



UNIVERSIDAD DE JAÉN

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

**ESTUDIO DE FILTROS PARA
ESTIMACIÓN DE ACABADO
SUPERFICIAL**

Alumno: Alberto Justicia Espinosa

Tutor: Prof. D. Rubén Dorado Vicente

Dpto: Departamento de Ingeniería Mecánica y
Minera

Junio, 2019



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Industrial

Don Rubén Dorado , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Estudio de filtros para estimación de acabado superficial, que presenta Alberto Justicia Espinosa, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2019

El alumno:

Los tutores:

Alberto Justicia Espinosa

Rubén Dorado Vicente

Índice

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1. Conceptos importantes	6
1.2. Medición de rugosidad superficial	7
1.2.1. Perfilometría de contacto	7
1.2.2. Perfilómetro óptico	9
1.3. Parámetros de acabado superficial más utilizados	9
1.3.1. Perfil total, Pt.....	9
1.3.2. Ondulación total, Wt.....	10
1.3.3. Rugosidad total, Rt.....	10
1.3.4. Rugosidad media aritmética, Ra	11
1.3.5. Rugosidad media cuadrática, Rq	13
1.3.6. Rugosidad media, Rz	14
1.3.7. Rugosidad máxima, Rmax	15
1.3.8. Rugosidad media en los picos, Rpk	16
1.3.9. Rugosidad media en los valles, Rvk.....	16
1.3.10. Anchura media de los elementos de un perfil, Rsm.....	16
1.4. Rangos de acabado industriales según proceso de fabricación	17
1.5. Análisis del contorno de un perfil.....	19
2. TIPOS DE FILTROS	21
2.1. Elección de la longitud de onda límite	21
2.2. Filtro mecánico.....	24
2.3. Filtros digitales	27
2.3.1. Filtros lineales y robustos.....	28
2.3.2. Filtro 2RC.....	30
2.3.3. Filtro de Gauss.....	31
2.3.4. Filtro B-Spline	33
3. REVISIÓN DE FILTROS PARA ACABADO SUPERFICIAL	37
3.1. SoftGauges for Surface Metrology, NPL.....	38
3.2. RPTB (Reference software for roughness measurement), PTB	38
3.3. SMATS (Surface Metrology Algorithm Test System), NIST	39
3.4. Últimos estudios realizados.....	40
4. IMPLEMENTACIÓN FILTRO B-SPLINE CON MATHEMATICA	41
4.1. Filtro Gaussiano con Mathematica	41
4.2. Filtro B-Spline de acuerdo a ISO TS 16610-22:2006.....	42
4.3. Filtro B-Spline propio con función “BSplineFunction”.....	44

4.4.	Cálculo de parámetros Ra, Rq y Rz	47
5.	ENSAYOS.....	48
5.1.	Obtención de las mediciones	49
5.1.1.	Primera medición	50
5.1.2.	Segunda medición	51
5.1.3.	Tercera medición	52
5.1.4.	Cuarta medición	53
5.2.	Desarrollo de perfiles en software NIST	54
5.2.1.	Desarrollo del primer perfil	56
5.2.2.	Desarrollo del segundo perfil.....	60
5.2.3.	Desarrollo del tercer perfil	63
5.2.4.	Desarrollo del cuarto perfil	67
5.3.	Desarrollo de perfiles con los filtros implementados	71
5.3.1.	Desarrollo del primer perfil	71
5.3.2.	Desarrollo del segundo perfil.....	73
5.3.3.	Desarrollo del tercer perfil	76
5.3.4.	Desarrollo del cuarto perfil	78
6.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	80
7.	CONCLUSIONES.....	87

1. INTRODUCCIÓN

Debido al avance de la tecnología se requieren métodos de control cada vez más precisos. Todas las industrias tienden a la perfección y por ello cada vez se busca mejorar sus métodos de medición y a su vez mejorar la calidad de los productos en un mercado cada vez más competitivo.

En el ámbito dimensional, todas las piezas fabricadas siempre van a tener irregularidades debido al método de obtención empleado, y por ello siempre vamos a necesitar controlar estas desviaciones. Si nos referimos a operaciones de arranque de material, existen diferentes tipos de mecanizados (fresado, rectificado, pulido, etc.) y, por lo tanto, unos tendrán unas especificaciones más precisas que otros y, a su vez, el método de medición a emplear será diferente en cada caso. Por lo que, para asegurar la mejor calidad de estos acabados será necesario métodos de medición cada vez más precisos.

Los métodos de medición convencionales para procesos de mecanizado se aplican en 3 niveles: dimensiones, formas y acabado. Pero para este trabajo nos centraremos en la medición de los acabados superficiales, específicamente en el parámetro de la rugosidad. Este parámetro influye tanto en la estética como en la funcionalidad de los componentes, comprometiendo las propiedades del material en cuestión, por ejemplo, la resistencia a la fatiga. Su estimación requiere el tratamiento y filtrado de un gran número de mediciones. La forma en la que se realice el tratamiento y el filtrado genera variaciones en los resultados de la estimación.

Los objetivos de este trabajo son los siguientes:

- Estudiar los filtros existentes, cuándo se requieren usar, qué controla, ventajas, inconvenientes y a su vez, analizar los trabajos actuales que existen actualmente acerca de este tema.
- Implementar un filtro B-Spline propio y comparar los resultados con filtros ya existentes.

1.1. Conceptos importantes

Hay que empezar recordando relacionados al acabado superficial.

- Perfil ideal: Es el corte de una superficie considerada perfecta, sin ningún error. También se llama perfil nominal.
- Perfil real: Es el corte en base al plano de corte nominal de una superficie que si presenta desviaciones.
- Perfil efectivo: Aproximación de perfil real obtenido por alguno de los metodos de medición, todavía contiene algunas imprecisiones del propio equipo utilizado sin filtrar. En general, los equipos más avanzados de medición contienen filtros internos para evitar la representación de estas imperfecciones en el perfil.
- Perfil de rugosidad: Obtenido del perfil efectivo, este perfil puede ser evaluado ya que sí están filtradas tanto la ondulación como las imprecisiones del equipo. Se puede distinguir como las marcas o el rastro que quedan después de cualquier proceso de acabado superficial y la encontramos superpuesta a la ondulación. Será nuestro elemento a seguir durante todo el trabajo.
- Perfil de ondulación: Obtenido del perfil efectivo, este perfil contiene la forma u ondas de la superficie a evaluar. Es el conjunto de desviaciones repetidas en ondas de paso de gran amplitud y que se originan por diferencia en movimientos o posicionamiento de máquina, deformación por tratamiento térmico, etc.
- Longitud de corte o Cutoff: Distancia utilizada para poder diferenciar entre ondulación y rugosidad. Si el espacio la desviación es menor al cutoff es considerado como rugosidad, si es mayor o igual se puede considerar como ondulación. Esta característica es la que nos va a servir para el aplicado de distintos filtros en base al perfil que vayamos a evaluar.

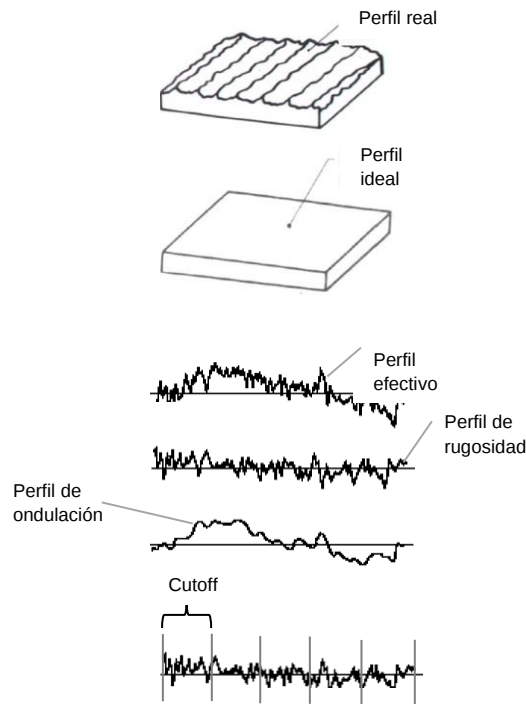


Ilustración 1.1 – Conceptos importantes sobre acabado superficial [1]

1.2. Medición de rugosidad superficial

Para poder conseguir nuestro perfil de rugosidad deberemos medir las superficies reales, de las cuales extraeremos el perfil deseado. Los dos métodos más usados para la obtención de estos perfiles son por medio de perfilometría de contacto o perfilometría láser.

1.2.1. Perfilometría de contacto

Este método es el más usado convencionalmente, de hecho es el que se usó para la obtención de perfiles en nuestro trabajo. Esta tecnología se basa en la morfología de una superficie.

Hay dos tipos de equipos dentro de este método: equipos de banco, se muestra en la Imagen 1.2, normalmente son equipos fijos y, por ello, suelen ser más precisos, y equipos portátiles, se puede ver en la Imagen 1.3, estos equipos pueden moverse de su lugar de origen y ser fijados a una placa base, suelen tener mayor grado de incertidumbre.

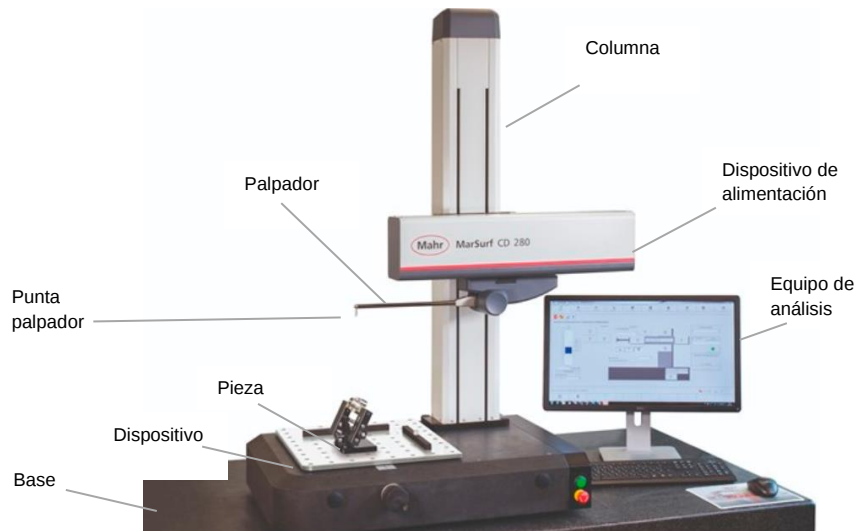


Ilustración 1.2 – Equipo de banco para medición de acabado superficial



Ilustración 1.3 – Equipo portátil para medición de acabado superficial

Vamos a centrarnos en los equipos fijos, ya que fue el que utilizamos para la obtención de nuestras mediciones. Como muestra la Imagen 1.2, estos equipos cuentan con una base, normalmente de mármol cuyo espesor determina la cantidad de vibraciones que pueden absorber para reducir la incertidumbre. Sobre la base está la columna que sostiene el equipo de medición y el dispositivo sobre el cual se coloca la pieza a medir. Un palpador con una punta cónica, con un radio esférico proporcional a la característica a evaluar, recorre una distancia, también proporcional a la característica a controlar, movido por un dispositivo de alimentación. Cabe mencionar que también hay diferentes tipos de palpadores: capacitativo, piezo eléctrico, patín mecánico, etc.

Todos los datos obtenidos por la punta del palpador se transfieren directamente al equipo de cómputo para ser evaluados por el analista.

1.2.2. Perfilómetro óptico

Esta tecnología es mucho más avanzada y aún está en desarrollo. Estos equipos se caracterizan por una detección mucho más rápida, a diferencia de los anteriores, de grandes superficies de medición con una alta precisión de medición.

Normalmente estos equipos trabajan con un método de luz confocal y suelen ser diseños modulares. En base a la medición y especificación del producto a analizar pueden ajustarse y seleccionarse diferentes sensores.

Estos equipos dependen también de la condición estética de la pieza, ya que si no hay buena visibilidad, el material tiene mucho brillo, etc. el haz de luz no se va a reflejar de manera que el lente pueda absorber correctamente y transformar los datos al equipo de cómputo.

1.3. Parámetros de acabado superficial más utilizados

Para medir de manera correcta y precisa cualquier parámetro de acabado es necesario filtrar la forma del perfil real. Si necesitamos medir algún parámetro de rugosidad filtraremos a su vez el perfil de ondulación. Esto es lo que hace realmente interesante el estudio de los filtros

En este apartado vamos a explicar más detalladamente cuáles son los parámetros más utilizados para el estudio de una superficie, cómo calcularlos, sus ventajas y sus inconvenientes.

1.3.1. Perfil total, Pt

Se define el perfil total o perfil primario como la superficie obtenida por el instrumento de medición aplicando un filtro pasa bajos, dependiendo de la longitud de evaluación, para corregir valores que puedan producirse al momento de la medición (como vemos en la Imagen 1.4). Este perfil será la base para empezar a analizar cualquier superficie, así que cualquier error que afecte en este parámetro, tendrá influencia en los parámetros siguientes que calculemos.

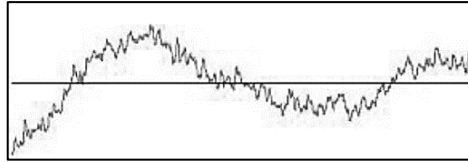


Ilustración 1.4 – Perfil total [1]

1.3.2. Ondulación total, W_t

Este parámetro es determinado mediante un filtrado pasa banda, en el cual se eliminan los componentes de onda corta y de onda larga, con esto conseguimos eliminar todos los componentes relacionados con la rugosidad y forma. Aplicándole un filtro pasa banda al perfil de la Imagen 1.4, podemos apreciar la ondulación en la Imagen 1.5.

La gran ventaja de este parámetro es que podemos apreciar realmente cómo trabajó la máquina, si la herramienta tuvo alguna vibración, si tuvo una mala colocación a la hora de hacer el mecanizado, etc.

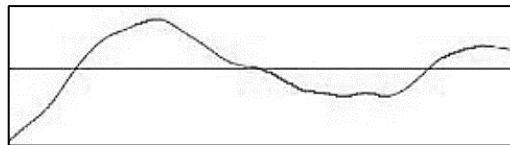


Ilustración 1.5 – Ondulación total [1]

1.3.3. Rugosidad total, R_t

Para poder determinar un buen perfil de rugosidad, la medición de éste debe ser en sentido transversal a las estrías de la mecanización. Una vez bien realizada esta medición, aplicaremos un filtrado pasa altos, para dejar visibles solo los componentes de onda corta. Se puede definir como la máxima distancia entre el mayor pico y el valle más profundo.

Una de las ventajas de este parámetro es su rigidez de evaluación, ya que considera toda la longitud del perfil, aunque tiene que ser tomado con mucho cuidado puesto que puede llevar a resultados engañosos.

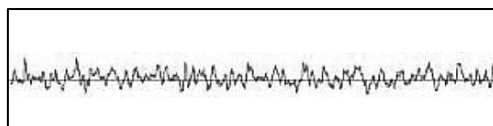


Ilustración 1.6 – Rugosidad total [1]

1.3.4. Rugosidad media aritmética, Ra

Este parámetro, también conocido como CLA o AA, es definido como la media aritmética de un perfil en valores absolutos respecto a la línea central de éste dentro de la longitud de evaluación. En otras palabras, es la altura del rectángulo cuya área viene definida por la suma absoluta de las áreas delimitadas entre el perfil y la línea central dentro de la longitud de evaluación (L_e).

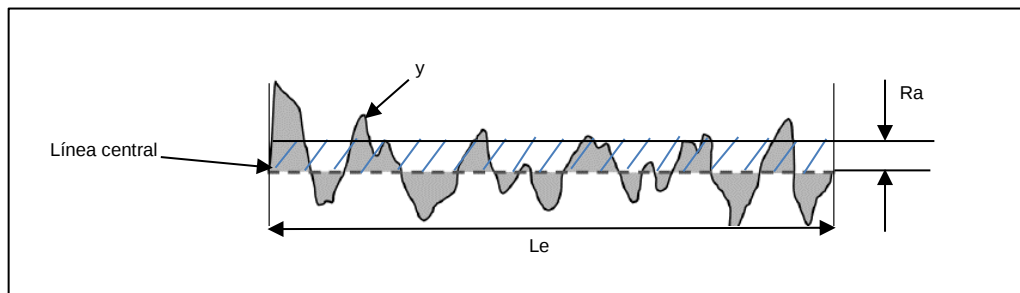


Ilustración 1.7 – Rugosidad media aritmética [1]

El Ra viene definido por la fórmula siguiente:

$$R_a = \frac{1}{L_e} \int_0^{L_e} |y| dx$$

(Fórmula 1.2)

En la práctica y, como podemos ver en la Imagen 1.7, el Ra equivale a la altura de un rectángulo en la longitud de evaluación, que corresponde a la suma de las áreas delimitadas por el perfil de rugosidad y la línea central.

En la Tabla 1.1, podemos ver valores de Ra típicos en μm , según distintas aplicaciones:

Ra [μm]	Aplicaciones típicas de rugosidad superficial
0,01	Bloques patrón – Reglas de alta precisión – Guías de aparatos de medida de alta precisión
0,02	Aparatos de precisión- Superficies de medida en micrómetros y calibres de precisión
0,03	Calibradores. Elementos de válvulas de alta presión hidráulica
0,04	Agujas de rodamientos. Superacabado de camisas de block de motores
0,05	Pistas de rodamientos. Piezas de aparatos control de alta precisión
0,06	Válvulas giratorias de alta presión. Camisas block de motor.

0,08	Rodamientos de agujas de grandes rodamientos
0,1	Asientos cónicos de válvulas. Ejes montados sobre bronce, teflón, etc. a velocidades medias. Superficies de levas de baja velocidad.
0,15	Rodamientos de dimensiones medias. Protectores de rotores de turbinas y reductores.
0,2	Anillos de sincronizados de cajas de velocidades
0,3	Flancos de engranaje. Guías de mesa de máquinas-herramientas
0,4	Pistas de asientos de agujas en crucetas.
0,6	Válvulas de esfera. Tambores de freno.
1,5	Asientos de rodamiento en ejes c/carga pequeña. Ejes-agujeros de engranajes. Cabezas de pistón
2	Superficies mecanizadas en general, ejes, chavetas, alojamientos, etc.
3	Superficies mecanizadas en general. Superficies de referencia. Superficies de apoyo
4	Superficies desbastadas
5 a 15	Superficies fundidas y estampadas
>15	Piezas fundidas, forjadas y laminadas.

Tabla 1.1 – Aplicaciones convencionales de acuerdo a una tolerancia Ra [2]

Este parámetro es el más utilizado debido a la facilidad de obtención del mismo, por ejemplo, para controlar de forma continua una línea de producción.

Según la DIN 4769, podemos dividir los valores de Ra en diferentes grados como vemos en la Tabla 1.2:

Ra [μm]	Nº de Grado
0,025	N1
0,05	N2
0,1	N3
0,2	N4
0,4	N5
0,8	N6
1,6	N7
3,2	N8
6,3	N9
12,5	N10
25	N11
50	N12

Tabla 1.2 – Denominación de grados de acuerdo a un Ra [3]

Esta tabla nos permite especificar y controlar de una mejor manera el acabado que queramos lograr.

Las grandes ventajas de este parámetro son:

- Fácilmente aplicable a la mayoría de los procesos industriales.
- La mayoría de los equipos de medición de rugosidad ya lo tienen implementado por defecto.
- Las marcas inherentes al proceso de mecanizado no modifican su valor.

Y las desventajas que presenta son:

- No podemos distinguir entre picos y valles.
- Su valor no es capaz de definir la irregularidad de un perfil, por lo que no podemos diferenciar superficies con acabados diferentes.

1.3.5. Rugosidad media cuadrática, Rq

Este parámetro viene especificado según la raíz cuadrada de la desviación del perfil, o en términos prácticos, equivale a los distanciamientos del perfil de la línea central dentro de la longitud de evaluación, Le. Viene dado por la siguiente fórmula:

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{Le} \int_0^{Le} y^2 dx}$$

(Fórmula 1.3)

La rugosidad media cuadrática se usa básicamente en superficies donde el Ra no presenta una buena resolución o que necesitamos mayor exactitud en cuanto a la cantidad de picos y valles que presenta.

Una de las grandes ventajas es que, a comparación del Ra, con el Rq puedes detectar picos o valles en superficies que realmente son importantes, ya que este parámetro le da un valor agregado a las altas desviaciones.

Las desventajas principales son la dificultad que representa obtenerlo gráficamente, más que el R_a , y que, para poder tener una buena evaluación del perfil, debemos acompañarlo de un $R_{\max}$.

1.3.6. Rugosidad media, R_z

Hay dos tipos de rugosidad media R_z , uno se define con DIN 4768 y otro según ISO.

- R_z – DIN 4768

El R_z se define como la media aritmética de las alturas pico-valle de los 5 módulos de medición (Cut-off), Z_i , que definen a la longitud de evaluación, L_e , según la norma DIN 4768. Cada corte se define la máxima distancia, como la mayor altura del pico hasta la mínima altura de un valle referente a la línea central; todo esto viene representado en la Imagen 1.8:

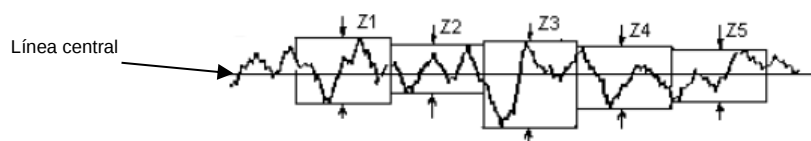


Ilustración 1.8 – Rugosidad media de acuerdo a DIN 4768 [1]

Por lo tanto, el R_z puede ser definido por la fórmula que vemos a continuación:

$$R_z = \frac{1}{5} (Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5)$$

(Fórmula 1.4)

Las ventajas son la fácil obtención de la superficie en perfiles periódicos y las desviaciones aisladas serán consideradas solo parcialmente, dependiendo de la cantidad de puntos aislados.

- R_z – ISO

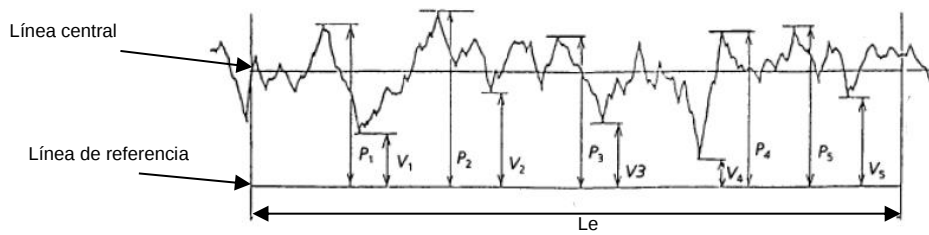


Ilustración 1.9 – Rugosidad media de acuerdo a ISO [1]

Este R_z tiene un método diferente de medición, ya que en este parámetro se utiliza una línea de referencia, Imagen 1.9, paralela a la línea central que no intercepta al perfil. Se define como la diferencia entre el promedio de los picos más altos y los valles más bajos como vemos en la fórmula siguiente:

$$R_z = \frac{(P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5) - (V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5)}{5}$$

(Fórmula 1.5)

1.3.7. Rugosidad máxima, R_{max}

Este parámetro viene definido del cálculo de R_z en base a la norma DIN 4768. Por ejemplo, como vemos en la Imagen 1.9, el cálculo de este $R_{máx}$, será la máxima distancia, Z_i , entre los 5 cut-off de la longitud de evaluación, en este caso Z_3 .

Se emplea, básicamente, cuando tengamos la certeza que los puntos aislados no van a tener ninguna influencia sobre la superficie que estamos evaluando.

Sus ventajas son:

- Una buena definición en superficies periódicas.
- Evaluación óptima de superficies de deslizamiento, aunque siempre debe ir acompañada de la ondulación.

Sus inconvenientes son los siguientes:

- Puede dar una percepción errónea de la superficie, ya que evalúa errores que a veces no representa a la superficie en general.
- No podemos distinguir la forma que tiene la superficie a evaluar.

1.3.8. Rugosidad media en los picos, Rpk

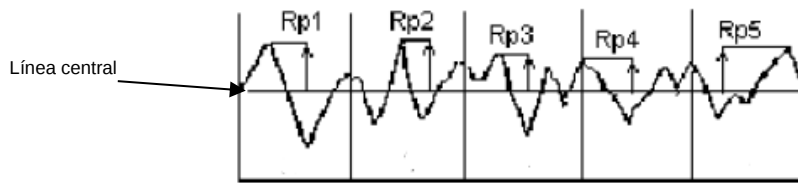


Ilustración 1.10 – Rugosidad media en los picos [1]

Este parámetro sólo toma en cuenta los picos del perfil evaluado en base a la línea central. Se define como el promedio de las alturas de pico más altas en cada uno de los Cut-off (Rp_i):

$$Rpk = \frac{Rp_1 + Rp_2 + Rp_3 + Rp_4 + Rp_5}{5}$$

(Fórmula 1.6)

1.3.9. Rugosidad media en los valles, Rvk

A diferencia de la rugosidad media en los picos, este parámetro mide el promedio de la profundidad en los picos para cada uno de los cutoff (Rv_i) del perfil a evaluar.

$$Rvk = \frac{Rv_1 + Rv_2 + Rv_3 + Rv_4 + Rv_5}{5}$$

(Fórmula 1.7)

1.3.10. Anchura media de los elementos de un perfil, Rsm

Este parámetro, a diferencia de los anteriores, mide el perfil de manera horizontal y sirve como complemento a la rugosidad media aritmética, Ra . Como su nombre indica el espacio o la anchura media que existe entre los elementos de un perfil, ya sean picos o valles, como podemos ver en la Fórmula 1.8.

$$Rsm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{Si}$$

(Fórmula 1.8)

Donde X_{si} es la anchura de un elemento del perfil y m es el número de elementos del perfil presentes en el perfil de rugosidad, como podemos ver en la Imagen 1.11.

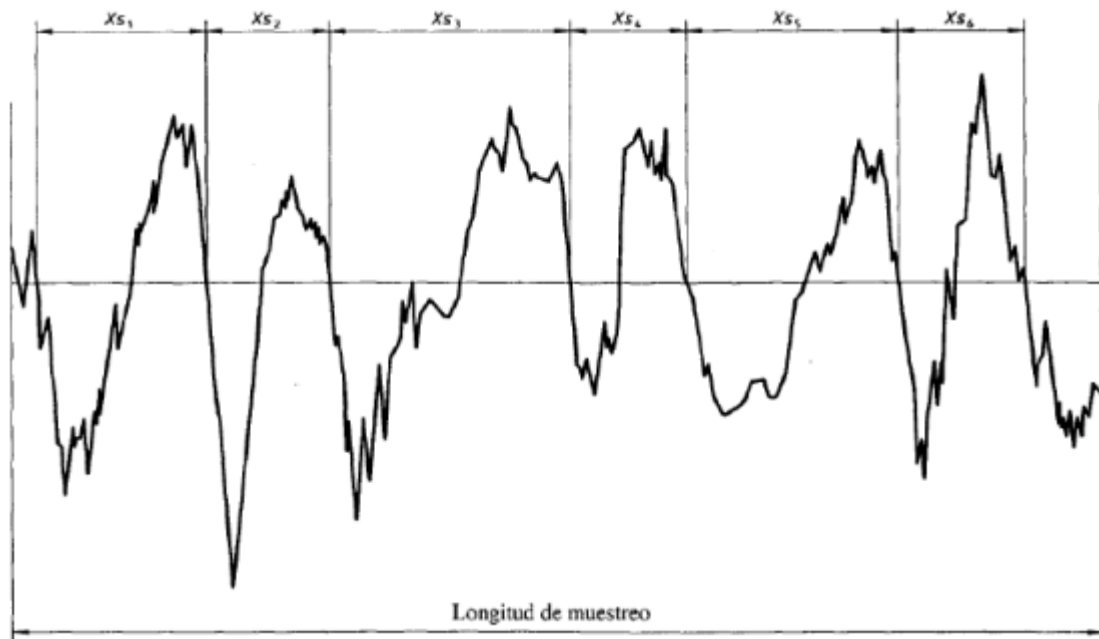


Ilustración 1.11 – Anchura media de los elementos de un perfil, R_{sm} [4]

1.4. Rangos de acabado industriales según proceso de fabricación

En este apartado vamos a hablar de algunos de los acabados superficiales que existen y las diferencias en cada uno de ellos, entre ellos la tolerancia de acabado superficial, en las Tablas 1.3. y 1.4 podemos ver distintos tipos de acabados y sus valores más frecuentes.

RUGOSIDAD Ra μ	SUPERFICIE OBTENIDA CON ARRANQUE DE VIRUTA																													
	Lapado	Superacabado	Bruído con piedra			Pulido	Mandrinado		Rectificado			Torneado			Escarado	Fresado		Tallado		Acabado			Brochado	Tahdrado	Mortajado	Refrentado	Limadora	Cepillado	Aseado debastado.	
			Interior	Cilíndrico	Plano		Diamante	Común	Diamante	Cilíndrico normal	Plano	Diamante	Fino	Basto		Metal duro	Común	Fresa módulo	Fresa mañe	Lapado	Anulado	Bruído								Afeitado
0.025																														
0.032																														
0.040																														
0.05																														
0.063																														
0.080																														
0.10																														
0.125																														
0.16																														
0.20																														
0.25																														
0.32																														
0.4																														
0.5																														
0.63																														
0.8																														
1.0																														
1.25																														
1.6																														
2																														
2.5																														
3.2																														
4																														
5																														
6.3																														
8																														
10																														
12.5																														
16																														
20																														
25																														
32																														
40																														
50																														
63																														
80																														
100																														

Valores mas frecuentes

Valores menos frecuentes

Valores mas frecuentes
Valores menos frecuentes

Tabla 1.3 – Clasificación de rugosidad superficial en base al proceso de mecanizado con arranque de viruta [2]

RUGOSIDAD Ra μ	SUPERFICIE OBTENIDA SIN ARRANQUE DE VIRUTA													
	Laminado				Fundición									
	Bridido con rodillos	Rovras	Frio	Caliente	Trefilado en frio	Acuñado	Estruido	Estampado	Forjado	Microfusión	Presión	Coquilla	Cacera	Avena
0.025														
0.032														
0.040														
0.05														
0.063														
0.080														
0.10														
0.125														
0.16														
0.20														
0.25														
0.32														
0.4														
0.5														
0.63														
0.8														
1.0														
1.25														
1.6														
2														
2.5														
3.2														
4														
5														
6.3														
8														
10														
12.5														
16														
20														
25														
32														
40														
50														
63														
80														
100														

Tabla 1.4 – Clasificación de rugosidad superficial en base al proceso de mecanizado sin arranque de viruta [2]

1.5. Análisis del contorno de un perfil

Los perfiles como coméntabamos en la introducción tienen tres componentes individuales de oscilación según DIN 4760: forma, ondulación y rugosidad. Podemos verlo gráficamente en la Imagen 1.12:

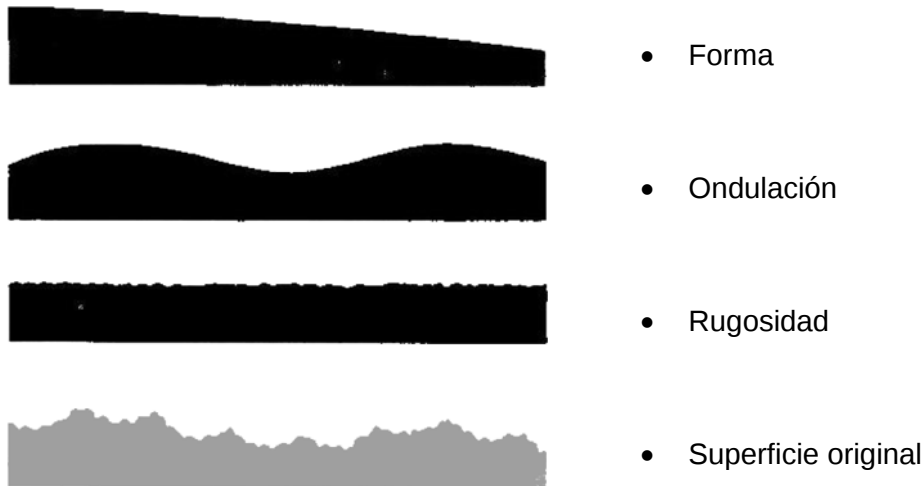


Ilustración 1.12 – Componentes de un perfil [5]

En el análisis de contorno se pueden descomponer las oscilaciones en componentes individuales depende de las amplitudes y longitudes de onda que filtremos.

