

Modelado metrológico como herramienta para prever la distribución del lubricante en superficies

Leire Mendieta-Echevarria ^{(1) (2)}, María Ana Sáenz Nuño ⁽³⁾ y Eva María Rubio ⁽⁴⁾

⁽¹⁾ Betsaide S.A.L., C/ Betsaide 1, 48230 Elorrio, Vizcaya, España

⁽²⁾ Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), B/ Sarriena, 48940 Leioa, Vizcaya, España

⁽³⁾ Instituto de Investigación Tecnológica (IIT), Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Universidad Pontificia Comillas, C/ Alberto Aguilera, 25, 28015 Madrid, España.

⁽⁴⁾ Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII), Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), C/ Juan del Rosal, 12, 28040 Madrid, España

RESUMEN: En este estudio se presenta una metodología para simular posibles problemas en la distribución del aceite o lubricante sobre superficies, debidos a la presencia de partículas, mediante la caracterización de los parámetros de rugosidad R y S. Se considera la posible presencia de partículas indeseadas en el lubricante, originadas por fricción, desgaste de componentes o contaminación en el circuito de lubricación. Una distribución deficiente del lubricante sobre la superficie puede verse condicionada por la presencia de estas partículas.

Para abordar este problema, se han implementado algoritmos eficientes que permiten calcular parámetros de rugosidad de perfil y superficie conforme a las normas vigentes, junto con el desarrollo de un filtro morfológico capaz de simular la interacción entre las partículas del lubricante y la superficie. Este análisis contribuye a estimar el tamaño máximo de partícula admisible en el sistema y, en consecuencia, a establecer criterios para el filtrado o sustitución del lubricante dentro de un plan de mantenimiento preventivo.

1. INTRODUCCIÓN

La presencia de partículas contaminantes en el aceite puede provocar un aumento de la fricción entre las piezas móviles, favorecer la acumulación de partículas en zonas críticas y dar lugar a un mayor desgaste o incluso a la rotura de los componentes.

Los aceites y lubricantes actúan como disipadores de calor y mejoran la eficiencia energética mediante la disminución de la fricción entre piezas móviles. Sin embargo, la presencia de partículas procedentes del desgaste de los componentes o de contaminantes externos puede alterar la correcta distribución del lubricante sobre las superficies, comprometiendo su capacidad para garantizar unas condiciones adecuadas de lubricación. Debido a las funciones que desempeñan los lubricantes en las máquinas, resulta de interés analizar la presencia de partículas como parte de las estrategias de mantenimiento preventivo, para garantizar el correcto funcionamiento y prolongar la vida útil de las máquinas.

Dependiendo de la superficie original de la que se parta, el tamaño de una partícula en el lubricante puede ser más o menos perjudicial. Existen criterios y normas para la clasificación y el control de la contaminación por partículas en lubricantes, pero aun así puede ser interesante el estudio de cada caso particular desde el punto de vista del mantenimiento preventivo. De esta forma, se puede analizar el lubricante en uso e identificar cuándo debe ser sustituido.

Este artículo simula los efectos de la distribución del aceite mediante la aplicación de un filtro morfológico de cierre con un elemento estructurante esférico, utilizado para representar la interacción entre las partículas presentes en el lubricante y la superficie analizada. Para ello, se analiza el efecto que tienen diferentes tamaños de partículas sobre la superficie inicial y la evolución de los parámetros de rugosidad para cada uno de ellos. La metodología se puede

implantar tanto utilizando parámetros de rugosidad de perfil como de superficie. El trabajo forma parte de la continuación de la investigación mostrada en las publicaciones [1,2].

Este trabajo no tiene en cuenta la energía superficial, la temperatura del aceite, el tipo de material ni el posible desgaste presente en el aceite. La evaluación se realiza únicamente desde el punto de vista del estudio geométrico del efecto del filtro morfológico. Para este estudio se asume que las partículas tienen forma esférica, considerando los tamaños de partículas establecidos en la normativa vigente sobre lubricantes y analizados previamente en [1].

