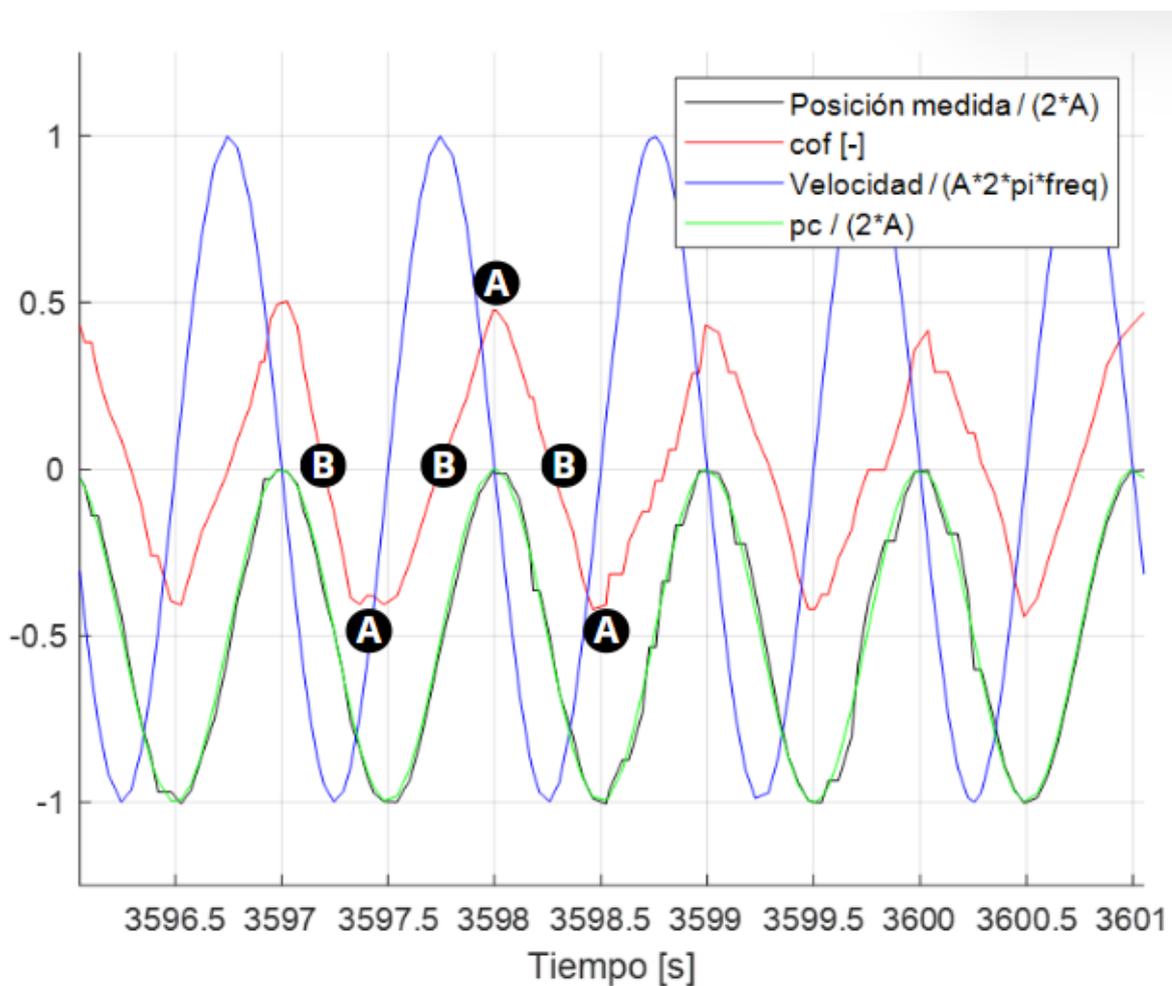


Figura 11. Gráfica creada por la función procesa\_cof.

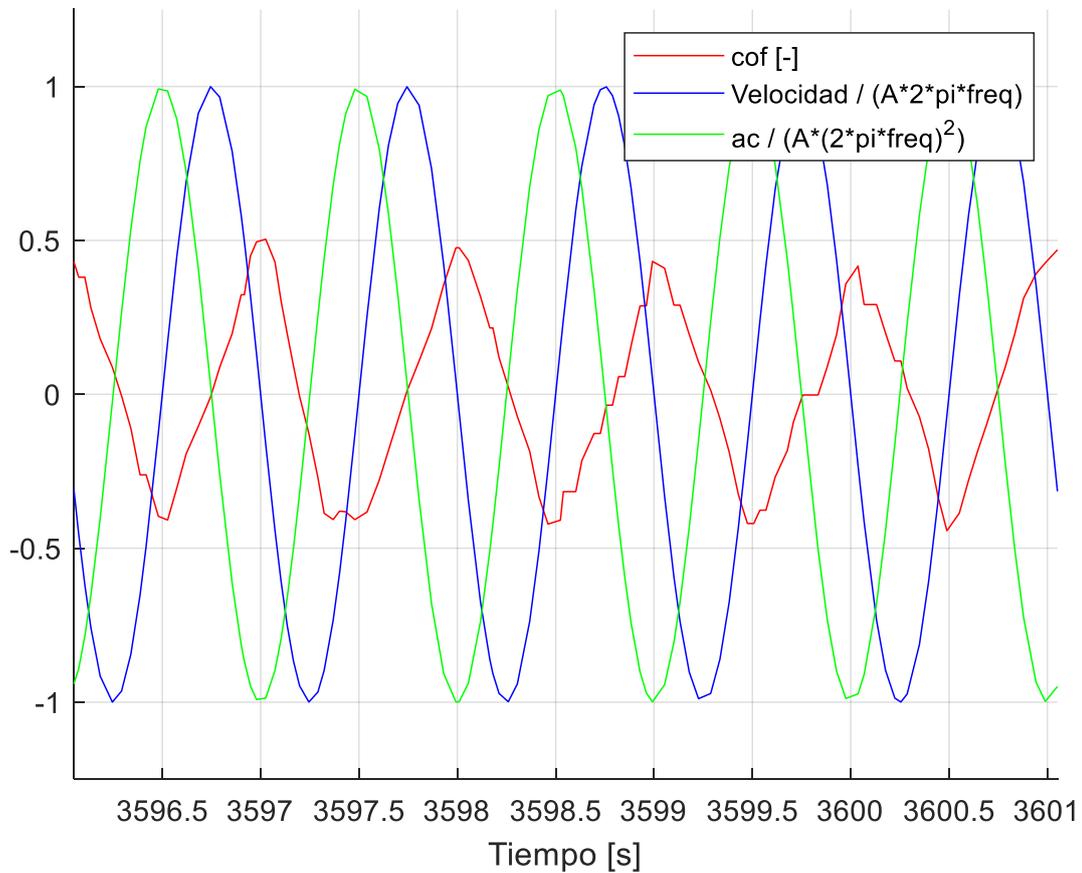


Figura 12. Gráfico sacado de MATLAB incluyendo la aceleración.

Sobre la Figura 12. Cuando la aceleración es positiva, la fuerza tangencial es negativa y por lo tanto el cof tiene valores negativos. Cuando ésta cambia de signo, también lo hace la fuerza tangencial y con ello el cof.

La Figura 13 muestra la relación existente entre la velocidad y el cof. Se observa cómo, para valores de velocidad nulos, se obtienen los máximos valores de cof, que se pueden corresponder con el coeficiente de rozamiento estático. A medida que aumenta la velocidad, el cof disminuye, como era de esperar. Como se ha observado en la Figura 12, cuando la velocidad es máxima aparece un cambio de signo en el cof

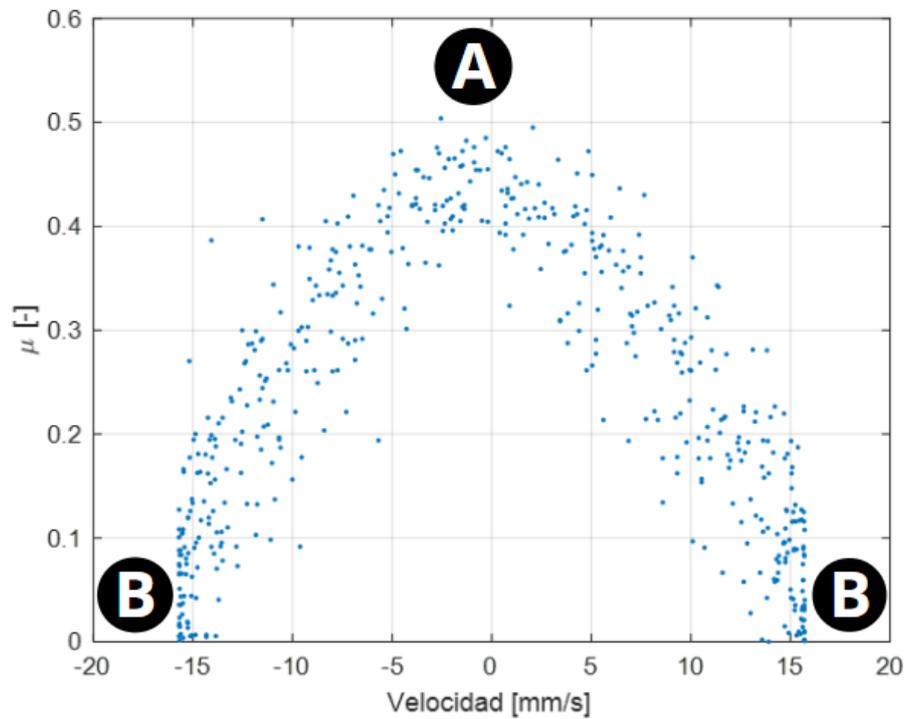


Figura 13. Gráfica acerca del coeficiente de fricción en función de la velocidad.

Sobre la Figura 13. A máxima velocidad (Zona B) los valores de cof se sitúan cercanos a cero y aparecen los problemas de sensibilidad. Cuando la velocidad es cero (Zona A) obtenemos los valores máximos de cof.

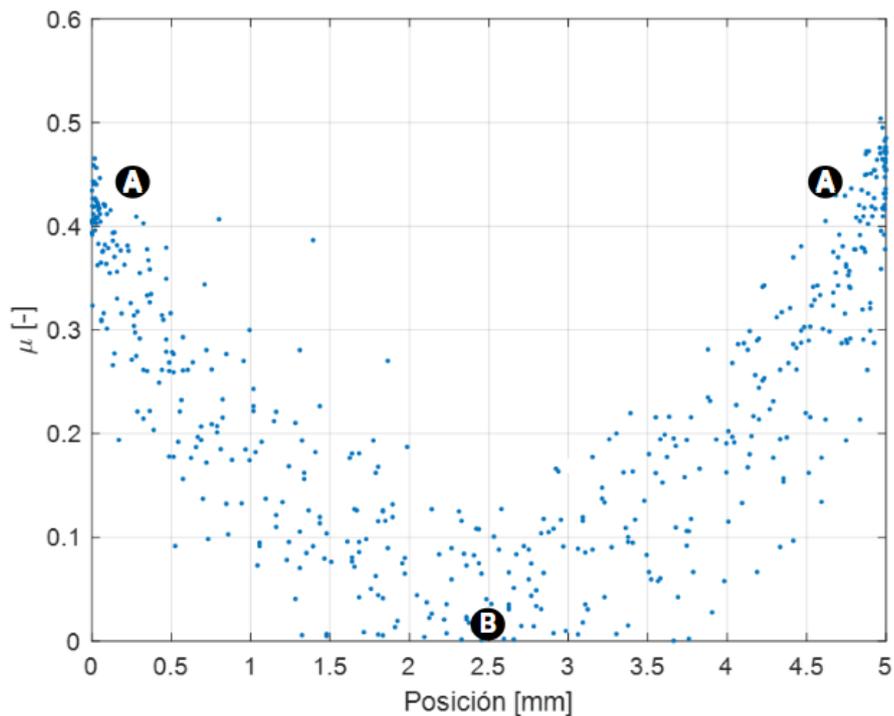


Figura 14. Gráfica acerca del coeficiente de fricción en función de la posición.

En la Figura 14 se representa la correlación entre la posición y el cof. Se pueden identificar las zonas A y B nombradas anteriormente. La zona A se corresponde con los valores que tienden al coeficiente de rozamiento estático, mientras que la zona B, al cambio de signo del cof.

Para obtener valores del cof, en las nubes de puntos obtenidas se ha observado que se podría ajustar una parábola del tipo:

$$y = a * x^2 + b * x + c \quad (12)$$

donde  $y$  es el valor del cof,  $x$  es el valor de la velocidad,  $a$  y  $b$  son factores que acompañan a la velocidad y  $c$  es el valor del coeficiente de rozamiento cuando la velocidad es nula, es decir, el valor del cof estático. El coeficiente  $b$  es nulo ya que la parábola es simétrica respecto a la recta  $x = 0$ .

Con el fin de proporcionar valores de cof que se ajusten a los resultados obtenidos experimentalmente, se ha creado una función de MATLAB llamada *ajusta\_parabola*. Esta función realiza un ajuste por mínimos cuadrados de la nube de puntos para obtener un valor de cof.

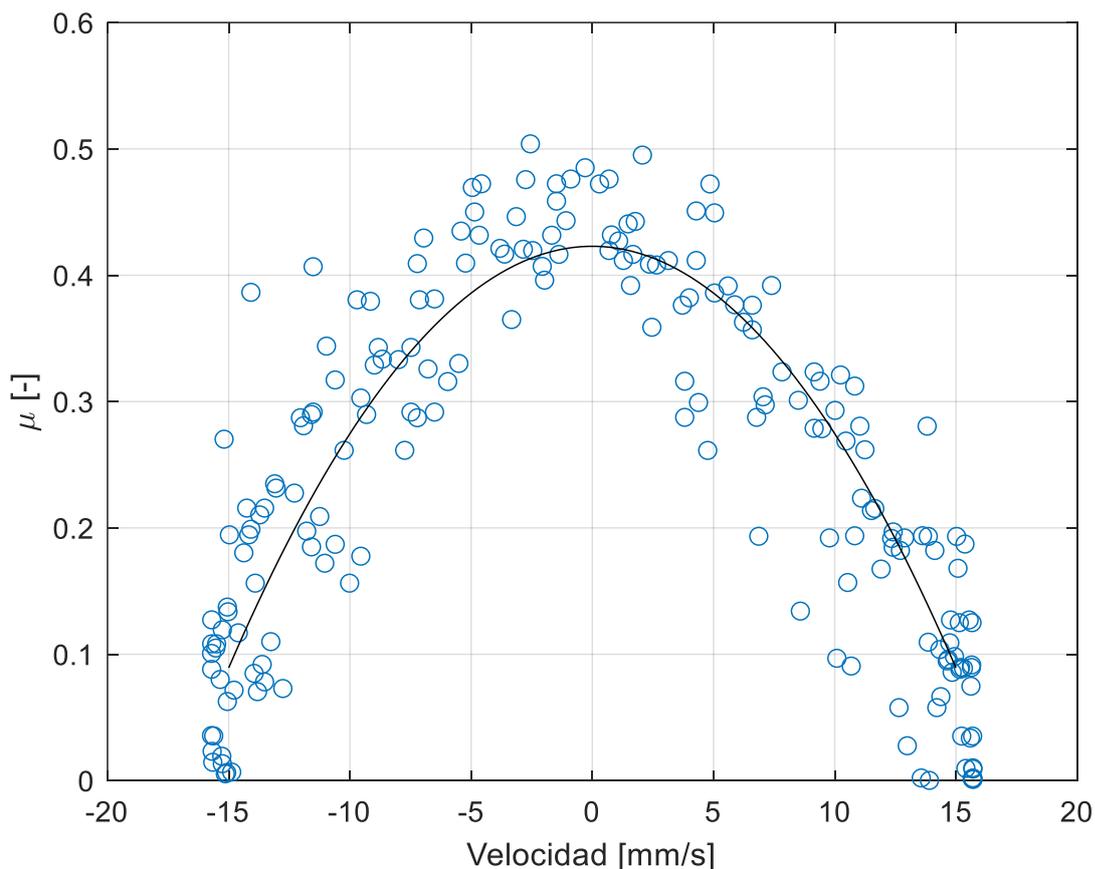


Figura 15. Gráfica proporcionada por la función *ajuste\_parabola*.

En Figura 16 la se puede ver de manera esquemática los pasos del procesamiento de datos.

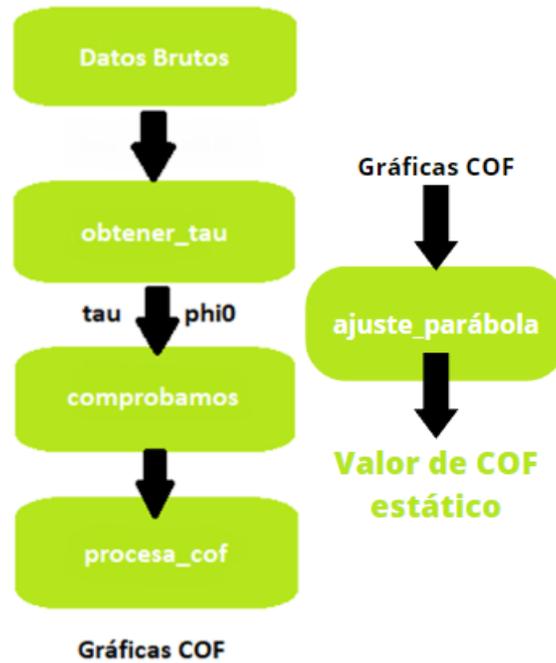


Figura 16. Esquema del procesamiento de datos.

#### 1.6.4 Cálculo del volumen

Para la obtención de valores acerca del volumen de material que se ha desprendido de la muestra, se han procesado las huellas de los ensayos mediante el perfilómetro *Filmetrics Profilm 3D*. A continuación, la Figura 17 muestra una imagen de dicho perfilómetro y la Figura 18 y Figura 19 muestran varios ejemplos de las huellas obtenidas.



Figura 17. Perfilómetro Filmetrics Profilm 3D.

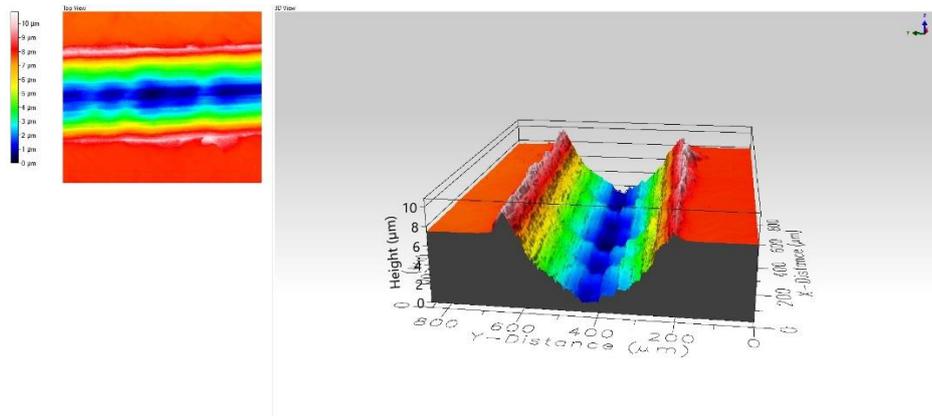


Figura 18. Zona desgastada obtenida mediante el perfilómetro para el ensayo 3 de 1Hz y 5,56N.

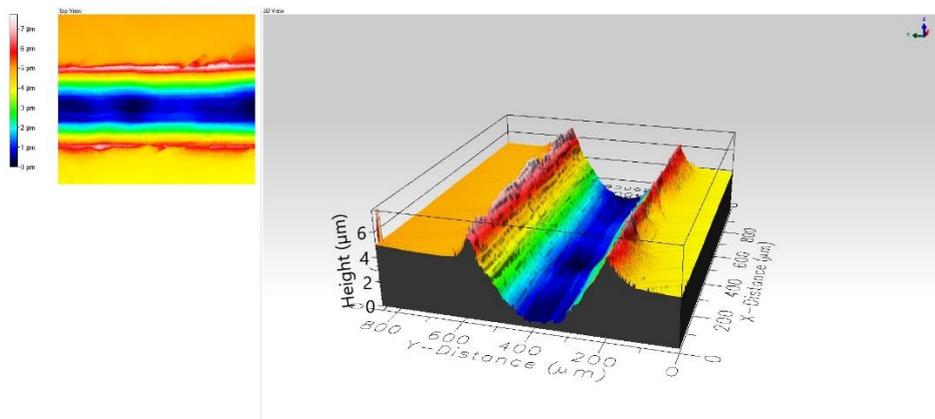


Figura 19. Zona desgastada obtenida mediante el perfilómetro para el ensayo 1 de 0,5Hz y 7,56N.

Estas imágenes (Figura 18 y Figura 19) muestran parte de la huella con la aplicación del perfilómetro. Más tarde, se han extraído datos acerca del perfil de las huellas, que han sido procesados mediante *MATLAB*. A continuación, la Figura 20 y la Figura 21 muestran imágenes sobre los perfiles de huella.

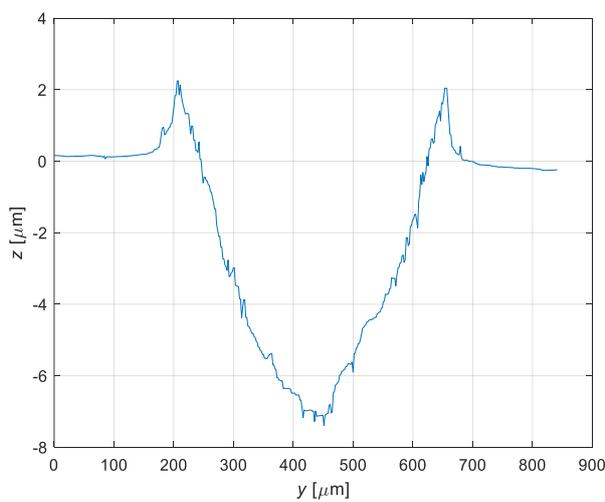


Figura 20. Perfil de huella procesado mediante *MATLAB* para el ensayo 3 de 1Hz y 5.56N.

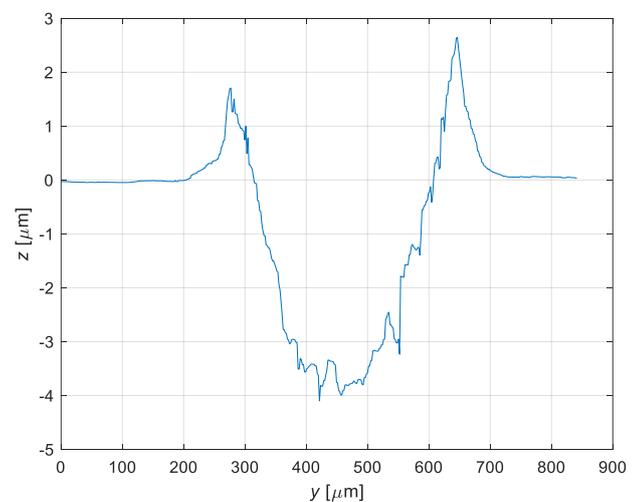


Figura 21. Perfil de huella procesado mediante *MATLAB* para el ensayo 1 de 0.5Hz y 5.56N.

Para el cálculo del área y el volumen se han utilizado las:

$$A_h = \int_{i_2}^{i_3} \text{surco}(x) dx = \sum_{i=i_2}^{i_3} \text{surco } i \quad (13)$$

$$V_{calc} = A_h L \quad (14)$$

donde  $A_h$  es el área de la huella [ $\mu\text{m}^2$ ],  $i_2$  e  $i_3$  son los puntos donde empieza la huella, el surco es el perfil que describe la huella,  $V_{calc}$  es el volumen total de la huella [ $\text{mm}^3$ ] y  $L$  la longitud de esta misma [ $\text{mm}$ ]. Cabe destacar que el sumatorio solo se realiza cuando  $\text{surco}(x)$  es negativo. En la imagen siguiente se puede ver el surco de manera más clara:

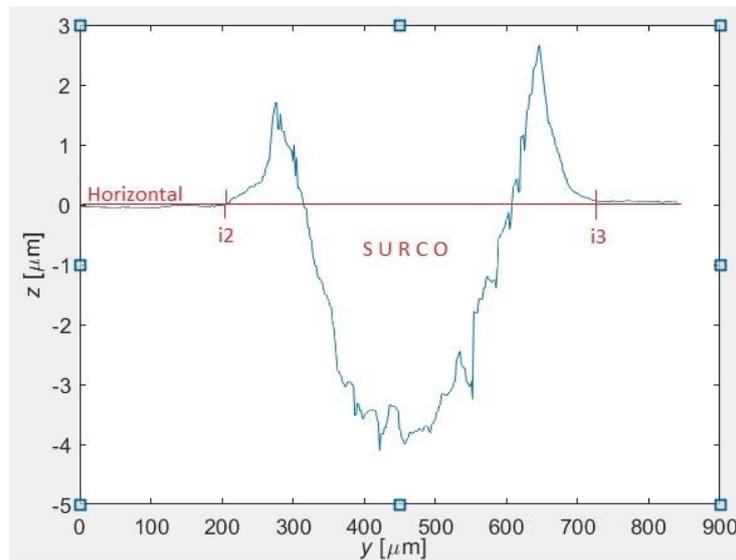


Figura 22. Imagen donde podemos visualizar los puntos  $i_2$  e  $i_3$  y el surco.

Para determinar el desgaste se ha utilizado el modelo de Archard [1]. A partir de la ecuación (6), se puede obtener el coeficiente  $K_H$  que representa el coeficiente adimensional de desgaste dividido por la dureza del material a ensayar:

$$K_H = \frac{V_{calc}}{F_n L} \quad (15)$$

$$L = 2 A n_c \quad (16)$$

donde  $K_H$  es el coeficiente de desgaste [ $\text{mm}^2/\text{N}$ ],  $V_{calc}$  es el volumen total de la huella [ $\text{mm}^3$ ],  $F_n$  es la fuerza normal aplicada [ $\text{N}$ ],  $L$  es la longitud de deslizamiento [ $\text{mm}$ ],  $A$  es la amplitud del movimiento [ $\text{mm}$ ] y  $n_c$  es el número de ciclos.

Con los valores de  $K_H$  obtenidos en los distintos ensayos se puede construir un mapa de desgaste en función de la frecuencia del movimiento y de la fuerza normal aplicada.

## 1.7 Resultados y discusión

### 1.7.1 Coeficiente de rozamiento

Después de realizar los pasos explicados en el apartado 1.6 en cada experimento, se ha obtenido un valor del coeficiente de fricción para cada uno de los ensayos. En la Tabla 5 se exponen dichos resultados.

Fuerza [N]	Frecuencia [Hz]	COF Obtenido			Media	Desviación Típica
		1	2	3		
5,56	1	<del>0,705411</del>	0,507504	0,422908	0,465	0,060
5,56	0,5	0,424049	0,505224	0,440389	0,457	0,043
5,56	2	0,179478	0,171213	0,136472	0,162	0,023
3,56	1	0,487012	0,474821	0,460651	0,474	0,019
3,56	0,5	0,457379	0,450314	0,477402	0,462	0,014
3,56	2	<del>0,297654</del>	0,06968	0,079569	0,075	0,007
7,56	1	<del>0,652395</del>	0,479807	0,423517	0,452	0,040
7,56	0,5	0,432352	0,470899	0,460415	0,455	0,020
7,56	2	0,095897	0,077125	0,066479	0,080	0,015

Tabla 5. Valores obtenidos del coeficiente de fricción para cada ensayo.

En la Tabla 6 se encuentran también los valores obtenidos de COF, agrupados en función de su valor.

Valores obtenidos de COF [-]				
		Frecuencia [Hz]		
		0,5	1	2
Fuerza [N]	3,56	0,46	0,47	0,07
	5,56	0,46	0,47	0,16
	7,56	0,45	0,45	0,08

Tabla 6. Valores obtenidos de COF.

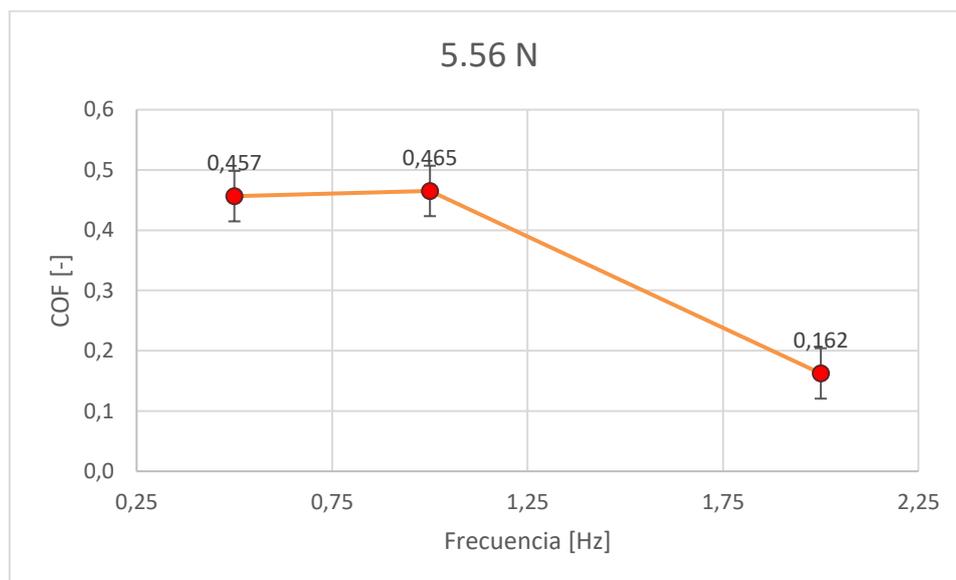


Figura 23. Gráfica donde se observan los valores obtenidos del coeficiente de rozamiento para 5.56N.

Para 5.56N los resultados acerca del coeficiente de rozamiento aparecen en la Figura 23. El valor obtenido a una frecuencia de 0.5Hz es de 0.457, a 1Hz es de 0.465 y a 2Hz es de 0.162.

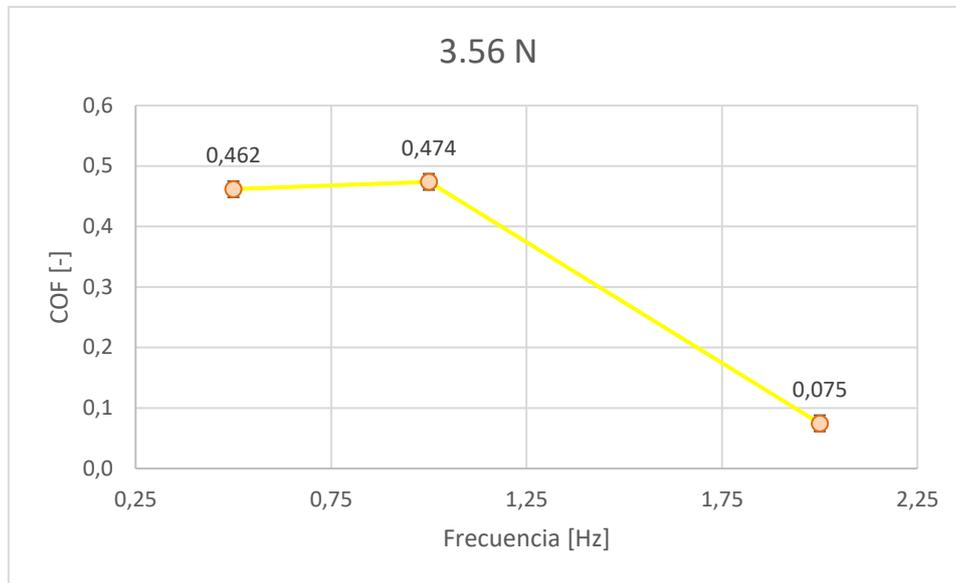


Figura 24. Gráfica donde se observan los valores obtenidos del coeficiente de rozamiento para 3.56N

Para 3.56N los resultados acerca del coeficiente de rozamiento aparecen en la Figura 24. El valor obtenido a una frecuencia de 0.5Hz es de 0.462, a 1Hz es de 0,474 y a 2Hz es de 0.075.

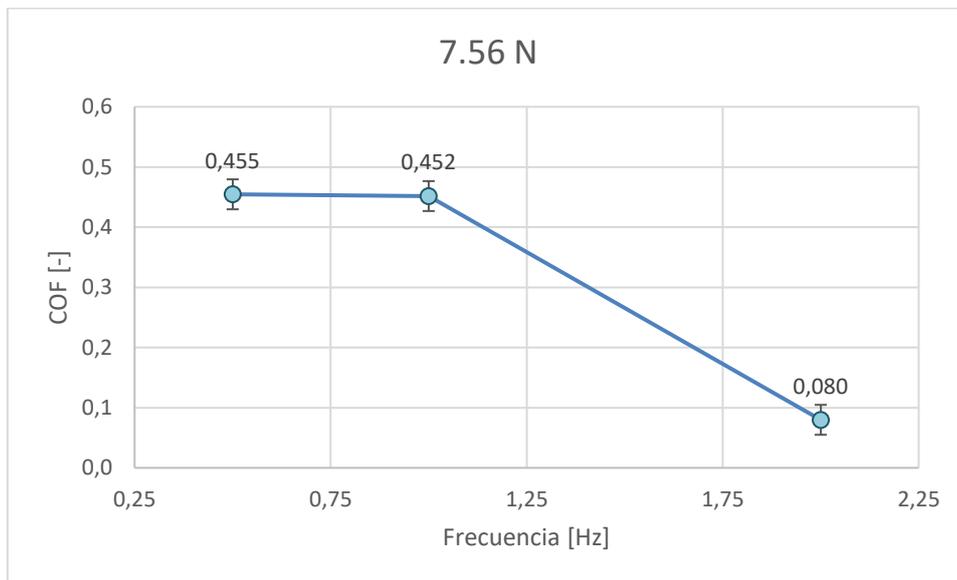


Figura 25. Gráfica donde se observan los valores obtenidos del coeficiente de rozamiento para 7.56N.

Para 7.56N los resultados acerca del coeficiente de rozamiento aparecen en la Figura 25. El valor obtenido a una frecuencia de 0.5Hz es de 0.455, a 1Hz es de 0.452 y a 2Hz es de 0.080.

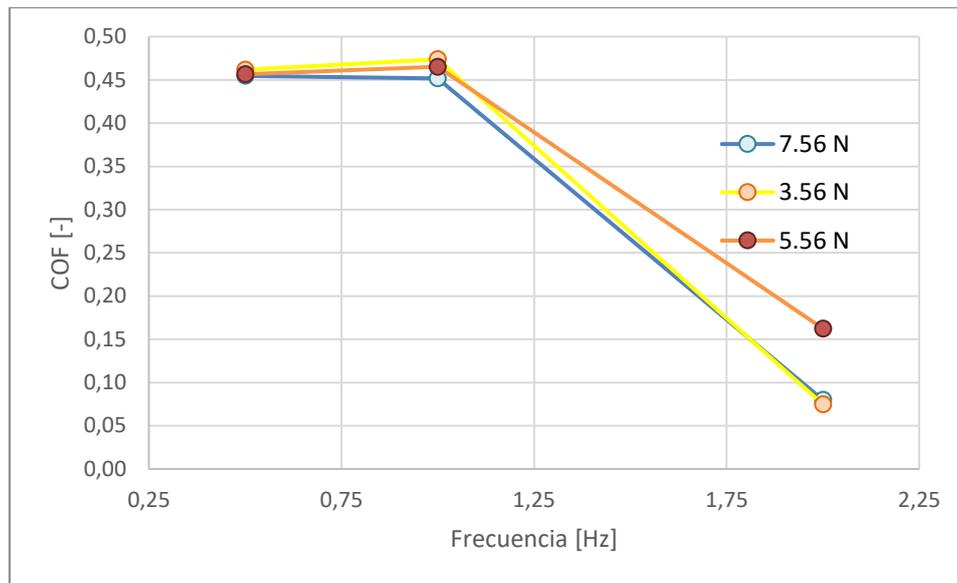


Figura 26. Gráfica comparativa de los resultados obtenidos del coeficiente de fricción para las diferentes cargas.

En la Figura 26 se pueden observar los resultados obtenidos acerca del coeficiente de fricción para los diferentes valores de carga y frecuencia utilizados durante los ensayos. Se puede decir que el valor de coeficiente de fricción permanece constante en un rango de frecuencias cercano a 0.5 y 1Hz mientras que existe un umbral de frecuencia donde el valor del cof disminuye considerablemente. Esto ocurre independientemente de la carga aplicada.

### 1.7.2 Desgaste

En la Tabla 7 se pueden observar los volúmenes obtenidos para las diferentes fuerzas normales (5.56, 3.56 y 7.56) N y para frecuencias de 1, 0.5 y 2 hercios. De estos volúmenes se ha calculado una media para cada tipo de ensayo y posteriormente se ha calculado el valor de  $K_H$ .

Fuerza [N]	Frecuencia [Hz]	Volúmenes obtenidos [ $\text{mm}^3 \cdot 10^{-3}$ ]			Media	Desviación Típica	Kh [ $\text{mm}^2/\text{N}$ ]
		1	2	3			
5,56	1	<del>20,1728</del>	8,7772	8,4793	8,628	0,211	4,31E-08
5,56	0,5	2,9885	3,3566	2,9845	3,110	0,214	3,11E-08
5,56	2	7,1868	8,5826	5,9789	7,249	1,303	1,81E-08
3,56	1	4,3045	3,7249	5,2127	4,414	0,750	3,44E-08
3,56	0,5	1,9139	2,0031	1,4299	1,782	0,308	2,78E-08
3,56	2	1,4677	1,9444	1,3587	1,590	0,311	6,20E-09
7,56	1	10,8845	11,1894	10,7834	10,952	0,211	4,02E-08
7,56	0,5	3,7924	4,4003	4,2975	4,163	0,325	3,06E-08
7,56	2	<del>5,7831</del>	9,8604	10,8741	10,367	0,717	1,90E-08

Tabla 7. Volúmenes obtenidos

En la Tabla 8 se ofrece el mapa de desgaste realizado con las variables de fuerza normal y frecuencia.

		Valores obtenidos de $K_h$ [ $\text{mm}^2/\text{N} \cdot 10^{-8}$ ]		
		Frecuencia [Hz]		
		0,5	1	2
Fuerza [N]	3,56	2,78	3,44	0,62
	5,56	3,11	4,31	1,81
	7,56	3,06	4,02	1,90

Tabla 8. Valores obtenidos de  $K_H$ .

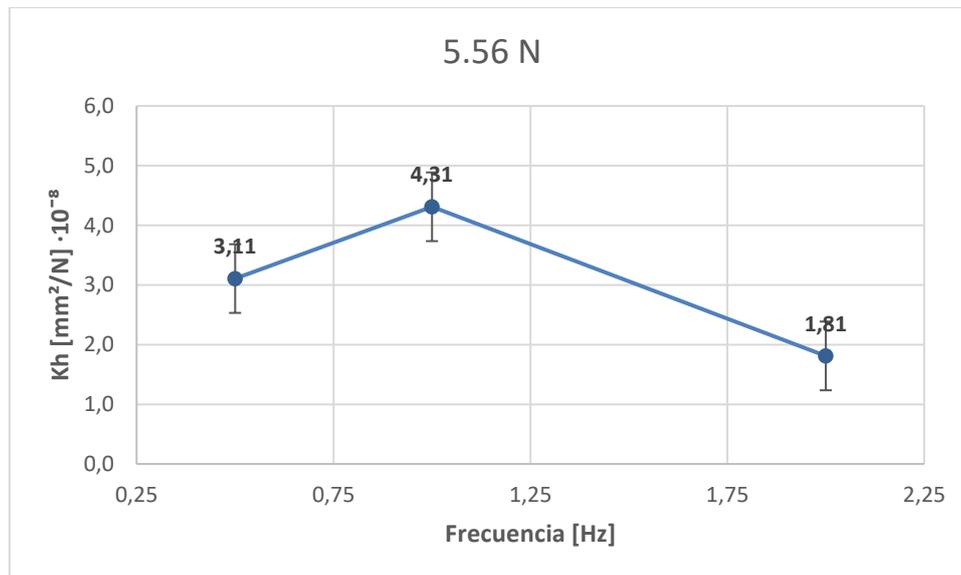


Figura 27. Gráfica donde se observan los valores obtenidos del coeficiente de desgaste para 5.56N.

Para 5.56N los resultados de coeficiente de desgaste aparecen en la Figura 27. A la frecuencia de 0.5Hz su valor es de  $3.11 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$ , a 1Hz es de  $4.31 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$  y a 2Hz es de  $1.81 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$ .