Todos los componentes también pueden ser representados como espectro, en una gráfica donde el eje X es la longitud de onda (λ) medido en ondas por revolución, W/U, y eje Y corresponde a la amplitud de onda, A. Dependiendo de qué longitud de onda se quiera evaluar corresponde a forma, ondulación o rugosidad y, a su vez, si está fuera de la tolerancia requerida a qué puede afectar. Podemos ver en un ejemplo en la Imagen 1.13:

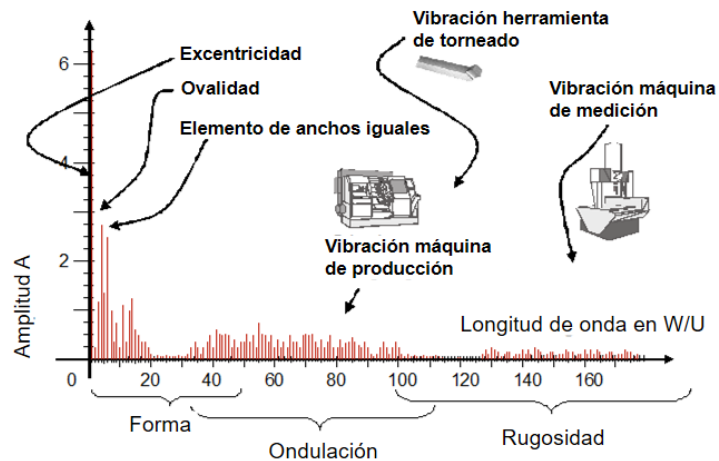


Ilustración 1.13 – Ejemplo de perfil de acuerdo con su espectro de ondas [5]

Esta clasificación de la superficie en sus componentes se llama Análisis de Fourier. Para nuestro caso, debido al sistema avanzado de medición va a ser calculado con la transformada rápida de Fourier (FFT).

Pero lo realmente interesante es la posibilidad de representar solo una parte de los componentes de la oscilación, por ejemplo sólo los valores mayores a 120 W/U (ondas por revolución). Esta técnica se llama filtrado digital, este filtrado se aplica también en acústica y es especialmente útil en el área de metrología.

El funcionamiento de este tipo de filtrado va en función del componente que se quiera analizar:

- Rugosidad: Para poder analizar sólo este componente es necesario un filtro pasa altos, el cual solo va a permitir ver oscilaciones de onda corta (altas)
- Ondulación: Para este componente se requiere un filtro pasabanda, el cual solo dejará ver las oscilaciones de onda media.
- Forma: Para éste último, necesitamos un filtro pasa bajos para poder ver únicamente oscilaciones de onda larga (bajas).

Los filtros se caracterizan por dos factores:

- El tipo de algoritmo matemático de cálculo (Gaussiano, 2RC, Spline, etc.)

- El número de onda límite w_c en W/U para superficies redondas/cilíndricas, o bien, su longitud de onda límite λ_c para superficies rectas/planas. Existe una manera para poder hacer la conversión entre w_c y λ_c .

$$\lambda_c = \frac{3,14 \cdot D}{w_c} ; w_c = \frac{3,14 \cdot D}{\lambda_c}$$

(Fórmula 1.9)

donde D es el diámetro de la pieza.

Para poder tener condiciones óptimas de cálculo, se necesita mínimo 2 puntos de medición por longitud de onda del componente a evaluar y se recomienda 7 puntos para asegurar el cálculo de manera inequívoca.

2. TIPOS DE FILTROS

Para poder evaluar cualquier tipo de acabado superficial es necesario aplicar un filtrado para poder separar los diferentes componentes del perfil, ondulación y rugosidad. En la actualidad, existen numerosos tipos de filtro, los cuales vamos a ver a continuación, aunque podría decirse que el más usado o el estándar es el filtro de Gauss. En este apartado vamos a ver las ventajas e inconvenientes de cada uno de ellos.

También es importante destacar que algunos de estos filtros no están estandarizados, por lo cual, no es posible implementarlos en algunos casos.

2.1. Elección de la longitud de onda límite

Antes de comenzar a hablar de los tipos de filtros, es necesario tener en cuenta la correcta elección de la longitud de onda que va a limitar nuestro perfil. Esto va a determinar cuán exacto va a ser el componente del perfil que estemos filtrando.

La mejor manera de hacer esta elección, siempre y cuando tengamos el perfil descompuesto en sus ondas, es tomar el valor de de número de onda límite directamente de la gráfica de Fourier del perfil a analizar. Para poder realizarlo de esta

manera, primero hay que tomar la superficie a filtrar con una precisión y densidad de puntos suficientemente alta y posteriormente determinar la longitud de onda límite en base a su gráfica representada. Vamos a ver algunos ejemplos de cómo realizar este ejercicio y problemas que se pueden presentar:

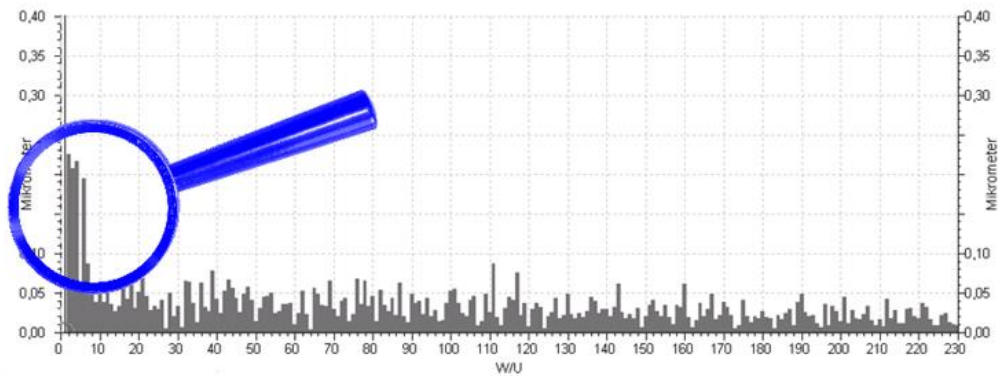


Ilustración 2.1 – Ejemplo de perfil con ondas largas dominantes [5]

Para la Imagen 2.1, está claro que los componentes de onda larga son más dominantes por lo que ondas más cortas que 10 pueden ser despreciables, por lo que con un filtrado con $w_c = 50$ W/U es más que suficiente.

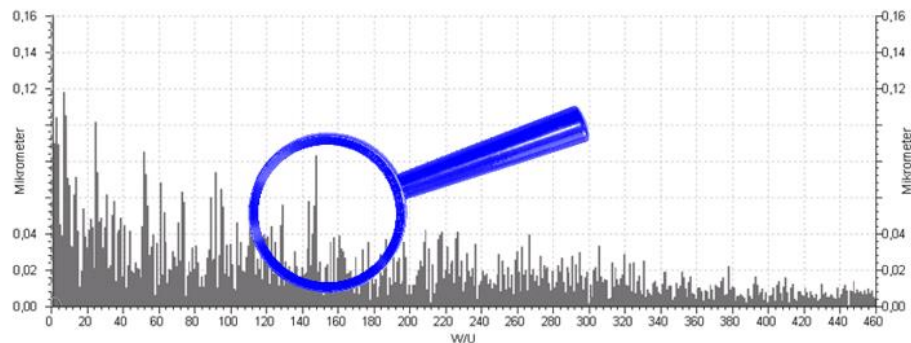


Ilustración 2.2 – Ejemplo de perfil con ondas medias y largas dominantes [5]

Para el ejemplo de la Imagen 2.2, podemos ver como dominan los componentes de onda media y larga. Si es cierto que existe un máximo característico en 150 W/U por lo que, lo mejor sería elegir un número de ondas límite que represente este pico ya que puede ser importante.

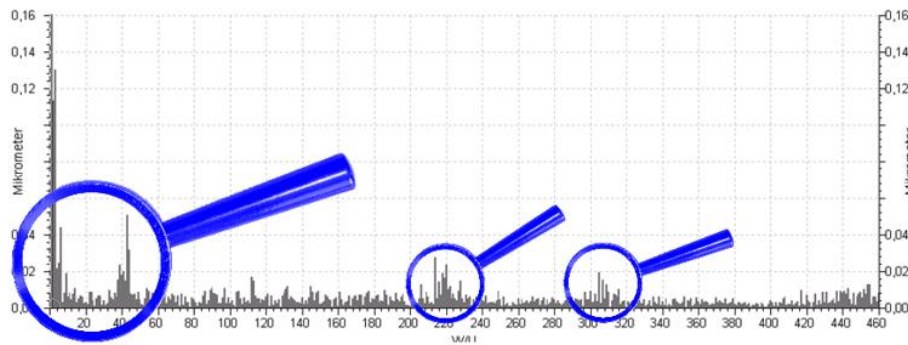


Ilustración 2.3 – Ejemplo de un perfil con diferentes ondas dominantes [5]

Para este último ejemplo (Imagen 2.3), podemos ver que existen picos tanto en la zona de onda larga, 40, como en 220 y 310 W/U. Lo mejor sería un filtrado en w_c en 160 W/U pero hay que analizar los picos que mencionamos y determinar si es necesario un filtrado por separado en cada uno de los rangos.

Como vemos éste método es algo subjetivo y requerimos tanto de analizar el perfil de manera espectral y un análisis para casos complejos, por lo que cuando conocemos la tolerancia que vamos a controlar, existe otra manera más sencilla de calcular este longitud de onda, según ISO 4288, ASME B46.1. Este método puede regular tanto perfiles periódicos (como los máster o patrones) como no periódicos (piezas ya mecanizadas), podemos ver en la Tabla 2.1 como se regulan los cut-off según esta norma.

Perfiles periódicos	Perfiles no periódicos		Cutoff	Longitud de un segmento/ Long. Evaluación
R_{sm} (mm)	R_z (μm)	R_a (μm)	λ_c (mm)	L_t / L_n (mm)
0.013 a 0.04	Hasta 0.1	Hasta 0.02	0.08	0.08 / 0.4
0.04 a 0.13	Más de 0.1 hasta 0.5	Más de 0.02 hasta 0.1	0.25	0.25 / 1.25
0.13 a 0.4	Más de 0.5 hasta 10	Más de 0.1 hasta 2	0.8	0.8 / 4
0.4 a 1.3	Más de 10 hasta 50	Más de 2 hasta 10	2.5	2.5 / 12.5
1.3 a 4	Más de 50 hasta 200	Más de 10 hasta 80	8	8 / 40

Tabla 2.1 – Elección de cutoff en base a la tolerancia de rugosidad [6]

Este método podemos utilizarlo en base a la tolerancia que vamos a controlar, si, por ejemplo, nuestra pieza tiene una tolerancia en R_z de 5 μm nuestro cutoff a utilizar será de 2.5 mm y la longitud de evaluación de 12.5 mm.

2.2. Filtro mecánico

Existen dos componentes que influyen directamente en el ruido mecánico que se produce al medir una superficie: el diámetro de la esfera de palpado y el material a evaluar.

Para asegurar tanto una correcta medición como que el palpado de nuestra máquina no esté actuando como un filtro pasa bajos debemos asegurar que la esfera de palpado o la punta con la que vamos a medir el perfil tiene el tamaño idóneo para la tolerancia que estamos controlando, en base al diagrama de ondas.

Para calcular el diámetro apropiado en base a la medición que queremos obtener nos basamos en las siguientes fórmulas:

- Para un plano:

$$D_K = \frac{\lambda_c^2}{9,87 \cdot wh}$$

(Fórmula 2.1)

donde D_K es el diámetro de la pieza y wh la altura de la onda.

Podemos ver un diagrama, Imagen 2.4, para la elección de este diámetro de palpado para medición de un plano dependiendo de la longitud de onda y de la altura de la onda:

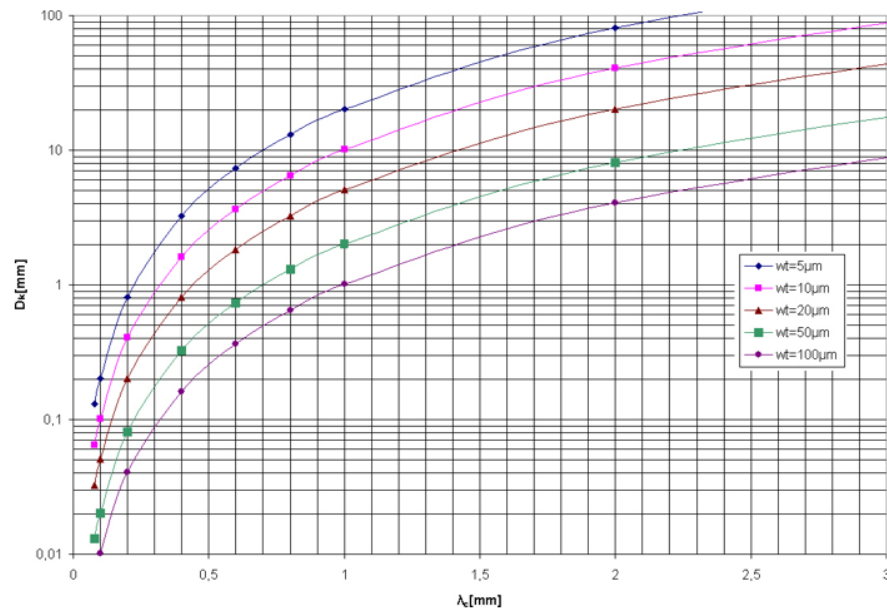


Ilustración 2.4 – Elección del diámetro de palpado para medición de plano [5]

- Para un diámetro externo:

$$D_K \leq \frac{D^2}{D + w_c^2 \cdot wh} ; \text{ donde } D \text{ es el diámetro de la pieza y } w_c \text{ el número de onda}$$

(Fórmula 2.2)

Se puede ver un diagrama, Imagen 2.5, para la elección de este diámetro de palpado para la medición de un diámetro externo D dependiendo de la longitud de onda y de la altura de la onda:

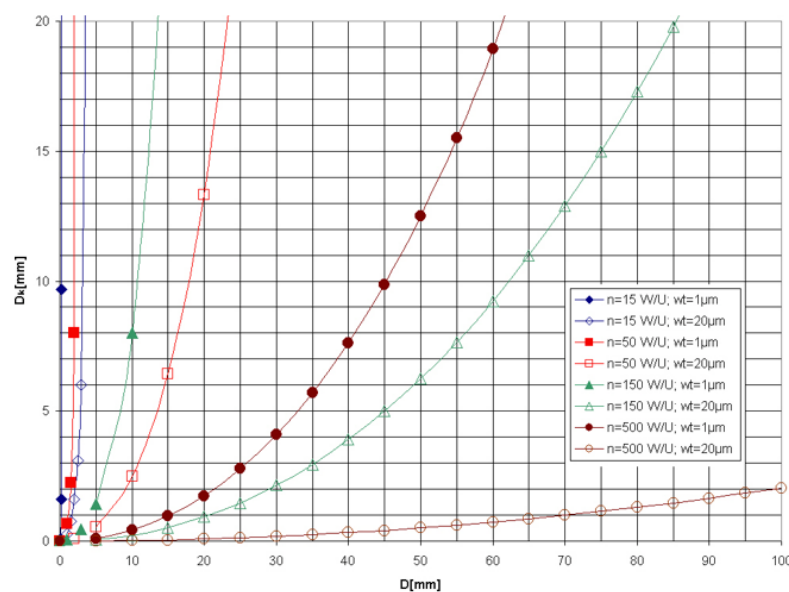


Ilustración 2.5 – Elección del diámetro de palpado para medición de diámetro externo [5]

- Para un diámetro interno:

$$D_K \leq \frac{D^2}{D + w_c^2 \cdot wh} \text{ si } w_c^2 \cdot wh \geq D_K$$

(Fórmula 2.3)

En la Imagen 2.6 se ve el diagrama para poder elegir el diámetro de palpado para la medición de un diámetro interno D dependiendo de la longitud de onda y de la altura de la onda:

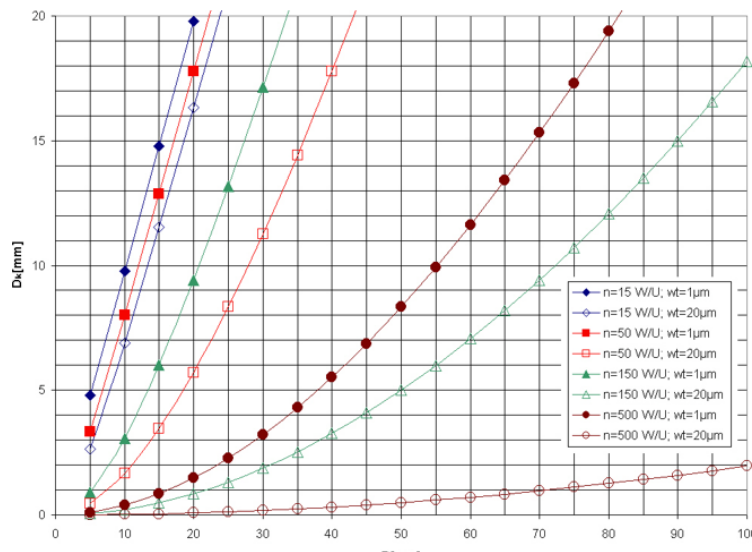


Ilustración 2.6 – Elección del diámetro de palpado para medición de un diámetro interno [5]

Al igual que para la elección del cutoff también existe una tabla, según ISO 4288, ASME B46.1, para la elección del radio del palpador cuando tenemos un cutoff conocido. Podemos ver en la Tabla 2.2 la relación entre ambos elementos.

Cutoff	Radio del palpador	Máximo espaciado de la muestra
λ_c (mm)	r_{tip} (μm)	Δx (μm)
0.08	2 o menos	0.5
0.25	2 o menos	0.5
0.8	2 o menos	0.5
2.5	5 o menos	1.5
8	10 o menos	5

Tabla 2.2 – Elección del radio del palpador en base a un cutoff conocido [6]

Además, para poder corregir el posible ruido que puede generar la máquina existen sistemas de amortiguación, los más usados en la industria son los mecánicos (método de fricción de Newton), en el cual se crea una fricción artificial para amortiguar el comportamiento de oscilación del cabezal de palpado, o los de fluidos (método de fricción de Stoke), en el cual los componentes del interior del cabezal de palpado están alojados en fluidos, reduciendo así el ruido que pudiera producirse al evaluar.

2.3. Filtros digitales

Existen numerosos filtros digitales y cada día nuevos métodos y algoritmos que permiten la introducción de filtros más avanzados.

En este apartado vamos a ver los filtros que existen hoy en día y cuáles son sus principales ventajas e inconvenientes. Como se mencionó en la introducción toda superficie puede ser representada como una superposición de diferentes estructuras geométricas con diferentes escalas. En la Imagen 2.7 podemos ver como se aprecian los distintos componentes en una superficie honeada:

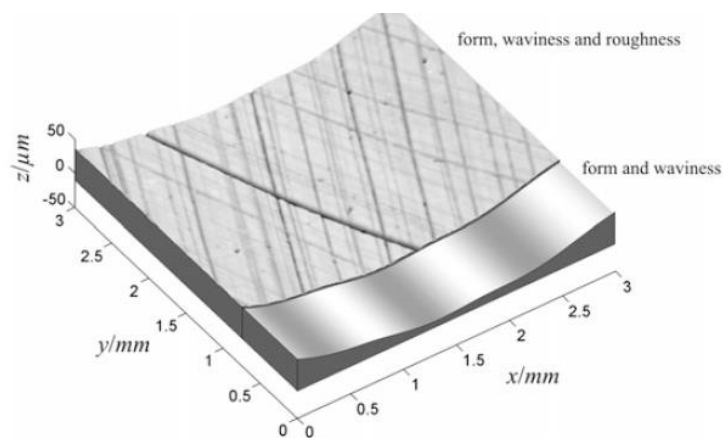


Ilustración 2.7 – Componentes de una superficie honeada [7]

El filtrado es una herramienta muy útil para poder hacer un análisis más exhaustivo de la pieza a revisar porque cada uno de los componentes del perfil, como vimos anteriormente, nos posibilita estudiar diferentes partes del proceso de mecanizado y cada uno tiene un efecto diferente en la funcionalidad de la pieza.

Son necesarios dos pasos para aplicar una operación de filtrado. El primer paso es elegir el método adecuado de filtrado y el segundo el parámetro apropiado de filtrado para dividir la información en componentes de grande y pequeña escala. Para

personas sin experiencia, se deben de usar valores definidos en ISO 25178 parte 3 (2012) para superficies y ISO 4288 (1996) para perfiles como ya se mencionó en el apartado 2.1.

2.3.1. Filtros lineales y robustos

Un filtro lineal o robusto es una operación que puede ser aplicada para extraer o suprimir ciertos rangos de escala de la superficie, $z(x,y)$. La fórmula para describir la extracción de onda larga es la siguiente:

$$z(x, y) \rightarrow w(x, y)$$

(Fórmula 2.4)

Sin embargo, para poder extraer la onda corta es necesario restar a la superficie original, la superficie ya filtrada:

$$r(x, y) = z(x, y) - w(x, y)$$

(Fórmula 2.5)

Todos los filtros lineales tienen que cumplir el siguiente requerimiento:

$$az_1(x, y) + bz_2(x, y) \rightarrow aw_1(x, y) + bw_2(x, y)$$

(Fórmula 2.6)

Esta ecuación indica que cuando dos superficies son superpuestas aditivamente y se les aplica un filtro lineal, el resultado es idéntico a la superposición aditiva de las superficies filtradas.

Un filtro lineal determina una media móvil, sin embargo, los valores son ponderados de manera diferente en el proceso de promediado. Este proceso está regulado por una función de ponderación $s(x,y)$, que también determina las propiedades del filtro, que puede ser expresada por una doble integral para el filtrado de un área:

$$w(x, y) = \iint s(x - \mu, y - v) z(\mu, v) d\mu dv$$

(Fórmula 2.7)

Donde μ y ν son las variables de integración en los ejes x e y respectivamente. El valor de $w(x,y)$ de la superficie filtrada es calculado moviendo el origen de la función de ponderación de $s(0,0)$ a (x,y) y determinando la media ponderada de esta función. Esta operación se llama también convolución, ya que los valores de la función son reflejados sobre la ordenada antes de la integración.

Gráficamente, el filtrado de superficie se puede reducir al filtrado de perfiles, primero en dirección X y luego en Y , siendo numéricamente eficiente y filtrado rápido.

El filtro robusto se caracteriza porque los datos que arroja de salida son insensibles a fenómenos específicos en los datos de entrada. Estos fenómenos pueden ser valores atípicos, que son porciones locales de un conjunto de datos que no son representativos y se caracterizan por magnitud y escala, o estructuras en la superficie, como surcos aislados.

Debido a que un filtro lineal es una media móvil, a diferencia del filtro robusto, si es influenciado por estos surcos aislados, como, por ejemplo, en la Imagen 2.8:

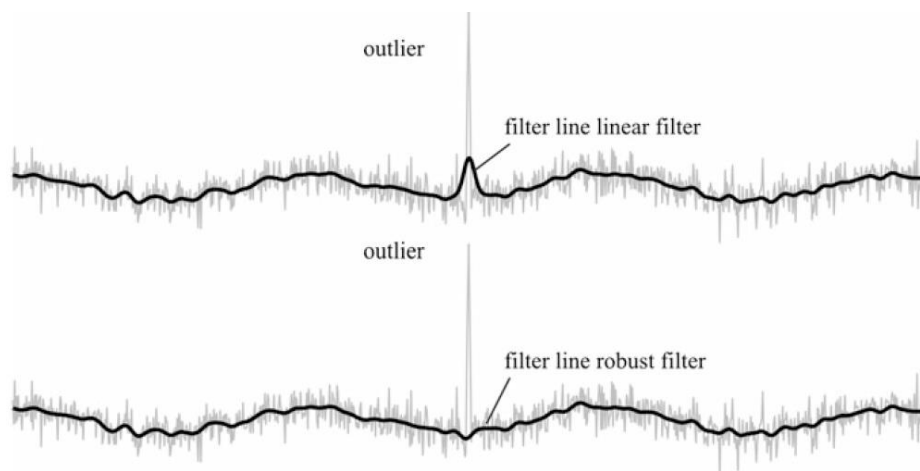


Ilustración 2.8 – Diferencia entre filtro robustos y lineales [7]

Como vemos el filtro lineal, si sigue el comportamiento del punto atípico pero el filtro robusto no siente ninguna influencia e incluso lo desprecia.

Sabiendo que el proceso para el filtro lineal es un problema de mínimos cuadrados expresado con la siguiente función:

$$\min_{w(x,y)} = \iint (z(\mu, v) - w(x, y))^2 (s(x - \mu, y - v)) d\mu dv$$

(Fórmula 2.8)

Al elevarse al cuadrado los valores residuales, cualquier punto atípico tendrá influencia en el resultado. Para mitigar este efecto, el filtro robusto usa una función de ponderación p como se ve en la Fórmula 2.9.:

$$\min_{w(x,y)} = \iint p(z(\mu, v) - w(x, y))^2 (s(x - \mu, y - v)) d\mu dv$$

(Fórmula 2.9)

Un filtro robusto necesita métodos iterativos para calcular la superficie filtrada y es, debido a la no linealidad, que no tienen funciones de transferencia. Para un filtro robusto, el cut-off también será el parámetro para el filtro; sin embargo, la longitud de este cut-off se calcula en base al ancho de las estructuras geométricas medidas y siempre depende cada filtro porque cada uno tiene propiedades de transferencia diferentes.

2.3.2. Filtro 2RC

Este filtro es un filtro lineal y es invariante a la translación. Este filtro está dado por la siguiente ecuación:

$$s(x) = \frac{A^2 \cdot x}{\lambda_c} \cdot e^{-\frac{A \cdot x}{\lambda_c}}$$

(Fórmula 2.10)

Donde A es $\frac{2\pi}{\sqrt{3}}$ y λ_c la longitud de corte.

Para poder filtrar la señal digital se utiliza la convolución digital en la siguiente ecuación, donde $p(k)$ es el perfil original leído y $s(x)$ el filtro aplicado:

$$g(x) = \sum_{k=0}^{n=1} p(k)s(x)$$

(Fórmula 2.11)

Cabe destacar que este filtro ya fue totalmente reemplazado por el filtro gaussiano desde hace más de 20 años (ISO 11562:1996) y actualmente no se utiliza en casi ningún ámbito.

2.3.3. Filtro de Gauss

Este filtro es el más utilizado en el ámbito de la metrología. Funciona de modo que para cada valor de medición calcula un valor medio, teniendo en cuenta tanto el propio valor de medición como de los valores adyacentes que se ponderan en base a una distribución normal (campana de Gauss), por ello no presenta corrimiento de fase. Es un filtro lineal invariante a la translación.

Funciona de manera que para cada valor de medición calcula un valor medio, teniendo en cuenta también los valores de medición vecinos. Estos se ponderan de acuerdo a la curva de distribución normal conocida como campana de Gauss.

Este filtro presenta problemas en los extremos del perfil medido debido a la simetría, por lo tanto, no es posible trabajarlo en los límites del campo de medición. El primer punto de medición es tomado después de pasar, la mitad o completamente, la longitud de onda límite inicial y el último punto se toma antes de llegar a, la mitad o completamente, de la longitud de la onda límite del final del perfil medido, a esto se le llama comportamiento de arranque y arrastre. Como vemos en la Imagen 2.9, las zonas señaladas son los campos de arranque y arrastre, mismos que no son tomados para la evaluación del perfil, lo que conlleva la reducción del campo de medición.

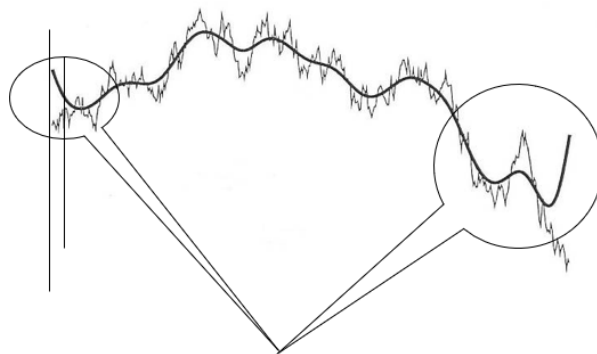


Ilustración 2.9 – Comportamiento de arranque y arrastre para un perfil medido [7]

Este filtro está dado por la siguiente función de ponderación:

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \lambda_c} \cdot e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \cdot \lambda_c}\right)^2}$$

(Fórmula 2.12)

donde x es la distancia desde el centro (máximo) de la función, λ_c es la longitud de onda del cutoff y α es una constante igual a $\sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}}$ que especifica la amplitud de amortiguación de la onda.

La Imagen 2.10 muestra la forma de la función, donde el eje X es x/λ_c y el eje Y es $\lambda_c \cdot s(x)$.

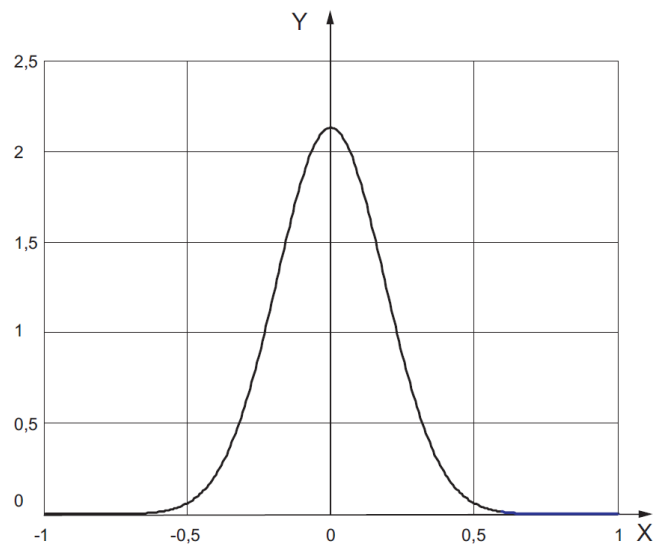


Ilustración 2.10 – Representación de la función de un filtro gaussiano [7]

Esta función no tiene límites en x o y , por lo que para la determinación práctica de la media móvil es necesario establecer un cero, $s(x) = 0$ para $x > L_c * \lambda_c$. Así el área a evaluar se reduce a los límites mediante $L_c * \lambda_c$, donde L_c es una constante de truncamiento para esta función. Para la implementación en un software de referencia un valor mayor o igual 0.6. Para prevenir que el campo de medición sea reducido en exceso se puede utilizar un valor mayor o igual a 0.5.

