



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA



## **ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES**

Departamento de Ingeniería Civil, de Materiales y Fabricación

Área de Conocimiento de Ingeniería de Procesos de Fabricación

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

**Influencia de los parámetros en el texturizado láser  
para operaciones de pulido en aleaciones de Titanio**

Autor: D. José María González de Troya

Tutor: D. Fermín Bañón García

Cotutor: D. Sergio Martín Béjar

Málaga, junio 2025



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Influencia de los parámetros en el  
texturizado láser para operaciones de  
pulido en aleaciones de Titanio





### **Resumen:**

El titanio y sus aleaciones presentan excelentes propiedades mecánicas y de resistencia a la corrosión, lo que los convierte en materiales clave en sectores como la aeronáutica o la biomedicina. Sin embargo, su tratamiento superficial mediante métodos convencionales presenta importantes limitaciones, especialmente cuando se busca alcanzar rugosidades muy bajas sin alterar la integridad del material.

Este proyecto explora el uso del texturizado láser en régimen de nanosegundo como técnica de pulido térmico superficial sobre titanio grado 2. Para ello, se han evaluado los efectos de distintos parámetros del proceso (potencia, velocidad de escaneo, frecuencia y número de pasadas) sobre la calidad superficial, analizando rugosidades tridimensionales mediante parámetros de área como  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_k$  o  $V_{vc}$ .

Los resultados obtenidos permiten identificar combinaciones óptimas de parámetros que reducen significativamente la rugosidad superficial, partiendo de probetas con una alta rugosidad inicial, demostrando el potencial del láser de nanosegundo como alternativa viable y precisa para el acabado superficial de titanio en aplicaciones funcionales.

### **Palabras clave:**

Texturizado láser, titanio, rugosidad, calidad superficial, métodos de mecanizado no convencionales, ablación, láser nanosegundo, pulido térmico, número de pasadas, parámetros láser.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Influencia de los parámetros en el  
texturizado láser para operaciones de  
pulido en aleaciones de Titanio





**Abstract:**

Titanium and its alloys offer excellent mechanical properties and corrosion resistance, making them key materials in sectors such as aerospace and biomedical engineering. However, conventional surface finishing techniques often face significant limitations, especially when aiming to achieve low roughness values without compromising the material's integrity.

This project explores the use of nanosecond pulsed laser texturing as a thermal polishing technique for Grade 2 titanium surfaces. The study evaluates the influence of various process parameters (power, scanning speed, pulse frequency, and number of passes) on surface quality, analysing three-dimensional roughness using areal parameters such as Sa, Sz, Sk, and Vvc.

The results reveal optimal parameter combinations capable of significantly reducing surface roughness of titanium parts with high initial roughness, demonstrating the potential of nanosecond laser technology as a precise and viable alternative for functional surface treatment of titanium components.

**Key words:**

Laser texturing, titanium, roughness, surface quality, non-conventional machining methods, ablation, nanosecond laser, thermal polishing, number of passes, laser parameters.



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

Influencia de los parámetros en el  
texturizado láser para operaciones de  
pulido en aleaciones de Titanio





<b>1. Objeto y alcance</b>	<b>11</b>
<b>2. Antecedentes</b>	<b>12</b>
<b>2.1. Titanio y aleaciones</b>	<b>12</b>
2.1.1. Definición	12
2.1.2. Propiedades	12
2.1.3. Principales aleantes	13
2.1.4. Aplicaciones industriales	14
2.1.5. Unión con materiales disímiles en forma de estructuras híbridas: Stacks FML	18
2.1.6. Necesidad de activar su superficie y activarla para aplicaciones posteriores	19
<b>2.2. Tecnologías de activación superficial</b>	<b>19</b>
2.2.1. Métodos tradicionales	27
2.2.2. Métodos no convencionales	32
2.2.3. Pulido térmico	34
2.2.4. Pulido mediante tecnología de láser pulsado de nanosegundo	36
2.2.5. Estudios y líneas de investigación sobre el uso del texturizado láser en operaciones de pulido	41
<b>3. Metodología experimental</b>	<b>43</b>
<b>3.1. Concepto inicial y texturizado láser de probetas</b>	<b>44</b>
<b>3.2. Evaluación de la calidad superficial tras las operaciones de texturizado láser.</b>	<b>54</b>
<b>3.3. Tratamiento estadístico de datos</b>	<b>62</b>
<b>4. Análisis de resultados</b>	<b>64</b>
<b>4.1. Primera etapa: estudio general de la influencia de los parámetros del equipo láser en la calidad superficial</b>	<b>64</b>
4.1.1. Potencia al 15% (15,75W)	65
4.1.1.1. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sa	66
4.1.1.2. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sz	67
4.1.1.3. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sk	68
4.1.1.4. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Vvc	69
4.1.2. Potencia al 25% (26,25 W)	71
4.1.2.1. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sa	71
4.1.2.2. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sz	73
4.1.2.3. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sk	74
4.1.2.4. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Vvc	75
4.1.3. Potencia al 40% (42 W)	76
4.1.3.1. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sa	77
4.1.3.2. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sz	78
4.1.3.3. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sk	79
4.1.3.4. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Vvc	80
<b>4.2. Segunda etapa: estudio de la influencia del número de pasadas en los parámetros de calidad superficial</b>	<b>82</b>



4.2.1. Estudio de la influencia del número de pasadas en el parámetro de rugosidad superficial Sa	83
4.2.2. Estudio de la influencia del número de pasadas en el parámetro de rugosidad superficial Sz	84
4.2.3. Estudio de la influencia del número de pasadas en el parámetro de rugosidad superficial Sk	86
4.2.4. Estudio de la influencia del número de pasadas en el parámetro de rugosidad superficial Vvc	88
<b>4.3. Tercera etapa: estudio de la influencia de altas velocidades de texturizado en los parámetros de rugosidad superficial</b>	<b>90</b>
4.3.1. Estudio de la influencia de altas velocidades en el parámetro de rugosidad superficial Sa	91
4.3.2. Estudio de la influencia de altas velocidades en el parámetro de rugosidad superficial Sz	92
4.3.3. Estudio de la influencia de altas velocidades en el parámetro de rugosidad superficial Sk	94
4.3.4. Estudio de la influencia de altas velocidades en el parámetro de rugosidad superficial Vvc	95
<b>5. Conclusiones</b>	<b>98</b>
<b>6. Líneas futuras de investigación</b>	<b>100</b>
<b>7. Bibliografía</b>	<b>101</b>

## Índice de figuras

Figura 1, número de publicaciones sobre Ti-6Al-4V desde 1980 [8].	14
Figura 2, Piezas del sector aeronáutico hechas con titanio: a) Conjunto rotor; b) Motor de avión [10].	15
Figura 3, distribución de materiales en el Boeing 787 Dreamliner	16
Figura 4, Implantes biomédicos hechos de titanio: a) Corona dental; b) Prótesis de rodilla y cadera [13], [14].	16
Figura 5, Halo de Fórmula 1	17
Figura 6, stack FML de aluminio. a) Esquema Stack FML; b) Fotografía Stack FML	18
Figura 7, parámetros de rugosidad de perfil	20
Figura 8, caracterización de Sa [22].	21
Figura 9, caracterización de Sz [23]	22
Figura 10, caracterización de Ssk [23]	22
Figura 11, caracterización de Sdr [23]	23
Figura 12, caracterización de Sdq [23]	23
Figura 13, perfil 3D de una superficie	24
Figura 14, defectos y tolerancias de forma [27].	26
Figura 15, piezas sometidas a granallado. a) Durante el proceso; b) Después del proceso [30].	28
Figura 16, comparación superficie granallada y sin granallar [31].	28
Figura 17, pulido mecánico mediante fijación a disco [32].	29



Figura 18, procesos mecánicos. a) Cepillado; b) Bruñido	30
Figura 19, proceso de lapeado [34].	30
Figura 20, decapado químico [36].	31
Figura 21, anodizado. a) Esquema del proceso; b) Piezas de titanio anodizadas [40], [41].	32
Figura 22, CMP (Chemical Mechanical Polishing) [53].	35
Figura 23, LS-MARK-2D Nanosecond Lasing Laser Texturing Equipment	37
Figura 24, pieza de titanio sin texturizar (franja izquierda), texturizada una vez (franja central) y texturizada dos veces (franja derecha)	37
Figura 25, evolución de publicaciones sobre texturizado láser desde 2010 [59]	39
Figura 26, metodología experimental	44
Figura 27, interfaz de control del equipo láser	47
Figura 28, función "Find home"	47
Figura 29, trazo de la circunferencia a texturizar	48
Figura 30, ajuste de la circunferencia a texturizar	48
Figura 31, botón "Hatch"	49
Figura 32, menú de configuración del patrón de texturizado	50
Figura 33, configuración de parámetros	50
Figura 34, botón "Red" para asistencia de colocación de la probeta	51
Figura 35, puntos de haz láser	51
Figura 36, calibrado del láser de texturizado	52
Figura 37, extractor de gases. a) Botón de encendido; b) Extractor encendido	52
Figura 38, función "Mark"	53
Figura 39, equipo de evaluación superficial InfiniteFocus SL de Alicona	54
Figura 40, botón de calibración y vuelta al origen	54
Figura 41, periférico de alta precisión del microscopio confocal	55
Figura 42, colocación de la pieza en la base del microscopio confocal	55
Figura 43, función "Focusing Help"	56
Figura 44, función de ajuste de brillo automático	56
Figura 45, ajuste de rango focal para el escaneo	57
Figura 46, interfaz con la pieza ya escaneada	58
Figura 47, ajuste del sistema de referencia en la pieza	58
Figura 48, botón para la eliminación de forma "Form Removal"	59
Figura 49, pestaña de eliminación de forma original	59
Figura 50, botón "Surface Texture Measurement"	60
Figura 51, interfaz de medida de rugosidad	60
Figura 52, pestaña de medición de parámetros	61
Figura 53, superficie escaneada	62
Figura 54, superficie después de eliminar la forma original	62
Figura 55, superficie 3D de las probetas. a) 1 (P=15%, f=45 kHz, v=50mm/s); b) 13 (P=40%, f=45 kHz, v=50 mm/s); c) 18 (P=15%, f=15 kHz, v=500 mm/s).	64
Figura 56, variación de Sa a potencia 15% (15,8 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	67
Figura 57, variación de Sz a 15% de potencia (15,8 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada.	68
Figura 58, variación de Sk para 15% de potencia (15,8 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	69
Figura 59, variación de Vvc para 15% de potencia (15,8 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	70
Figura 60, variación de Sa a potencia 25% (26,25 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	73
Figura 61, variación de Sz a potencia 25% (26,25 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	74



Figura 62, variación de $S_k$ a potencia 25% (26,25 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	75
Figura 63, variación de $V_{vc}$ a potencia 25% (26,25 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	76
Figura 64, variación de $S_a$ a potencia 40% (42 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	78
Figura 65, variación de $S_z$ a potencia 40% (42 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	79
Figura 66, variación de $S_k$ a potencia 40% (42 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	80
Figura 67, variación de $V_{vc}$ a potencia 40% (42 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada	80
Figura 68, variación de $S_a$ en función del número de pasadas	84
Figura 69, variación de $S_z$ en función del número de pasadas	85
Figura 70, variación de $S_k$ en función del número de pasadas	87
Figura 71, variación de $V_{vc}$ en función del número de pasadas	89
Figura 72, variación de $S_a$ en función de la potencia y la velocidad	92
Figura 73, variación de $S_z$ en función de la potencia y la velocidad	93
Figura 74, variación de $S_k$ en función de la potencia y la velocidad	95
Figura 75, variación de $V_{vc}$ en función de la potencia y la velocidad	96

## Índice de tablas

Tabla 1, tabla de composición del Ti-6Al-4V	13
Tabla 2, tabla de propiedades de la aleación Ti-6Al-4V	14
Tabla 3, valores de rugosidad recomendados en la industria	25
Tabla 4, parámetros relevantes para el texturizado láser	41
Tabla 5, parámetros de rugosidad de las probetas sin tratar	45
Tabla 6, orden de las probetas en función de la densidad de energía	46
Tabla 7, probetas texturizadas a 15% de potencia (15,8W).	65
Tabla 8, probetas texturizadas a 25% de potencia (26,25 W)	71
Tabla 9, probetas texturizadas a 40% de potencia (42 W)	77
Tabla 10, variación de los parámetros entre la segunda y la primera pasada de texturizado de las combinaciones de la primera etapa	83



## 1. Objeto y alcance

El titanio es un material estratégico de alto valor tecnológico utilizado en sectores de exigencia como la aeronáutica, la biomedicina o la industria química, debido a su excelente relación resistencia-peso, su resistencia a la corrosión y su elevada biocompatibilidad. No obstante, estas mismas cualidades dificultan su mecanizado y, especialmente, su acabado superficial, ya que los métodos tradicionales presentan limitaciones tanto en precisión como en eficiencia. Obtener superficies con rugosidades bajas sin afectar la microestructura del material sigue siendo un reto técnico importante.

Ante esta situación, el uso de tecnologías láser ha emergido como una alternativa de gran interés, particularmente en aplicaciones donde se requieren acabados funcionales, control térmico preciso y la posibilidad de trabajar con geometrías complejas sin contacto físico. Dentro de estas tecnologías, el texturizado láser por pulsos en régimen de nanosegundo representa una solución intermedia entre los sistemas continuos convencionales y los ultrarrápidos (pico y femtosegundo), permitiendo modificar la superficie con buena resolución, control térmico razonable y una estructura de costes más asumible para su transferencia industrial.

El presente Trabajo Fin de Grado, titulado “Influencia de los parámetros en el texturizado láser para operaciones de pulido en aleaciones de Titanio”, tiene como objetivo estudiar la influencia de los parámetros de procesado en la calidad superficial del titanio, tomando como referencia el titanio grado 2. Se investigará cómo afectan variables como la potencia, la frecuencia del láser, la velocidad de escaneo y el número de pasadas sobre la rugosidad final del material. Para ello, se realizarán pruebas experimentales sobre probetas metálicas sometidas a diferentes combinaciones de tratamiento láser, analizando posteriormente su superficie mediante parámetros de rugosidad tridimensional definidos en la norma ISO 25178:2023, como Sa, Sz, Sk o Vvc.

El alcance de este trabajo incluye tanto la caracterización inicial como el análisis comparativo de los resultados obtenidos a partir de los distintos tratamientos aplicados, con el fin de identificar condiciones óptimas que permitan reducir la rugosidad superficial de forma eficiente y repetible. Los resultados podrán servir de base para futuras líneas de investigación o implementación industrial en procesos de pulido láser de componentes de titanio, con especial interés en aplicaciones funcionales donde el acabado superficial resulta crítico para el rendimiento del producto.



## 2. Antecedentes

En este apartado se expondrán los conocimientos previos necesarios para la comprensión y desarrollo del presente trabajo, incluyendo aspectos fundamentales sobre el titanio y sus aleaciones, las técnicas de activación superficial y los procesos de pulido láser, así como el contexto tecnológico en el que se enmarca el estudio.

### 2.1. Titanio y aleaciones

El titanio es un material metálico estratégico ampliamente utilizado en sectores de alta exigencia como la aeronáutica, la medicina o la industria química, gracias a su excelente combinación de ligereza, resistencia mecánica, estabilidad térmica y resistencia a la corrosión. Su comportamiento puede adaptarse significativamente mediante aleaciones o tratamientos superficiales, lo que ha convertido al titanio en un elemento clave en el desarrollo de tecnologías estructurales avanzadas. A continuación, se describen sus principales características, propiedades y aplicaciones.

#### 2.1.1. Definición

El titanio (Ti) es un elemento metálico de transición, situado en el grupo IVB de la tabla periódica, cuyo número atómico es 22. Descubierta por William Gregor en 1791, no fue hasta mediados del siglo XX cuando comenzó a consolidarse su uso industrial, debido a la complejidad asociada a su extracción y procesamiento. Se encuentra abundantemente en la corteza terrestre, aunque raramente en estado puro, siendo sus principales fuentes minerales el rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) y la ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ). La particularidad del titanio reside en su combinación única de propiedades mecánicas, térmicas y químicas, lo que lo ha convertido en un material estratégico en sectores de altas prestaciones tecnológicas como la aeronáutica, la energía, la medicina o la industria química [1].

#### 2.1.2. Propiedades

La relevancia del titanio a nivel tecnológico se debe, en gran medida, a su elevada relación resistencia-peso. Con una densidad de  $4,5 \text{ g/cm}^3$  (significativamente inferior a la del acero) y una resistencia mecánica comparable, el titanio permite la fabricación de componentes estructurales ligeros sin comprometer la integridad o el rendimiento mecánico [2]. Además, presenta una excelente resistencia a la corrosión gracias a la formación espontánea de una capa pasiva de óxido ( $\text{TiO}_2$ ) que protege la superficie frente a medios agresivos, incluidos ambientes marinos y biológicos.

En cuanto a sus propiedades térmicas, el titanio posee un bajo coeficiente de expansión térmica y una notable estabilidad a altas temperaturas, conservando

su integridad estructural hasta aproximadamente 600 °C. También destaca por su resistencia a la fatiga, su carácter no magnético y su alta biocompatibilidad, lo que lo convierte en un material especialmente valorado en el diseño de componentes médicos implantables [3].

### 2.1.3. Principales aleantes

El titanio puro, aunque útil en aplicaciones específicas, encuentra sus principales aplicaciones en forma de aleaciones, cuya composición permite adaptar sus propiedades a diferentes requerimientos industriales. Estas aleaciones se clasifican según su microestructura en tres grupos principales: alfa ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ) y alfa-beta ( $\alpha+\beta$ ). Las aleaciones del grupo alfa, estabilizadas con elementos como el aluminio o el oxígeno, ofrecen buena resistencia a la fluencia y excelente comportamiento a altas temperaturas, aunque presentan cierta limitación en su conformabilidad. Por otro lado, las aleaciones beta, que incluyen elementos estabilizadores como el molibdeno, el vanadio o el niobio, permiten tratamientos térmicos más versátiles y una mayor facilidad de conformado en frío.

El grupo más empleado en la industria es el de las aleaciones alfa-beta, que combinan características de ambas fases y proporcionan un equilibrio óptimo entre resistencia, ductilidad, soldabilidad y respuesta térmica. En este grupo destaca la aleación Ti-6Al-4V, que representa más del 50% del uso mundial de titanio y tiene un comportamiento excepcional en aplicaciones aeroespaciales, biomédicas e industriales, gracias a su buena resistencia mecánica, tenacidad y estabilidad frente a la corrosión [4]. En la **Tabla 1** se puede ver la tabla de composición de la aleación Ti-6Al-4V, y en la

**Tabla 2** una tabla con sus propiedades mecánicas [5,6].

*Tabla 1, tabla de composición del Ti-6Al-4V*

Elemento	Símbolo	% en peso (aproximado)
Titanio	Ti	Resto ( $\approx 88,9 - 91,0\%$ )
Aluminio	Al	5,5 – 6,75%
Vanadio	V	3,5 – 4,5%
Hierro	Fe	$\leq 0,40\%$
Oxígeno	O	$\leq 0,20\%$
Carbono	C	$\leq 0,08\%$
Nitrógeno	N	$\leq 0,05\%$
Hidrógeno	H	$\leq 0,015\%$
Otros	-	$\leq 0,40\%$ (cada uno $\leq 0,10\%$ )

Tabla 2, tabla de propiedades de la aleación Ti-6Al-4V

Propiedad	Valor típico
Densidad	4,43 g/cm <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción (UTS)	895 – 965 MPa
Límite elástico (0,2% offset)	825 – 880 MPa
Alargamiento a la rotura	10 – 15%
Módulo de elasticidad	110 GPa
Dureza (Rockwell C)	36 – 41 HRC
Tenacidad a la fractura (K <sub>IC</sub> )	55 – 75 MPa·√m
Temperatura máxima de servicio	400 – 600 °C

En la **Figura 1** se puede observar la evolución en el número de publicaciones que estudian e investigan esta aleación de titanio cada año, donde es exponencial el aumento que han experimentado confirmando su gran versatilidad y buena combinación de propiedades mecánicas [7].

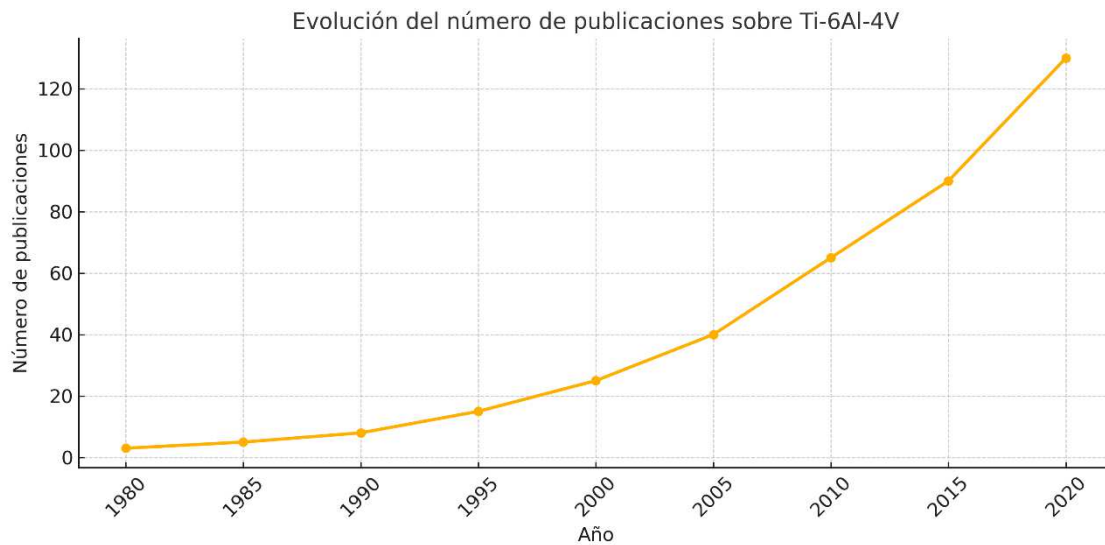


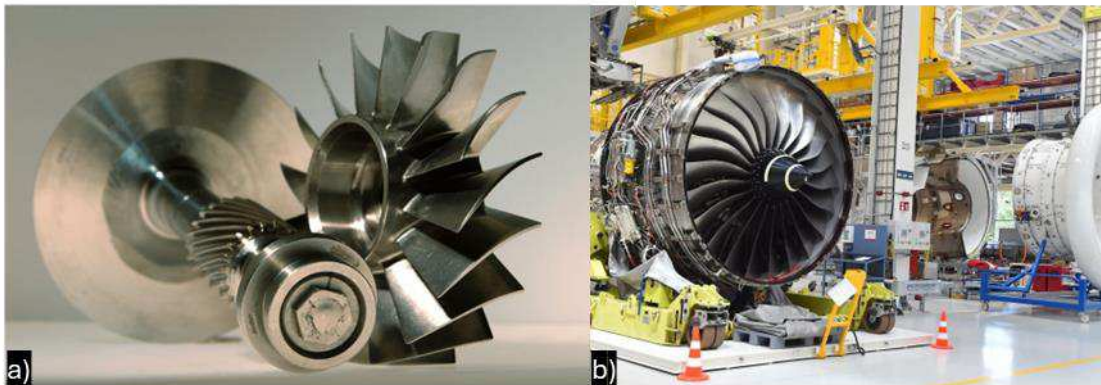
Figura 1, número de publicaciones sobre Ti-6Al-4V desde 1980 [8].

#### 2.1.4. Aplicaciones industriales

El titanio ha adquirido un papel fundamental en múltiples industrias gracias a su combinación única de propiedades mecánicas, químicas y biológicas. Su resistencia específica elevada, junto con su excelente comportamiento frente a la corrosión y su biocompatibilidad, lo convierten en un material idóneo para sectores con requerimientos extremos, tanto en términos de rendimiento estructural como de durabilidad superficial. A medida que los procesos de fabricación se han sofisticado, también lo ha hecho la capacidad para explotar

plenamente el potencial del titanio, abriendo nuevas aplicaciones donde antes no era viable ni económicamente accesible.

En la industria aeroespacial, el titanio es un material estratégico, utilizado en la fabricación de estructuras aeronáuticas, sistemas de escape, trenes de aterrizaje y componentes de motores de reacción. Su capacidad para soportar esfuerzos cíclicos en condiciones térmicas y químicas extremas lo convierte en una opción preferente frente al acero inoxidable o al aluminio en zonas críticas del fuselaje o en las carcasas de turbinas. La aleación Ti-6Al-4V, en particular, ha sido empleada con gran éxito en los motores de aviones comerciales y militares debido a su excelente relación resistencia/peso y su estabilidad térmica hasta temperaturas cercanas a los 600 °C (ver **Figura 2**) [9]. Además, su compatibilidad con tecnologías de fabricación aditiva ha permitido la producción de componentes optimizados topológicamente que antes eran inviables con técnicas convencionales, reduciendo el peso estructural sin comprometer el rendimiento.



*Figura 2, Piezas del sector aeronáutico hechas con titanio: a) Conjunto rotor; b) Motor de avión [10].*

Para ilustrar la relevancia del titanio en la industria aeroespacial, basta observar su presencia en aeronaves de última generación como el Boeing 787 Dreamliner (**Figura 3b**) y el Airbus A350 XWB, donde representa aproximadamente un 15% y un 14% del peso estructural total, respectivamente [9]. Este metal se utiliza en trenes de aterrizaje, pilones de motor, anclajes estructurales y uniones con materiales compuestos, no solo por su elevada resistencia específica y su comportamiento estable a altas temperaturas, sino también por su excelente resistencia a la corrosión, que reduce significativamente los costes de mantenimiento a lo largo del ciclo de vida de la aeronave. Su compatibilidad térmica con composites, gracias a un coeficiente de expansión similar, refuerza aún más su papel como material estratégico en aeronaves diseñadas para combinar ligereza estructural y eficiencia energética [11].

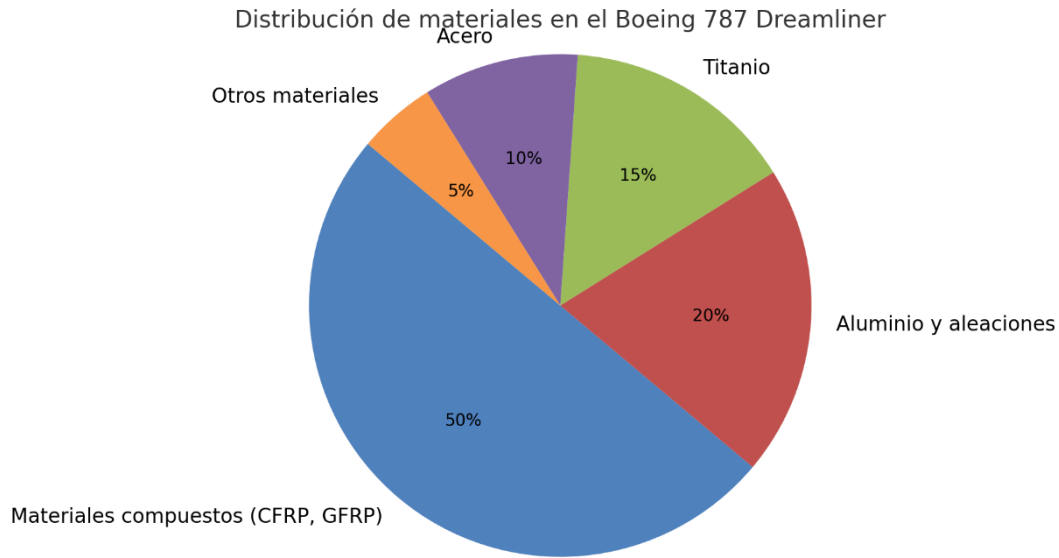


Figura 3, distribución de materiales en el Boeing 787 Dreamliner

En el ámbito biomédico, el titanio ha sido considerado durante décadas como el estándar de oro para implantes ortopédicos, dispositivos quirúrgicos y dentales, donde se emplea en coronas dentales sustituyendo a la raíz del diente, prótesis fijas e implantes. Su biocompatibilidad, debida en gran parte a la formación espontánea de una capa de óxido de titanio ( $TiO_2$ ), evita la reacción inmunológica y permite una integración ósea eficaz (osteointegración). Las aleaciones como Ti-6Al-4V ELI (extra-low interstitials) se utilizan en prótesis articulares, placas, tornillos, clavos intramedulares y válvulas cardíacas, garantizando tanto estabilidad mecánica como neutralidad biológica a largo plazo, **Figura 4** [12]. Además, los recientes avances en nanotexturizado y recubrimientos bioactivos sobre titanio han ampliado sus posibilidades terapéuticas, mejorando la proliferación celular y reduciendo el riesgo de infección postoperatoria.