Por su naturaleza, el filtro morfológico se considera idóneo para la simulación de la distribución del aceite en las superficies, cuando este se realiza mediante un elemento estructurante esférico. El filtro morfológico es un procesamiento de los datos, formado por dos operaciones básicas (dilatación y erosión), que utiliza una forma geométrica para descartar los datos no relevantes [2]. Este filtro es idempotente y presenta la particularidad de que solo produce efecto la primera vez que se aplica un determinado tamaño de filtro, es decir, si se aplica dos veces el mismo tamaño de filtro, la segunda aplicación no produce ningún efecto.

El objetivo principal de este trabajo es mostrar una metodología que permita evaluar el tamaño crítico de una impureza o partícula en el lubricante, en función de la superficie original de la pieza, utilizando los parámetros de rugosidad para realizar esta evaluación.

2. METODOLOGÍA

En la Fig. 1 se muestra el diagrama de flujo de la metodología propuesta. Los dos primeros pasos aparecen sombreados en gris porque, al emplearse directamente datos sintéticos de rugosidad, no han sido necesarios en este estudio.

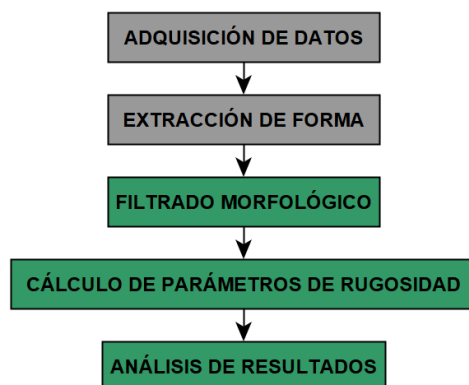


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología.

2.1. Adquisición de datos

En esta primera fase se realiza la medición de perfil o la adquisición de los datos. En el caso de utilizar mediciones por contacto, debe tenerse en cuenta el radio de la punta de palpador, ya que, debido a esta geometría habrá un filtro morfológico aplicado en los datos por defecto. Los tamaños de partículas analizadas deberán superar el de la punta del palpador. Cuando las partículas tengan un tamaño inferior al diámetro del palpador, no tendrá cabida aplicar esta metodología.

Estos datos pueden corresponder a perfiles 2D o a superficie 3D, en función del método de medición utilizado.

Asimismo, debe considerarse que el filtro morfológico presenta un efecto de borde que introduce deformaciones en los extremos de los datos. En consecuencia, será necesario adquirir una extensión adicional de la superficie para poder eliminar las zonas afectadas o aplicar técnicas de compensación adecuadas.

2.2. Extracción de forma

Aunque la normativa sobre la evaluación de la rugosidad especifica una primera fase de extracción de la forma de la superficie para tener solamente la información microgeométrica, es decir, la rugosidad, esta etapa queda fuera del alcance de este trabajo, ya que, se parte de datos sintéticos sin defecto de forma, por lo que la superficie inicial se considera ya corregida de forma. En el comienzo ya se parte de una superficie de rugosidad con la forma extraída.

Las normas UNE-EN ISO 25178-2:2023 [3] y UNE-EN ISO 21920-2:2023 [4] establecen los términos y parámetros aplicables a la textura superficial de área y de perfil, respectivamente.

2.3. Filtrado morfológico

La siguiente etapa especificada en la Fig. 1 es aplicar un filtro morfológico de cierre para cada uno de los tamaños de partícula objeto de estudio.

Los filtros morfológicos de cierre con elemento estructurante esférico permiten simular la interacción entre las partículas presentes en el lubricante y la superficie analizada. Estos filtros se implementan mediante operaciones matemáticas sobre los datos de la superficie. La operación de cierre se realiza mediante una dilatación seguida de una erosión [2].

La dilatación expande los datos iniciales, mientras que la erosión produce el efecto contrario, como se detalla en la norma EN ISO 16610-40:2015 [5]. A efectos prácticos sobre una superficie o un perfil, la dilatación eleva los datos en función de la geometría utilizada como elemento estructurante y la erosión los reduce.