Para las características de transmisión de los componentes de onda larga y onda corta de un perfil se utilizan las siguientes funciones:

- Onda corta:

$$\frac{a_1}{a_0} = e^{(-\pi(\frac{\alpha \cdot \lambda_c}{\lambda})^2)}$$

(Fórmula 2.13)

- Onda larga:

$$\frac{a_2}{a_0} = 1 - e^{(-\pi(\frac{\alpha \cdot \lambda_c}{\lambda})^2)}; \frac{a_2}{a_0} = 1 - \frac{a_1}{a_0}$$

(Fórmula 2.14)

Donde a_0 es la amplitud del perfil de onda sinusoidal antes del filtrado, a_1 y a_2 son la amplitud del componente de onda larga y onda corta, respectivamente, del perfil de onda sinusoidal y λ es la longitud de onda del perfil sinusoidal. En la Imagen 2.11 se puede ver de manera gráfica estas ecuaciones:

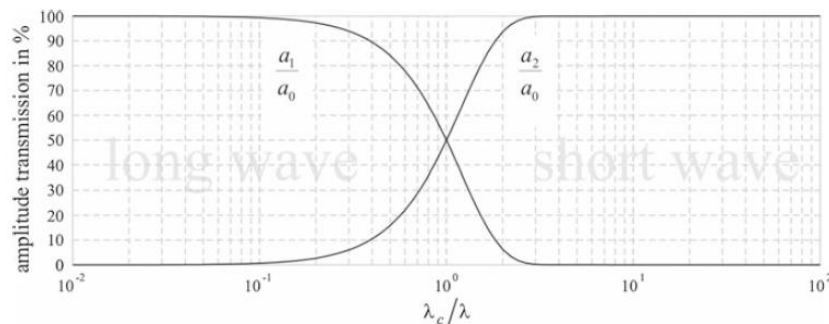


Ilustración 2.11 – Representación gráfica de onda corta y onda larga [7]

2.3.4. Filtro B-Spline

Este filtro se rige por la norma ISO TS 16610-22:2006 y si varía en translación a diferencia del filtro de Gauss o 2RC. Su función de ponderación no puede darse mediante una fórmula cerrada simple sino que será necesario utilizar ecuaciones de filtrado para describir este filtro. Sin embargo, es posible realizar un cálculo numérico de la función de ponderación cuando el intervalo de prueba Δz sea lo suficientemente pequeño, el filtro spline esté basado en splines cúbicos cardinales y el valor predeterminado de $\beta=0$. En la Imagen 2.12 se puede ver la representación gráfica de esta función.

$$s(x) = \frac{\pi}{\lambda_c} \cdot \sin\left(\sqrt{2} \frac{\pi}{\lambda_c} |x| + \frac{\pi}{4}\right) e\left(-\sqrt{2} \frac{\pi}{\lambda_c} |x|\right)$$

(Fórmula 2.15)

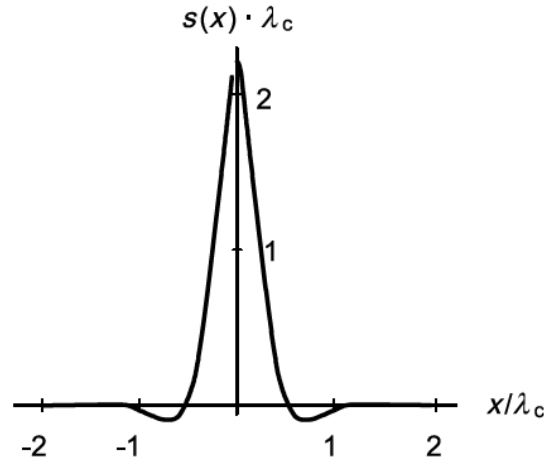


Ilustración 2.12 – Representación de la función de un filtro B-Spline [8]

Las ecuaciones de filtrado siguientes están basadas en splines cubicos cardinales. Para un filtro spline aplicado a un perfil no periodico la ecuacion a utilizar es la siguiente:

$$[1 - \beta \alpha^2 P + (1 - \beta) \alpha^4 Q] w = z$$

$$P = \begin{pmatrix} 1 & -1 & & & & \\ -1 & 2 & -1 & & & \\ & -1 & 2 & -1 & & \\ & & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & & -1 & 2 & -1 \\ & & & & -1 & 2 & -1 \\ & & & & & -1 & 1 \end{pmatrix} \quad Q = \begin{pmatrix} 1 & -2 & 1 & & & & \\ -2 & 5 & -4 & 1 & & & \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots & \\ & & 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ & & & 1 & -4 & 5 & -2 \\ & & & & 1 & -2 & 1 \end{pmatrix}$$

Con n filas, n columnas y los parámetros:

$$\alpha = \frac{1}{2 \sin \frac{\pi \Delta x}{\lambda_c}}; 0 \leq \beta \leq 1$$

(Fórmula 2.16)

Donde n es el número de valores de datos extraídos del perfil, z es el vector de dimensión n de los valores del perfil antes del filtrado, w es el vector de dimensión n de los valores del perfil en perfil filtrado, λ_c es la longitud de onda del cut-off y Δx es el intervalo de muestra.

Como datos adicionales, el vector w solo da los valores del perfil de componente de onda larga. Para la onda corta se pueden calcular a través de $r = z - w$ y β es el parámetro de tensión, el cual controla como de ajustado va a encajar la curva a través de los puntos del perfil, si no existe especificación se recomienda tomar el valor 0.

Para calcular las características de transmisión de los componentes de onda larga y onda corta de un perfil se utilizan las siguientes funciones:

- Onda corta:

$$\frac{a_1}{a_0} = \left[1 + \beta \alpha^2 \sin^2 \frac{\pi \Delta x}{\lambda} + 16(1 - \beta) \alpha^4 \sin^4 \frac{\pi \Delta x}{\lambda} \right]^{-1}$$

(Fórmula 2.17)

- Onda larga:

$$\frac{a_2}{a_0} = 1 - \frac{a_1}{a_0} = \left[4\beta \alpha^2 + 16(1 - \beta) \alpha^4 \sin^4 \frac{\pi \Delta x}{\lambda} \right] \left[1 + \beta \alpha^2 \sin^2 \frac{\pi \Delta x}{\lambda} + 16(1 - \beta) \alpha^4 \sin^4 \frac{\pi \Delta x}{\lambda} \right]^{-1}$$

(Fórmula 2.16)

Donde λ es longitud del perfil sinusoidal y debe ser mayor o igual a $2\Delta x$.

En la Imagen 2.13, podemos ver una comparativa de las características de transmisión entre el filtro gaussiano y el filtro spline, de acuerdo a la ISO 11562:1996 ($\beta=0,625242$ y $\Delta x = \lambda_c/2000$).

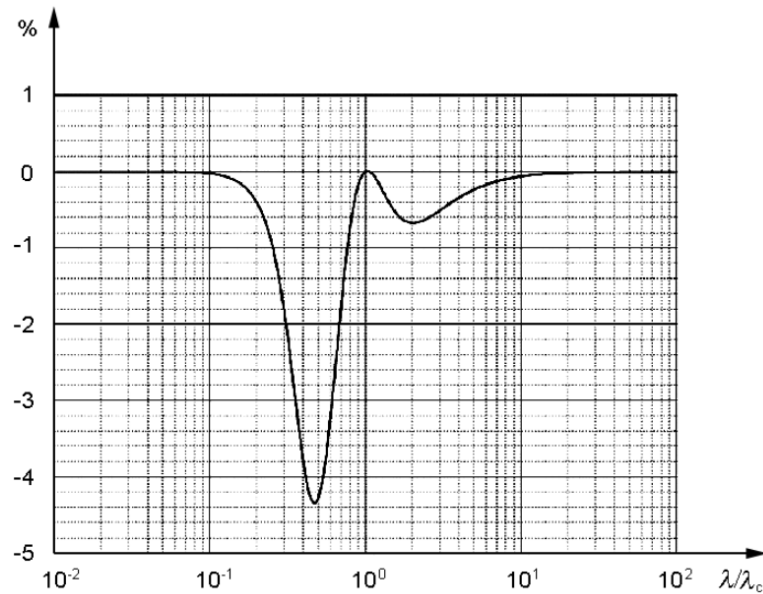


Ilustración 2.13 – Desviación de las características de transmisión del filtro Spline en cuanto a un perfil Gauss [8]

Adicional, en las siguiente imágenes, Imagen 2.14 y 2.15, veremos unas comparativas de cómo se ajusta un perfil gaussiano (a la izquierda) contra un perfil spline (a la derecha) utilizando la misma longitud de onda para el cut-off y un $\beta = 0$ para éste último.

- $\lambda_c = 0,8 \text{ mm}$

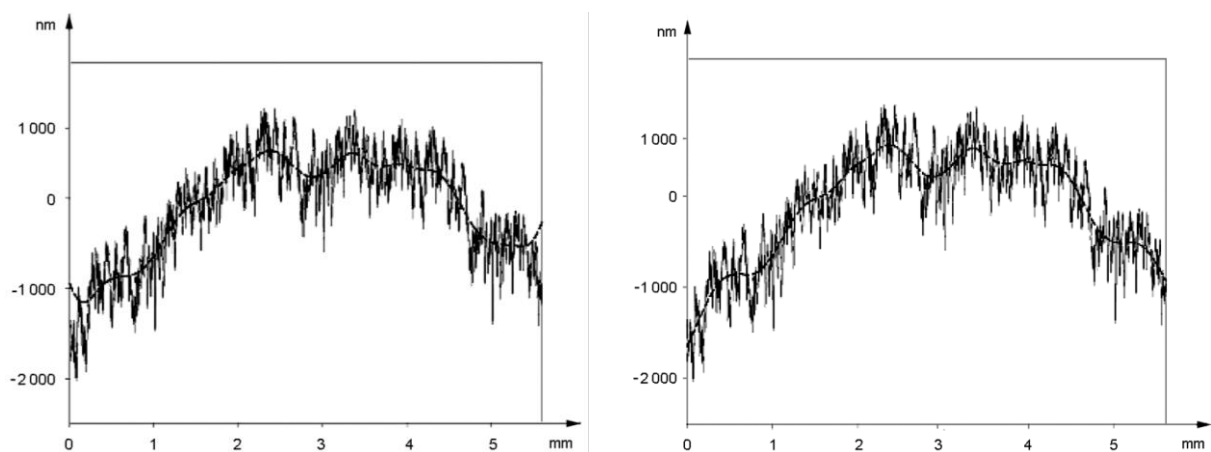


Ilustración 2.14 – Comparación para un perfil Spline (derecha) y uno Gauss (izquierda) para un cutoff de 0.8 mm [8]

- $\lambda_c = 8 \text{ mm}$

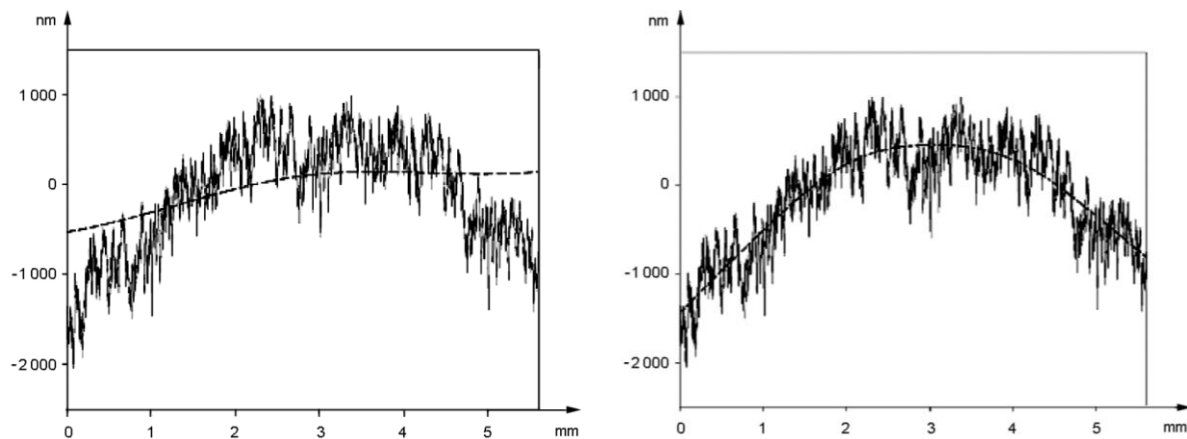


Ilustración 2.15 – Comparación para un perfil Spline (derecha) y uno Gauss (izquierda) para un cutoff de 8 mm [8]

Como podemos ver, existe una diferencia notoria entre un filtro y otro, a simple vista se ajusta mejor al perfil un filtro Spline. Es por ello, que realizaremos un filtro spline para ver si realmente es apreciable este cambio.

3. REVISIÓN DE FILTROS PARA ACABADO SUPERFICIAL

La norma ISO 5436-2 (2001) introdujo en la estandarización internacional el concepto de la norma de medición de software o del parámetro en el contexto de la medición del acabado superficial.

Esta norma define los estándares de medición de software Tipo F1 (datos de referencia) y Tipo F2 (software de referencia), misma que permite evaluar los parámetros en términos de datos digitales, representados por un perfil bidimensional a través de un software, este perfil puede ser primario o, una vez filtrado este perfil primario, por un perfil de rugosidad u ondulación para la superficie.

Existen diversos estudios realizados, en los cuales se han desarrollado software y algoritmos para esta evaluación, los más importantes son los denominados Software Estándar de Medición, realizados por Alemania (PTB, *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*), Reino Unido (NPL, *National Physical Laboratory*) y Estados Unidos (NIST, *National Institute of Standards and Technology*). Hasta la fecha son los proyectos referentes para implementación de nuevos softwares para la estimación de acabado industriales. Adicional, también vamos a repasar los últimos trabajos científicos realizados por diversos ingenieros.

3.1. SoftGauges for Surface Metrology, NPL

El trabajo que fue realizado por el Laboratorio Nacional de Física, NPL, en Reino Unido, en conjunto con el Centro de Tecnologías de Precisión en la Universidad de Huddersfield y Taylor Hobson Ltd, ha conducido al desarrollo de estándares de medición de software ('SoftGauges').

Este software es capaz de calcular parámetros de acabado superficial, tales como R_p , R_v , R_z , P_t , W_t , R_a entre otros, implementando un filtro gaussiano compatible con la ISO 11562 (1996)

SoftGauges hace dos suposiciones principales sobre el perfil para el cual se calcularán los parámetros anteriores. La primera consiste en un filtrado del perfil para eliminar la forma y los componentes más cortos que los asociados con la rugosidad. En la segunda, el perfil se digitaliza de tal manera que las posiciones de los puntos están espaciadas uniformemente a lo largo del eje X.

3.2. RPTB (Reference software for roughness measurement), PTB

RPTB es el software de referencia utilizado por el Instituto Nacional de Metrología de la República Federal de Alemania (PTB), fundado en 1887, utilizado durante más de diez años.

Este software puede ser utilizado tanto de manera interna y también como referencia para terceros ya que está ubicado en un servidor en el centro de datos del PTB. Sus módulos principales son activados mediante una interfaz web y comprende modelos de datos, vista de perfiles y un controlador del software.

Estos se relacionan, como vemos en la Imagen 3.1, a través del controlador del programa, el navegador web se comunica con éste para que envíe los programas de visualización, presentándose a través como tablas y gráficos en el equipo de cómputo del cliente. Las aplicaciones web normalmente utilizan sistemas de bases de datos como modelos, mientras que el RPTB está representado por los programas de análisis de datos.

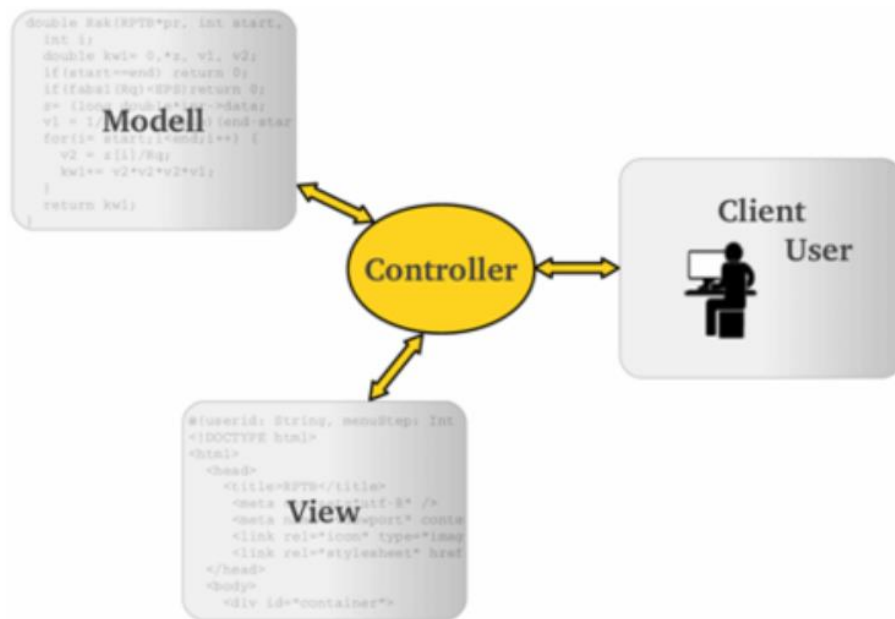


Ilustración 3.1 – Relación entre los módulos del software RPTB [9]

3.3. SMATS (Surface Metrology Algorithm Test System), NIST

El NIST, Instituto Nacional de Estándares y Tecnología fundado en 1901 en Estados Unidos, realizó un algoritmo de prueba basado en internet (SMATS), mismo que utilizaremos en la realización de este proyecto, para el estudio de acabado superficial. Lo interesante de este proyecto es que cualquiera puede tener acceso remoto al software a través de internet. Además del software, también ponen a disposición una base de datos de referencia donde encontramos perfiles de superficie sin procesar, ya filtrados y parámetros de superficies calculados.

Los cálculos de los parámetros se validaron de acuerdo a dos algoritmos realizados por el comité B46 de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos sobre la Clasificación y Designación de Calidades Superficiales y por el Laboratorio Nacional de Física del Reino Unido.

El software contiene un amplio número de herramientas designadas para la visualización y análisis de los distintos acabados superficiales, como puede ser el filtrado gaussiano, filtrado 2RC, filtrado rápido gaussiano entre otras.

Gracias a la accesibilidad de esta herramienta, cualquier persona puede validar cálculos de parámetros, implementar algoritmos, filtrados de perfiles, etc.

3.4. Últimos estudios realizados

Para la realización de este apartado realizamos el siguiente procedimiento.

Utilizamos el motor de búsqueda Google Scholar, este buscador está diseñado para revisar y encontrar todo tipo de material científico-académico.

Definimos como palabras clave “implementación”, “análisis”, “medición”, “rugosidad”, “desarrollo”, “ software” y “acabado superficial”. En base a estos parámetros ordenamos los trabajos por orden de relevancia y fue los que analizamos.

Los más destacados, con referencia al tema que estamos trabajando, son tres estudios realizados en los últimos 10 años, los cuales consisten en implementación de softwares para medición y/o evaluación de acabados industriales.

El primero y más antiguo es el realizado por el CENAM (Centro Nacional de Metrología en México) en 2008 [10]. Este proyecto se realizó con el objetivo de desarrollar un software el cual permitiera evaluar los nuevos parámetros, como Ra, Rq, Rsk, Rku, Rv, Rp y Rt para perfiles 2D y Sa, Sq, Sku, Sdq, Sdr, Sp, y Sv para perfiles 3D, requeridos en la norma ISO/TS 16610. Además, también puede hacer intercambio de datos con otros software que permitan los tipos de archivos de acuerdo a la ISO 5436-2:2000.

El segundo es el realizado por Ignacio Patricio, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Aeronáutica y del Espacio de la Universidad Politécnica de Madrid en 2013 [11]. Como su nombre indica, este estudio se realizó con la finalidad de realizar un software patrón de referencia para perfiles 2D, el cual pudiera aunar diferentes SoftGauges (Estándares de Software de Medición) tanto el del NIST como el del NPL. Como propuesta de ampliación, le quedó pendiente la expansión a perfiles tridimensionales y la optimización del mismo producto.

El último es el realizado por Francisco Vera, de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona en 2018 [12]. Este trabajo consta de base teórica para los conceptos de rugosidad, mediciones y desarrollo informático y además la implementación de un nuevo software y la comparación contra un software comercial.

Este software es capaz de trabajar perfiles en 2D y 3D y evaluar parámetros para ambas superficies.

4. IMPLEMENTACIÓN FILTRO B-SPLINE CON MATHEMATICA

El último paso a realizar antes de comenzar con los ensayos es la implementación de varios filtros descritos en la norma (Gauss y B-Spline) y un filtro B-Spline propio.

Los filtros se han implementado con el programa Mathematica, para su uso es necesario importar un perfil sin filtrado, obtenido directamente de la máquina de medición (con la función “Import”). Además, se debe introducir Δx (distancia en la cual toma el palpador una medición), el cutoff y la longitud total del perfil como podemos ver en la Imagen 4.1.

Data

```
(*Introducir perfil y datos manualmente*)

data = Import["C:\\Users\\Julian\\Desktop\\perfil1.txt", "Table", "FieldSeparators" -> {"{", "}", ",", " "};
|importa
delx = 0.0005;
cutoff = 0.8;
Lt = 5.6;
```

Ilustración 4.1 – Datos a modificar para implementación de filtro

4.1. Filtro Gaussiano con Mathematica

Primero realizamos un intento con un filtro Gaussiano realizado en Mathematica con ayuda de la función “Gaussianfilter”. Para poder calcular los perfiles de rugosidad y de ondulación, utilizaremos el siguiente código, Imagen 4.2:

Filtro Gaussiano

```
In[10]:= rGauss = Quotient[Length[data], Lt / cutoff];
|cociente |longitud

Lc = rGauss;
PerfilRugosidad = data[[All, 2]] - GaussianFilter[data[[All, 2]], rGauss];
|todo |filtro gaussiano |todo

Waviness = GaussianFilter[data[[All, 2]], rGauss];
|filtro gaussiano |todo

ListPlot[{data[[All, 2]], PerfilRugosidad, Waviness}, Joined -> True, PlotLegends -> {"Perfil total", "Rugosidad", "Ondulación"}]
|representación de lista |todo |unido |verd... |leyendas de representación
```

Ilustración 4.2 – Código para calcular rugosidad y ondulación con filtro Gaussiano

El código consiste en utilizar la función “GaussianFilter”, definiendo previamente el parámetro r a partir de la cantidad de puntos, el cutoff y la longitud de la medición. Lo aplicamos y arroja la ondulación del perfil. Para sacar únicamente el perfil de rugosidad, restaremos esta ondulación al perfil total. Una vez hecho esto, podemos calcular automáticamente los 3 perfiles (total, rugosidad y ondulación), Imagen 4.3.

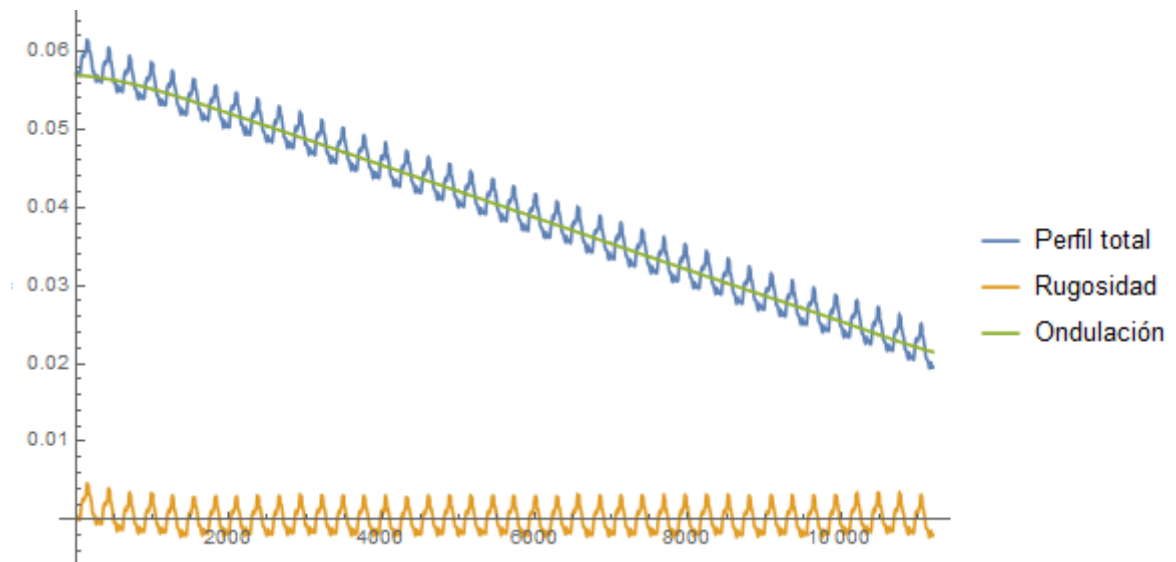


Ilustración 4.3 – Representación gráfica del perfil y sus componentes

4.2. Filtro B-Spline de acuerdo a ISO TS 16610-22:2006

El segundo filtro que implementaremos será el filtro B-Spline de acuerdo a la norma ISO TS 16610-22:2006. Como ya vimos en el apartado 2, implementaremos la Fórmula 2.14, la cual está diseñada para el filtro de perfiles no periódicos.

Para ello, nos basamos en un artículo del NCBI (Centro Nacional de Información sobre Biotecnología en E.E.U.U.) llamado “A simple and Fast Spline Filtering Algorithm for Surface Metrology” (<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4730687/>), en el cual, en el apartado 3.1 de dicho artículo, se argumenta la posibilidad de resolver la ecuación por medio de una Transformada de Fourier discreta en Coseno (DCT) como vemos en la Fórmula 4.1.

$$w = DCT^{-1}(\Gamma DCT(z))$$

(Fórmula 4.1)

Donde Γ es la matriz diagonal $(\Gamma_1, \dots, \Gamma_n)$,

$$\Gamma_i = [1 - \beta \alpha^2 \lambda_i + (1 - \beta) \lambda_i^2]^{-1}$$

$$\text{y } \lambda_i = -2 + 2 \cos\left(\frac{(i-1)\pi}{n}\right)$$

Por lo tanto, con la ayuda de esta fórmula ya somos capaces de implementar nuestro filtro de acuerdo a ISO con ayuda de Mathematica. En la Imagen 4.4 podemos ver el código utilizado para implementar el filtro B-Spline. El único código modificable para este filtro es “beta” (β), que según ISO puede variar de 0 a 1, ajustándose al perfil de menos a más. Nosotros lo dejaremos como predeterminado en 0.5.

Filtro B-Spline según ISO TS 16610-22:2006

Aplicación del filtro según las ecuaciones de la norma para perfiles no periódicos

```
x = Transpose[data][[1]];
|transposición
z = Transpose[data][[2]];
|transposición
n = Length[z];
|longitud
alpha = 1 / (2 * Sin[Pi * delx / cutoff]);
|senc |número pi
beta = 0.5;

gam = SparseArray[{k_ -> 1 / (1 - beta * alpha^2 * (-2 + 2 * Cos[(k - 1) * Pi / n]) + (1 - beta) * alpha^4 * (-2 + 2 * Cos[(k - 1) * Pi / n]^2)), {n, n}}];
|array disperso |coseno |número pi |coseno |número pi
w = FourierDCT[gam.FourierDCT[z, 1], 1];
|transformada de F... |transformada de Fourier discreta en coseno

OndulacionISO = Flatten[w];
|aplana
PerfilRugosidadISO = Flatten[z - w];
|aplana
ListPlot[{data[[All, 2]], PerfilRugosidadISO, OndulacionISO}, Joined -> True, PlotLegends -> {"Perfil total", "Rugosidad", "Ondulación"}]
|representación de lista |todo |unido |verd... |leyendas de representación
ListPlot[{PerfilRugosidadBS[[Lc ;; -Lc]], PerfilRugosidadBS[[Lc ;; -Lc]], PerfilRugosidadISO[[Lc ;; -Lc]]}, Joined -> True,
|representación de lista |unido |verdadero
PlotLegends -> {"Gaussiano", "B-Spline Mathematica", "B-Spline ISO"}]
|leyendas de representación
```

Ilustración 4.4 – Código usado en Mathematica para implementar filtro Spline de acuerdo a ISO

Al igual que en el caso anterior, graficamos el conjunto de puntos filtrado y podemos observar su perfil de ondulación y rugosidad en la Imagen 4.5.

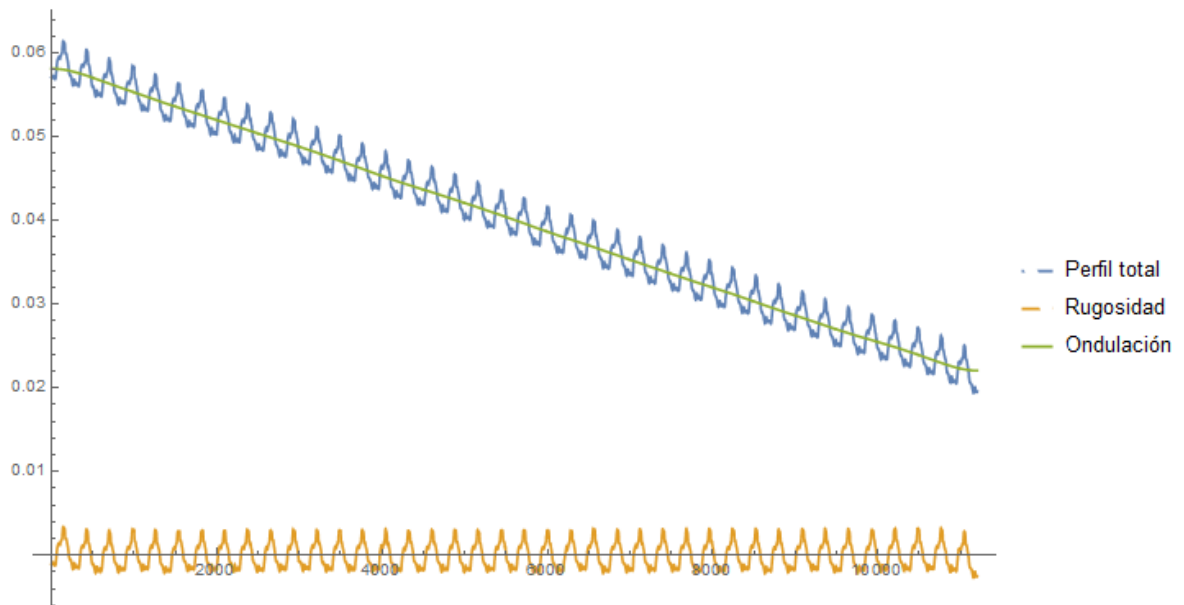


Ilustración 4.5 – Representación gráfica de perfil y sus componentes con un filtro B-Spline de acuerdo a ISO

4.3. Filtro B-Spline propio con función “BSplineFunction”

Ya que tenemos creado el filtro Gaussiano y el filtro B-Spline de acuerdo a ISO, el siguiente paso a realizar es el filtro B-Spline propio. La idea consiste en considerar el perfil sin filtrar con una curva que puede ser ajustada por un spline de polinomios (en concreto por un B-Spline). En el caso de ajustar por un número de puntos de control del B-Spline igual a todos los puntos del perfil tendremos una interpolación, pero en el caso de ajustar con un número inferior, la curva resultante es la original filtrada.