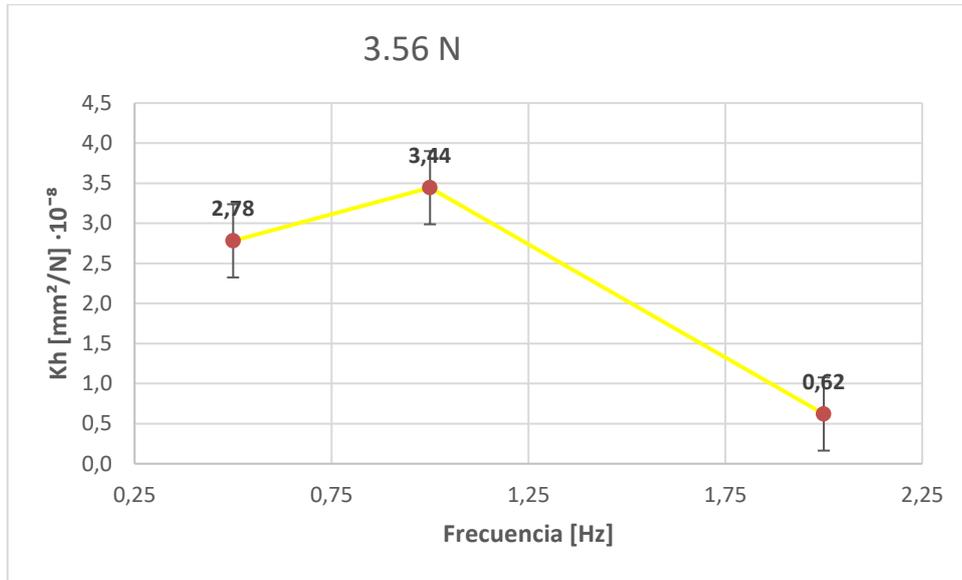


Figura 28. Gráfica donde se observan los valores obtenidos del coeficiente de desgaste para 3.56N.

Para 3.56N los resultados acerca del coeficiente de desgaste aparecen en la Figura 28. A la frecuencia de 0.5Hz su valor es de  $2.78 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$ , a 1Hz es de  $3.44 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$  y a 2Hz es de  $0.62 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$ .

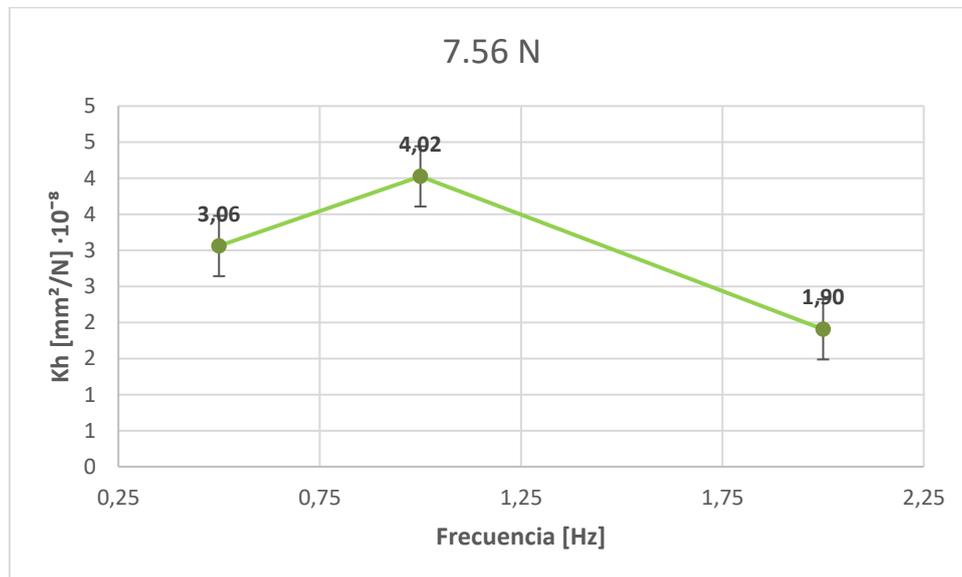


Figura 29. Gráfica donde se observan los valores obtenidos del coeficiente de desgaste para 7.56N.

Para 7.56N los resultados acerca del coeficiente de desgaste aparecen en la Figura 29. A la frecuencia de 0.5Hz su valor es de  $3.06 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$ , a 1Hz es de  $4.02 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$  y a 2Hz es de  $1.90 \cdot 10^{-8} \text{ mm}^2/\text{N}$ .

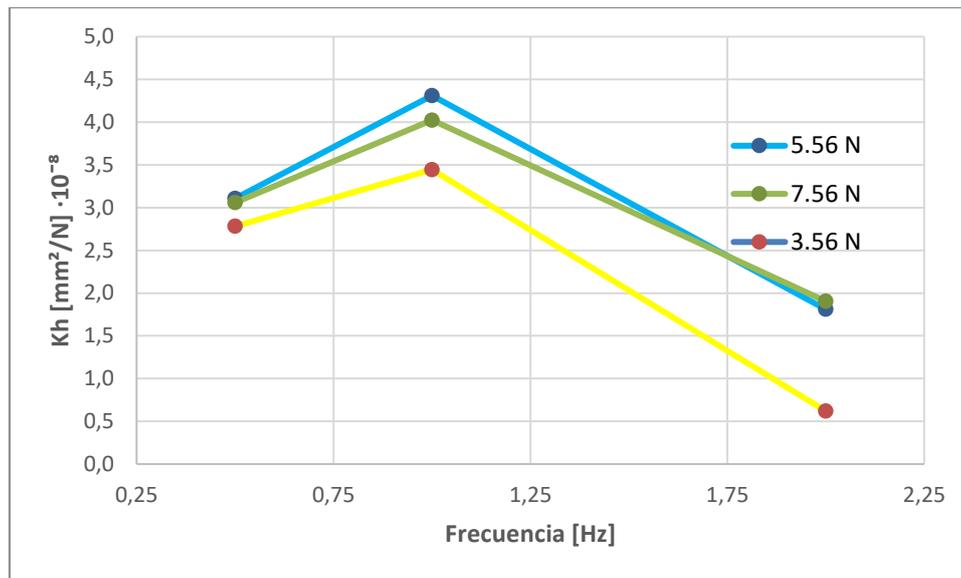


Figura 30. Gráfica comparativa de los resultados obtenidos del coeficiente de desgaste para las diferentes cargas.

En la Figura 30 se pueden observar los valores obtenidos acerca del coeficiente de desgaste para diferentes valores de frecuencia y fuerza normal aplicada. Cabe destacar que existe un valor de frecuencia en el cual el coeficiente de desgaste llega a un máximo y esto se cumple para las diferentes cargas aplicadas. A frecuencias más altas, 2Hz, se puede ver una disminución considerable del coeficiente de desgaste que también se cumple independientemente de la carga utilizada. Por último, se observa que, con una carga menor, de 3.56N, los coeficientes de desgaste son menores para todas las frecuencias utilizadas. Sin embargo, existe un umbral de carga a partir del cual los coeficientes de desgaste no sean mayores si se aumenta la carga aplicada. Es por ello que los valores de 5.56N y 7.56N son muy similares en todas las frecuencias.



## 1.8 Conclusiones

Las conclusiones del trabajo realizado son las siguientes:

- El tribómetro recíprocante empleado en los ensayos presenta problemas de sincronización entre las señales obtenidas por diferentes sensores. Si se quieren correlacionar las distintas señales, es necesario corregir el posible retraso que pueda existir.
- Se han realizado tres repeticiones sobre cada ensayo y se ha observado una buena repetitibilidad.
- Se ha ajustado una función coseno a la posición medida y se ha obtenido la velocidad derivando esta función con respecto al tiempo.
- El coeficiente de fricción medido en las condiciones de los ensayos ha demostrado ser dependiente de la velocidad. Se identifica un valor máximo cuando la velocidad es nula y, a medida que aumenta la velocidad, el coeficiente disminuye.
- Se aprecia un cambio de signo en el coeficiente de fricción a partir del máximo/mínimo de la función velocidad, cuando el indentador se desacelera/acelera. Este cambio de signo da lugar a valores muy cercanos a cero.
- Se ha ajustado una función parabólica en las nubes de puntos velocidad-coeficiente de fricción obtenidas en régimen estacionario del ensayo. Este ajuste permite obtener una estimación del coeficiente de rozamiento estático.
- Con respecto a la frecuencia del movimiento: de los ensayos realizados a 0.5, 1 y 2 Hz, el coeficiente de fricción se mantiene constante en el rango de frecuencias de 0.5 a 1 Hz. Para 2 Hz el coeficiente es mucho menor. Posiblemente existe un umbral de frecuencia a partir del cual aparece una disipación energética en el contacto y se crean partículas de desgaste que actúan como lubricante. A mayor frecuencia, mayor velocidad y energía disipada en el contacto, así como menor tiempo de enfriamiento. Este efecto ocurre independientemente de la carga aplicada.
- Con respecto a la carga, no se ha observado variación en los valores de coeficiente de fricción. Sí que existe dispersión en las medidas obtenidas para 2 Hz, pero puede deberse a que las señales medidas son más pequeñas y puede haber problemas de sensibilidad o influencia del ruido.
- En cuanto al desgaste se observa una tendencia similar a la obtenida con el coeficiente de fricción. El coeficiente de desgaste  $K_H$  [ $\text{mm}^2/\text{N}$ ] alcanza un máximo en el rango de frecuencias cercanas a 1 Hz. Disminuye para un valor de frecuencia de 2 Hz. Estas observaciones refuerzan la idea de que aparece una lubricación en el contacto para estos valores de alta frecuencia. En cuanto a la carga aplicada, existe un umbral a partir del cual los valores de  $K_H$  permanecen constantes. En cuanto a la presión de contacto, este umbral se sitúa alrededor de 1300 Mpa.



## 1.9 Referencias

- [1] Archard, J. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of applied physics*, 24(8), 981-988.
- [2] Johnson, K. L., & Johnson, K. L. (1987). *Contact mechanics*. Cambridge university press.
- [3] Munoz, A. I., Espallargas, N., & Mischler, S. (2020). *Tribocorrosion*. Cham (Switzerland): Springer International Publishing.
- [4] Salas Vicente, F., Segovia López, E. F., & Vicente Escuder, A. (2019). Problemas de ciencia de materiales. *Colección Académica*.
- [5] Cao, S., & Mischler, S. (2020). Tribocorrosion of a CoCrMo alloy in sulfuric acid–glycerol mixtures. *Wear*, 458, 203443.
- [6] Chan, S. M. T., Neu, C. P., Komvopoulos, K., Reddi, A. H., & Di Cesare, P. E. (2011). Friction and wear of hemiarthroplasty biomaterials in reciprocating sliding contact with articular cartilage.
- [7] Iwnicki, S. (2006). *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC press.
- [8] Rovira, A., Roda, A., Lewis, R., & Marshall, M. B. (2012). Application of Fastsim with variable coefficient of friction using twin disc experimental measurements. *Wear*, 274, 109-126.

## 1.10 Anexos

### 1.10.1 Tablas de rugosidad

Las siguientes tablas corresponden a los valores de rugosidad media y rugosidad media cuadrática obtenidos gracias al perfilómetro. Estos valores se tomaron antes de realizar los ensayos con el fin de demostrar el correcto estado de las muestras a ensayar con el fin de obtener resultados fiables.

	Ra [ $\mu\text{m}$ ]				
	1	2	3	Promedio	Desv. Típica
<b>Muestra 1</b>	0,00198	0,00165	0,00221	0,00195	0,00028
<b>Muestra 2</b>	0,00215	0,00211	0,00217	0,00215	0,00003
<b>Muestra 3</b>	0,00162	0,00135	0,00168	0,00155	0,00018
<b>Muestra 4</b>	0,00186	0,00156	0,00141	0,00161	0,00023
<b>Muestra 5</b>	0,00162	0,00150	0,00217	0,00176	0,00036
<b>Muestra 6</b>	0,00207	0,00194	0,00208	0,00203	0,00008

Tabla 9. Valores de rugosidad media obtenidos mediante el perfilómetro.

	Rq [ $\mu\text{m}$ ]				
	1	2	3	Promedio	Desv. Típica
<b>Muestra 1</b>	0,00251	0,00201	0,00272	0,00241	0,00036
<b>Muestra 2</b>	0,00278	0,00278	0,00284	0,00280	0,00003
<b>Muestra 3</b>	0,00237	0,00168	0,00213	0,00206	0,00035
<b>Muestra 4</b>	0,00239	0,00191	0,00179	0,00203	0,00032
<b>Muestra 5</b>	0,00224	0,00196	0,00277	0,00232	0,00041
<b>Muestra 6</b>	0,00256	0,00249	0,00261	0,00256	0,00006

Tabla 10. Valores de rugosidad media cuadrática obtenidos mediante el perfilómetro.

### 1.10.2 Gráficas de rugosidad de las muestras

Las siguientes imágenes se tomaron mediante el perfilómetro y muestran el estado de la superficie de las muestras antes de realizar el procedimiento experimental.

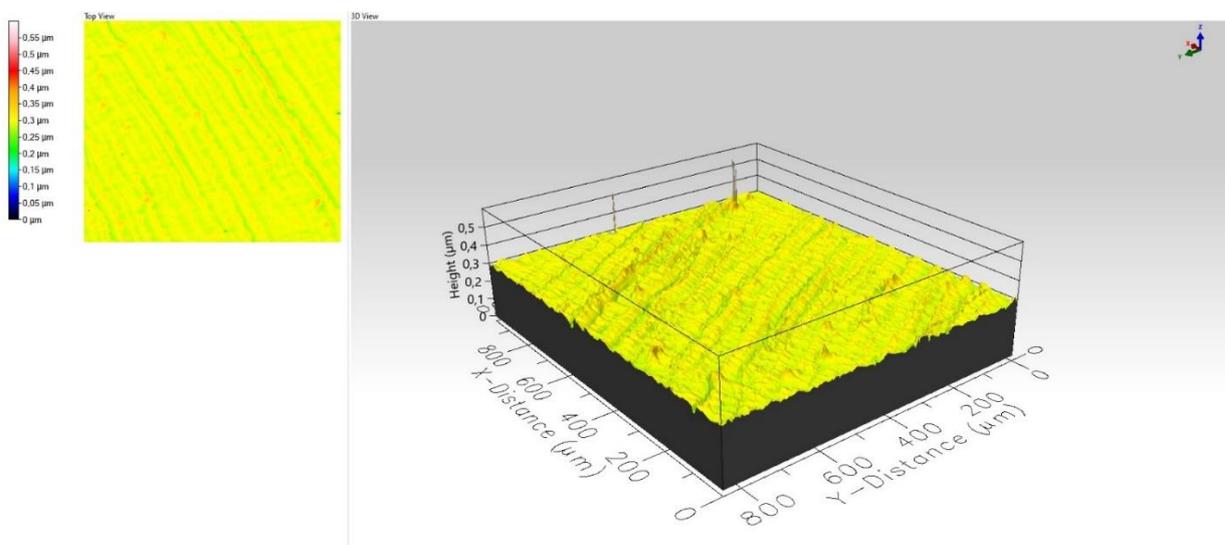


Figura 31. Imagen de la muestra 1 obtenida mediante el perfilómetro.

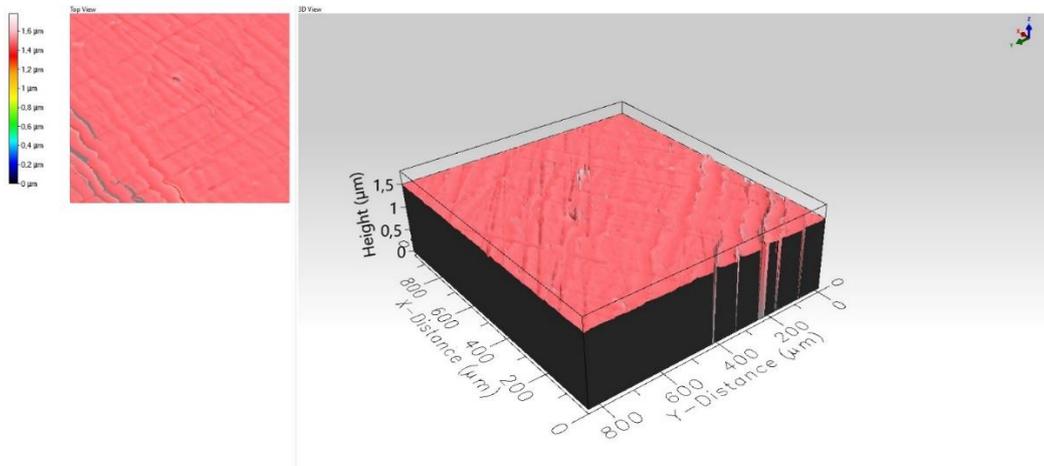


Figura 32. Imagen de la muestra 2 obtenida mediante el perfilómetro.

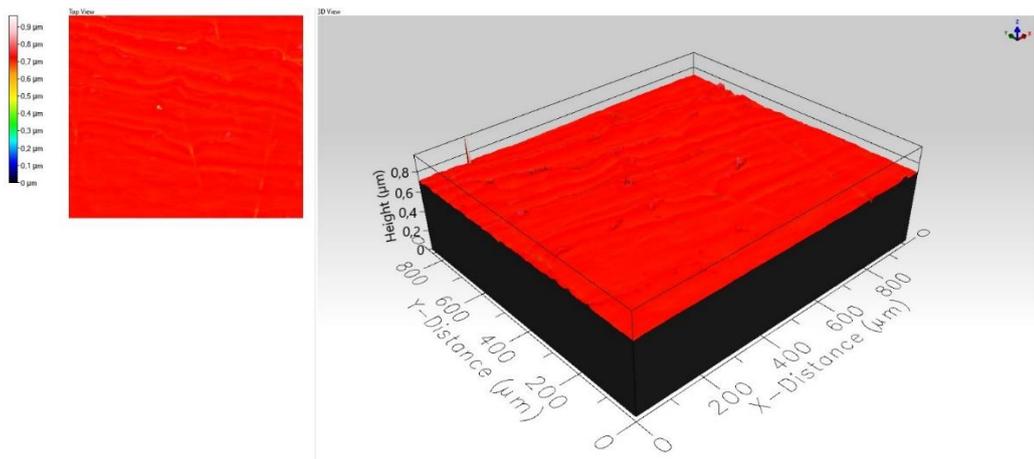


Figura 33. Imagen de la muestra 3 obtenida mediante el perfilómetro.

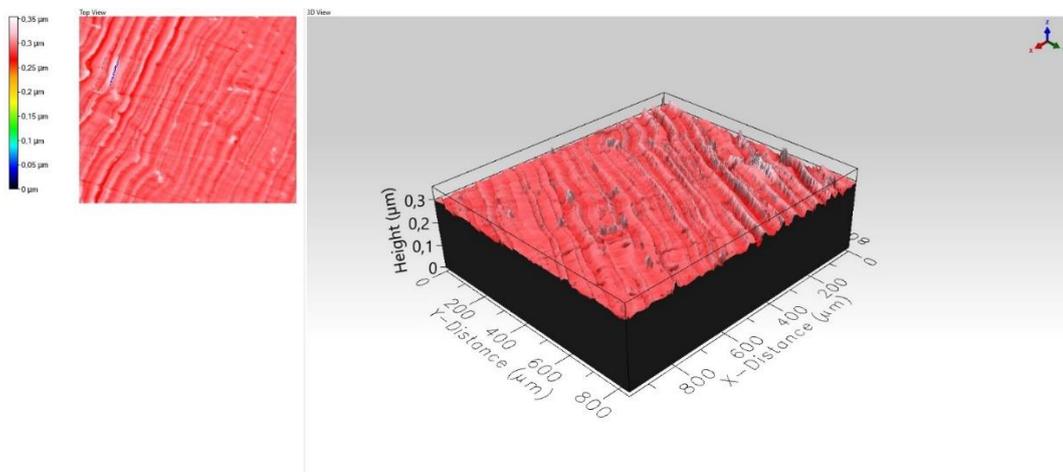


Figura 34. Imagen de la muestra 4 obtenida mediante el perfilómetro.

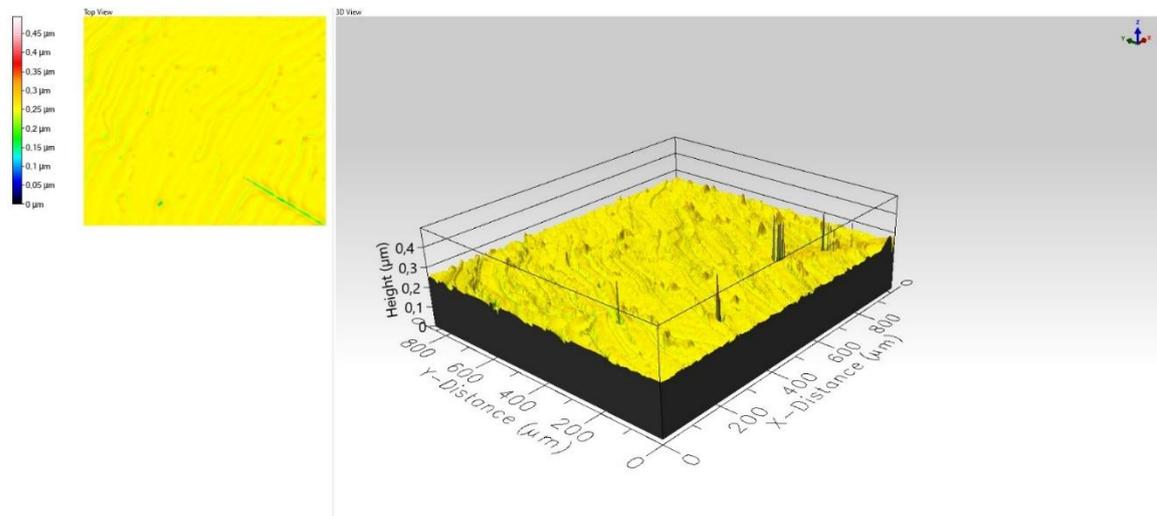


Figura 35. Imagen de la muestra 5 obtenida mediante el perfilómetro.

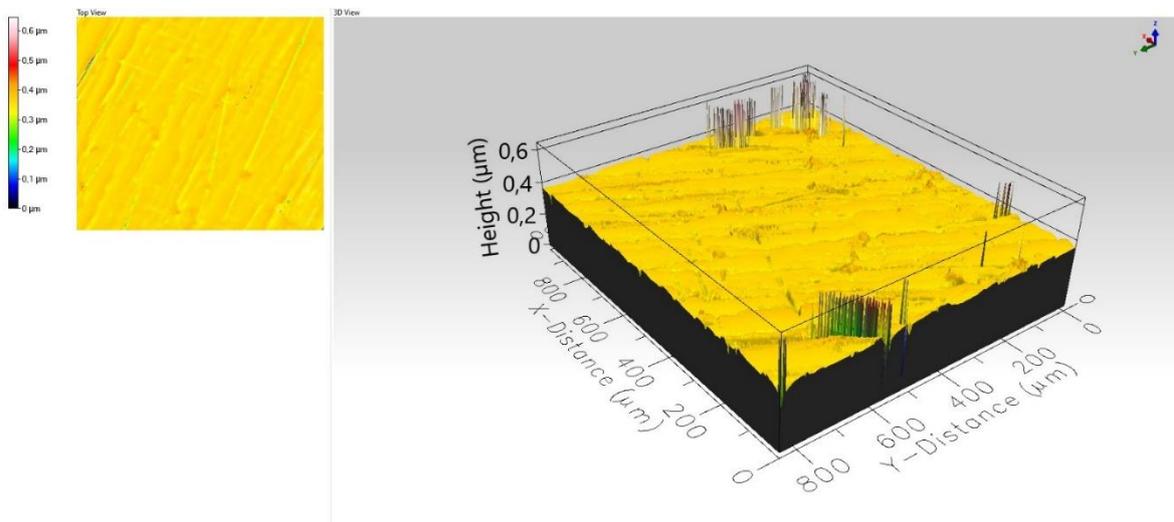


Figura 36. Imagen de la muestra 6 obtenida mediante el perfilómetro.

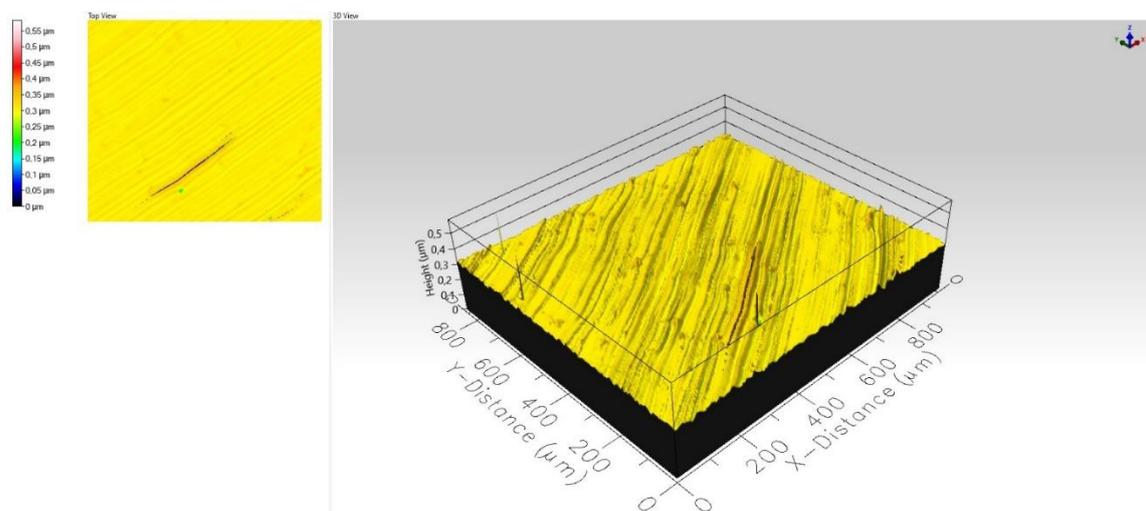


Figura 37. Imagen de la muestra 1 obtenida mediante el perfilómetro.



### 1.10.3 Código de MATLAB

En este apartado se ha adjuntado el código de MATLAB de las funciones utilizadas para procesar los datos, así como las rutinas realizadas en el programa.

#### 1.10.3.1 Función *obtener\_tau*

```
function datos = obtener_tau(fichero,freq,N)
% =====
% ENTRADA
% fichero: cadena de caracteres con el nombre de fichero de Excel
% A:      amplitud de movimiento [mm]
% freq:   frecuencia del movimiento [Hz]
% N:      fuerza normal [N]
% SALIDA
% datos:  matriz con los datos extraídos de Excel

% calculamos el valor medio
datos = xlsread(fichero);

fuerza = datos(:,1);
medio = mean(fuerza);
cof = (fuerza-medio)/N;

pos     = datos(:,6);
minpos = min(pos);
maxpos = max(pos);
A       = (maxpos-minpos)/2;
pos     = pos-maxpos;

tiempo = datos(:,11);

figure
plot(tiempo,cof) % varía entre [-1 1]
% xlim([0,5/freq]) % representa los 5 primeros ciclos
xlim([tiempo(end)-5/freq,tiempo(end)]) % representa los 5 últimos ciclos, así se ve mejor
ylim([-1.2,1.2])
hold on
plot(tiempo,pos/(2*A),'r')
legend('cof [-]','Posición/(2*A) [mm]')
grid on
xlabel('tiempo [s]')

end
```

#### 1.10.3.2 Función *comprobamos*

```
function [tiempo1,pos1,cof1]=comprobamos(datos,freq,N,tau,phi0)
% =====
% ENTRADA
% datos: matriz de datos del ensayo en tribómetro
% freq:  frecuencia del movimiento de la bola [Hz]
% N:     fuerza normal [N]
% tau:   retraso de la señal "COF" con respecto a "pos" [s]
% phi0:  desfase de la señal "pos" con respecto a una señal coseno [rad]
% si "pos" es un cos: phi0 = 0
```



```
% si "pos" es un -cos: phi0 = pi
% si "pos" es un sin: phi0 = 3*pi/2
% si "pos" es un -sin: phi0 = -3*pi/2
% SALIDA
% tiempo1, pos1, cof1: vectores recortados para en su inicio para tenerlos
% todos en fase

fuerza = datos(:,1);
pos = datos(:,6);
minpos = min(pos);
maxpos = max(pos);
A = (maxpos-minpos)/2;
pos = pos-maxpos;

tiempo = datos(:,11);

% calculamos el cof
medio = mean(fuerza);
cof = (fuerza-medio)/N;

% comprobamos el retraso (no hace falta)
figure
hold on
plot(tiempo-tau,cof)
plot(tiempo,pos)
% xlim([0,5/freq]) % representa los 5 primeros ciclos
xlim([tiempo(end)-5/freq,tiempo(end)]) % representa los 5 últimos ciclos
grid on
title ('Comprobamos el retraso')
legend('cof [-]','Posición [mm]')
xlabel('tiempo [s]')

% Representamos la posición en su forma de referencia
figure
hold on
plot(tiempo+phi0/(2*pi*freq),pos) % w*t = phi --> t = phi/w
% xlim([0,5/freq]) % representa los 5 primeros ciclos
xlim([tiempo(end)-5/freq,tiempo(end)]) % representa los 5 últimos ciclos
grid on
title ('Posición del pin (función coseno)')
legend('Posición [mm]')
xlabel('tiempo [s]')

% Recortamos los vectores
tiempo0 = -phi0/(2*pi*freq)+1/freq;
i0 = buscar_valor(tiempo,tiempo0);
dim0 = length(tiempo)-i0+1;

% para el vector cof1 debemos tener en cuenta el retraso tau, así, la
% primera posición se correspondería con "tiempo0-tau"
tiempo00 = tiempo0+tau;
i00 = buscar_valor(tiempo,tiempo00);
dim00 = length(tiempo)-i00+1;

dim = min(dim0,dim00);

tiempo1 = tiempo(i0:dim+i0-1);
```



```
pos1    = pos(i0:dim+i0-1);
cof1    = cof(i00:dim+i00-1); %debemos aplicar el retraso al cof

t0 = tiempo1(1);
for i=1:length(tiempo1)
    tiempo1(i) = tiempo1(i)-t0;
end

tend = tiempo1(end);
figure
hold on
plot(tiempo1,cof1)
plot(tiempo1,pos1)
%xlim([0,5/freq]) % representa los 5 primeros ciclos
xlim([tend-5/freq,tend]) % representa los 5 últimos ciclos
legend('cof [-]', 'Posición [mm]')
grid on

return
end
```

### 1.10.3.3 Función procesa\_cof

```
function [ti,pc,vs,cof] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,freq)
% ENTRADA
% tiempo1
% pos1
% cof1
% freq: frecuencia del movimiento [Hz]
% SALIDA
% ti: vector de tiempos
% pc: posición calculada (ajuste)
% vc: velocidad calculada
% ac: aceleración calculada
% cof

A = 2.5; %amplitud del movimiento [mm]
% generar la función velocidad y comprobamos la sincronización (desfase)
dim = length(tiempo1);
ac = zeros(dim,1);
vs = zeros(dim,1);
pc = zeros(dim,1);
for i = 1:dim
    ac(i) = -A*(2*pi*freq)^2*(cos((2*pi*freq)*tiempo1(i,1)));
    vs(i) = -A*(2*pi*freq)*( sin((2*pi*freq)*tiempo1(i,1)));
    pc(i) = A*cos((2*pi*freq)*tiempo1(i,1))-A;
end
figure
hold on
plot(tiempo1,pos1/(2*A), 'k') %/(2*A)
plot(tiempo1,cof1, 'r')
plot(tiempo1,vs/(A*2*pi*freq), 'b') %/(A*2*pi*freq)
plot(tiempo1,pc/(2*A), 'g')
legend('Posición medida / (2*A)', 'cof [-]', 'Velocidad / (A*2*pi*freq)', 'pc / (2*A)')
grid on
% xlim([0 5/freq]) % representa los 5 primeros ciclos
```



```
xlim([tiempo1(end)-5/freq,tiempo1(end)]) % representa los 5 últimos ciclos
ylim([-1.25,1.25])
% representamos gráfico vs-cof
figure
hold on
plot(tiempo1,pos1,'k') %/(2*A)
plot(tiempo1,cof1,'r')
plot(tiempo1,vs/3,'b') %/(A*2*pi*freq)
plot(tiempo1,pc,'g')
legend('Posición [mm] medida','cof [-]','Velocidad/Xa [mm/s]','pc [mm]')
grid on
% xlim([0 5/freq]) % representa los 5 primeros ciclos
xlim([tiempo1(end)-5/freq,tiempo1(end)])
figure
num1 = dim-500;
num2 = dim;
plot(vs(num1:num2,1),abs(cof1(num1:num2,1)),'.')
grid on
% xlim([0 15])
% ylim([0 0.5])
xlabel('Velocidad [mm/s]')
ylabel('\mu [-]')

% representamos gráfico pc-cof
figure
num1 = dim-500;
num2 = dim;
plot(pc(num1:num2,1)+5,abs(cof1(num1:num2,1)),'.')
grid on
% xlim([0 15])
% ylim([0 0.5])
xlabel('Posición [mm]')
ylabel('\mu [-]')

% Escribimos las variables de salida
ti = tiempo1;
cof= cof1;

% figure % unas comprobaciones
% hold on
% plot(vs(num1:num2,1))
% plot(cof1(num1:num2,1))
% grid on
% legend('Velocidad','cof')
figure
hold on
plot(tiempo1,cof1,'r')
plot(tiempo1,vs/(A*2*pi*freq),'b') %/(A*2*pi*freq)
plot(tiempo1,ac/(A*(2*pi/freq)^2),'g')
legend('cof [-]','Velocidad / (A*2*pi*freq)','ac / (A*(2*pi*freq)^2)')
grid on
% xlim([0 5/freq]) % representa los 5 primeros ciclos
xlim([tiempo1(end)-5/freq,tiempo1(end)]) % representa los 5 últimos ciclos
ylim([-1.25,1.25])
% representamos gráfico vs-cof

end
```



#### 1.10.3.4 Función *índices\_perfil*

```
function perfil = indices_perfil(fichero)
% =====
% Representa el perfil medido para obtener los índices que definen la
% huella
% =====
% ENTRADA
% fichero: Nombre del fichero para leer el perfil (fichero de Excel)
% SALIDA
% perfil: Es la matriz de datos con el perfil leído
% =====

perfil = xlsread(fichero);
figure
plot(perfil(:,2))
```

#### 1.10.3.5 Función *Procesa\_perfil*

```
function area = procesa_perfil(perfil,i2,i3)

i1 = 1;
i4 = length(perfil);

ref = (mean(perfil(i1:i2,2))*(i2-i1)+mean(perfil(i3:i4,2))*(i4-i3))/((i2-i1)+(i4-i3));
%%
% figure
% plot(perfil(:,1),perfil(:,2)-ref)
% hold on
% plot(perfil(i1,1),perfil(i1,2),'ro')
% plot(perfil(i2,1),perfil(i2,2),'ro')
% plot(perfil(i3,1),perfil(i3,2),'ro')
% plot(perfil(i4,1),perfil(i4,2),'ro')
% grid on
% xlabel('{\ity} [\mum]')
% ylabel('{\itz} [\mum]')
% Restamos la referencia (offset) e integramos
perfil1 = perfil(:,2)-ref;
figure
plot(perfil(:,1),perfil1);
xlabel('{\ity} [\mum]')
ylabel('{\itz} [\mum]')
grid on

area = 0;
dy = perfil(2,1)-perfil(1,1);
for i=i2:i3
    if perfil1(i) < 0
        area = area - perfil1(i);
    end
end
area = area*dy;
vol = area*5/10^6*1000; % [.10^-3 mm^2]
```



### 1.10.3.6 Ajusta\_parábola

```
function [a,c] = ajusta_parabola(xpuntos,ypuntos,num,vlim)
X = zeros(num,2);
Y = zeros(num,1);
contador = 0;
for i=1:num
    if abs(xpuntos(end-num+i-1))<=vlim
        contador = contador+1;
        X(contador,1) = xpuntos(end-num+i-1)^2.0;
        X(contador,2) = 1.0;
        Y(contador) = ypuntos(end-num+i-1);
    end
end

% Redefinimos la dimensión de los vectores/matrices
XX = X(1:contador,:);
YY = Y(1:contador);

% Resolvemos el sistema de ecuaciones
sol = XX\YY;
a = sol(1);
c = sol(2);

% Representamos la nube de puntos junto a la parábola
figure
plot(xpuntos(end-num:end),ypuntos(end-num:end),'o')
hold on
grid on

num1 = 100;
vx = linspace(-vlim,vlim,num1)';
vy = zeros(num1,1);
for i=1:num1
    vy(i) = a*vx(i)^2+c;
end
plot(vx,vy,'k')

% Representamos la ley de fricción

return
end
```