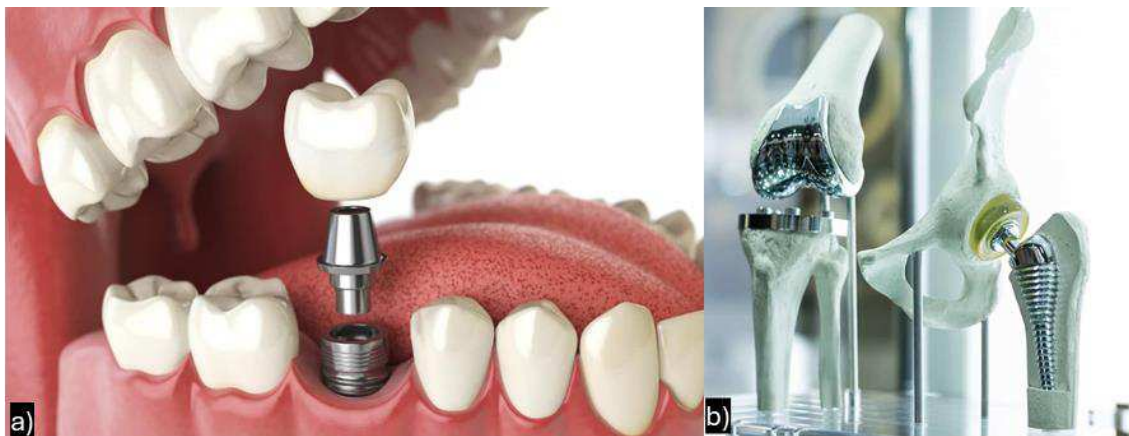
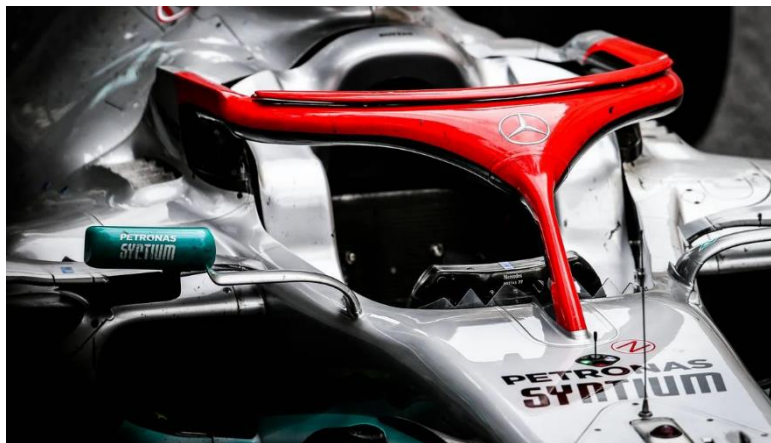


Figura 4, Implantes biomédicos hechos de titanio: a) Corona dental; b) Prótesis de rodilla y cadera [13,14].

En la industria química y energética, el titanio se emplea extensamente en entornos altamente corrosivos, donde otros metales fallarían rápidamente. Equipos como intercambiadores de calor, tanques de almacenamiento, reactores y condensadores en plantas desalinizadoras o nucleares están fabricados o revestidos con titanio, ya que este metal resiste con eficacia la acción de medios ácidos, salinos y oxidantes. Su longevidad estructural en estas condiciones ha demostrado ser una inversión rentable en aplicaciones donde la fiabilidad del sistema es crítica y el coste de reemplazo resulta elevado [11].

También ha crecido su uso en sectores como la automoción de alto rendimiento, donde se valora su ligereza y resistencia en la fabricación de válvulas de motor, sistemas de escape y componentes estructurales para vehículos deportivos y de competición. Como adición reciente cumpliendo la función de seguridad pasiva destaca el “Halo” de la Fórmula 1, completamente hecho de titanio, proporcionando un compromiso entre rigidez estructural y ligereza, ver en la **Figura 5**. En la industria de bienes de consumo y equipamiento deportivo, su combinación de baja densidad y alta durabilidad ha dado lugar a productos de alta gama como cuadros de bicicletas, palos de golf o relojes. Incluso en sectores de vanguardia como la industria electrónica, el titanio se está integrando en encapsulados, contactos eléctricos y disipadores térmicos, especialmente cuando se requiere un equilibrio entre conductividad, resistencia mecánica y comportamiento químico neutro [15].



*Figura 5, Halo de Fórmula 1*

Este amplio espectro de aplicaciones refleja el carácter transversal del titanio como material de ingeniería. A medida que evolucionan los procesos de manufactura avanzada (incluyendo el mecanizado láser, el pulido térmico, la fabricación aditiva y los tratamientos superficiales asistidos por plasma o químicos) se expande también la frontera de lo posible en su aplicación. En este sentido, el titanio no es sólo un material resistente y duradero, sino un habilitador

tecnológico que transforma la forma en que diseñamos y fabricamos productos en sectores de alta exigencia.

### 2.1.5. Unión con materiales disímiles en forma de estructuras híbridas: Stacks FML

Otra de las líneas de desarrollo más destacadas en el ámbito de las aleaciones de titanio es su creciente utilización en estructuras híbridas, donde se combina con materiales de naturaleza distinta (como otros metales o compuestos poliméricos reforzados) con el objetivo de optimizar el rendimiento estructural sin aumentar el peso total del componente. Este enfoque responde a la necesidad de materiales capaces de ofrecer simultáneamente resistencia mecánica, ligereza, tenacidad y funcionalidad superficial, especialmente en sectores como la aeronáutica, donde los requisitos de eficiencia y seguridad estructural son cada vez más exigentes [9,16].

En este contexto, el titanio actúa como componente metálico clave dentro de configuraciones multicapa, aportando su conocida resistencia a la corrosión, su tolerancia al daño y su comportamiento estable frente a esfuerzos térmicos. Estas estructuras, conocidas como Fiber Metal Laminates (FML), representan una evolución en la ingeniería de materiales hacia soluciones integradas, en las que las propiedades de cada capa se complementan para superar las limitaciones de los materiales individuales.

Los “*Fiber Metal Laminates*” (FML) son materiales compuestos multicapa formados por la alternancia de láminas metálicas y capas de material compuesto reforzado con fibras, ver **Figura 6**, donde para el titanio es la misma estructura. Cuando el titanio se utiliza como componente metálico, se conforman estructuras híbridas tipo Stacks FML, ampliamente empleadas en la industria aeronáutica debido a su muy buen comportamiento frente a impactos, su capacidad para absorber energía y su elevada resistencia específica [12].

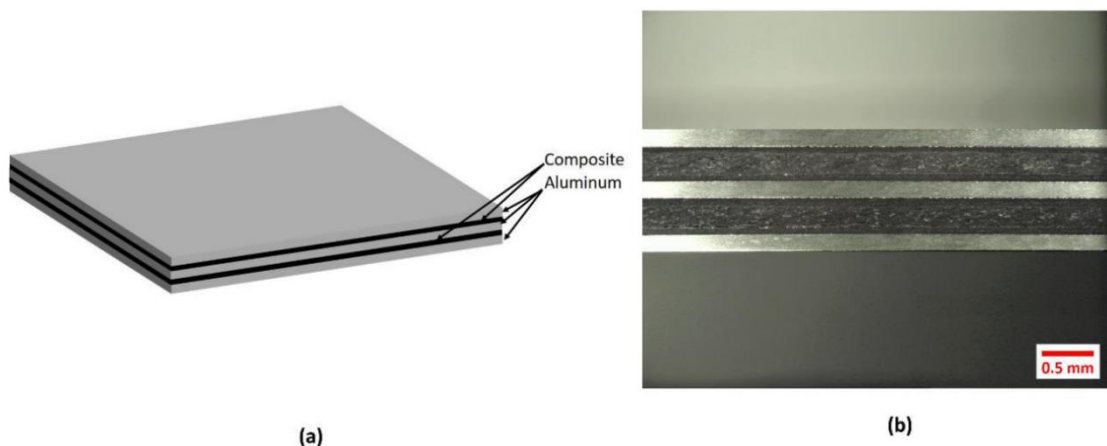


Figura 6, stack FML de aluminio. a) Esquema Stack FML; b) Fotografía Stack FML

En estas estructuras, el titanio aporta tenacidad, resistencia a la corrosión y protección frente a agentes externos, mientras que las capas interiores de compuestos poliméricos (normalmente reforzados con fibra de carbono o fibra de vidrio) proporcionan rigidez y ligereza. Esta combinación de materiales permite optimizar el rendimiento estructural sin aumentar significativamente el peso.

En la actualidad, los Stacks FML con titanio se utilizan principalmente en componentes aeronáuticos que requieren una elevada resistencia al daño, capacidad de absorción de energía y tolerancia estructural frente a impactos o defectos internos. El desarrollo continuo de estas soluciones híbridas y la mejora de las técnicas de unión han abierto nuevas posibilidades en campos como la automoción de alto rendimiento, la defensa y la implantología avanzada.

### 2.1.6. Necesidad de activar su superficie y activarla para aplicaciones posteriores

Aunque la capa pasiva de  $TiO_2$  confiere al titanio una excelente resistencia química, también representa una barrera en procesos donde se requiere una interacción directa con otros materiales, como en adhesión, recubrimientos, unión por difusión o deposición funcional. Por ello, es habitual recurrir a técnicas de activación superficial, orientadas a modificar las propiedades fisicoquímicas de la superficie del titanio. Estas técnicas tienen como finalidad aumentar la energía superficial, generar rugosidad controlada o incluso sustituir la capa natural por otra más compatible mecánica o químicamente con el proceso posterior [17].

Entre los métodos empleados se encuentran el ataque ácido, el anodizado, el granallado, el chorro abrasivo, el tratamiento láser o los métodos físicos como el plasma o la deposición en fase vapor. Estas técnicas permiten mejorar la mojabilidad, la adherencia, la compatibilidad con polímeros o resinas y, en general, la calidad de la interfaz en estructuras multicapa o recubiertas.

## 2.2. Tecnologías de activación superficial

La calidad superficial de un material es un factor crítico en multitud de aplicaciones industriales, especialmente en sectores como la aeronáutica, la biomedicina o la microelectrónica, donde la funcionalidad de las piezas depende directamente de sus características topográficas a micro y nanoescala. Uno de los parámetros clave para evaluar dicha calidad es la rugosidad superficial, concepto que describe las irregularidades presentes sobre una superficie real respecto a una superficie ideal o teórica perfectamente lisa.

La rugosidad no solo actúa como un descriptor geométrico de la superficie, sino que cumple un papel funcional esencial en numerosos procesos industriales. Su valor influye directamente en la capacidad de contacto, la adherencia, la resistencia al desgaste, la respuesta biológica y la calidad estética o de replicado de una pieza [18,19].

En sectores como la automoción o la óptica, la reducción de la rugosidad superficial mediante pulido es fundamental para obtener superficies altamente lisas, que minimicen la fricción en moldes de inyección, mejoren la reflexión de la luz o aseguren una transferencia térmica eficiente [20]. Del mismo modo, en áreas como la odontología, la joyería o la fabricación de modelos para prototipado, el acabado superficial controla la precisión del detalle, permitiendo obtener réplicas exactas y sin defectos en procesos de fundición o impresión [21]. También en el ámbito biomédico, la rugosidad condiciona la respuesta celular y la integración tisular en implantes, donde se buscan superficies con texturas controladas para favorecer la osteointegración [17]. Por tanto, la gestión de la rugosidad no es solo un criterio de calidad dimensional, sino una herramienta para adaptar la funcionalidad final del componente a su aplicación específica.

La rugosidad se mide cuantificando la desviación de la superficie respecto a una línea media, habitualmente a través de parámetros estandarizados. Tradicionalmente, estas mediciones se realizaban siguiendo una traza lineal sobre la superficie, obteniendo parámetros como la altura media de rugosidad ( $R_a$ ), que representa el promedio aritmético de las desviaciones absolutas respecto a la línea central en un tramo de medición determinado [18], ver **Figura 7**.

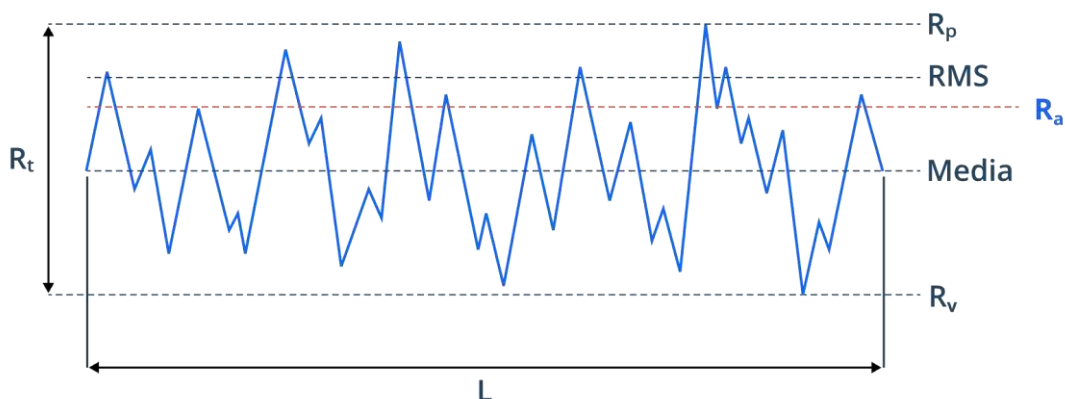


Figura 7, parámetros de rugosidad de perfil

Los parámetros de rugosidad, tanto lineales como de área, están regulados principalmente por las normas ISO de la serie UNE-EN ISO 21920:2023, ISO

4288:1996 e ISO 25178-2:2023, que establecen definiciones, procedimientos de medición y criterios de evaluación.

- UNE-EN ISO 21920:2023: Define los parámetros tradicionales de rugosidad lineal ( $R_a$ ,  $R_q$ ,  $R_z$ , etc.) y su cálculo a partir de un perfil bidimensional.
- ISO 4288:1996: Establece reglas de evaluación (criterios de aceptación, longitud de evaluación, número de mediciones, etc.) para parámetros de perfil.
- ISO 25178-2:2023: Es la norma que define los parámetros de superficie tridimensional ( $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$ ,  $S_{dr}$ ,  $S_k$ , etc.). Es considerada la evolución natural de la ISO 4288 hacia una caracterización más realista en 3D.

Además, la norma ISO 16610:2015 aborda la separación de componentes (forma, ondulación y rugosidad) mediante filtrado (por ejemplo, filtro Gaussiano) y es clave para la correcta interpretación de rugosidad, el cual se utilizará en la metodología experimental.

Sin embargo, con la evolución de las necesidades industriales y el desarrollo de tecnologías de medición más avanzadas (como la microscopía confocal, la interferometría óptica o los perfiles 3D de láser), la caracterización de la rugosidad ha pasado de basarse en perfiles lineales a contemplar la superficie completa, como se ve en la **Figura 13**. Esto ha permitido la introducción de parámetros de área, como:

Parámetros de superficie (ISO 25178-2:2023):

- $S_a$ : altura media aritmética sobre una superficie. Es el equivalente tridimensional de  $R_a$ , representando la media de las desviaciones absolutas de la superficie respecto a una superficie de referencia (ver **Figura 8**).

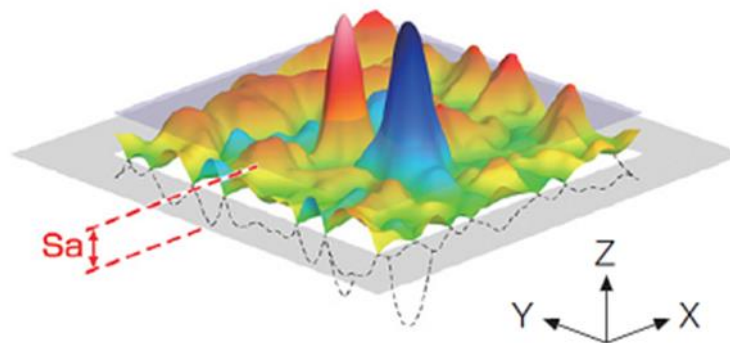


Figura 8, caracterización de  $S_a$  [22].

- $Sq$ : desviación estándar de la altura.
- $Sz$  (**Figura 9**): altura máxima entre el pico más alto y el valle más profundo de la superficie.

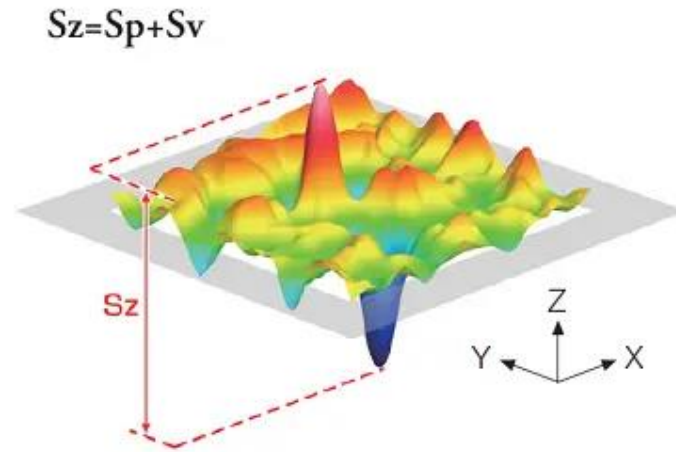


Figura 9, caracterización de  $Sz$  [23]

- $Sku$ : coeficiente de curtosis, relacionado con la concentración de picos y valles.

Parámetros de función de soporte (ISO 21920-2:2023):

- $Sk$ : profundidad del núcleo de rugosidad, útil para evaluar la capacidad de carga de la superficie.
- $Ssk$  (**Figura 10**): coeficiente de asimetría de la distribución de alturas (asimetría).

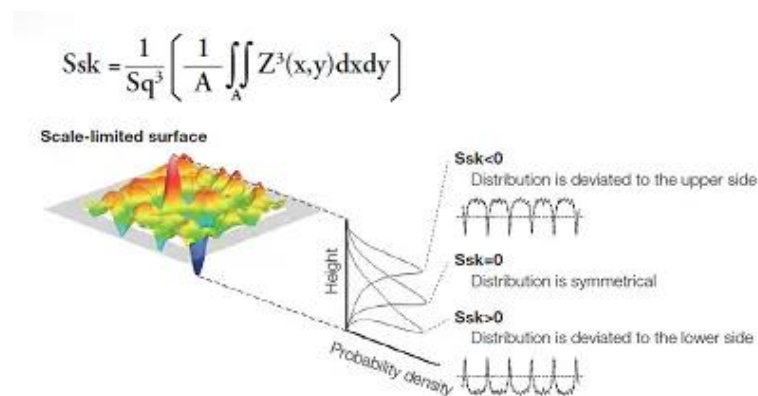


Figura 10, caracterización de  $Ssk$  [23]

Parámetros híbridos:

- Sdr (**Figura 11**): índice de desarrollo de la superficie, que expresa el incremento porcentual del área real frente al área proyectada (relacionado con la complejidad topográfica).

$$Sdr = \frac{1}{A} \left[ \iint_A \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2} - 1 \right) dx dy \right]$$

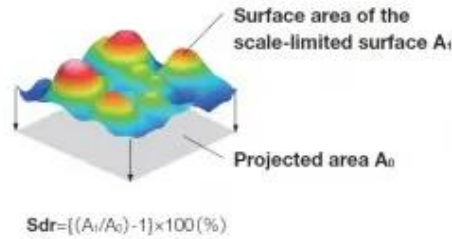


Figura 11, caracterización de Sdr [23]

- Sdq (**Figura 12**): gradiente medio cuadrático, este parámetro expande el parámetro de perfil (rugosidad lineal) Rdq a tres dimensiones. Indica la magnitud media del gradiente local (pendiente) de la superficie. La superficie estará más inclinada a medida que el valor del parámetro Sdq aumenta.

$$Sdq = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A \left[ \left( \frac{\partial z(x,y)}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial z(x,y)}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy}$$

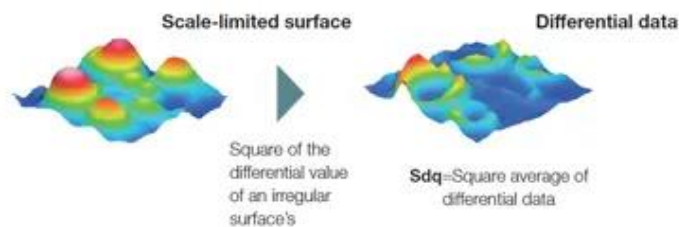


Figura 12, caracterización de Sdq [23]

Parámetros de volumen (ISO 25178-2:2023):

- Vvc: volumen del material en los valles, empleado en contextos tribológicos para valorar la retención de lubricantes o fluidos funcionales.
- Vmp: volumen de los picos materiales, mide el volumen de material contenido en los picos de la superficie, relevante para aplicaciones donde la capacidad de carga es crucial.
- Vmc: volumen de material del núcleo, e valúa el volumen de material en el núcleo de la superficie, proporcionando una medida de la capacidad de soporte.

- Vvv: volumen de valles de vacío, mide el volumen de vacío en los valles de la superficie, importante para la retención de líquidos y la capacidad de drenaje.

Estos parámetros permiten una caracterización mucho más completa del comportamiento funcional de una superficie, especialmente en procesos donde la interacción superficial es crítica, como la adhesión, la fricción o la biocompatibilidad [19].

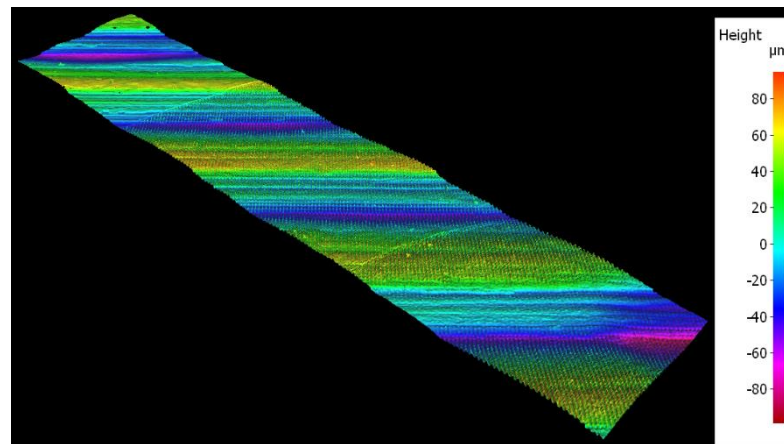


Figura 13, perfil 3D de una superficie

En numerosas ocasiones se prefiere trabajar con parámetros de área como  $S_a$  en lugar de parámetros de perfil como ( $R_a$ ,  $R_z$ , ...), debido a que estos solo analizan una línea del relieve superficial, lo que implica:

- Sensibilidad a la dirección de la medición.
- Pérdida de información tridimensional.
- Representación incompleta de la morfología real.

En cambio, los parámetros de área ( $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$ ,  $S_{dr}$ ...) evalúan una superficie completa, lo que permite:

- Capturar texturas anisotrópicas o irregulares.
- Relacionar directamente la topografía con funciones como retención de lubricante, adhesión o crecimiento celular.
- Obtener descriptores estadísticos más robustos.

Por ejemplo,  $S_a$  representa la rugosidad media de toda una superficie, no solo de una línea, lo que lo hace más representativo en procesos como el pulido láser, donde la energía puede distribuirse de forma heterogénea en el plano [19]

En cuanto a los valores de referencia, para considerar una superficie como pulida de forma técnica, se suelen manejar valores de rugosidad  $R_a$  inferiores a  $0,2 \mu\text{m}$ , mientras que en aplicaciones de alta precisión óptica o biomédica se requiere

alcanzar  $S_a$  inferiores a  $0,05 \mu\text{m}$  [24]. Por tanto, cualquier proceso de pulido, incluyendo los tratamientos de activación superficial que aquí se estudian, tiene como objetivo fundamental la reducción controlada de la rugosidad hasta alcanzar valores compatibles con los requerimientos funcionales de cada aplicación.

Los valores deseables de rugosidad varían en función del sector y la aplicación específica [12,17,20,25,26]. A modo orientativo:

*Tabla 3, valores de rugosidad recomendados en la industria*

Aplicación	Parámetro	Valor típico
Uniones adhesivas estructurales	$S_a$	$0,5-1,5 \mu\text{m}$
Componentes aeronáuticos (ajuste metálico)	$R_a$	$0,4-1,6 \mu\text{m}$
Prótesis o implantes dentales	$S_a$	$0,2-0,8 \mu\text{m}$
Óptica de precisión	$S_a$	$< 0,05 \mu\text{m}$
Moldes y matrices	$R_a$	$0,1-0,8 \mu\text{m}$

La evaluación precisa de una superficie no puede limitarse a observar únicamente su rugosidad. En realidad, toda superficie técnica está compuesta por irregularidades que actúan en distintas escalas, y que deben ser correctamente clasificadas para realizar una caracterización funcional fiable. Estas irregularidades se agrupan habitualmente en tres categorías jerárquicas:

- Defectos de forma: son las desviaciones de gran escala respecto a la geometría teórica de la pieza. Incluyen errores como alabeo, ovalización, conicidad, torsión o inclinaciones. Estos defectos afectan la geometría global del componente y suelen deberse a errores en el mecanizado, deformaciones térmicas o tensionales durante el enfriamiento [19].
- Ondulación: corresponde a irregularidades de media frecuencia, como las que se generan por vibraciones en el sistema de mecanizado, herramientas inestables o condiciones de corte variables. Pueden alterar propiedades tribológicas o provocar resonancias indeseadas.
- Rugosidad: hace referencia a las irregularidades de alta frecuencia, o microrrelieve, generadas por la interacción directa entre la herramienta y la pieza. Es el componente más directamente asociado al contacto superficial, adhesión, desgaste y funcionalidad fina.

Tolerancias de Forma				
Rectitud		Una línea contenida en la superficie superior paralela al plano de proyección sobre el que se da la inclinación, debe estar contenida entre dos líneas paralelas distantes en $t=0,1$ (d es cualquier distancia).	Redondez	El contorno del cono debe estar comprendido entre dos circunferencias separadas entre sí 0.06 mm
		Cualquier generatriz del cilindro ha de estar comprendida entre dos rectas // separadas entre sí 0.06 mm	Cilindricidad	La superficie considerada debe estar comprendida entre dos cilindros coaxiales separados entre sí 0.07 mm.
		El eje del cilindro ha de estar comprendido en una zona cilíndrica de diámetro 0.06 mm	Forma de una línea cualquiera	La línea debe estar comprendida entre dos líneas envolventes de círculos de diámetro $t=0,05$ cuyos centros están situados sobre una línea con la forma geométrica teórica.
Planitud		La superficie debe estar comprendida entre dos planos // separados entre sí, 0.06 mm	Forma de una superficie cualquiera	La superficie debe estar comprendida entre dos superficies envolventes de esferas de diámetro $t=0,2$ cuyos centros están situados sobre una superficie con la forma geométrica correcta.

Figura 14, defectos y tolerancias de forma [27].

Para poder medir la rugosidad de forma precisa, es necesario eliminar los efectos de la forma y la ondulación, ya que su presencia distorsionaría los parámetros obtenidos. Esta operación se realiza mediante el uso de filtros matemáticos, que permiten separar los componentes de baja frecuencia (forma y ondulación) de los de alta frecuencia (textura fina).

El método más aceptado y estandarizado para ello es el uso del filtro gaussiano, definido en la norma ISO 16610-21. Este filtro actúa sobre el perfil medido o la superficie tridimensional, permitiendo atenuar gradualmente las irregularidades de mayor longitud de onda. De esta forma, la rugosidad queda aislada como componente residual de alta frecuencia [18].