La función de Mathematica “BSplineFunction” se ajusta por mínimos cuadrados para obtener el filtro mencionado. Para el ajuste, utilizaremos las 3 funciones definidas en la Imagen 4.6. Las dos primeras funciones, “uparam” (parametrización uniforme) y “kfun” (función para generar grupos cerrados), nos sirven para poder definir la matriz base para mínimos cuadrados, función “mbasis”, la cual necesitamos para ajustar los puntos antes de aplicar el filtro B-Spline

```

uparam[pts_] := N[Range[0, 1, 1 / (Length[pts] - 1)]];
kfun[n_, d_] := Join[ConstantArray[0, d], Range[0, 1, 1 / (n - d)], ConstantArray[1, d]];
mbasis[pts_, n_, d_] := With[{param = uparam[pts]}, Table[BSplineBasis[{d, kfun[n, d]}, j - 1, param[[i]]], {i, Length[param]}, {j, n}]];

```

Ilustración 4.6 – Códigos de ajuste para filtro B-Spline

Una vez calculado, procedemos a la aplicación del filtro B-Spline para ello vamos a necesitar definir dos parámetros, el primero es el número de puntos de control, éste parametro se ha fijado en 12 en los ejemplos realizados porque proporciona un resultado adecuado. El número de puntos de control determina el grado de filtrado de esta solución (si se reduce podemos conseguir filtrar más el perfil)

El segundo es el grado de la curva Spline, éste lo dejaremos fijado en 3. Cuanto más lo aumentemos más conseguiremos filtrar el perfil.

Una vez tengamos estos dos parámetros definidos, con ayuda de la función “BSplineFunction”, podemos aplicar el filtro como se indica en la Imagen 4.7:

```

NumeroPuntosControl = 12;
GradoSpline = 3;
ctrlpts = LeastSquares[mbasis[data[[All, 2]], NumeroPuntosControl, GradoSpline], data[[All, 2]]];
fc = BSplineFunction[ctrlpts, SplineDegree -> 3];
pts = (data[[All, 1]] - data[[1, 1]]) / (data[[-1, 1]] - data[[1, 1]]);
WavinessBS = Table[fc[u], {u, 0, 1, pts[[3]] - pts[[2]]}];
PerfilRugosidadBS = data[[All, 2]] - WavinessBS;

```

Ilustración 4.7 – Código para calcular rugosidad y ondulación de acuerdo a filtro B-Spline

Igual que en los dos anteriores, al aplicarle el filtro al perfil obtendremos la ondulación, misma que tendremos que restar al perfil total para obtener la rugosidad. Finalmente, utilizando el comando “ListPlot”, podremos visualizar los 3 perfiles: total, ondulación y rugosidad en la Imagen 4.8.

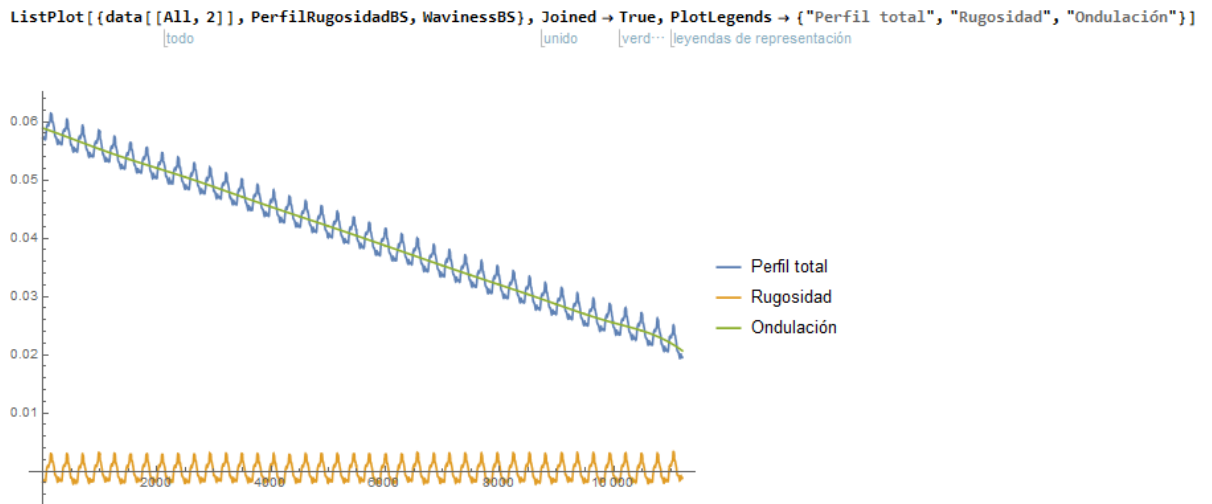


Ilustración 4.8 – Representación gráfica de perfil y sus componentes con un filtro B-Spline

Acto seguido, representaremos las dos gráficas del perfil de rugosidad de los filtros Gaussiano y B-Spline con funciones de Mathematica. Visualmente no se aprecian grandes diferencias entre ambos, como vemos en la imagen 4.9.

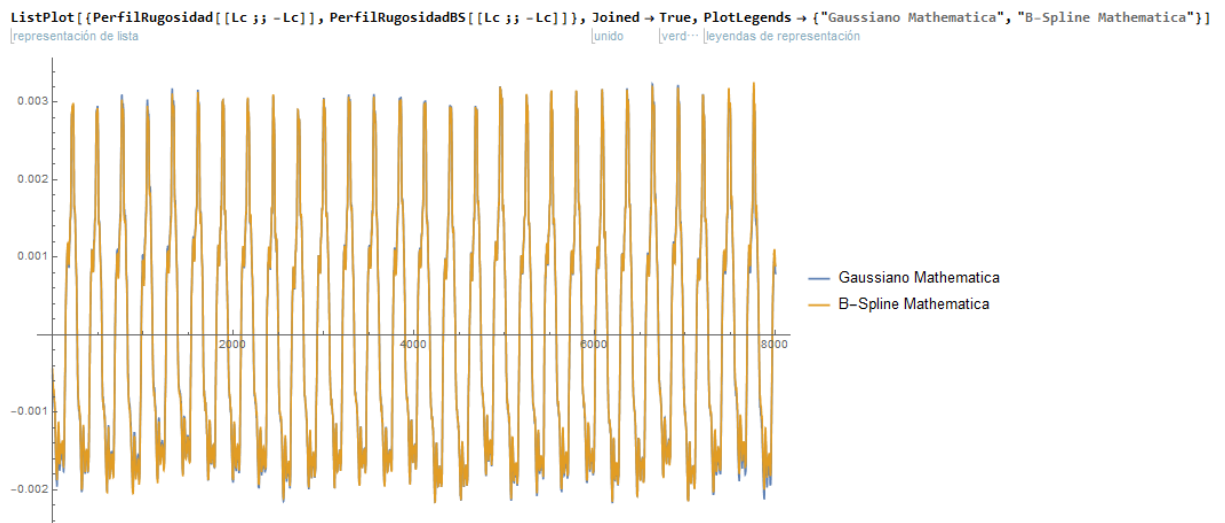


Ilustración 4.9 – Comparación entre filtro Gaussiano y B-Spline

El último paso es superponer los 3 perfiles de rugosidad obtenidos con los distintos filtros, como vemos en la Imagen 4.10. Al igual que en la anterior comparación, podemos ver que no existen grandes variaciones entre ellos.

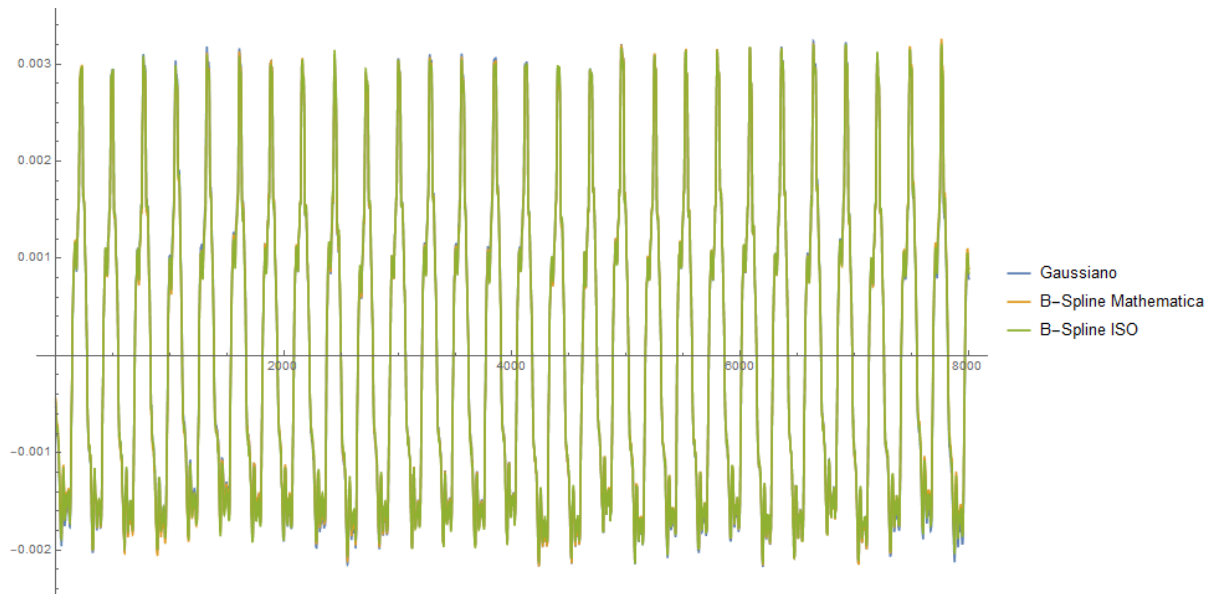


Ilustración 4.10 – Comparativa entre los 3 tipos de filtros que se van a implementar

4.4. Cálculo de parámetros Ra, Rq y Rz

De los 3 componentes graficados, solo utilizaremos el de rugosidad, ya que es el que necesitamos utilizar para calcular los parámetros Ra, Rq y Rz. Por lo tanto, el último paso será, precisamente, calcular estos 3 parámetros y aplicarlos para los diferentes perfiles rugosidad.

En base a la norma ISO 4287 y como ya vimos en la Fórmula 1.2, calcularemos la rugosidad media aritmética, Ra, con ayuda del siguiente código que vemos en la Imagen 4.11:

```
(*Cálculo de Ra*)
Ra = (c = BSplineFunction[perfiltest /. {ac -> #[[1]], bc -> #[[2]]}, SplineDegree -> 3];
      [función b-spline] [grado de spline]
      Quiet[[silencioso] (1/cutoff) NIntegrate[Abs[c[[integrando] x - data[[#[[1]], 1]]] / [valor absoluto] data[[#[[2]], 1]] - data[[#[[1]], 1]]], {x, data[[#[[1]], 1]], data[[#[[2]], 1]]}]] 1000) & /@ Table[{i Lc, (i + 1) Lc}, {i, 1, CN, 1}];
      [tabla]
Ra = Total[Ra] / CN;
      [total]
```

Ilustración 4.11 – Código para calcular Ra en Mathematica

Para calcular la rugosidad media cuadrática, nos basamos en la Fórmula 1.3 y la aplicaremos en Mathematica con el siguiente código que observamos en la Imagen

4.12:

```
(*Cálculo de Rq*)
Rq = 
$$\sqrt{\text{Quiet}\left[\left(\frac{1}{\text{cutoff}}\right) \text{NIntegrate}\left[c \left[\frac{x - \text{data}[\{\#[[1]], 1\}]}{\text{data}[\{\#[[2]], 1\}] - \text{data}[\{\#[[1]], 1\}]}\right]^2, \{x, \text{data}[\{\#[[1]], 1\}], \text{data}[\{\#[[2]], 1\}]\right] 1000\right] \& / \text{Table}[\{i \text{ Lc}, (i + 1) \text{ Lc}\}, \{i, 1, \text{CN}, 1\}];}$$

Rq = Total[Rq] / CN;
```

Ilustración 4.12 – Código para calcular Rq en Mathematica

Una vez tenemos calculado Ra y Rq, solo nos queda calcular la rugosidad media Rz de acuerdo a ISO con ayuda de la Fórmula 1.5. El código para calcular este último parámetro lo podemos ver en la Imagen 4.13:

```
(*Cálculo de Rz*)
Rp = Max[perfiltest /. {ac -> #[[1]], bc -> #[[2]]} 1000 & /@ Table[{i Lc, (i + 1) Lc}, {i, 1, CN, 1}];
Rp = Total[Rp] / CN;
Rv = Min[perfiltest /. {ac -> #[[1]], bc -> #[[2]]} 1000 & /@ Table[{i Lc, (i + 1) Lc}, {i, 1, CN, 1}];
Rv = Abs[Total[Rv] / CN];
Rz = Rp + Rv;
```

Ilustración 4.13 – Código para calcular Rz en Mathematica

Ahora que ya tenemos todos los códigos para los filtros para poder calcular los distintos valores de rugosidad de nuestros perfiles podemos pasar a realizar los ensayos para obtener el perfil, aplicarle los distintos filtros y evaluarlo.

5. ENSAYOS

Una vez vistos los diferentes tipos de filtro, el filtro B-Spline propio ya realizado y conceptos necesarios ya conocidos podemos comenzar a ver cuál va a ser la metodología que vamos a llevar a cabo para este proyecto.

Un objetivo de este proyecto es proponer un filtro propio viable, describir cómo se pueden implementar, como se pueden implementar otros filtros descritos por las normas, y compararlos entre sí y con patrones software. Para este ha sido necesario implementar los filtros descritos en la Sección 4, así como desarrollar funciones Mathematica para determinar parámetros de rugosidad (Ra, Rq y Rz), que permitan

compararlos y aprender a emplear patrones software como se describe en la Sección 5.2.

En primer lugar obtendremos las mediciones del perfil y evaluaremos el perfil de rugosidad con el filtro propio de la máquina utilizada para la evaluación

5.1. Obtención de las mediciones

Para la obtención de las superficies y debido a las tolerancias que vamos a estar midiendo, se utiliza una máquina de medición Mahr Surf XCR 20 (Imagen 5.1) , ya que esta máquina es capaz de tomar tanto contornos como perfiles y su precisión es de $0,001\text{ }\mu\text{m}$, por lo tanto, no tendremos ningún problema para asegurarnos de que la medición está siendo efectiva.



Ilustración 5.1 – Mahr Surf XCR 20

Para poder tener un espectro más amplio y poder tener un análisis de resultados más amplio, se eligen cuatro piezas con diferentes acabado superficiales y, a su vez, diferentes tolerancias, que van a ir desde $2.5\text{ }\mu\text{m}$ a $25\text{ }\mu\text{m}$.

Para la elección del radio de palpador, puesto que en las 4 mediciones tenemos un cutoff conocido, vamos a utilizar la Tabla 2.2. Teniendo en cuenta que la tolerancia más pequeña a controlar es de $2.5\text{ }\mu\text{m}$, el cutoff apropiado es de 0.8 mm y, por ende, el diámetro de nuestro palpador será de $4\text{ }\mu\text{m}$.

5.1.1. Primera medición

Para cada medición, el procedimiento va a ser similar, primero tomamos la pieza y en base a su tolerancia vamos a definir un cutoff.

Esta primera pieza cuenta con un acabado superficial producido con un proceso de mandrinado común, por lo que, como vemos en su dibujo, Imagen 5.2, la tolerancia máxima permitida para el R_z es de $10\text{ }\mu\text{m}$. En base a la Tabla 2.1 del apartado 2.1, vamos a definir un cutoff de 0.8 mm y una longitud de evaluación de 4 mm . También para eliminar ruidos de inicio y final de trayecto, se toma una longitud total de 5.6 mm pero para efectos de evaluación la máquina sólo tomará la longitud de 4 mm mencionada anteriormente.

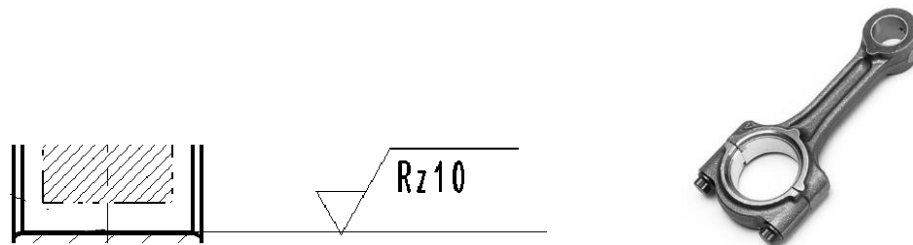


Ilustración 5.2 – Tolerancia y pieza de la primera medición

En cuanto a la velocidad de palpado y los puntos de palpado, dejaremos los parámetros predeterminados de la máquina de $0,50\text{ mm/s}$ y el rango de medición en $\pm 500\text{ }\mu\text{m}$ para todas las piezas.

Lt:	5.60 mm
Ls:	2.50 μm
VB:	$\pm 500.0\text{ }\mu\text{m}$
Vt:	0.50 mm/s
Puntos:	11200

Ilustración 5.3 – Parámetros usados para medición del primer perfil

Una vez terminada la medición, obtenemos el perfil en bruto, es decir, todos sus componentes están superpuestos (Imagen 5.3). Ya que en este proyecto, se busca obtener sólo resultados de rugosidad procedemos a utilizar un filtro de Gauss al 50% en la misma máquina para obtener tanto R_a , R_q como R_z con el algoritmo que

tiene instalado la máquina Mahr (Imagen 5.4). Utilizaremos el mismo algoritmo para todas las piezas.

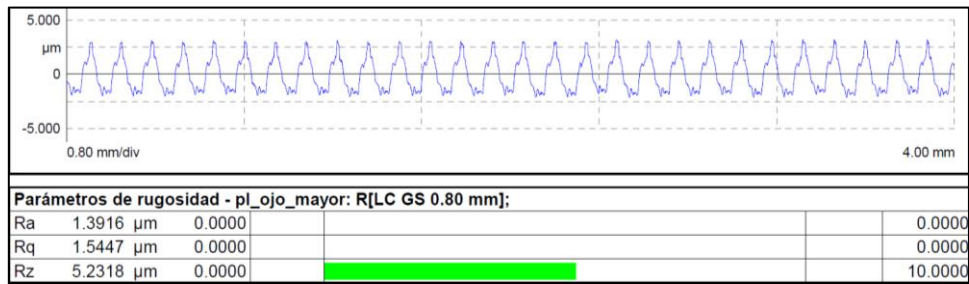
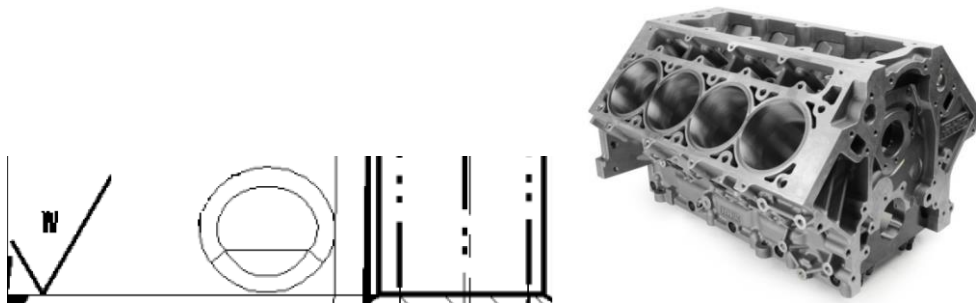


Ilustración 5.4 – Reporte de medición de Mahr Surf

5.1.2. Segunda medición

Para esta segunda medición, contamos con una pieza que tiene un acabado superficial producido por un rectificado cilíndrico. Su tolerancia máxima permitida para Rz es w que, de acuerdo a la Imagen 5.5 (tabla del dibujo), corresponde a 10 μm . Igual que para la primera pieza nos basamos en la Tabla 2.1 del apartado 2.1, procedemos a definir, de nuevo, un cutoff de 0.8 mm y una longitud de evaluación de 4 mm con una longitud total de 5.6 mm para eliminar ruidos.



Haupt-reihe	Neben-reihe	Rauhtiefe		Ober-fläche
Reihe 2		R _z in μm	R _a in μm	
s		reh		~
t		√ R _z 100	12,5/	▽
	u	√ R _z 40	6,3/	▽▽
v		√ R _z 25	3,2/	▽▽
	w	√ R _z 10	1,6/	▽▽

Ilustración 5.5 – Segunda pieza para medición con tabla de tolerancia

En la Imagen 5.6, podemos ver los resultados de Ra, Rq y Rz para esta nueva medición con el filtro de Gauss al 50%.

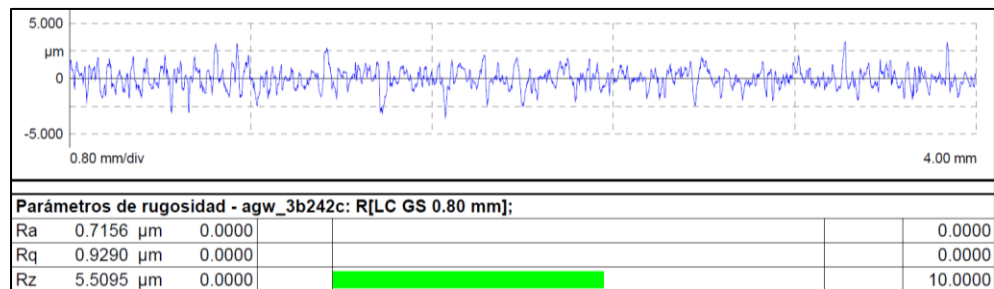


Ilustración 5.6 – Reporte de medición para segundo perfil

5.1.3. Tercera medición

En esta tercera medición, la pieza a evaluar tiene un acabado superficial que se origina por un lapeado, en este mecanizado se utiliza un grano abrasivo muy fino para frotar dos superficies dejando una gran condición de acabado superficial. Es por eso que su tolerancia máxima permitida para Rz es de 2.5 μm , como aparece en la Imagen 5.7. Volvemos a tomar en cuenta la Tabla 2.1 del apartado 2.1, con la cual podemos definir un cutoff de 0.8 mm y una longitud de evaluación de 4 mm, ya que está por encima de 0.5 μm la tolerancia de Rz, con una longitud total de 5.6 mm para eliminar ruidos.



Ilustración 5.7 – Tolerancia y pieza para el tercer perfil

En la Imagen 5.8 podemos ver los resultados de Ra, Rq y Rz para esta nueva medición con el filtro de Gauss al 50%.

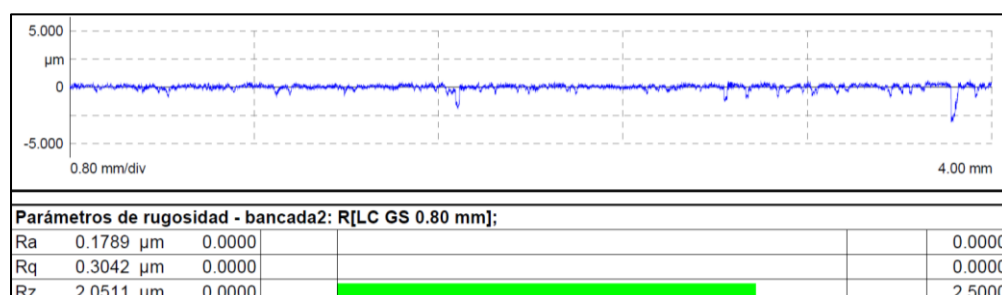


Ilustración 5.8 – Tercer reporte de medición según Mahr Surf**5.1.4. Cuarta medición**

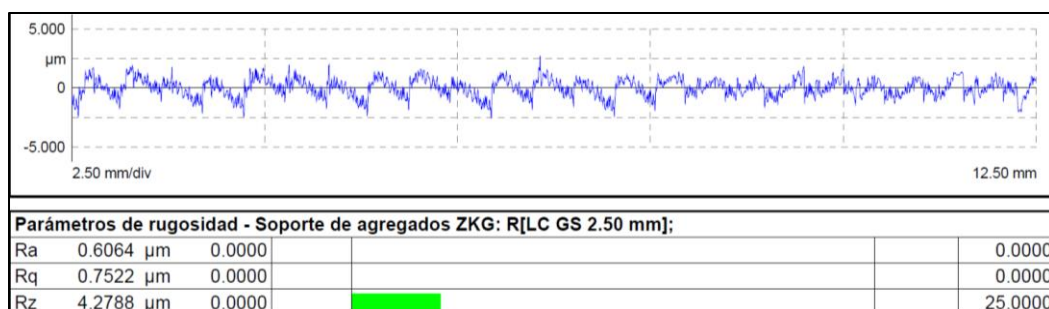
Para terminar con las mediciones, esta última pieza tiene un acabado superficial producido por un fresado común, es por eso que su tolerancia máxima permitida para R_z es v , que, de acuerdo a la tabla 5.1, es de $25\ \mu\text{m}$, como vemos en la imagen 5.9. Volvemos a hacer referencia a la Tabla 2.1 del apartado 2.1, y en base a esta tolerancia de R_z , el cutoff a elegir es de $2.5\ \text{mm}$ y, por lo tanto, la longitud de evaluación será de $12.5\ \text{mm}$ con una longitud total de $17.5\ \text{mm}$ (imagen 5.10) para contemplar un cutoff más tanto al principio como al final para eliminar cualquier tipo de ruido o vibración

**Ilustración 5.9 – Tolerancia y pieza para la cuarta medición**

Lt:	17.50 mm
Ls:	8.00 μm
VB:	+/-500.0 μm
Vt:	0.50 mm/s
Puntos:	11666

Ilustración 5.10 – Parámetros utilizados para medición del cuarto perfil

En la Imagen 5.11 podemos ver los resultados de R_a , R_q y R_z para esta última medición con el filtro de Gauss al 50%.

**Ilustración 5.11 – Cuarto reporte de medición según Mahr Surf**

5.2. Desarrollo de perfiles en software NIST

Una vez obtenidos los resultados en la máquina Mahr, el siguiente paso en nuestro método es obtener el perfil total como archivo .txt y pasarlo a formato especial ASCII para poder introducirlo en el software especial para evaluación de superficies en la página del NIST (National Institute of Standards and Technology): <https://physics.nist.gov/VSC/jsp/index.jsp>

Esta página permite usar su algoritmo para comparar y asegurar que el algoritmo que hemos usado previamente en la máquina Mahr para tomar valores de rugosidad efectivamente si compara, para que funcione el algoritmo del NIST hay que introducir datos que la persona previamente haya tomado con un equipo de medición sin filtrar.

Dado que sólo vamos a analizar perfiles en 2D, utilizaremos únicamente la herramienta 2D Analysis Tools como se muestra en la Imagen 5.12:

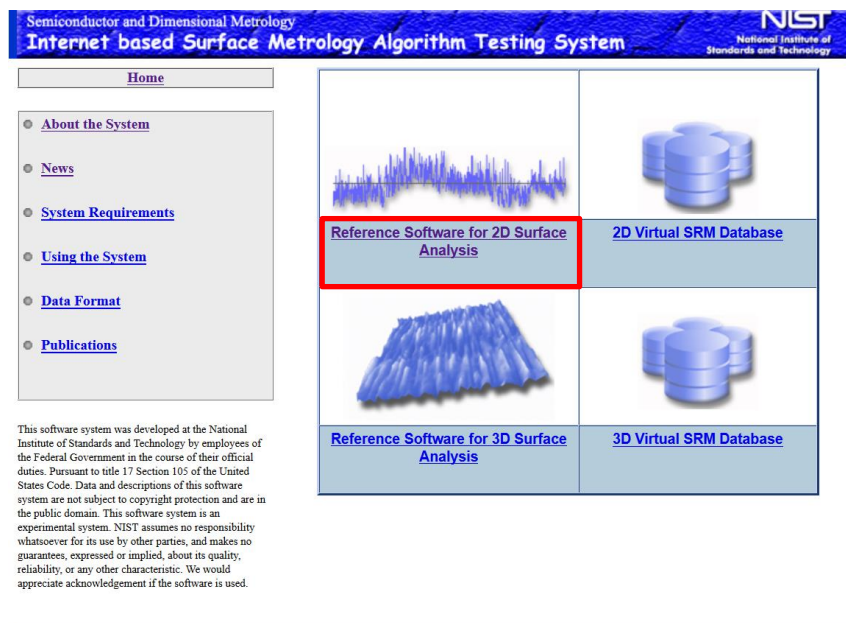


Ilustración 5.12 – Elección del apartado para cálculo de parámetros en NIST [13]

Esta página nos permite utilizar diferentes tipos de filtros como vemos en la imágenes, para ello nos vamos a la pestaña filter/surface parameters:

- Para el filtro gaussiano, tiene 3 formas diferentes de calcularlo:

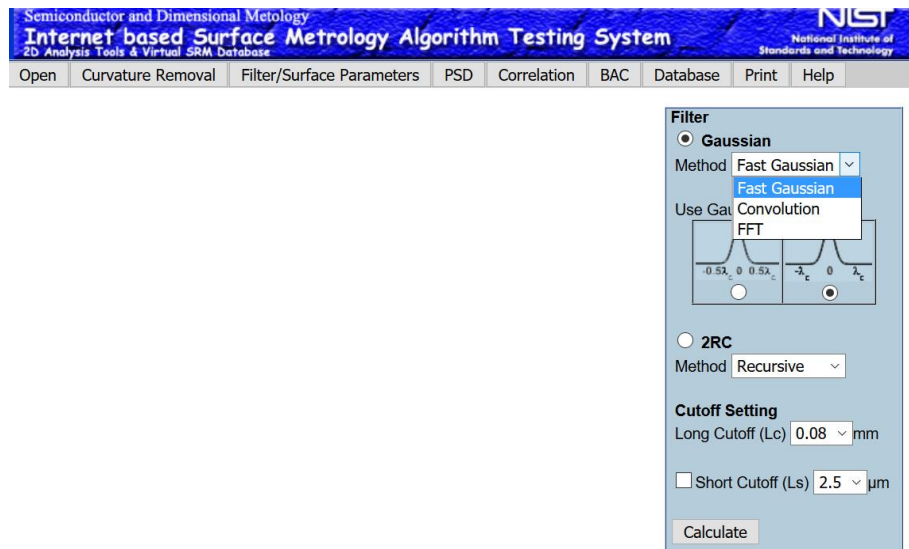


Ilustración 5.13 – 3 métodos de filtrado Gaussiano según NIST [13]

Por Fast Gaussian (Gaussiano rápido), Convolution (Convolución) y FFT (Transformada rápida de Fourier). Además marcaremos la ventana Gaussiana de $-\lambda_c$ a λ_c .