### 1.10.3.7 Datos procesados

```
%% Ensayo 1 Tipo 1
datos = obtener_tau('(1) 15_02_1_1Hz_5,89N_1.xlsx',1,5.56);
tau= 0.09;
phi0= 2*3.14159*1*0.12;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,1,5.56,tau,phi0);
[ti01,pc01,vs01,cof01] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,1);
%% Ensayo 2 Tipo 1
datos = obtener_tau('(2) 22_02_1_1Hz_5,89N_2.xlsx',1,5.56);
tau= 0.03;
phi0=-2*3.14159*1*0.16;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,1,5.56,tau,phi0);
[ti02,pc02,vs02,cof02] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,1);
```



```
%% Ensayo 3 Tipo 1
datos = obtener_tau('(3) 23_02_1_1Hz_5,89N_3.xlsx',1,5.56);
tau= 0.03;
phi0=-2*3.14159*1*0.16;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,1,5.56,tau,phi0);
[ti03,pc03,vs03,cof03] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,1);
%% Ensayo 4 Tipo 2
datos = obtener_tau('(4) 25_02_2_1Hz_3,89N_1.xlsx',1,3.56);
tau= 0,
phi0= -2*3.14159*1*0.16;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,1,3.56,tau,phi0);
[ti04,pc04,vs04,cof04] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,1);

%% Ensayo 5 Tipo 2
datos = obtener_tau('(5) 01_03_2_1Hz_3,89N_2.xlsx',1,3.56);
tau= 0,
phi0= -2*3.14159*1*0.16;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,1,3.56,tau,phi0);
[ti05,pc05,vs05,cof05] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,1);
%% Ensayo 6 Tipo 2
datos = obtener_tau('(6) 02_03_2_1Hz_3,89N_3.xlsx',1,3.56);
tau= 0.03;
phi0= 2*3.14159*1*-0.31;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,1,3.56,tau,phi0);
[ti06,pc06,vs06,cof06] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,1);
%% Ensayo 7 Tipo 3
datos = obtener_tau('(7) 02_03_3_1Hz_7,89N_1.xlsx',1,7.56);
tau= 0.03;
phi0= -2*3.14159*1*0.24;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,1,7.56,tau,phi0);
[ti07,pc07,vs07,cof07] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,1);
%% Ensayo 8 Tipo 3
datos = obtener_tau('(8) 03_03_3_1Hz_7,89N_2.xlsx',1,7.56);
tau= 0.04;
phi0= -2*3.14159*1*0.31;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,1,7.56,tau,phi0);
[ti08,pc08,vs08,cof08] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,1);
%% Ensayo 9 Tipo 3
datos = obtener_tau('(9) 03_03_3_1Hz_7,89N_3.xlsx',1,7.56);
tau= 0.06;
phi0= -2*3.14159*1*0.16;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,1,7.56,tau,phi0);
[ti09,pc09,vs09,cof09] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,1);
%% Ensayo 10 Tipo 4
datos = obtener_tau('(10) 04_03_4_0,5Hz_5,89N_1.xlsx',0.5,5.56);
tau= -0.12;
phi0= -2*3.14159*0.5*0.75;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,0.5,5.56,tau,phi0);
[ti10,pc10,vs10,cof10] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,0.5);
%% Ensayo 11 Tipo 4
datos = obtener_tau('(11) 04_03_4_0,5Hz_5,89N_2.xlsx',0.5,5.56);
tau= -0.1;
phi0= -2*3.14159*0.5*0.68;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,0.5,5.56,tau,phi0);
[ti11,pc11,vs11,cof11] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,0.5);
%% Ensayo 12 Tipo 4
datos = obtener_tau('(12) 08_03_4_0,5Hz_5,89N_3.xlsx',0.5,5.56);
```



```
tau= -0.1;
phi0= -2*3.14159*0.5*0.69;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,0.5,5.56,tau,phi0);
[ti12,pc12,vs12,cof12] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,0.5);
%% Ensayo 13 Tipo 5
datos = obtener_tau('(13) 08_03_5_0,5Hz_3,89N_1.xlsx',0.5,3.56);
tau= -0.12;
phi0= -2*3.14159*0.5*0.69;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,0.5,3.56,tau,phi0);
[ti13,pc13,vs13,cof13] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,0.5);
%% Ensayo 14 Tipo 5
datos = obtener_tau('(14) 08_03_5_0,5Hz_3,89N_2.xlsx',0.5,3.56);
tau= -0.09;
phi0=-2*3.14159*0.5*0.75;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,0.5,3.56,tau,phi0);
[ti14,pc14,vs14,cof14] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,0.5);
%% Ensayo 15 Tipo 5
datos = obtener_tau('(15) 09_03_5_0,5Hz_3,89N_3.xlsx',0.5,3.56);
tau= -0.12;
phi0= -2*3.14159*0.5*0.82;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,0.5,3.56,tau,phi0);
[ti15,pc15,vs15,cof15] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,0.5);
%% Ensayo 16 Tipo 6
datos = obtener_tau('(16) 09_03_6_0,5Hz_7,89N_1.xlsx',0.5,7.56);
tau= -0.12;
phi0= -2*3.14159*0.5*0.68;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,0.5,7.56,tau,phi0);
[ti16,pc16,vs16,cof16] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,0.5);
%% Ensayo 17 Tipo 6
datos = obtener_tau('(17) 10_03_6_0,5Hz_7,89N_2.xlsx',0.5,7.56);
tau= -0.11;
phi0= -2*3.14159*0.5*0.68;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,0.5,7.56,tau,phi0);
[ti17,pc17,vs17,cof17] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,0.5);
%% Ensayo 18 Tipo 6
datos = obtener_tau('(18) 10_03_6_0,5Hz_7,89N_3.xlsx',0.5,7.56);
tau= -0.1;
phi0= -2*3.14159*0.5*0.69;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,0.5,7.56,tau,phi0);
[ti18,pc18,vs18,cof18] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,0.5);
%% Ensayo 19 Tipo 7
datos = obtener_tau('(19) 14_03_1_2Hz_5,89N_1.xlsx',2,5.56);
tau= 0.1;
phi0= 0;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,2,5.56,tau,phi0);
[ti19,pc19,vs19,cof19] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,2);
%% Ensayo 20 Tipo 7
datos = obtener_tau('(20) 14_03_1_2Hz_5,89N_2.xlsx',2,5.56);
tau= 0.1;
phi0= 2*3.14159*2*0.16;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,2,5.56,tau,phi0);
[ti20,pc20,vs20,cof20] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,2);
%% Ensayo 21 Tipo 7
datos = obtener_tau('(21) 22_03_1_2Hz_5,89N_3.xlsx',2,5.56);
tau= 0.07;
phi0= 2*3.14159*2*0.04;
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,2,5.56,tau,phi0);
```



```
[ti21,pc21,vs21,cof21] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,2);  
%% Ensayo 22 Tipo 8  
datos = obtener_tau('(22) 22_03_1_2Hz_3,89N_1(4).xlsx',2,3.56);  
tau= 0.08;  
phi0= 2*3.14159*2*0.05;  
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,2,3.56,tau,phi0);  
[ti22,pc22,vs22,cof22] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,2);  
%% Ensayo 23 Tipo 8  
datos = obtener_tau('(23) 19_05_1_2Hz_3,89N_2(5).xlsx',2,3.56);  
tau= 0.15;  
phi0= 2*3.14159*2*0.07;  
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,2,3.56,tau,phi0);  
[ti23,pc23,vs23,cof23] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,2);  
%% Ensayo 24 Tipo 8  
datos = obtener_tau('(24) 19_05_1_2Hz_3,89N_3(6).xlsx',2,3.56);  
tau= 0.14;  
phi0= 2*3.14159*2*0.14;  
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,2,3.56,tau,phi0);  
[ti24,pc24,vs24,cof24] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,2);  
%% Ensayo 25 Tipo 9  
datos = obtener_tau('(25) 19_05_2_2Hz_7,89N_1.xlsx',2,7.56);  
tau= 0.14;  
phi0= 2*3.14159*2*0.12;  
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,2,7.56,tau,phi0);  
[ti25,pc25,vs25,cof25] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,2);  
%% Ensayo 26 Tipo 9  
datos = obtener_tau('(26) 24_05_2_2Hz_7,89N_2.xlsx',2,7.56);  
tau= 0.12;  
phi0= 2*3.14159*2*0.06;  
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,2,7.56,tau,phi0);  
[ti26,pc26,vs26,cof26] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,2);  
%% Ensayo 27 Tipo 9  
datos = obtener_tau('(27) 24_05_2_2Hz_7,89N_3',2,7.56);  
tau= 0.16;  
phi0= 2*3.14159*2*0.11;  
[tiempo1,pos1,cof1] = comprobamos(datos,2,7.56,tau,phi0);  
[ti27,pc27,vs27,cof27] = procesa_cof(tiempo1,pos1,cof1,2);
```

### 1.10.3.8 Código de las gráficas conjuntas

```
%% Tipo 1  
figure  
dim1 = length(ti01);  
num1 = dim1-200;  
num2 = dim1;  
plot(vs01(num1:num2,1),abs(cof01(num1:num2,1)), 'o')  
grid on  
hold on  
  
dim2 = length(ti02);  
num1 = dim2-200;  
num2 = dim2;  
plot(vs02(num1:num2,1),abs(cof02(num1:num2,1)), '+')  
hold on  
  
dim3 = length(ti03);
```



```
num1 = dim3-200;  
num2 = dim3;  
plot(vs03(num1:num2,1),abs(cof03(num1:num2,1)),'.')  
xlabel('Velocidad [mm/s]')  
ylabel('\mu [-]')  
title(['1Hz 5.56N'])  
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
```

```
figure  
dim1 = length(ti01);  
num1 = dim1-200;  
num2 = dim1;  
plot(pc01(num1:num2,1),(cof01(num1:num2,1)), 'o')  
grid on  
hold on
```

```
dim2 = length(ti05);  
num1 = dim2-200;  
num2 = dim2;  
plot(pc02(num1:num2,1),(cof02(num1:num2,1)), '+')  
hold on
```

```
dim3 = length(ti03);  
num1 = dim3-200;  
num2 = dim3;  
plot(pc03(num1:num2,1),(cof03(num1:num2,1)),'.')  
xlabel('Posición [mm]')  
ylabel('\mu [-]')  
title(['1Hz 5.56N'])  
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
```

```
%% Tipo 2  
figure  
dim1 = length(ti04);  
num1 = dim1-200;  
num2 = dim1;  
plot(vs04(num1:num2,1),abs(cof04(num1:num2,1)), 'o')  
grid on  
hold on
```

```
dim2 = length(ti05);  
num1 = dim2-200;  
num2 = dim2;  
plot(vs05(num1:num2,1),abs(cof05(num1:num2,1)), '+')  
hold on
```

```
dim3 = length(ti06);  
num1 = dim3-200;  
num2 = dim3;  
plot(vs06(num1:num2,1),abs(cof06(num1:num2,1)),'.')  
xlabel('Velocidad [mm/s]')  
ylabel('\mu [-]')  
title(['1Hz 3.56N'])  
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
```

```
figure  
dim1 = length(ti04);  
num1 = dim1-200;
```



```
num2 = dim1;
plot(pc04(num1:num2,1),(cof04(num1:num2,1)), 'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti05);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(pc05(num1:num2,1),(cof05(num1:num2,1)), '+')
hold on

dim3 = length(ti06);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(pc06(num1:num2,1),(cof06(num1:num2,1)), '.')
xlabel('Posición [mm]')
ylabel('\mu [-]')
title(['1Hz 3.56N'])
legend(['Ensayo 1'], ['Ensayo 2'], ['Ensayo3'])
%% Tipo 3
figure
dim1 = length(ti07);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(vs07(num1:num2,1),abs(cof07(num1:num2,1)), 'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti08);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(vs08(num1:num2,1),abs(cof08(num1:num2,1)), '+')
hold on

dim3 = length(ti09);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(vs09(num1:num2,1),abs(cof09(num1:num2,1)), '.')
xlabel('Velocidad [mm/s]')
ylabel('\mu [-]')
title(['1Hz 7.56N'])
legend(['Ensayo 1'], ['Ensayo 2'], ['Ensayo3'])

figure
dim1 = length(ti07);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(pc07(num1:num2,1),(cof07(num1:num2,1)), 'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti08);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(pc08(num1:num2,1),(cof08(num1:num2,1)), '+')
hold on
```



```
dim3 = length(ti09);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(pc09(num1:num2,1),(cof09(num1:num2,1)),'.')
xlabel('Posición [mm]')
ylabel('\mu [-]')
title(['1Hz 7.56N'])
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
%% Tipo 4
figure
dim1 = length(ti10);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(vs10(num1:num2,1),abs(-cof10(num1:num2,1)),'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti11);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(vs11(num1:num2,1),abs(cof11(num1:num2,1)),'+')
hold on

dim3 = length(ti12);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(vs12(num1:num2,1),abs(cof12(num1:num2,1)),'.')
xlabel('Velocidad [mm/s]')
ylabel('\mu [-]')
title(['0.5Hz 5.56N'])
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])

figure
dim1 = length(ti10);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(pc10(num1:num2,1),(cof10(num1:num2,1)),'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti11);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(pc11(num1:num2,1),(cof11(num1:num2,1)),'+')
hold on

dim3 = length(ti12);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(pc12(num1:num2,1),(cof12(num1:num2,1)),'.')
xlabel('Posición [mm]')
ylabel('\mu [-]')
title(['0.5Hz 5.56N'])
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
%% Tipo 5
figure
dim1 = length(ti13);
```



```
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(vs13(num1:num2,1),abs(-cof13(num1:num2,1)), 'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti14);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(vs14(num1:num2,1),abs(cof14(num1:num2,1)), '+')
hold on

dim3 = length(ti15);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(vs15(num1:num2,1),abs(cof15(num1:num2,1)), '.')
xlabel('Velocidad [mm/s]')
ylabel('\mu [-]')
title(['0.5Hz 3.56N'])
legend(['Ensayo 1'], ['Ensayo 2'], ['Ensayo3'])

figure
dim1 = length(ti13);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(pc13(num1:num2,1), (cof13(num1:num2,1)), 'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti14);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(pc14(num1:num2,1), (cof14(num1:num2,1)), '+')
hold on

dim3 = length(ti15);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(pc15(num1:num2,1), (cof15(num1:num2,1)), '.')
xlabel('Posición [mm]')
ylabel('\mu [-]')
title(['0.5Hz 3.56N'])
legend(['Ensayo 1'], ['Ensayo 2'], ['Ensayo3'])
%% Tipo 6
figure
dim1 = length(ti16);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(vs16(num1:num2,1),abs(-cof16(num1:num2,1)), 'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti17);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(vs17(num1:num2,1),abs(cof17(num1:num2,1)), '+')
hold on
```



```
dim3 = length(ti18);  
num1 = dim3-200;  
num2 = dim3;  
plot(vs18(num1:num2,1),abs(cof18(num1:num2,1)),'.')  
xlabel('Velocidad [mm/s]')  
ylabel('\mu [-]')  
title(['0.5Hz 7.56N'])  
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
```

```
figure  
dim1 = length(ti16);  
num1 = dim1-200;  
num2 = dim1;  
plot(pc16(num1:num2,1),(cof16(num1:num2,1)), 'o')  
grid on  
hold on
```

```
dim2 = length(ti17);  
num1 = dim2-200;  
num2 = dim2;  
plot(pc17(num1:num2,1),(cof17(num1:num2,1)), '+')  
hold on
```

```
dim3 = length(ti18);  
num1 = dim3-200;  
num2 = dim3;  
plot(pc18(num1:num2,1),(cof18(num1:num2,1)),'.')  
xlabel('Posición [mm]')  
ylabel('\mu [-]')  
title(['0.5Hz 7.56N'])  
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
```

```
%% Tipo 7
```

```
figure  
dim1 = length(ti19);  
num1 = dim1-200;  
num2 = dim1;  
plot(vs19(num1:num2,1),abs(cof19(num1:num2,1)), 'o')  
grid on  
hold on
```

```
dim2 = length(ti20);  
num1 = dim2-200;  
num2 = dim2;  
plot(vs20(num1:num2,1),abs(cof20(num1:num2,1)), '+')  
hold on
```

```
dim3 = length(ti21);  
num1 = dim3-200;  
num2 = dim3;  
plot(vs21(num1:num2,1),abs(cof21(num1:num2,1)),'.')  
xlabel('Velocidad [mm/s]')  
ylabel('\mu [-]')  
title(['2Hz 5.56N'])  
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
```

```
figure
```



```
dim1 = length(ti19);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(pc19(num1:num2,1),(cof19(num1:num2,1)), 'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti20);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(pc20(num1:num2,1),(cof20(num1:num2,1)), '+')
hold on

dim3 = length(ti21);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(pc21(num1:num2,1),(cof21(num1:num2,1)), '.')
xlabel('Posición [mm]')
ylabel('\mu [-]')
title(['2Hz 5.56N'])
legend(['Ensayo 1'], ['Ensayo 2'], ['Ensayo3'])
%% Tipo 8
figure
dim1 = length(ti22);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(vs22(num1:num2,1),abs(cof22(num1:num2,1)), 'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti23);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(vs23(num1:num2,1),abs(cof23(num1:num2,1)), '+')
hold on

dim3 = length(ti24);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(vs24(num1:num2,1),abs(cof24(num1:num2,1)), '.')
xlabel('Velocidad [mm/s]')
ylabel('\mu [-]')
title(['2Hz 3.56N'])
legend(['Ensayo 1'], ['Ensayo 2'], ['Ensayo3'])

figure
dim1 = length(ti22);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(pc22(num1:num2,1),(cof22(num1:num2,1)), 'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti23);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(pc23(num1:num2,1),(cof23(num1:num2,1)), '+')
```



```
hold on

dim3 = length(ti24);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(pc24(num1:num2,1),(cof24(num1:num2,1)),'.')
xlabel('Posición [mm]')
ylabel('\mu [-]')
title(['2Hz 3.56N'])
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
%% Tipo 9
figure
dim1 = length(ti25);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(vs25(num1:num2,1),abs(cof25(num1:num2,1)),'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti26);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(vs26(num1:num2,1),abs(cof26(num1:num2,1)),'+')
hold on

dim3 = length(ti27);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(vs27(num1:num2,1),abs(cof27(num1:num2,1)),'.')
xlabel('Velocidad [mm/s]')
ylabel('\mu [-]')
title(['2Hz 7.56N'])
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])

figure
dim1 = length(ti25);
num1 = dim1-200;
num2 = dim1;
plot(pc25(num1:num2,1),(cof25(num1:num2,1)),'o')
grid on
hold on

dim2 = length(ti26);
num1 = dim2-200;
num2 = dim2;
plot(pc26(num1:num2,1),(cof26(num1:num2,1)),'+')
hold on

dim3 = length(ti27);
num1 = dim3-200;
num2 = dim3;
plot(pc27(num1:num2,1),(cof27(num1:num2,1)),'.')
xlabel('Posición [mm]')
ylabel('\mu [-]')
title(['2Hz 7.56N'])
legend(['Ensayo 1'],['Ensayo 2'],['Ensayo3'])
```



### 1.10.3.9 Parábolas ajustadas

```
%% Tipo 1
% 1
[a01,c01]=ajusta_parabola(vs01,abs(cof01),200,15)
cof1= 0.705411
% 2
[a02,c02]=ajusta_parabola(vs02,abs(cof02),200,15)
cof2= 0.507504
% 3
[a03,c03]=ajusta_parabola(vs03,abs(cof03),200,15)
cof3= 0.422908
%% Tipo 2
% 1
[a04,c04]=ajusta_parabola(vs04,abs(cof04),200,15)
cof4= 0.487012
% 2
[a05,c05]=ajusta_parabola(vs05,abs(cof05),200,15)
cof5= 0.568821
% 6
[a06,c06]=ajusta_parabola(vs06,abs(cof06),200,15)
cof6= 0.460651
%% Tipo 3
% 1
[a07,c07]=ajusta_parabola(vs07,abs(cof07),200,15)
cof7= 0.652395
% 2
[a08,c08]=ajusta_parabola(vs08,abs(cof08),200,15)
cof8= 0.479807
% 3
[a09,c09]=ajusta_parabola(vs09,abs(cof09),200,15)
cof9= 0.423517
%% Tipo 4
% 1
[a10,c10]=ajusta_parabola(vs10,abs(cof10),200,8)
cof010= 0.424049
% 2
[a11,c11]=ajusta_parabola(vs11,abs(cof11),200,8)
cof011= 0.505224
% 3
[a12,c12]=ajusta_parabola(vs12,abs(cof12),200,8)
cof012= 0.440389
%% Tipo 5
% 1
[a13,c13]=ajusta_parabola(vs13,abs(cof13),200,8)
cof013= 0.457379
% 2
[a14,c14]=ajusta_parabola(vs14,abs(cof14),200,8)
cof014= 0.450311
% 3
[a15,c15]=ajusta_parabola(vs15,abs(cof15),200,8)
cof015= 0.477402
%% Tipo 6
% 1
[a16,c16]=ajusta_parabola(vs16,abs(cof16),200,8)
cof016= 0.432352
% 2
```



```
[a17,c17]=ajusta_parabola(vs17,abs(cof17),200,8)
cof017= 0.470899
% 3
[a18,c18]=ajusta_parabola(vs18,abs(cof18),200,8)
cof018=
%% Tipo 7
% 1
[a19,c19]=ajusta_parabola(vs19,abs(cof19),200,30)
cof19= 0.179478
% 2
[a20,c20]=ajusta_parabola(vs20,abs(cof20),200,30)
cof20= 0.171213
% 3
[a21,c21]=ajusta_parabola(vs21,abs(cof21),200,30)
cof21= 0.136472
%% Tipo 8
% 1
[a22,c22]=ajusta_parabola(vs22,abs(cof22),200,30)
cof22= 0.297654
% 2
[a23,c23]=ajusta_parabola(vs23,abs(cof23),200,30)
cof23= 0.069680
% 3
[a24,c24]=ajusta_parabola(vs24,abs(cof24),200,30)
cof24= 0.079569
%% Tipo 9
% 1
[a25,c25]=ajusta_parabola(vs25,abs(cof25),200,30)
cof25= 0.095897
% 2
[a26,c26]=ajusta_parabola(vs26,abs(cof26),200,30)
cof26= 0.077125
% 3
[a27,c27]=ajusta_parabola(vs27,abs(cof27),200,30)
cof27= 0.066479
```

### 1.10.4 Imágenes de las huellas producidas

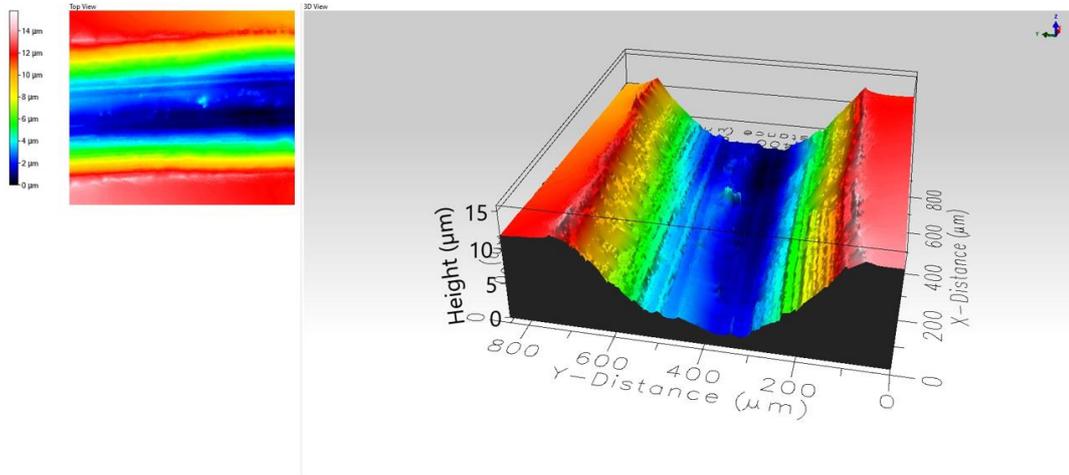


Figura 38. Gráfica de la huella producida en el primer ensayo a 1Hz y 5.56N.

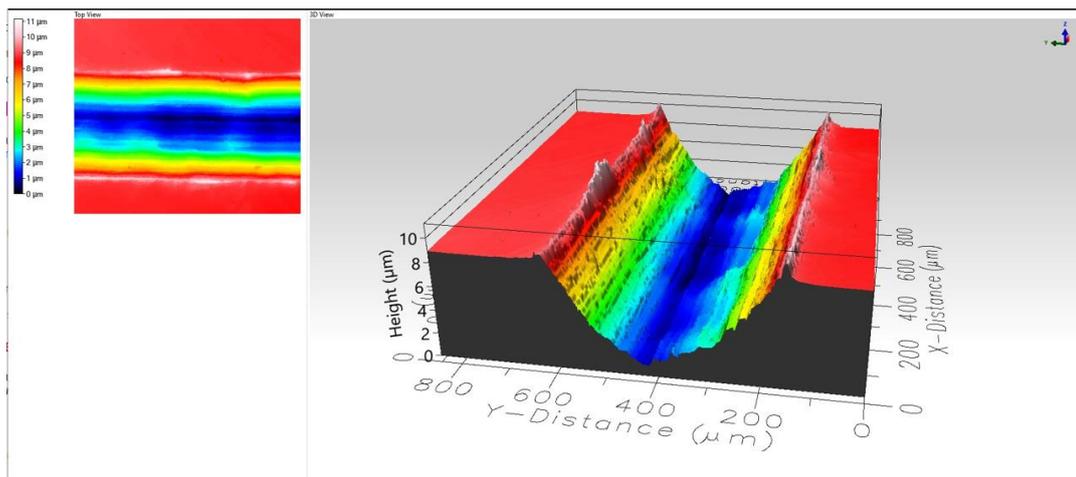


Figura 39. Gráfica de la huella producida en el segundo ensayo a 1Hz y 5.56N.

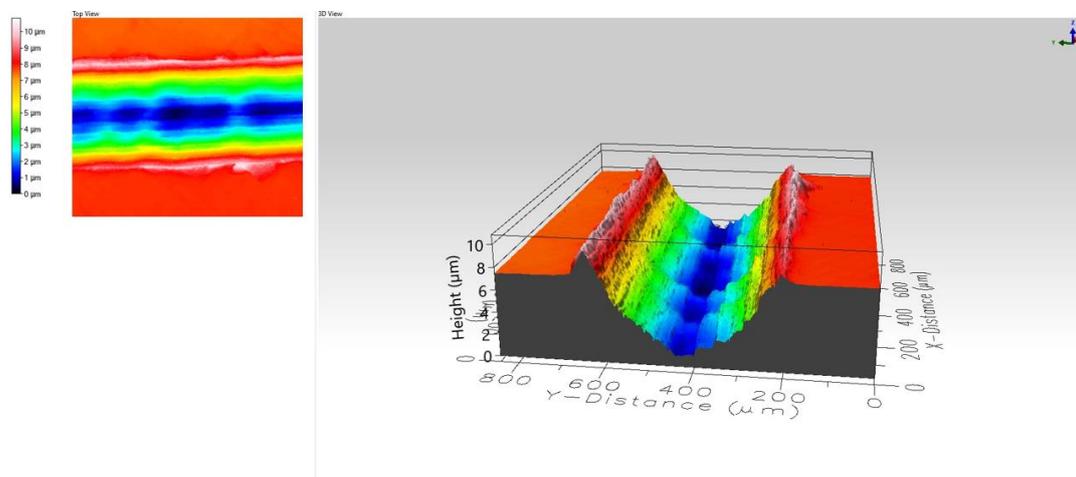


Figura 40. Gráfica de la huella producida en el tercer ensayo a 1Hz y 5.56N.

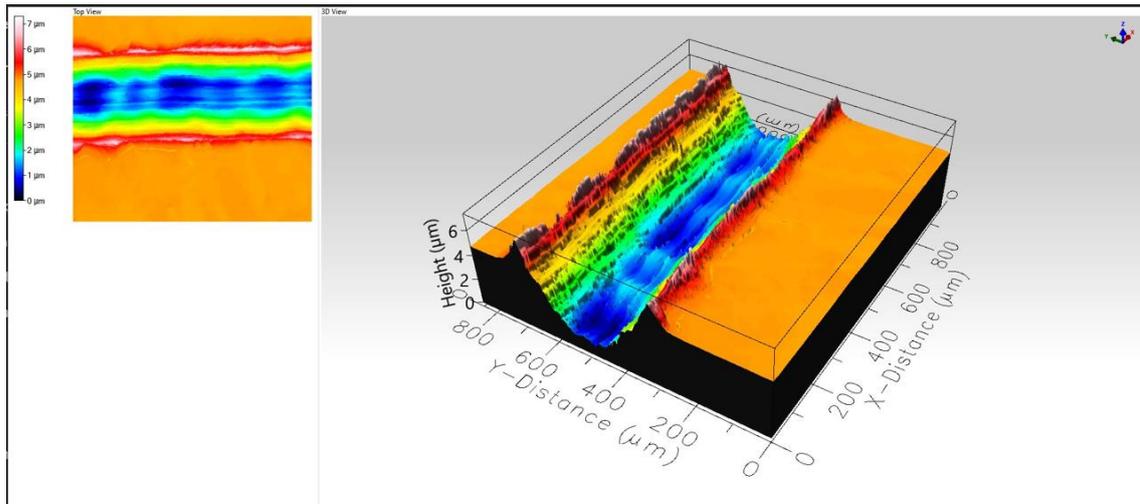


Figura 41. Gráfica de la huella producida en el primer ensayo a 1Hz y 3.56N.

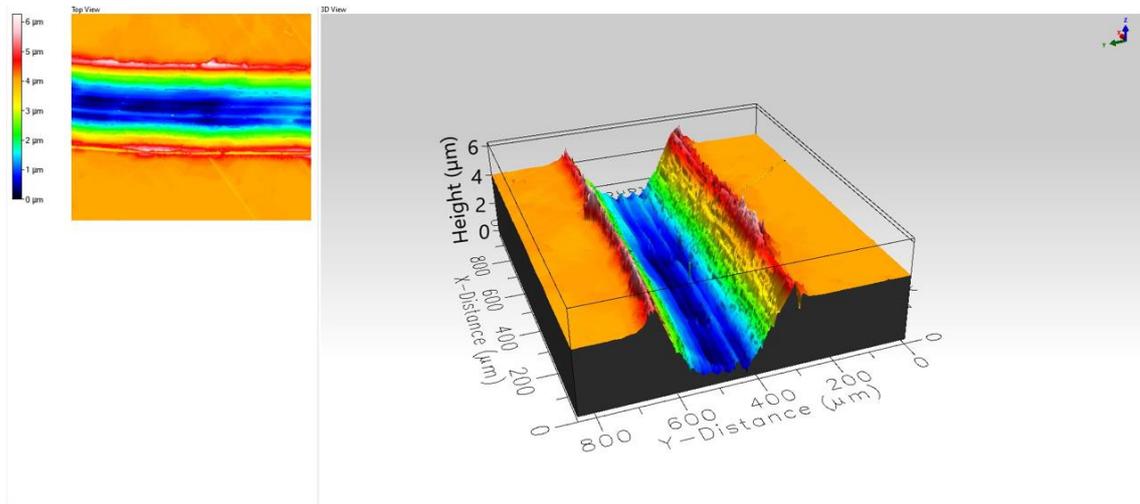


Figura 42. Gráfica de la huella producida en el segundo ensayo a 1Hz y 3.56N.

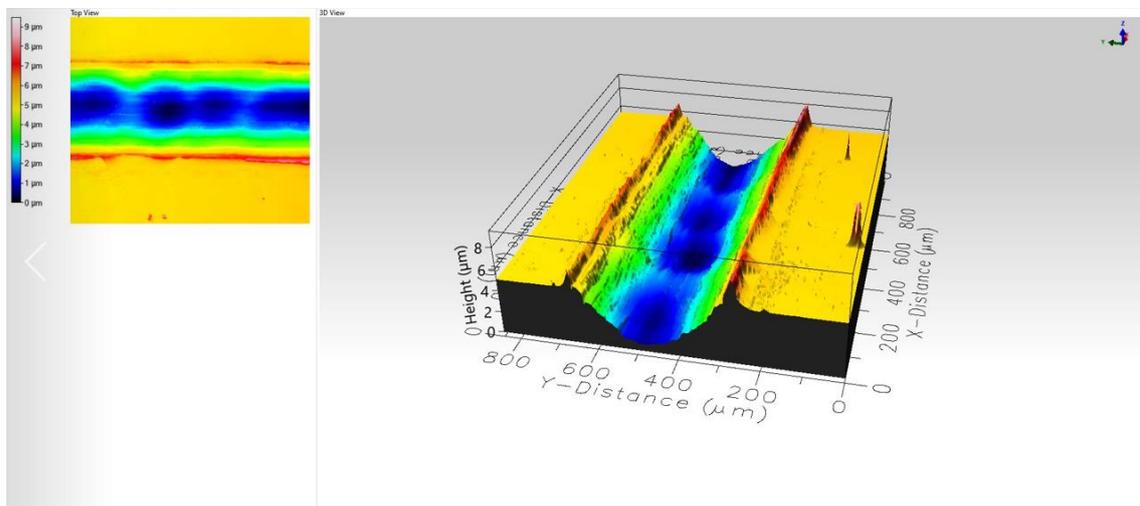


Figura 43. Gráfica de la huella producida en el tercer ensayo a 1Hz y 3.56N.

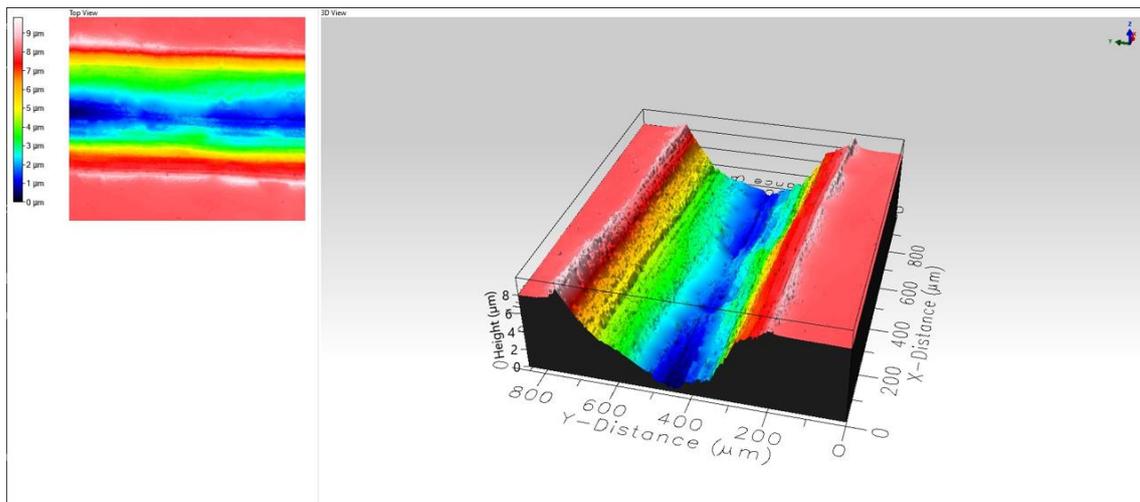


Figura 44. Gráfica de la huella producida en el primer ensayo a 1Hz y 7.56N.

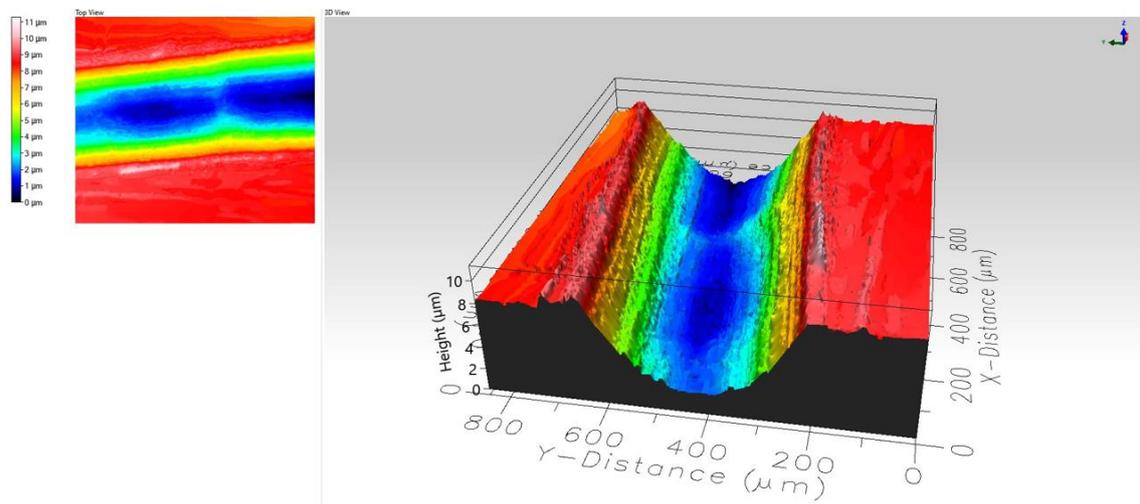


Figura 45. Gráfica de la huella producida en el segundo ensayo a 1Hz y 7.56N.

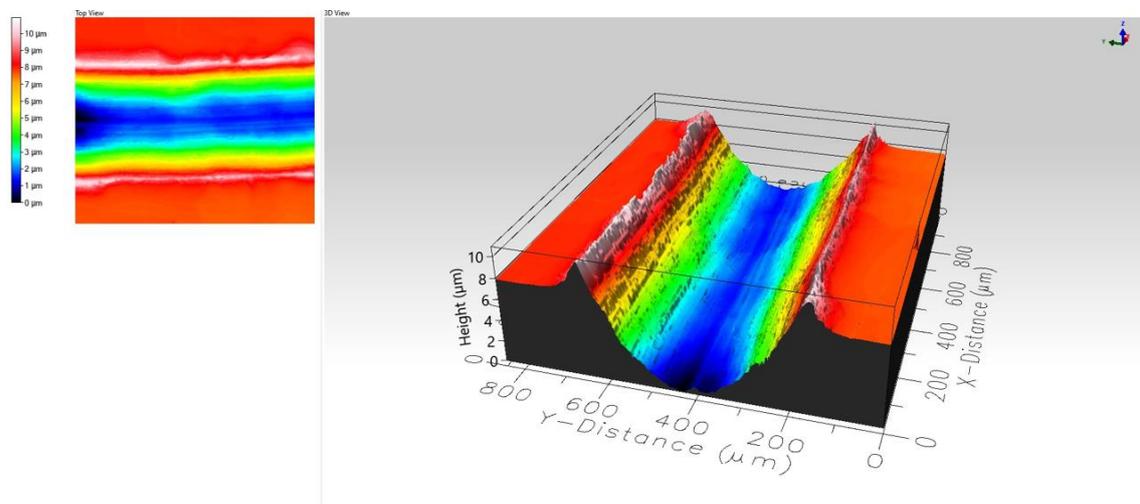


Figura 46. Gráfica de la huella producida en el tercer ensayo a 1Hz y 7.56N.

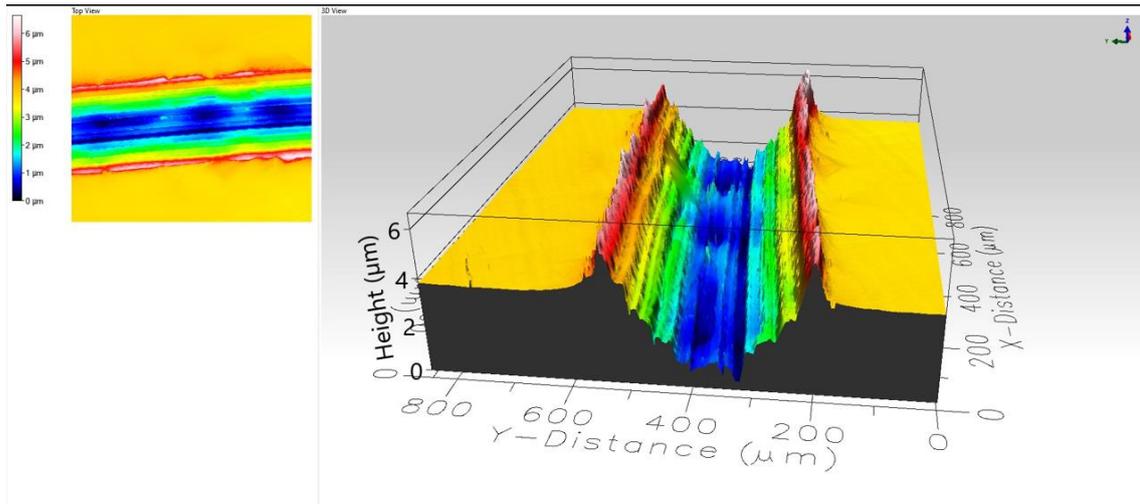


Figura 47. Gráfica de la huella producida en el primer ensayo a 0,5Hz y 5.56N.

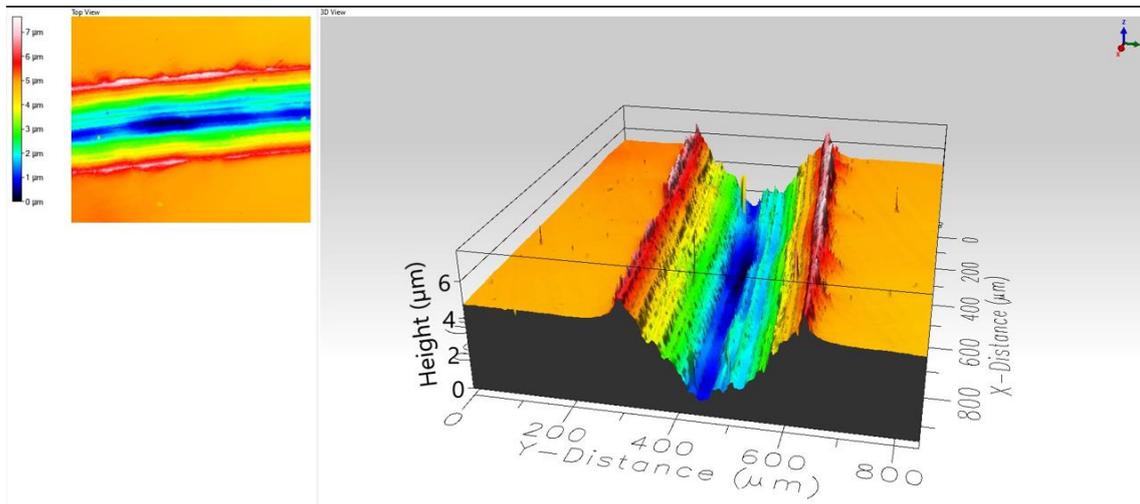


Figura 48. Gráfica de la huella producida en el segundo ensayo a 0,5Hz y 5.56N.

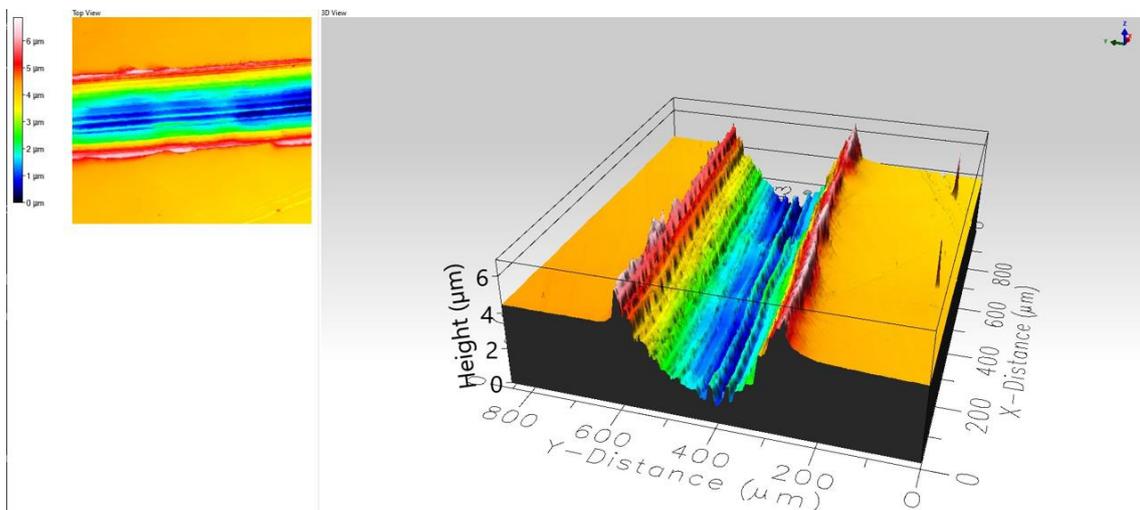


Figura 49. Gráfica de la huella producida en el tercer ensayo a 0,5Hz y 5.56N.