El elemento clave en este filtrado es la longitud de corte o cut-off ( $\lambda_c$ ). Este valor actúa como un umbral de frecuencia espacial, es decir, marca la frontera entre lo que se considera ondulación y lo que se considera rugosidad. Todo componente de la superficie con una longitud de onda mayor a  $\lambda_c$  es eliminado del análisis de rugosidad, mientras que los detalles más finos (por debajo de esa escala) se conservan para calcular parámetros como Ra, Sa o Rz.

La elección del cut-off no es arbitraria. La norma ISO 4288:1996 establece valores estándar de  $\lambda_c$  según el rango de rugosidad esperado. Por ejemplo:

- Para rugosidades medias (Ra entre 0,1 y 2  $\mu\text{m}$ ), el cut-off recomendado es  $\lambda_c = 0,8$  mm.
- Para superficies más lisas (Ra < 0,1  $\mu\text{m}$ ), puede usarse  $\lambda_c = 0,25$  mm.

En análisis de textura de área (3D), el cut-off se define también en dos dimensiones (X e Y) y su control es fundamental para obtener una caracterización reproducible de la superficie (ISO 25178-3:2023).

Una correcta separación de forma, ondulación y rugosidad garantiza que los valores obtenidos para la rugosidad sean comparables, funcionalmente

representativos, y normativamente válidos. Esto resulta especialmente crítico en superficies técnicas como las tratadas mediante láser, donde pueden coexistir microtexturas funcionales con distorsiones térmicas sutiles que deben ser excluidas del análisis de rugosidad para evitar una interpretación errónea del tratamiento.

En el caso del titanio, su alta reactividad superficial y la formación espontánea de una capa pasiva de óxido ( $\text{TiO}_2$ ) imponen limitaciones adicionales, ya que no solo es necesario reducir la rugosidad, sino también modificar las propiedades químicas y energéticas de la superficie para favorecer procesos posteriores de unión, recubrimiento o funcionalización [17].

Para abordar estos retos, se han desarrollado diferentes tecnologías de activación superficial, que pueden clasificarse en dos grupos:

- Métodos tradicionales, basados en la acción mecánica o química directa sobre la superficie, como el granallado, el pulido mecánico, el lapeado, el ataque ácido o el anodizado.
- Métodos no convencionales, que emplean fuentes de energía avanzadas (eléctrica, térmica, láser o ultrasónica) para modificar la morfología o la composición superficial sin contacto físico directo.

Cada uno de estos métodos ofrece ventajas y limitaciones en función del tipo de material, la rugosidad objetivo, la geometría de la pieza y los requisitos funcionales posteriores. En los siguientes apartados se describirán en detalle las principales técnicas utilizadas actualmente para el tratamiento superficial del titanio y sus aleaciones.

### 2.2.1. Métodos tradicionales

La preparación superficial de componentes metálicos mediante métodos tradicionales ha constituido durante décadas la base de los tratamientos de acabado para mejorar la adherencia, eliminar contaminantes o adecuar la rugosidad superficial a requerimientos funcionales específicos. Estos métodos, basados en la acción mecánica, física o química directa, permiten modificar la topografía superficial de forma relativamente sencilla. Sin embargo, presentan limitaciones importantes cuando se trabaja con materiales altamente reactivos y resistentes como el titanio y sus aleaciones [25].

#### *Granallado*

El granallado consiste en el bombardeo controlado de la superficie con partículas abrasivas (generalmente de acero, cerámica o vidrio) impulsadas a alta velocidad (**Figura 15**). Esta técnica genera una deformación plástica superficial que induce tensiones residuales de compresión, aumentando así la resistencia a la fatiga y la tolerancia al daño [28].

En titanio, el granallado permite alcanzar rugosidades superficiales de  $Ra \approx 1,5-3 \mu\text{m}$  en función del tamaño de la partícula y las condiciones del proceso[29]. Sin embargo, puede provocar problemas importantes:

- Contaminación superficial, por incrustación de partículas bombardeadas.
- Daño microestructural, en forma de capas severamente deformadas y cráteres (**Figura 16**) debidas a la alta velocidad de las partículas proyectadas.
- Riesgo de formación de micro fisuras, si no se controlan los parámetros del granallado adecuadamente.

Además, el titanio es especialmente sensible a la contaminación por hierro, lo que puede comprometer su resistencia a la corrosión en ambientes críticos.

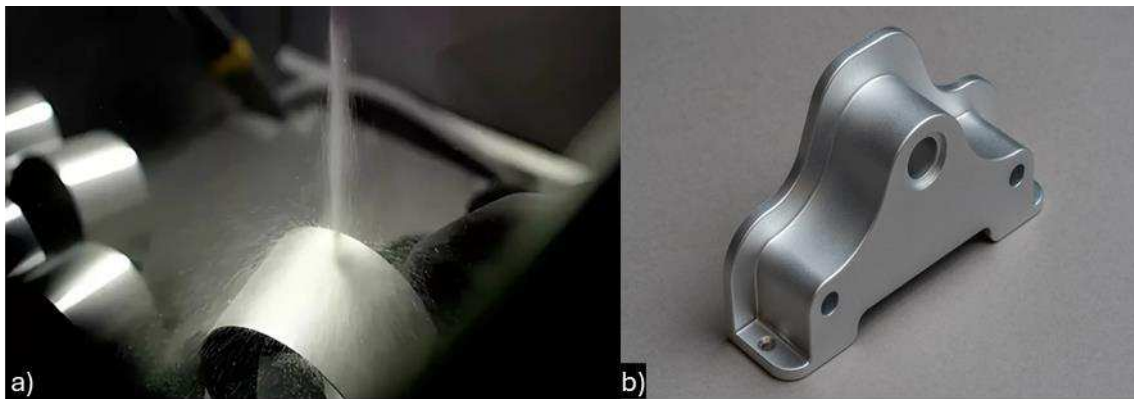


Figura 15, piezas sometidas a granallado. a) Durante el proceso; b) Después del proceso [30].



Figura 16, comparación superficie granallada y sin granallar [31].

### *Pulido mecánico*

El pulido mecánico utiliza abrasivos sólidos fijados sobre discos o bandas para eliminar material superficial mediante desgaste controlado (**Figura 17**). Permite obtener superficies de bajo nivel de rugosidad, típicamente en el rango de  $Ra \approx 0,1-0,5 \mu\text{m}$  [17].

En aleaciones de titanio, el pulido mecánico produce superficies uniformes visualmente, pero puede generar:

- Contaminación superficial, por restos de abrasivo.
- Calentamiento local excesivo, debido a la fricción y altas velocidades del proceso, que favorecen la formación de óxidos no deseados.
- Estrías o marcas direccionales, que empeoran la calidad superficial y afectan negativamente a la adherencia para procesos posteriores.

Es un método adecuado para tratamientos preliminares, pero insuficiente cuando se requiere una alta funcionalización de la superficie.



*Figura 17, pulido mecánico mediante fijación a disco [32].*

### *Cepillado y bruñido*

El cepillado emplea herramientas de cerdas metálicas o poliméricas para limpiar y texturizar superficialmente la pieza. El bruñido, en cambio, utiliza una herramienta pulida para compactar la superficie, cerrando microporos y reduciendo irregularidades a través de deformación plástica [33], ver en la **Figura 18**.

Estos métodos ofrecen acabados de rugosidad moderada,  $R_a \approx 0,8-2 \mu\text{m}$ , y son útiles para aplicaciones donde se requiere mejorar la resistencia al desgaste superficial sin eliminar material en exceso. Sin embargo, en titanio presentan riesgos como:

- Endurecimiento superficial localizado, que podría dificultar soldaduras, procesos o recubrimientos posteriores.
- Generación de tensiones internas, si las condiciones del proceso no son controladas adecuadamente.

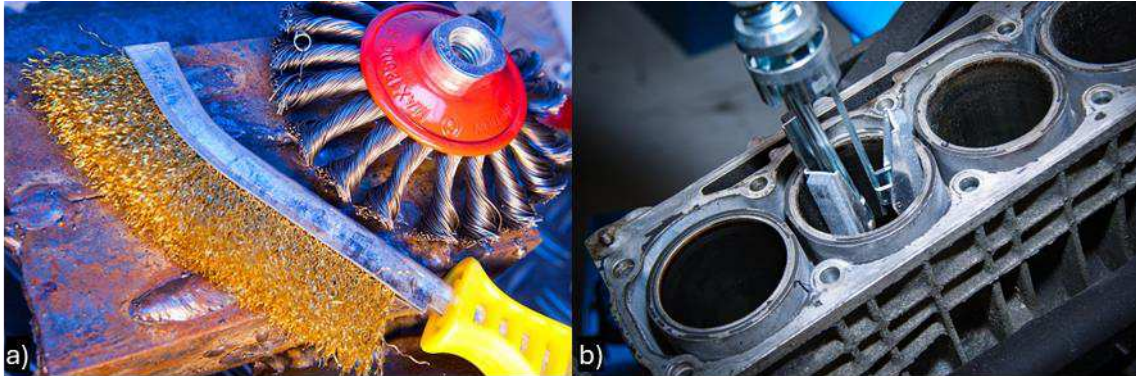


Figura 18, procesos mecánicos. a) Cepillado; b) Bruñido

### Lapeado

El lapeado es un proceso de abrasión fina mediante partículas suspendidas en un líquido portador, utilizado para conseguir superficies con tolerancias dimensionales muy estrictas y acabados de alta calidad, ver en la **Figura 19**. Se emplean pastas de carburo de silicio, óxido de aluminio o diamante, dependiendo de la dureza del material [20].

En titanio, el lapeado permite alcanzar rugosidades muy bajas,  $R_a < 0,05 \mu\text{m}$ , idóneas para aplicaciones ópticas o biomédicas. Sin embargo, presenta las siguientes limitaciones:

- Baja tasa de eliminación de material, que hace el proceso lento y lo encarece, requiriendo de más tiempo de aplicación o de procesos previos.
- Contaminación superficial, por residuos de la pasta abrasiva.
- Riesgo de formación de capas endurecidas, si la presión aplicada es superior a la adecuada.



Figura 19, proceso de lapeado [34].

### *Ataque ácido y decapado químico*

El ataque ácido o decapado químico implica el tratamiento de la superficie del titanio con soluciones ácidas (habitualmente mezclas de ácido fluorhídrico, ácido nítrico y ácido sulfúrico) para eliminar contaminantes, óxidos superficiales y preparar la superficie para procesos posteriores [35], ver **Figura 20**.

Este tratamiento puede reducir la rugosidad inicial en función de las condiciones del baño, y permite activar la superficie químicamente para mejorar la adherencia a recubrimientos o adhesivos. Entre las limitaciones de este proceso, las más destacables son:

- Sensibilidad a la sobregrabación, que puede producir un ataque descontrolado.
- Generación de defectos superficiales, si las condiciones no son ajustadas adecuadamente.
- Riesgos ambientales y de seguridad, debido al manejo y utilización de ácidos agresivos.

En titanio, si no se controla adecuadamente, el decapado puede dejar zonas debilitadas, afectar la homogeneidad superficial o alterar localmente las propiedades de la capa pasiva de  $TiO_2$ .



*Figura 20, decapado químico [36].*

### *Anodizado*

El anodizado del titanio es un proceso electroquímico que forma una capa de óxido más gruesa y estable sobre la superficie mediante la aplicación de una corriente continua en un baño electrolítico, el titanio actúa como ánodo en una celda electroquímica, permitiendo la formación de una capa de dióxido de titanio ( $TiO_2$ ) sobre su superficie, mejorando la resistencia a la corrosión y permitiendo además la modificación de las propiedades ópticas o adhesivas [37], ver en la **Figura 21**.

Dependiendo del voltaje, del tipo de electrolito y del tiempo de exposición, es posible generar distintas nanoestructuras en la superficie del titanio, como nanotubos, nanopocillos o capas porosas, que pueden favorecer la integración celular en implantes ortopédicos o dentales [38]. Además, el anodizado también puede emplearse como paso previo para la deposición de recubrimientos bioactivos, como fosfato cálcico o hidroxiapatita, lo que mejora aún más el rendimiento clínico del material implantado [39].

El anodizado no busca reducir rugosidad, sino funcionalizar la superficie. Sin embargo, dependiendo de los parámetros (voltaje, electrolito, tiempo), puede inducir:

- Incrementos de rugosidad, por formación de nanotubos o porosidades.
- Modificación de la energía superficial.
- Cambios de color por fenómenos de interferencia óptica.

Es especialmente útil en aplicaciones biomédicas, donde se busca mejorar la respuesta celular al implante, pero requiere un control exhaustivo para garantizar la estabilidad de la capa anódica.

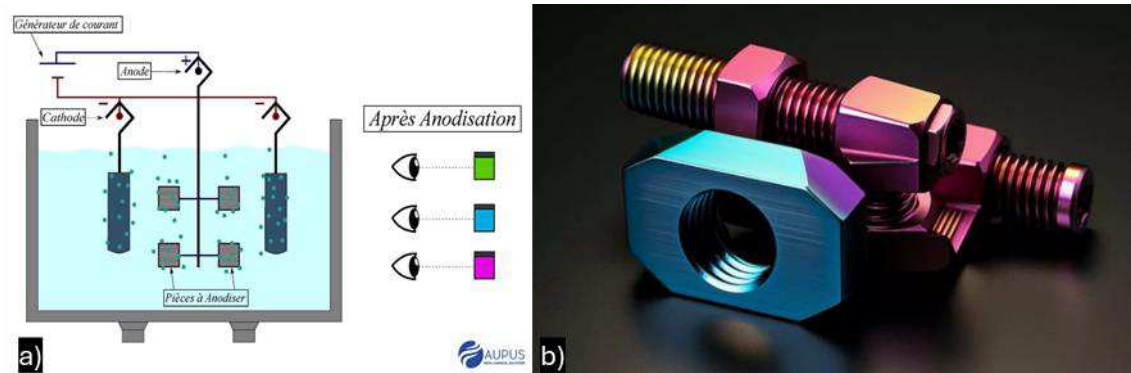


Figura 21, anodizado. a) Esquema del proceso; b) Piezas de titanio anodizadas [40,41].

En resumen, aunque los métodos tradicionales siguen siendo herramientas fundamentales en el tratamiento superficial del titanio, presentan una serie de limitaciones técnicas que han impulsado el desarrollo de técnicas no convencionales más precisas, como las basadas en láser o electroerosión.

### 2.2.2. Métodos no convencionales

A diferencia de las técnicas tradicionales, que se basan en el desgaste físico o la abrasión, estos métodos emplean formas de energía alternativas (como la térmica, eléctrica, química, láser o ultrasónica) para eliminar material o modificar la morfología superficial. Esta aproximación no solo ofrece ventajas en términos de precisión, sino también en la posibilidad de trabajar con geometrías complejas o materiales de difícil mecanizado, como ocurre con el titanio y sus aleaciones.



Uno de los procesos más estudiados y aplicados es la electroerosión o EDM (*Electrical Discharge Machining*), que emplea descargas eléctricas controladas entre un electrodo y la pieza de trabajo, sumergida en un fluido dieléctrico. Este método permite generar texturas finas y precisas sin contacto físico, lo que lo hace especialmente útil en componentes biomédicos o moldes de alta exigencia. No obstante, el proceso puede dejar capas de refundición y microgrietas que requieren posteriores etapas de tratamiento para mejorar la calidad superficial [42].

Junto a la electroerosión, el texturizado por láser ha alcanzado una importancia notable por su capacidad de actuar de forma localizada y sin desgaste de herramienta. Al incidir sobre la superficie metálica, el haz láser funde y reconfigura la capa superficial con una resolución extremadamente alta. Dependiendo de la configuración, se pueden generar patrones funcionales como surcos, cráteres o retículas que modifican las propiedades tribológicas, aumentan la capacidad de retención de lubricante o mejoran la adhesión celular. Esta técnica ha demostrado ser especialmente eficaz en titanio, tanto para mejorar su respuesta en implantes biomédicos como para optimizar superficies en aplicaciones aeronáuticas.

El texturizado mediante láser, se está explorando por su capacidad para modificar la topografía superficial sin afectar la microestructura del material, gracias a la mínima transferencia térmica asociada a estos pulsos ultracortos. En estudios recientes se ha observado que este tipo de texturizado sobre titanio puede inducir configuraciones superficiales que favorecen notablemente la adherencia celular en entornos médicos, sin generar zonas afectadas por el calor ni alterar la fase base del material [43].

Otra técnica que ha mostrado gran potencial es el mecanizado electroquímico por chorro de electrolito (EJM), en el que un fluido conductor permite disolver de forma localizada la superficie del material por acción anódica, sin contacto y sin elevación térmica significativa. Este método permite crear patrones precisos en superficies metálicas con una rugosidad controlada, siendo particularmente atractivo en aplicaciones microelectrónicas o biomédicas [44].

A su vez, han surgido soluciones como el texturizado ultrasónico rotacional (RUT), que combina la vibración de alta frecuencia con herramientas abrasivas, y permite obtener microestructuras sin daño térmico en materiales delicados. Su capacidad de control y repetibilidad lo hacen idóneo en procesos de precisión donde el acabado superficial es crítico [45].

También se ha explorado el chorro abrasivo controlado como herramienta de texturizado funcional. Mediante la proyección de partículas sólidas a alta velocidad, se pueden reproducir patrones inspirados en superficies naturales,

como la piel de serpiente o el efecto loto, con aplicaciones en superficies hidrofóbicas, anti-desgaste o autolimpiables [46].

Finalmente, en los últimos años se han desarrollado tecnologías híbridas que combinan técnicas mecánicas clásicas con procesos adicionales (térmicos, vibratorios o químicos) para ampliar el control sobre el proceso. Entre ellos se encuentran el fresado asistido por vibración o de los sistemas que integran el pulido químico con energía láser. Estas soluciones permiten reducir el número de etapas en los tratamientos, optimizando tiempos y costes, y logrando al mismo tiempo superficies con propiedades avanzadas en una sola fase [47].

### 2.2.3. Pulido térmico

El pulido térmico comprende un conjunto de técnicas de acabado superficial que aprovechan el efecto del calor (ya sea de forma directa o en combinación con agentes químicos) para modificar la superficie de los materiales. A diferencia de los métodos mecánicos, que actúan por abrasión o fricción física, el pulido térmico opera mediante la refluencia del material o la alteración controlada de su composición superficial, lo que permite alcanzar niveles de acabado extremadamente finos y homogéneos. Este tipo de técnicas ha ido ganando relevancia en la industria, especialmente para componentes que requieren una alta calidad superficial en contextos donde los métodos convencionales no son efectivos, como en geometrías complejas, materiales de alta dureza o entornos biomédicos [48].

Una de las variantes más estudiadas es el pulido por oxidación térmica, en el que el material se somete a una atmósfera controlada y a una temperatura suficiente como para inducir la formación de una capa superficial de óxido. Esta capa, más blanda y fácilmente removible que el sustrato original, puede eliminarse posteriormente mediante pulido químico, logrando así superficies lisas y regulares. Este método se ha aplicado con éxito en materiales como el carburo de silicio sinterizado, alcanzando rugosidades inferiores al nanómetro en tiempos de procesamiento muy reducidos, lo que lo convierte en una opción interesante para aplicaciones ópticas de alta precisión [26].

Otro método es el pulido termoquímico, una técnica en la que se genera una interacción difusiva entre el sustrato metálico y un medio reactivo activado térmicamente. En materiales como el diamante CVD, por ejemplo, se utiliza un sustrato metálico como el hierro que, al calentarse, promueve la difusión del material superficial y su eliminación controlada. Este tipo de procesos requiere un control térmico muy preciso, ya que cualquier exceso puede comprometer la integridad estructural de la pieza, pero permite alcanzar acabados superficiales excepcionales con tiempos de proceso muy bajos [49].

En el caso específico del titanio, el uso de calor como elemento funcional del proceso de pulido también ha mostrado resultados prometedores. Algunos tratamientos aprovechan el incremento térmico para favorecer la formación de capas oxidadas blandas, que posteriormente pueden eliminarse de forma más eficaz, generando superficies limpias, uniformes y con una topografía más regular. Estos tratamientos termoquímicos suelen incorporar reactivos como el persulfato potásico ( $K_2S_2O_8$ ) o el fluoruro de potasio (KF), cuya reactividad aumenta notablemente en presencia de calor, permitiendo una eliminación más eficiente de la capa pasivada y la obtención de un acabado más homogéneo [50].

Además de los métodos puramente térmicos, también se han desarrollado enfoques híbridos que combinan el calor con otras formas de energía o de acción física. Uno de los más relevantes en este contexto es el pulido químico-láser, donde un haz láser de baja potencia actúa de forma conjunta con un medio químico para facilitar la eliminación precisa de material superficial sin afectar negativamente la microestructura base. Este tipo de técnicas está siendo especialmente explorado en aplicaciones biomédicas, donde la limpieza superficial, la eliminación de óxidos residuales y la preservación de la biocompatibilidad son condiciones críticas [51].

En el entorno industrial, también se ha observado que incluso procesos como el CMP (*Chemical Mechanical Polishing*), esquematizado en la **Figura 22**, tradicionalmente considerados puramente mecánicos, pueden beneficiarse del calentamiento generado por fricción. El incremento de temperatura durante el proceso puede acelerar las reacciones químicas que se producen en la interfaz, mejorando la eficacia y la uniformidad del pulido, especialmente en el caso de óxidos térmicos o metales blandos como el cobre [52].

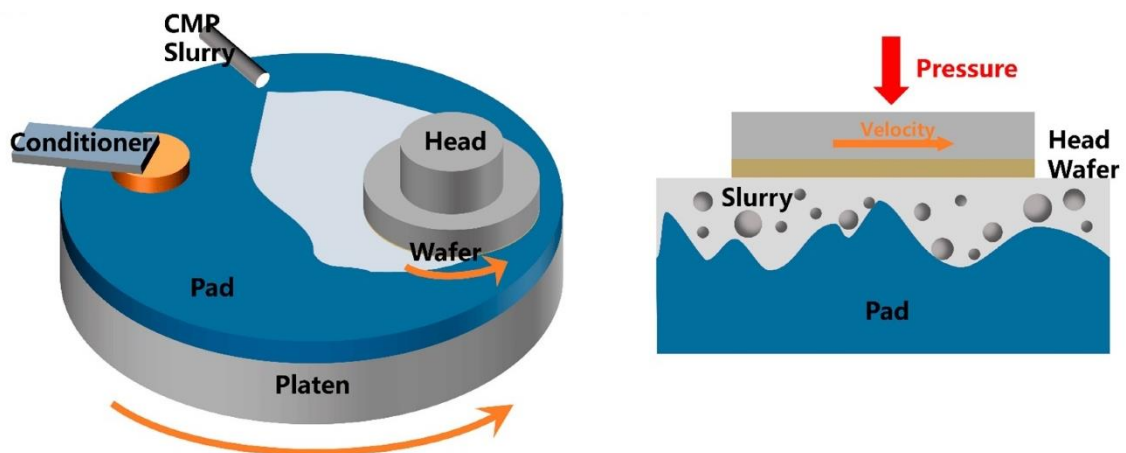


Figura 22, CMP (*Chemical Mechanical Polishing*) [53].

En este marco de técnicas térmicas de acabado, destaca con fuerza el pulido láser, que representa una solución tecnológica avanzada dentro de los métodos sin contacto. A diferencia de otras estrategias que actúan por difusión o reacción química asistida por calor, el pulido láser utiliza un haz de energía altamente concentrada para fundir de forma superficial y controlada una fina capa del material. Esta capa fundida se redistribuye por acción de la tensión superficial antes de solidificarse rápidamente, alisando irregularidades topográficas sin necesidad de abrasivos. En titanio grado 2, se ha observado que una configuración adecuada puede generar superficies con rugosidad  $S_a$  inferior a  $0,6 \mu\text{m}$ , con buena isotropía y sin deformaciones apreciables en la zona afectada por el calor. Esto confirma que el pulido láser en régimen nanosegundo, aunque conceptualmente más localizado y agresivo que otros métodos, puede ser ajustado para cumplir funciones de micro acabado de precisión [43].

En resumen, el pulido térmico representa una familia de tecnologías que, bien seleccionadas y controladas, permiten alcanzar niveles de calidad superficial que difícilmente pueden lograrse con métodos tradicionales. En el caso del titanio, el calor controlado se convierte en un aliado clave, ya sea como agente directo de modificación o como catalizador de procesos químicos complementarios, abriendo nuevas posibilidades para su uso en sectores de alta exigencia como el biomédico, el aeroespacial o el óptico.

#### 2.2.4. Pulido mediante tecnología de láser pulsado de nanosegundo

El equipo láser que se utilizará en el proceso de pulido térmico en este proyecto es el equipo láser de nanosegundo “LS-MARK-2D Nanosecond Lasing Laser Texturing Equipment” (ver **Figura 23**). Se trata de una fuente de radiación coherente diseñada para emitir pulsos de energía de muy corta duración (del orden de 1 a 100 nanosegundos) que inciden sobre la superficie del material a tratar provocando una fusión superficial controlada. Este tipo de tecnología se encuentra a medio camino entre los láseres continuos convencionales y los pulsados ultracortos (como los de femtosegundo), combinando una buena capacidad de eliminación o modificación de material con un grado de control térmico razonablemente alto [54].



Figura 23, LS-MARK-2D Nanosecond Lasing Laser Texturing Equipment

Su principio de funcionamiento se basa en la absorción rápida de energía por parte de la superficie metálica, que, al alcanzar temperaturas elevadas en fracciones de segundo, permite fundir de forma localizada una delgada capa superficial del material. Una vez fundida, esta capa se redistribuye por acción de la tensión superficial y se solidifica con rapidez, generando una superficie más uniforme y con menor rugosidad [54], ver **Figura 24**. Este proceso también llamado ablación, aplicado correctamente es capaz de mejorar la calidad superficial del material y hasta cambiar sus características tribológicas, lo que es de gran interés para industrias como la biomédica, aeronáutica, óptica... Donde se requieren niveles muy exigentes de calidad superficial.



Figura 24, pieza de titanio sin texturizar (franja izquierda), texturizada una vez (franja central) y texturizada dos veces (franja derecha)



El sistema láser utilizado en este tipo de aplicaciones está conformado por varios subsistemas que trabajan de forma sincronizada. La fuente láser propiamente dicha, que puede ser de estado sólido (como un Nd:YAG) o de fibra dopada, emite pulsos en una longitud de onda específica (habitualmente en el rango del infrarrojo cercano) con energías que pueden ajustarse en función de la aplicación. A esta fuente se le acopla un sistema óptico de focalización que permite concentrar el haz sobre áreas muy pequeñas, optimizando así la eficiencia energética y la resolución del tratamiento [55].

El control del movimiento del haz sobre la superficie se realiza mediante escáneres galvanométricos o plataformas CNC, capaces de desplazar con precisión el punto de incidencia según trayectorias programadas. Estos movimientos permiten cubrir áreas amplias sin perder resolución ni homogeneidad en el tratamiento. A través de un software especializado, el usuario puede ajustar parámetros clave como la potencia, la frecuencia de pulsos, la velocidad de escaneo o el grado de solapamiento entre pasadas, lo que ofrece una gran versatilidad operativa.

En aplicaciones avanzadas, el sistema puede estar integrado en una cámara cerrada con atmósfera controlada, utilizando gases inertes como argón o nitrógeno para minimizar la formación de óxidos durante el proceso. Esta característica resulta especialmente relevante cuando se trabaja con titanio, dado que su alta reactividad a temperaturas elevadas puede dar lugar a capas de oxidación indeseadas si no se controla adecuadamente el entorno.

Gracias a su precisión, versatilidad y capacidad de integración en procesos automatizados, el láser de nanosegundo representa una solución a considerar para el tratamiento superficial de piezas metálicas en sectores como la aeronáutica, la biomedicina o la ingeniería de materiales.