Para el filtro 2RC existen dos formas de cálculo, Recursive (Método recursivo) y Convolution (Convolución), como vemos en la Imagen 5.14:

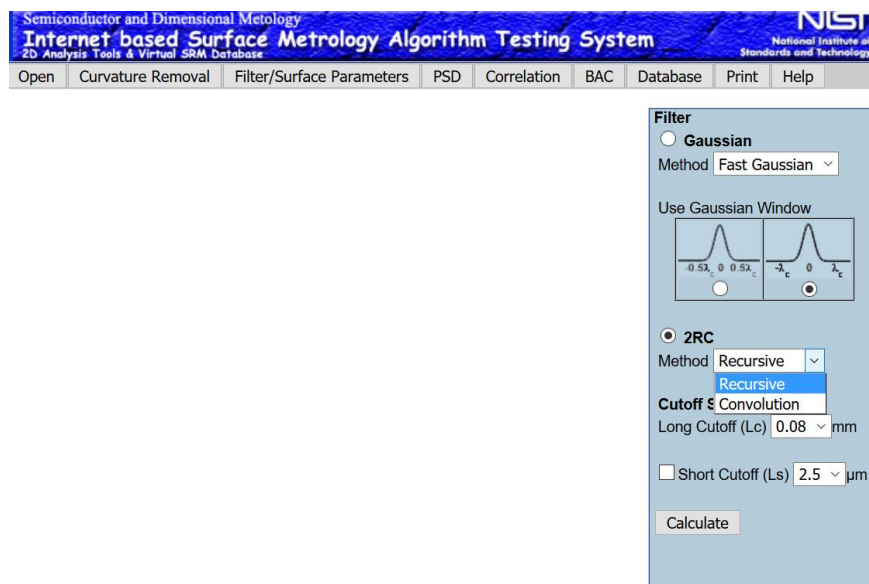


Ilustración 5.14 – 2 métodos de filtrado 2RC según NIST [13]

El desarrollo de los cuatro perfiles va a ser el siguiente:

1. Seleccionamos “Open” y abrimos el archivo del perfil, quedando en la pantalla el perfil en bruto.

- Una vez esto realizado procederemos a aplicarlos los 5 métodos diferentes de filtrado y plasmaremos sus valores. Para estos valores seleccionaremos en la pestaña “Filter/Surface Parameters” y en el apartado “Surface Parameters”, elegimos cálculo basado en ISO 4287 y Ra, Rq y Rz. Los demás valores los dejaremos como predeterminados

Surface Parameters

Calculation is based on:

☐ the evaluation length (ASME B46)

☒ all sampling length(s) (ISO 4287)

☒ Ra ☒ Rq ☐ Rp

☐ Rv ☐ Rt ☒ Rz

☐ Rsk ☐ Rku ☐ Rdq

☐ RSm* ☐ Rc ☐ Rk Family

Height Discrimination % Rz

Spacing Discrimination % sampling length

☐ Calculate Uncertainty

Uz % Pq

Ux % spacing

Ilustración 5.15 – Elección de parámetros de superficie en software NIST [13]

- Los demás valores se dejarán como predeterminados para no influir en el perfil a evaluar.
- Se hará una tabla para cada uno de los perfiles con los distintos valores de Ra, Rq y Rz.

5.2.1. Desarrollo del primer perfil

Como mencionado en el proceso a seguir, abrimos el perfil en bruto en la página del NIST, como vemos en la Imagen 5.16. Se puede observar una inclinación en el perfil, esto es producido ya que a la hora de apoyar la pieza queda con un ligero desposicionamiento que los filtros son capaces de eliminar, como veremos en las mediciones.

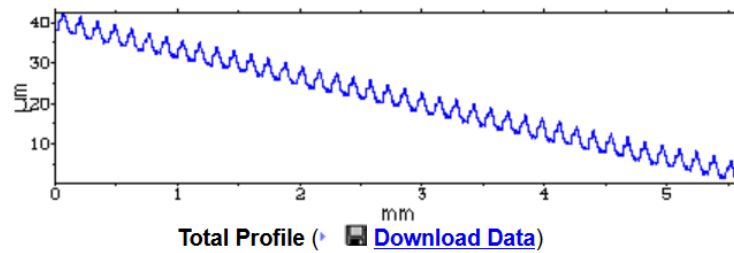


Ilustración 5.16 – Primer perfil en software NIST [13]

Procedemos a seleccionar los distintos filtros y aplicamos un cutoff de 0.8 mm porque la tolerancia que queremos controlar es un R_z de 10 μm con todos los filtros.

- Filtro Gaussiano - método gaussiano rápido

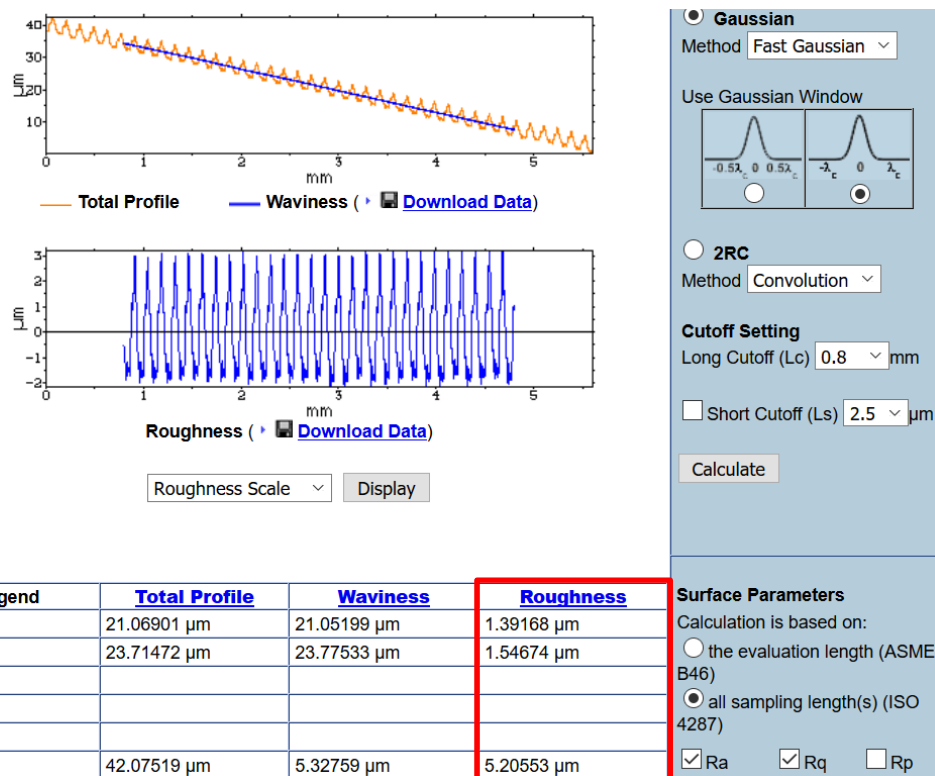


Ilustración 5.17 – Parámetros obtenidos con filtro Gaussiano (método rápido) para primer perfil [13]

- Filtro Gaussiano - método de convolución

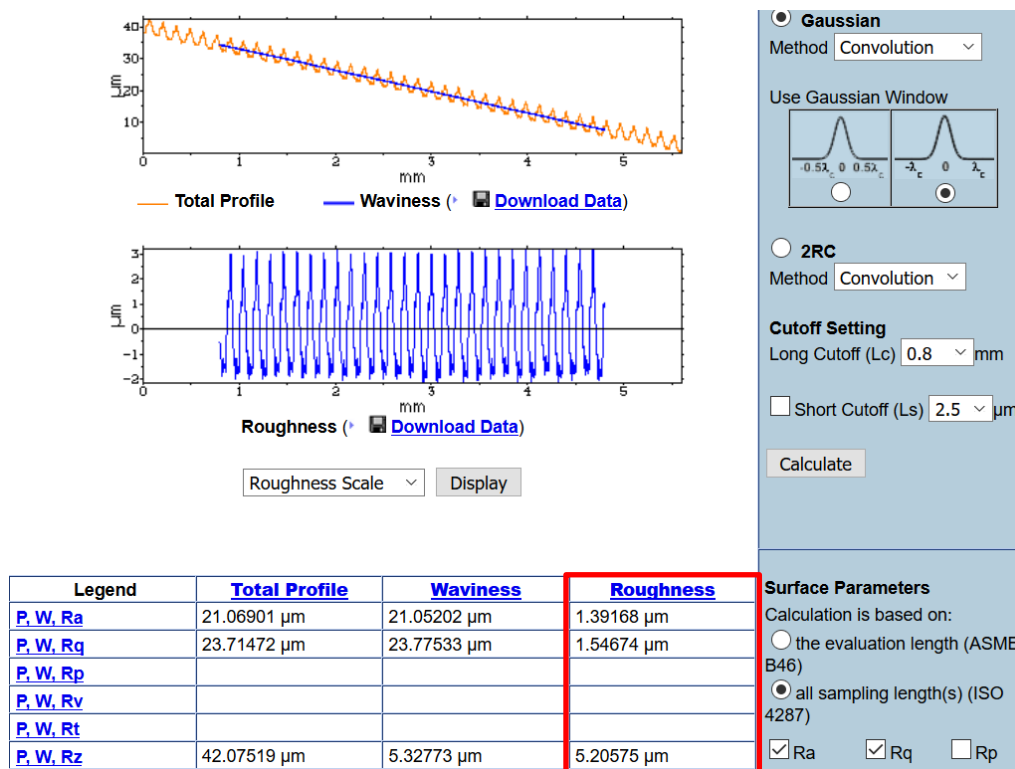


Ilustración 5.18 – Parámetros obtenidos con filtro Gaussiano (convolución) para primer perfil [13]

- Filtro Gaussiano - método de transformada rápida de Fourier

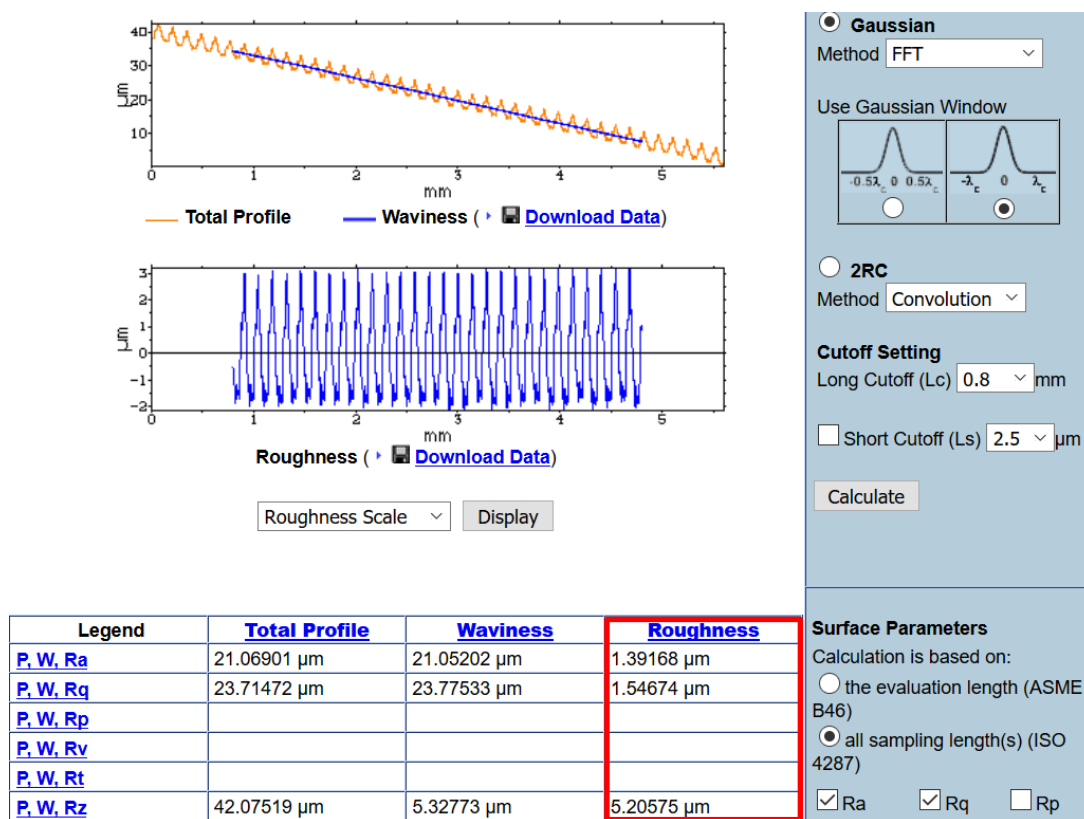


Ilustración 5.19 – Parámetros obtenidos con filtro Gaussiano (transformada de Fourier) para primer perfil [13]

- Filtro 2RC - método recursivo

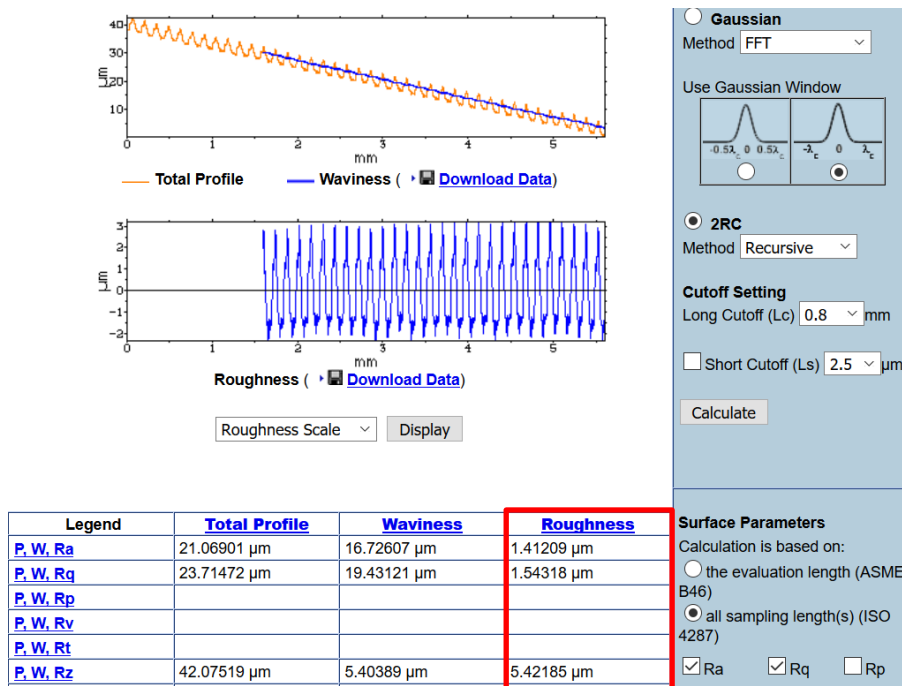


Ilustración 5.20 – Parámetros obtenidos con filtro 2RC (recursivo) para primer perfil [13]

- Filtro 2RC - método convolución

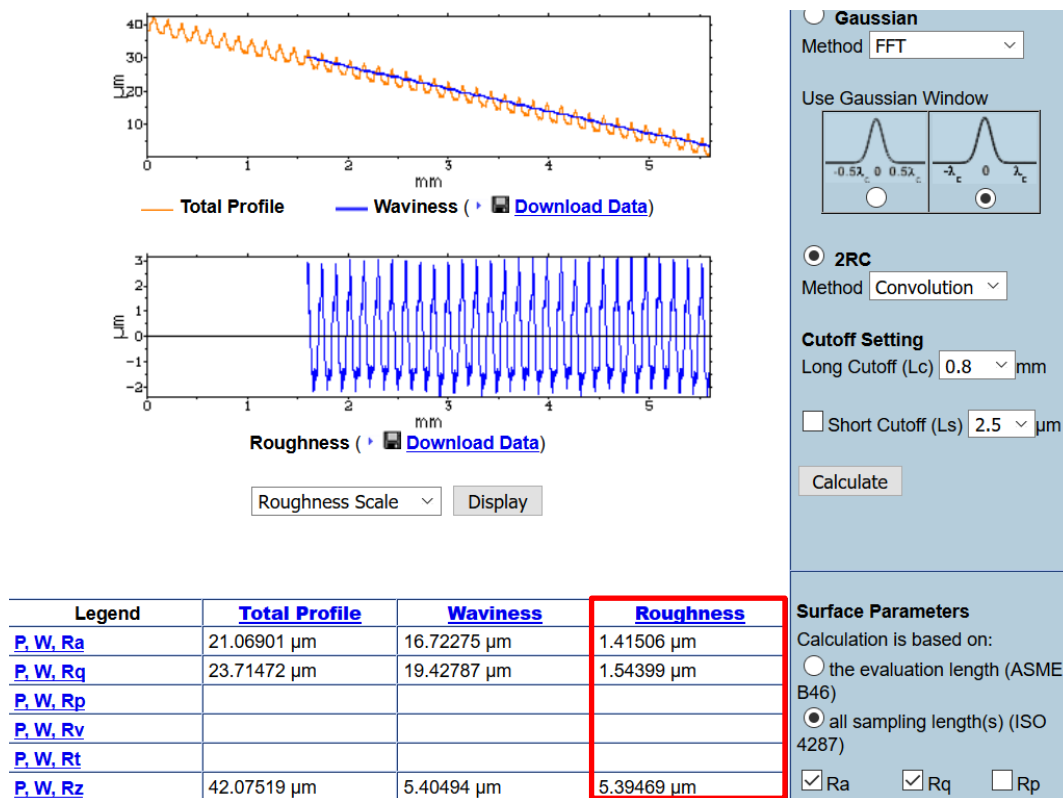


Ilustración 5.21 – Parámetros obtenidos con filtro 2RC (convolución) para primer perfil [13]

A continuación, se muestra la Tabla 5.1 con todos los resultados obtenidos para este perfil.

Resultados obtenidos para la primera pieza evaluada				
	Tipo filtro	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Mahr XCR 20	Gaussian filter	1.39160	1.54470	5.23180
Gaussian	Fast gaussian	1.39168	1.54674	5.20553
	Convolution	1.39168	1.54674	5.20575
	FFT	1.39168	1.54674	5.20575
2RC	Recursive	1.41209	1.54318	5.42185
	Convolution	1.41506	1.54399	5.39469

Tabla 5.1 – Resultados obtenidos con los distintos tipos filtros NIST para la 1ª pieza

5.2.2. Desarrollo del segundo perfil

Volvemos a repetir el proceso para este segundo perfil, así que abrimos el perfil otal, como se muestra en la Imagen 5.22:

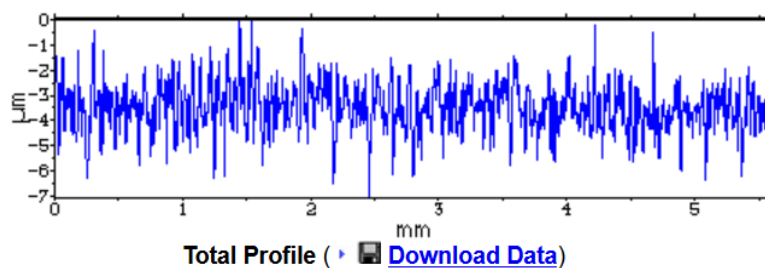


Ilustración 5.22 – Segundo perfil en software NIST [13]

Procedemos a seleccionar los distintos filtros y aplicaremos para todos los mismos parámetros a calcular. Ya que la tolerancia Rz a controlar es 10 μm utilizamos un cutoff de 0.8 mm en todos los filtros.

- Filtro Gaussiano - método gaussiano rápido



Ilustración 5.23 – Parámetros obtenidos con Gaussiano (método rápido) para segundo perfil [13]

- Filtro Gaussiano - método de convolución



Ilustración 5.24 – Parámetros obtenidos con Gaussiano (convolución) para segundo perfil [13]

- Filtro Gaussiano - método de transformada rápida de Fourier

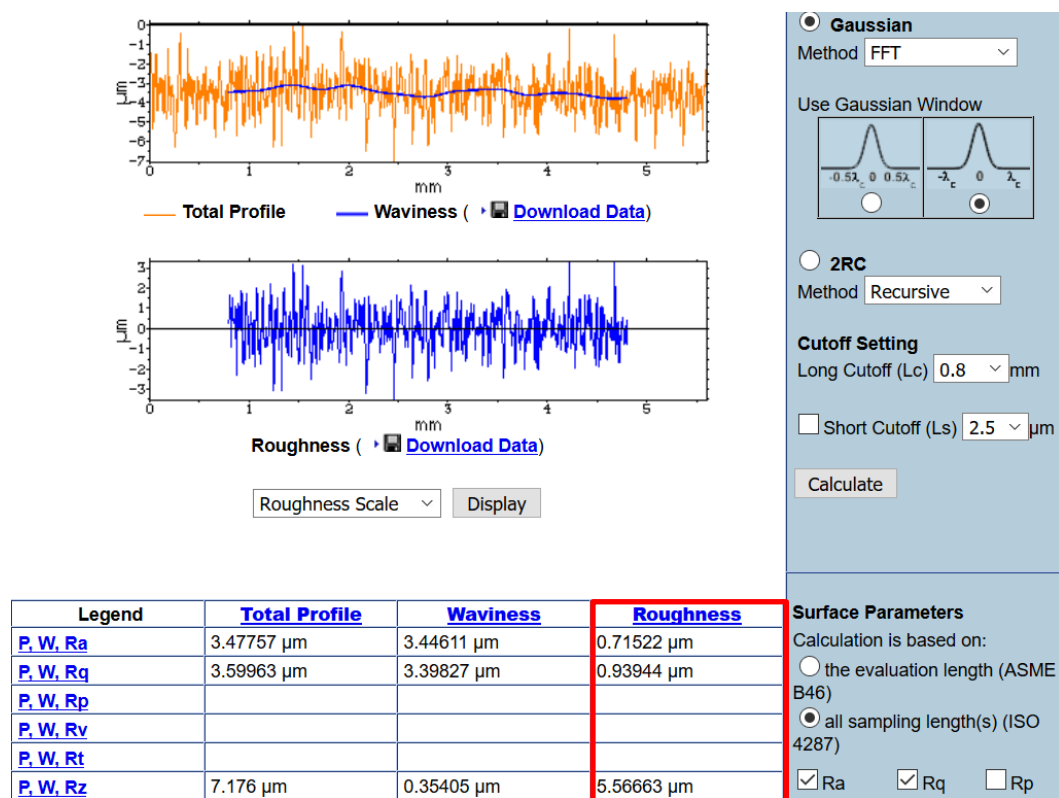


Ilustración 5.25 – Parámetros obtenidos con Gaussiano(transformada de Fourier) para segundo perfil [13]

- Filtro 2RC - método recursivo

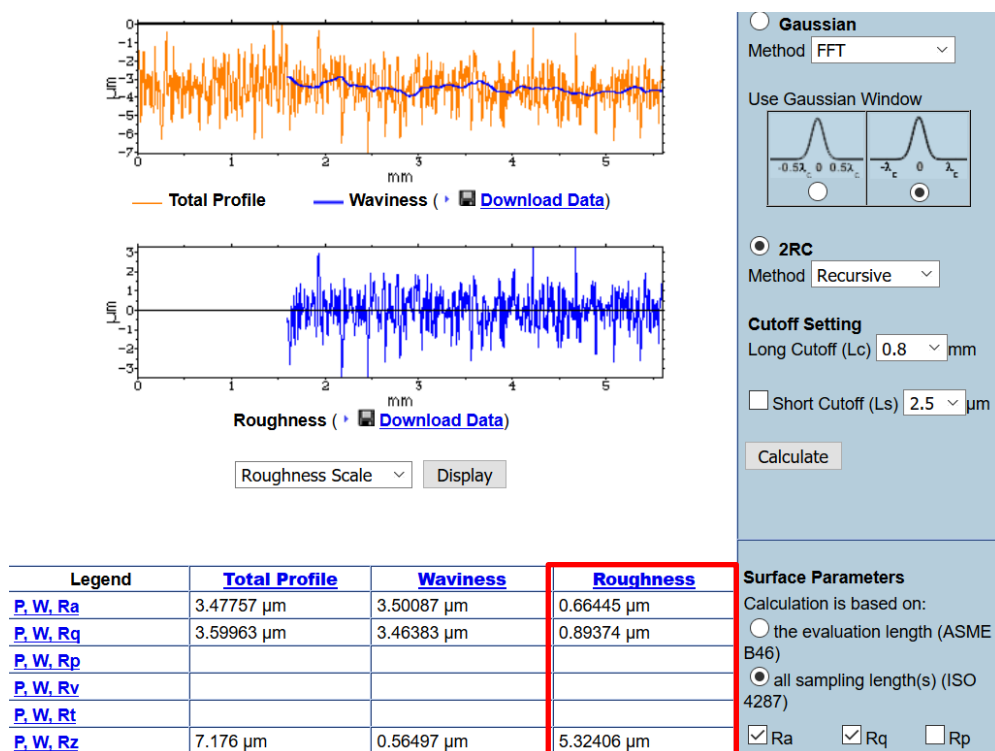


Ilustración 5.26 – Parámetros obtenidos con filtro 2RC (recursivo) para segundo perfil [13]

- Filtro 2RC - método convolución

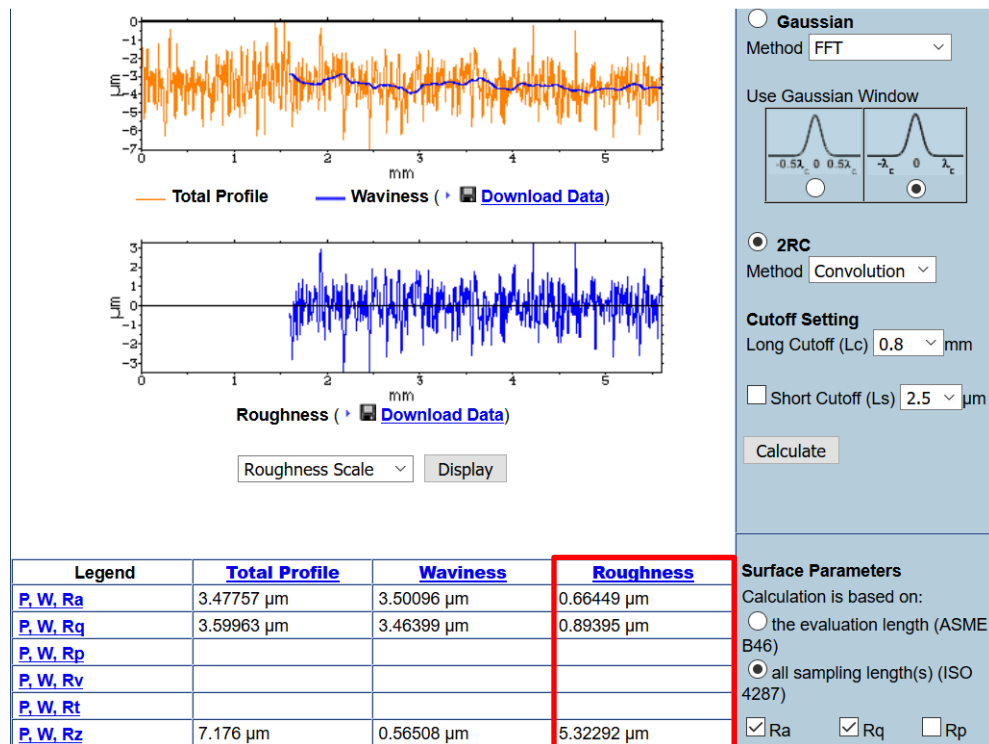


Ilustración 5.27 – Parámetros obtenidos con filtro 2RC (convolución) para segundo perfil [13]

A continuación, se muestra la Tabla 5.2 con todos los resultados obtenidos para este perfil.

Resultados obtenidos para la segunda pieza evaluada				
Tipo filtro		Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Mahr XCR 20 Gaussian filter		0.71560	0.92900	5.50950
Gaussian	Fast gaussian	0.71541	0.93944	5.56855
	Convolution	0.71522	0.93944	5.56663
	FFT	0.71522	0.93944	5.56663
2RC	Recursive	0.66445	0.89374	5.32406
	Convolution	0.66449	0.89395	5.32292

Tabla 5.2 – Resultados obtenidos con los distintos tipos filtros NIST para la 2ª pieza

5.2.3. Desarrollo del tercer perfil

De nuevo, repetimos el proceso para este tercer perfil. Abrimos el perfil total, como se muestra en la Imagen 5.28:

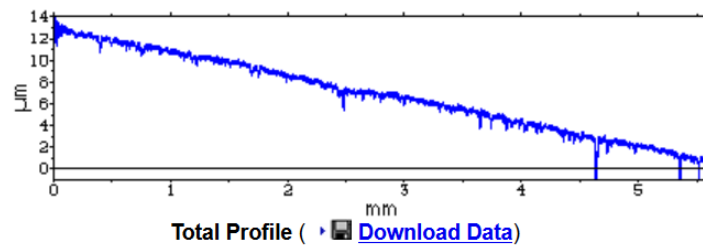


Ilustración 5.28 – Tercer perfil en software NIST [13]

Procedemos a seleccionar los distintos filtros y aplicaremos para todos los mismos parámetros a calcular aunque la tolerancia Rz a controlar es de 2,5 μm está dentro del mismo cutoff (0,8 mm) en todos los filtros.