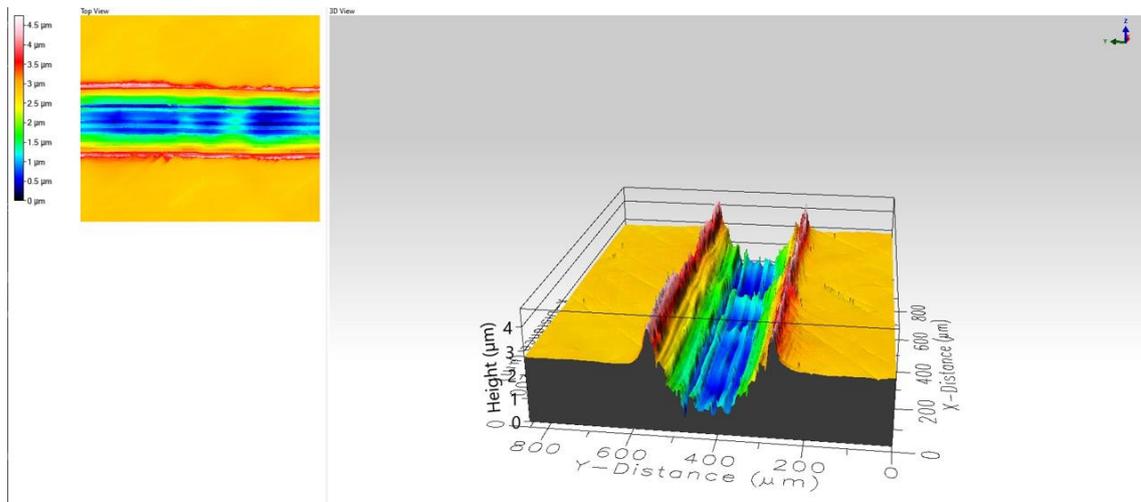


Figura 50. Gráfica de la huella producida en el primer ensayo a 0,5Hz y 3.56N.

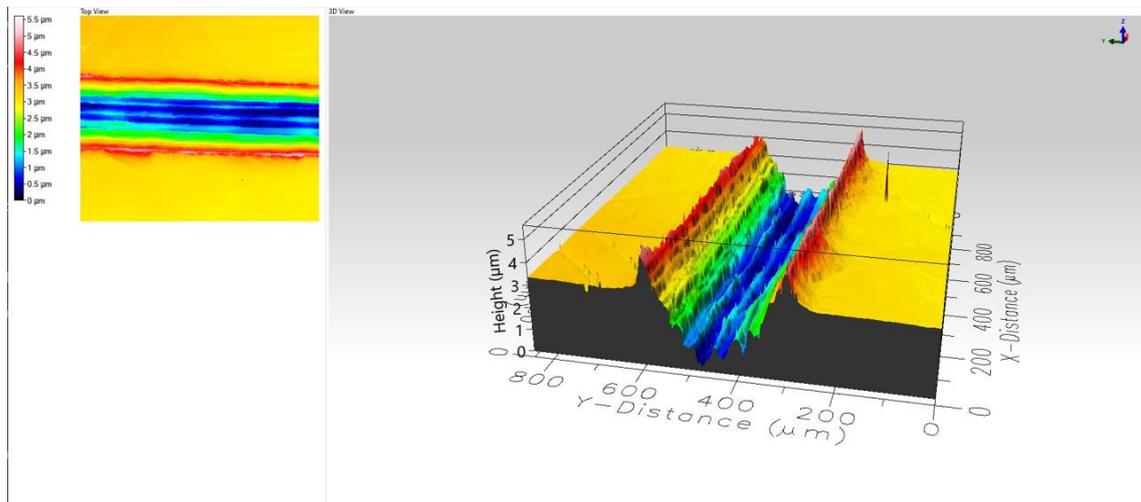


Figura 51. Gráfica de la huella producida en el segundo ensayo a 0,5Hz y 3.56N.

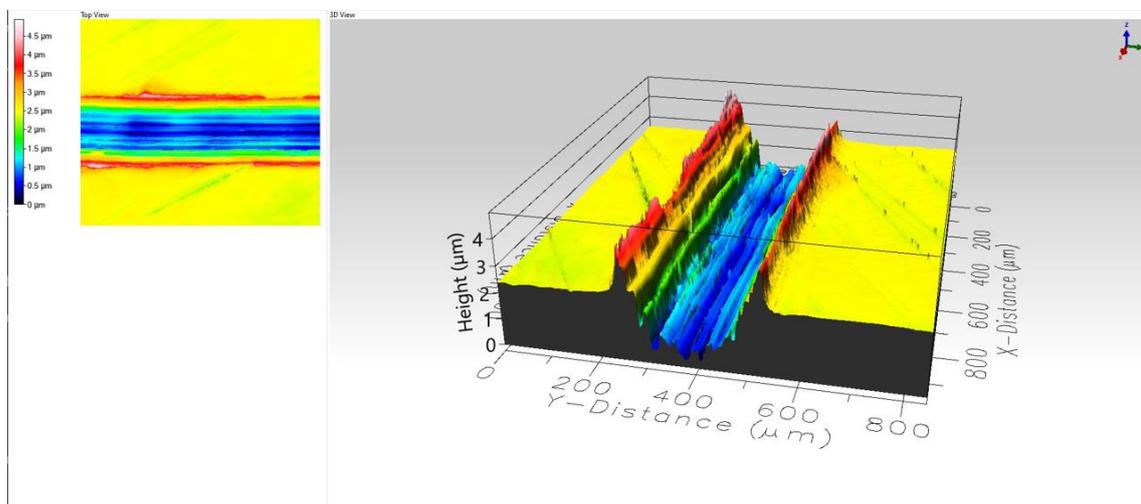


Figura 52. Gráfica de la huella producida en el tercer ensayo a 0,5Hz y 3.56N.

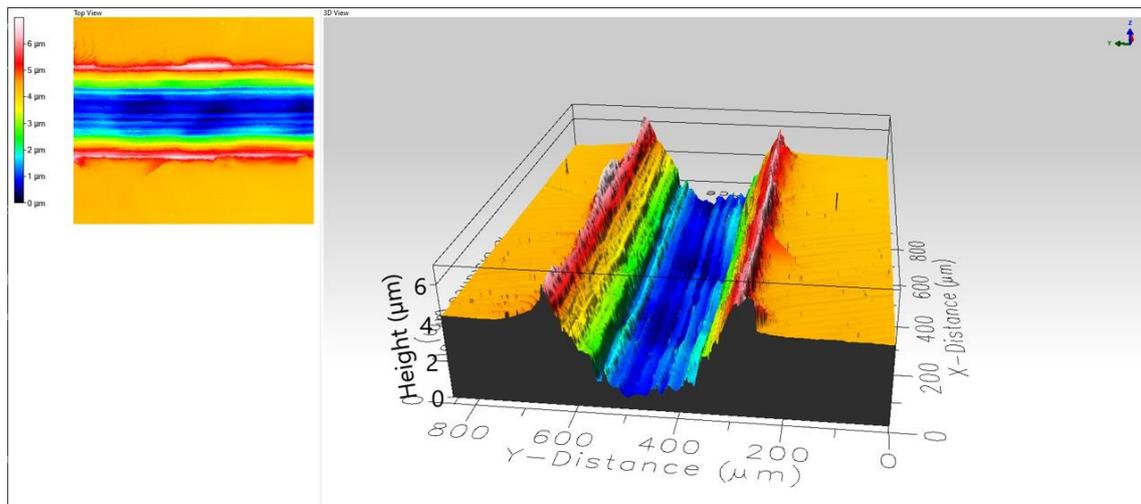


Figura 53. Gráfico de la huella producida en el primer ensayo a 0,5Hz y 7.56N.

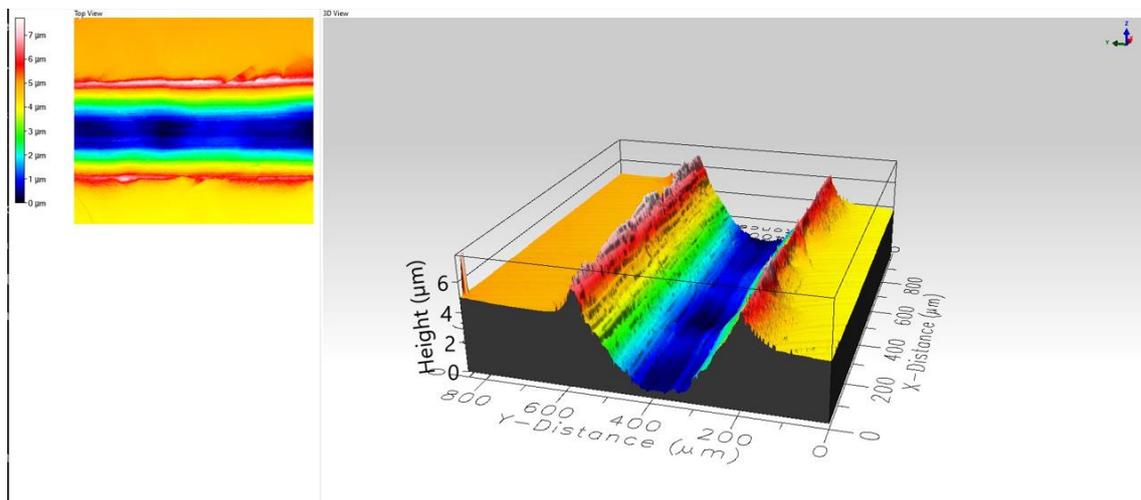


Figura 54. Gráfico de la huella producida en el segundo ensayo a 0,5Hz y 7.56N.

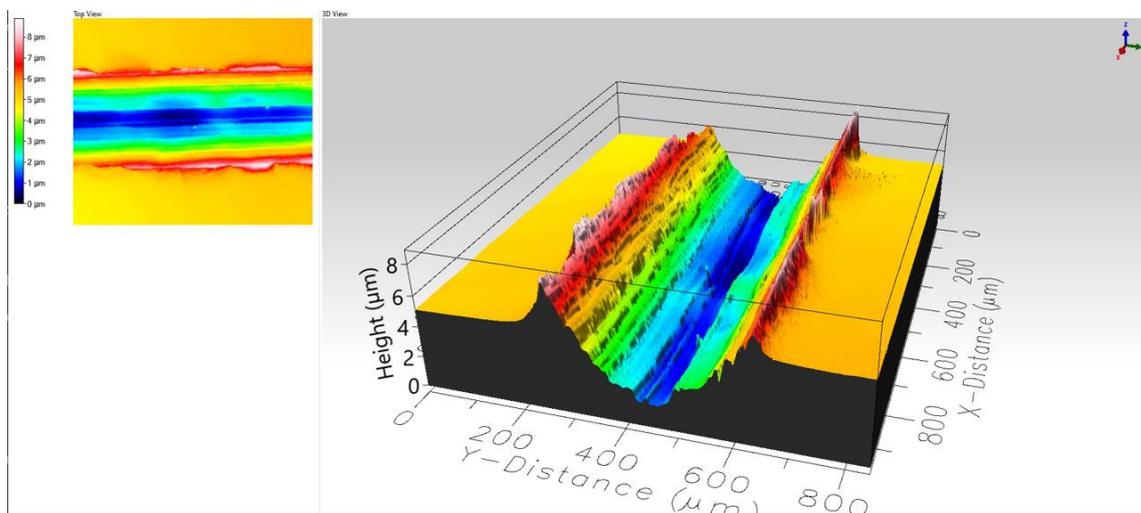


Figura 55. Gráfico de la huella producida en el tercer ensayo a 0,5Hz y 7.56N.

### 1.10.5 Gráficas cof-velocidad y cof-posición

## 1Hz 5.56N

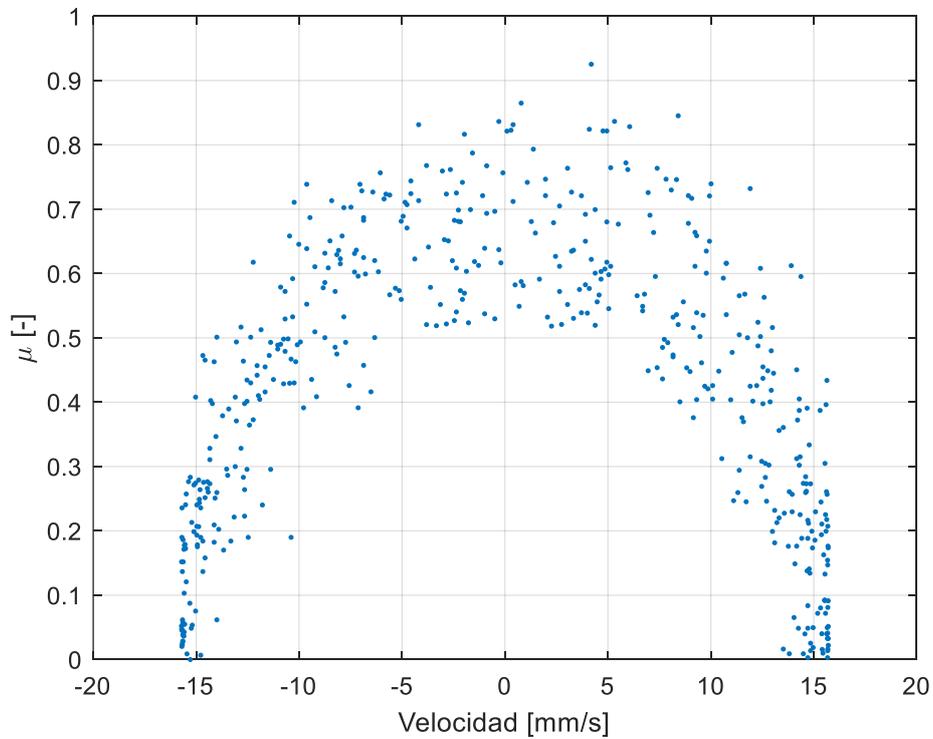


Figura 56. Gráfico cof-velocidad para el primer ensayo de 1Hz y 5.56N.

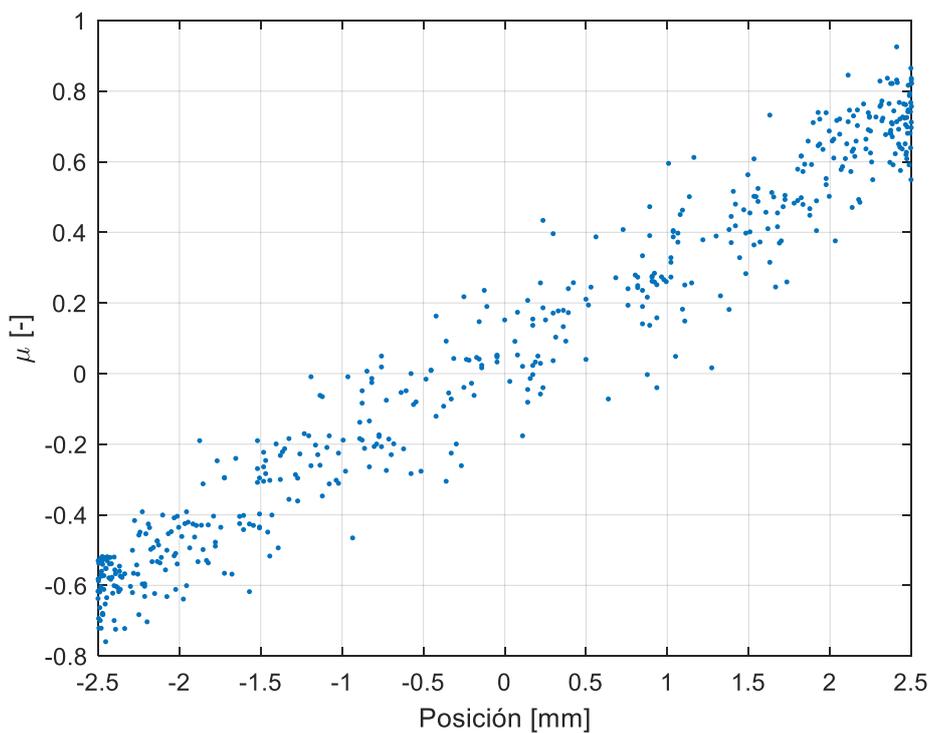


Figura 57. Gráfico cof-posición para el primer ensayo de 1Hz y 5.56N.

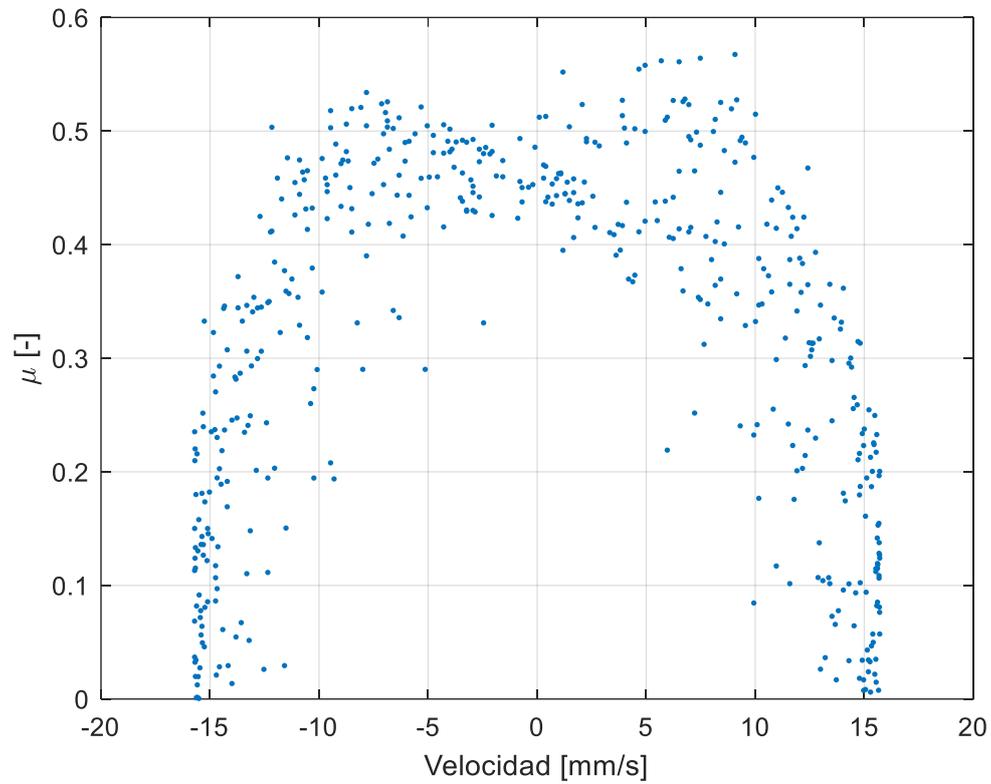


Figura 58. Gráfico cof-velocidad para el segundo ensayo de 1Hz y 5.56N.

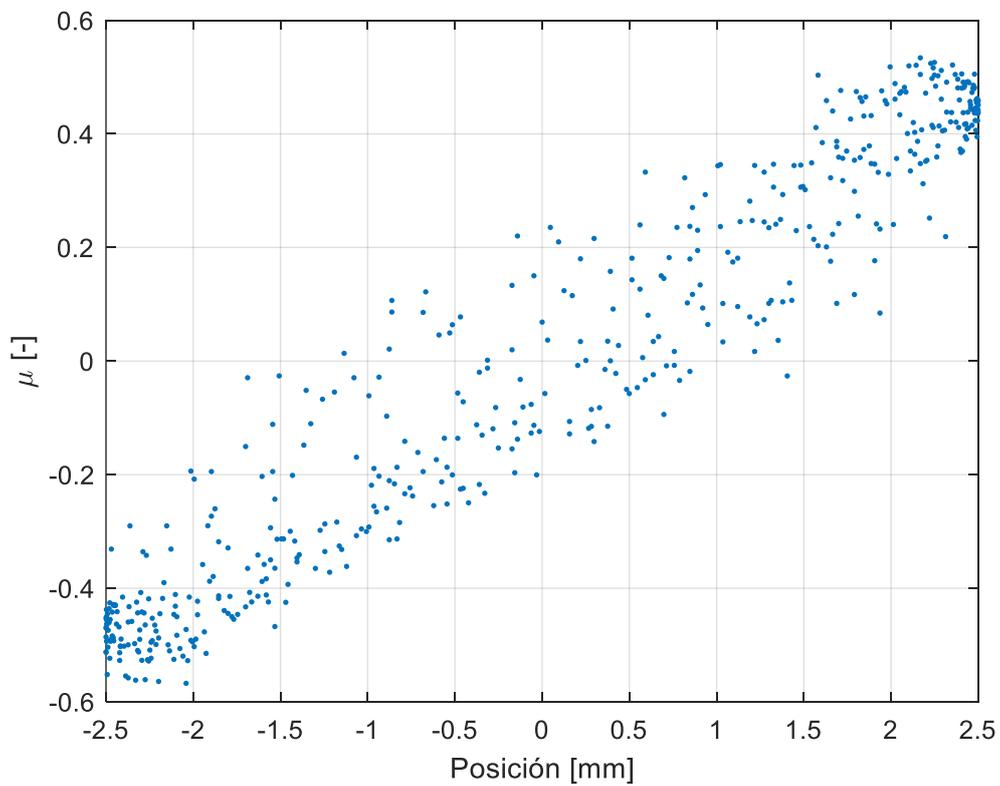


Figura 59. Gráfico cof-posición para el segundo ensayo de 1Hz y 5.56N.

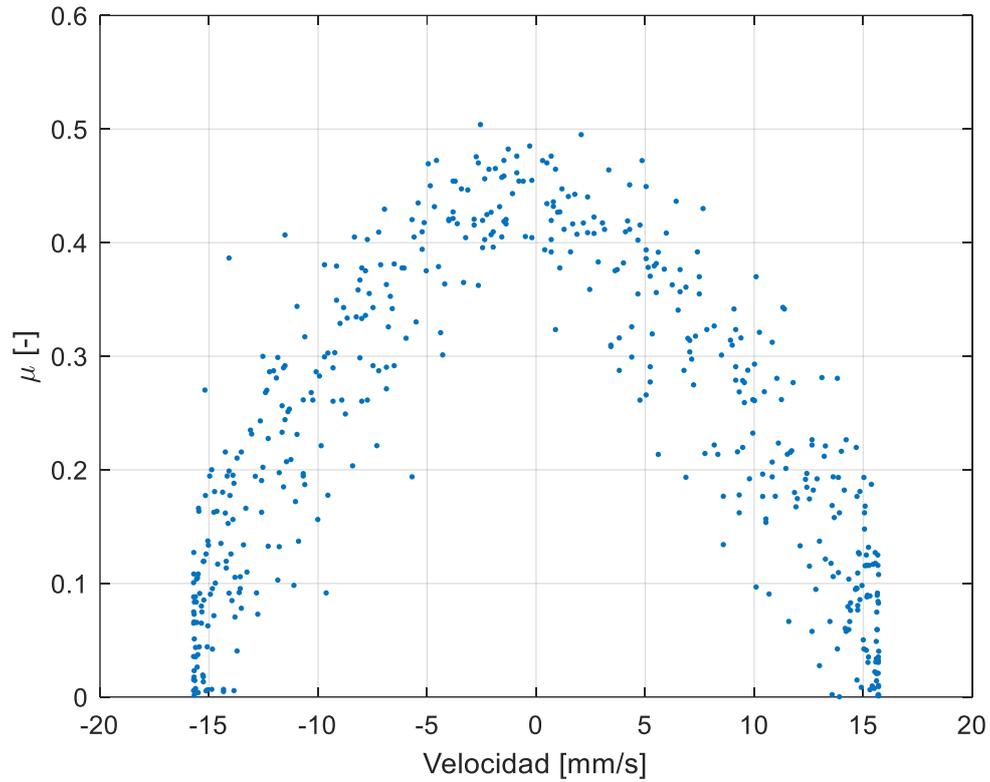


Figura 60. Gráfico cof-velocidad para el tercer ensayo de 1Hz y 5.56N.

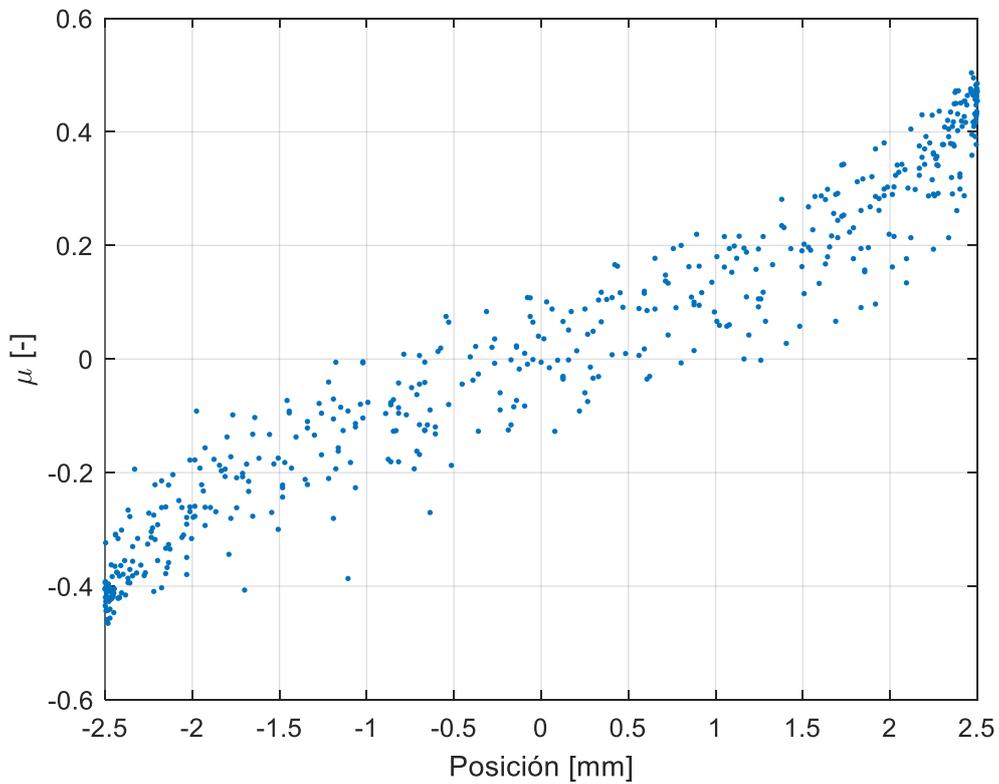


Figura 61. Gráfico cof-posición para el tercer ensayo de 1Hz y 5.56N.

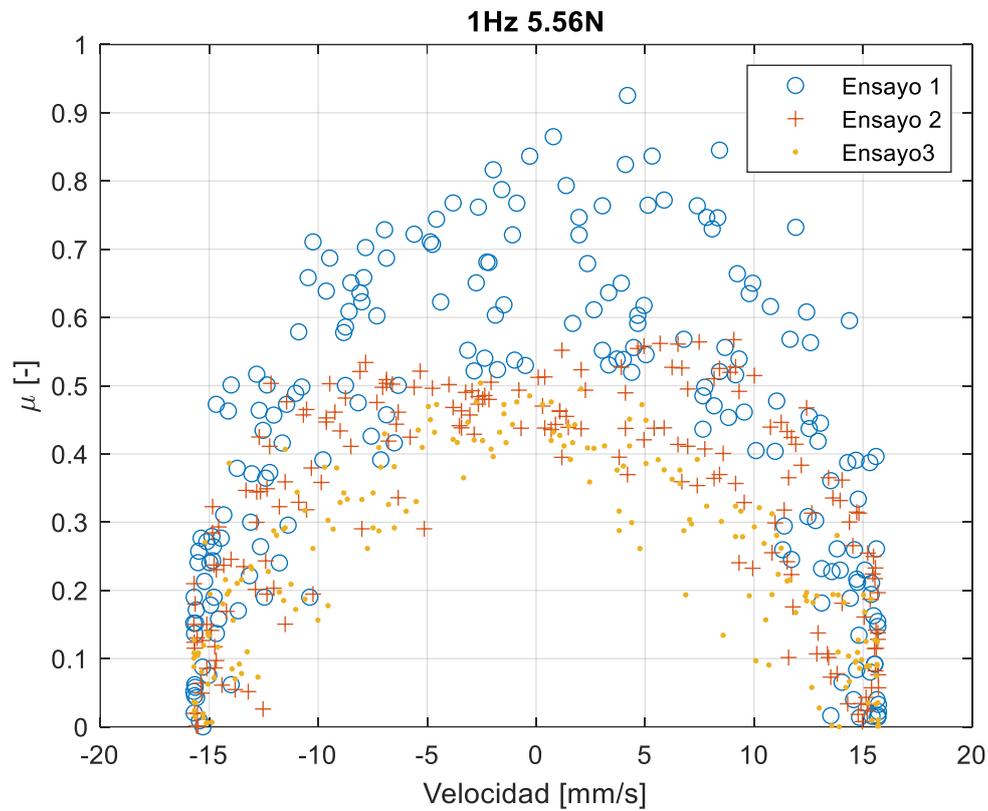


Figura 62. Gráfico cof-velocidad donde se comparan los ensayos de 1Hz y 5.56N.

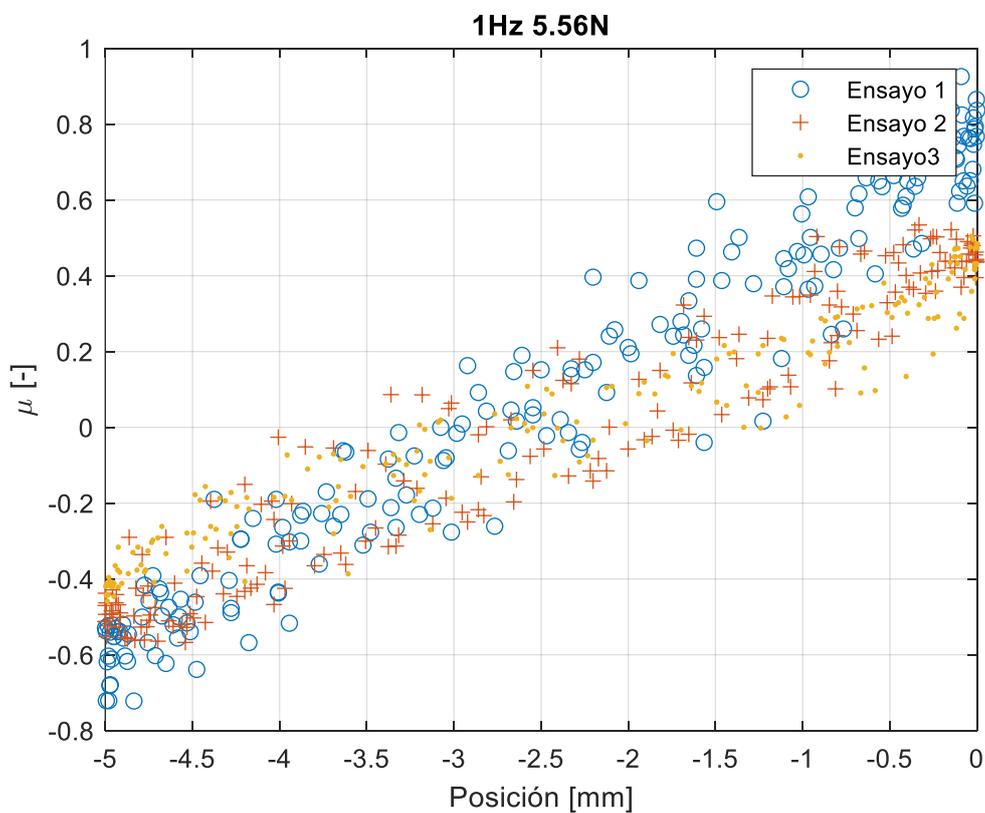


Figura 63. Gráfico cof-posición donde se comparan los ensayos de 1Hz y 5.56N.

## 1Hz 3.56N

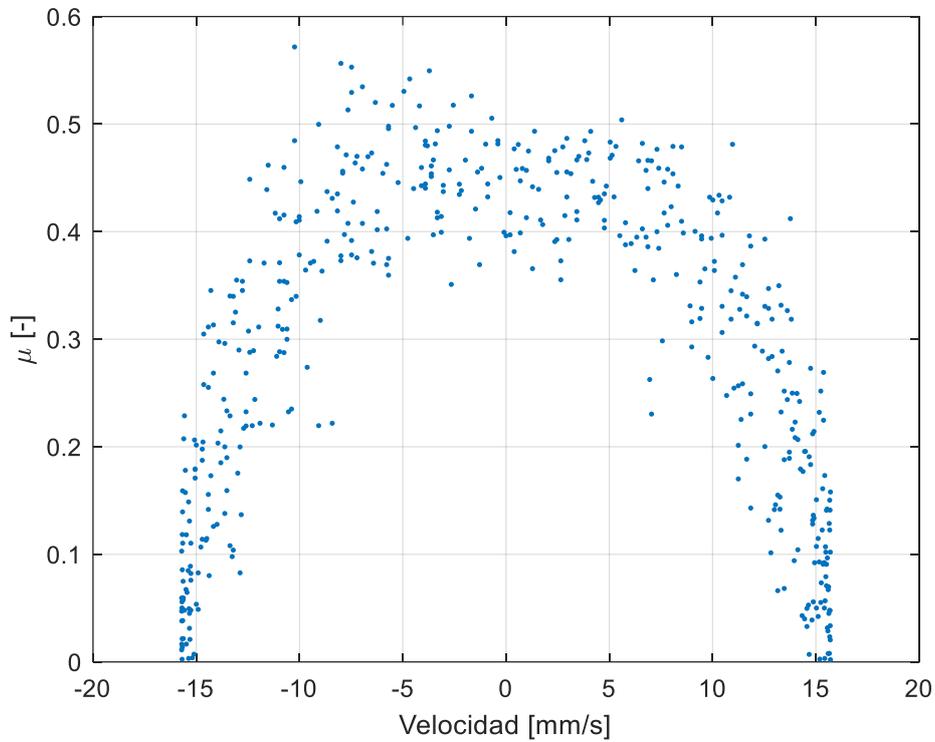


Figura 64. Gráfico cof-velocidad para el primer ensayo de 1Hz y 3.56N.

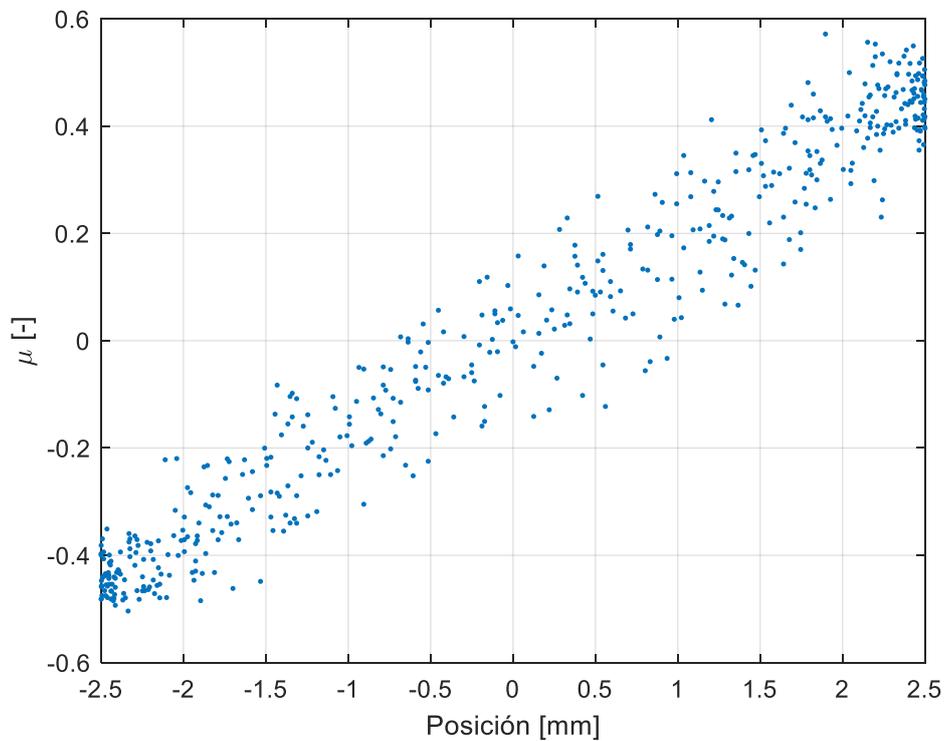


Figura 65. Gráfico cof-posición para el primer ensayo de 1Hz y 3.56N.

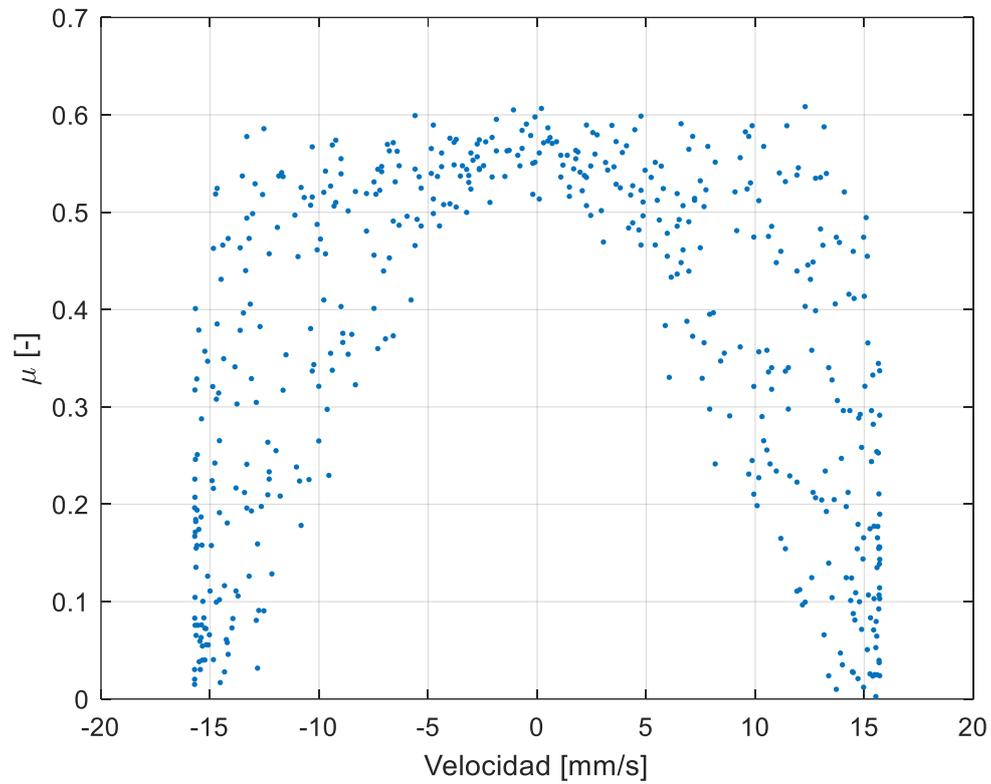


Figura 66. Gráfico cof-velocidad para el segundo ensayo de 1Hz y 3.56N.

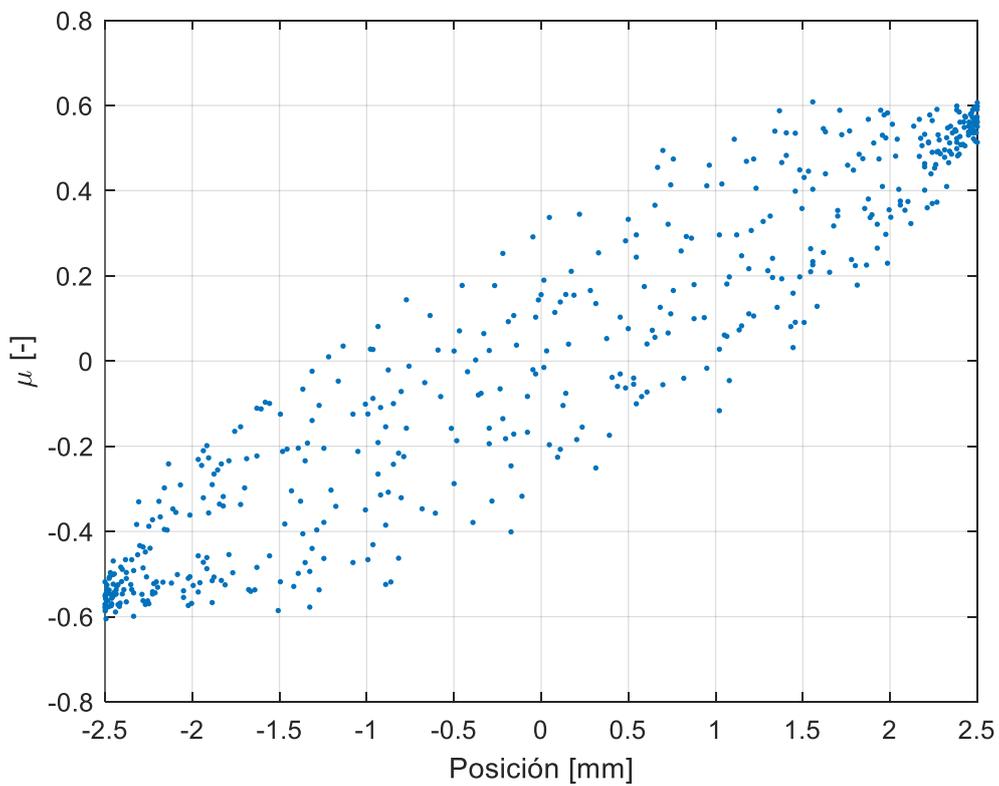


Figura 67. Gráfico cof-posición para el segundo ensayo de 1Hz y 3.56N.