Las referencias [1] y [2] describen con mayor detalle el fundamento y la implementación de estos filtros. Asimismo, se dispone de una simulación interactiva [6] que facilita la comprensión de su funcionamiento. Los filtros morfológicos se han implementado tomando como referencia los conceptos descritos en la norma UNE-EN ISO 16610-41:2015 [7], que detalla el funcionamiento de este tipo de filtros sobre un perfil.

2.4. Cálculo de parámetros de rugosidad

Una vez aplicado el filtro morfológico, se calculan los parámetros de rugosidad para cada tamaño de partícula considerado y para la superficie original.

En la Tabla 1 se recogen los parámetros que, de acuerdo con estudios previos [1], presentan una mayor sensibilidad frente a la variación del tamaño de la partícula.

Nombre del parámetro	Rugosidad del perfil	Rugosidad superficial
Profundidad máxima de hoyo	R_{vt}	S_v
Altura máxima	R_{zt}	S_z
Gradiente cuadrático medio	R_{dq}	S_{dq}
Proporción de área interfacial desarrollada	R_{dr}	S_{dr}
Profundidad de hoyo reducida	R_{vk}	S_{vk}
Profundidad de hoyo máxima	R_{vkk}	S_{vkk}
Área de valles	R_{ak2}	S_{ak2}

Tabla 1. Parámetros de estudio.

Para el cálculo de los parámetros de rugosidad se han utilizado las expresiones de las normas UNE-EN ISO 25178-2:2023 [3] y UNE-EN ISO 21920-2:2023 [4].

2.5. Análisis de resultados

Se analizan los parámetros obtenidos y la evolución de sus valores en función del tamaño de las partículas. A partir de este análisis y considerando la incertidumbre asociada a los datos de entrada, se puede estimar el tamaño máximo de partícula admisible en el lubricante para la superficie estudiada.

La metodología se repite para cada uno de los tamaños de partícula considerados en el estudio, obteniéndose la evolución de los distintos parámetros de rugosidad en función del tamaño del elemento estructurante. Esta evolución constituye la base para identificar el tamaño crítico de partícula compatible con la superficie analizada.

2.6. Ejemplo de uso

A continuación, se muestra un ejemplo de aplicación de la metodología.

En la Fig. 2 se muestra la superficie sintética original sin ondulación ni defecto de forma.

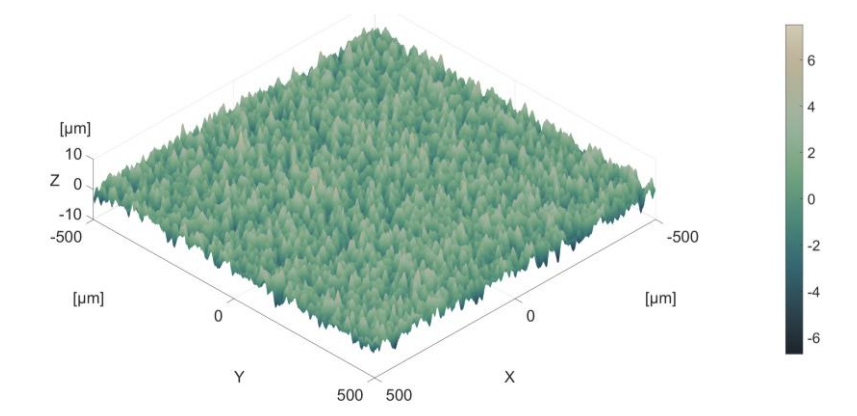


Fig. 2. Superficie original.

En la Fig. 3 se muestra la superficie ya filtrada con el tamaño de partícula de 100 μm . Se observa una notable atenuación de los valles, mientras que los picos se ven menos afectados.