- Filtro Gaussiano - método gaussiano rápido

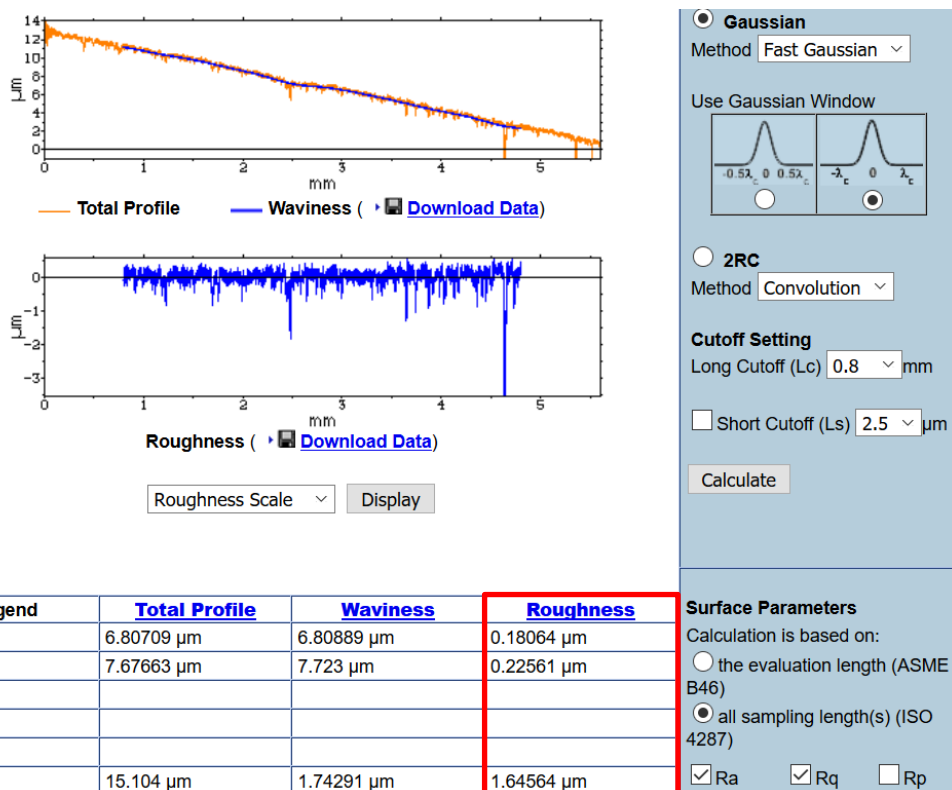


Ilustración 5.29 – Parámetros obtenidos con Gaussiano (método rápido) para tercer perfil [13]

- Filtro Gaussiano - método de convolución

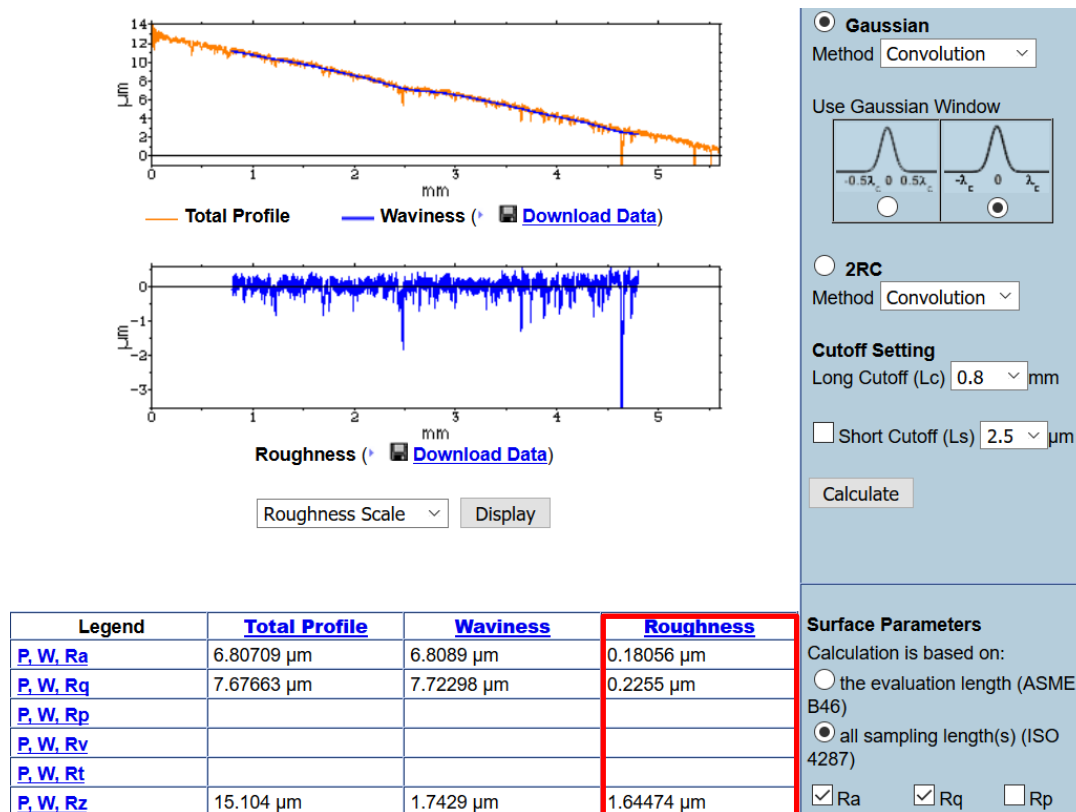


Ilustración 5.30 – Parámetros obtenidos con Gaussiano (convolución) para tercer perfil [13]

- Filtro Gaussiano - método de transformada rápida de Fourier

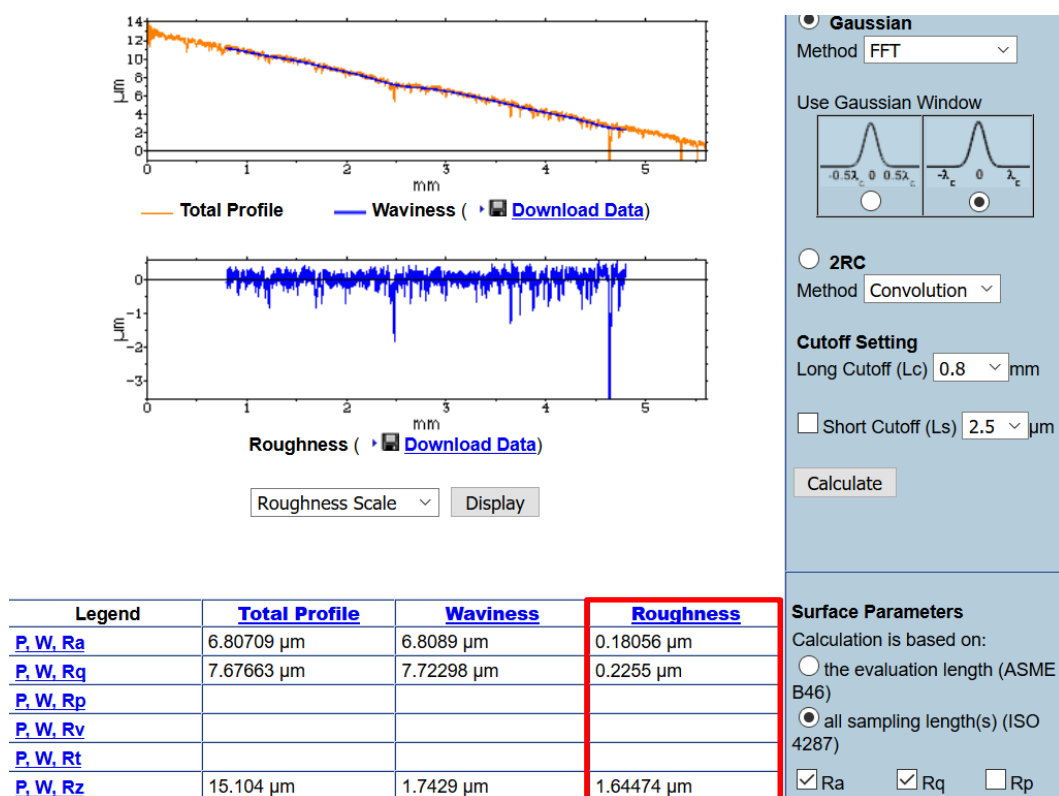


Ilustración 5.31 – Parámetros obtenidos con Gaussiano (transformada de Fourier) para tercer perfil [13]

- Filtro 2RC - método recursivo

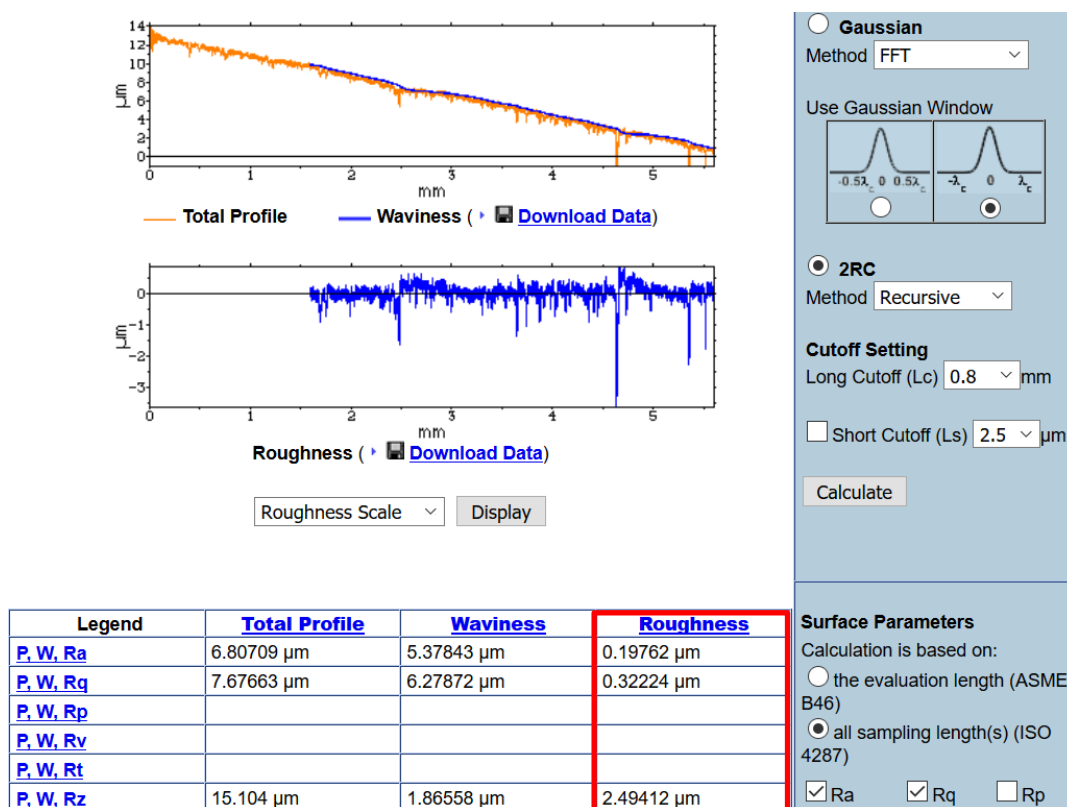


Ilustración 5.32 – Parámetros obtenidos con 2RC (recursivo) para tercer perfil [13]

- Filtro 2RC - método convolución

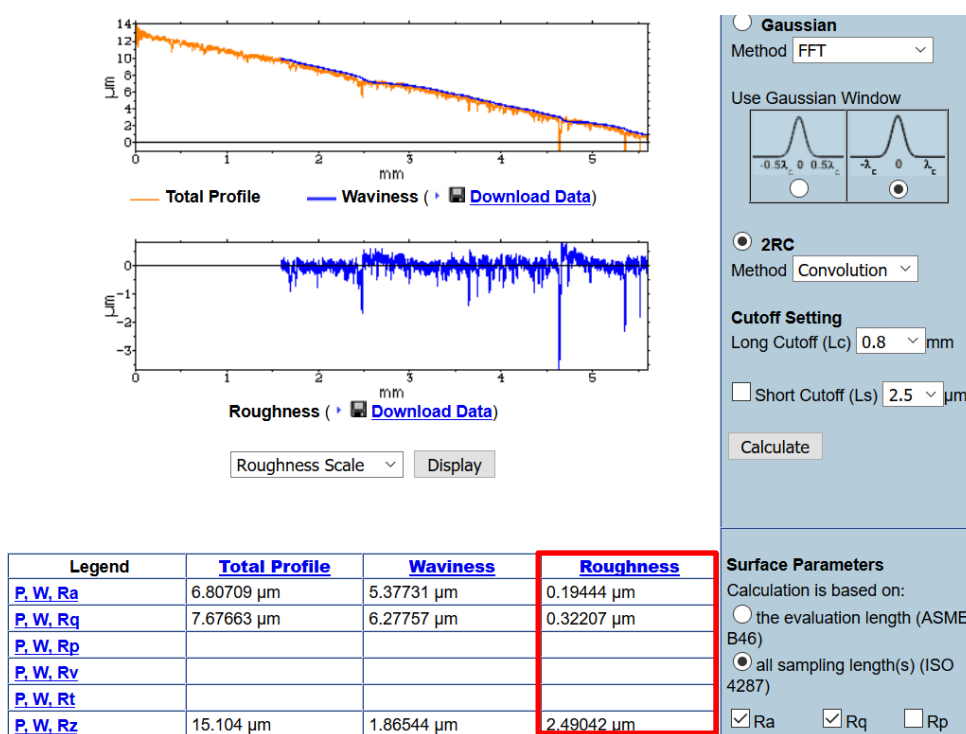


Ilustración 5.33 – Parámetros obtenidos con 2RC (convolución) para tercer perfil [13]

A continuación, se muestra la Tabla 5.3 con todos los resultados obtenidos para este perfil.

Resultados obtenidos para la tercera pieza evaluada				
Tipo filtro		Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Mahr XCR 20 Gaussian filter		0.17890	0.30420	2.05110
Gaussian	Fast gaussian	0.18064	0.22561	1.64564
	Convolution	0.18056	0.22550	1.64474
	FFT	0.18056	0.22550	1.64474
2RC	Recursive	0.19762	0.32224	2.49412
	Convolution	0.19444	0.32207	2.49012

Tabla 5.3 – Resultados obtenidos con los distintos tipos filtros NIST para la 3ª pieza

5.2.4. Desarrollo del cuarto perfil

Por último realizamos los mismos pasos para el cuarto perfil. Abrimos el perfil total, como se muestra en la Imagen 5.34:

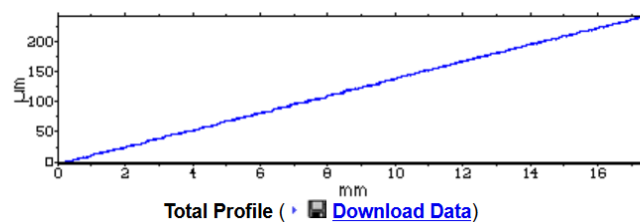


Ilustración 5.34 – Cuarto perfil en software NIST [13]

En esta ocasión, la tolerancia a controlar es un Rz de 25 μm , por lo que el cutoff que aplicaremos para cada uno de los filtros será de 2,5 mm.

- Filtro Gaussiano - método gaussiano rápido

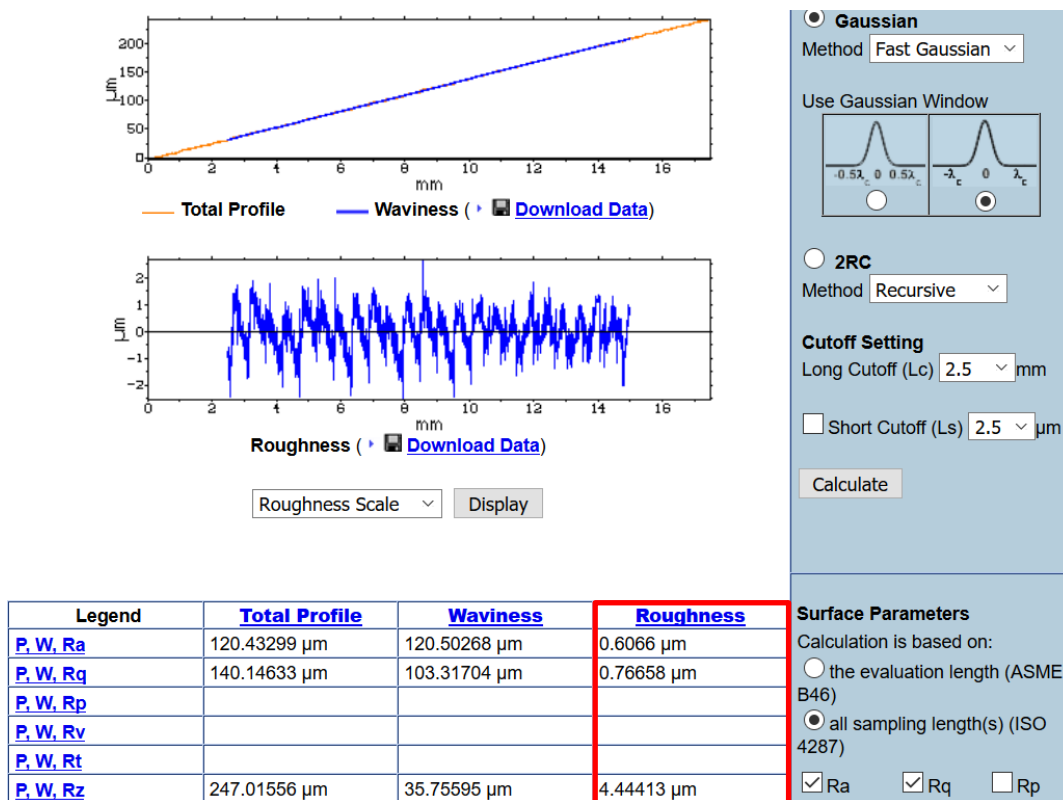


Ilustración 5.35 – Parámetros obtenidos con Gaussiano (método rápido) para cuarto perfil [13]

- Filtro Gaussiano - método de convolución

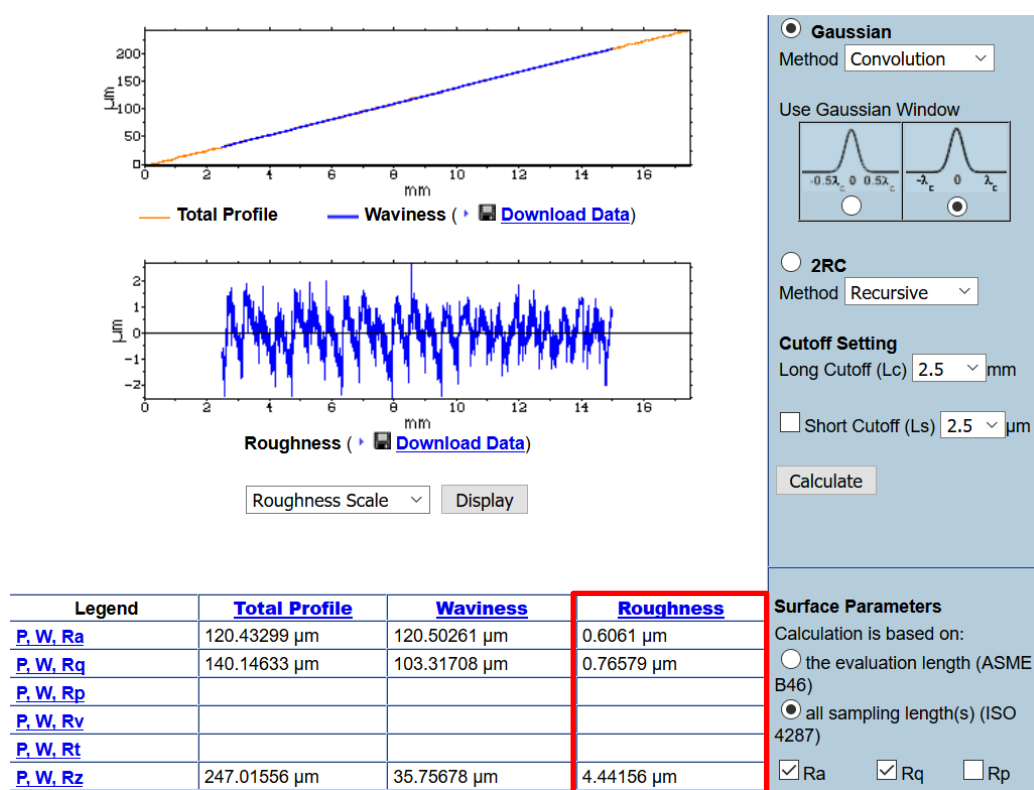


Ilustración 5.36 – Parámetros obtenidos con Gaussiano (convolución) para cuarto perfil [13]

- Filtro Gaussiano - método de transformada rápida de Fourier

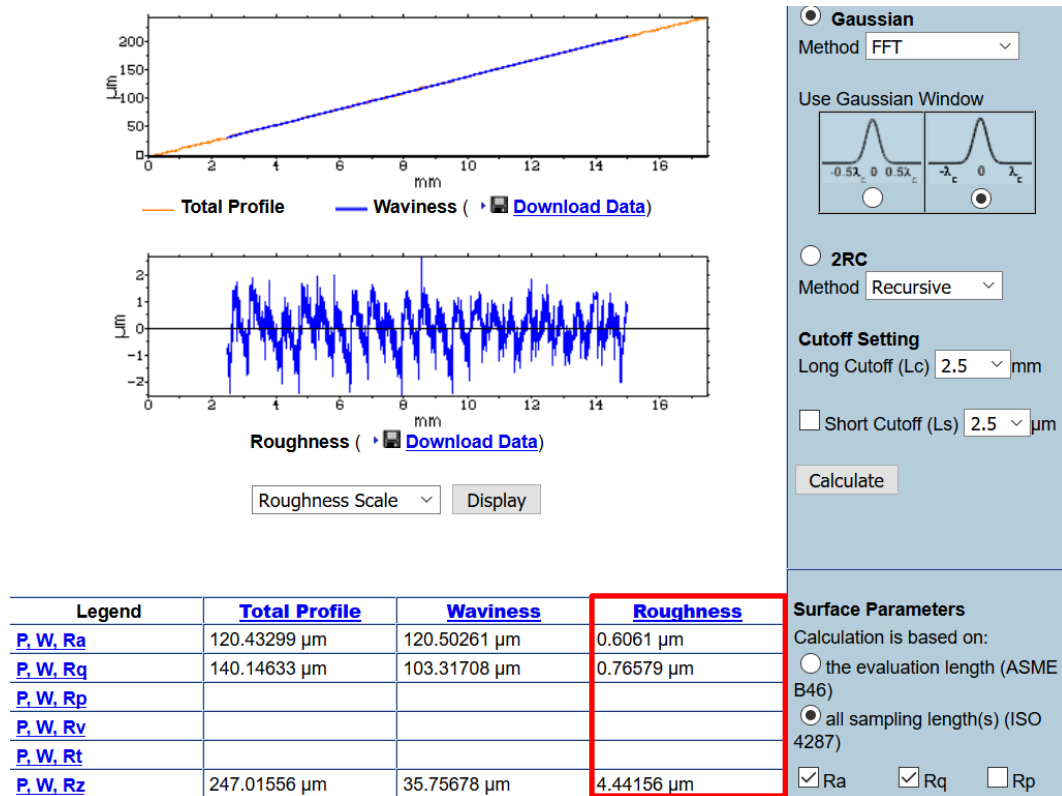


Ilustración 5.37 – Parámetros obtenidos con Gaussiano (transformada de Fourier) para cuarto perfil [13]

- Filtro 2RC - método recursivo

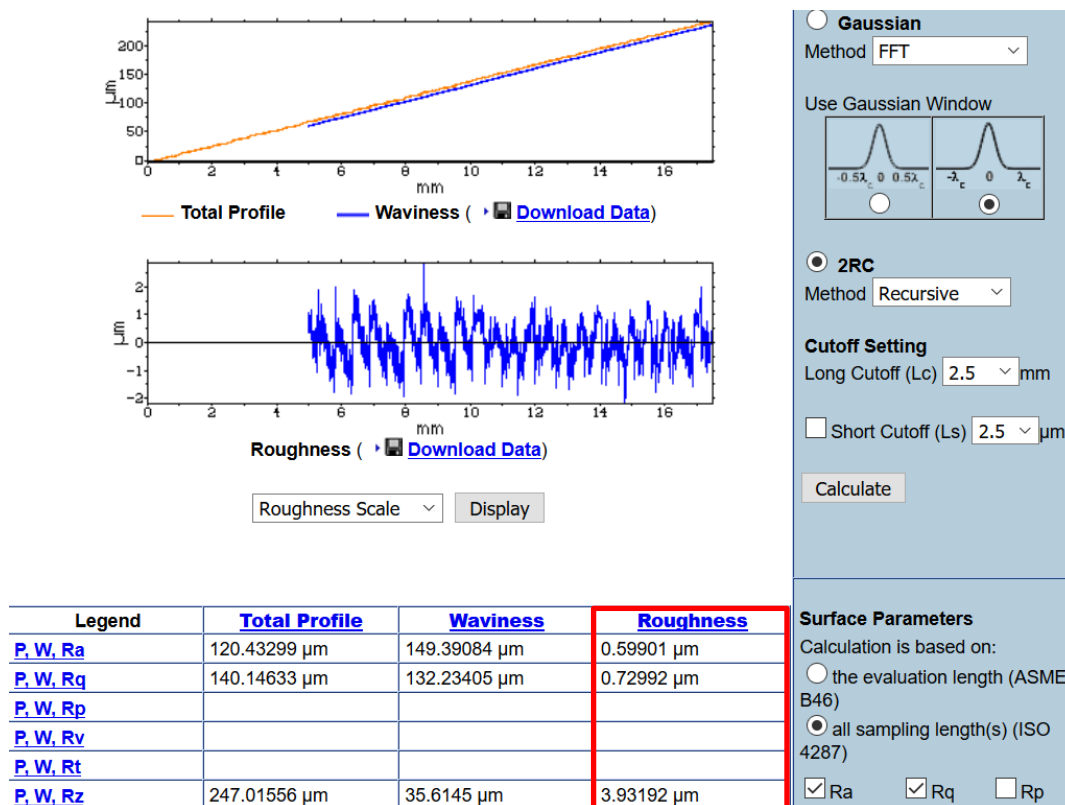


Ilustración 5.38 – Parámetros obtenidos con 2RC (recursivo) para cuarto perfil [13]

- Filtro 2RC - método convolución

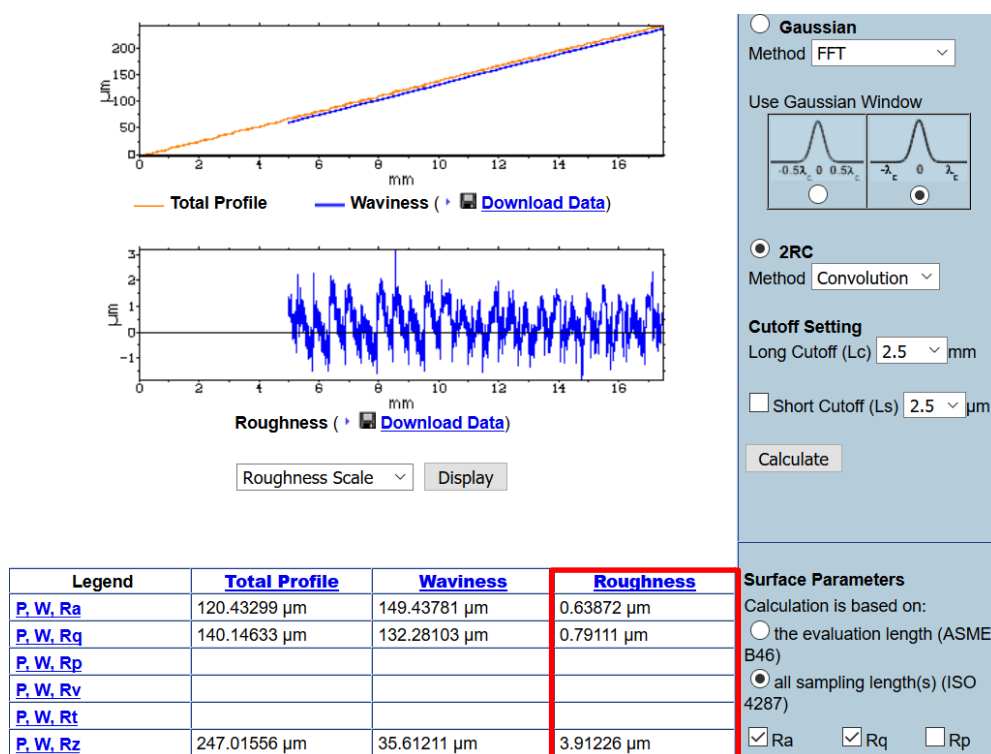


Ilustración 5.39 – Parámetros obtenidos con 2RC (convolución) para cuarto perfil [13]

Podemos ver en la Tabla 5.4 todos los resultados obtenidos para este perfil.

		Resultados obtenidos para la cuarta pieza evaluada			
		Tipo filtro	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Mahr XCR 20 Gaussian filter		0.60640	0.75220	4.27880	
Gaussian	Fast gaussian	0.60660	0.76658	4.44413	
	Convolution	0.60610	0.76579	4.44156	
	FFT	0.60610	0.76579	4.44156	
2RC	Recursive	0.59901	0.72992	3.93192	
	Convolution	0.63872	0.79111	3.91226	

Tabla 5.4 – Resultados obtenidos con los distintos tipos filtros NIST para la 4ª pieza

5.3. Desarrollo de perfiles con los filtros implementados

Una vez ya tenemos todos estos filtros aplicados, el siguiente paso es utilizar el filtro Gaussiano y los dos filtros B-Spline creados, para poder comparar resultados y obtener una mejor curva para cada uno de estos perfiles. Además, también utilizaremos para comparar el filtro Gaussiano que creamos en Mathematica.

5.3.1. Desarrollo del primer perfil

Comenzamos con el primer perfil, para ellos aplicamos el código Gaussiano, y graficamos la función como muestra la Imagen 5.40:

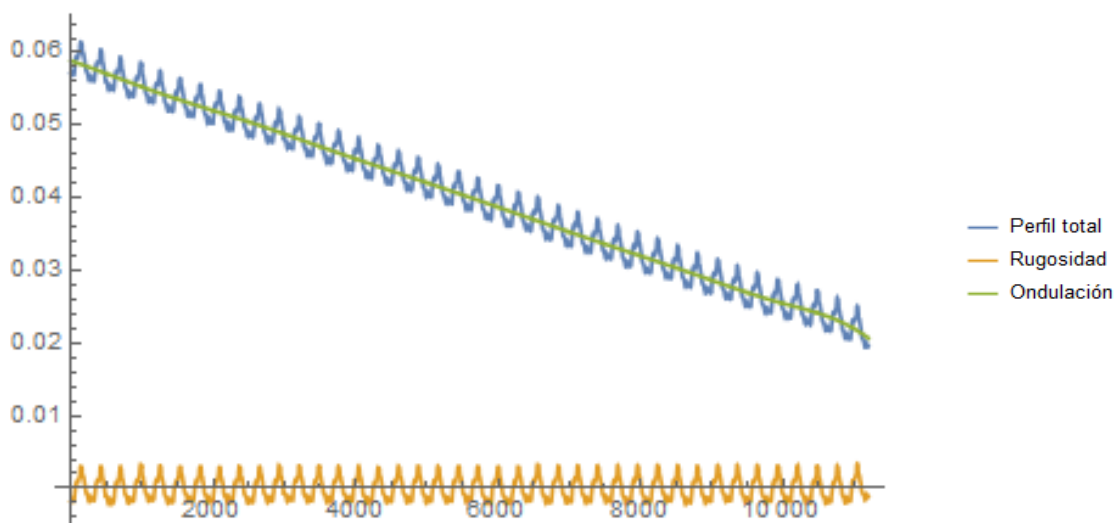


Ilustración 5.40 – Primer perfil y sus componentes con filtro Gaussiano

Acto seguido, aplicamos el código B-Spline con función de Mathematica y graficamos de nuevo esta ecuación, obteniendo como resultado la Imagen 5.41:

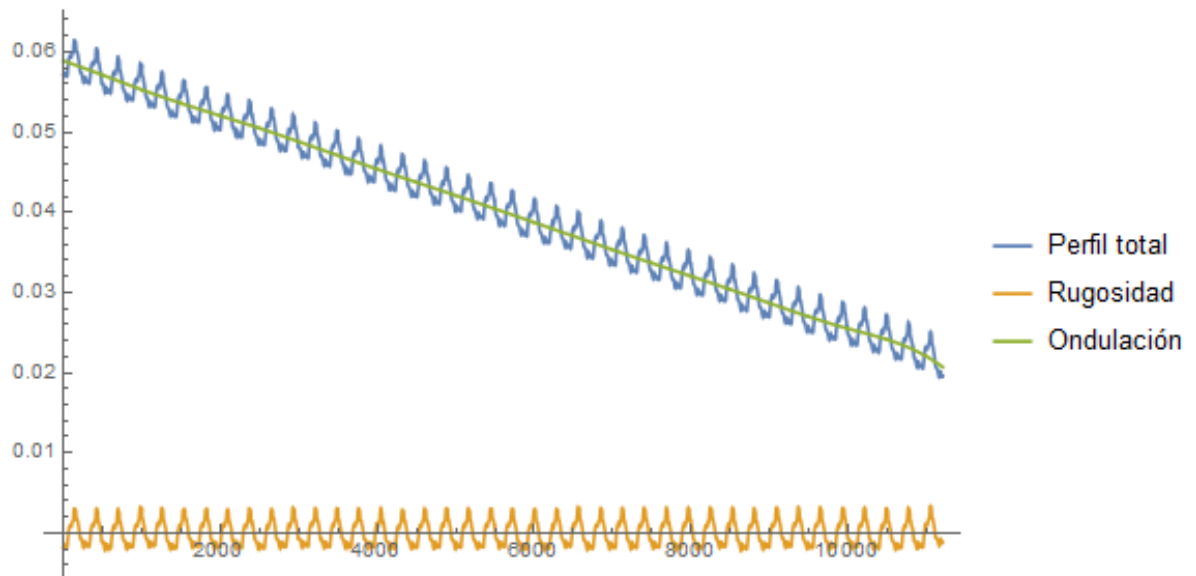


Ilustración 5.41 – Primer perfil y sus componentes con filtro B-Spline (función Mathematica)

Por último, aplicamos el código para el filtro B-Spline de acuerdo a ISO y graficamos la ecuación resultante como se muestra en la Imagen 5.42.