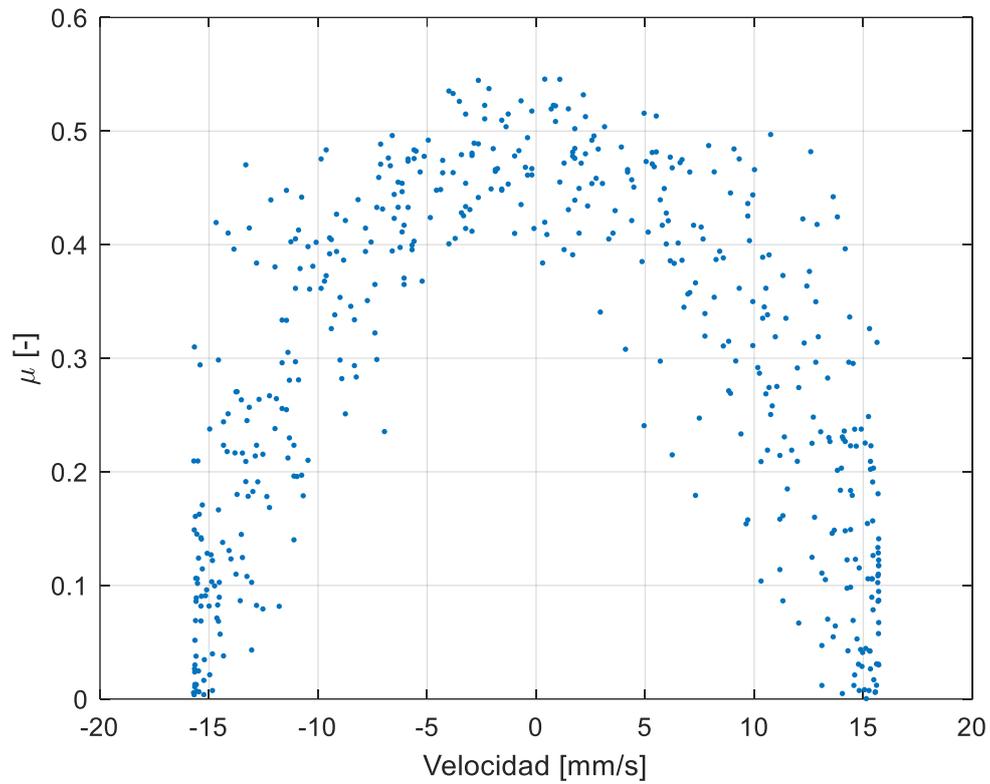


Figura 68. Gráfico cof-velocidad para el tercer ensayo de 1Hz y 3.56N

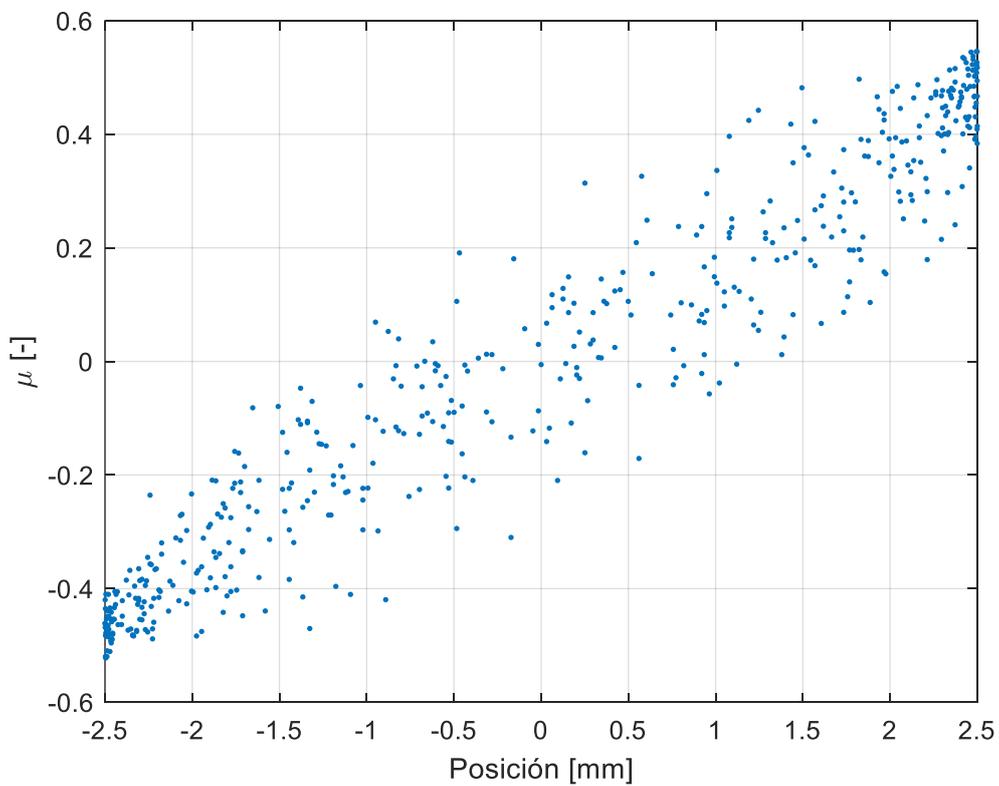


Figura 69. Gráfico cof-posición para el tercer ensayo de 1Hz y 3.56N.

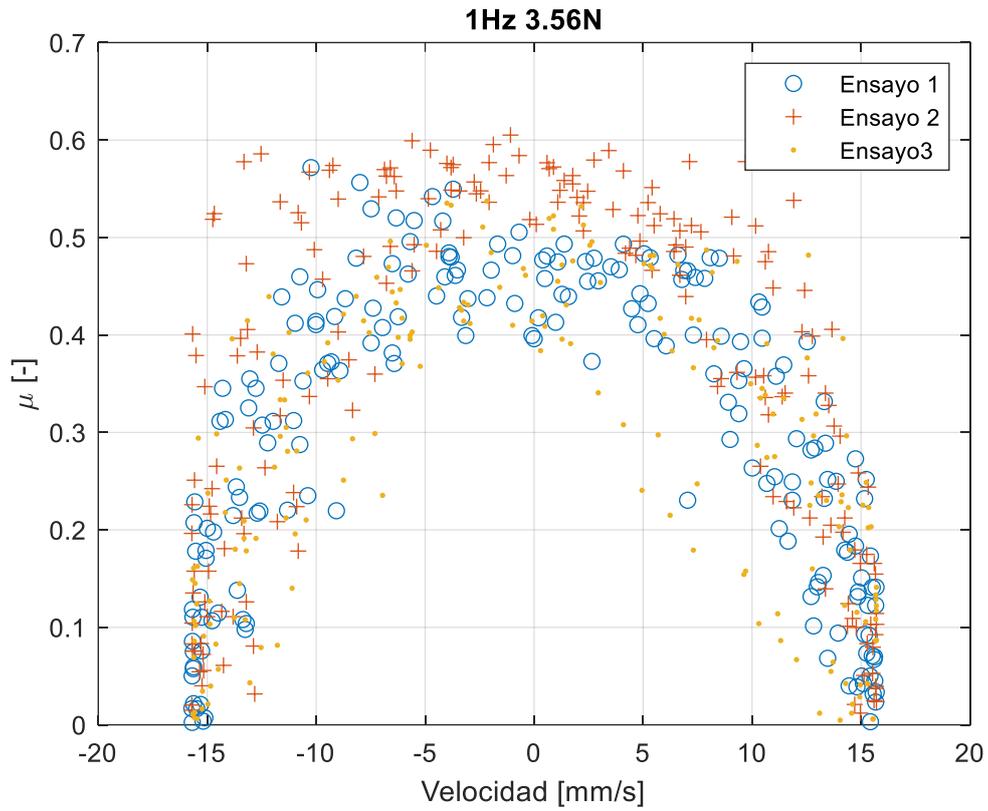


Figura 70. Gráfico cof-velocidad donde se comparan los ensayos de 1Hz y 3.56N.

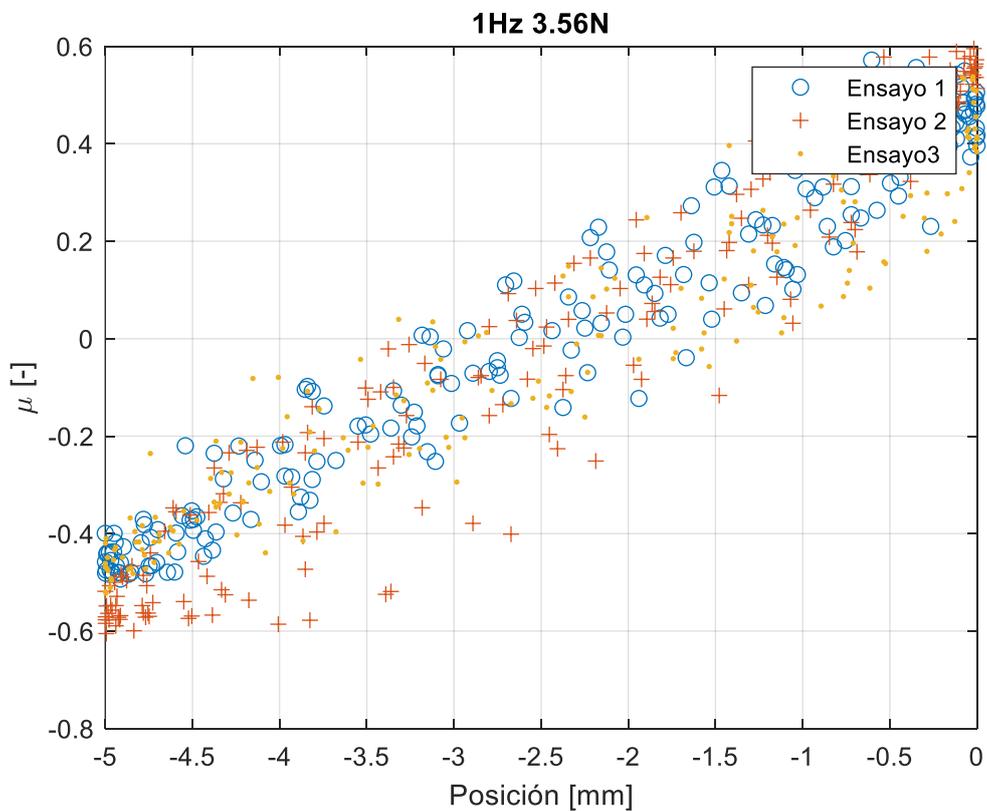


Figura 71. Gráfico cof-posición donde se comparan los ensayos de 1Hz y 3.56N.

## 1Hz 7.56N

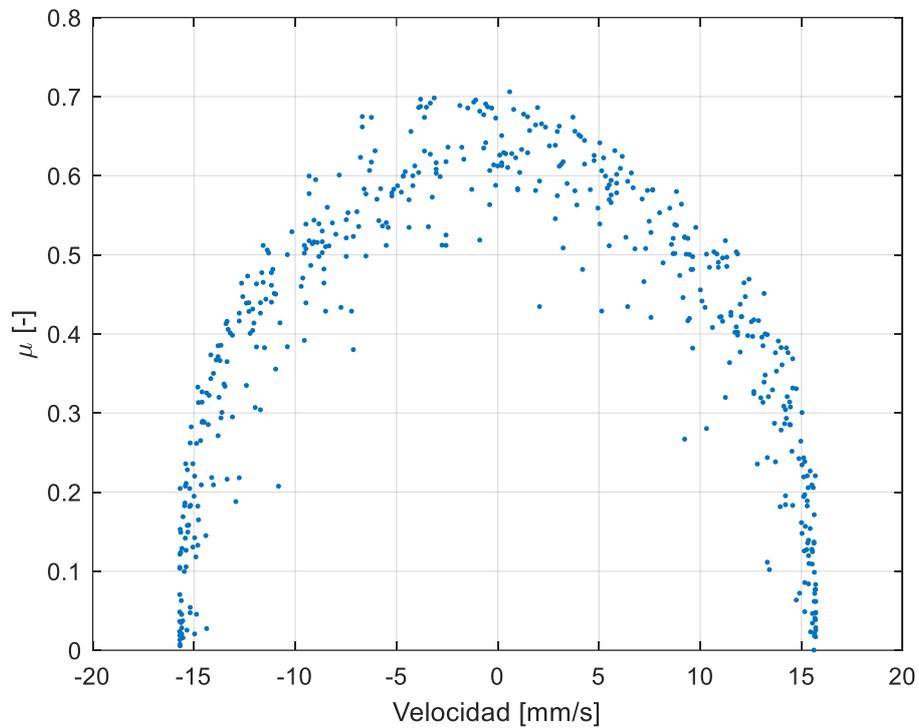


Figura 72. Gráfico cof-velocidad para el primer ensayo de 1Hz y 7.56N.

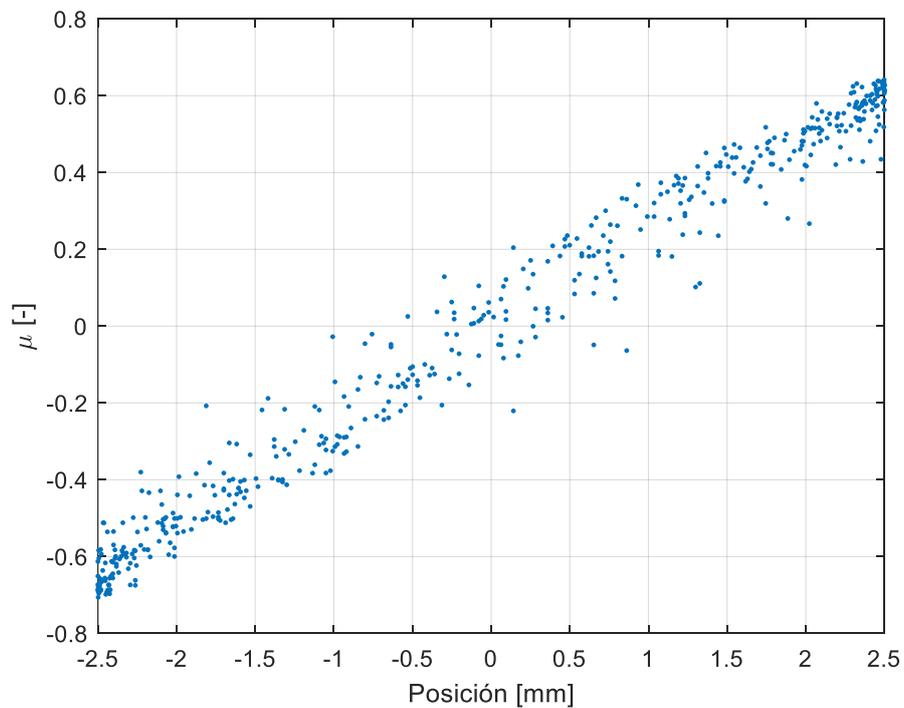


Figura 73. Gráfico cof-posición para el primer ensayo de 1Hz y 7.56N.

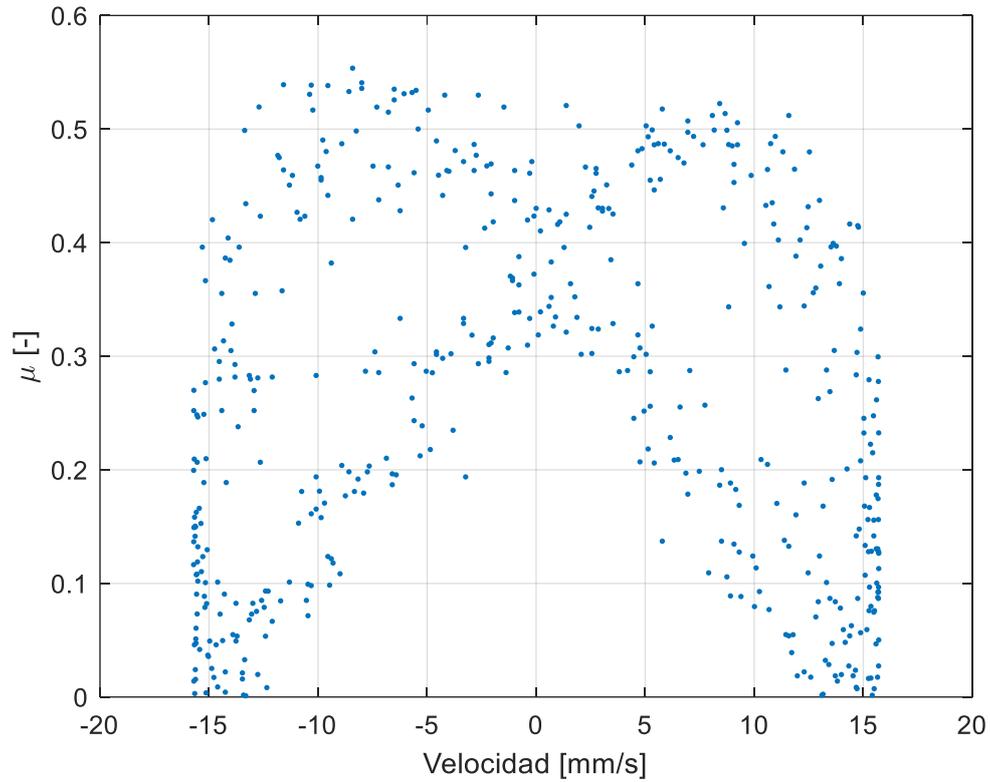


Figura 74. Gráfico cof-velocidad para el segundo ensayo de 1Hz y 7.56N.

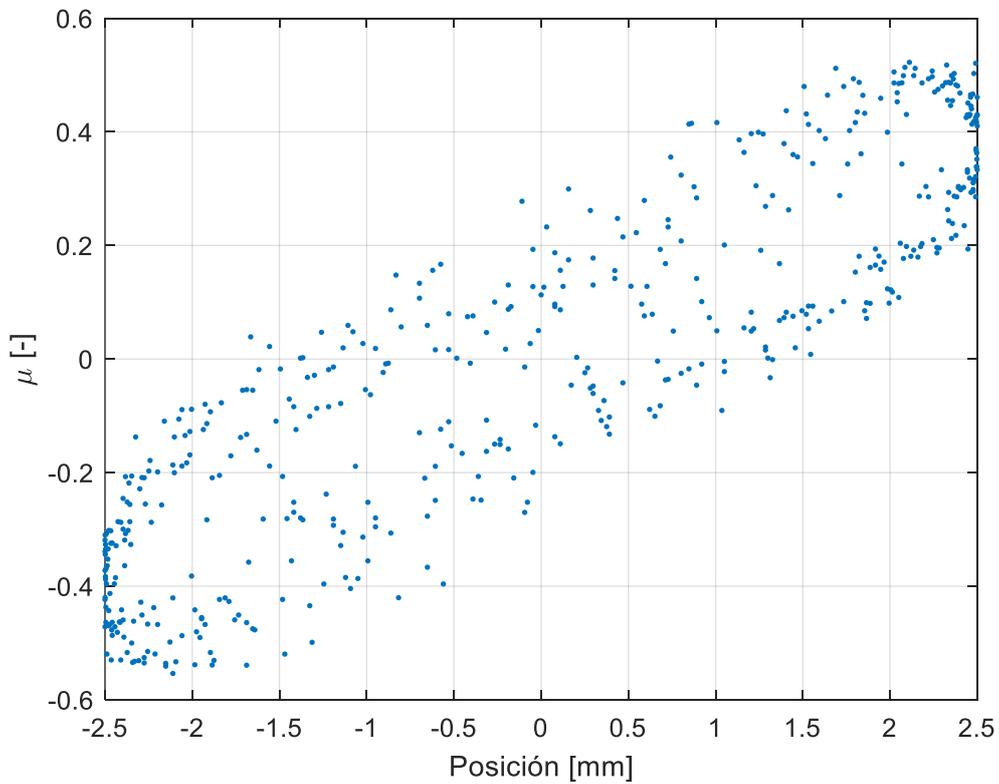


Figura 75. Gráfico cof-posición para el segundo ensayo de 1Hz y 7.56N.

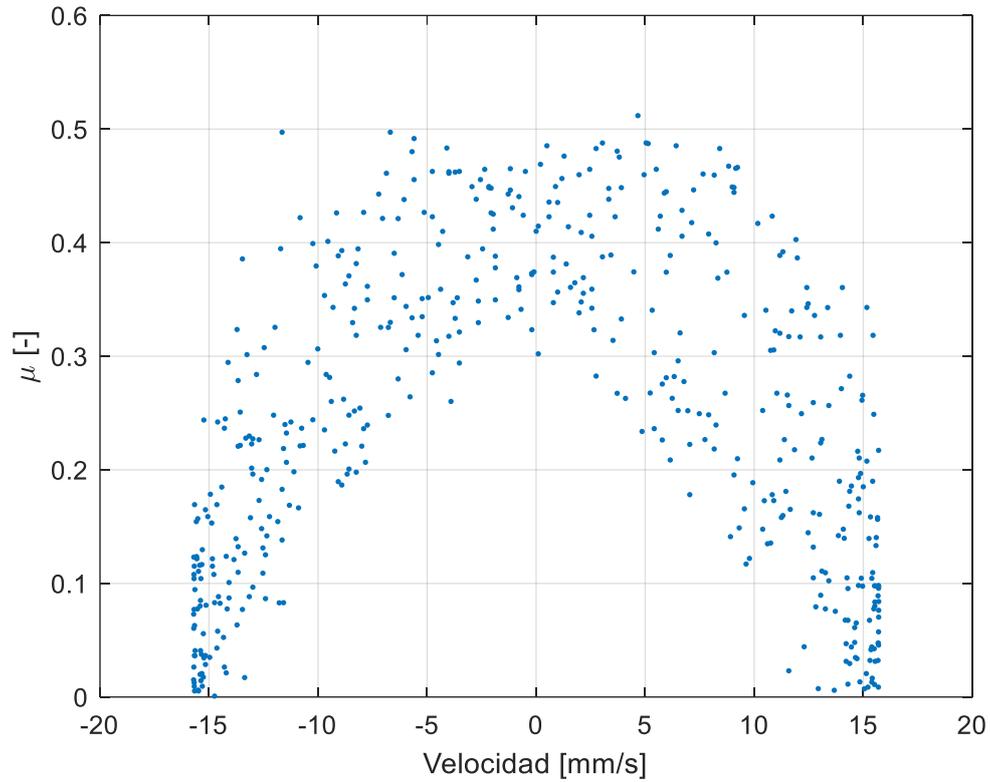


Figura 76. Gráfico cof-velocidad para el tercer ensayo de 1Hz y 7.56N.

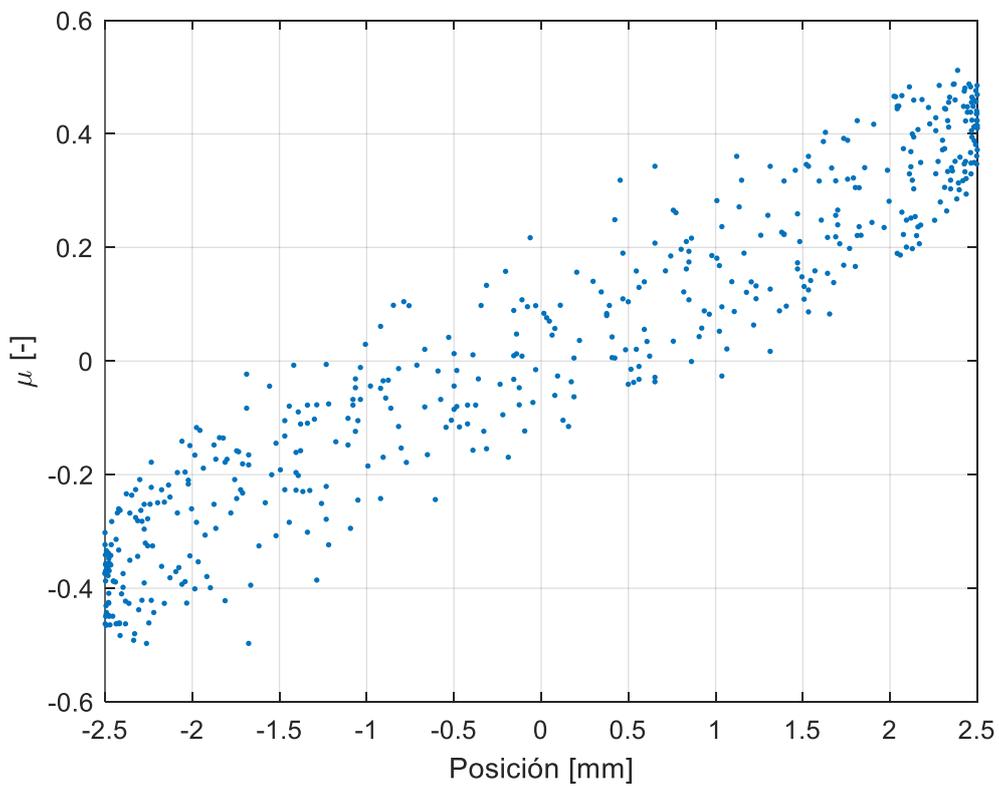


Figura 77. Gráfico cof-posición para el tercer ensayo de 1Hz y 7.56N.

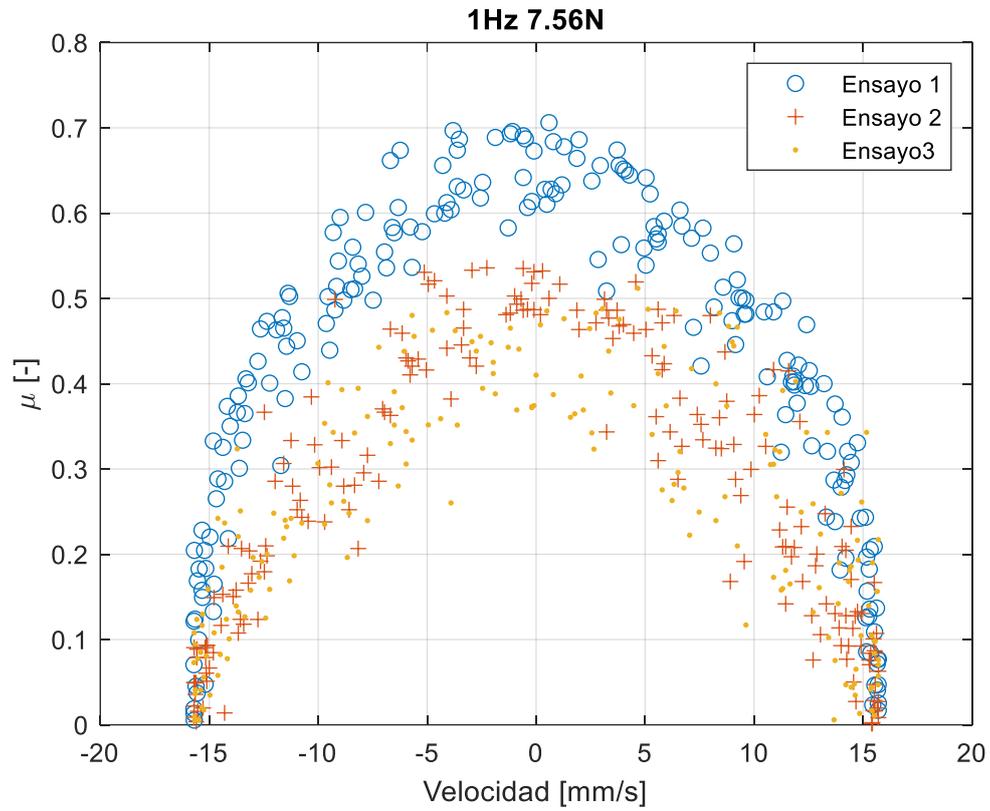


Figura 78. Gráfico cof-velocidad donde se comparan los ensayos de 1Hz y 7.56N.

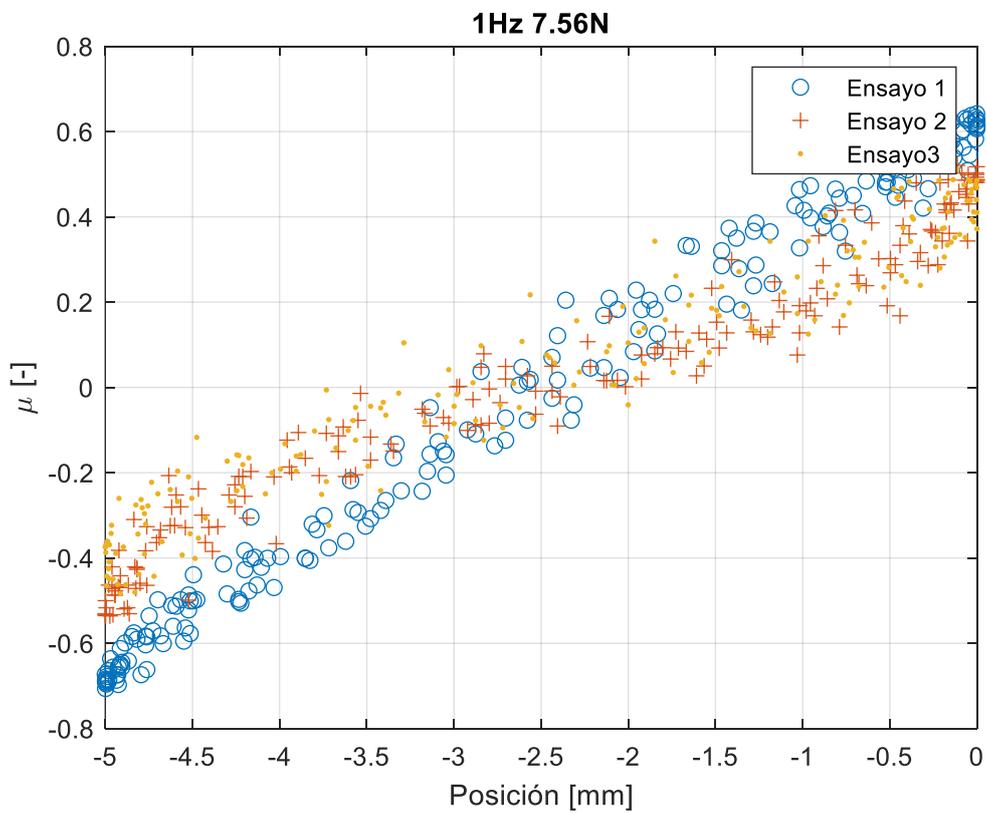


Figura 79. Gráfico cof-posición donde se comparan los ensayos de 1Hz y 7.56N.

## 0.5Hz 5.56N

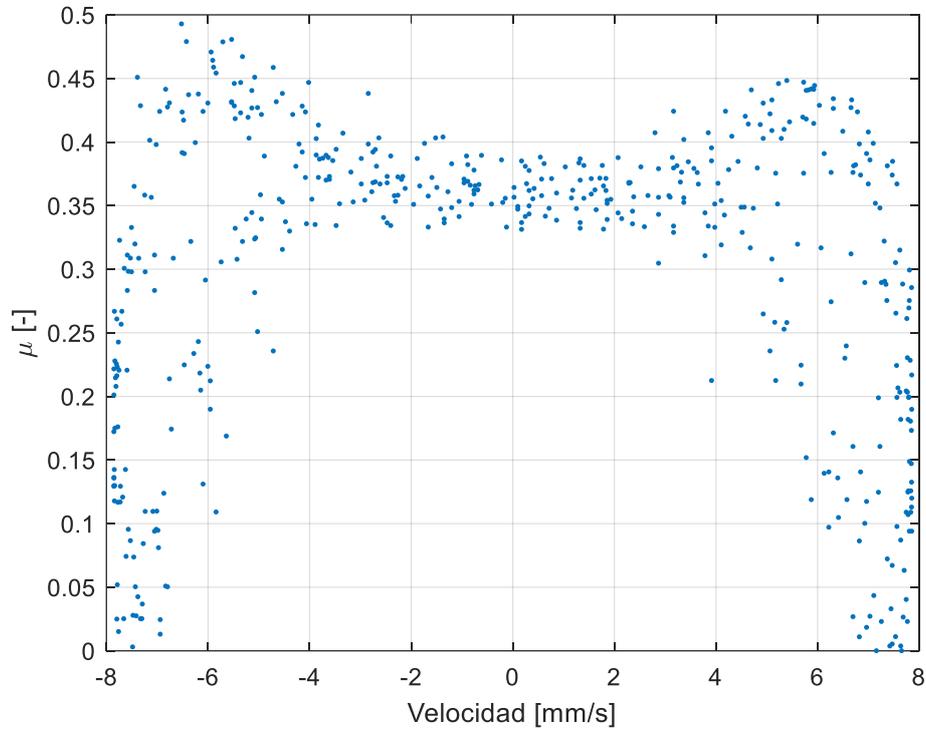


Figura 80. Gráfico cof-velocidad para el primer ensayo de 0.5Hz y 5.56N.

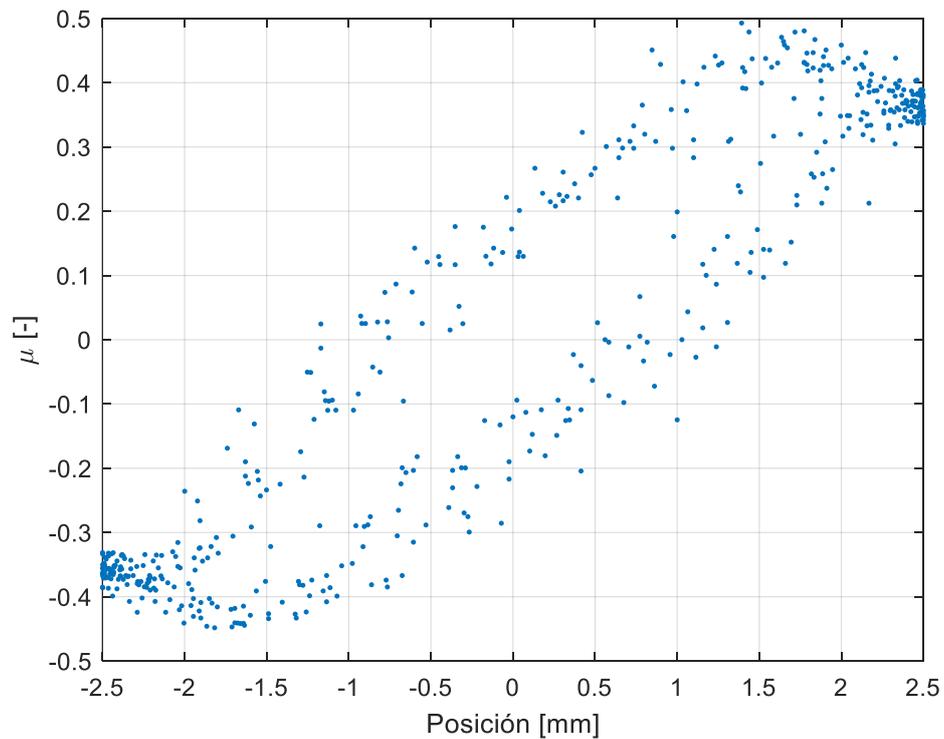


Figura 81. Gráfico cof-posición para el primer ensayo de 0.5Hz y 5.56N.

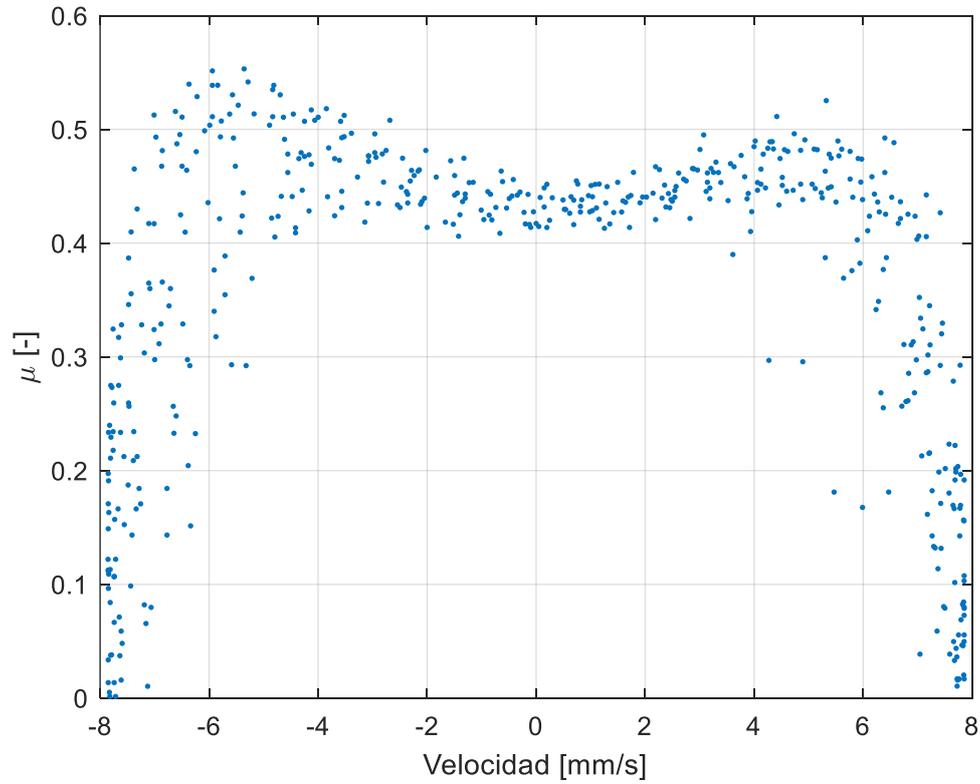


Figura 82. Gráfico cof-velocidad para el segundo ensayo de 0.5Hz y 5.56N.

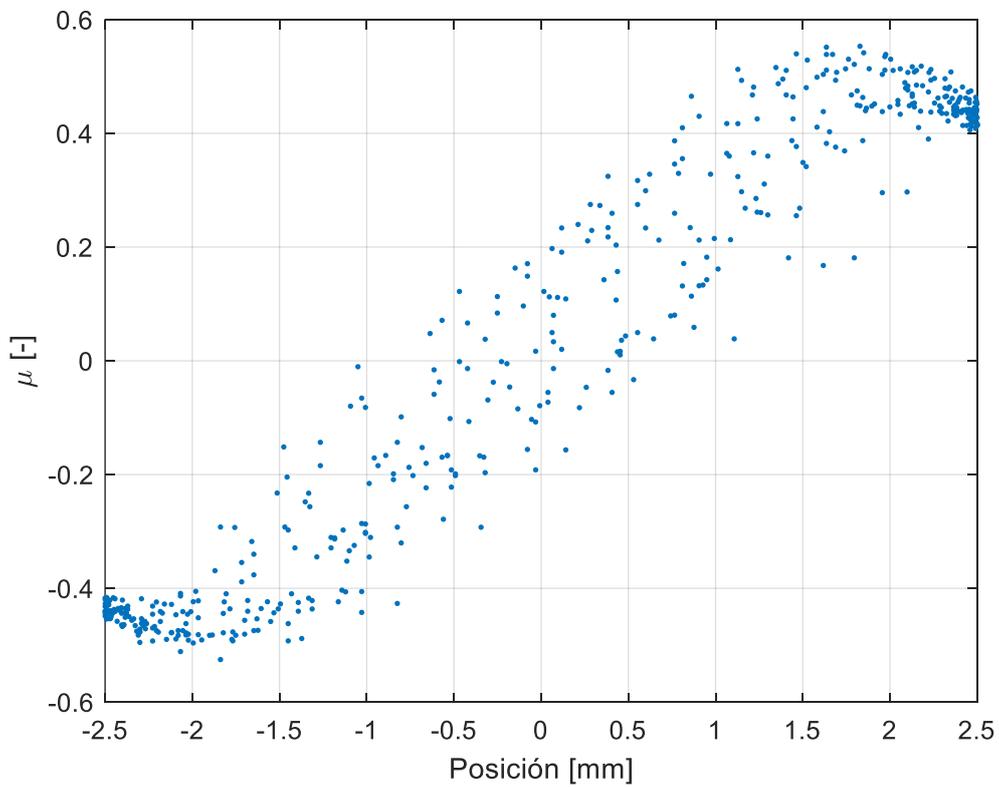


Figura 83. Gráfico cof-posición para el segundo ensayo de 0.5Hz y 5.56N.