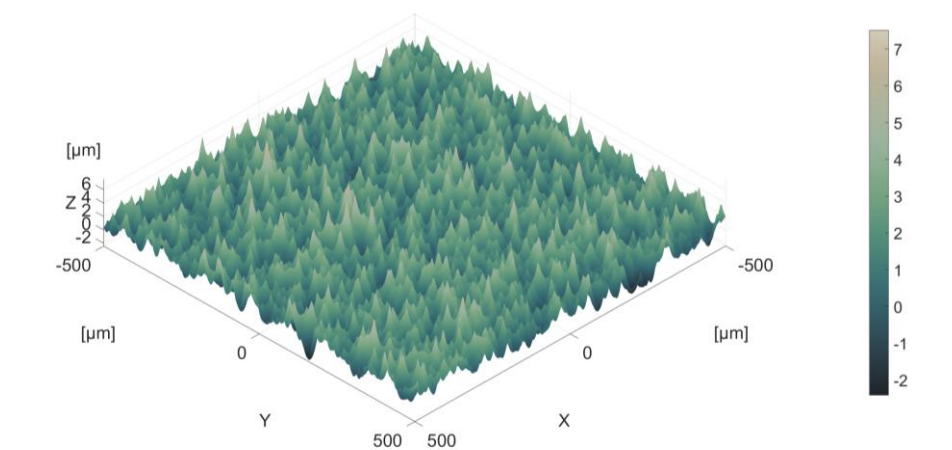


Fig. 3. Superficie con el filtro de 100 μm aplicado.

Así, partiendo de la superficie generada de forma sintética mostrada en la Fig. 2, se han aplicado filtros morfológicos con distintos tamaños de partícula, obteniéndose los siguientes parámetros de rugosidad de superficie que se recogen en las Tabla 2 y Tabla 3.

Parámetros	Original	2 μm	4 μm	5 μm	6 μm	14 μm	15 μm
S_v [μm]	6.6769	6.6776	6.6641	6.6455	6.6051	6.1742	6.1270
S_z [μm]	14.2354	14.2354	14.2191	14.1969	14.1514	13.6542	13.5960
S_{dq} [rad]	0.4304	0.4295	0.4259	0.4218	0.4170	0.3814	0.3772
S_{dr} [%]	8.6407	8.6148	8.4735	8.3158	8.1333	6.8526	6.7066
S_{vk} [μm]	1.5673	1.5669	1.5647	1.5619	1.5580	1.4876	1.4717
S_{vkk} [μm]	4.4962	4.4972	4.4847	4.4677	4.4294	4.0275	3.9859
S_{ak2} [$\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$]	77.6061	77.5852	77.4290	77.2451	76.9882	72.3932	71.2780

Tabla 2. Resultados de los parámetros de rugosidad de superficie después del filtrado (2-15 μm) [1].

Parámetros	21 μm	25 μm	38 μm	50 μm	70 μm	100 μm
S_v [μm]	5.6975	5.5356	4.7164	4.4972	4.0934	3.6758
S_z [μm]	13.0845	12.8556	11.7977	11.3709	10.6753	9.9236
S_{dq} [rad]	0.3498	0.3315	0.2800	0.2453	0.2057	0.1690
S_{dr} [%]	5.8130	5.2451	3.7930	2.9366	2.0815	1.4130
S_{vk} [μm]	1.3599	1.2932	1.1251	1.0439	0.9626	0.8856
S_{vkk} [μm]	3.6095	3.4969	2.8456	2.7519	2.5032	2.2335
S_{ak2} [$\mu\text{m}^3/\text{mm}^2$]	63.6721	59.2715	49.6228	44.9760	41.6490	39.0753

Tabla 3. Resultados de los parámetros de rugosidad de superficie después del filtrado (21-100 μm) [1].

En la Tabla 3 se observa una variación apreciable en los parámetros S_v , S_z , S_{dr} y S_{ak2} para los tamaños de partículas de 25 μm y 38 μm . Esto puede ser un indicativo de que entre estos tamaños podría estar el tamaño crítico de las partículas admisibles en el lubricante.

En la Fig. 4 se muestra de forma gráfica la variación porcentual que tiene cada uno de los parámetros de área por cada tamaño de partícula respecto a su valor original.