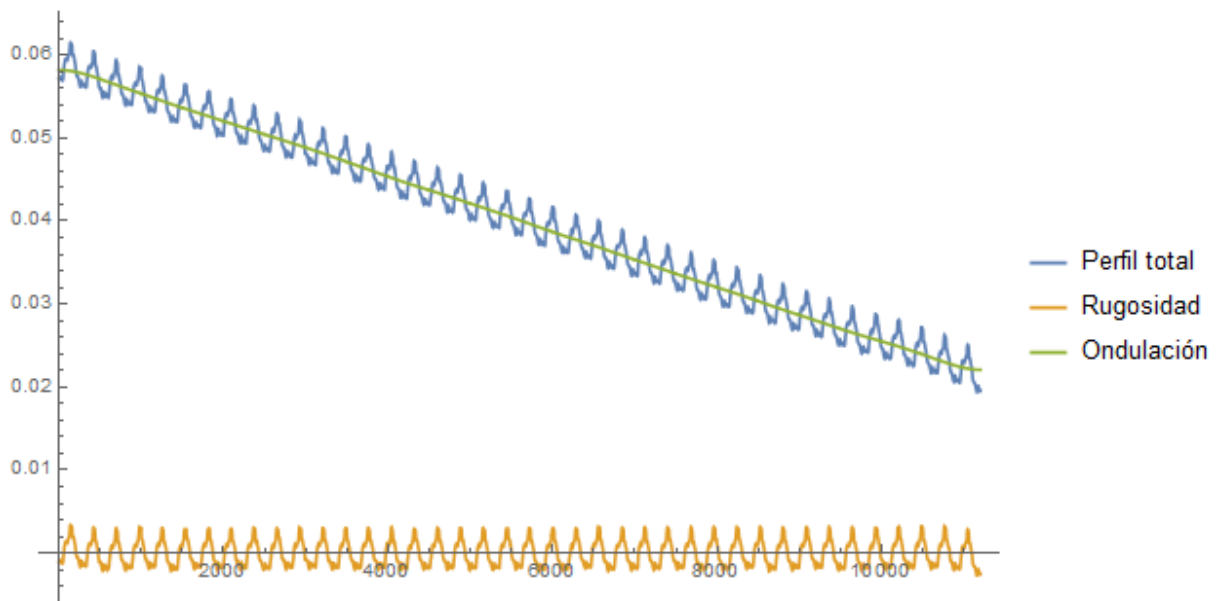


Ilustración 5.42 – Primer perfil y sus componentes con filtro B-Spline de acuerdo a ISO

Una vez ya tenemos el perfil de rugosidad filtrado con ambos B-Spline y Gaussiano, superponemos las gráficas para comparar los perfiles visualmente,

Imagen 5.43, y aplicamos el código para el cálculo de parámetros obteniendo el resultado, Imagen 5.44, y añadimos estos resultados a la Tabla 5.1.

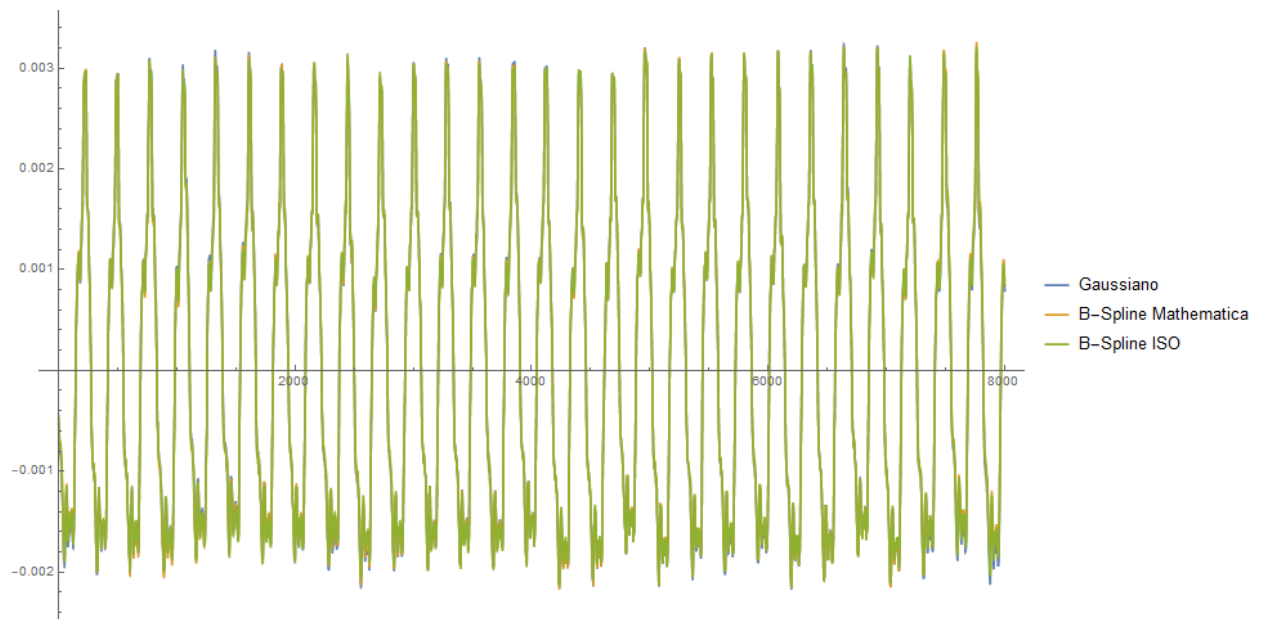


Ilustración 5.43 – Comparativa entre filtro B-Spline (función Mathematica), B-Spline de acuerdo a ISO y Gaussiano para el primer perfil

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
1.39124	1.54451	5.28109

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
1.3891	1.54163	5.2229

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
1.40031	1.55442	5.30906

Ilustración 5.44 – Resultados con filtro B-Spline, función Mathematica (izquierda), B-Spline de acuerdo a ISO (centro) y Gaussiano (derecho) para el primer perfil

5.3.2. Desarrollo del segundo perfil

Para este segundo perfil procedemos de la misma manera, por lo que aplicamos el filtro Gaussiano, como muestra la Imagen 5.45:

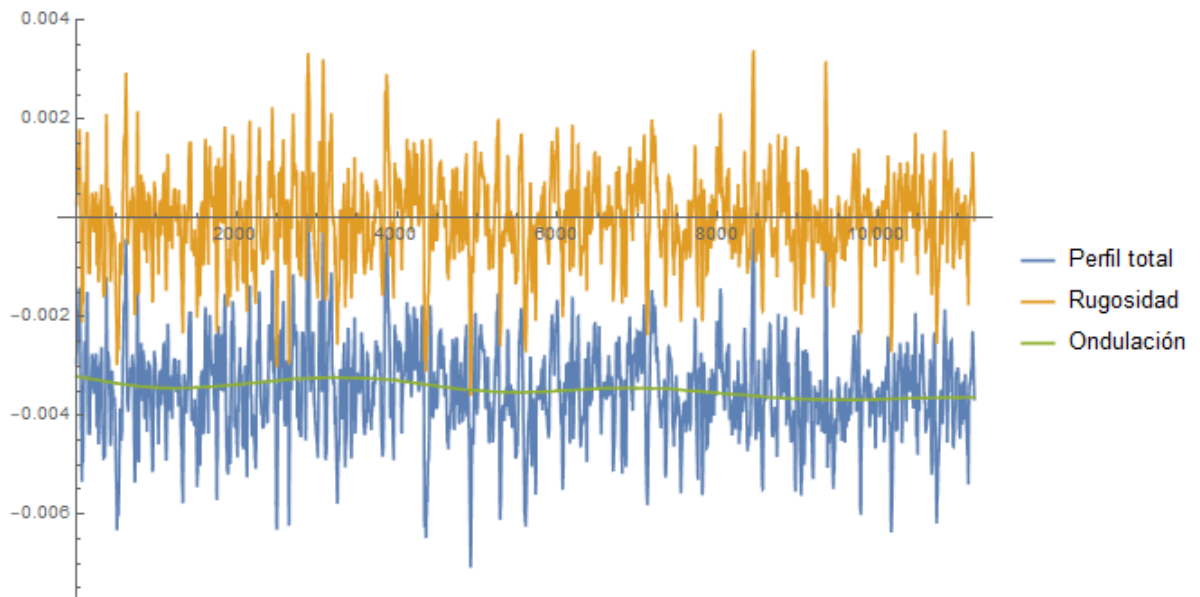


Ilustración 5.45 – Segundo perfil y sus componentes con filtro Gaussiano

El siguiente paso es la aplicación del código B-Spline con función de Mathematica y volvemos a graficar como muestra la Imagen 5.46:

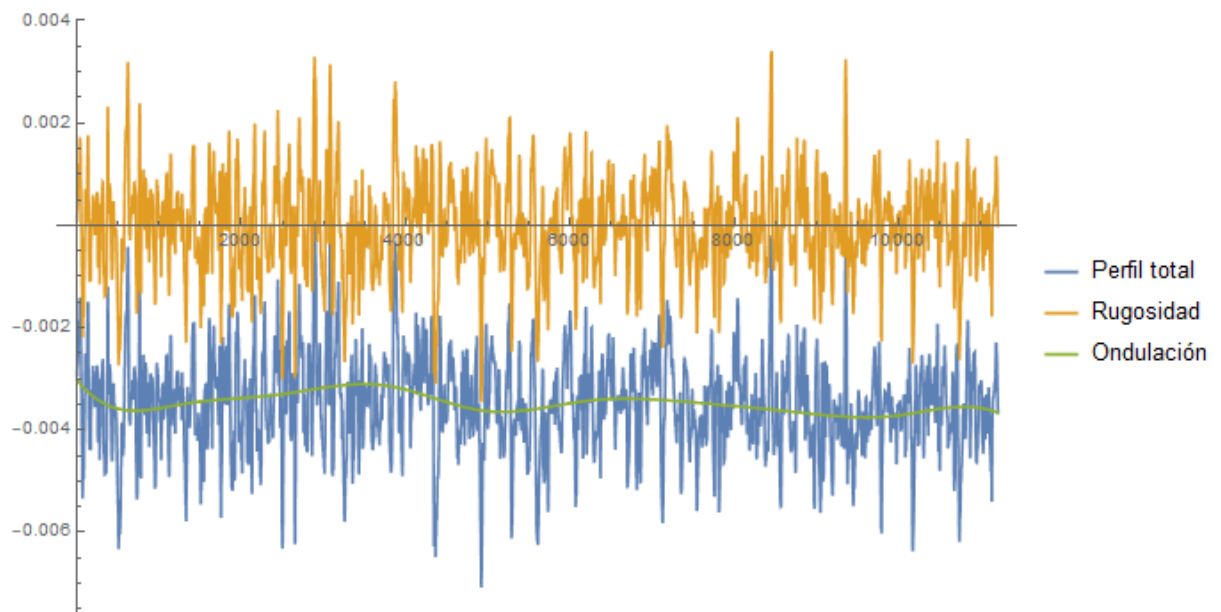


Ilustración 5.46 – Segundo perfil y sus componentes con filtro B-Spline (función Mathematica)

El tercer paso, como ya hemos visto, es aplicar el código para el filtro B-Spline de acuerdo a ISO y graficar la ecuación resultante como se muestra en la Imagen 5.47.

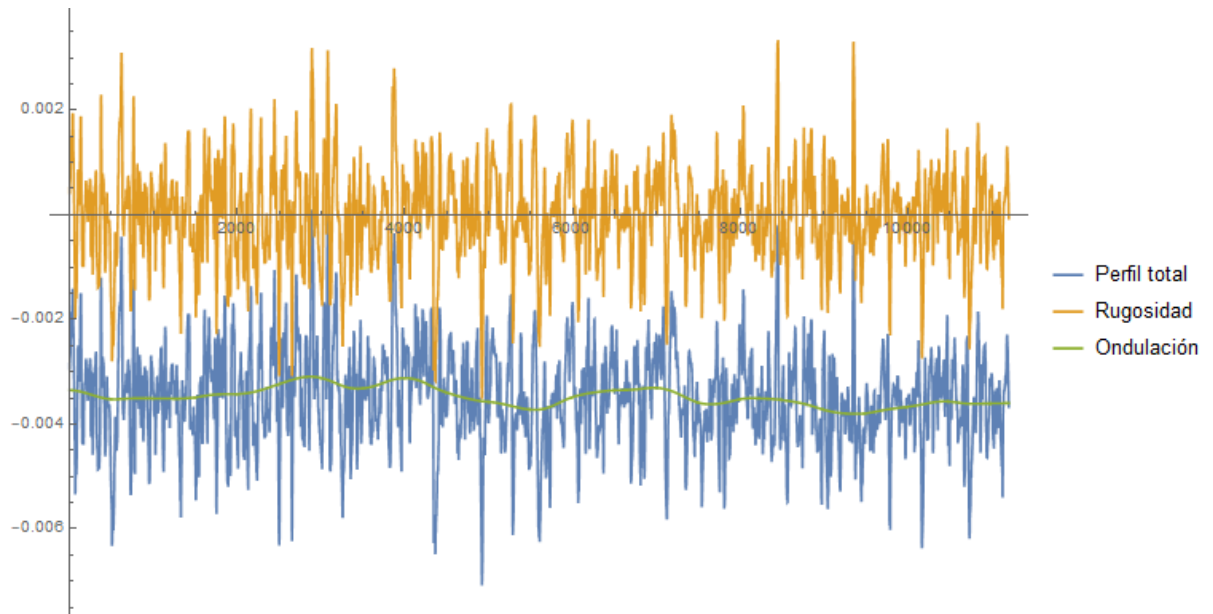


Ilustración 5.47 – Segundo perfil y sus componentes con filtro B-Spline de acuerdo a ISO

De la misma manera que para el primer perfil graficamos las 3 ecuaciones en una sola imagen, tanto con filtro Gaussiano como ambos filtros B-Spline y comparamos los perfiles visualmente, Imagen 5.48:



Ilustración 5.48 – Comparativa entre filtro B-Spline (función Mathematica), B-Spline de acuerdo a ISO y Gaussiano para el segundo perfil

Para el último paso, aplicamos el código para el cálculo de parámetros obteniendo el resultado, Imagen 5.49, y añadimos estos resultados a la Tabla 5.2.

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
0.726003	0.934484	5.49366

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
0.712735	0.920442	5.50166

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
0.729805	0.93696	5.53956

Ilustración 5.49 – Resultados con filtro B-Spline, función Mathematica (izquierda), B-Spline de acuerdo a ISO (centro) y Gaussiano (derecho) para el segundo perfil

5.3.3. Desarrollo del tercer perfil

Procedemos en este caso con el desarrollo del tercer perfil de la misma forma que para los dos anteriores, aplicando los 3 filtros creados, como muestran las Imágenes 5.50, 5.51 y 5.52:

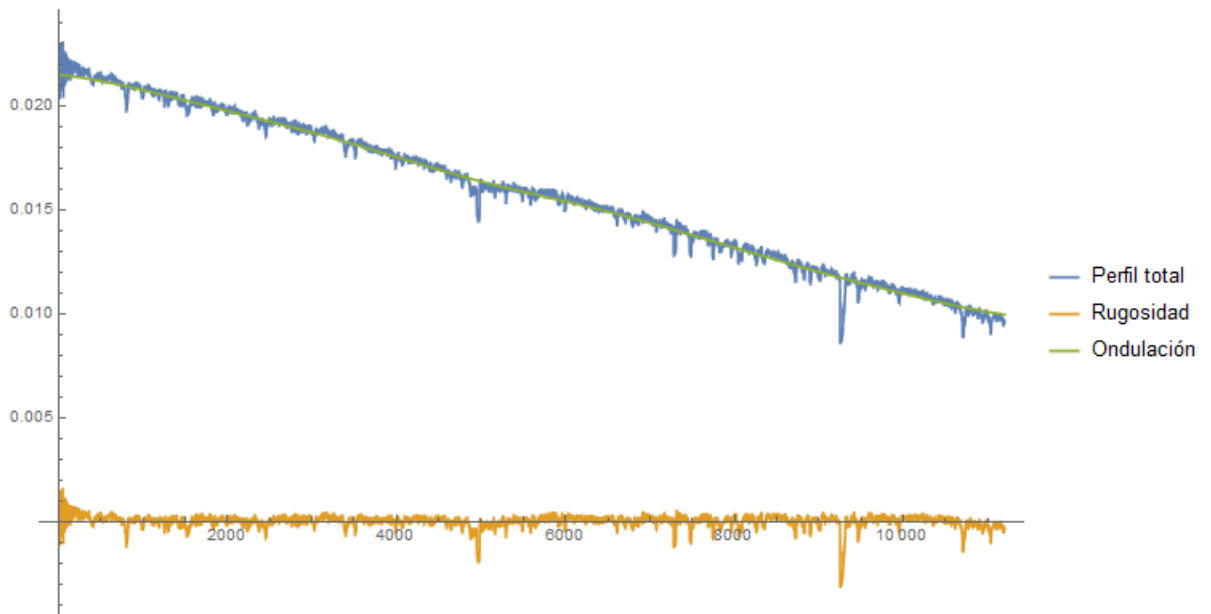


Ilustración 5.50 – Tercer perfil y sus componentes con filtro Gaussiano

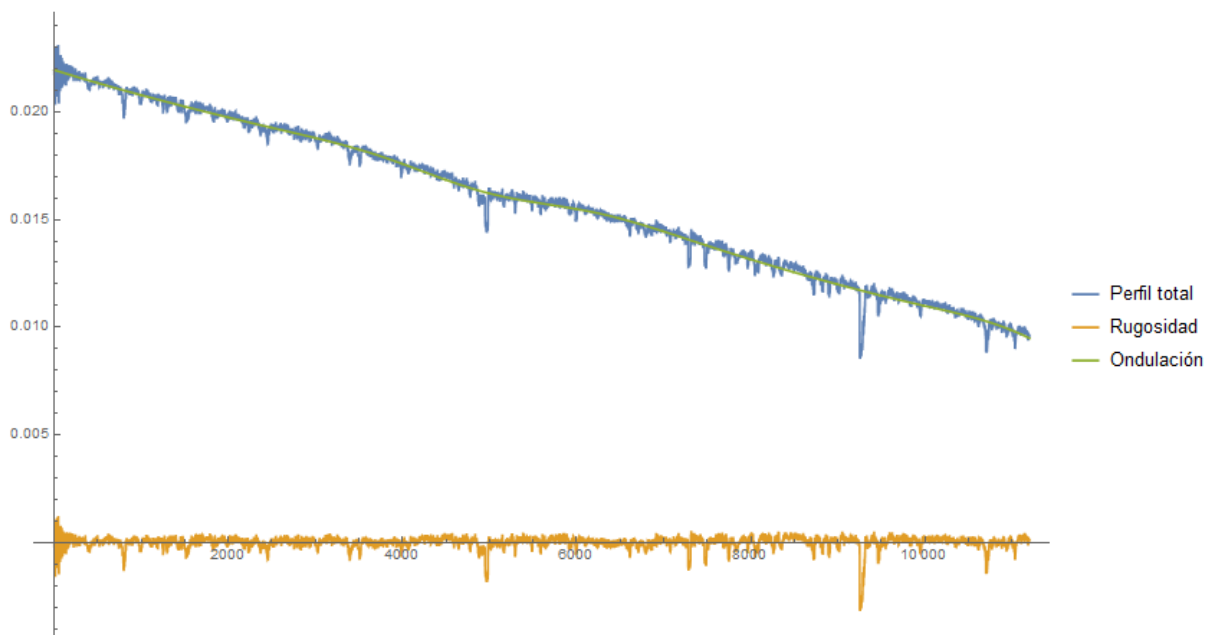


Ilustración 5.51 – Tercer perfil y sus componentes con filtro B-Spline (función Mathematica)

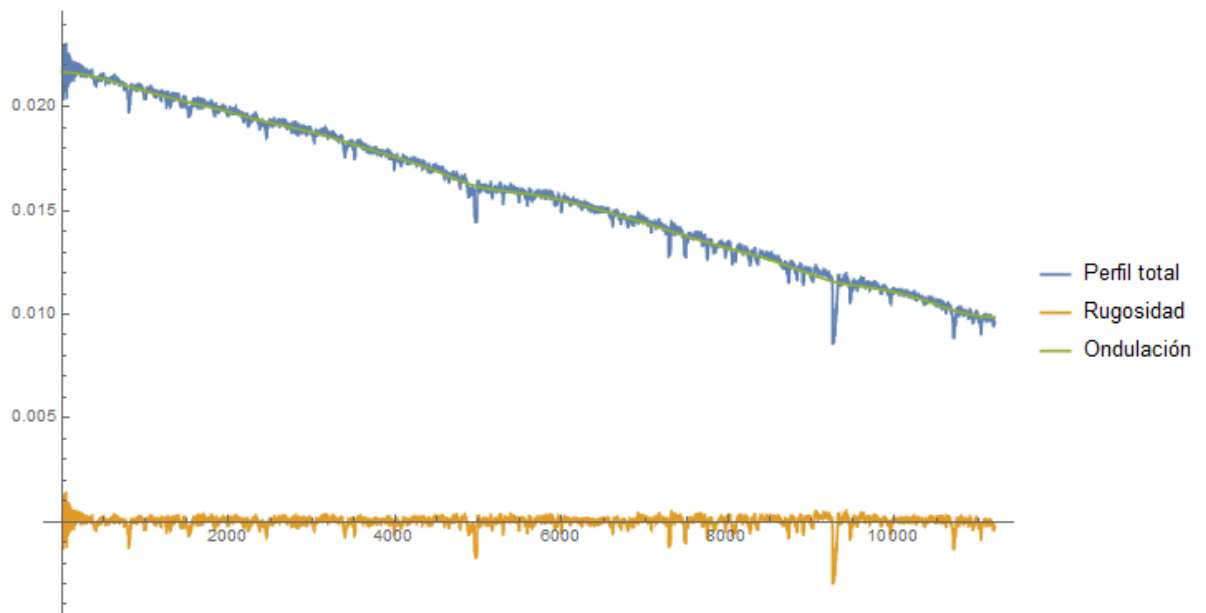


Ilustración 5.52 – Tercer perfil y sus componentes con filtro B-Spline de acuerdo a ISO

Después graficamos las tres funciones, con filtro Gaussiano y filtro B-Spline, y comparamos ambos perfiles visualmente, Imagen 5.53:

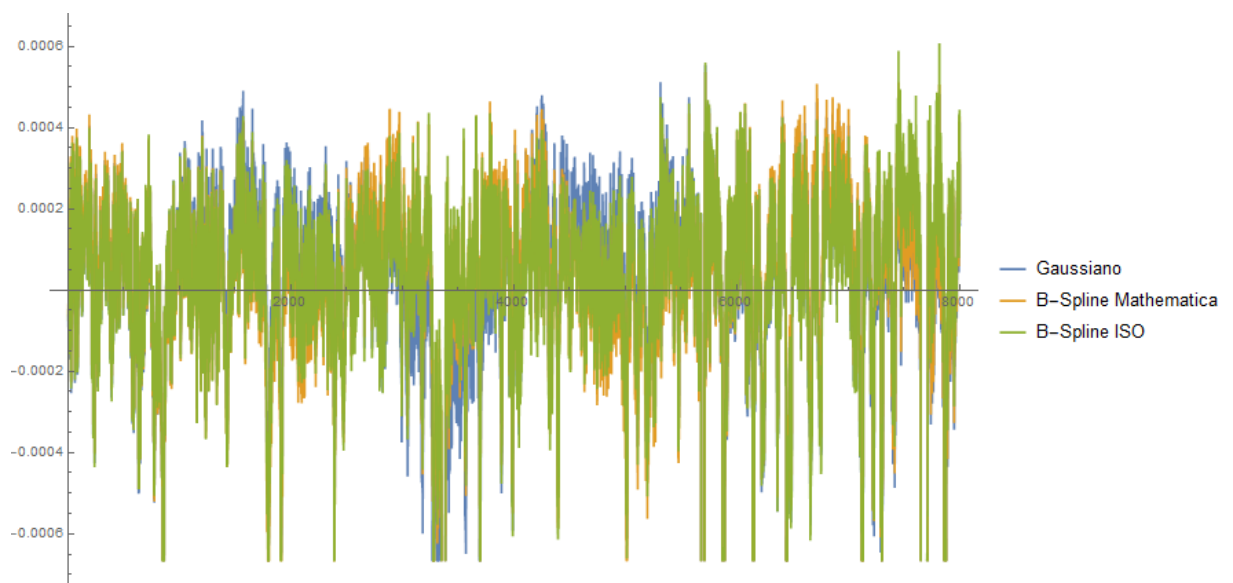


Ilustración 5.53 – Comparativa entre filtro B-Spline (función Mathematica), B-Spline de acuerdo a ISO y Gaussiano para el tercer perfil

Por último, calculamos de la misma manera los 3 parámetros, R_a , R_q y R_z , con ayuda del código implementado, obteniendo el siguiente resultado, Imagen 5.54, y añadimos estos resultados a la Tabla 5.3.