Una comparación relevante dentro de esta categoría tecnológica se da frente a los láseres de picosegundo y femtosegundo, ambos pertenecientes a la familia de los láseres ultrarrápidos. Los sistemas de femtosegundo operan con duraciones de pulso del orden de  $10^{-15}$  s, lo que les permite llevar a cabo procesos de ablación fría, con una transferencia térmica casi nula y sin generación de zonas afectadas por el calor (HAZ). Esta precisión extrema resulta ideal para aplicaciones en microelectrónica, óptica o nanotexturizado, pero su coste, complejidad técnica y dificultad de mantenimiento los limitan en entornos productivos convencionales [56]. Por su parte, los láseres de picosegundo ofrecen una mayor eficiencia en la eliminación de material respecto al nanosegundo, con menor HAZ y una mejor resolución estructural, aunque también implican sistemas más costosos y sensibles [57]. Frente a estos, el láser de nanosegundo, aunque genera mayor interacción térmica, destaca por su

robustez, fiabilidad industrial y menor coste, lo que lo convierte en la opción preferente para aplicaciones que requieran un equilibrio entre precisión y viabilidad técnica, como el pulido funcional de titanio [43,58]. En la **Figura 25** se muestra la evolución en el número de publicaciones sobre texturizado láser en los últimos años, donde se muestra claramente una tendencia al alza debido al interés de los resultados que se pueden obtener. En especial los equipos de texturizado de picosegundo y femtosegundo son los que han experimentado una evolución más pronunciada, al ser más modernos y sofisticados que los de nanosegundo.

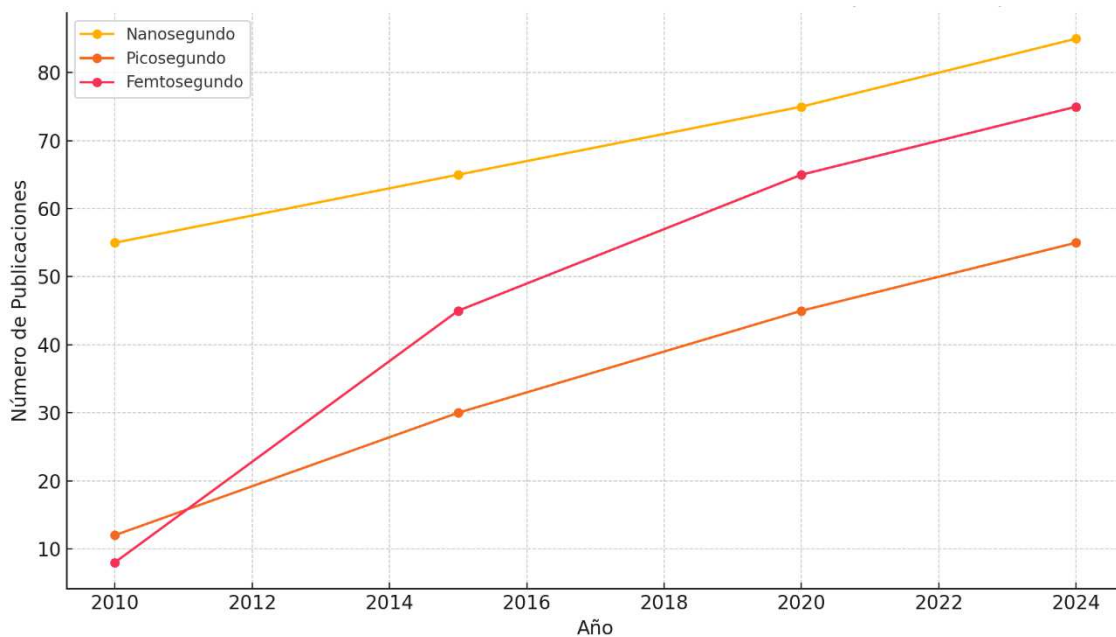


Figura 25, evolución de publicaciones sobre texturizado láser desde 2010 [59]

En el proceso de texturizado láser, se deben considerar una serie de parámetros fundamentales (ver **Tabla 4**) que controlan el comportamiento del haz sobre la superficie del material y determinan la topografía resultante. La correcta configuración de estos factores es esencial para lograr un acabado funcional, reproducible y adaptado a las necesidades del componente. A continuación, se describen los ocho parámetros más relevantes del proceso, acompañados de observaciones basadas en la literatura científica.

El primero de ellos es la potencia del láser, que representa la energía total suministrada al material por unidad de tiempo. Un incremento en este valor suele provocar una ablación más profunda, con generación de cráteres y estructuras más marcadas, aunque también puede inducir efectos térmicos indeseados como la fusión superficial si no se controla adecuadamente [42].

En segundo lugar, se encuentra la velocidad de escaneo, la cual define el tiempo de interacción del láser con cada punto de la superficie. A velocidades reducidas,

se concentra más energía por área, lo que genera relieves pronunciados; en cambio, velocidades más altas tienden a suavizar la superficie al reducir la energía acumulada [56].

El tercer parámetro es la frecuencia del láser, que determina el número de pulsos por segundo. A mayor frecuencia, si la potencia se mantiene constante, cada pulso transporta menos energía, lo que favorece una ablación más suave y precisa. Esta estrategia es útil para reducir la rugosidad superficial sin comprometer la cobertura del área tratada [60].

Otro aspecto fundamental es la duración del pulso o ancho de pulso, que clasifica los equipos láser en nanosegundo, picosegundo o femtosegundo. Pulsos largos suelen generar efectos térmicos y fusión localizada, mientras que pulsos ultracortos producen ablaciones más limpias y precisas, con mínima zona afectada térmicamente, lo cual es especialmente valorado en aplicaciones médicas o de alta precisión [56].

El número de pasadas, en quinto lugar, hace referencia al número de veces que el haz láser recorre la misma trayectoria. Las primeras pasadas definen la estructura superficial principal, mientras que pasadas sucesivas pueden provocar re-fusión o acumulación térmica, suavizando el relieve o generando saturación del material tratado [61].

El sexto parámetro, la distancia entre líneas (también conocida como hatch distance), controla el solapamiento entre trayectorias consecutivas. Un espaciado muy cerrado garantiza una cobertura uniforme, pero también puede aumentar la acumulación térmica, mientras que un paso más amplio reduce la interacción superpuesta, dando lugar a texturas menos densas y más definidas [62].

El diámetro del haz láser, o tamaño del spot, también influye en el nivel de detalle que puede alcanzarse. Un haz pequeño permite la generación de microestructuras más finas y localizadas, mientras que un haz de mayor tamaño es más eficiente para cubrir superficies amplias, aunque a costa de perder resolución [63].

Finalmente, la atmósfera de trabajo es otro factor importante. La presencia de oxígeno, argón u otros gases puede alterar las reacciones de superficie, la oxidación inducida por láser y la eficiencia de enfriamiento tras la ablación. Esto es particularmente relevante en materiales reactivos como el titanio, donde una atmósfera inerte puede evitar la formación de óxidos superficiales indeseados [64].

Tabla 4, parámetros relevantes para el texturizado láser

Parámetro	Descripción
Potencia	Determina la cantidad de energía entregada por pulso o por unidad de tiempo
Velocidad del haz láser	Indica la rapidez con que el haz láser recorre la superficie
Frecuencia	Frecuencia del haz de láser
Ancho de pulso	Define cuánto tiempo dura cada impacto láser
Número de pasadas	Veces que se repite el barrido sobre la misma trayectoria
Distancia entre líneas o pasos	Afecta la homogeneidad de la textura
Diámetro del haz (Spot size)	Influye en la resolución de la textura
Atmósfera de trabajo	El entorno (aire, argón, vacío) puede modificar la oxidación, reactividad o el enfriamiento

En conjunto, estos ocho parámetros deben ajustarse de manera interdependiente para garantizar una texturización eficaz, segura y adecuada a los requerimientos funcionales del material trabajado. El dominio de estos aspectos es clave para avanzar en el diseño de superficies con propiedades tribológicas, mecánicas o biomédicas optimizadas.

### 2.2.5. Estudios y líneas de investigación sobre el uso del texturizado láser en operaciones de pulido

La revisión de antecedentes evidencia un creciente interés científico e industrial por el uso del texturizado láser como herramienta de mejora en procesos de acabado superficial, especialmente en materiales técnicamente exigentes como el titanio. Su baja conductividad térmica, alta reactividad y dificultad de mecanizado convencional han impulsado el desarrollo de técnicas alternativas que permitan controlar la rugosidad sin comprometer sus propiedades estructurales ni su biocompatibilidad.

Diversos estudios han demostrado que, mediante el uso de láseres pulsados, es posible lograr una modificación controlada de la topografía superficial, ajustando parámetros como la potencia, la velocidad de escaneo o la frecuencia de pulsos. Estas investigaciones han evolucionado desde simples aplicaciones de limpieza o marcado, hacia estrategias más avanzadas de microtexturizado y pulido térmico, orientadas a aplicaciones específicas en biomedicina, aeronáutica, óptica y tribología [43,60,61,63,65–67].

Actualmente, las líneas de investigación más activas exploran el uso de láseres de nanosegundo, picosegundo y femtosegundo como herramientas precisas y eficientes en operaciones de pulido, destacando su capacidad para reducir



rugosidad, eliminar óxidos y mejorar la funcionalidad superficial sin contacto mecánico. En particular, el titanio y sus aleaciones han sido objeto de múltiples ensayos por su elevada sensibilidad al tratamiento térmico y su amplio uso en componentes donde la calidad superficial es crítica.

En este contexto, el presente estudio se plantea como una contribución experimental al estudio del texturizado láser en régimen de nanosegundo aplicado al titanio, evaluando su eficacia como método de pulido funcional. Los resultados obtenidos buscan aportar evidencia cuantitativa sobre las posibilidades reales de esta tecnología en el tratamiento avanzado de superficies metálicas.



### 3. Metodología experimental

Se ha seguido durante el estudio la metodología que se describe a continuación con el fin de obtener los objetivos propuestos a través de un proceso de seis etapas, ver **Figura 26**. La primera etapa es la de selección de parámetros para el estudio y texturizado láser de las probetas utilizando el equipo láser de nanosegundo de la Universidad de Málaga. Se harán dos texturizados en cada probeta, para poder analizar los resultados en función de las variaciones de los parámetros, la primera pasada con un diámetro de 15 mm y la segunda con un diámetro de 9 mm siendo ambas circunferencias texturizadas concéntricas. La segunda etapa es el escaneo superficial de las probetas una vez texturizadas y la obtención de los valores de calidad superficial que son objeto del estudio, este análisis superficial se realizará utilizando el equipo de evaluación superficial InfiniteFocusSL de Alicona.

La tercera etapa consistirá en el análisis de los resultados, mediante métodos estadísticos y gráficos, con el fin de encontrar relaciones entre los parámetros del texturizado láser y los valores de calidad superficial obtenidos, buscando siempre aquellas combinaciones que reduzcan la rugosidad de las probetas. Una vez obtenidos los resultados, se procederá con la cuarta etapa, en la que se seleccionarán dos probetas en las que las calidades superficiales sean dispares, una en la que se observe una reducción de la rugosidad (resultados positivos para el estudio), y otra en la que no se haya logrado reducir la rugosidad. Se volverán a texturizar sus superficies con los mismos parámetros, esta vez con la intención de comprobar el efecto que produce en las probetas el número de pasadas de texturizado, haciendo dos, cuatro y seis pasadas adicionales en diferentes zonas, donde se podrán estudiar los valores de calidad superficial en zonas con 2 pasadas (etapa 1 y 2), 4 pasadas, 6 pasadas y 8 pasadas. La quinta etapa será el escaneado superficial de estas superficies y análisis de los resultados de la misma manera y con los mismos métodos que en la etapa 2. Por último, en la sexta etapa, se compararán todos los resultados y se elaborarán las conclusiones.

# METODOLOGÍA

## Estudio del texturizado láser



Figura 26, metodología experimental

### 3.1. Concepto inicial y texturizado láser de probetas

Para el estudio se han utilizado probetas de titanio duro puro 99,31%, de 20 mm de diámetro cada una. Dichas probetas provienen de una barra cilíndrica, que fue cortada en cilindros de alrededor de 2 cm de alto, y no se conoce el método por el que fueron cortados. La rugosidad inicial de las probetas sin tratar (ver **Figura 24**) es variable de una probeta a otra, ya que a pesar de todas se han mecanizado de la misma manera, el proceso no es suficientemente preciso como para obtener una superficie igual en todas, aunque se a simple vista y al tacto, que tienen una superficie rugosa, donde se pueden apreciar surcos causados por el proceso de corte de las barras. Los valores medios de calidad superficial de las probetas sin tratar analizado en 3 probetas al azar son los que se indican en la **Tabla 5**.

Tabla 5, parámetros de rugosidad de las probetas sin tratar

Parámetro	Valor medio
Sa [ $\mu\text{m}$ ]	4,940
Sz [ $\mu\text{m}$ ]	36,977
Sk [ $\mu\text{m}$ ]	14,239
Vvc [ $\text{ml}/\text{mm}^2$ ]	6.939

En el proceso de texturizado láser se ha utilizado el equipo “LS-MARK-2D Nanosecond Lasing Laser Texturing Equipment” (ver **Figura 23**), que se halla en el taller 25 de la Universidad de Málaga. Este equipo permite variar múltiples parámetros del texturizado, así como la forma del texturizado, el patrón que sigue el láser mediante el proceso, y el número de pasadas.

Al tratarse de un primer estudio orientado a un proceso de texturizado láser, los parámetros variables utilizados han sido seleccionados según los parámetros que se utilizaron en otros procesos previos, con el fin de hacer una estimación general pero no muy desviada de lo que se utiliza en la práctica.

A lo largo de los distintos estudios analizados, se observa una tendencia clara en cuanto al estudio de la velocidad de escaneo y la potencia como factores principales en el proceso de texturizado láser. La velocidad se varió ampliamente entre 10 y 250 mm/s [65–71], siendo uno de los factores con más impacto en los resultados de rugosidad y geometría superficial, tal como se evidenció en los distintos análisis realizados. Por su parte, la potencia fue gestionada principalmente a través de la energía por pulso ( $E_d$ ), con valores entre 4.42 y 35.37 J/cm<sup>2</sup>, ajustados para observar su influencia en la morfología generada. El ancho de pulso en todos estos estudios era de 100 ns.

En cuanto a la frecuencia, no se ha encontrado apenas información de valores específicos. Esto sugiere que probablemente se trató de un parámetro fijo del equipo, no modificado durante los experimentos, o bien que su influencia se consideró menor en comparación con velocidad y potencia, por lo que se trabajará con 3 valores que cubran un amplio espectro.

Para el texturizado de las probetas se varían los parámetros de potencia (15%, 25% y 40%, siendo respectivamente 15,75 W, 26,25 W y 42 W), la frecuencia (15 kHz, 30 kHz y 45 kHz) y la velocidad de pasada (50 mm/s, 150 mm/s y 500 mm/s). Las diferentes combinaciones de estos parámetros dan lugar a 27 ensayos. Estos ensayos se han ordenado en función de la densidad de energía, de menor densidad de energía a mayor densidad de energía (ver **Tabla 6**). En esta fórmula la “P” hace referencia a la potencia, la “f” a la frecuencia, y “D” es el diámetro del “spot” (0,05 mm), que es el área sobre la que incide el láser en cada instante. El ancho de pulso que se utilizará en los ensayos es de 200 ns (el

máximo que permite el equipo de texturizado), para hacer un primer estudio con carácter más generalista, habilitando líneas futuras de estudio donde se reduzca hasta los valores más bajos que proporciona el equipo (alrededor de 1 ns).

$$DE = \frac{4P}{\pi f D} \quad \text{Eq. 1}$$

Tabla 6, orden de las probetas en función de la densidad de energía

Probeta	Potencia (%)	Potencia (W)	Frecuencia (kHz)	Velocidad (mm/s)	Densidad de energía (J/mm <sup>2</sup> )
1	15	15,75	45	50	0,18
2	15	15,75	45	150	0,18
3	15	15,75	45	500	0,18
4	15	15,75	30	50	0,27
5	15	15,75	30	150	0,27
6	15	15,75	30	500	0,27
7	25	26,25	45	50	0,30
8	25	26,25	45	150	0,30
9	25	26,25	45	500	0,30
10	25	26,25	30	50	0,45
11	25	26,25	30	150	0,45
12	25	26,25	30	500	0,45
13	40	42	45	50	0,48
14	40	42	45	150	0,48
15	40	42	45	500	0,48
16	15	15,75	15	50	0,53
17	15	15,75	15	150	0,53
18	15	15,75	15	500	0,53
19	40	42	30	50	0,71
20	40	42	30	150	0,71
21	40	42	30	500	0,71
22	25	26,25	15	50	0,89
23	25	26,25	15	150	0,89
24	25	26,25	15	500	0,89
25	40	42	15	50	1,43
26	40	42	15	150	1,43
27	40	42	15	500	1,43

Para proceder con el texturizado se comienza encendiendo el equipo láser con la llave, que arranca a la vez el ordenador que lo controla.

Una vez encendido se clicla en el icono “*Lasing Processer*” que abre la interfaz de control del láser que se muestra en la **Figura 27**.

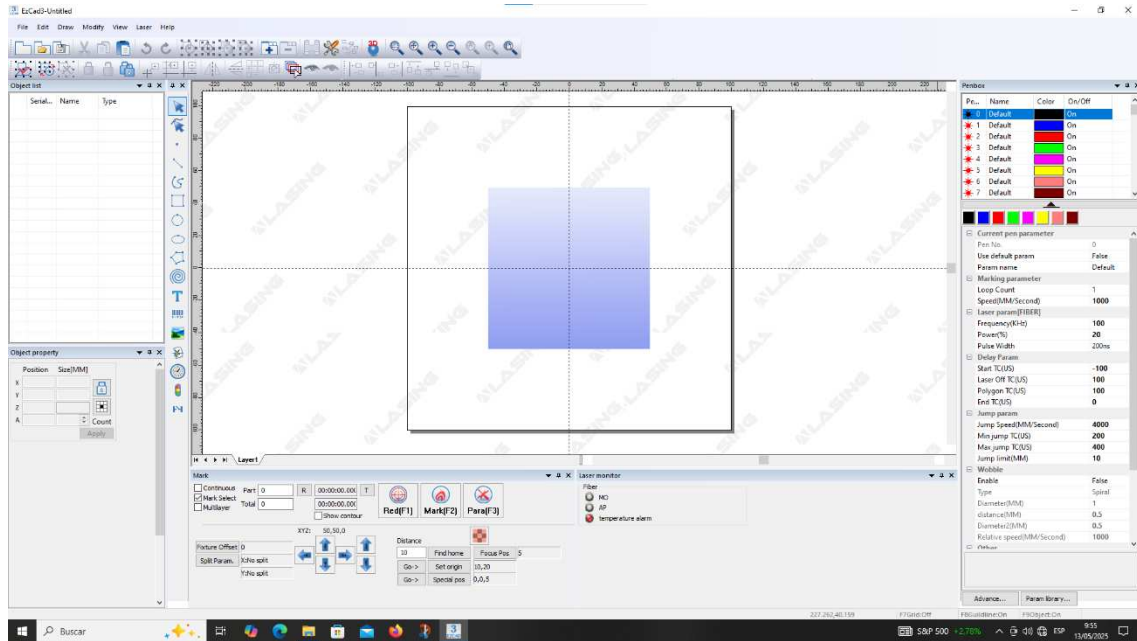


Figura 27, interfaz de control del equipo láser

Lo primero que se ha de hacer cuando se inicia el equipo es ajustar el sistema de referencia, esto el equipo de texturizado lo hace mediante el botón “*Find home*”, que se sitúa en la parte inferior de la interfaz (ver **Figura 28**). Mediante este botón, la base se traslada al origen de coordenadas y vuelve a la posición en la que estaba, esta vez con la posición definida.

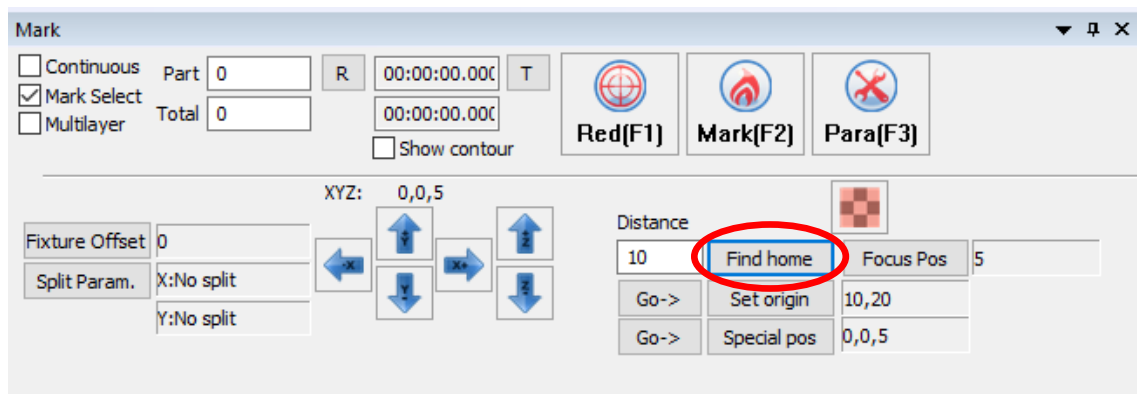


Figura 28, función “*Find home*”

Cuando se haya ubicado el origen de coordenadas, el siguiente paso es seleccionar el área que se desea texturizar. En el caso de este estudio, al ser las probetas cilíndricas, se texturizarán circunferencias en las caras circulares de las

mismas. Para ello, en la barra de asistentes de dibujo, se selecciona la opción de círculo, y clicando en el origen del cuadrado azul se dibuja la circunferencia.

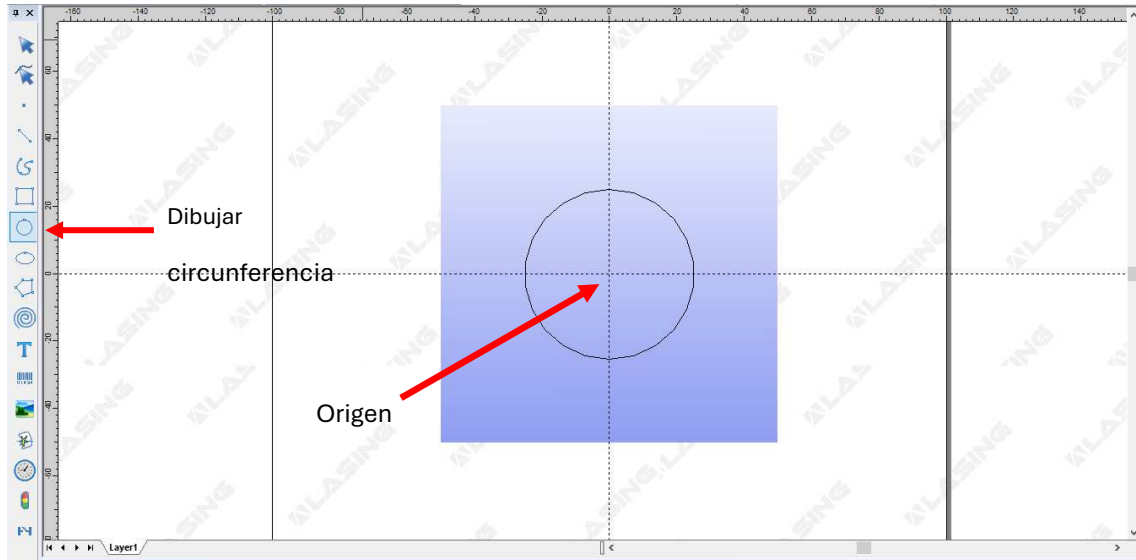


Figura 29, trazo de la circunferencia a texturizar

Dibujada la circunferencia, ésta aparecerá en el menú “Object list”. Se deberá clicar en ella, lo que hará que el color de relleno cambie a azul, y en el menú “Object property” de la parte inferior, se ajustará el diámetro de la circunferencia que se desea texturizar, configurándolo en la caja “Diameter”.

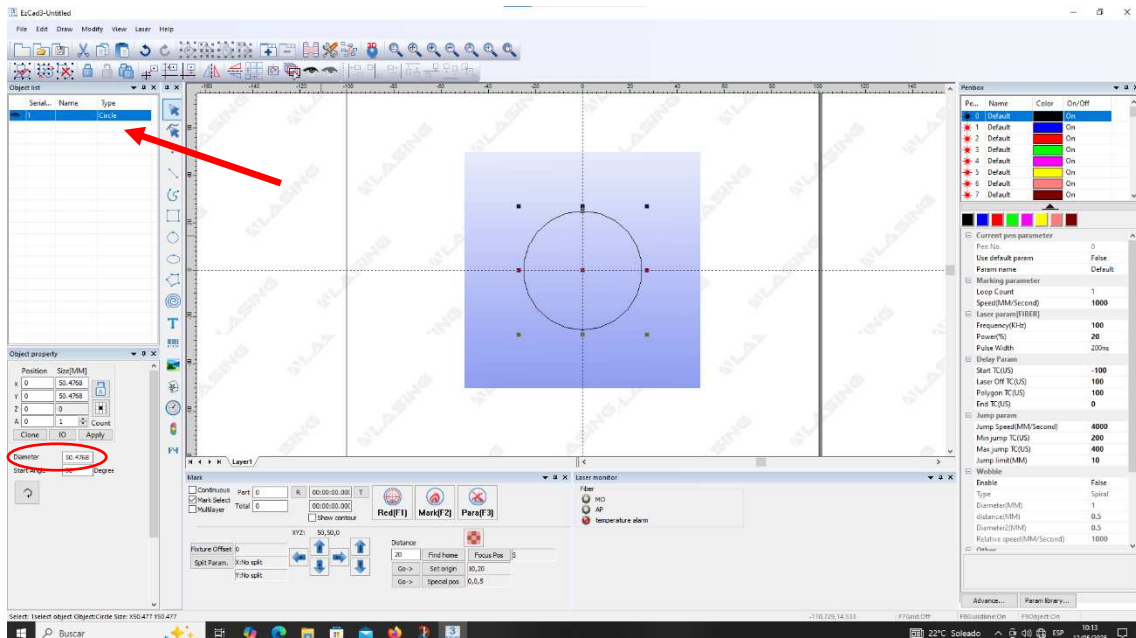


Figura 30, ajuste de la circunferencia a texturizar

Una vez se haya configurado la superficie a texturizar se habilitan funciones referentes al láser. Lo siguiente que se ha de configurar es el patrón de

texturizado, es decir, la ruta que seguirá el haz láser hasta cubrir por completo la superficie que se desea texturizar, la circunferencia en este caso.

Para abrir el menú que lo configura, se clic en el botón de “Hatch”, en la barra de herramientas superior que se muestra en la **Figura 31**. Con el menú de configuración del patrón de texturizado en pantalla (ver **Figura 32**), se selecciona el patrón que se quiera emplear en el texturizado. En este estudio, se ha seleccionado el patrón de líneas horizontales paralelas sin retorno, es decir, no texturiza durante el trayecto entre el fin de una línea y el comienzo de la siguiente, que es el que se ve en la figura.

Como último paso en este menú, se configura la opción “Line space”, esta función controla el espacio que el haz láser deja entre línea y línea. Basado en ensayos previos, se observa que, si el espaciado entre líneas se establece igual que el diámetro del haz láser, en las líneas que separan las pasadas de texturizado, se produce un recrecimiento de material. La mejor opción para evitar este fenómeno es establecer un espaciado entre líneas ligeramente menor que el diámetro del haz láser, lo que provoca un solapamiento de las pasadas de texturizado, reduciendo considerablemente este recrecimiento. Como “Spot” o diámetro del láser es de 0,05 mm, la separación entre líneas se ajusta a 0,04 mm, dejando un solapamiento de 0,01 mm.