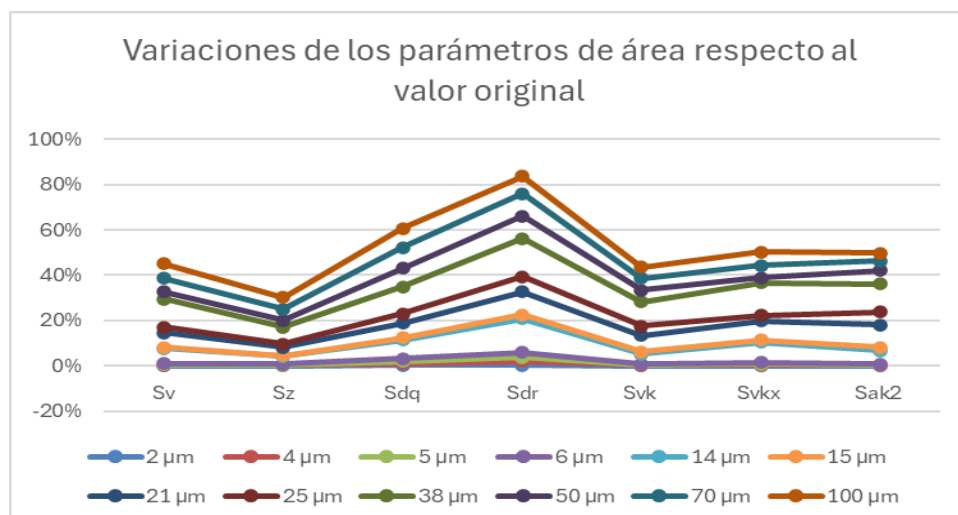


Fig. 4. Variación de los parámetros de superficie por cada tamaño de partícula analizada.

Se aprecia que los parámetros S_{dr} y S_{dq} tienen una elevada sensibilidad al tamaño del filtro morfológico aplicado. La variación porcentual de S_{vkk} es similar a la de S_{ak2} , aunque en las Tablas 2 y 3 no parezca significativo.

En la Tabla 4 y la Tabla 5 se presentan los valores obtenidos de los parámetros de rugosidad de un único perfil para cada uno de los tamaños de partícula estudiados.

Parámetros	Original	2 μm	4 μm	5 μm	6 μm	14 μm	15 μm
R_v [μm]	4.3783	4.3787	4.3742	4.3515	4.3204	4.2297	4.2092
R_{zt} [μm]	9.7321	9.7321	9.7264	9.7022	9.6689	9.5512	9.5264
R_{dq} [rad]	0.2986	0.2981	0.2960	0.2940	0.2915	0.2726	0.2703
R_{dr} [%]	4.2369	4.2268	4.1656	4.1101	4.0412	3.5374	3.4805
R_{vk} [μm]	1.4236	1.4230	1.4160	1.4161	1.4192	1.4188	1.4083
R_{vkk} [μm]	2.4678	2.4684	2.4566	2.4349	2.4060	2.3467	2.3295
R_{ak2} [$\mu\text{m}^2/\text{mm}$]	69.9784	69.9824	69.1953	69.1502	69.1399	69.4281	68.7978

Tabla 4. Resultados de los parámetros de rugosidad de perfil después del filtrado (2-15 μm) [1].

Parámetros	21 μm	25 μm	38 μm	50 μm	70 μm	100 μm
R_v [μm]	4.1236	4.0864	3.3434	2.9977	2.7497	2.5255
R_{zt} [μm]	9.4081	9.3456	8.4994	8.0611	7.6793	7.2840
R_{dq} [rad]	0.2556	0.2462	0.2154	0.1936	0.1677	0.1406
R_{dr} [%]	3.1284	2.9103	2.2543	1.8329	1.3845	0.9790
R_{vk} [μm]	1.4826	1.4364	1.1759	0.9848	0.9873	0.6862
R_{vkk} [μm]	2.2925	2.2409	1.5825	1.2128	1.0787	0.7963
R_{ak2} [$\mu\text{m}^2/\text{mm}$]	70.2334	67.0920	57.0128	45.5567	49.2659	30.0181

Tabla 5. Resultados de los parámetros de rugosidad de perfil después del filtrado (21-100 μm) [1].