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
0.17901	0.284697	2.08915

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
0.173234	0.272361	2.04606

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
0.184233	0.292156	2.11572

Ilustración 5.54 – Resultados con filtro B-Spline, función Mathematica (izquierda), B-Spline de acuerdo a ISO (centro) y Gaussiano (derecho) para el tercer perfil

5.3.4. Desarrollo del cuarto perfil

Para finalizar, aplicamos el filtro Gaussiano propio sobre el último perfil, y nos da como resultado las gráficas de la Imagen 5.55

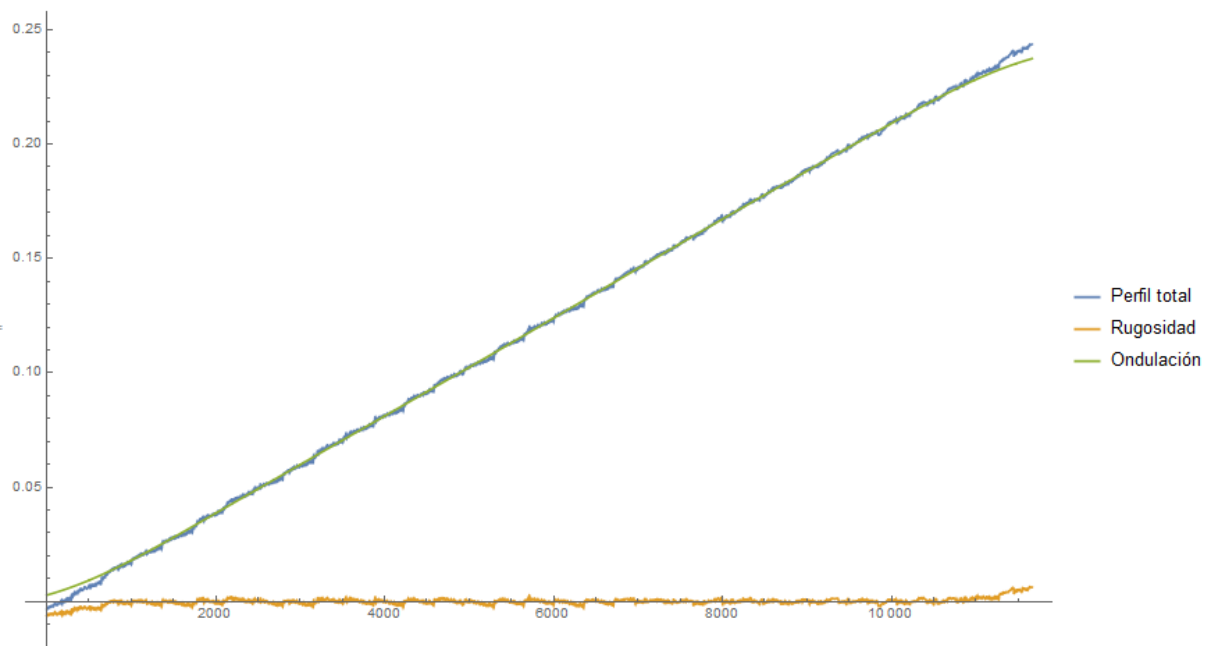


Ilustración 5.55 – Cuarto perfil y sus componentes con filtro Gaussiano

Seguimos con el código creado, en base a la función de Mathematica, para el filtro B-Spline y graficamos el resultado, Imagen 5.56:

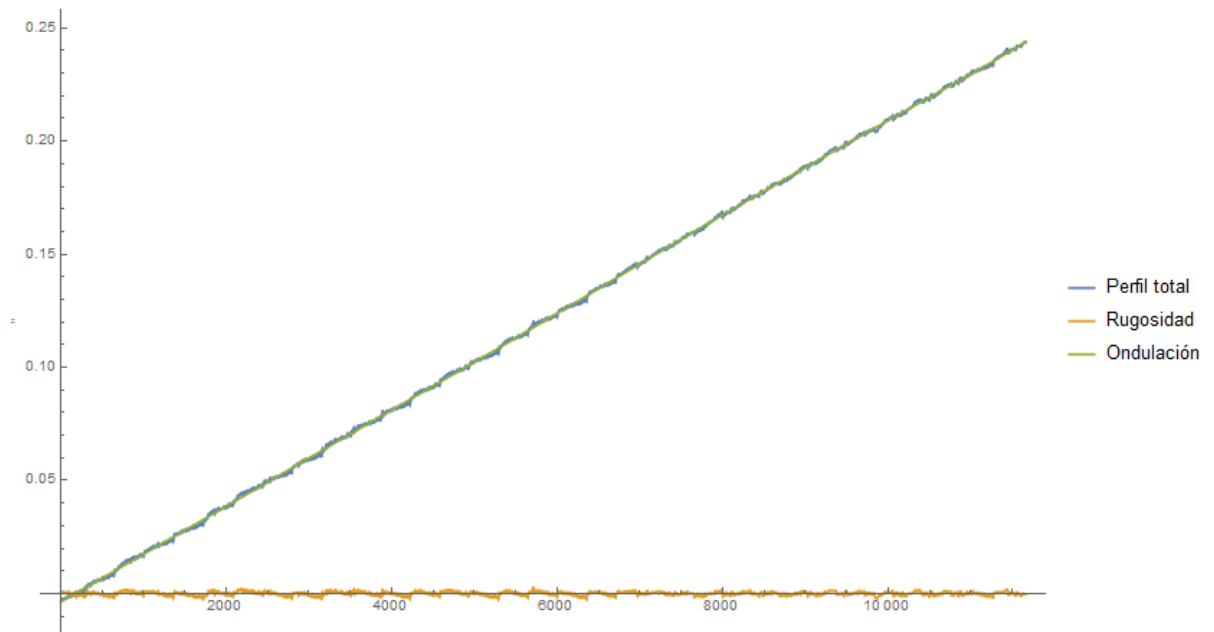


Ilustración 5.56 – Cuarto perfil y sus componentes con filtro B-Spline (función Mathematica)

El siguiente paso es ejecutar el código creado para el filtro B-Spline de acuerdo a ISO y volvemos a graficar la función para este cuarto perfil como muestra la Imagen 5.57:

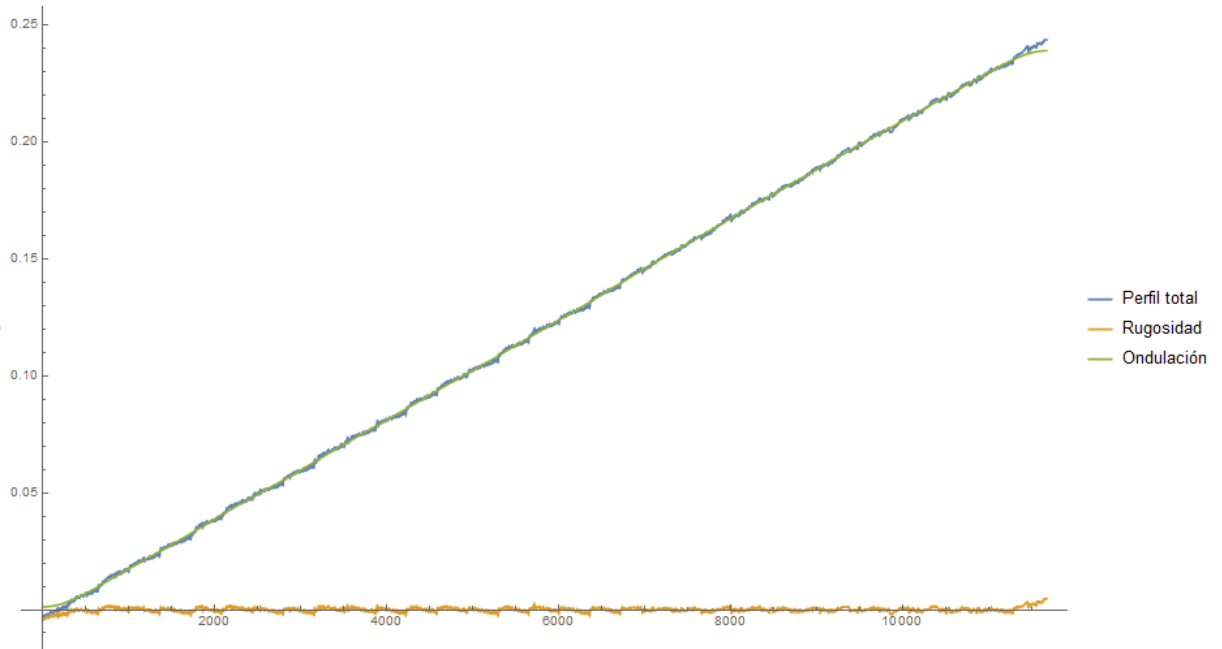


Ilustración 5.57 – Cuarto perfil y sus componentes con filtro B-Spline de acuerdo a ISO

Para el siguiente paso, con ayuda de los tres filtros creados, graficamos los perfiles con filtro Gaussiano y ambos filtros B-Spline, y los comparamos en la Imagen 5.58:

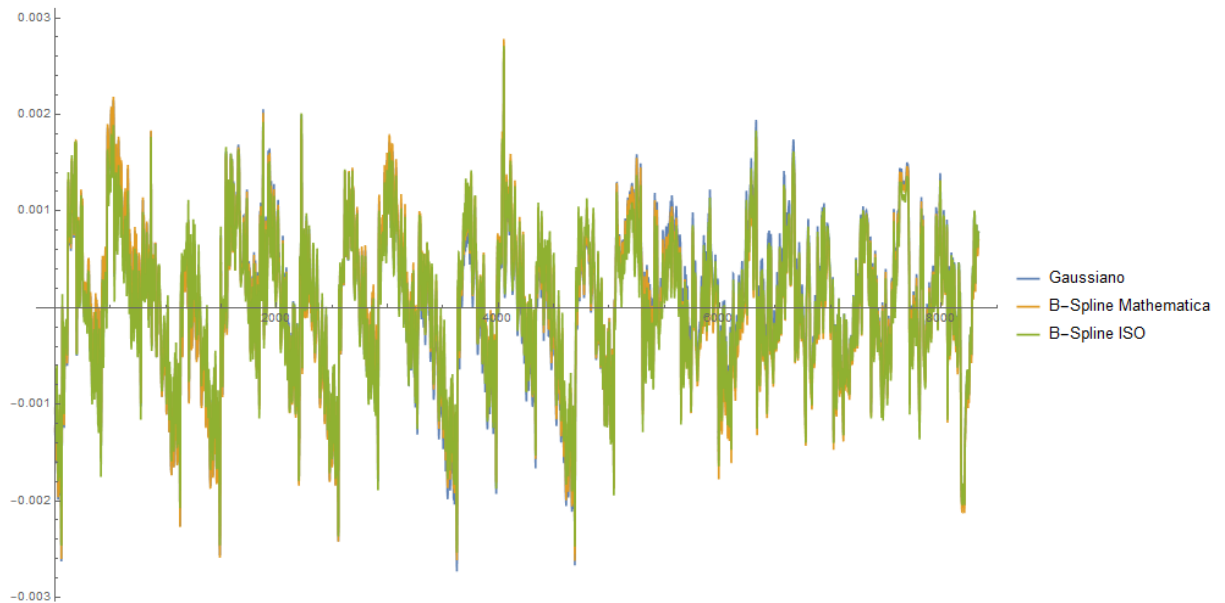


Ilustración 5.58 – Comparativa entre filtro B-Spline (función Mathematica), B-Spline de acuerdo a ISO y Gaussiano para el cuarto perfil

Y en último lugar, calculamos los 3 parámetros, Ra, Rq y Rz, y obtenemos el resultado de la Imagen 5.59, y añadimos estos resultados a la Tabla 5.4.

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
0.632577	0.782738	4.3964

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
0.601166	0.740717	4.28125

Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
0.631557	0.785389	4.44928

Ilustración 5.59 – Resultados con filtro B-Spline, función Mathematica (izquierda), B-Spline de acuerdo a ISO (centro) y Gaussiano (derecho) para el cuarto perfil

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Ahora que ya tenemos todos los filtros aplicados a los diferentes perfiles podemos empezar a evaluar que tan efectivos son cada uno de ellos.

		Resultados finales para la primera pieza evaluada			
		Tipo filtro	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
NIST	Mahr XCR 20	Gaussian filter	1,39160	1,54470	5,23180
	Gaussian	Fast gaussian	1,39168	1,54674	5,20553
		Convolution	1,39168	1,54674	5,20575
		FFT	1,39168	1,54674	5,20575
	2RC	Recursive	1,41209	1,54318	5,42185
		Convolution	1,41506	1,54399	5,39469
Mathematica	Funciones de Mathematica	Gaussiano	1,40031	1,55442	5,30906
		B-Spline	1,39124	1,54451	5,28109
	ISO TS 16610-22:2006	B-Spline	1,38910	1,54163	5,22290

Tabla 5.1 actualizada– Resultados obtenidos con los distintos tipos de filtro para la 1ª pieza

Vamos a empezar comparando el primer perfil, tanto los resultados obtenido como las gráficas. Por lo tanto, utilizando como referencia la Tabla 5.1 actualizada, podemos ver claramente que el filtro que más se acerca en valores de Rz, que es la tolerancia que estamos controlando, al obtenido en la máquina Mahr es el filtro B-Spline implementado en Mathematica de acuerdo a ISO. Para el valor de Ra, el más cercano es cualquiera de los Gaussianos del software del NIST y, para el valor de Rq el más cercano al valor arrojado por la máquina es el que se evaluó conforme al filtro B-Spline implementado en Mathematica con la función “BSplineFunction”.

Si comparamos los valores de los filtros implementados contra los valores del software patrón, podemos ver que para Ra la mayor diferencia apreciable entre todos ellos es $0,02 \mu\text{m}$ y la menor se da entre el filtro Gaussiano de NIST y el filtro B-Spline propio de $0,00044 \mu\text{m}$. Para el resultado de Rq, la mayor diferencia entre todos ellos es de $0,01 \mu\text{m}$ y la menor diferencia se da entre el filtro 2RC de NIST y el filtro B-Spline propio, siendo $0,00052 \mu\text{m}$. Por último, la mayor diferencia apreciable para el valor de Rz no es mayor de $0,05 \mu\text{m}$ y la menor es $0,017 \mu\text{m}$ entre el filtro Gaussiano-NIST y el filtro B-Spline de acuerdo a la norma.

Comparando las 3 gráficas de los filtros implementados en Mathematica podemos ver en la Imagen 6.1 que el ajuste es casi idéntico, a excepción de los

trayectos de arranque y arrastre, y si nos vamos a la Imagen 5.43, la diferencia entre los 3 perfiles de rugosidad, despreciando trayectos de arranque y arrastre, es prácticamente nula.

Esto puede deberse a que el perfil evaluado está cerca de la periodicidad y, por lo tanto, la diferencia que pueda presentarse al aplicarse los distintos tipos de filtros es muy baja.

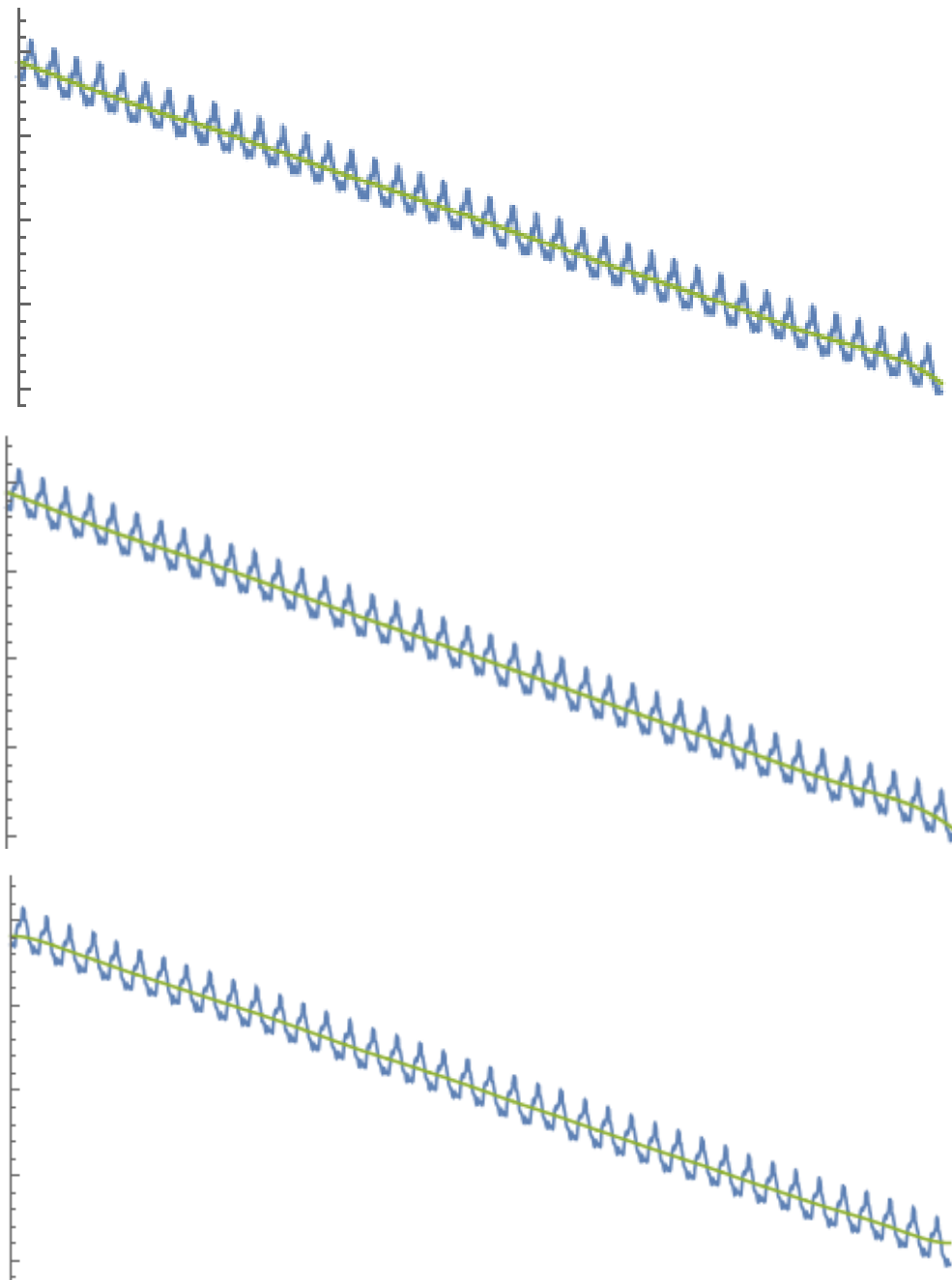


Ilustración 6.1 – Comparativa entre el ajuste para los tres filtros implementados en Mathematica para el primer perfil

Comparamos, para el segundo perfil evaluado, las 3 gráficas, Imagen 5.45, 5.46 y 5.47, y podemos observar que el mejor ajuste lo presenta el filtro B-Spline implementado en Mathematica de acuerdo a ISO. Si nos fijamos en la Tabla 5.2 actualizada, podemos ver de nuevo que para los tres valores calculados por Mahr para R_z , R_q y R_a , los más aproximados son idénticos al primer perfil, para R_z el valor obtenido con el filtro B-Spline de acuerdo a ISO, para R_q el valor que obtuvimos con el filtro B-Spline implementado con la función “BSplineFunction” y para el R_a el valor del filtro Gaussiano del software NIST.

Haciendo la comparación de patrones software contra los filtros implementados, para R_a podemos ver que la mayor diferencia es de $0,06 \mu\text{m}$ y la menor se da entre el filtro Gaussiano de NIST y el filtro B-Spline de acuerdo a la norma con $0,00248 \mu\text{m}$. Para el parámetro R_q , la mayor diferencia entre todos ellos es de $0,04 \mu\text{m}$ y la menor diferencia se da entre el filtro Gaussiano de NIST y el filtro B-Spline propio siendo $0,00004 \mu\text{m}$. Para el valor de R_z , podemos asumir que la mayor diferencia es de $0,08 \mu\text{m}$ entre todos ellos y la menor de $0,03 \mu\text{m}$ entre el filtro Gaussiano de NIST y el Gaussiano de Mathematica.

		Resultados finales para la segunda pieza evaluada			
		Tipo filtro	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
		Mahr XCR 20 Gaussian filter	0,71560	0,92900	5,50950
NIST	Gaussian	Fast gaussian	0,71541	0,93944	5,56855
		Convolution	0,71522	0,93944	5,56663
		FFT	0,71522	0,93944	5,56663
	2RC	Recursive	0,66445	0,89374	5,32406
		Convolution	0,66449	0,89395	5,32292
Mathematica	Funciones de Mathematica	Gaussiano	0,72981	0,93696	5,53956
		B-Spline	0,72600	0,93448	5,49366
	ISO TS 16610-22:2006	B-Spline	0,71274	0,92044	5,50166

Tabla 5.2 actualizada– Resultados obtenidos con los distintos tipos de filtro para la 2ª pieza

Con el tercer perfil podemos ver que si existe más variación para los parámetros de rugosidad de acuerdo a la evaluación de Mahr. Fijándonos en la Tabla 5.3 actualizada, se aprecia que para el valor de Rz repite el resultado más cercano siendo el resultado del filtro B-Spline implementado en Mathematica de acuerdo a ISO. Pero lo interesante es que en este caso, los valores más cercanos al resultado calculado en Mahr para Ra y Rq son los obtenidos en B-Spline y Gaussiano implementados con las funciones de Mathematica respectivamente.

Para este perfil también vamos a comparar los patrones software contra los filtros implementados. Por lo tanto, para Ra podemos ver que la mayor diferencia es de 0,02 μm y la menor se da entre el filtro Gaussiano de NIST y el filtro B-Spline propio con 0,00057 μm . Para el parámetro Rq, la mayor diferencia es 0,09 μm y la menor diferencia se da entre el filtro 2RC de NIST y el filtro Gaussiano de Mathematica siendo 0,003 μm . Para el valor de Rz, la mayor diferencia está en 0,83 μm entre todos ellos y la menor de 0,4 μm entre el filtro Gaussiano de NIST y el B-Spline de acuerdo a la norma.

		Resultados finales para la tercera pieza evaluada			
		Tipo filtro	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
NIST	Mahr XCR 20 Gaussian filter		0,17890	0,30420	2,05110
	Gaussian	Fast gaussian	0,18064	0,22561	1,64564
		Convolution	0,18056	0,22550	1,64474
		FFT	0,18056	0,22550	1,64474
	2RC	Recursive	0,19762	0,32224	2,49412
		Convolution	0,19444	0,32207	2,49042
Mathematica	Funciones de Mathematica	Gaussiano	0,18423	0,29216	2,11572
		B-Spline	0,17901	0,28470	2,08915
	ISO TS 16610-22:2006	B-Spline	0,17323	0,27236	2,04606

Tabla 5.3 actualizada– Resultados obtenidos con los distintos tipos de filtro para la 3ª pieza

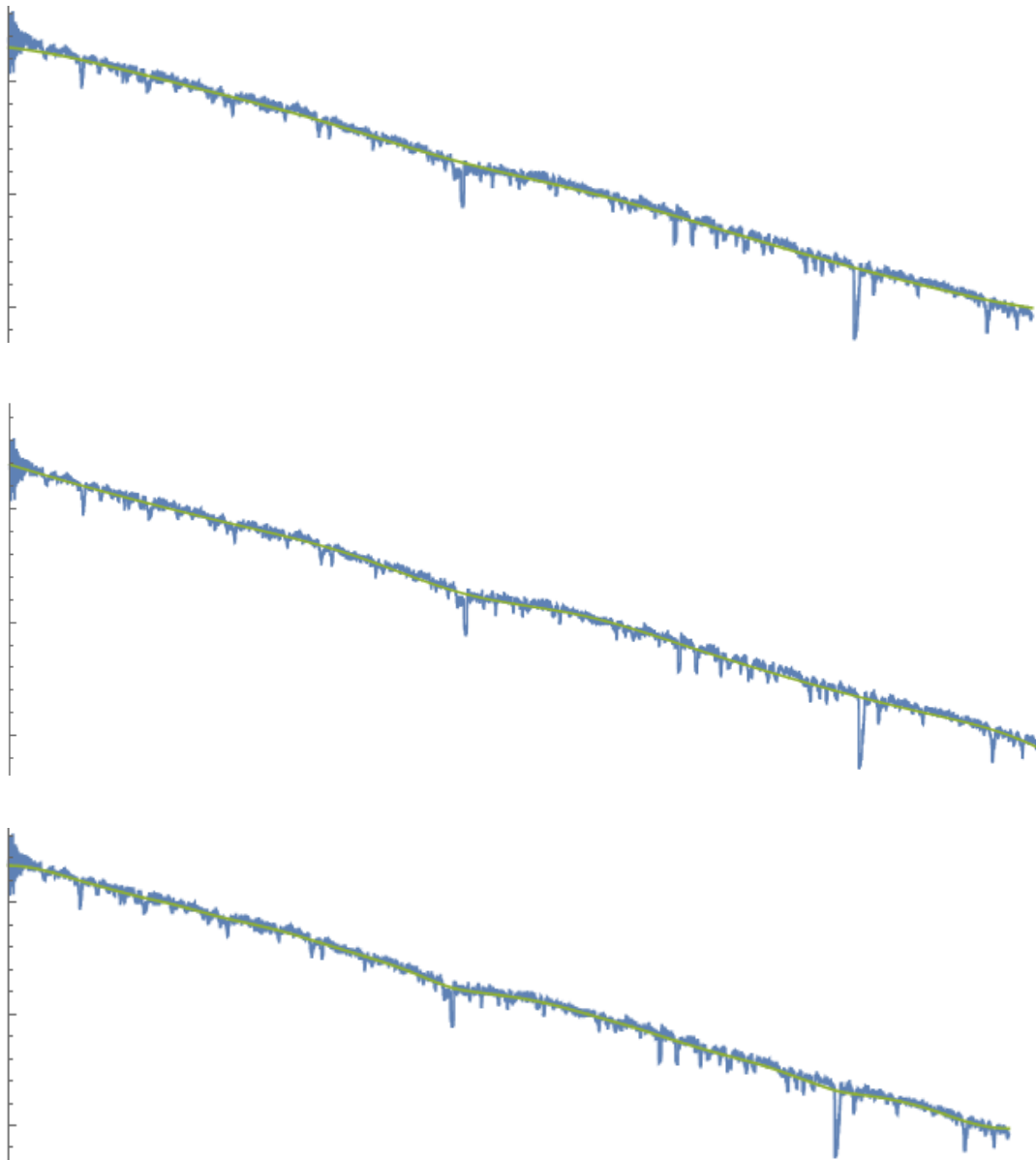


Ilustración 6.2 – Comparativa entre el ajuste para los tres filtros implementados en Mathematica para el tercer perfil

Comparando las 3 gráficas de los filtros implementados, se puede apreciar que el filtro que más se ajusta a la función de este tercer perfil es la resultante del filtro B-Spline implementado en Mathematica de acuerdo a ISO. Regresando a la imagen 5.53 podemos ver que existe variación entre los 3 perfiles pero la mayor variación se puede ver en el perfil de rugosidad resultante del filtro Gaussiano.

Para el cuarto perfil evaluado, tomando en cuenta los resultados de la Tabla 5.4 actualizada, podemos ver de nuevo que el valor R_z más cercano al medido con la máquina Mahr es de nuevo el filtro B-Spline implementado en Mathematica de acuerdo a la norma ISO y a R_a es el Gaussiano del software NIST, al igual que en los

2 primeros perfiles. Pero para los valores de R_q , el más parecido al que calculó la máquina Mahr es el B-Spline implementado en Mathematica de acuerdo a ISO.

Comparando los valores, como en los casos anteriores, entre los patrones software y los filtros implementados tenemos los siguientes resultados. Para R_a , la mayor diferencia es $0,04 \mu\text{m}$ y la menor se da entre el filtro Gaussiano de NIST y el filtro B-Spline de acuerdo a la norma con $0,00483 \mu\text{m}$. Para el parámetro R_q , la mayor diferencia entre todos ellos es de $0,05 \mu\text{m}$ y la menor diferencia se da entre el filtro 2RC, por convolución, de NIST y el filtro Gaussiano de Mathematica por $0,00572 \mu\text{m}$. Para el valor de R_z , la mayor diferencia la encontramos de $0,5 \mu\text{m}$ entre todos ellos y la menor de $0,007 \mu\text{m}$ entre el filtro Gaussiano de NIST y el Gaussiano de Mathematica.

		Resultados finales para la cuarta pieza evaluada			
		Tipo filtro	$R_a (\mu\text{m})$	$R_q (\mu\text{m})$	$R_z (\mu\text{m})$
	Mahr XCR 20	Gaussian filter	0,60640	0,75220	4,27880
NIST	Gaussian	Fast gaussian	0,60660	0,76658	4,44413
		Convolution	0,60610	0,76579	4,44156
		FFT	0,60610	0,76579	4,44156
	2RC	Recursive	0,59901	0,72992	3,93192
		Convolution	0,63872	0,79111	3,91226
Mathematica	Funciones de Mathematica	Gaussiano	0,63156	0,78539	4,44928
		B-Spline	0,63258	0,78274	4,39640
	ISO TS 16610-22:2006	B-Spline	0,60117	0,74072	4,28125

Tabla 5.4 actualizada– Resultados obtenidos con los distintos tipos de filtro para la 4ª pieza

Si nos fijamos en las 3 gráficas de los filtros implementados en Mathematica, Imagen 5.55, 5.56 y 5.57., podemos ver que en este caso la gráfica que presenta visualmente un mayor grado de ajuste es el filtro implementado con la función “BSplineFunction” de Mathematica. Es capaz de ajustarse con los trayectos de arranque y arrastre incluidos, después de éste podemos considerar que el segundo más ajustado es el B-Spline implementado de acuerdo a ISO y, por último, el filtro

implementado con la función “GaussianFilter” de Mathematica. Inclusive, si nos fijamos en la superposición de las 3, Imagen 5.58, se puede apreciar una diferencia entre ambos B-Spline en los trayectos de arranque y arrastre, y en la longitud restante se aprecian picos de diferencia entre el Gaussiano y los B-Spline.

Por último, en cuanto al tiempo de ejecución, repasaremos la efectividad de los filtros creados respecto al software del NIST. El filtro de la máquina Mahr no entrará a evaluación puesto que el sistema operativo no es el mismo que usamos para los demás filtros.

Para los filtros aplicados en NIST y con ayuda de un cronómetro manual, se estima para la aplicación de cada filtro, alrededor de 2.97 segundos, y para el cálculo de parámetros una media de 2.42 segundos para cada filtro.

En cuanto a los filtros implementados, se utilizó la función de Mathematica “AbsoluteTiming” para tomar el tiempo de ejecución de cada filtro así como del cálculo de parámetros. Se realizó una media para cada uno de ellos, despreciando el primer arranque del programa, en la cual salieron los siguientes datos:

- Filtro Gaussiano: 0,1 seg.
- Filtro B-Spline con función “BSplineFunction: 2,25 seg.
- Filtro B-Spline de acuerdo a norma ISO: 0,65 seg.
- Cálculo de parámetros para cada filtro: 0,81 seg.

7. CONCLUSIONES

En base a estos resultados obtenidos, puede decirse que se han conseguido implementar con éxito tanto los filtros descritos en la norma como un filtro propio. Además, se han comparado los resultados de los filtros implementados con los de un patrón software y los de un rugosímetro aplicándolos a medidas de rugosidad real en 4 piezas de automoción diferentes

De los datos obtenidos se deduce que el Mahr Surf XCR 20 utiliza un filtrado Gaussiano. Comparado el filtro del rugosímetro con los implementados podemos asumir que el mejor filtro para calcular Rz es el filtro B-Spline implementado en

Mathematica de acuerdo a la norma ISO TS 16610-22:2006. Para los valores de R_q y R_a , existen pequeñas variaciones entre los valores que más se aproximan de acuerdo al filtro utilizado, por lo que no podemos asumir cuál filtro sería el más recomendable para utilizar.

Para el tiempo de ejecución, se determina que el cálculo a través del código en Mathematica es mucho más rápido que el código del patrón software, esto es debido en su mayoría a no depender de la conexión a Internet o un navegador, sino directamente al rendimiento de la CPU.

Por lo que finalmente, gracias a los ensayos y tiempos de ejecución obtenidos se determina que el filtro más efectivo en cuanto a resultados y facilidad de cálculo es el filtro que implementamos en Mathematica con ayuda de la norma ISO TS 16610-22:2006.

Como mejoras, se proponen los siguientes puntos:

- Utilizar un valor ya conocido, calculado por un Centro Oficial de Metrología, de un perfil no periódico y evaluar los mismos datos a través de los distintos filtros usados a lo largo de todo el proyecto. Esto con el objetivo de verificar cuál es el mejor filtro a utilizar y poder modificar los parámetros, como β , de la mejor manera posible.
- Implementación del cálculo de más parámetros de rugosidad, como R_{pk} , R_{vk} , etc., y parámetros de ondulación, todos ellos utilizados comúnmente las fábricas industriales.
- Implementación del cálculo de superficies en 3D con un filtro B-Spline, esto puede incluir desde mapas topográficos hasta renderización de imágenes.

Bibliografía

- [1] Mitutoyo (2010). *Boletín técnico "Rugosidad superficial"*.
- [2] S. Poveda (2001). *Acabados superficiales*
- [3] C. González, R. Zeleny (1995). *Metrología*
- [4] J.A. Ortiz (2018). "Contribución al estudio de la rugosidad superficial, obtenida mediante el proceso de fresado en alta velocidad, en la fase de acabado, de aceros templados, de moldes y matrices"
- [5] Lunze, U (2015). *Training documents for AUKOM GD&T*.
- [6] ASME B-46.1 (2009). *Surface Texture(Surface Roughness,Waviness, and Lay)*
- [7] J. Seewig, R.Leach (2013). "Characterisation of Areal Surface Texture – Chapter 4: Areal Filtering Methods"
- [8] ISO 16610-22 (2011). *Especificaciones geométricas del producto. Parte 21: Filtros lineales: filtro Spline*.
- [9] PTB. "Reference software for roughness measurement, RPTB"
- [10] C. Galván (2008). "Nuevo Software para Análisis de Datos de Rugosidad en 2D y 3D"
- [11] I. Patricio (2013). "Caracterización del acabado superficial en la industria aeronáutica y aeroespacial: desarrollo de software patrón de referencia de acuerdo a la norma ISO 5436: VISUALSR2D"
- [12] F. Vera (2018). "Desarrollo de un software para el cálculo y el análisis de parámetros de rugosidad"
- [13] NIST. "Surface Metrology Algorithm Testing System, SMATS"
- [14] ISO 16610-21 (2011). *Especificaciones geométricas del producto. Parte 21: Filtros lineales: filtro Gaussiano*.
- [15] Tabenkin, A. *Surface finish measurements (Level 2)*.
- [16] Meyer, M (2006). *Measurements conditions in shape measurements*.
- [17] M. Tomov (2010). *Function on gaussian and 2RC Filters to determine the roughness profile in real non-periodic and periodic surfaces*
- [18] ASM International (1998). *Metals Handbook Desk Edition, 2nd Edition*
- [19] H. Zhang, J. Song D. Ott, M. Tong y W. Chu (2015). "A Simple and Fast Spline Filtering Algorithm for Surface Metrology"
- [20] NPL. "SoftGauges for Surface Metrology"