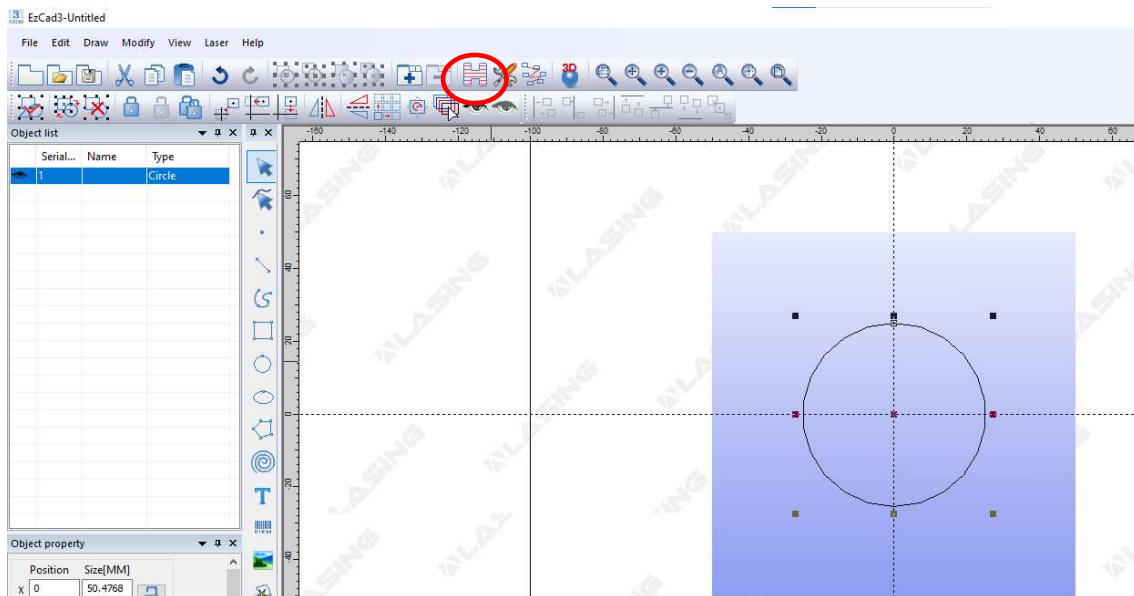


Figura 31, botón "Hatch"

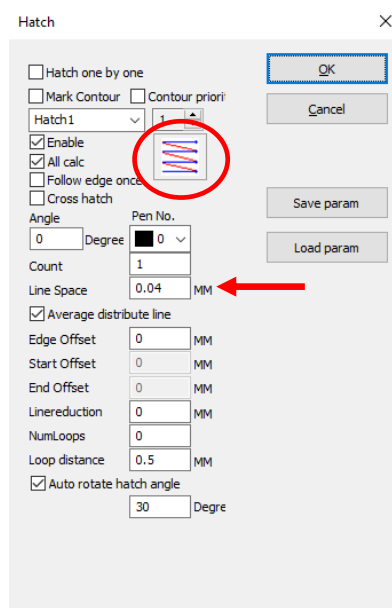


Figura 32, menú de configuración del patrón de texturizado

A continuación, se pasa a seleccionar los parámetros del texturizado, en este estudio según la **Tabla 6**. Los parámetros relativos al texturizado se configuran en el menú de la parte inferior derecha de la interfaz de texturizado, como se ve en la **Figura 33**. En este estudio se ajustarán únicamente la frecuencia, velocidad del haz, y potencia, la cual se ajusta según su porcentaje.

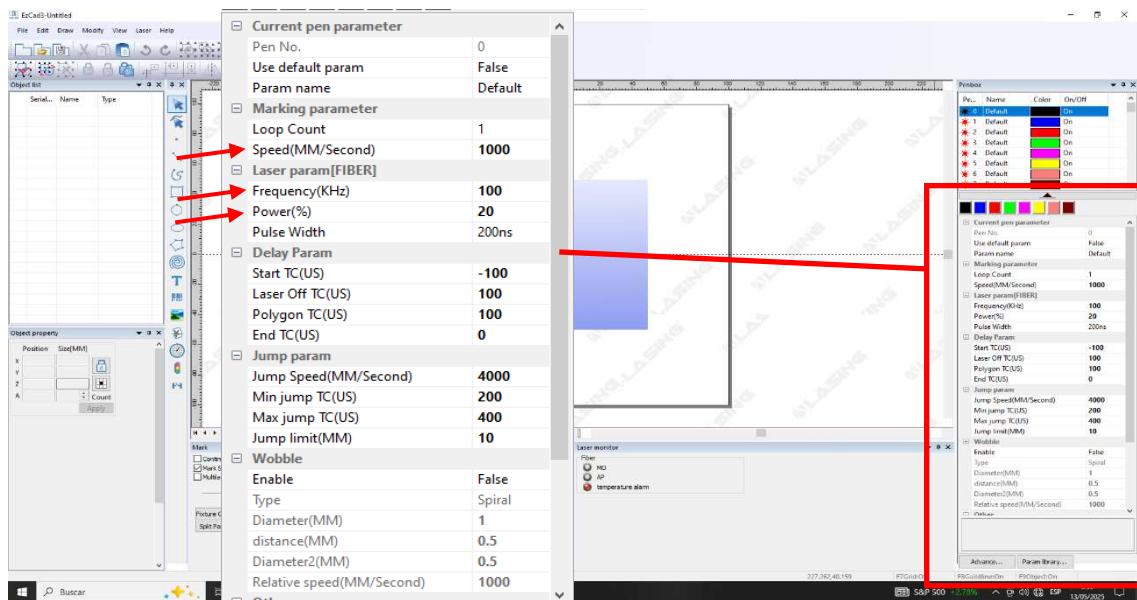


Figura 33, configuración de parámetros

A continuación, ya se puede colocar la probeta en la base del equipo de texturizado. Para ayudar a posicionarla en la posición adecuada se hace uso del botón "Red" (ver **Figura 34**), que proyecta el cuadrado donde se va a texturizar. En el caso de que el área a texturizar sea una circunferencia como en este

estudio, el cuadrado proyectado es aquel en el que está inscrita la circunferencia de texturizado.

Cuando se haya colocado adecuadamente, se clicca el botón “Stop”, que aparece en grande en la interfaz.

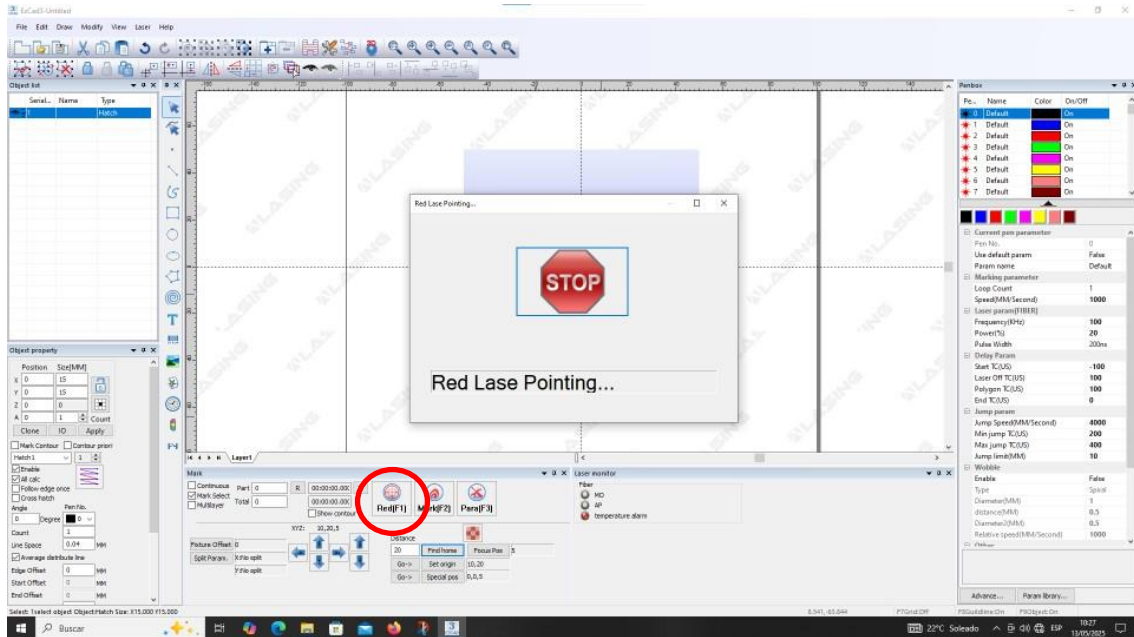


Figura 34, botón "Red" para asistencia de colocación de la probeta

El último paso es configurar la altura de la base. Esto se hace para asegurar que el foco del láser este centrado justo en la superficie de la probeta. Cuando se desactiva la función “Red”, el equipo proyecta dos puntos de láser de color rojo (ver **Figura 35**), para asegurar que el haz de láser está centrado en la superficie de la probeta, estos dos puntos han de estar alineados con el eje longitudinal de la base (horizontales si se mira de frente).

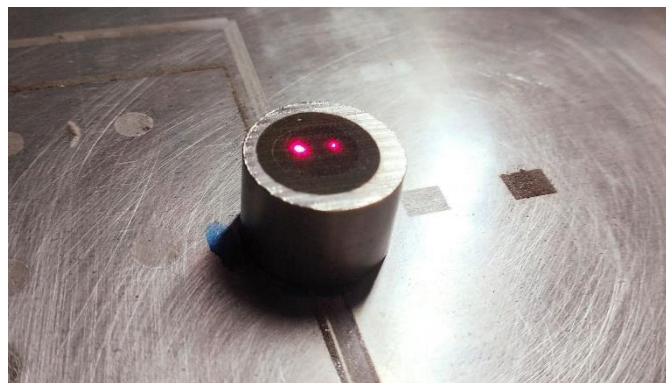


Figura 35, puntos de haz láser

El alineado se consigue elevando o bajando la placa base. Ésta se controla mediante el regulador de la cara frontal del equipo que, girándolo a derechas o izquierdas, sube y baja la placa hasta que estos haces se alinean.

Una vez ajustados todos los parámetros, se procede a ajustar el láser. El equipo cuenta con dos rayos de color rojo que inciden sobre la superficie. Uno de ellos ayuda a situar la pieza justo debajo del láser, mientras que el otro, tenemos que manualmente ajustarlo para que se sitúe horizontalmente con el primero. Este segundo láser, asegura que el foco del láser de texturizado se sitúe justo en la superficie que queremos texturizar, por eso para ello, se regula la altura de la base, hasta que como se indica previamente, están en posición horizontal, como se ve en la **Figura 36**, lo que indica que el láser de texturizado está calibrado.

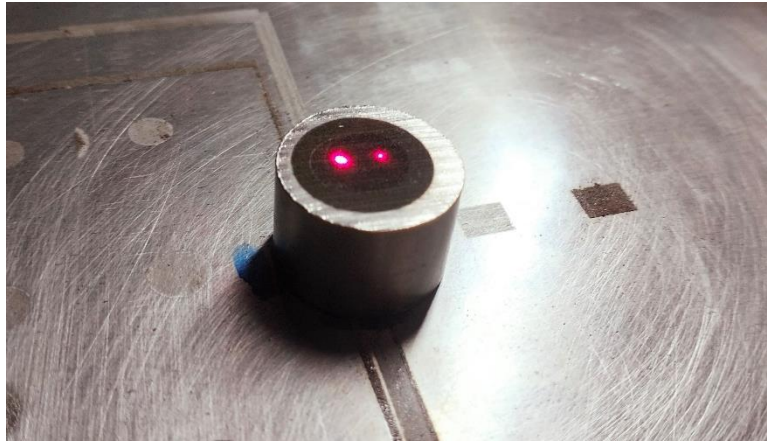


Figura 36, calibrado del láser de texturizado

Habiendo calibrado el láser, se baja la pantalla protectora y se enciende el ventilador anexo al equipo (**Figura 37**). Este ventilador aspira los gases producidos durante el texturizado, para filtrarlos posteriormente y devolverlos a la atmósfera.



Figura 37, extractor de gases. a) Botón de encendido; b) Extractor encendido

A continuación, se puede utilizar la opción de “Mark” en el software del láser, la que crea un cuadrado encima de la pieza (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), para ayudar a situarla correctamente. Este cuadrado indica exactamente el área donde se va a texturizar, siendo ésta el círculo que se inscribe en el mismo.

Finalmente se puede proceder con el texturizado, para ello se clic el botón de “Mark” de la **Figura 38**.

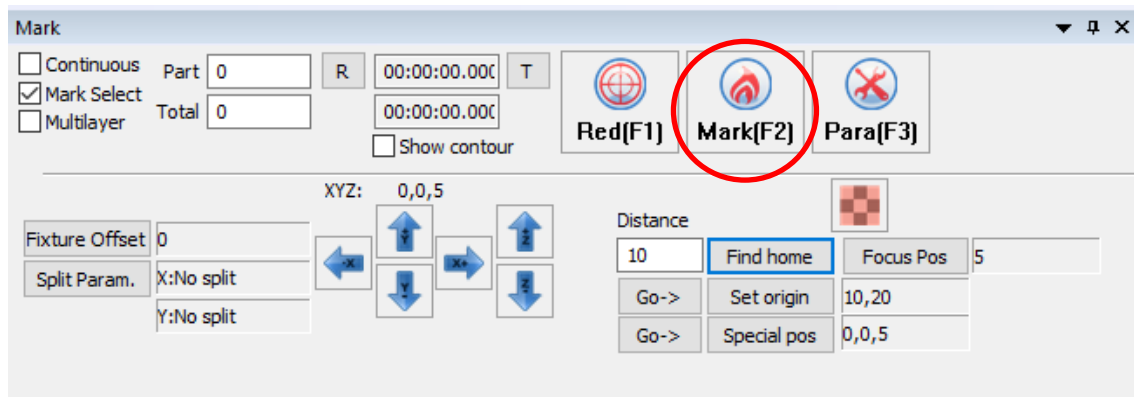


Figura 38, función "Mark"

Cuando el texturizado haya finalizado, se puede levantar la pantalla protectora y retirar la pieza. En caso de seguir texturizando se repite el proceso detallado anteriormente, pudiendo mantener el ventilador encendido.

Una vez estudiados los resultados en el apartado anterior, se decidió hacer un segundo estudio analizando la influencia de múltiples pasadas, para ello seleccionará una probeta en la que los parámetros que se le asignaron sean los que han reducido más considerablemente la rugosidad y la calidad superficial, y otra donde ocurra lo contrario. El objeto de esta etapa es comprobar la influencia de diferentes números de pasadas del texturizado láser en las probetas.

Las probetas en el primer ensayo recibieron 2 pasadas de texturizado láser, en esta etapa se volverá a texturizar hasta 6 veces en diferentes localizaciones, donde se puedan distinguir zonas con 2, 4, 6 y 8 pasadas de texturizado, siguiendo el mismo procedimiento que en la etapa

Estas dos probetas se escanearán otra vez en el equipo de ALICONA, siguiendo los procedimientos descritos en la etapa, y los datos obtenidos se recogerán y estudiarán según se describió en dicha etapa.

Al igual que se hizo con el resto de las probetas, en este caso la relación que se buscará será relacionada con el número de pasadas, y su influencia en la calidad superficial.

Por último, se realizará un tercer estudio, en el que en este caso se estudiará el efecto de altas velocidades de texturizado en los parámetros de calidad superficial, variando la velocidad entre 100 y 900 mm/s manteniendo fijos el resto de parámetros, el procedimiento de texturizado en todos los casos es el mismo que el descrito previamente.

### 3.2. Evaluación de la calidad superficial tras las operaciones de texturizado láser.

En esta segunda etapa, ya con las piezas texturizadas, se obtendrá un modelo 3D de la superficie de las probetas a la vez que los parámetros de calidad superficial que serán objeto de estudio posteriormente. Para el escaneo superficial se utilizará el equipo InfiniteFocusSL de la marca Alicona de la Figura 39



Figura 39, equipo de evaluación superficial InfiniteFocus SL de Alicona

Para el uso del equipo, en primer lugar, se enciende el ordenador que va conectado a él, y el equipo de escaneado arranca automáticamente junto al equipo. Con la interfaz del equipo abierta, se pulsa el botón de la **Figura 40**, que realiza una rápida calibración para luego volver al origen y tener registradas las coordenadas de posición con precisión.

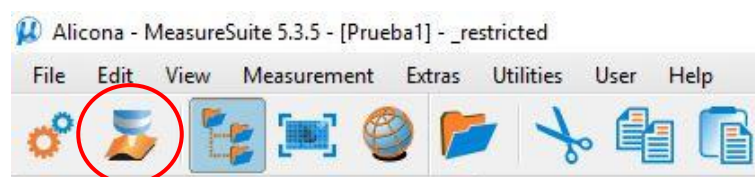


Figura 40, botón de calibración y vuelta al origen

Una vez realizada la calibración se puede situar la pieza debajo de la lente, se puede situar aproximadamente ya que el equipo permite mover la base en os ejes X e Y mientras que tanto manualmente como un periférico externo de alta precisión que regula la lente, se puede controlar la altura en el eje Z (ver **Figura 41**)



*Figura 41, periférico de alta precisión del microscopio confocal*

A la hora de situar la pieza puede ocurrir que, si no es suficientemente grande, se requiera de un soporte (una pieza estable cualquiera) para que la altura sea más fácilmente regulable, como se muestra en la **Figura 42**.



*Figura 42, colocación de la pieza en la base del microscopio confocal*

Una vez situada la probeta debajo de la lente, para ayudar a posicionarla con precisión se puede hacer uso de la función “Focusing Help” (**Figura 43**), que sitúa un láser de color rojo en el punto que está enfocado en la lente. Se posiciona la probeta correctamente debajo del haz de láser, y con el periférico de alta precisión, se ajusta la posición vertical de la lente, hasta que en pantalla se puede observar con claridad el haz de láser.

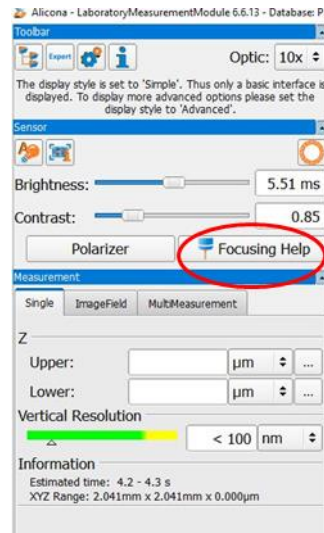


Figura 43, función "Focusing Help"

A continuación, se desactiva la función “Focusing Help”, y se puede ajustar el brillo manualmente mediante los parámetros de brillo, o haciendo uso de la función fe brillo automático, que regula el brillo por sí sólo para la correcta lectura de la superficie como se muestra en la **Figura 44**.

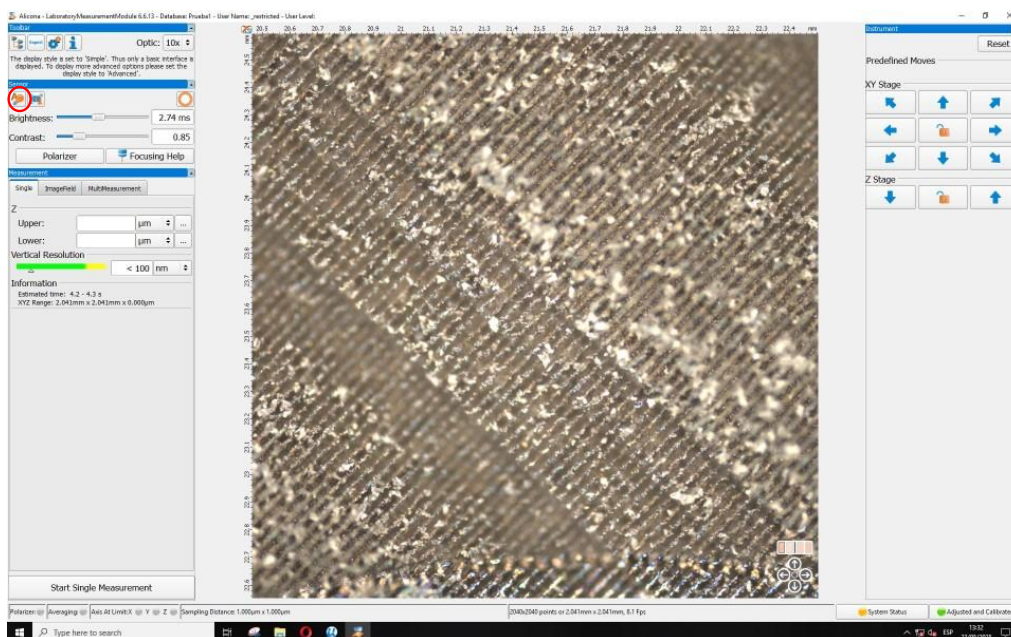


Figura 44, función de ajuste de brillo automático

Lo siguiente es establecer el rango focal de trabajo, lo cual implica enfocar la muestra tanto en su parte superior como inferior. Para ello, se desplaza el plano focal hacia arriba hasta que la imagen en la pantalla del ordenador aparezca desenfocada, y luego se realiza el mismo procedimiento hacia abajo, atravesando el objeto, hasta alcanzar la posición deseada. Este ajuste se realiza utilizando el periférico de alta precisión. Al mantener presionado el botón central, el plano focal desciende, mientras que, al jalarlo, se desplaza hacia arriba. Cada vez que se quiera registrar la posición (superior e inferior) para el escaneo se presiona el botón con los 3 puntos de la **Figura 45**. Si se quiere escanear un área más grande basta con desplazar lateralmente el control y registrar las posiciones que se necesiten.

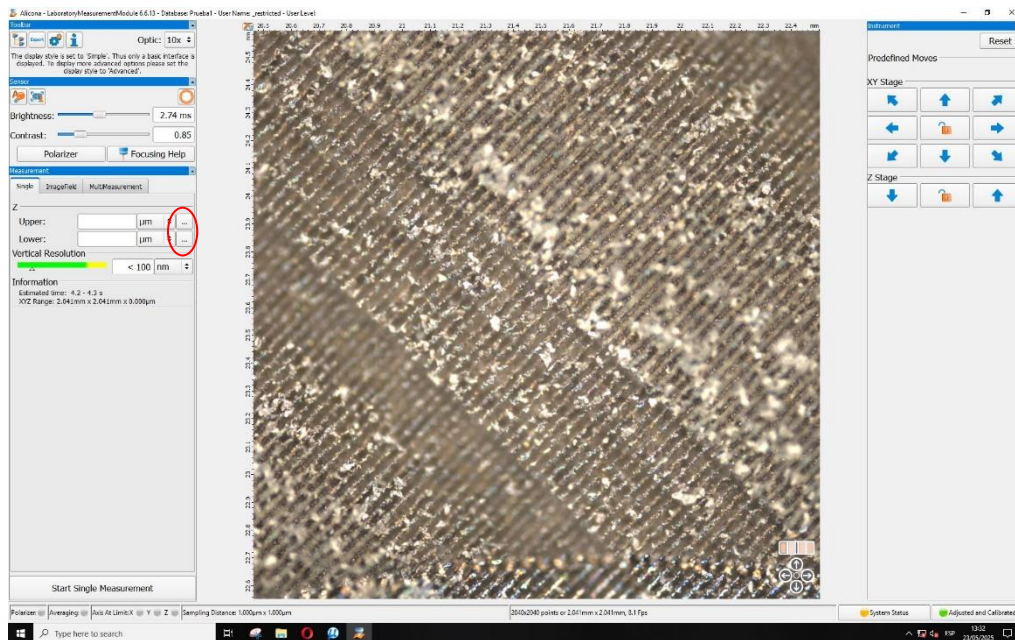


Figura 45, ajuste de rango focal para el escaneo

Una vez ajustado el rango focal, el brillo y la posición, se presiona el botón “Start Single Measurement”, que inicia el escaneo de la pieza, y que cuando termine muestra los resultados en pantalla, la superficie en 3 dimensiones de la probeta (ver **Figura 46**).

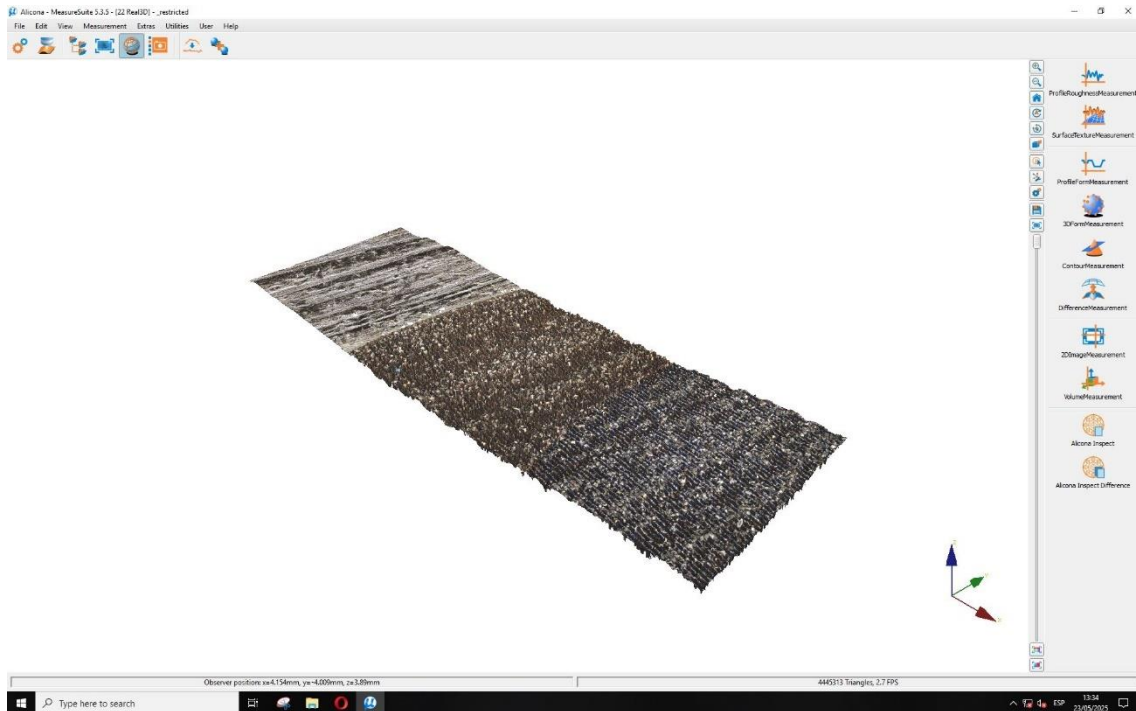


Figura 46, interfaz con la pieza ya escaneada

A partir de aquí se puede guardar el archivo que contiene toda la información 3D y de la que posteriormente se pueden extraer la información que se requiera. Para seguir trabajando es necesario ajustar el sistema de coordenadas de referencia, que con el botón de los 3 ejes de la **Figura 47** lo hace automáticamente y lo sitúa en el centro de la pieza, lo que permite que los valores de rugosidad superficial que devuelva sean correctos, para confirmar se pulsa el botón “Apply”.

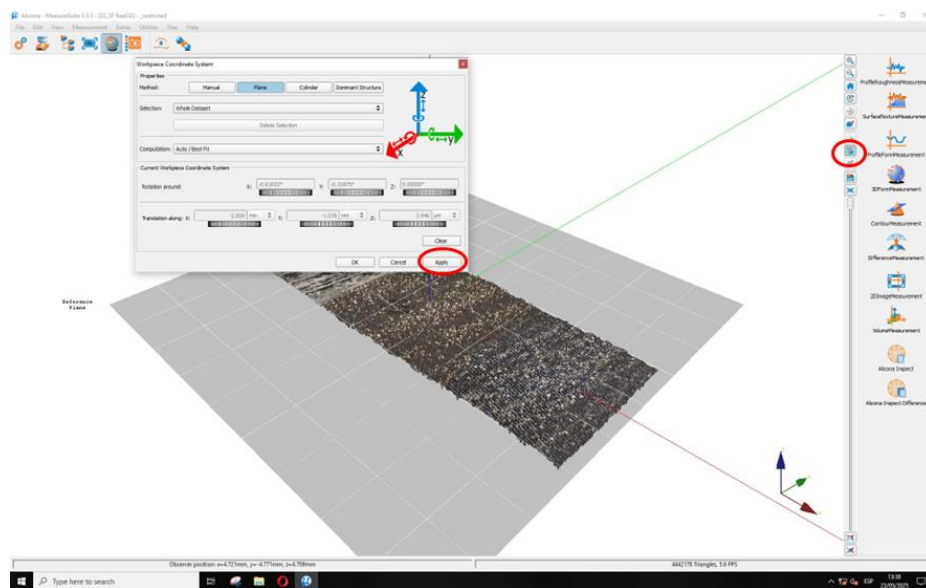


Figura 47, ajuste del sistema de referencia en la pieza

El siguiente paso consiste en generar el archivo sin forma, lo cual permite eliminar posibles imperfecciones relacionadas con la curvatura o deformaciones geométricas de la pieza. Esto es necesario para poder analizar correctamente el perfil de rugosidad y obtener los parámetros requeridos. Para ello se utiliza el botón señalado en la **Figura 48**, que abre el menú de la **Figura 49**, donde a la izquierda se muestra la pieza original y a la derecha la pieza sin forma. Para que sea preciso el eliminado de la forma, se seleccionará la forma polinómica de grado 2, como aparece señalado en la **Figura 49**. Para guardar el archivo si forma pulsar el botón “*Save from removed dataset*”.