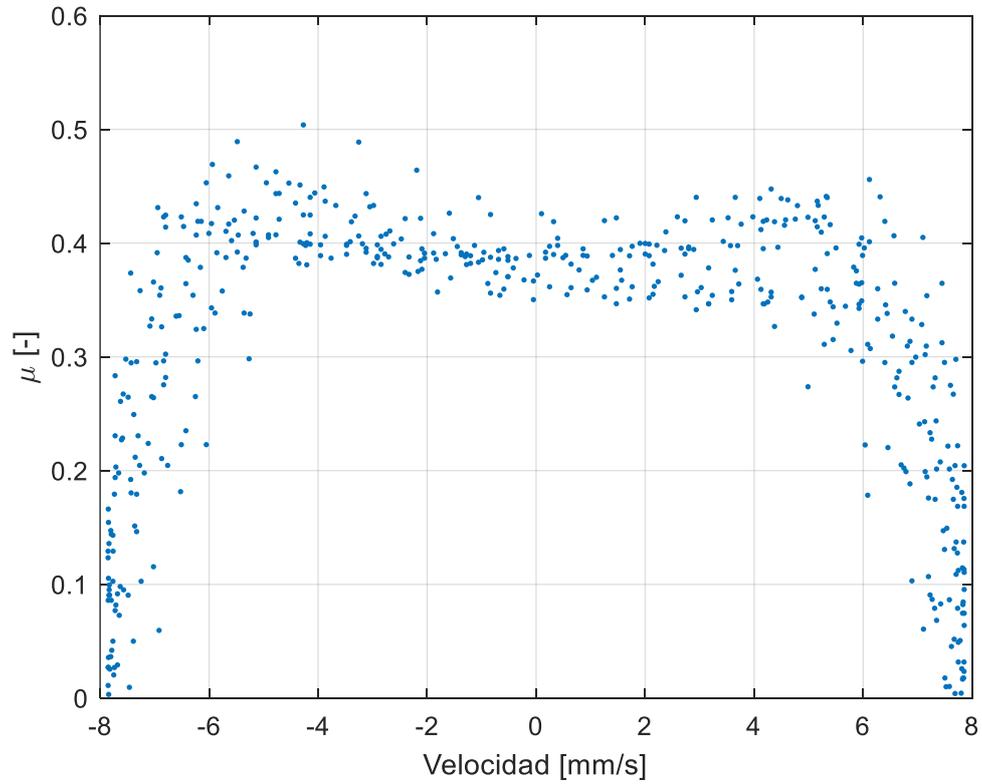


Figura 84. Gráfico cof-velocidad para el tercer ensayo de 0.5Hz y 5.56N.

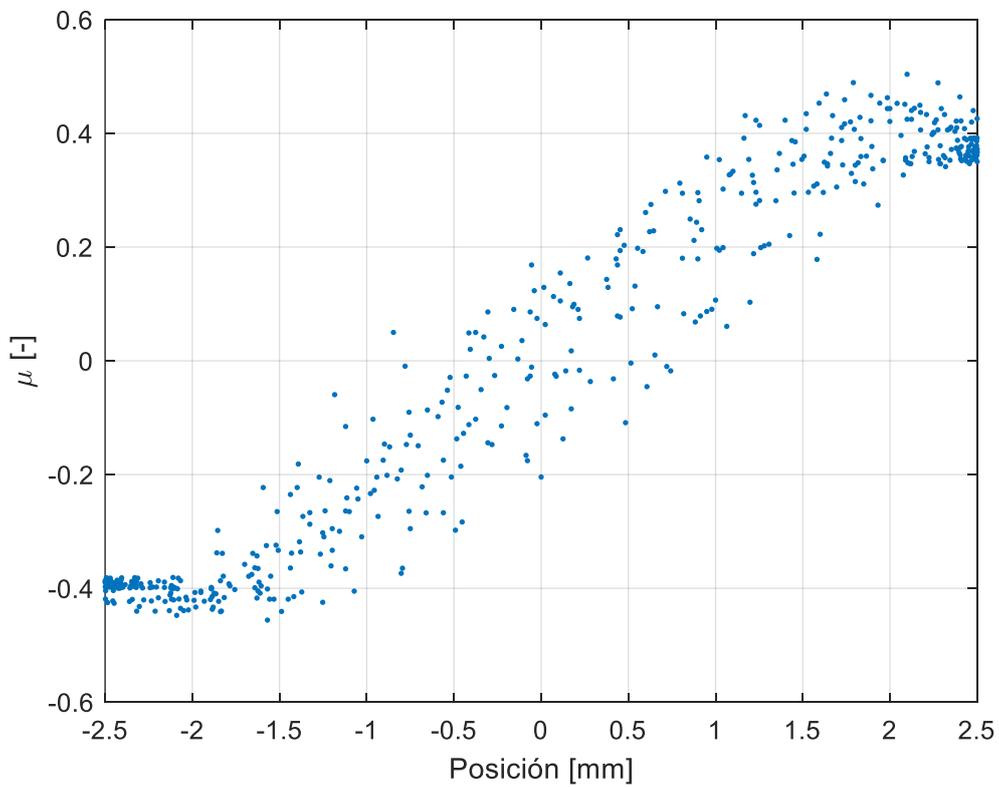


Figura 85. Gráfico cof-posición para el tercer ensayo de 0.5Hz y 5.56N.

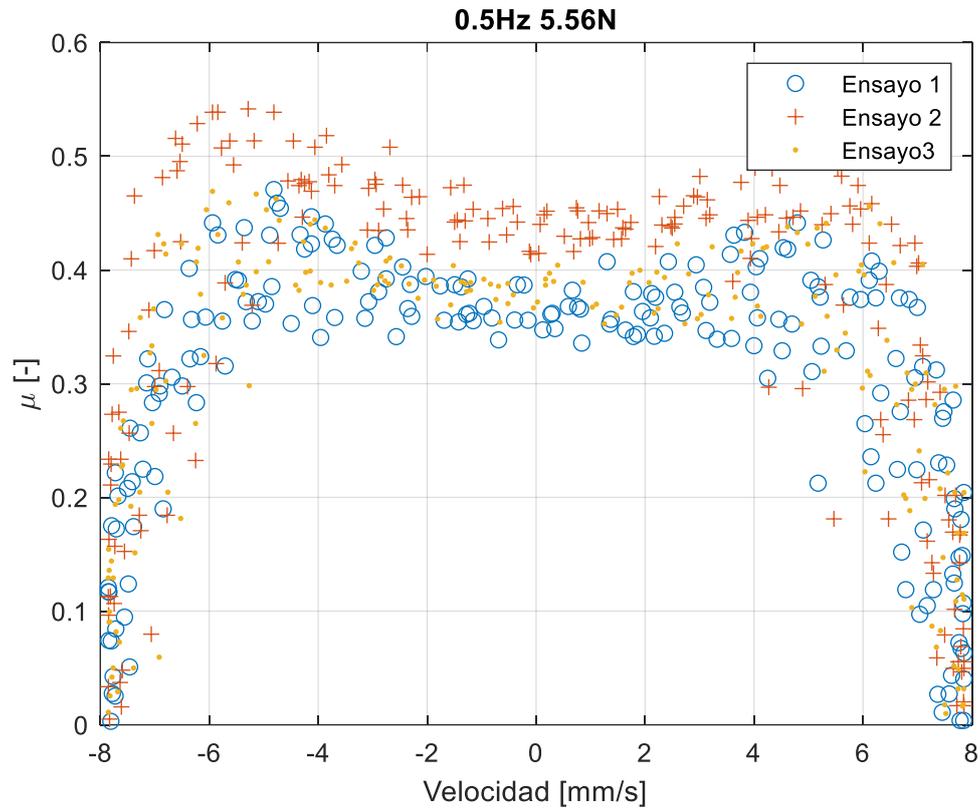


Figura 86. Gráfico cof-velocidad donde se comparan los ensayos de 0.5Hz y 5.56N.

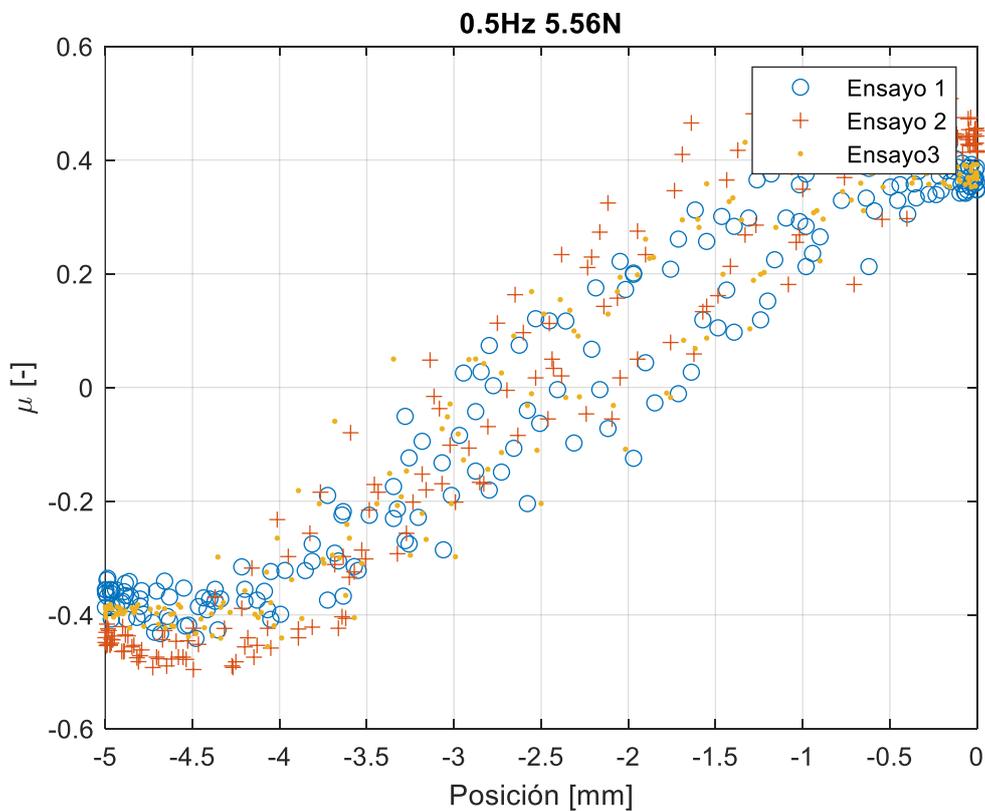


Figura 87. Gráfico cof-posición donde se comoaran los ensayos de 0.5Hz y 5.56N.

0.5Hz 3.56N

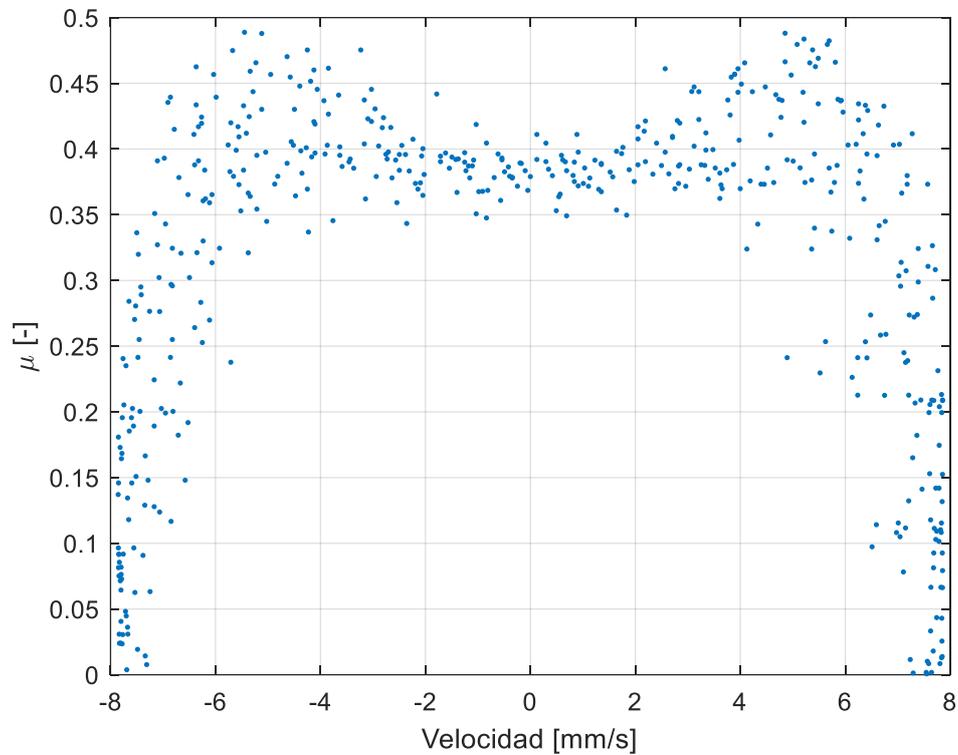


Figura 88. Gráfico cof-velocidad para el primer ensayo de 0.5Hz y 3.56N.

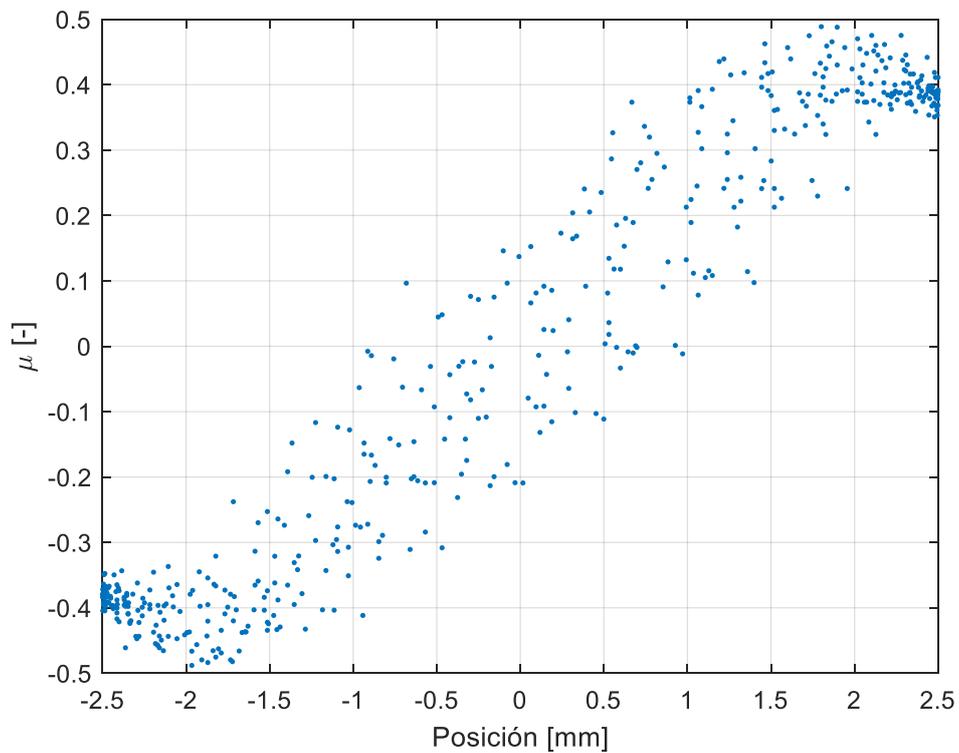


Figura 89. Gráfico cof-posición para el primer ensayo de 0.5Hz y 3.56N.

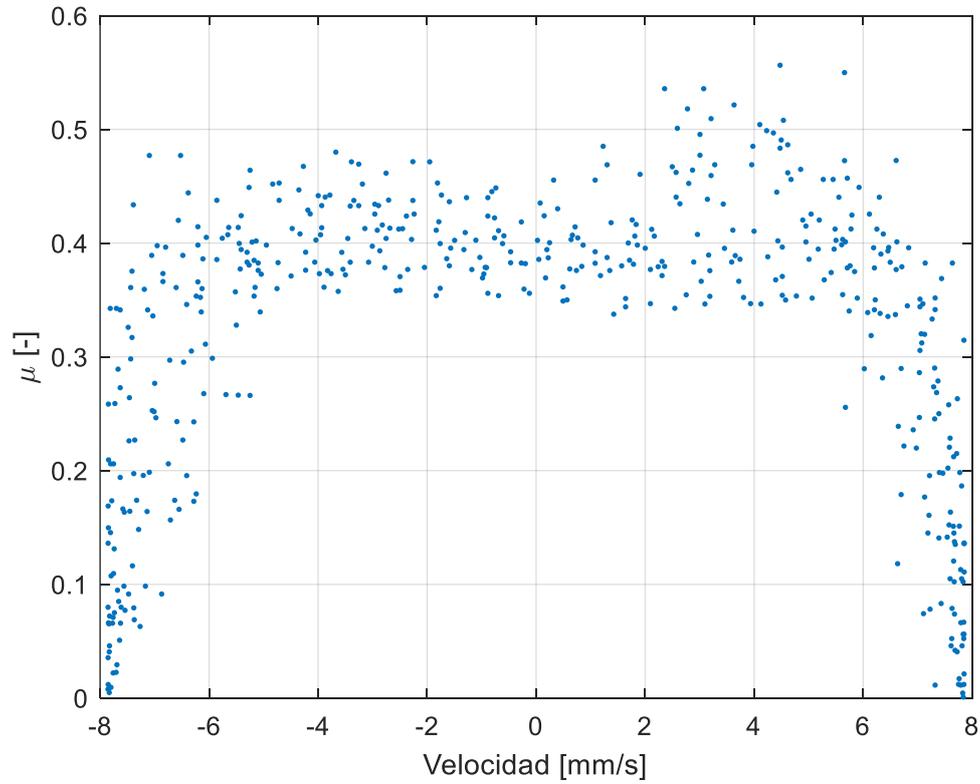


Figura 90. Gráfico cof-velocidad para el segundo ensayo de 0.5Hz y 3.56N.

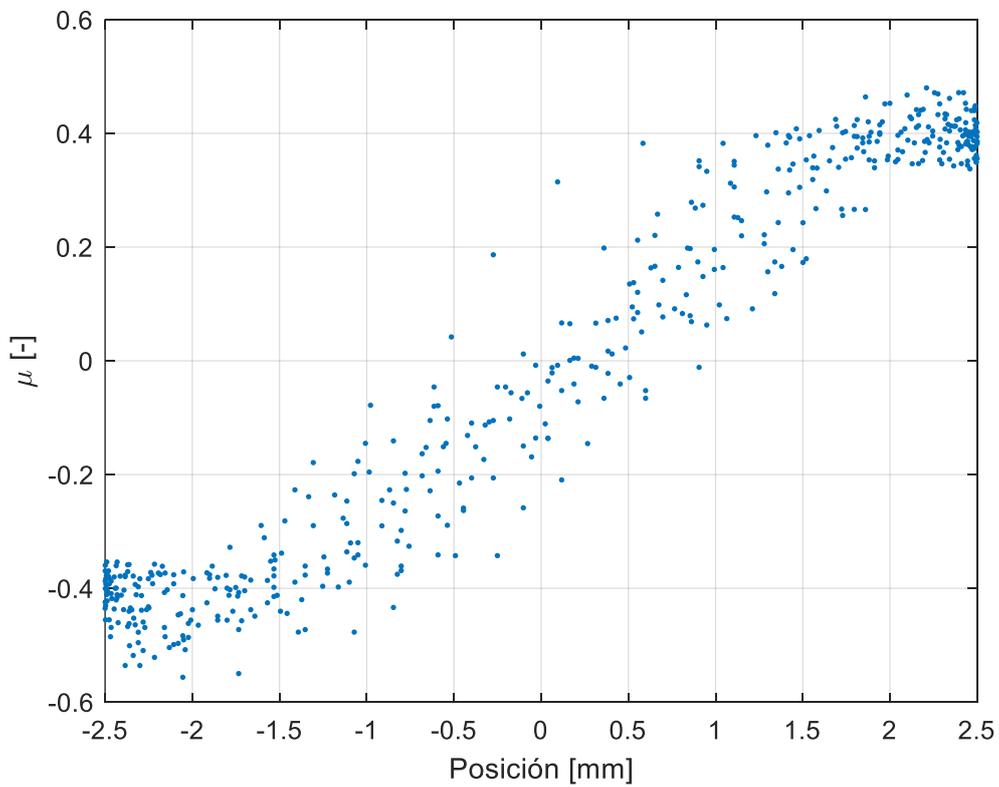


Figura 91. Gráfico cof-posición para el segundo ensayo de 0.5Hz y 3.56N.

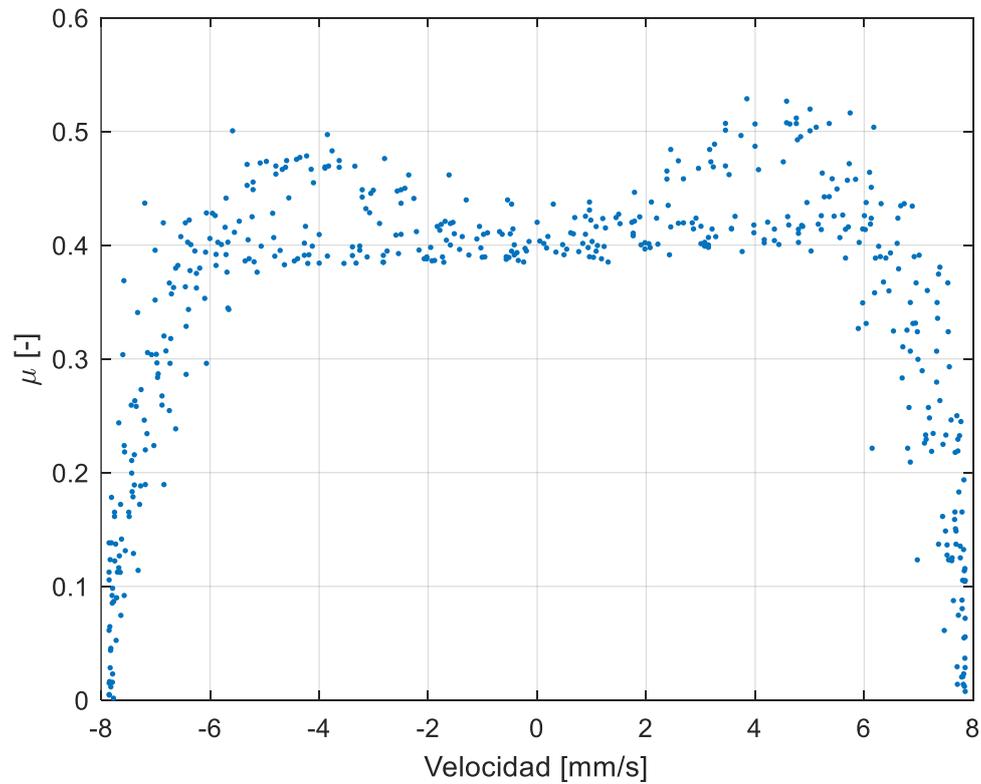


Figura 92. Gráfico cof-velocidad para el tercer ensayo de 0.5Hz y 3.56N.

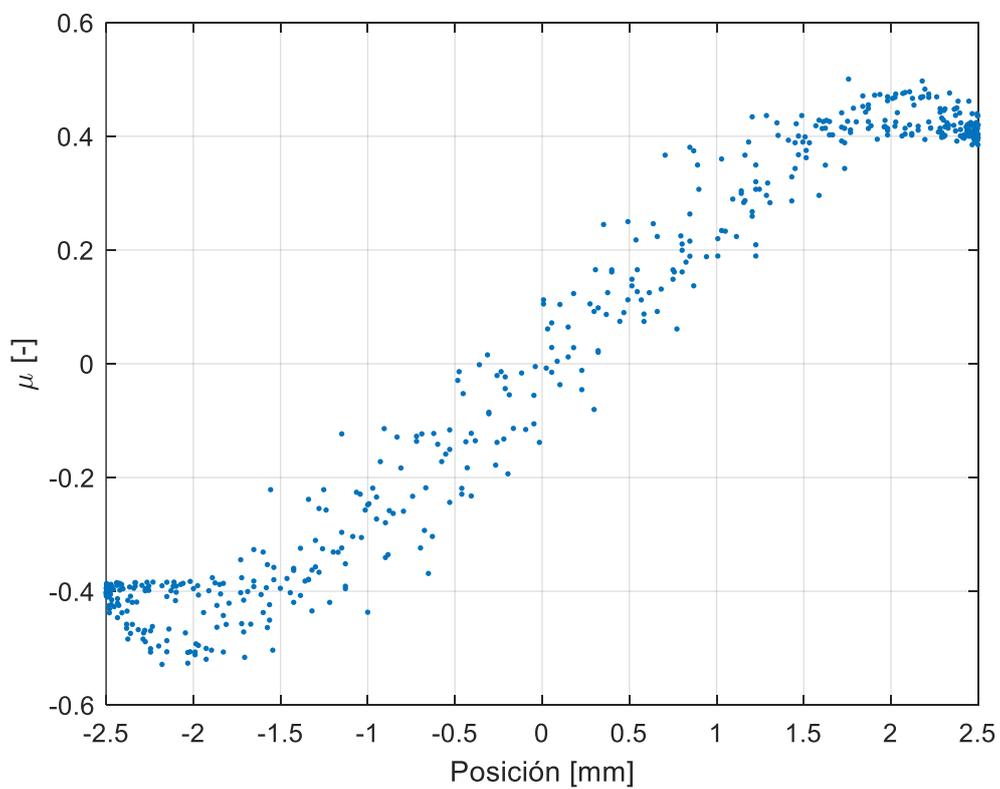


Figura 93. Gráfico cof-posición para el tercer ensayo de 0.5Hz y 3.56N.

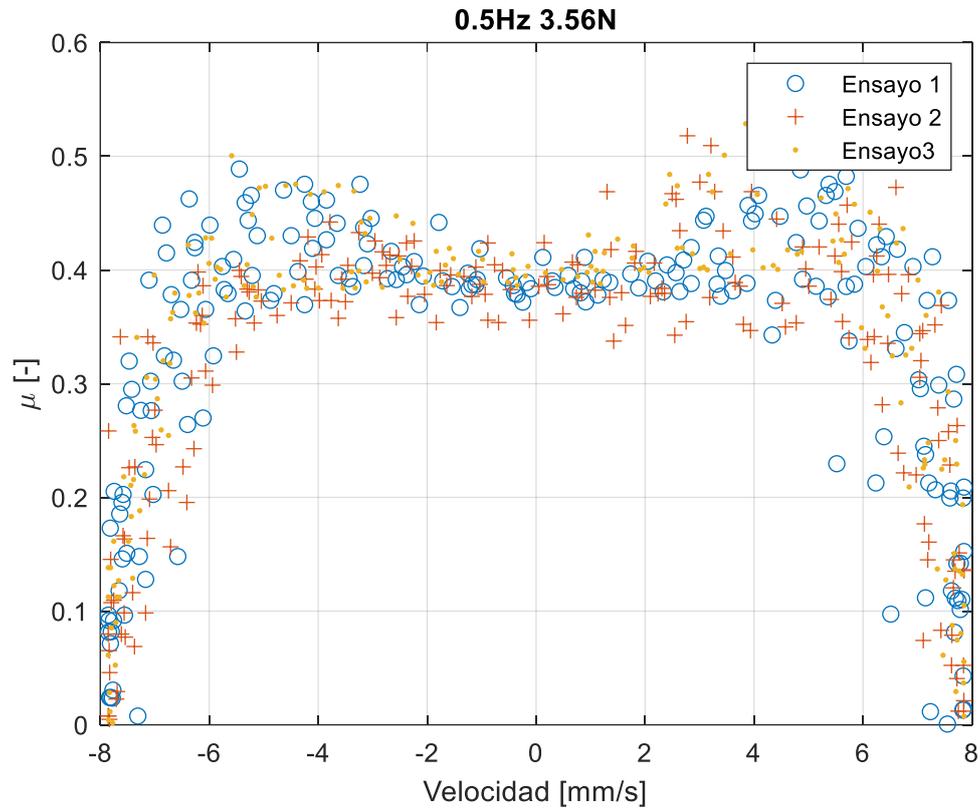


Figura 94. Gráfico cof-velocidad donde se comparan los ensayos de 0.5Hz y 3.56N.

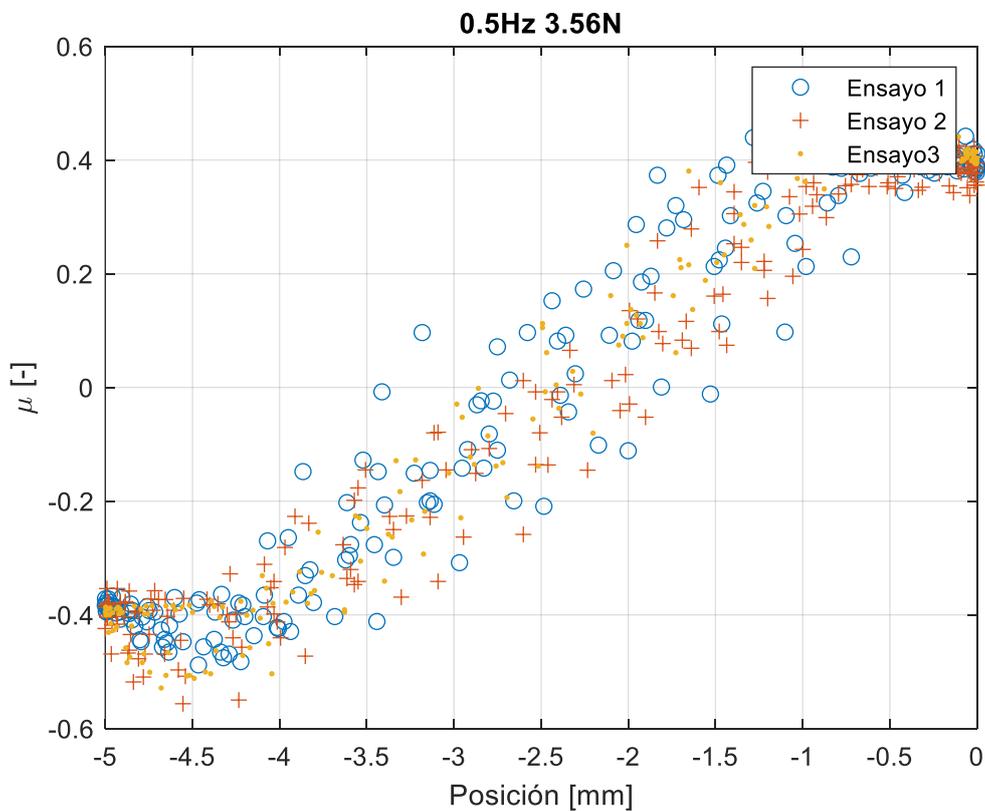


Figura 95. Gráfico cof-posición donde se comparan los ensayos de 0.5Hz y 3.56N.

## 0.5 Hz 7.56N

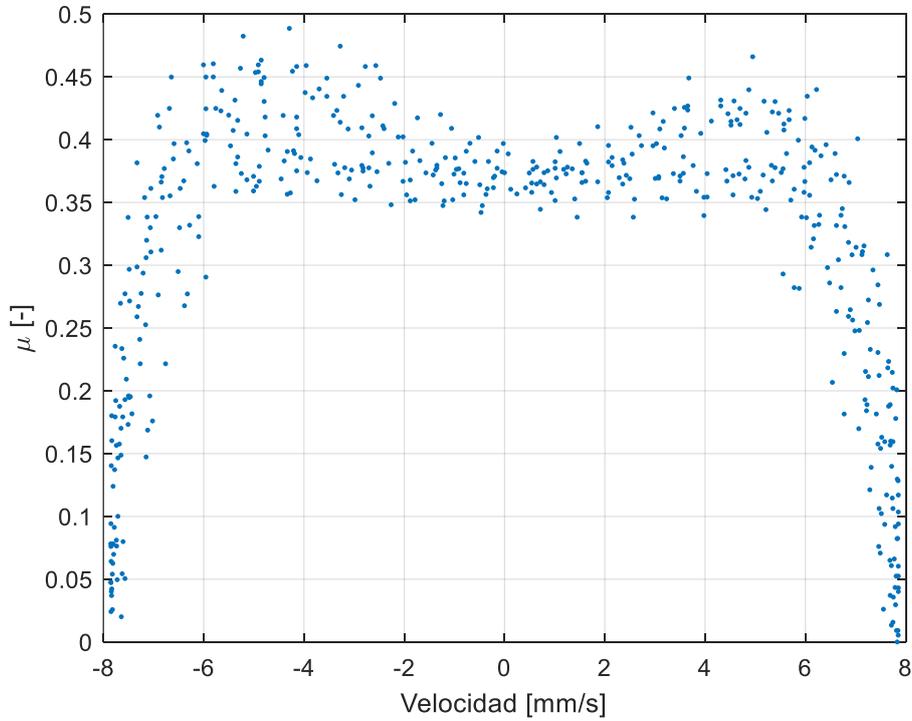


Figura 96. Gráfico cof-velocidad para el primer ensayo de 0.5Hz y 7.56N.

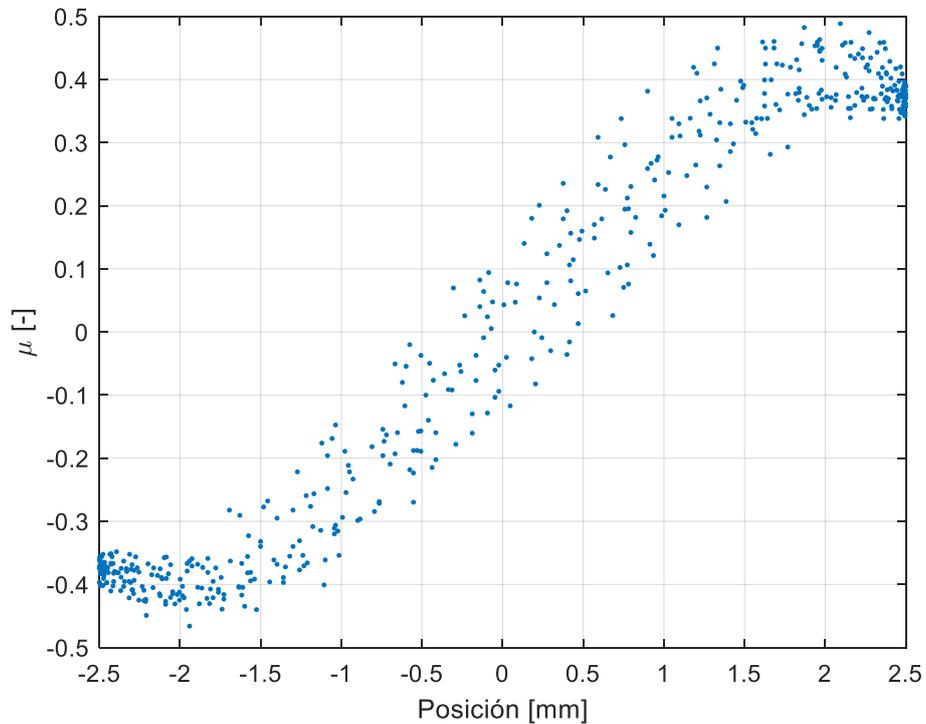


Figura 97. Gráfico cof-posición para el primer ensayo de 0.5Hz y 7.56N.

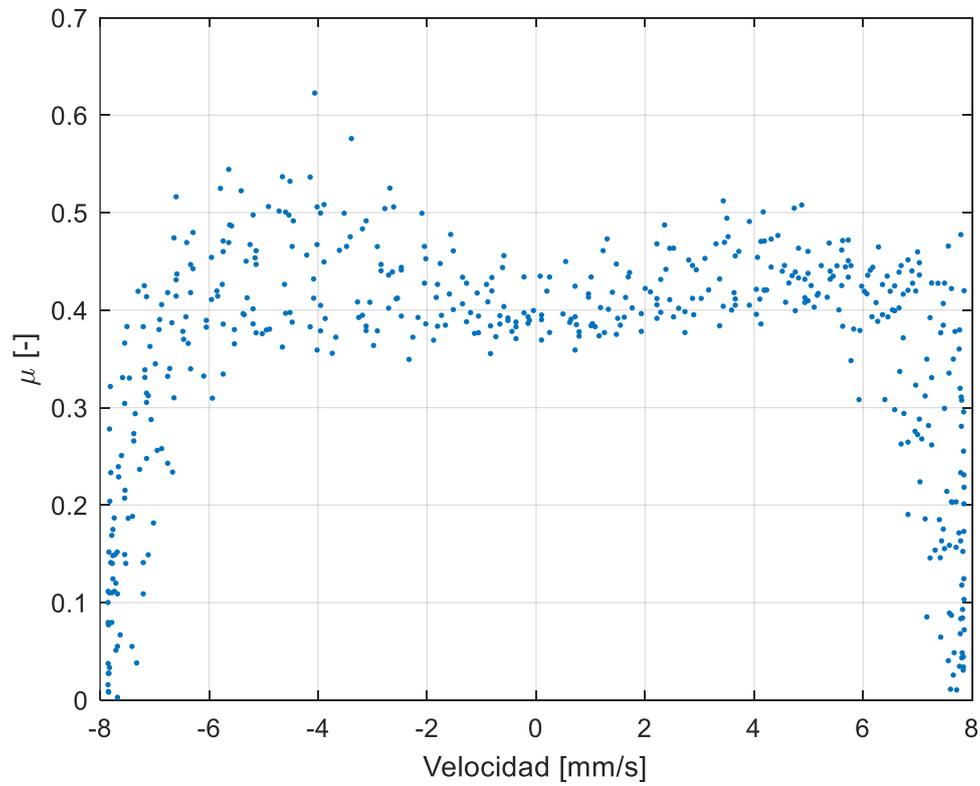


Figura 98. Gráfico cof-velocidad para el segundo ensayo de 0.5Hz y 7.56N.

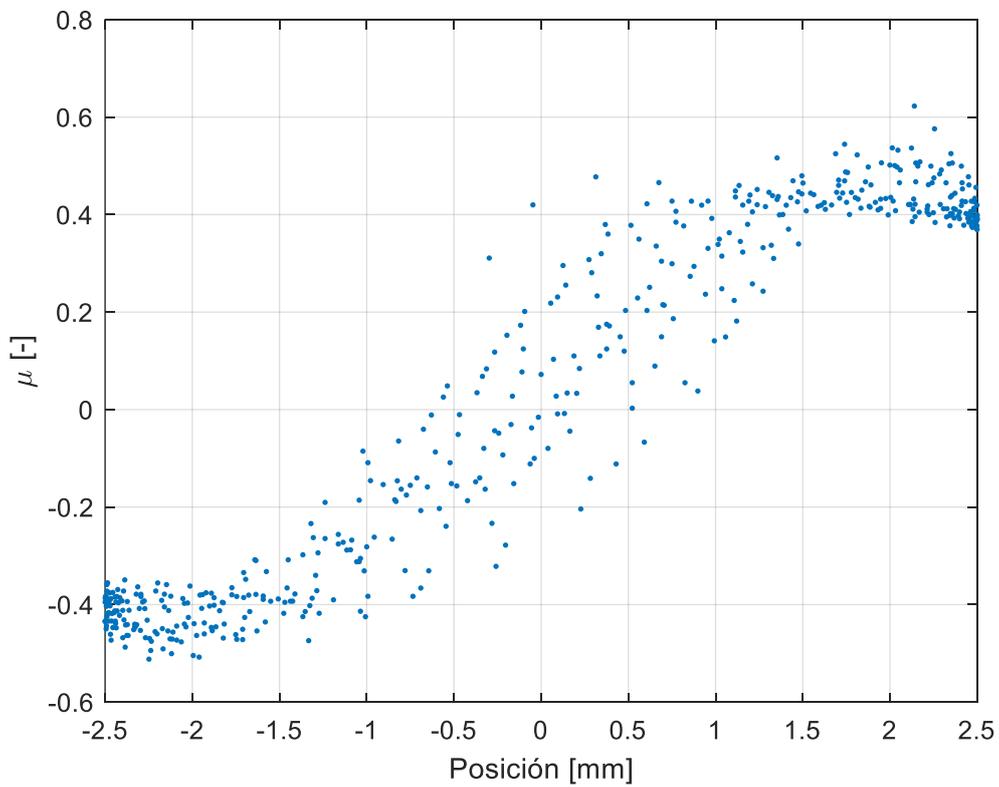


Figura 99. Gráfico cof-posición para el segundo ensayo de 0.5Hz y 7.56N.