En la Tabla 5 se observa que los parámetros R_v , R_{zt} , R_{dr} y R_{ak2} tienen una gran variación entre los tamaños de partículas de 25 μm y 38 μm , tal y como sucedía con los de superficie.

En la Fig. 5 se muestra la variación porcentual de cada parámetro de rugosidad de perfil para los distintos tamaños de partícula respecto a su valor original.

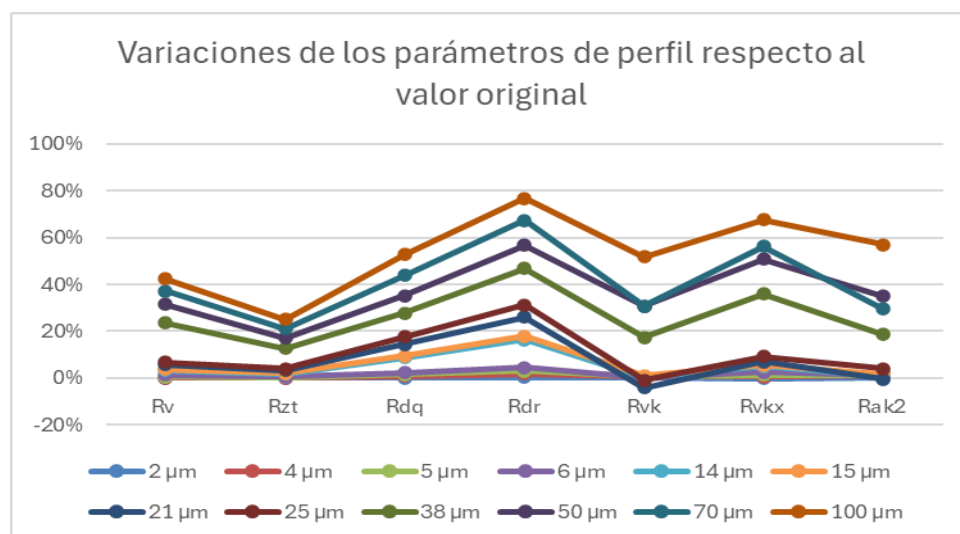


Fig. 5. Variación de los parámetros de perfil por cada tamaño de partícula analizada.

Se observa que los parámetros R_{dr} y R_{vkx} presentan las mayores variaciones porcentuales frente al tamaño de partícula analizado. Esto se detalla en profundidad en [1] y [2].

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el caso de ejemplo se aprecia un cambio significativo al pasar de un filtro de 25 μm a 38 μm en los parámetros S_v , S_z , S_{dr} , S_{vkx} y S_{ak2} . Estos resultados sugieren que el tamaño máximo de partícula admisible para la superficie considerada podría situarse entre ambos valores.

Aunque en las Tablas 2 y 3, el parámetro S_{dq} no muestre variación tan acusada en términos absolutos, la representación porcentual de la Fig. 4 presenta una elevada sensibilidad de este parámetro al aumento del tamaño de las partículas.

Los parámetros R_{vk} y R_{ak2} presentan un comportamiento no estrictamente monótono, como se aprecia en la Fig. 5 la variación porcentual que hay entre las partículas de 50 μm y 70 μm , revisando los datos de la Tabla 5 se aprecia que el resultado de estos parámetros aumenta para el tamaño de 70 μm .

Se observa que los parámetros de rugosidad de superficie son ligeramente más sensibles a la aplicación del filtro morfológico que los parámetros de perfil, además de presentar una mayor fiabilidad. Por tanto, para este tipo de análisis resulta más adecuado aplicar el filtrado sobre superficies que sobre perfiles.