Figura 48, botón para la eliminación de forma "Form Removal"

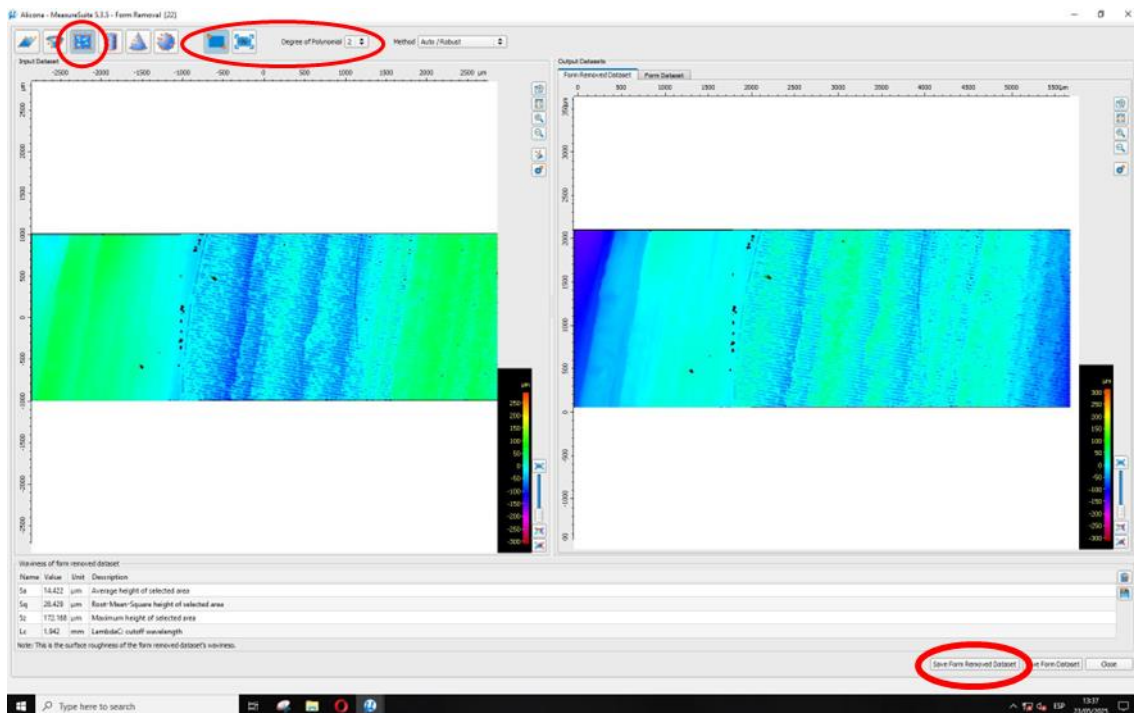


Figura 49, pestaña de eliminación de forma original

Una vez guardado el archivo sin forma se abre y se comprueba que el origen de coordenadas esté bien situado de la misma manera que se hizo previamente. Para obtener los parámetros de rugosidad superficial, se ha de pulsar el botón “*Surface Texture Measurement*” de la **Figura 50**.

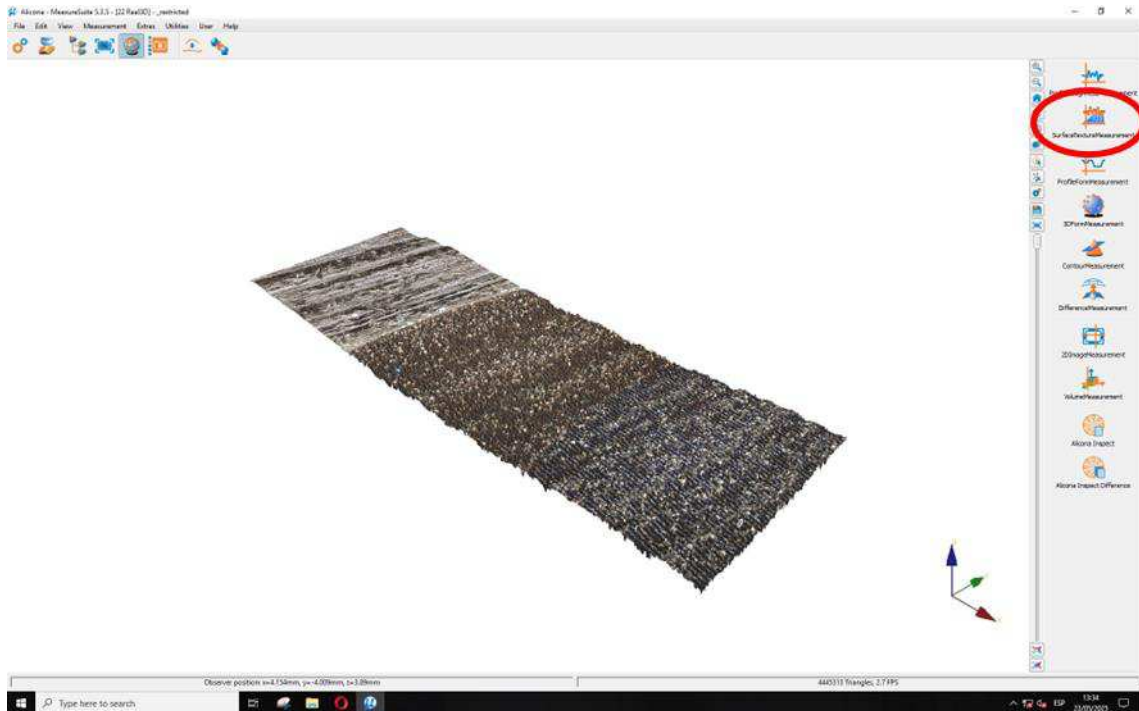


Figura 50, botón "Surface Texture Measurement"

En la pestaña de "Filtered Surface" (ver Figura 51), en la ventana de "Dataset Type", se selecciona "Roughness", y se selecciona el filtro gaussiano conforme a la norma ISO 16610-23, cut-off, que elimina cualquier componente de forma u ondulación, tal y como se ve en la Figura 51.

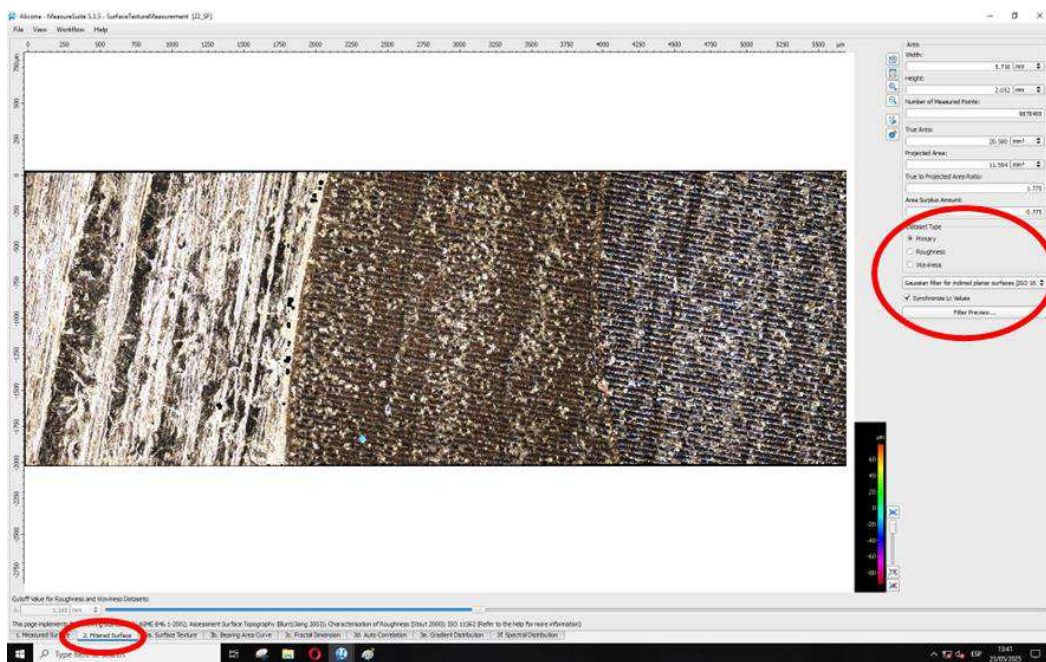


Figura 51, interfaz de medida de rugosidad

Por último, en las pestañas adyacentes a la de “*Filtered Surface*”, se pueden consultar todos los parámetros de rugosidad que se necesiten (ver **Figura 52**), en cada pestaña se recogerán unos datos, para este estudio se trabajará con Sa, Sz, Sk y Vvc, por lo que con las pestañas 3a y 3b se obtienen esos parámetros.

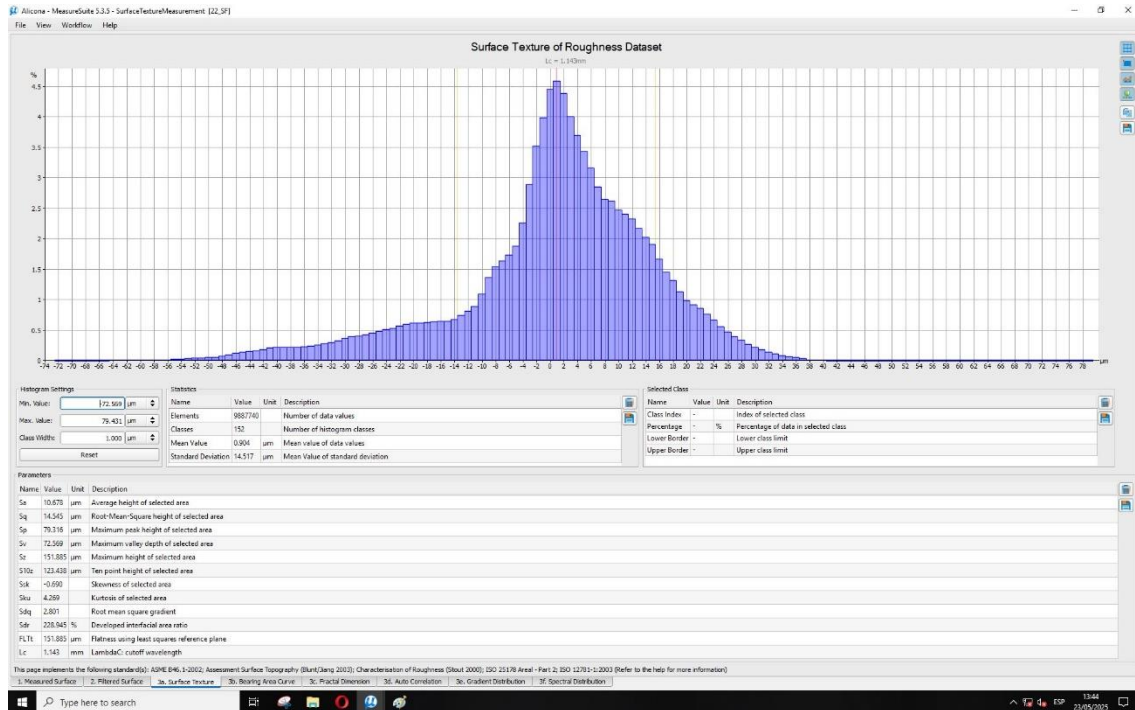


Figura 52, pestaña de medición de parámetros

A la derecha se pueden exportar los valores en formato .csv, que resulta cómodo para trabajar posteriormente con hojas de cálculo.

En la interfaz del equipo de medida se pueden consultar todo tipo de valores e imágenes, como la imagen 3D de toda la superficie que se muestra en la **Figura 53**, que también podría obtenerse con un diagrama de colores según la altura, o la misma representación pero en este caso en 2D, para la que se ha utilizado la gama “*Pseudocolours*” de la **Figura 54**, que resulta intuitiva a la hora de reconocer las alturas y profundidades de la superficie.

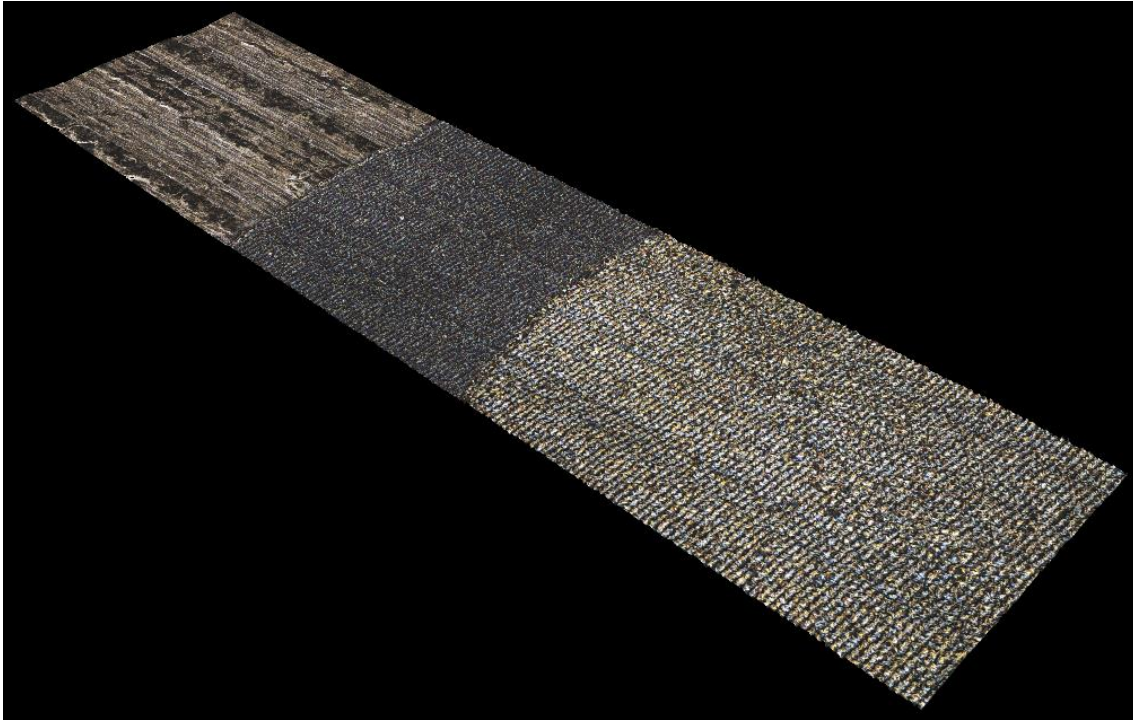


Figura 53, superficie escaneada

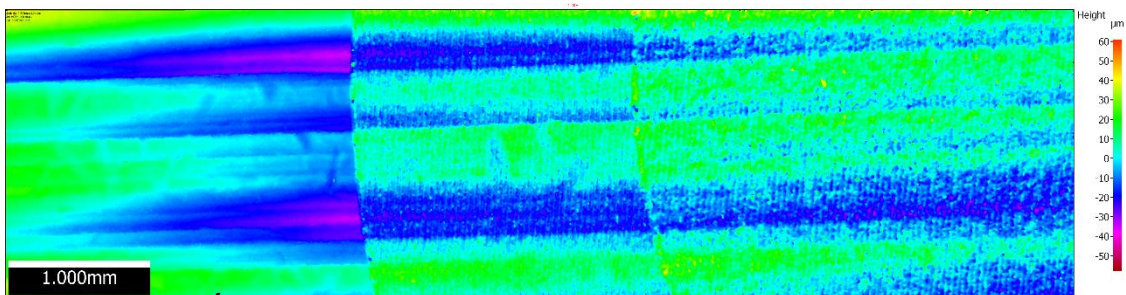


Figura 54, superficie después de eliminar la forma original

Para el estudio de múltiples pasadas y el de altas velocidades el proceso de escaneo será igual que el descrito previamente, estableciendo un campo de barrido más grande en el estudio de múltiples pasadas para abarcar toda la superficie texturizada.

### 3.3. Tratamiento estadístico de datos

Teniendo recogidos los valores de calidad superficial de  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_{dr}$ ,  $S_k$  y  $V_{vc}$ , se recogen en una tabla y se elaborarán gráficas que relacionen los parámetros de entrada con la densidad de energía y los parámetros de energía, para buscar correlación entre ellos y poder establecer una línea de influencia.

Para ayudar al proceso se realizará un análisis ANOVA, el análisis ANOVA, acrónimo de “*Analysis of Variance*”, es una herramienta estadística utilizada para determinar si existen diferencias significativas entre las medias de tres o más



grupos independientes, ideal para este estudio dada la cantidad de variables de las que se disponen.

Con tal de discernir si las diferencias observadas se deben a la variabilidad entre grupos o al azar, el ANOVA compara dos tipos de variabilidad: la variación entre grupos, que refleja cómo difieren las medias de los diferentes grupos entre sí, y la variación dentro de los grupos, que mide cuán dispersos están los valores individuales dentro de cada grupo. Si la variación entre grupos es considerablemente mayor que la variación dentro de los grupos se puede concluir que al menos una de las medias es significativamente distinta.

El proceso para realizar un análisis ANOVA comienza con la formulación de una hipótesis nula ( $H_0$ ), que establece que todas las medias de los grupos son iguales, y una hipótesis alternativa ( $H_1$ ), que sostiene que al menos una de las medias difiere. A continuación, se calcula el estadístico F, que es el cociente entre la varianza entre grupos y la varianza dentro de los grupos. Un valor alto de F sugiere diferencias reales entre los grupos. Este valor se compara luego con un valor crítico obtenido de la distribución F de Fisher, considerando los grados de libertad correspondientes y el nivel de significancia deseado (habitualmente  $\alpha = 0.05$ ).

Si el resultado del ANOVA es significativo (es decir, si el valor p asociado al estadístico F es menor que el nivel  $\alpha$ ), se rechaza la hipótesis nula, indicando que al menos un grupo difiere.

Con estos métodos de análisis se buscan relaciones entre parámetros de entrada y de salida, y combinaciones de estos que permitan rebajar la rugosidad y mejorar la calidad superficial.

## 4. Análisis de resultados

En este apartado se analizan los resultados obtenidos a lo largo del estudio mediante representaciones gráficas, cálculos realizados en Excel y análisis estadístico tipo ANOVA, con el fin de evaluar el efecto de los parámetros del proceso sobre la calidad superficial del titanio. Como se estudiarán las probetas en función de diferentes parámetros dependiendo del caso, durante todo el estudio se nombrarán según el orden de la **Tabla 6**, que las ordena según la densidad de energía que reciben.

### 4.1. Primera etapa: estudio general de la influencia de los parámetros del equipo láser en la calidad superficial

En esta primera etapa se muestran y analizan los resultados obtenidos tras dos pasadas de texturizado láser. Se realiza el proceso en dos ocasiones debido a que los altos valores de rugosidad inicial alteran los parámetros de calidad superficial relativos al texturizado, ya que, al ser del mismo orden de magnitud o mayores, falsean las muestras. Debido a esto, en esta etapa se texturizan las probetas en dos ocasiones (ver **Figura 55**) con el fin de analizar las diferencias entre los parámetros de calidad superficial, pudiendo comparar la diferencia entre segunda y primera pasada, con la diferencia entre primera pasada y la probeta sin tratar. Mediante este método sí se podrán analizar con objetividad los resultados obtenidos.

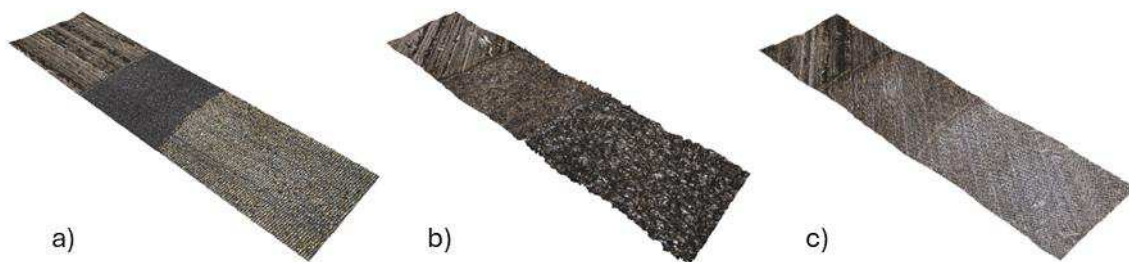


Figura 55, superficie 3D de las probetas. a) 1 ( $P=15\%$ ,  $f=45$  kHz,  $v=50$  mm/s); b) 13 ( $P=40\%$ ,  $f=45$  kHz,  $v=50$  mm/s); c) 18 ( $P=15\%$ ,  $f=15$  kHz,  $v=500$  mm/s).










Como se puede observar en la **Figura 55**, los resultados son dispares. Se pueden observar partes más oscuras y con la superficie aparentemente más alterada, mientras que en otras se aprecia un leve cambio de color en la zona texturizada, pero sigue siendo visible la textura original de la pieza, no habiendo cambios significativos en el aspecto de la probeta. Estas apreciaciones no parecen seguir una relación lineal con la densidad de energía, en lo que a inspección visual respecta.

Dados el amplio campo de parámetros tenidos en cuenta en el estudio se analizarán los resultados clasificando las probetas por potencia recibida, 15%, 25% y 40%, comparando resultados y parámetros de calidad superficial.

#### 4.1.1. Potencia al 15% (15,75W)

En este epígrafe se estudiarán las 9 probetas que recibieron un 15% de la potencia del equipo de texturizado, como se ve en la **Tabla 7**.

*Tabla 7, probetas texturizadas a 15% de potencia (15,8W).*

				Frecuencia [kHz]		
Velocidad [mm/s]	15	30	45			
50						
150						
500						

En estas probetas texturizadas a baja potencia se observan claramente las superficies texturizadas y la frontera entre ninguna, una y dos pasadas de láser. En todas las probetas la franja situada mas a la izquierda es la no texturizada, a continuación la zona que recibe una pasada de texturizado y en el extremo derecho la zona con dos texturizados.

Se aprecian cambios de unas a otras, en la probeta de frecuencia 15 kHz y velocidad de 150 mm/s, se aprecia una superficie de celdillas, mientras que en otras como la de frecuencia 30 kHz y velocidad 100 mm/s, la superficie texturizada sigue patrones lineales. A su vez, a simple vista, esta última probeta

parece tener una superficie menos rugosa, mientras que en la de frecuencia 45 kHz y velocidad 150 mm/s se aprecia una superficie más rugosa y basta.

Pese a estas diferencias, en las probetas se sigue apreciando la textura original de las probetas debajo del texturizado, lo que podría indicar que no es suficiente el 15% de potencia para obtener resultados relevantes.

#### *4.1.1.1. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sa*

En la primera pasada de texturizado (ver **Figura 56 a**), para velocidades medias y bajas, el valor de Sa se incrementa, siendo considerable el aumento para el valor medio de velocidad. Es para el valor de velocidad de 500 mm/s cuando el valor de Sa empieza a disminuir. Esto concuerda con los estudios [43,72], que atribuyen esta disminución a la menor exposición térmica y a la interacción reducida entre el haz láser y la superficie del material, lo que resulta en una topografía más uniforme y menos rugosa, ya que la energía del láser se distribuye sobre una mayor área en menos tiempo, reduciendo la formación de picos y valles pronunciados en la superficie.

En cuanto a las frecuencias, también se observan mejores resultados a frecuencias más bajas, obteniendo los mejores resultados con 15 kHz. Esto se debe a que frecuencias más altas tienden a aumentar más la rugosidad Sa en la primera pasada, posiblemente debido a una mayor densidad de pulsos y solapamiento, que intensifican la modificación superficial, como también se demuestra en el estudio [73].

Para la segunda pasada (ver **Figura 56 b**), también se produce un ligero aumento de la Sa para velocidades bajas (50 mm/s), y es con las velocidades medias y altas (150 y 500 mm/s) cuando el valor de Sa se mantiene o comienza a disminuir. Los resultados son parecidos, pero más moderados, es decir, las variaciones pasan a ser mucho menores y en la misma tendencia que en la primera pasada. El único cambio de tendencia se da a velocidades medias y frecuencia baja, que pasa de aumentar a reducir el valor de Sa. Puede que no se estén obteniendo resultados más relevantes debido a falta de potencia, saturación de la superficie o necesidad de más pasadas para contrastarlo.

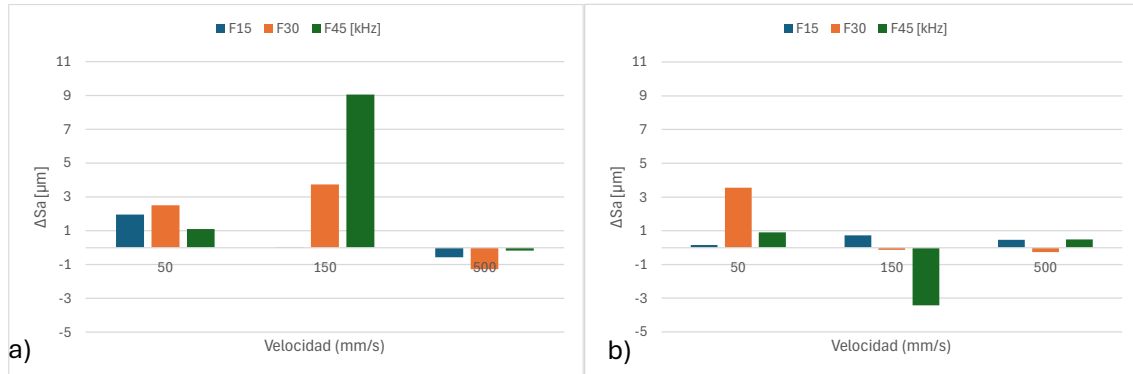


Figura 56, variación de Sa a potencia 15% (15,8 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

Para corroborar estos datos estadísticamente se ha hecho un estudio ANOVA, para el que se ha obtenido un valor F de 10,67 para la velocidad y de 7,84 para la frecuencia, y un p-valor (probability value) de 0,002 y 0,0073 respectivamente. Lo que sugiere que ambos parámetros son relevantes a la hora de reducir la Sa, pero especialmente la velocidad, que muestra ser el parámetro crítico a la hora de controlar la variable.

#### 4.1.1.2. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sz

Para la primera pasada (ver **Figura 57 a**) se obtienen resultados positivos para todas las combinaciones de parámetros, reduciendo el valor de Sz hasta en -42  $\mu\text{m}$ . Esta reducción es especialmente notoria para velocidad media (150 mm/s). La reducción de la altura pico-valle es uno de los indicadores más importantes a la hora de hablar de superficies lisas, por lo que estos resultados son de alta relevancia. Esto se debe a que una mayor velocidad reduce el tiempo de interacción del láser con la superficie, limitando la formación de picos altos y resultando en una topografía más plana [43]. Como a altas velocidades la reducción es menor, se puede afirmar que hay una velocidad intermedia óptima para la reducción de picos y valles, aunque no se haya encontrado una relación lineal.

Para las frecuencias se han obtenido resultados sugerentes según esta varía, las mayores reducciones se han obtenido a frecuencias bajas tanto para la primera como para la segunda pasada, como se discute a continuación.

En la segunda pasada (ver **Figura 57 b**) hay ciertas combinaciones de parámetros que reducen significativamente el valor de Sz. Para una frecuencia de 15 kHz y velocidad de 50 mm/s la Sz se reduce en 34  $\mu\text{m}$ . A su vez, para frecuencia media (30 kHz) y velocidades medias y altas, se reduce la Sz en 11  $\mu\text{m}$  para ambos casos. Con estas combinaciones también se redujo la Sz en la primera pasada, lo que sugiere que hay ciertas combinaciones que afectan positivamente en la disminución de Sz con el número de pasadas.