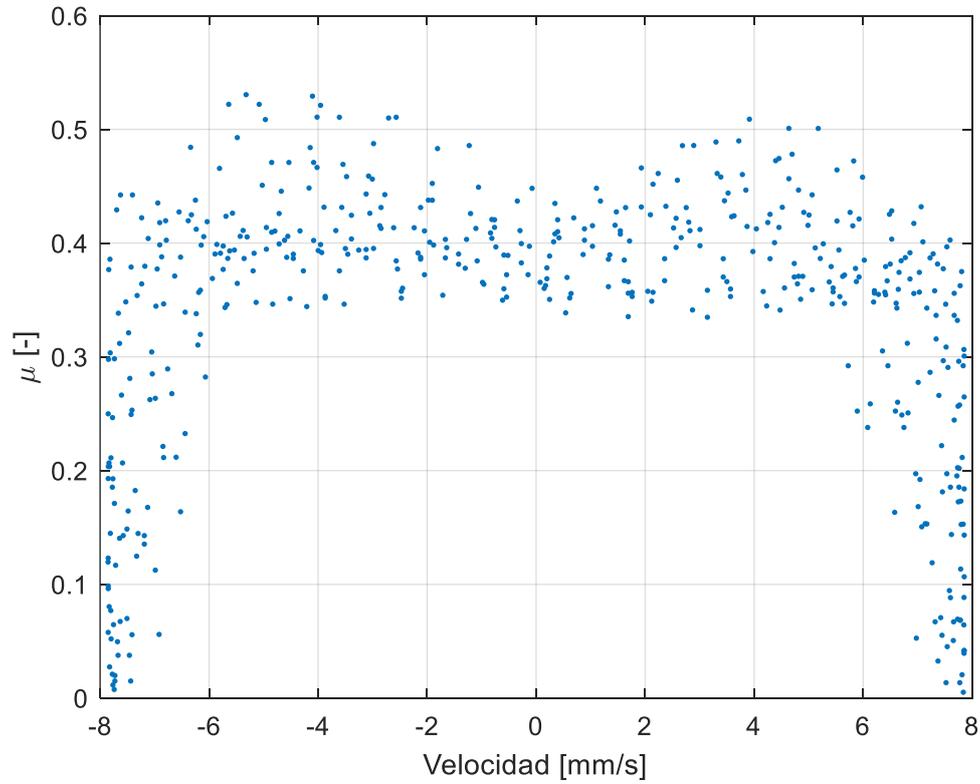


Figura 100. Gráfico cof-velocidad para el tercer ensayo de 0.5Hz y 7.56N.

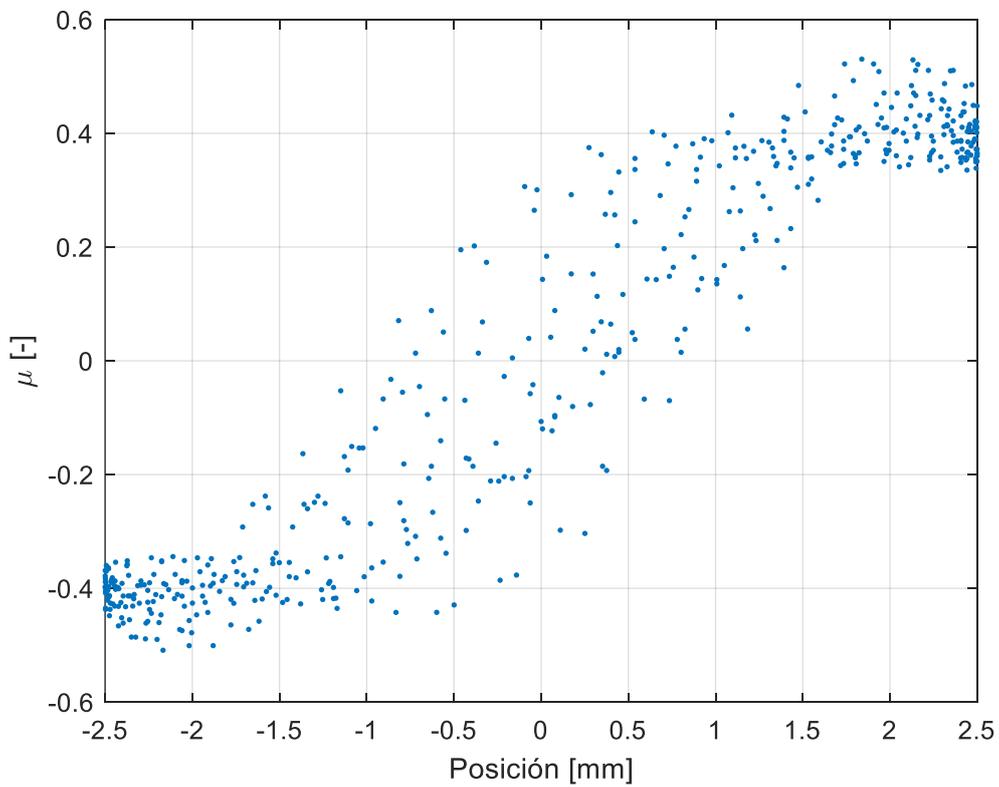


Figura 101. Gráfico cof-posición para el tercer ensayo de 0.5Hz y 7.56N.

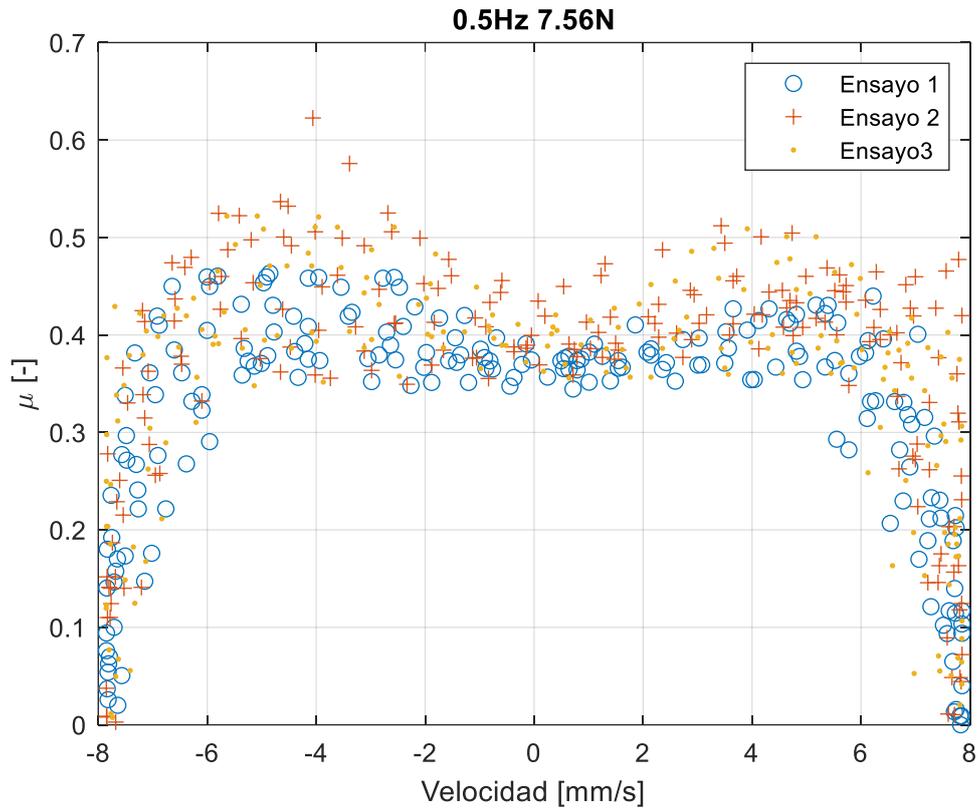


Figura 102. Gráfico cof-velocidad donde se comparan los ensayos de 0.5Hz y 7.56N.

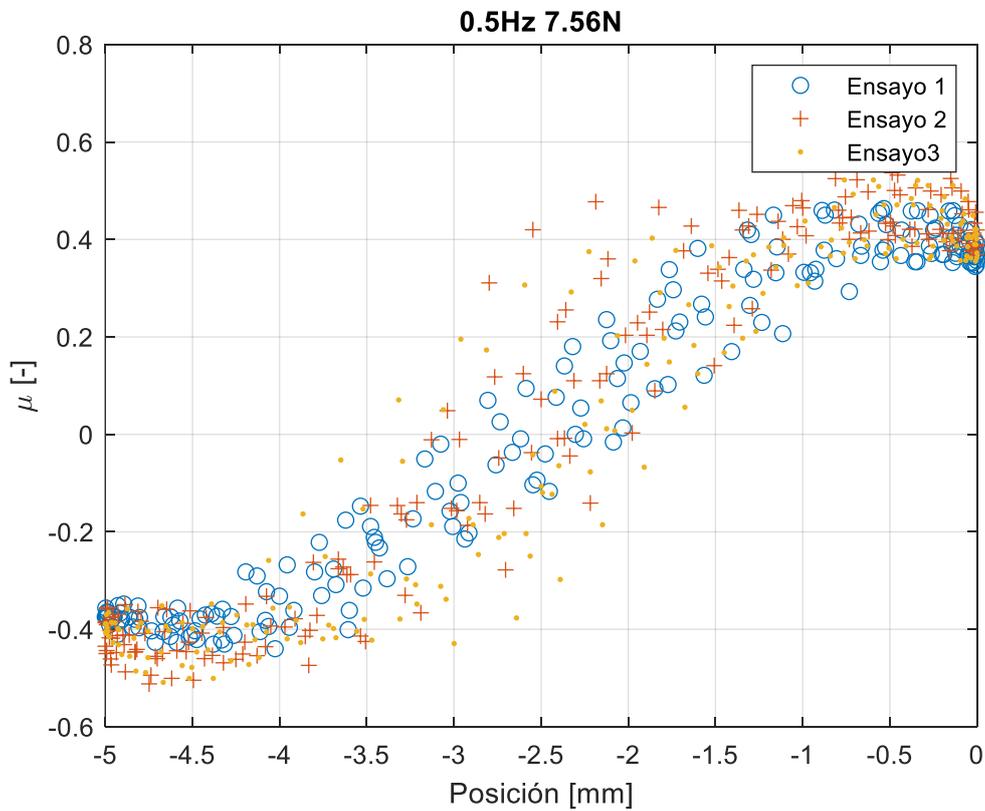


Figura 103. Gráfico cof-posición donde se comparan los ensayos de 0.5Hz y 7.56N.

## 2Hz 5.56N

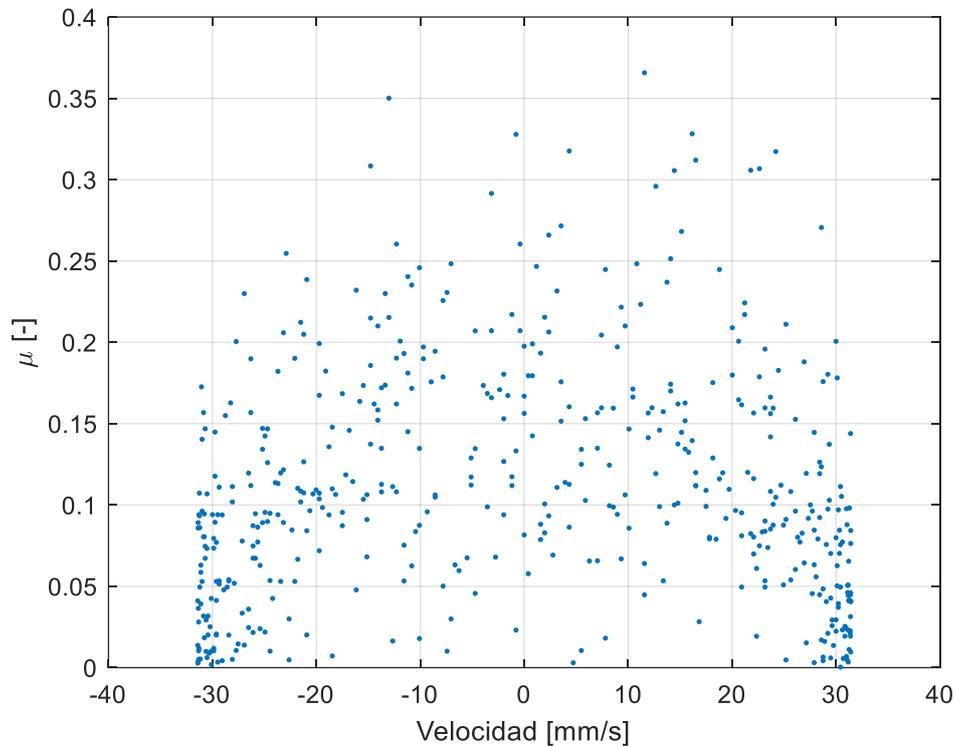


Figura 104. Gráfico cof-velocidad para el primer ensayo de 2Hz y 5.56N.

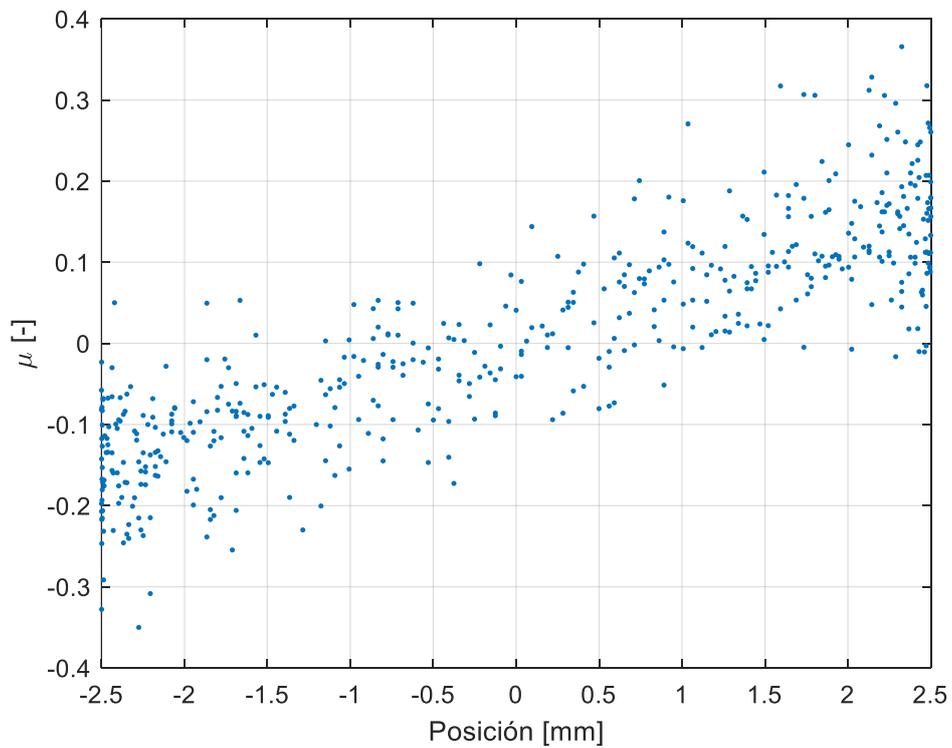


Figura 105. Gráfico cof-posición para el primer ensayo de 2Hz y 5.56N.

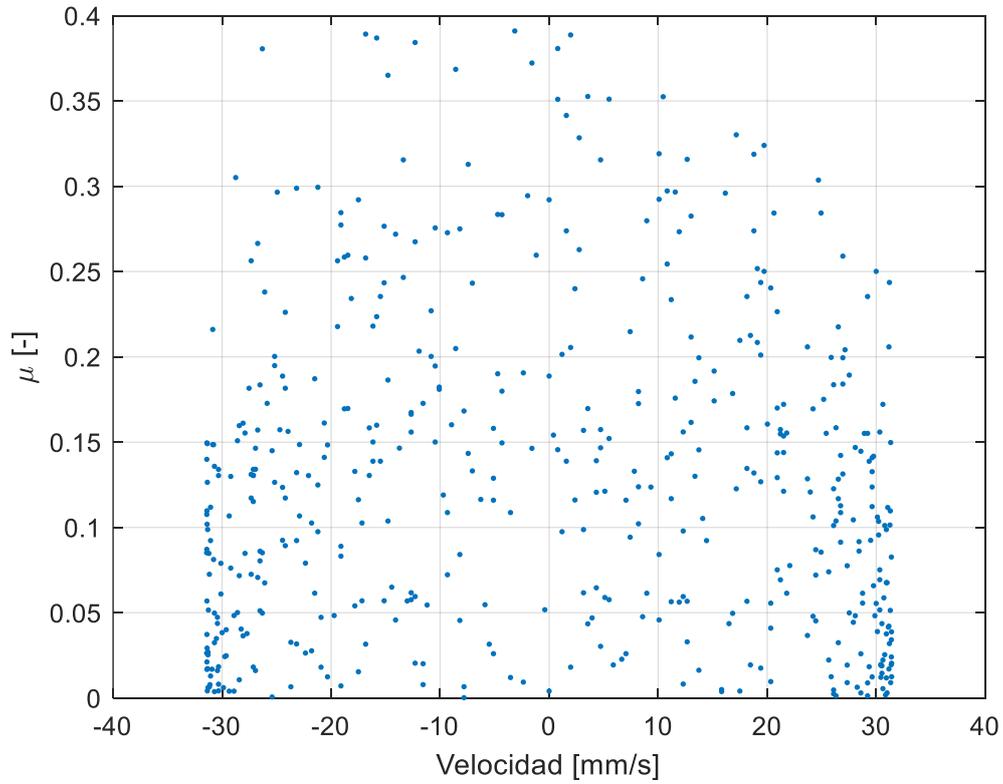


Figura 106. Gráfico cof-velocidad para el segundo ensayo de 2Hz y 5.56N.

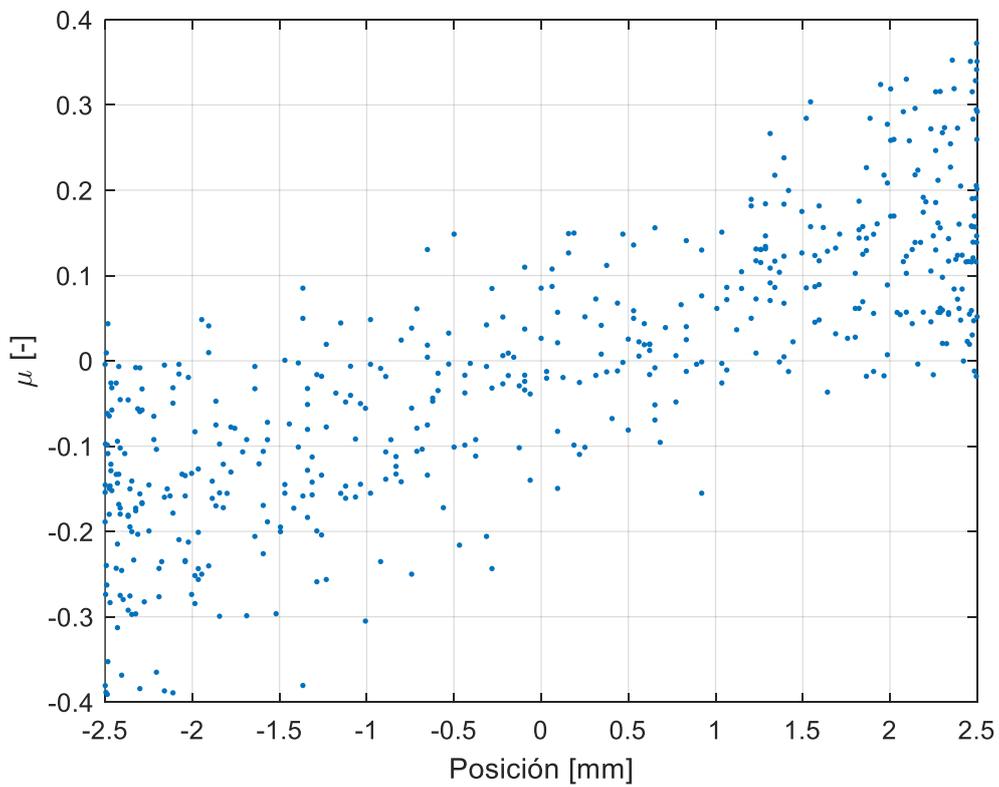


Figura 107. Gráfico cof-posición para el segundo ensayo de 2Hz y 5.56N.

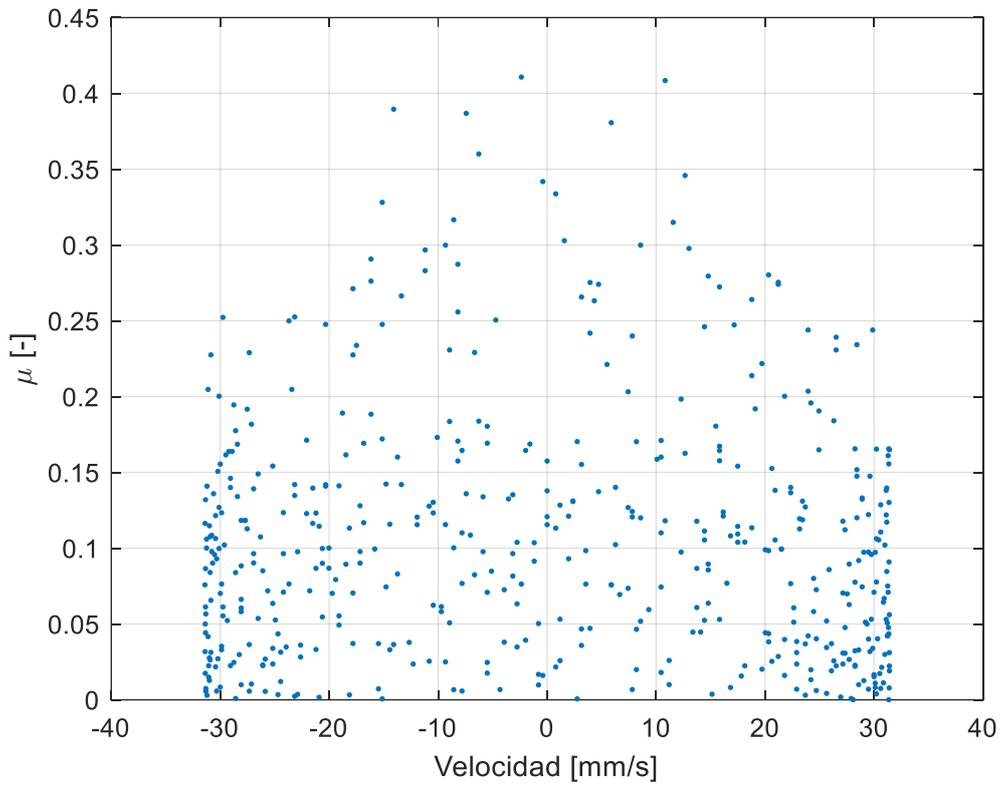


Figura 108. Gráfico cof-velocidad para el tercer ensayo de 2Hz y 5.56N.

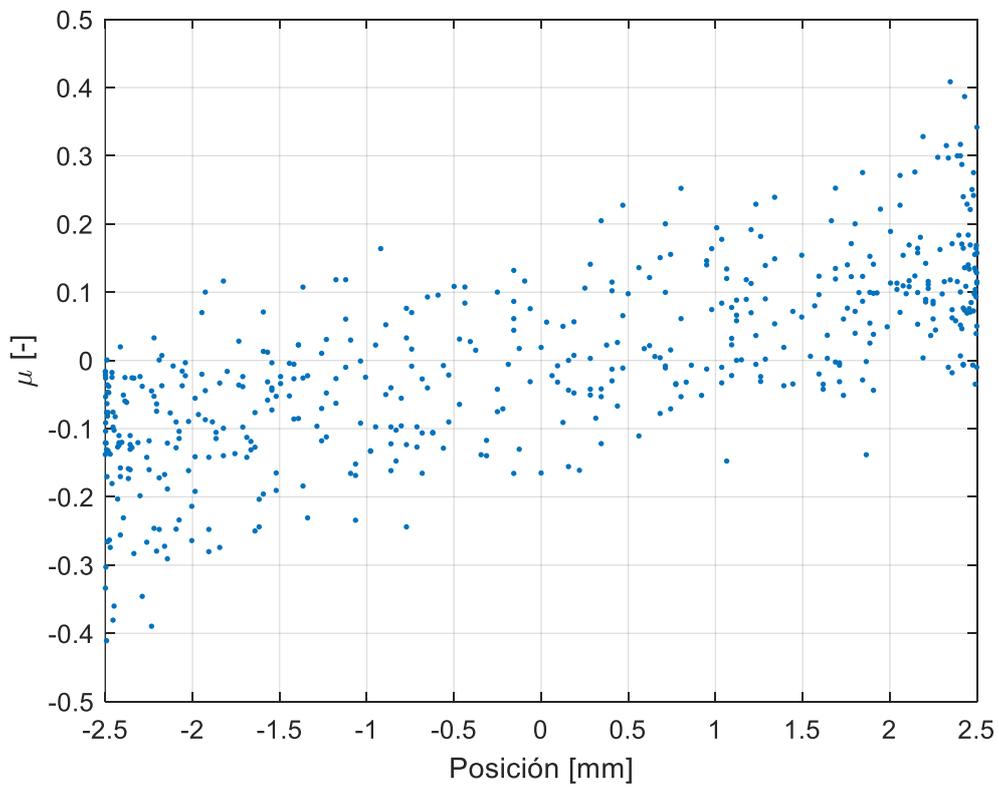


Figura 109. Gráfico cof-posición para el tercer ensayo de 2Hz y 5.56N.

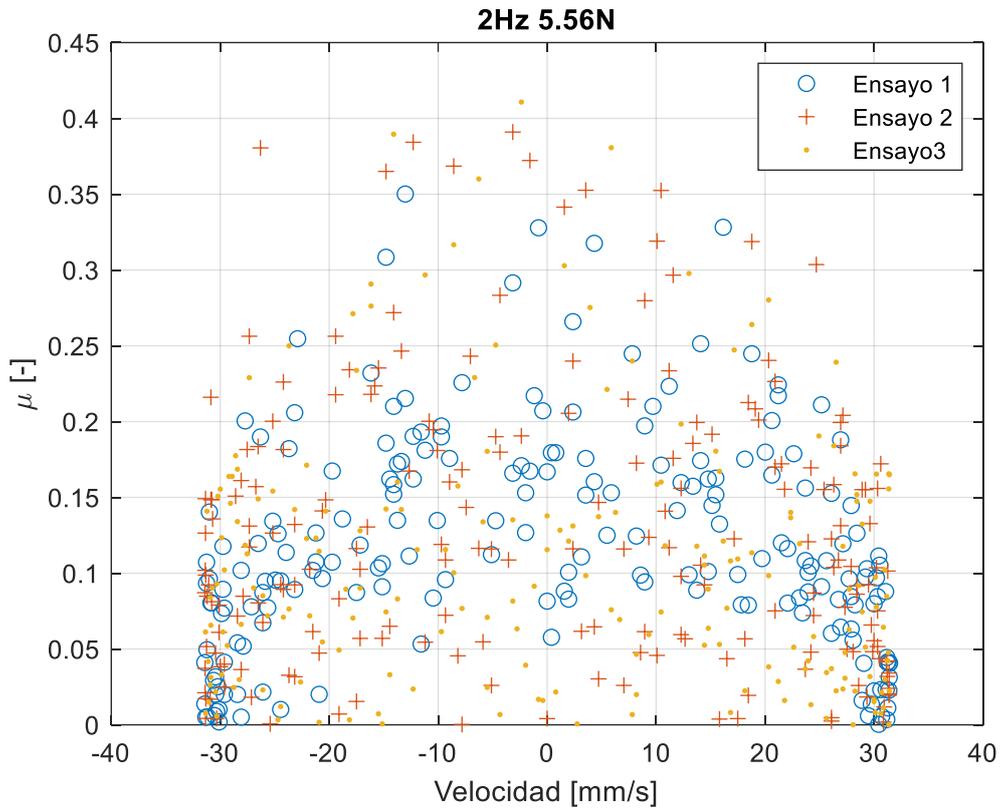


Figura 110. Gráfico cof-velocidad donde se comparan los ensayos de 2Hz y 5.56N.

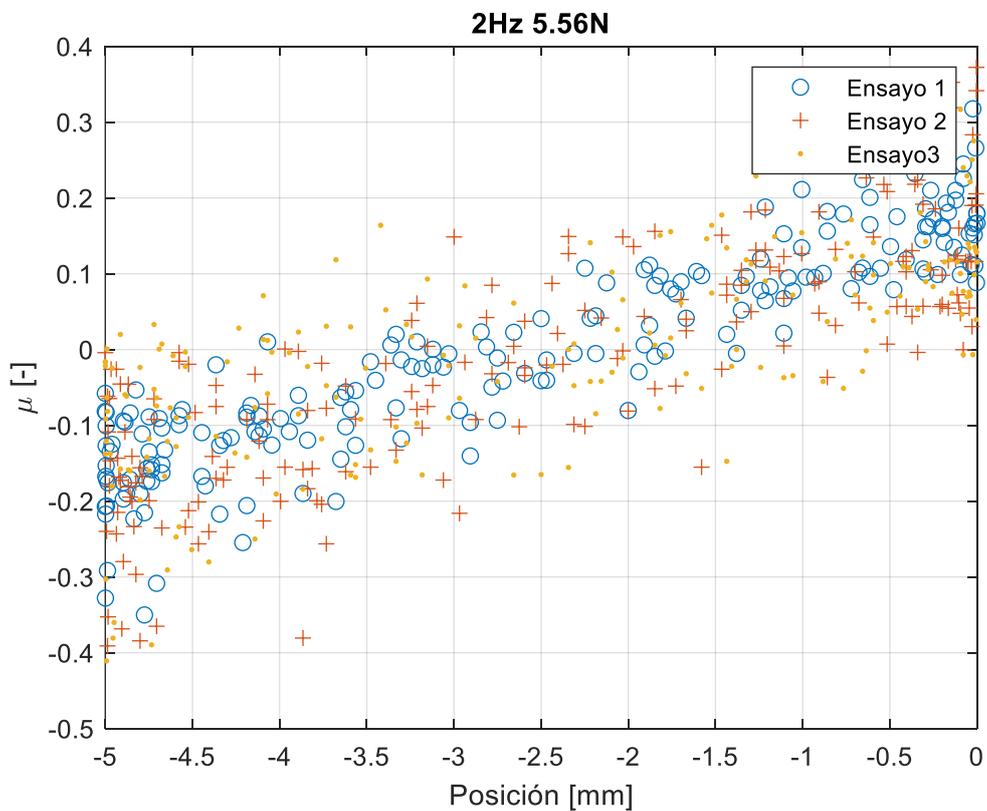


Figura 111. Gráfico cof-posición donde se comparan los ensayos de 2Hz y 5.56N.

## 2Hz 3.56N

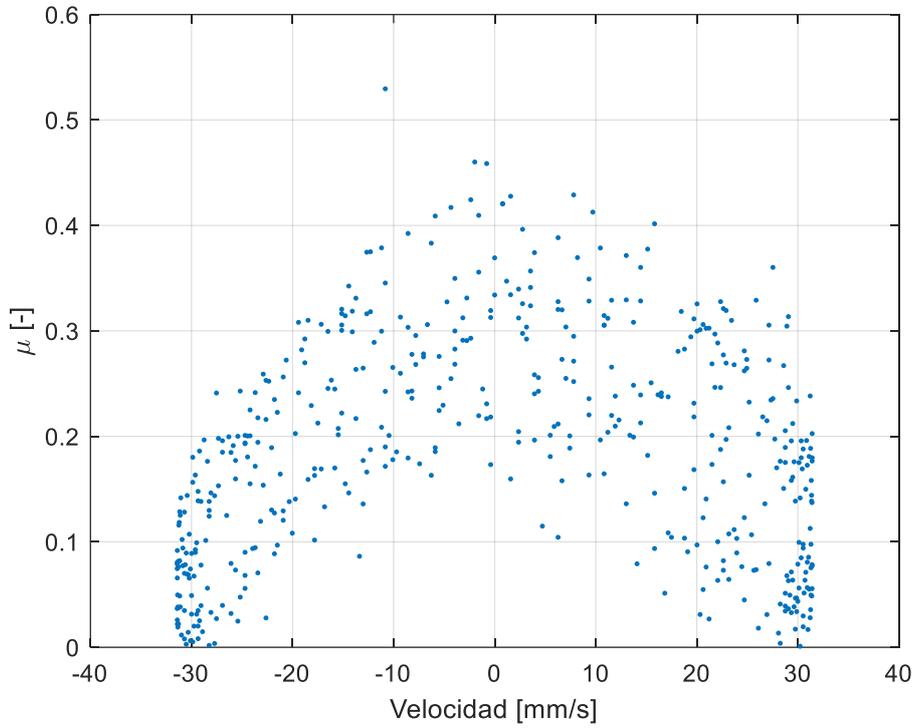


Figura 112. Gráfico cof-velocidad para el primer ensayo de 2Hz y 3.56N.

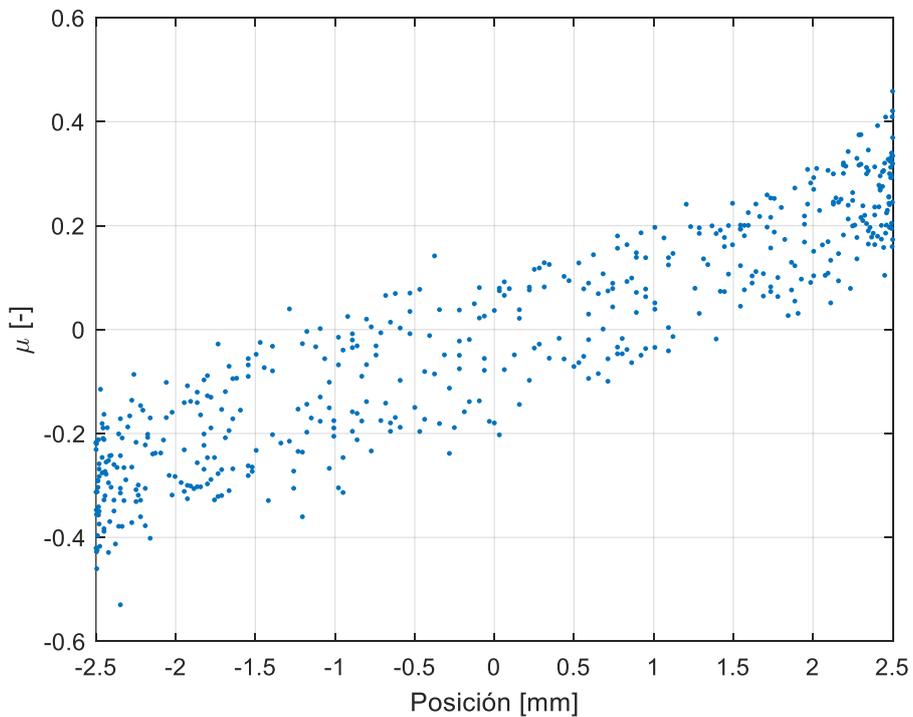


Figura 113. Gráfico para el primer ensayo de 2Hz y 3.56N.

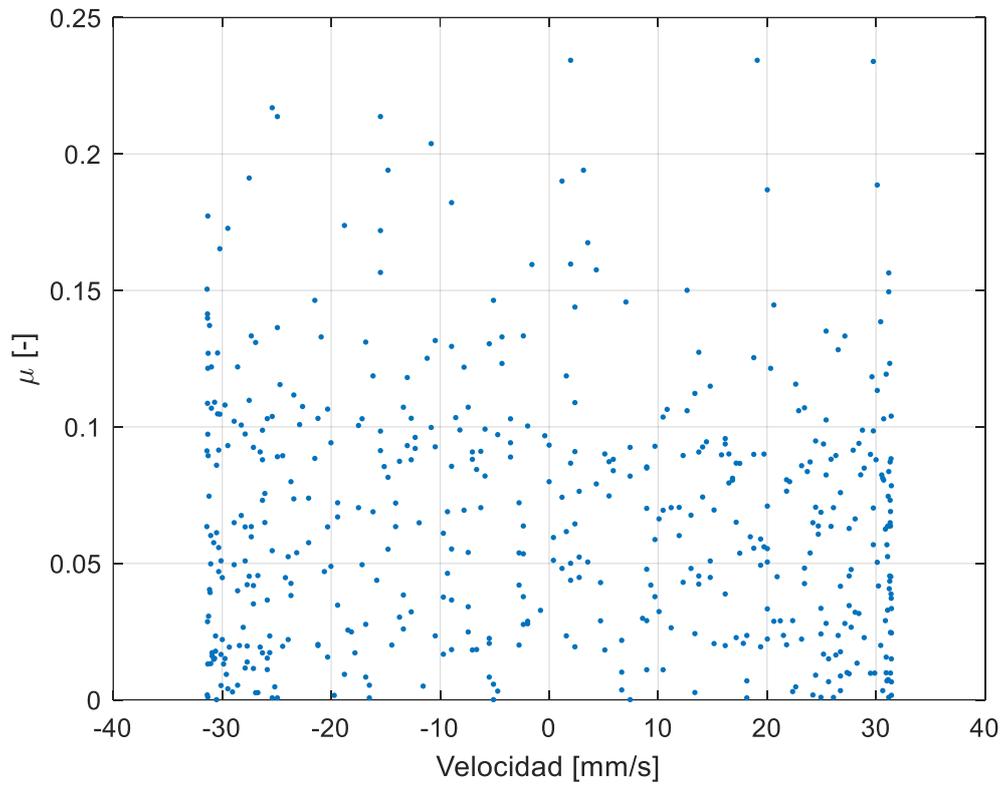


Figura 114. Gráfico cof-velocidad para el segundo ensayo a 2Hz y 3.56N.

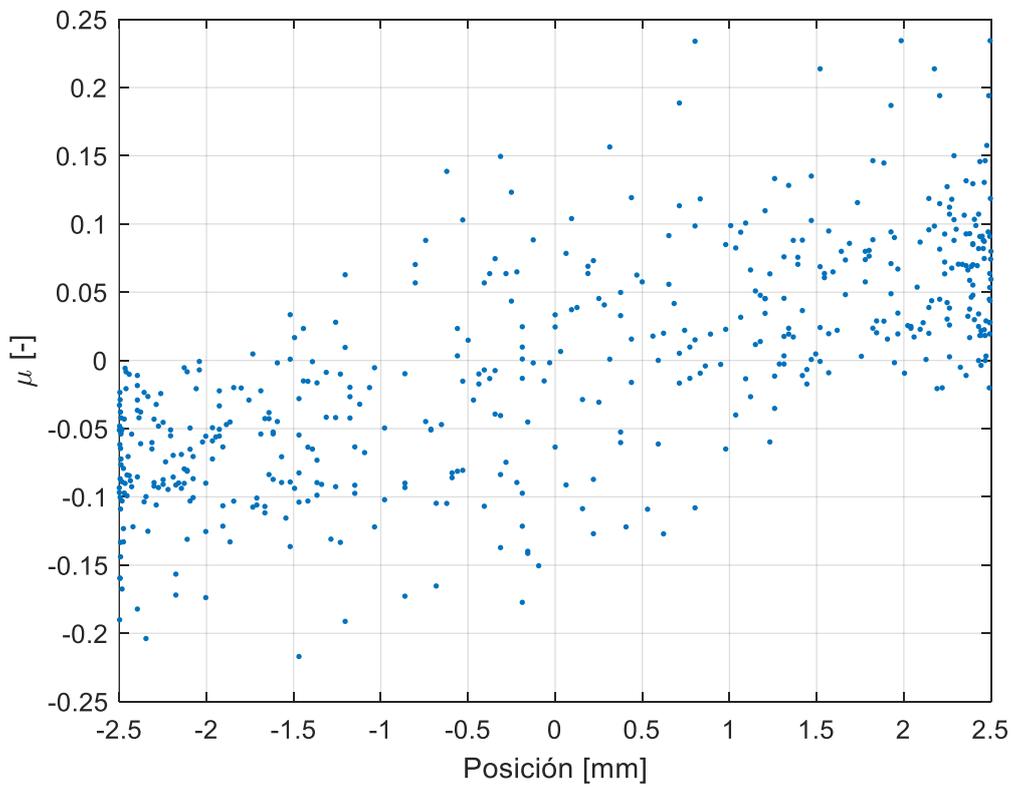


Figura 115. Gráfico cof-posición para el segundo ensayo de 2Hz y 3.56N.