4. CONCLUSIONES

Las conclusiones obtenidas son:

- La metodología propuesta permite estimar el tamaño máximo de partícula admisible en un lubricante en función de las características de la superficie original.
- La aplicación de filtros morfológicos de cierre con elementos estructurantes esféricos permite simular el efecto de partículas de diferentes tamaños sobre la distribución del lubricante en la superficie.
- En el ejemplo estudiado, los parámetros de rugosidad de superficie presentan una mayor sensibilidad frente al tamaño de partícula que los parámetros de perfil, por lo que su utilización resulta más adecuada para la aplicación de la metodología propuesta.
- La metodología desarrollada puede constituir una herramienta de apoyo, especialmente útil, para realizar el mantenimiento preventivo, asegurando así una baja fricción entre partes móviles, debido al buen estado del lubricante y a la buena disipación de calor en el sistema, asegurando la vida útil de los equipos.

5. LÍNEAS FUTURAS

Las líneas futuras de este estudio incluyen los siguientes puntos, en los que ya se está trabajando:

- Identificar la cantidad óptima de datos a utilizar, comparando los resultados obtenidos a partir de perfiles y de superficies, en función de la incertidumbre asociada a la reducción del conjunto de datos.
- Optimizar el algoritmo para reducir su tiempo de procesamiento.
- Validar la metodología propuesta mediante su aplicación a superficies reales obtenidas mediante técnicas de medición normalizadas.
- Incluir la operación de filtrado de la forma u ondulación como parte de la metodología.

- Aplicar operaciones de filtrado para la extracción de la forma, ondulación y rugosidad, sobre datos reales, para la detección de defectos superficiales en geometrías complejas.
- Explorar el uso de filtros morfológicos de apertura para la reducción de anomalías, debidas a destellos, en datos de superficies (nubes de puntos) inspeccionadas por métodos ópticos.
- Desarrollar técnicas de compensación del efecto de borde para el filtrado de superficies.
- Considerar las posibles diferencias en el uso de métodos de medición por contacto y sin contacto, en la comparación de resultados de rugosidad en una misma muestra.

6. REFERENCIAS

- [1] Mendieta-Echevarría, L., Sáenz-Nuño, M. A., & Rubio, E. M. (2025). Comparing the Effectiveness of R and S Roughness Parameters on Surfaces Lubricated with Standardized Nominal Particle Size Lubricants. *Lubricants*, 13(4), 148. <https://doi.org/10.3390/lubricants13040148>
- [2] Mendieta-Echevarría, L., Sáenz-Nuño, M. A., & Rubio Alvir, E. M. (2025). Programación en Matlab de los algoritmos para el cálculo de parámetros de rugosidad de perfiles y superficies conforme a la normativa ISO: comparativa con otros paquetes de software. *e-medida*, (26). <https://www.e-medida.es/numero-26/programacion-en-matlab-de-los-algoritmos-para-el-calculo-de-parametros-de-rugosidad-de-perfiles-y-superficies-conforme-a-la-normativa-iso-comparativa-con-otros-paquetes-de-software/>
- [3] UNE-EN ISO 25178-2:2023; Especificación geométrica de producto (GPS). Calidad superficial: Área. Parte 2: Términos definiciones y parámetros de calidad superficial. (ISO 25178-2:2021).
- [4] UNE-EN ISO 21920-2: 2023; Especificación geométrica de producto (GPS). Calidad superficial: Método del perfil. Parte 2: Términos definiciones y parámetros de calidad superficial. (ISO 21920-2:2021, Versión corregida 2022-06).
- [5] EN ISO 16610-40:2015. Especificación geométrica de producto (GPS). Filtración. Parte 40: Filtros de perfil morfológico: Conceptos básicos (ISO 16610-40:2015). (Ratificada por AENOR en agosto de 2015).
- [6] Filtrado morfológico, Genially, <https://view.genially.com/68179b0afa916185e008c7b2>
- [7] EN ISO 16610-41:2015; Especificación geométrica de producto (GPS). Filtración. Parte 41: Filtros de perfil morfológico: Filtros de disco y filtros de segmento horizontal (ISO 16610-41:2015). (Ratificada por AENOR en septiembre de 2015).

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento a la empresa Betsaide S.A.L., a Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU), a la Universidad Pontificia Comillas y a la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED) por su colaboración y apoyo durante el desarrollo de este trabajo. Su contribución ha sido fundamental para la realización de este estudio.