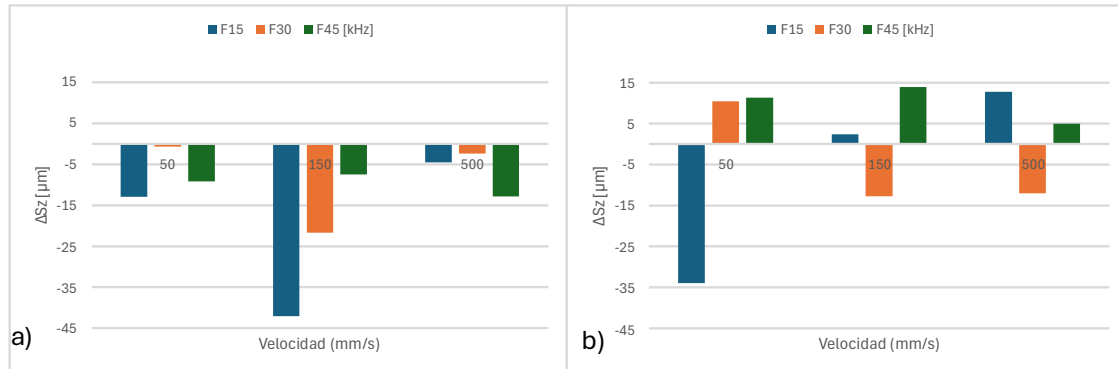


Figura 57, variación de Sz a 15% de potencia (15,8 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada.

En el análisis ANOVA se ha obtenido un valor F de 9,69 para el número de pasadas y de 7,26 para la frecuencia, y un p-valor de 0,0031 y 0,0096 respectivamente, el resto de las variables no tenían apenas influencia. Estos resultados sugieren que la frecuencia es un parámetro influyente en Sz (aumentándola o reduciéndola), pero que el parámetro crítico a la hora de controlar la altura pico-valle es el número de pasadas.

En esta primera etapa sólo se han estudiado dos pasadas, sin embargo, estos resultados indican que sería interesante un estudio concreto sobre el número de pasadas. Por el momento se puede afirmar que a la hora de reducir el valor de Sz, la primera pasada es siempre muy positiva, siendo clave para cierta combinación de parámetros.

#### 4.1.1.3. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sk

El estudio de la variable Sk es importante ya que condiciona la capacidad de carga del núcleo funcional del material, ignorando picos y valles.

Para la primera pasada (ver **Figura 58 a**), se observa un aumento de la Sk para velocidades medias y bajas, permaneciendo casi constante para el valor más alto de velocidad (500 mm/s). No obstante, cuando se realizó la segunda pasada, no se observó apenas diferencia al aumentar la velocidad. En el estudio “*Matec Web of Conferences*” se menciona que el aumento de velocidad disminuye rugosidad y profundidad de estructuras, lo que probablemente incluye una reducción de Sk, aunque no lo nombre explícitamente.

En este estudio no se observa una clara influencia de la frecuencia del láser sobre el parámetro Sk. Este resultado coincide con otros trabajos en los que la frecuencia muestra un efecto mínimo o no significativo sobre la altura del núcleo, siendo otros factores como la velocidad y la potencia los que presentan mayor impacto [43].

En la segunda pasada (ver **Figura 58 b**) los valores de  $S_k$  permanecen bastante constantes y sin relevantes variaciones con respecto a la primera pasada. Para frecuencias bajas y altas aumenta ligeramente, mientras que para la frecuencia media permanece prácticamente sin cambios o llega a reducirla. Una pasada adicional incrementa la acumulación de energía sobre la superficie, profundizando y consolidando las estructuras del núcleo [74]. Esto puede justificar un aumento de la  $S_k$  al generar valles y mesetas más marcados. Varios estudios han demostrado que un mayor número de pasadas tiende a reforzar el perfil central de la textura, lo que se traduce en valores más altos de  $S_k$  hasta llegar a un punto de saturación, donde el efecto se estabiliza [43].

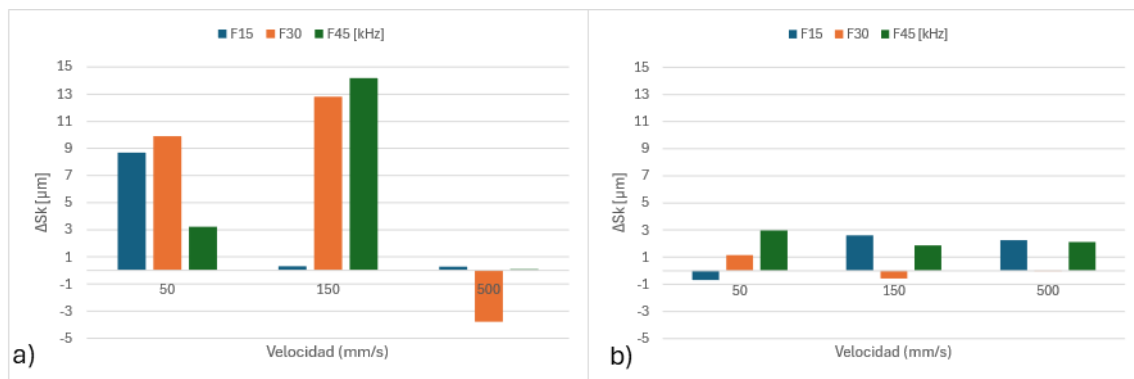


Figura 58, variación de  $S_k$  para 15% de potencia (15,8 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

En el análisis ANOVA se ha obtenido un valor F de 8,27 para la velocidad, 7,37 para la frecuencia y 7,29 para la potencia, con un p-valor asociado de 0,0059, 0,0091 y 0,0095 respectivamente, el resto de las variables no tenían apenas influencia. Estos valores sugieren una influencia media de estos parámetros sobre la  $S_k$ , sin ser ninguna claramente más relevante que las otras

#### 4.1.1.4. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área $V_{vc}$

El estudio del parámetro  $V_{vc}$  (volumen de los valles del núcleo) es relevante porque proporciona información clave sobre la capacidad funcional de una superficie texturizada, especialmente en aplicaciones donde se requiere retención de fluidos, adhesión celular o mejor comportamiento tribológico. Comprender cómo los parámetros del láser afectan el  $V_{vc}$  permite optimizar procesos de texturizado para aplicaciones biomédicas e industriales donde el control del volumen superficial es crítico.

En la primera pasada se observa un aumento del  $V_{vc}$  para velocidades bajas y medias, y variaciones no significativas para velocidades altas (500  $\text{mm/s}$ ). Un estudio de Narayanan et al. (2024) [61] desarrolló un modelo computacional para simular la topografía resultante del texturizado con láser de nanosegundo, el cual demostró que la velocidad de procesamiento afecta de forma no lineal los

parámetros de volumen, incluyendo  $V_{vc}$ . Se observó que, al aumentar la velocidad, disminuye la superposición de pulsos y la energía acumulada sobre la superficie, lo que reduce la profundidad de los valles formados y, en consecuencia, el valor de  $V_{vc}$ . Estos resultados fueron validados experimentalmente, mostrando una alta correlación con los valores reales medidos de rugosidad y volumen [61].

Por otro lado, se observa que, tanto para una como para dos pasadas, se redujo el volumen de los valles del núcleo para frecuencias altas (45 kHz) según se combine con la velocidad. Desde el punto de vista físico, al aumentar la frecuencia del láser (manteniendo constante la potencia), se reduce la energía por pulso, lo que genera impactos menos profundos sobre la superficie del titanio. Esto disminuye la capacidad de ablación y la formación de cráteres profundos, resultando en texturas más superficiales y, por tanto, en un menor volumen de los valles ( $V_{vc}$ ) generado durante el texturizado.

En la segunda pasada la variación del parámetro  $V_{vc}$  no es tan significativa, como se puede ver en la **Figura 59 b**, y como revela el análisis ANOVA, se ha obtenido un valor de F con respecto al número de pasadas de 4,52 y un p-valor de 0,386, lo que indica una baja influencia del parámetro sobre el  $V_{vc}$ .

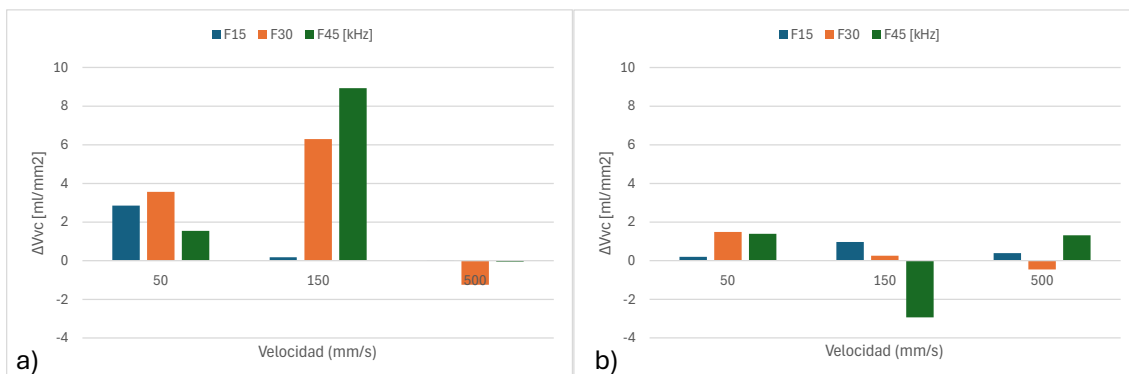


Figura 59, variación de  $V_{vc}$  para 15% de potencia (15,8 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

Los parámetros que sí han mostrado influencia son la velocidad y frecuencia. Para los cuales se ha obtenido un valor F de 11,66 y 9,55 respectivamente, mientras que los p-valores calculados son 0,0013 y 0,0033 para cada uno. Dichos datos revelan la alta influencia que tiene la velocidad al aumentarla, siendo el parámetro crítico de influencia en el  $V_{vc}$ , mientras que la frecuencia también tiene influencia, pero más moderada.

#### 4.1.2. Potencia al 25% (26,25 W)

En este epígrafe se estudiarán las 9 probetas que recibieron un 25% de la potencia del equipo de texturizado, como se ve en la

Tabla 8, probetas texturizadas a 25% de potencia (26,25 W)

		Frecuencia [kHz]		
Velocidad [mm/s]	15	30	45	
50				
150				
500				

En estas probetas texturizadas a potencia media se observan claramente las superficies texturizadas y la frontera entre ninguna, una y dos pasadas de láser. En todas las probetas la franja situada mas a la izquierda es la no texturizada, a continuación la zona que recibe una pasada de texturizado y en el extremo derecho la zona con dos texturizados, igual que en el ensayo a 15% de potencia.

En un primer análisis meramente visual, salta a la vista que las probetas texturizadas a baja velocidad (50 mm/s), son las que presentan una superficie más alterada y potencialmente rugosa, que podría deberse a que la incidencia del láser sobre una misma zona se prolonga demasiado en el tiempo.

##### 4.1.2.1. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área $S_a$

En el análisis de la influencia sobre la altura media de la superficie, se observa una tendencia a aumentarla en la primera pasada (ver **Figura 60 a**), como igual

ocurría en el texturizado al 15% de potencia. Cuando se texturiza por segunda vez (ver **Figura 60 b**) es cuando se puede observar la primera reducción significativa de  $S_a$  ( $7,21 \mu\text{m}$ ), para  $50 \text{ mm/s}$  de velocidad y  $15 \text{ kHz}$  de frecuencia. No obstante, esta reducción se produce en las condiciones que produjeron el mayor aumento en la primera pasada ( $12,02 \mu\text{m}$ ). Este fenómeno que ya se dio en el primer ensayo no encuentra correlación con ningún estudio publicado hasta la fecha, pero puede deberse a que durante la primera pasada de texturizado láser, se produce el mayor cambio en la superficie, ya que se actúa sobre un material virgen sin modificaciones previas. Esto generalmente genera una rugosidad inicial alta (mayor  $S_a$ ) debido a la formación de cráteres más definidos, sin efectos acumulativos de otras pasadas. A medida que se realizan más pasadas, la superficie se funde y redistribuye, lo que puede alisar parcialmente el perfil y reducir o estabilizar el  $S_a$ .

Al ser a baja velocidad cuando se producen estos resultados más dispares, sugiere que una exposición más prolongada en el tiempo del láser sobre la superficie propicia una alteración mayor en ella, lo que se traduce en variaciones de la altura media.

Para la máxima velocidad ( $500 \text{ mm/s}$ ), se obtienen ligeras reducciones de  $S_a$  computando ambas pasadas, reduciendo mínimamente o permaneciendo igual según el caso. Sin embargo, no tiene porqué significar que no se está texturizando la superficie, puede estar sucediendo que la superficie se esté suavizando e igualando, manteniendo la altura media, pero acercándose a un estado de pulido, lo que podrá ser contrastado cuando se estudie la altura pico-valle o  $S_z$ .

Esta relación de la velocidad con la  $S_a$  puede deberse a que Al aumentar la velocidad de texturizado láser, se reduce la energía entregada por unidad de área, lo que genera estructuras más superficiales y menos agresivas sobre la superficie del titanio. Esto provoca una menor profundidad de ablación y, como consecuencia, una disminución en el valor del parámetro  $S_a$ . Por tanto, velocidades más altas tienden a producir superficies más suaves [61].

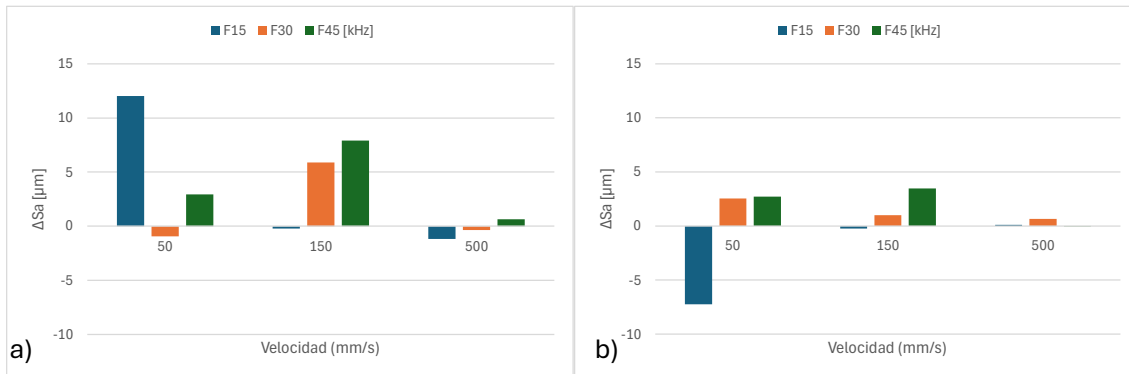


Figura 60, variación de Sa a potencia 25% (26,25 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

#### 4.1.2.2. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sz

En el estudio de la altura pico-valle o Sz, los resultados son dispares con respecto a los obtenidos en el ensayo a 15 W de potencia.

En la primera pasada (ver **Figura 61 a**) se puede observar que para una frecuencia de 30 kHz y velocidad baja, y para una frecuencia de 15 kHz y alta velocidad, el valor de Sz se reduce drásticamente, hasta en 394,32 μm para la segunda combinación, cuando para el resto de los ensayos realizados a esta potencia los incrementos o decrementos permanecen en el orden de los 50 μm. Esto sugiere que puede tratarse de un fallo a la hora de escanear la superficie de la probeta o bien que se trata de una combinación de parámetros muy positiva para la reducción de Sz. Para corroborar cualquiera de estas dos hipótesis sería conveniente volver a texturizar otras probetas repitiendo las condiciones del estudio para comprobar la naturaleza de los resultados.

Salvando estas dos combinaciones, en la primera pasada se aprecia una reducción de Sz para valores bajos y medios de frecuencia. De igual manera se contabiliza un efecto positivo en la reducción de Sz con el aumento de la velocidad.

No existen estudios hoy en día con los que contrastar la correlación con la frecuencia, pero se podría relacionar una frecuencia más baja suponga pulsos más largos, que producirían una mayor ablación, y que a su vez proporcionen una ventana temporal más dilatada para la refluencia del material y la suavización de la superficie.

Para la velocidad se debe a que como se mencionó para 15 W, una mayor velocidad reduce el tiempo de interacción del láser con la superficie, limitando la formación de picos altos y resultando en una topografía más plana [43]. Para la segunda (ver **Figura 61 b**) pasada los resultados son más negativos, estabilizándose a altas velocidades, pero aumentando la Sz a velocidades

medias y bajas. De nuevo no existen estudios que relacionen la multipasada con la Sz, ni positiva ni negativamente, pero se deduce una posible saturación de la superficie en la segunda pasada.

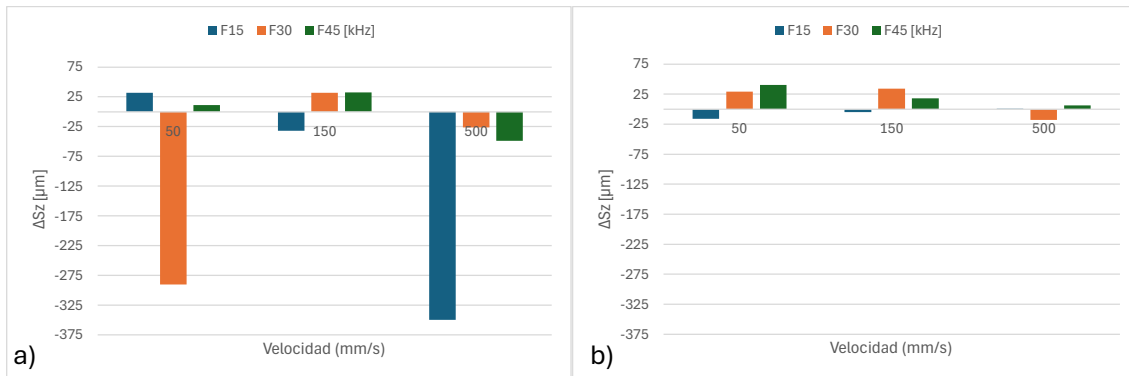


Figura 61, variación de Sz a potencia 25% (26,25 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

#### 4.1.2.3. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sk

En el estudio de la altura del núcleo superficial, los resultados obtenidos siguen una tendencia lineal con los obtenidos para el estudio al 15% de potencia. Comparando la **Figura 58** con la **Figura 62**, la Sk aumenta o disminuye para las mismas combinaciones de parámetros, haciéndolo en mayor cantidad en el texturizado a 25% de potencia.

En la primera pasada (ver **Figura 62 a**), para velocidades medias y bajas tiende a aumentarse la Sk, de igual manera que ocurría en el texturizado a 15% de potencia. Como se menciona en el estudio “*Matec Web of Conferences*” [75], el aumento de la velocidad favorece la reducción o estabilización de la altura media del núcleo, ya que se entrega menos energía por unidad de área, se generan microfosas menos profundas y la distribución del material fundido es más uniforme.

En cuanto a las frecuencias no se observa una correlación directa con el aumento o la reducción de Sk, como muestra el análisis ANOVA, para el que se obtiene un valor F de 7,37 y un p-valor igual a 0,0091. Valores casi idénticos a los obtenidos para la potencia (7,29 y 0,0095) respectivamente, lo que indica que la influencia no es tan decisiva como para la velocidad (8,27 y 0,0059).

En la segunda pasada (ver **Figura 62 b**), los valores permanecen más cerca de la línea neutra, observando la reducción más notable para velocidad igual a 50 mm/s y frecuencia igual a 15 kHz, reduciendo la Sk en 17,48 µm, pero en el cómputo de ambas pasadas, la Sk aumentó en 15,66 µm. La única combinación que encontró combinación de parámetros que redujeran la Sk en ambas pasadas o en el cómputo de estas fue a alta velocidad (500 mm/s) y baja frecuencia (15

kHz), donde para las otras frecuencias a esa velocidad los valores estaban cercanos al cero, sugiriendo una suavización de la superficie.

Se observa que el parámetro que más influencia positiva tiene en el control de Sk es la velocidad, tanto en valores de calidad superficial como en los análisis estadísticos.

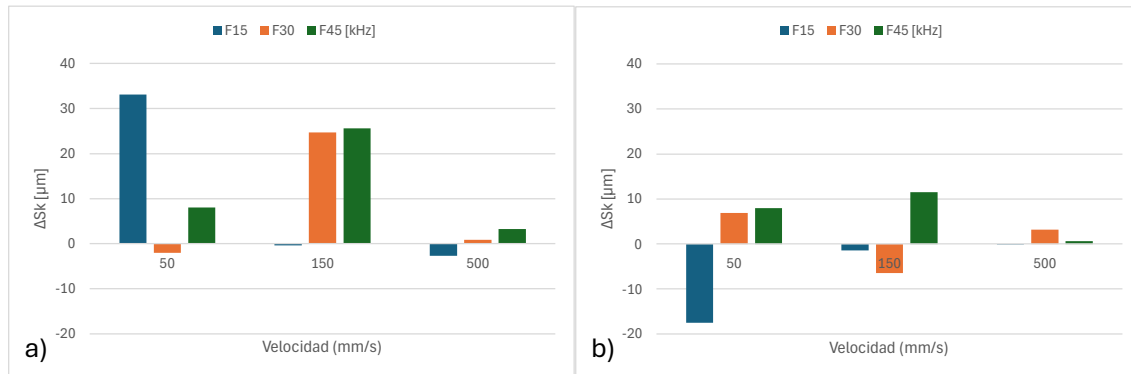


Figura 62, variación de Sk a potencia 25% (26,25 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

#### 4.1.2.4. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Vvc

En el estudio del volumen de los valles del núcleo (Vvc) para potencia al 25%, se han obtenido resultados similares a los obtenidos con potencia al 15% (ver **Figura 59**), pero con aumentos más cuantiosos. Para velocidades medias y bajas, al 15% de potencia, el Vvc crece de media 3,85 ml/mm<sup>2</sup>, mientras que para el 25% de potencia el Vvc crece 7,03 ml/mm<sup>2</sup> de media. Este aumento medio se debe a la mayor cantidad de energía que incide sobre la superficie, se incrementa la ablación de material, lo que tiende a generar cráteres más profundos y anchos, aumentando así el volumen vacío del núcleo de la superficie, como corrobora el estudio “A 3D computational model of nanosecond pulsed laser texturing of metals for designing engineered surfaces” [61].

En la segunda pasada (**Figura 63 b**) se obtiene una notable reducción a velocidad igual a 50 mm/s y frecuencia igual a 15 kHz, y en general los parámetros tienden a estabilizarse cerca de la línea del valor nulo. Sería interesante estudiar un número superior de pasadas para comprobar si esta tendencia puede reducir la Vvc con un número mayor de pasadas.

En contra de lo que se afirma en el estudio [61], que afirma que el número de pasadas durante el texturizado láser influye en el solapamiento y acumulación de cráteres en la superficie, por lo que cada pasada adicional agrega más capas de ablación, lo que aumenta la profundidad y complejidad de la textura, generando un mayor volumen en los valles (Vvc), en este estudio se observa una tendencia a estabilizar o reducir la Vvc.

En ambas pasadas las altas velocidades proporcionan los mejores resultados, de igual manera que ocurriría en el ensayo a menor potencia (**Figura 59**), siendo el único parámetro que logra reducir el Vvc en ambas pasadas.

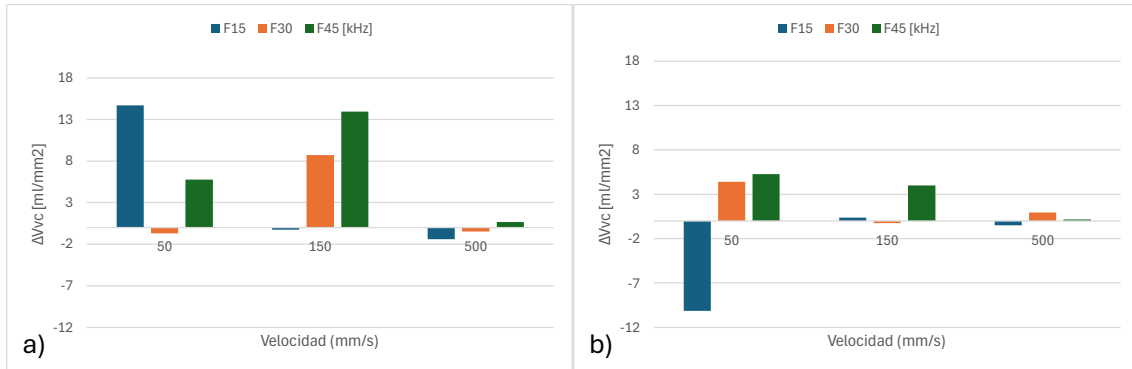


Figura 63, variación de Vvc a potencia 25% (26,25 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

#### 4.1.3. Potencia al 40% (42 W)

En este tercer ensayo con una potencia cercana a la mitad que puede ofrecer el equipo láser de nanosegundo, y observando las diferencias observadas entre 15% y 25%, se espera que los resultados que se obtengan sean más extremos que en los ensayos previos.

En este tercer ensayo se observan superficies aparentemente más alteradas, siendo estas especialmente abruptas en valores más bajos de velocidad, que podría relacionarse con las conclusiones obtenidas de los dos ensayos previos.

Tabla 9, probetas texturizadas a 40% de potencia (42 W)

Velocidad [mm/s]	Frecuencia [kHz]		
	15	30	45
50			
150			
500			

#### 4.1.3.1. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área $S_a$

En este tercer estudio se han obtenido resultados proporcionales a los obtenidos en los estudios previos. Siendo estos negativos en lo referente a una operación de pulido para velocidades medias y bajas, con aumentos de  $S_a$  de hasta 17,11  $\mu\text{m}$  en la primera pasada (**Figura 64 a**) y 12,52  $\mu\text{m}$  en la segunda (**Figura 64 b**).

Para las frecuencias, lo que se obtuvo en el ensayo a 15% de potencia, donde se relacionó un aumento de frecuencia con una reducción de la  $S_a$  [61], en este ensayo se invierte, logrando reducciones de  $S_a$  en ambas pasadas para 15 kHz de frecuencia cuando se texturizó a 500 mm/s. La baja frecuencia emite pulsos de láser más prolongados, pero a su vez proporciona una ventana más grande de tiempo para la redistribución del metal fundido, que sumado a la alta velocidad puede ser la razón de la reducción de  $S_a$  observada.

Esta reducción es de 1,86  $\mu\text{m}$  para la primera pasada y 0,512  $\mu\text{m}$  en la segunda, que ambas pasadas consiguen una reducción de 2,371  $\mu\text{m}$  en la altura media de la superficie, acercándose al objetivo de lograr un acabado de pulido.

Considerando que la Sa media de las probetas sin texturizar es de 3,73  $\mu\text{m}$ , esta reducción es bastante significativa.

De nuevo a altas velocidades es cuando se han obtenido los mejores resultados, resaltando el interés que tendría un estudio centrado en el efecto de la velocidad.

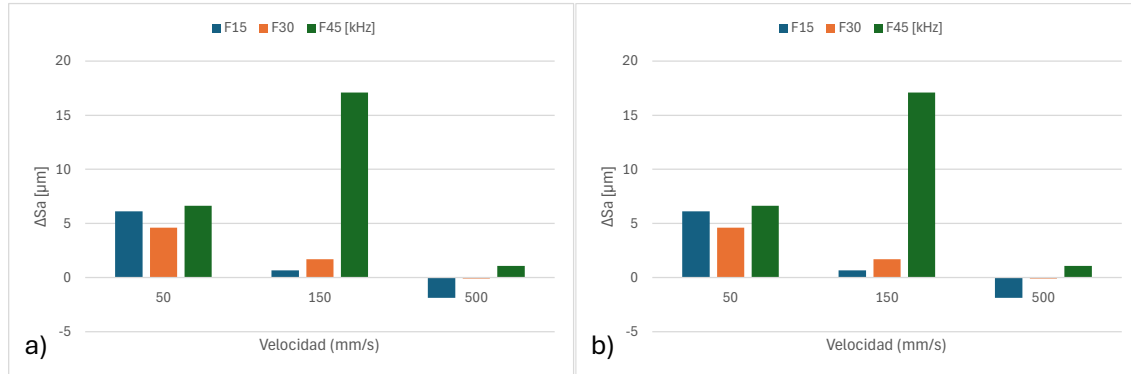


Figura 64, variación de Sa a potencia 40% (42 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

#### 4.1.3.2. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sz

Los resultados obtenidos en el estudio de la altura pico-valle muestran una clara diferencia entre lo que se consigue con una pasada y con dos pasadas. En la primera (**Figura 65 a**) pasada se reduce drásticamente la Sz, en velocidades bajas, donde se logra reducir hasta en 241,49  $\mu\text{m}$  para 15 kHz de frecuencia, y especialmente para la misma frecuencia a 500 mm/s, donde la reducción es de 361,87  $\mu\text{m}$ .