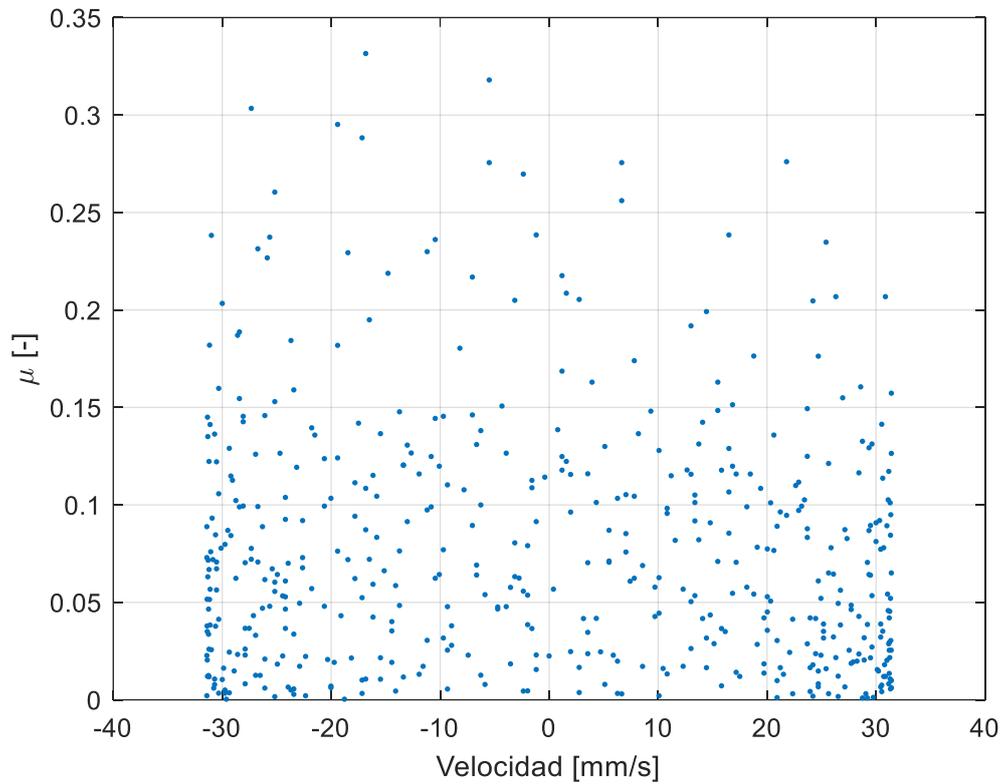


Figura 116. Gráfico cof-velocidad para el tercer ensayo de 2Hz y 3.56N.

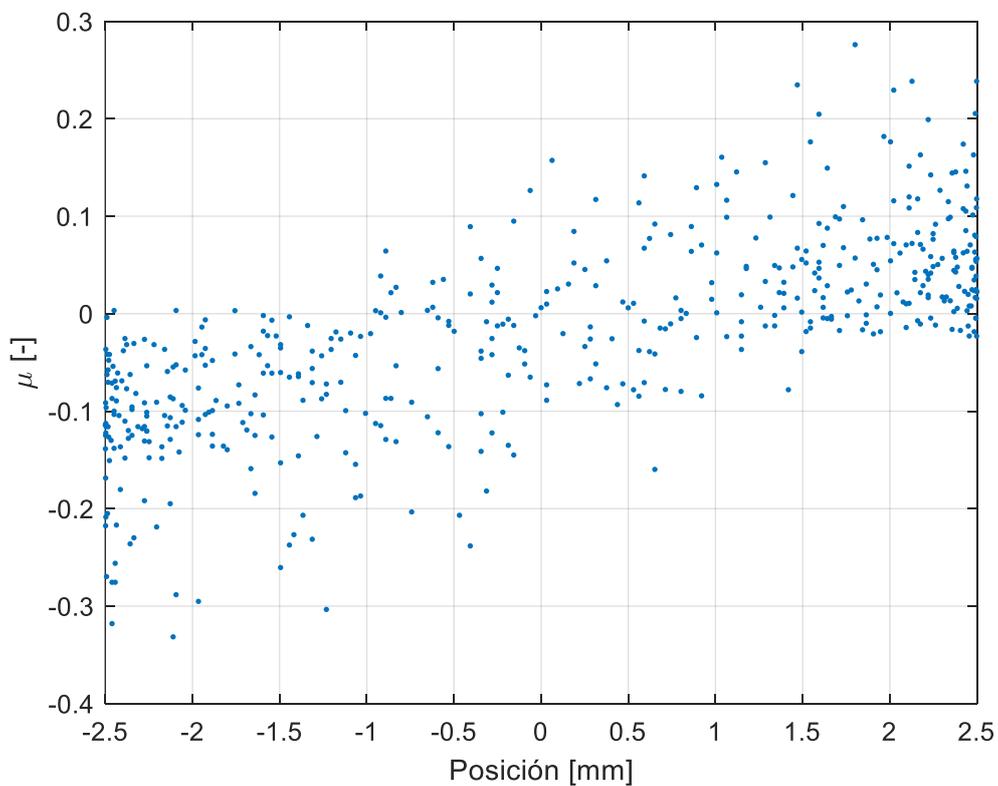


Figura 117. Gráfico cof-posición para el tercer ensayo de 2Hz y 3.56N.

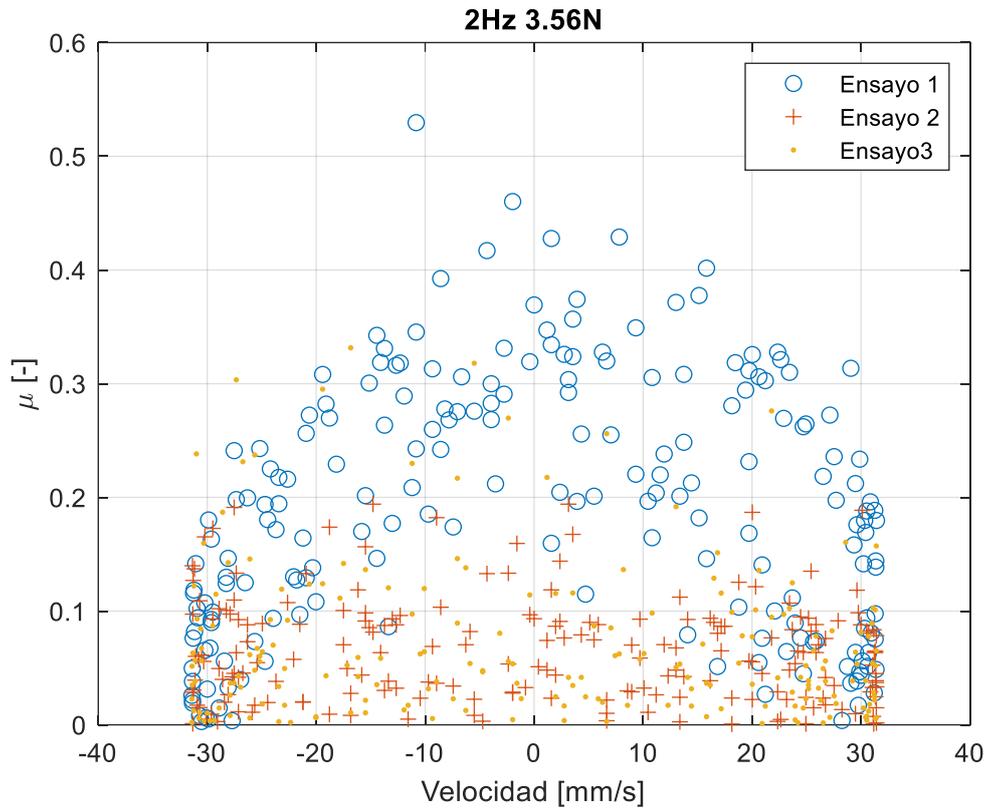


Figura 118. Gráfico cof-velocidad donde se comparan los ensayos de 2Hz y 3.56N.

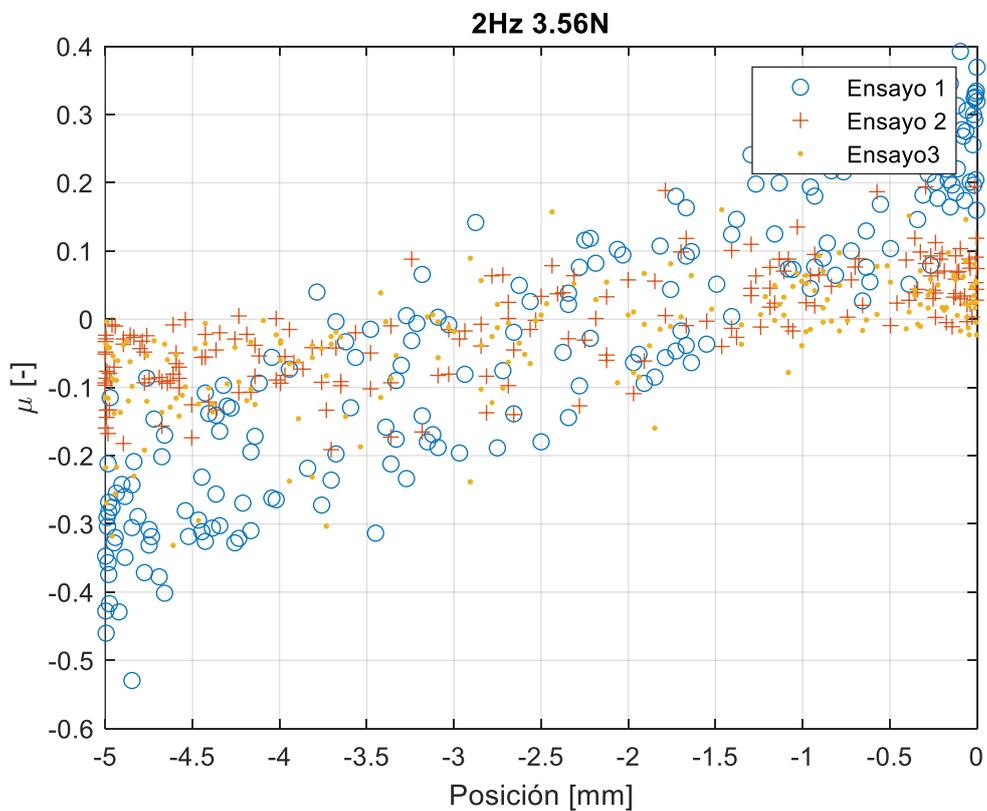


Figura 119. Gráfico cof-posición donde se comparan los ensayos de 2Hz y 3.56N.

## 2Hz 7.56N

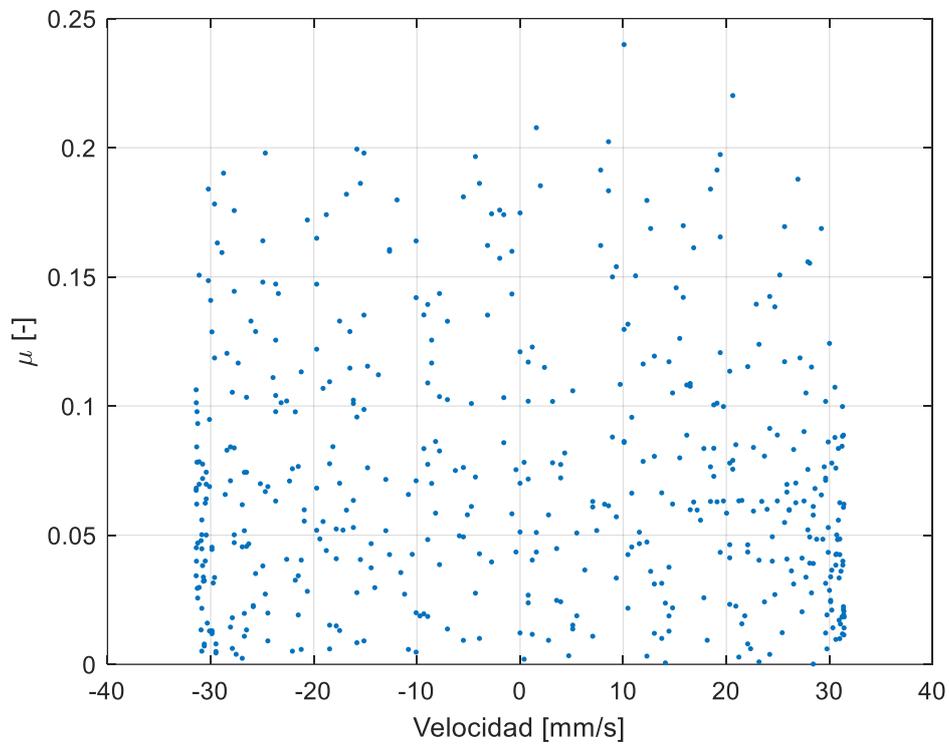


Figura 120. Gráfico cof-velocidad para el primer ensayo de 2Hz y 7.56N.

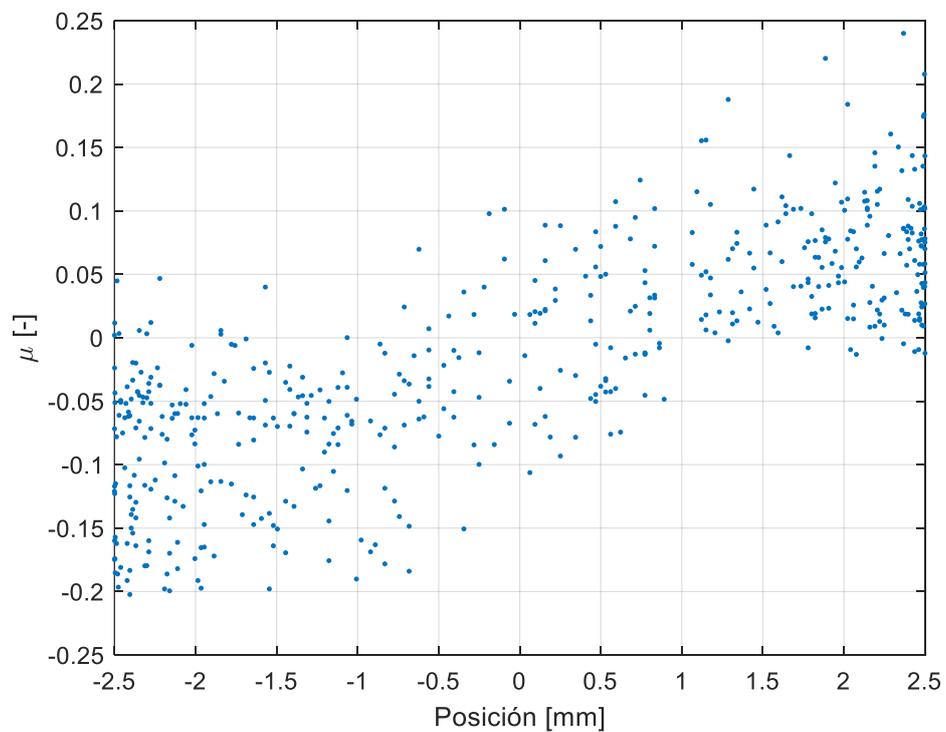


Figura 121. Gráfico cof-posición para el primer ensayo de 2Hz y 7.56N.

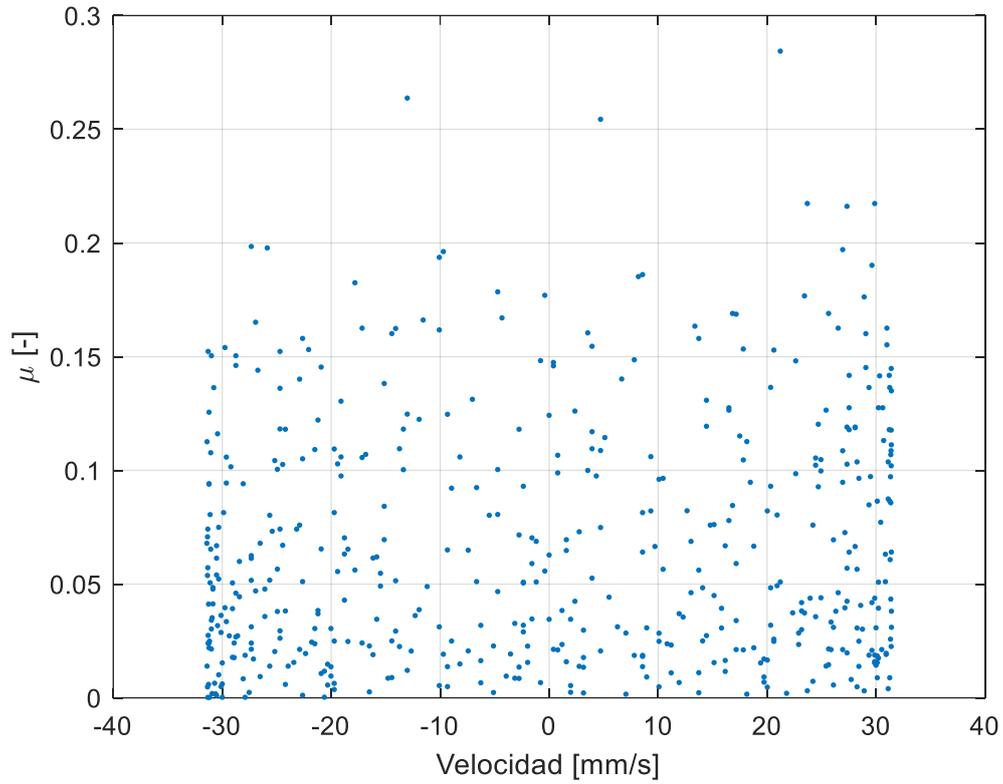


Figura 122. Gráfico cof-velocidad para el segundo ensayo de 2Hz y 7.56N.

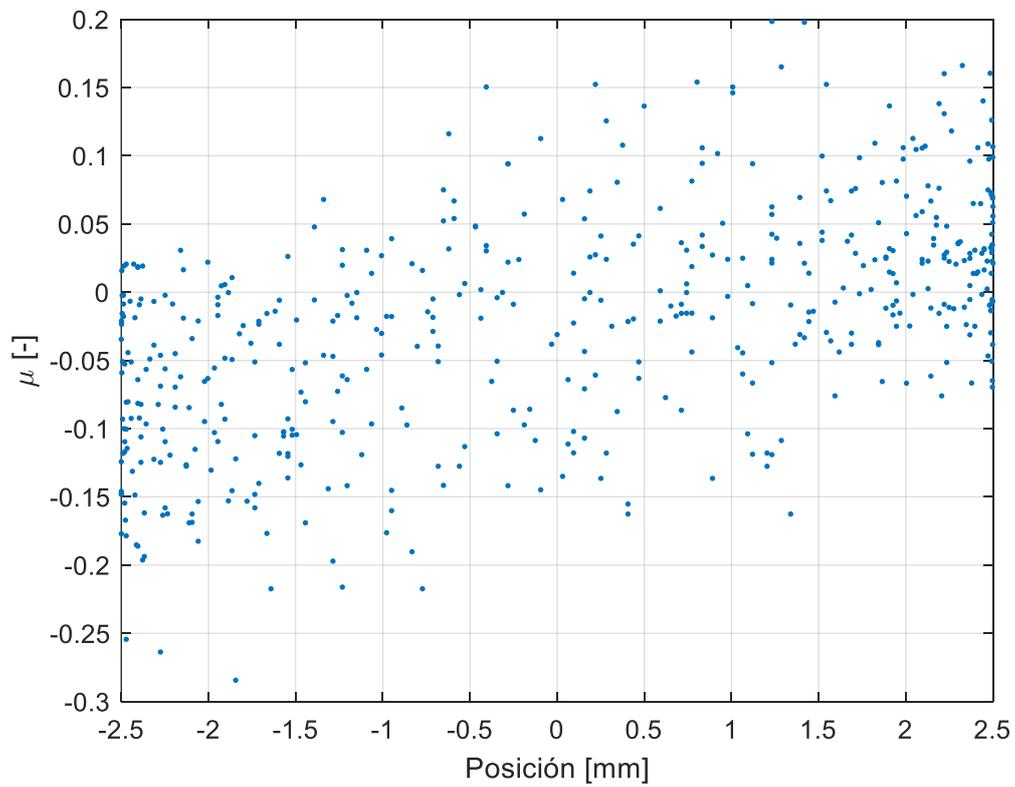


Figura 123. Gráfico cof-posición para el segundo ensayo de 2Hz y 7.56N.

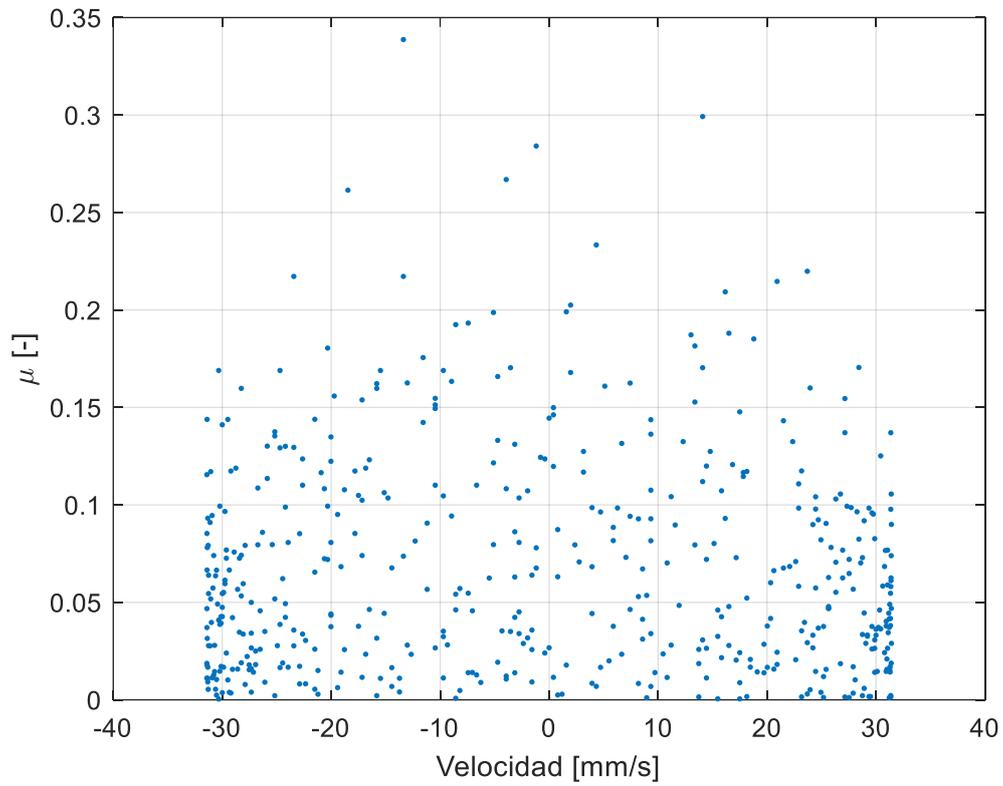


Figura 124. Gráfico cof-velocidad para el tercer ensayo de 2Hz y 7.56N.

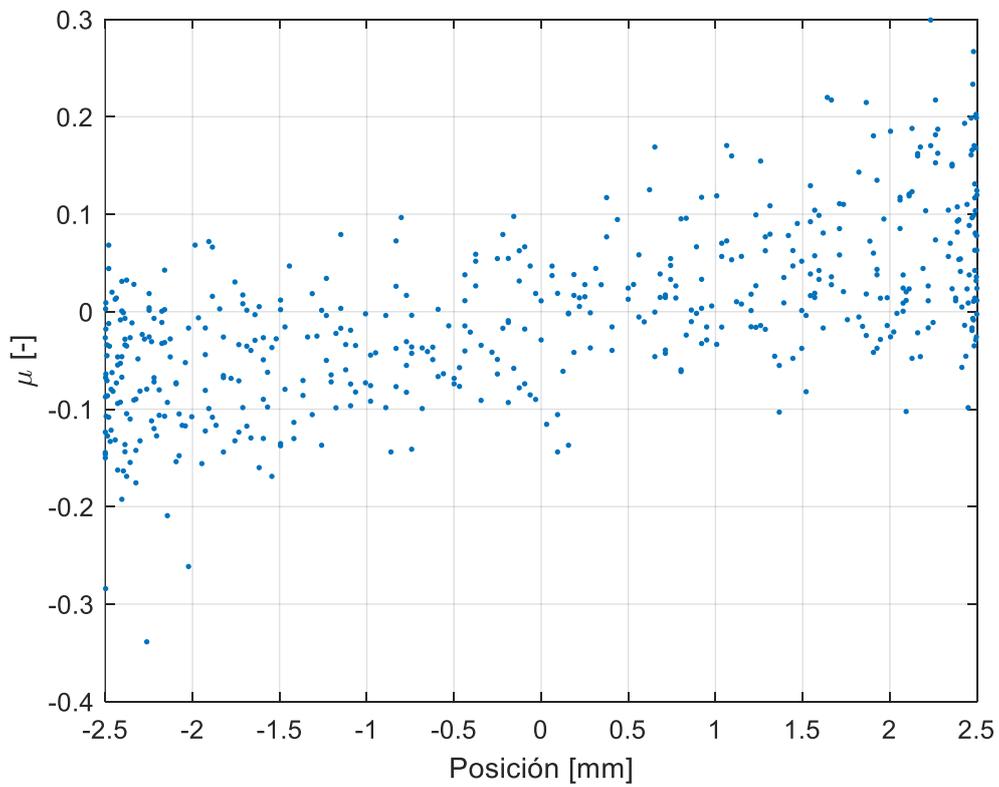


Figura 125. Gráfico cof-posición para el tercer ensayo de 2Hz y 7.56N.

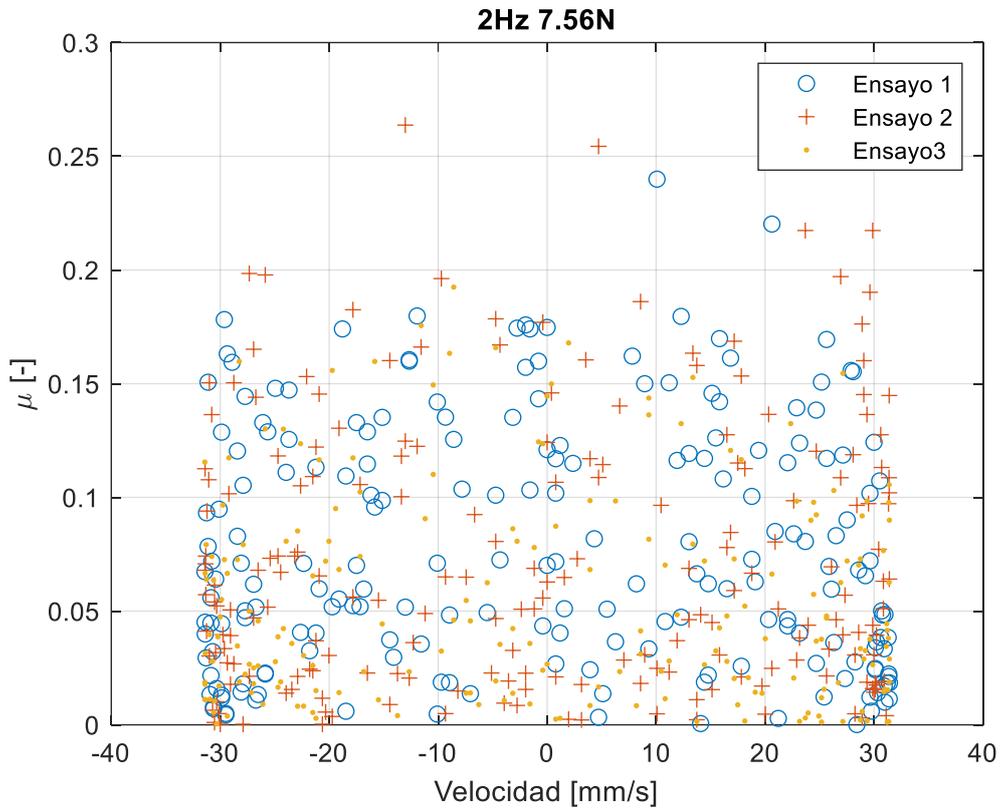


Figura 126. Gráfico cof-velocidad donde se comparan los ensayos de 2Hz y 7.56N.

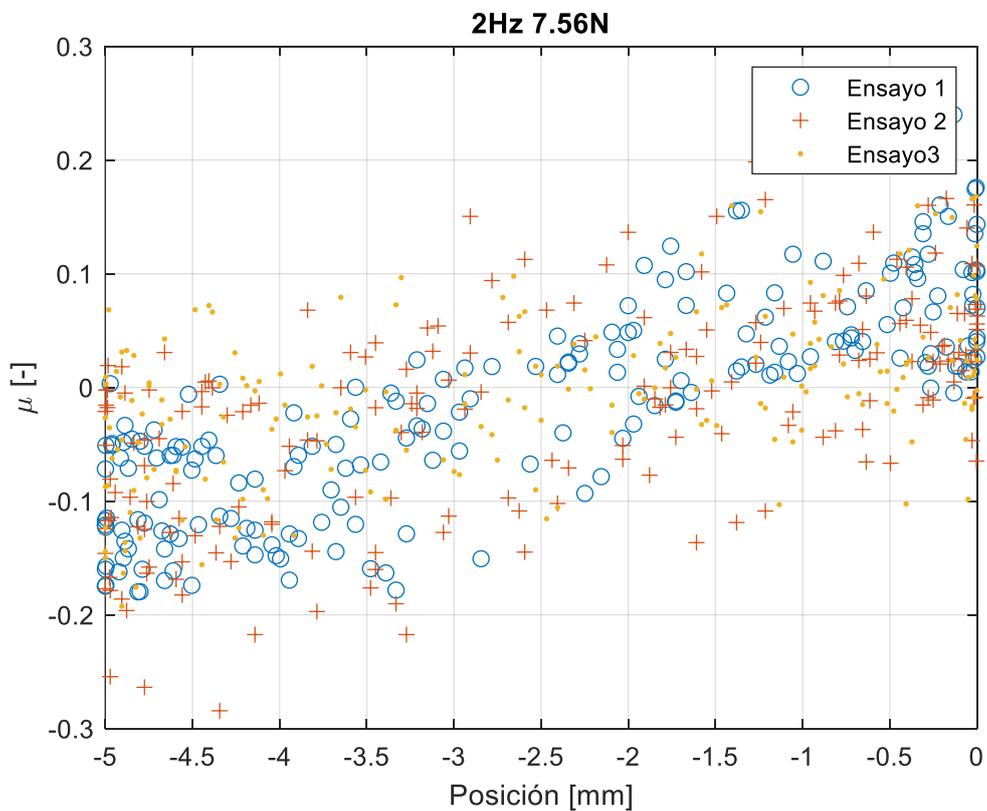


Figura 127. Gráfico cof-posición donde se comparan los ensayos de 2Hz y 7.56N.

## 2 Pliego de condiciones

### 2.1 Materiales

El material seleccionado con el que se han realizado los ensayos es la aleación del biomaterial CoCr. Una aleación compuesta por un 70% de cobalto y 30% de cromo y utilizada para implantes médicos y prótesis dentales. Las dimensiones de las muestras son de 30 mm de diámetro y 8 mm de altura. El material inerte utilizado para desgastar la muestra es una bola de alúmina 96% ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de 6 mm de diámetro.



Figura 128. Muestra de CoCr.



Figura 129. Bola de alúmina.

### 2.2 Equipos

En este punto se exponen los equipos utilizados para la realización del trabajo. En la primera parte de preparación de las muestras se ha utilizado la pulidora *GP-1B Grinder Polisher*. Para el desbaste de las piezas se han utilizado diversas lijas de desbaste y pulido. La Figura 130 nos muestra la pulidora en cuestión y la Figura 131 nos muestra las diferentes lijas empleadas.



Figura 130. Pulidora utilizada para preparar las muestras.

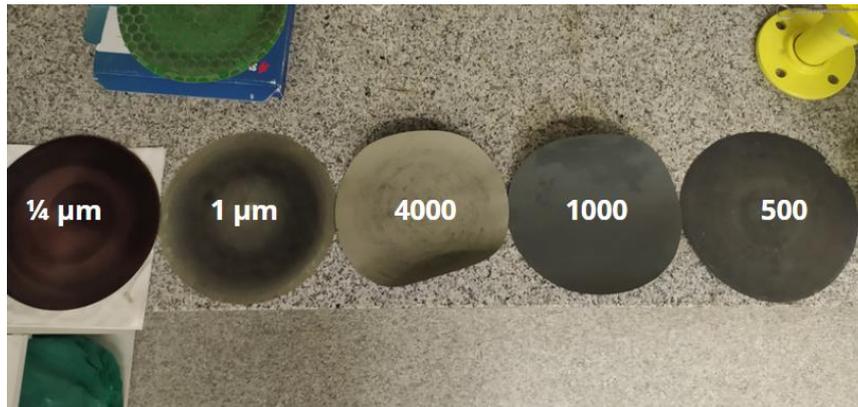


Figura 131. Lijas utilizadas para la preparación de las muestras.

Para eliminar restos de material de las muestras después de realizar varios ensayos se ha utilizado el limpiador ultrasónico *Filmasonic S 30 H*. Se muestra a continuación en



Figura 132. Limpiador ultrasónico.

El perfilómetro ha servido al equipo de investigación para medir la rugosidad antes de realizar los ensayos y para procesar las huellas provocadas por dichos ensayos. El perfilómetro utilizado es el *Filmetrics Profilm 3D* presentado en la Figura 17. En los apartados 1.10.1, 1.10.2 y 1.10.4 podemos observar las gráficas obtenidas por este equipo, así como los valores de rugosidad superficial. En cuanto al tribómetro empleado, se ha utilizado el tribómetro recíprocante de tipo *ball-on-flat Microtest MTL/10/AT* presentado en la Figura 3.

La parte más extensa del trabajo, el procesamiento de datos, se ha realizado mediante el ordenador portátil *Lenovo Ideapad 3*.



Figura 133. Ordenador portátil empleado en el trabajo.

## 2.3 Procedimiento experimental

La fase experimental empieza por determinar el diámetro de la bola de alúmina que se utilizará. El criterio seguido para ello es encontrar valores de fuerza normal que se sitúen cerca de valores entre 1000 y 1500 MPa de presión de contacto (según la teoría de Hertz). En la Tabla 1 se pueden observar diferentes valores de presión de contacto para diferentes cargas aplicadas, así como para la bola de alúmina de 3 mm de diámetro y d 6 mm de diámetro. Se ha elegido la bola de 6 mm de radio ya que, al tener una mayor área de contacto, la presión máxima de contacto no es tan elevada desde cargas bajas. La bola de 3 mm de diámetro, en cambio, a cargas de 1.56 N ya alcanza valores muy elevados de presión máxima. Cabe destacar que el tribómetro trae por defecto el peso del cabezal que, sin añadir ninguna carga, su peso es de 0.56 N.

Fn (N)	Max Contact Pressure (Pmax) (MPa)	
	R'= 1,5mm	R'= 3mm
10,56	2543	1602
9,56	2460	1550
8,56	2371	1494
7,56	2275	1433
6,56	2170	1367
5,56	2054	1294
4,56	1922	1211
3,56	1770	1115
2,56	1586	999
1,56	1344	847

Tabla 11. Valores de presión máxima de contacto.

Las siguientes tablas presentan valores obtenidos de radio del área de contacto (Tabla 12) y de la presión media de contacto (Tabla 13).

Fn (N)	Radius of Contact area (a) (mm)	
	R'= 1,5mm	R'= 3mm
10,56	0,0445	0,0561
9,56	0,0431	0,0543
8,56	0,0415	0,0523
7,56	0,0398	0,0502
6,56	0,0380	0,0479
5,56	0,0360	0,0453
4,56	0,0337	0,0424
3,56	0,0310	0,0390
2,56	0,0278	0,0350
1,56	0,0235	0,0297

Tabla 12. Valores del radio del área de contacto.

Fn (N)	Average Contact Pressure (Paverage) (MPa)	
	R'= 1,5mm	R'= 3mm
10,56	1695	1068
9,56	1640	1033
8,56	1581	996
7,56	1517	955
6,56	1447	911
5,56	1369	862
4,56	1281	807
3,56	1180	743
2,56	1057	666
1,56	896	565

Tabla 13. Valores de presión media de contacto.

La propiedades mecánicas y geométricas de los materiales utilizados se exponen en la Tabla 14.

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (96%)		CoCr (70/30)	
E <sup>A</sup> (GPa)	310	E <sup>B</sup> (GPa)	210
V <sup>A</sup> (-)	0,22	V <sup>B</sup> (-)	0,29
R <sup>A</sup> (mm)	3 ó 6	R <sup>B</sup> (mm)	∞

Tabla 14. Propiedades mecánicas y geométricas de los materiales empleados.

Finalmente, las cargas elegidas han sido de 3.56, 5.56 y 7.56N. Como se ha dicho en el apartado Ensayo tribológico en el laboratorio, la duración de los ensayos es de una hora. Respecto a la frecuencia, los valores elegidos han sido de 0.5,1 y 2 Hz. De esta forma los ensayos tendrán 1800, 3600 y 7200 ciclos, respectivamente.

### 3 Presupuesto

En este punto se expone el presupuesto necesario para llevar a cabo el proyecto. Este presupuesto se ha realizado por costes según naturaleza, con sus respectivas partes: cuadro de precios elementales, estado de mediciones y la valoración final.

1. Precios elementales			
Ref	ud.	Descripción	Precio (€)
<b>Materiales</b>			
m1	kg.	Muestra de CoCr (IVA incl.)	116,99 €
m2	ud.	Bola de alúmina de 3mm de radio (IVA incl.)	0,44 €
<b>Equipos</b>			
e1	mes.	Uso del tribómetro recíprocante	125,00 €
e2	mes.	Uso del perfilómetro	208,33 €
e3	mes.	Uso del ordenador portátil.	12,29 €
<b>M.O.D.</b>			
h1	h.	Técnico de laboratorio (Ingeniero Mecánico)	30,00 €

Tabla 15. Cuadro de precios elementales.

En el cuadro de precios elementales (Tabla 15) se exponen los materiales utilizados para los ensayos, así como el coste de los equipos utilizados y la mano de obra. No se han tenido en cuenta en este apartado otros materiales como los utilizados para el desgaste de las muestras pues se tendrán en cuenta en los gastos generales. En cuanto a los equipos, se ha considerado que sus amortizaciones son constantes y su valor residual es nulo. Se ha considerado una vida útil del tribómetro y del perfilómetro de 10 años y 4 años para el ordenador portátil.

2. Medición			
Ref.	ud.	Descripción	Cantidad
m1	kg.	Muestras CoCr para ensayar.	0,6
m2	ud.	Bolas utilizadas en los ensayos.	10
e1	mes.	Amortización del tribómetro.	2
e2	mes.	Amortización del perfilómetro.	2
e3	mes.	Amortización del ordenador portátil.	5
h1	h.	Tiempo medido en el laboratorio	75
h1	h.	Tiempo de ordenador	225

Tabla 16. Estado de mediciones.

En el estado de mediciones (Tabla 16) se ofrecen datos acerca de la cantidad necesaria de cada uno de los elementos del cuadro de precios elementales.



<b>3. Valoración</b>					
Ref	ud.	Descripción	Precio	Cantidad	Total
<b>Materiales</b>					
m1	kg.	Muestra de CoCr (IVA incl.)	116,99 €	0,6	70,19 €
m2	ud.	Bola de alúmina de 3mm de radio (IVA incl.)	0,44 €	10	4,43 €
<b>Equipos</b>					
e1	mes.	Uso del tribómetro recíprocante	125,00 €	2	250,00 €
e2	mes.	Uso del perfilómetro	208,33 €	2	416,66 €
e3	mes.	Uso del ordenador portátil.	12,29 €	5	61,46 €
<b>M.O.D</b>					
h1	h.	Técnico de laboratorio (Ingeniero Mecánico)	30,00 €	75	2.250,00 €
h1	h.	Técnico de laboratorio (Ingeniero Mecánico)	30,00 €	225	6.750,00 €
<b>Gastos Generales</b>				<b>Presupuesto</b>	
%		Medios auxiliares sobre costes directos	10,00%	9.802,74 €	980,27 €
<b>Total Presupuesto</b>					<b>10.783,01 €</b>

Tabla 17. Valoración.

Se han considerado unos gastos generales de un 10% sobre el presupuesto, correspondientes a los materiales no considerados en el cuadro de precios elementales, costes de electricidad y mantenimiento del laboratorio.

El presupuesto total es de 10.783,01 €.