Sin embargo, en la segunda (**Figura 65 b**) pasada la Sz tiende a aumentar de nuevo, siendo este aumento más significativo en bajas velocidades. No se han encontrado estudios científicos que relacionen el número de pasadas con la Sz, pero una posible explicación es que la primera pasada actúa sobre una superficie lisa y virgen, removiendo material de forma controlada y generando una textura inicial con relieves moderados, lo que puede reducir irregularidades naturales y disminuir Sz. En cambio, la segunda pasada interactúa con una superficie ya texturizada, profundizando cráteres existentes o acentuando valles sin eliminar completamente los picos. Esto aumenta el contraste entre las zonas altas y bajas, provocando un incremento significativo de Sz. Así, el efecto acumulativo de la segunda pasada puede intensificar la topografía más que la primera, dependiendo de la energía aplicada y la distribución de la textura previa.

Aun así, a velocidades intermedias y altas, existen 3 combinaciones de parámetros que sí logran reducir la Sz, posiblemente compensando la energía que el láser proyecta sobre la superficie con una breve exposición del uno sobre el otro.

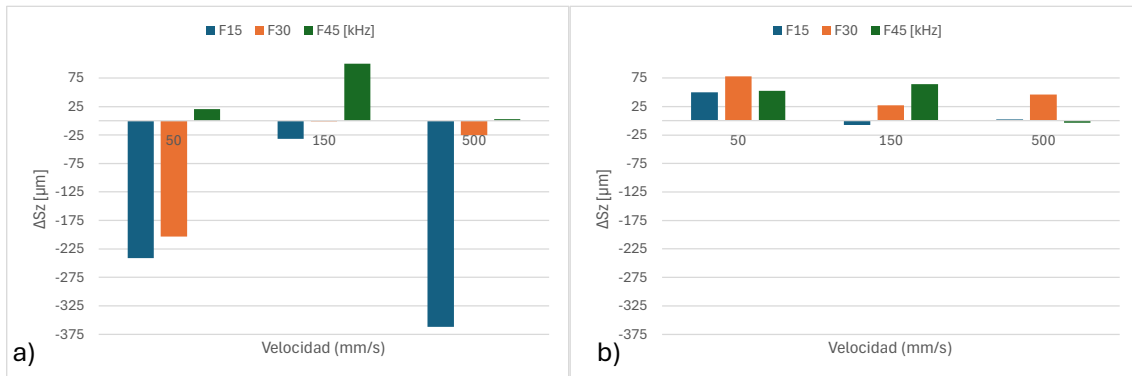


Figura 65, variación de Sz a potencia 40% (42 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

#### 4.1.3.3. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Sk

En esta etapa a 40% de potencia, los resultados a velocidades medias y bajas han sido altamente negativos si se habla en clave de pulido.

Para el primer texturizado (**Figura 66 a**), combinando velocidad media con frecuencia igual a 45 kHz, el aumento de Sk alcanza el valor de 60 μm, aunque en la gráfica sólo se muestre hasta 30 μm con tal de que sea apreciable el conjunto de esta.

Por el contrario, el aumento de velocidad se muestra como el parámetro clave en el proceso, que estabiliza la variación de la altura media del núcleo de la superficie, y reduciendo ésta en 4,13 μm para frecuencias bajas. A diferencia de lo observado en el estudio a 15% de potencia y lo que se presenta en el estudio [43], a velocidades medias y altas, las bajas frecuencias logran los mejores resultados e incluso reducciones de la Sk, que podría explicarse de la misma manera que lo hacía para la Sz.

En la segunda pasada (**Figura 66 b**), los resultados obtenidos son muy similares a los de la primera pasada. Para velocidades bajas y medias, el aumento de Sk llega hasta los 52,34 μm, mientras que a 500 mm/s y 15 kHz, vuelve a reducir la Sk haciéndolo en 3,95 μm.

Se puede concluir que, para el ensayo a 42 W de potencia, existen combinaciones tanto muy negativas como bastante positivas a la hora de la reducción de Sk y la estabilización de la superficie. Siendo óptima la combinación de 500 mm/s y 15 kHz de frecuencia, logrando una reducción combinada de 8,08 μm.

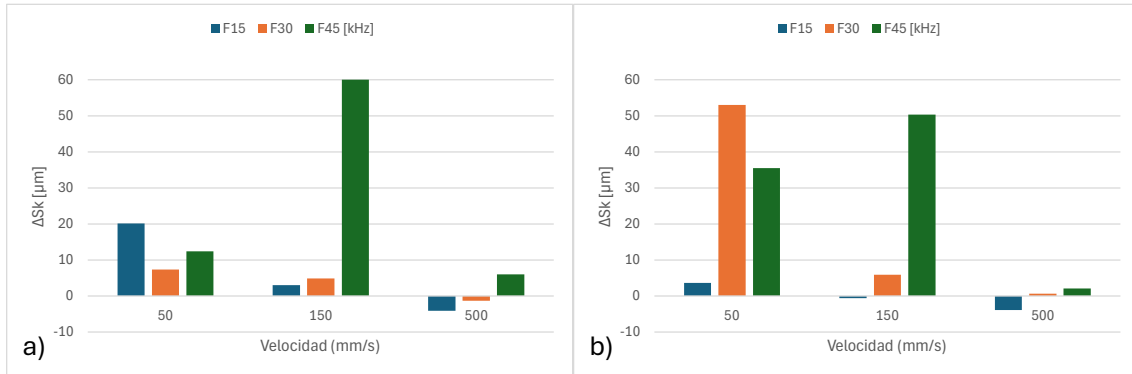


Figura 66, variación de Sk a potencia 40% (42 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

#### 4.1.3.4. Influencia de los parámetros sobre el parámetro de rugosidad de área Vvc

En este caso, la influencia de los parámetros continúa en línea con lo observado en el estudio a 15% de potencia. Como se observa en la **Figura 67**, a altas velocidades se obtienen las mayores reducciones y los menores aumentos de Vvc, como se expuso previamente en concordancia con el estudio [61].

Las frecuencias que mejores resultados presentan vuelven a ser las bajas frecuencias, que, combinado con la alta velocidad, constituyen las mejores combinaciones a la hora de reducir el volumen del núcleo de los valles. De igual manera que se expuso para la Sk en el apartado anterior, puede deberse, en contra de lo que afirma el estudio [43], al mayor intervalo de tiempo entre pulsos, que favorece la redistribución y afinado de la superficie.

De nuevo sería interesante comprobar si con un número mayor de pasadas, o un mayor aumento de la velocidad, se obtendrían mayores reducciones de Vvc.

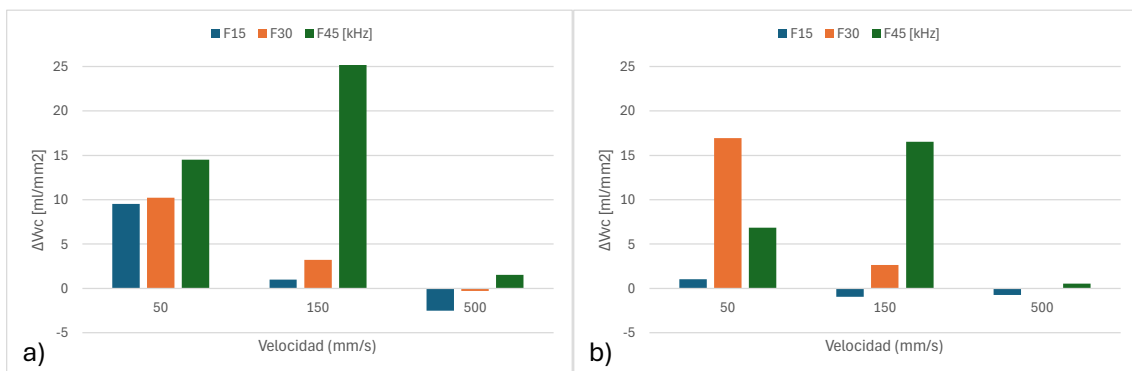


Figura 67, variación de Vvc a potencia 40% (42 W). a) Primera pasada; b) Segunda pasada

A continuación, recogen las conclusiones de los diferentes ensayos previos realizados, en los que se ha analizado la influencia de la velocidad de escaneo, la frecuencia del láser y el número de pasadas sobre la superficie del titanio, para distintos niveles de potencia (15 %, 25 % y 40 %). Estos resultados permiten



establecer una primera aproximación sobre cómo los diferentes parámetros del texturizado influyen sobre los parámetros de calidad superficial estudiados a la hora de buscar el acabado de pulido.

El parámetro que ha mostrado ser el más influyente es la velocidad, logrando mejores resultados en  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_k$  y  $V_{vc}$ , es decir, el aumento de potencia ha tenido efectos positivos en todos los parámetros de rugosidad. a velocidad de desplazamiento del láser afecta directamente la energía acumulada por unidad de superficie: al aumentar la velocidad, se reduce el tiempo de exposición y, por tanto, la energía entregada [69]. Esto genera una ablación más superficial, lo que tiende a disminuir los valores de  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_k$  y  $V_{vc}$ , produciendo superficies más suaves y controladas. Este comportamiento ha sido confirmado mediante simulaciones y validaciones experimentales que muestran cómo una mayor velocidad reduce la agresividad del texturizado.

Los aumentos de potencia han sido negativos para todos los parámetros de rugosidad superficial, excepto para la  $S_z$ , donde según se combinara con los demás parámetros podía llegar a ser positiva. Exceptuando este caso, los mejores resultados obtenidos para  $S_a$ ,  $S_z$  y  $S_k$  han sido con los valores más bajos de potencia, teniendo respaldo físico en que a medida que la potencia aumenta, también lo hace la energía entregada por pulso, lo que genera cráteres más profundos y una mayor ablación del material [67,69,76]. Esto se traduce en un incremento de los valores de  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_k$  y  $V_{vc}$ , al formarse relieves más pronunciados y valles más amplios en la superficie. Para lograr superficies pulidas, caracterizadas por rugosidades muy bajas ( $S_a < 0.1 \mu\text{m}$  y  $S_z < 1 \mu\text{m}$ ), es necesario mantener la potencia en niveles bajos o moderados para minimizar la agresividad del láser y evitar estructuras profundas o desiguales. Esta relación ha sido respaldada por simulaciones y validaciones experimentales como las presentadas por [61], donde se confirma que la potencia láser tiene un efecto significativo y no lineal sobre parámetros volumétricos y topográficos de superficies tratadas.

La frecuencia del láser influye en la textura superficial al controlar la energía por pulso: frecuencias más altas reducen esa energía, generando impactos más suaves y estructuras menos profundas. Esto tiende a disminuir los valores de  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_k$  y  $V_{vc}$ , favoreciendo superficies más uniformes y cercanas al pulido. Este efecto se alinea con estudios computacionales que muestran cómo la frecuencia modifica la morfología sin necesidad de aumentar la ablación [61], sin embargo, en algunos casos se ha demostrado lo contrario, donde bajas frecuencias presentaban mayores reducciones, posiblemente debido al mayor lapso de tiempo disponible entre pulsos para la redistribución del titanio fundido.



En cuanto al número de pasadas no se pueden establecer conclusiones firmes ya que sólo se han realizado dos pasadas, pero por lo general ha sido positiva la segunda pasada, a la hora de reducir los valores obtenidos de los diferentes parámetros, donde se puede observar una tendencia que sería interesante estudiar para más pasadas. Esta tendencia da pie a la segunda etapa del estudio, donde estudiará más en profundidad.

## 4.2. Segunda etapa: estudio de la influencia del número de pasadas en los parámetros de calidad superficial

En esta segunda etapa del proceso se estudiará el efecto del número de pasadas sobre las superficies de titanio, analizando su evolución sobre dos probetas seleccionadas. Para ello, se evaluarán zonas texturizadas con 1, 2, 4, 6 y 8 pasadas consecutivas, con el objetivo de entender cómo influye la repetición del tratamiento láser en la modificación topográfica del material y los parámetros de rugosidad superficial.

Para el estudio se han seleccionado dos probetas que presentaron resultados opuestos en el segundo texturizado de la primera etapa. La primera probeta, en adelante “Probeta A”, se texturizó 40% de potencia, 45 kHz de frecuencia y 150 mm/s. Esta combinación de parámetros ocasionó los mayores incrementos en los parámetros de rugosidad superficial como se muestra en la **Tabla 10**, donde las variaciones de ambas combinaciones de parámetros seleccionadas para la segunda etapa se muestran.

Por contraparte se ha estudiado una probeta texturizada al 25% de potencia, 15 kHz de frecuencia y una velocidad de 50 mm/s, en adelante “Probeta B”. Esta combinación de parámetros fue la que más reducción de los parámetros de rugosidad superficial presentó de todas las estudiadas.

La razón de la selección de estas combinaciones es estudiar la influencia del número de pasadas de texturizado en los casos más extremos, con la intención de discernir una tendencia de éstas sobre la calidad superficial.

Se estudiarán los efectos de múltiple número de pasadas sobre cada parámetro de rugosidad superficial de forma independiente de la misma manera que se hizo en la primera etapa, esta vez trabajando con el valor de cada parámetro y no con variaciones.

Tabla 10, variación de los parámetros entre la segunda y la primera pasada de texturizado de las combinaciones de la primera etapa

	Probeta A	Probeta B
Pot. (%) / Frec. (kHz) / Vel. (mm/s)	40 / 45 / 150	25 / 15 / 50
$\Delta Sa$ [ $\mu\text{m}$ ]	12,542	-6,967
$\Delta Sz$ [ $\mu\text{m}$ ]	64,536	-15,955
$\Delta Sk$ [ $\mu\text{m}$ ]	50,276	-17,481
$\Delta Vvc$ [ $\text{ml}/\text{mm}^2$ ]	16,532	-10,144

#### 4.2.1. Estudio de la influencia del número de pasadas en el parámetro de rugosidad superficial Sa

En este apartado se analiza cómo influye el número de pasadas del haz láser sobre el parámetro Sa (altura media de la superficie) de las probetas tratadas. Al repetir sucesivamente el barrido láser sobre una misma zona, se acumula energía térmica, lo que puede modificar significativamente la morfología de la superficie. Este análisis permitirá identificar posibles tendencias o umbrales a partir de los cuales el incremento de pasadas no mejora el acabado, o incluso lo deteriora debido al sobrecalentamiento o fusión localizada del material.

Como se muestra en la **Figura 68**, la Probeta A muestra un aumento de Sa en las dos primeras pasadas, para después reducirse poco a poco en la cuarta, sexta y octava pasada. A partir de la cuarta pasada las reducciones comienzan a ser cada vez más pequeñas, hasta que de la sexta a la octava apenas se observa diferencia. Se aprecia que no se alcanzan en ningún momento valores cercanos a la Sa original de la superficie.

Para la Probeta B se observa un aumento en la primera pasada, y una considerable reducción en la segunda, alcanzando el valor de 7,856  $\mu\text{m}$ , cercano a los 2,8  $\mu\text{m}$  de la superficie sin tratar, sin embargo, a partir de la cuarta pasada se vuelve a incrementar. El mejor resultado se obtiene para dos pasadas, pudiendo a partir de la tercera pasada llegar a saturar el material.

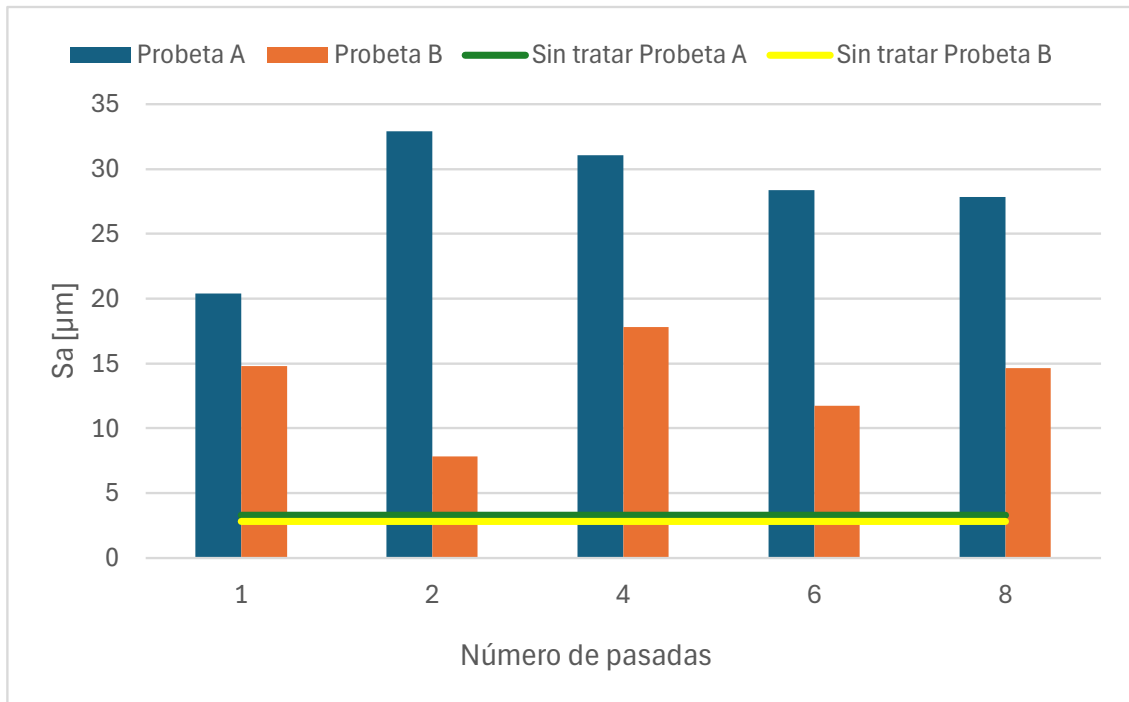


Figura 68, variación de  $S_a$  en función del número de pasadas

Al superar cierto número de pasadas, este crecimiento tiende a estabilizarse o incluso a revertirse ligeramente. Esto se debe a fenómenos como la re-fusión parcial del material, la redistribución térmica y la saturación de la ablación, que pueden alisar sutilmente la superficie o impedir que nuevas pasadas modifiquen sustancialmente el relieve ya formado. Aunque no existen estudios específicos que cuantifiquen esta evolución de  $S_a$  en función del número de pasadas sobre titanio, el modelo predictivo del estudio “*A 3D computational model of nanosecond pulsed laser texturing of metals for designing engineered surfaces*” respalda esta dinámica no lineal, mostrando cómo la superposición de cráteres afecta la rugosidad superficial y tiende a estabilizarse con pasadas sucesivas [61].

En el estudio “*Texturing design of WC-Co through laser parameter selection to improve lubricant retention ability of cutting tools*” [68] se dice que el parámetro  $S_a$  tiende a incrementarse significativamente tras la primera pasada debido a la formación de cráteres iniciales; sin embargo, con pasadas adicionales, la rugosidad puede estabilizarse o incluso disminuir, dependiendo del grado de fusión y redistribución térmica, concordando con lo observado en este ensayo.

#### 4.2.2. Estudio de la influencia del número de pasadas en el parámetro de rugosidad superficial $S_z$

En este apartado se analiza cómo influye el número de pasadas del haz láser sobre el parámetro  $S_z$  (máxima altura pico valle) de las probetas tratadas.

Para la Probeta A (ver **Figura 69**) se observa un comportamiento parecido al obtenido en el estudio de Sa. Se observa un crecimiento inicial en las primeras pasadas, hasta llegar a un punto de inflexión donde la altura pico-valle tiende a estabilizarse e incluso bajar, aunque no apreciándose una relación lineal. En este ensayo el punto de inflexión para la Probeta A se sitúa en cuatro pasadas, a partir de las cuales el valor de Sz comienza a reducirse.

Para la Probeta B se observa una reducción de la Sz en la segunda pasada, de igual manera que ocurría para Sa, a partir de la cuarta pasada comienza a aumentar de nuevo el valor de Sz, sin lograr reducir el valor de la máxima altura pico-valle.

En la Probeta A, que es la que en la primera etapa presentó resultados más desfavorables, los valores de Sz tienden a aumentar hasta la cuarta pasada, a partir de la cual disminuyen. Para la Probeta B, el comportamiento es a la inversa, con las primeras pasadas disminuye la Sz, y a partir de la segunda o tercera aumenta hasta estabilizarse.

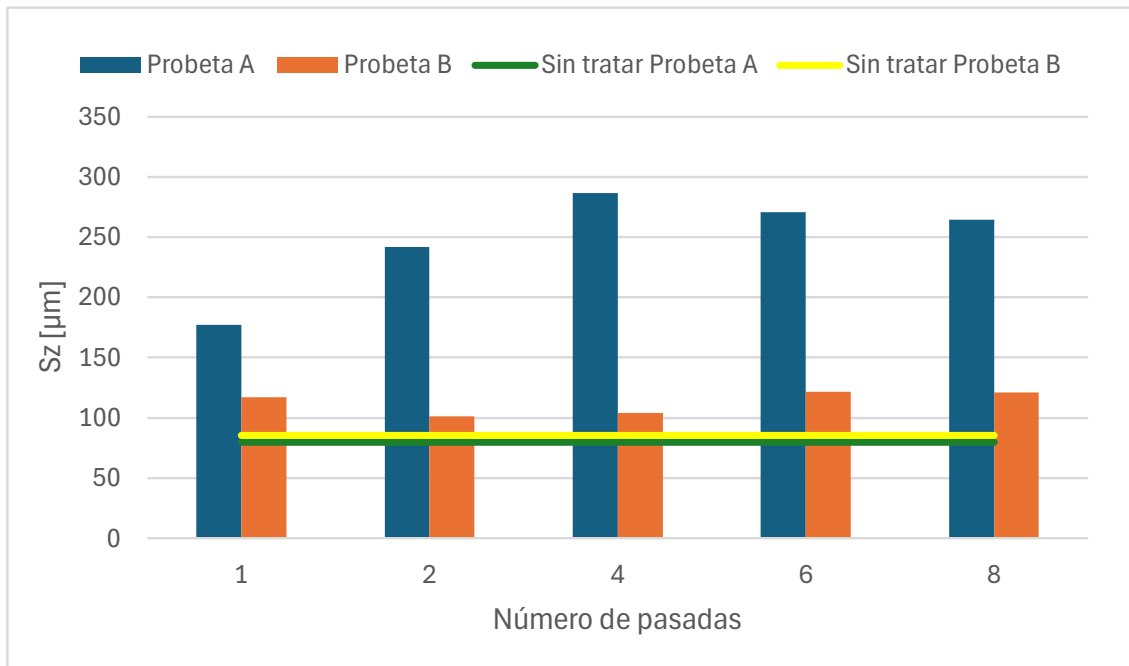


Figura 69, variación de Sz en función del número de pasadas

Desde un punto de vista físico, cada pasada del láser remueve material mediante ablación térmica, generando cráteres en la superficie. En las primeras pasadas, estos cráteres se forman sobre un material virgen, con lo cual los relieves aún son moderados. Sin embargo, al aplicar una segunda o tercera pasada, el láser actúa sobre una superficie ya texturizada, profundizando los valles existentes y elevando la complejidad de la superficie. Este proceso tiende a aumentar

significativamente el valor de  $S_z$ , ya que se amplía la distancia entre los puntos más altos y los más profundos de la superficie.

No obstante, cuando se alcanzan muchas pasadas consecutivas, se produce un efecto de saturación térmica. Esto ocurre cuando el material comienza a refundirse en zonas previamente tratadas, lo cual puede suavizar los picos o rellenar valles parcialmente, provocando una estabilización o incluso una leve disminución de  $S_z$  [61].

Un estudio sobre el texturizado láser en acero inoxidable AISI 301LN observó que, al aumentar el número de pasadas, la profundidad de las marcas láser incrementa debido a la acumulación térmica. Sin embargo, más allá de cierto número de pasadas, la superficie se vuelve más lisa, lo que sugiere una posible disminución de la  $S_z$  [71].

En el estudio *“Texturing design of WC-Co through laser parameter selection to improve lubricant retention ability of cutting tools”* [68], se afirma que la primera pasada provoca un aumento notable en  $S_z$  por la formación de relieves profundos; sin embargo, al incrementar el número de pasadas, puede producirse saturación térmica, lo que suaviza la textura y reduce el parámetro. Esta conclusión se puede correlacionar con los resultados obtenidos en la Probeta B, pero no con los de la Probeta A, lo que sugiere que la respuesta del material no sólo depende del parámetro concreto sino de la combinación de todos los parámetros de texturizado.

#### 4.2.3. Estudio de la influencia del número de pasadas en el parámetro de rugosidad superficial $S_k$

En este apartado se analiza cómo influye el número de pasadas del haz láser sobre el parámetro  $S_k$  (altura media del núcleo de la superficie) de las probetas tratadas.

Para la Probeta A (ver **Figura 70**), el comportamiento vuelve a ser similar a los otros dos ensayos, experimentando un primer incremento de la  $S_k$ , llegando a un punto de inflexión en la segunda pasada, a partir de la cual la  $S_k$  baja y se estabiliza para pasadas posteriores.

En la Probeta B los resultados también son comparables con los obtenidos en los ensayos anteriores. De la primera a la segunda pasada la  $S_k$  disminuye, alcanzando los 19,78  $\mu\text{m}$ , cercanos a los 4,13  $\mu\text{m}$  de la superficie original, no obstante, es un punto de inflexión a partir del cual sube y se estabiliza en torno a los 37  $\mu\text{m}$ .

En la segunda pasada, la diferencia entre los valores de  $Sk$  de ambas probetas es de  $97,77 \mu\text{m}$ , evidenciando la importancia en la elección de los parámetros del texturizado.

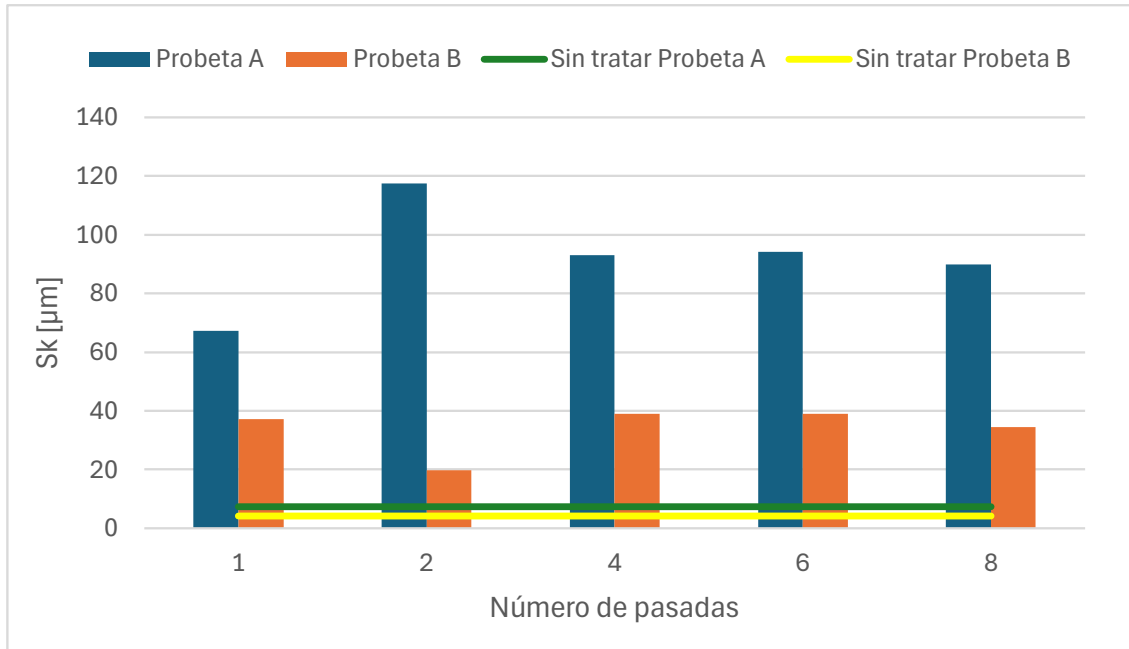


Figura 70, variación de  $Sk$  en función del número de pasadas

En la Probeta A, los iniciales incrementos de  $Sk$  pueden explicarse por la formación inicial de surcos profundos y valles abruptos que aún no han sido modificados por procesos térmicos acumulativos. Conforme se incrementó el número de pasadas, el comportamiento de  $Sk$  mostró ciertas fluctuaciones, probablemente asociadas a fenómenos de re-fusión y redistribución del material.

Estos efectos térmicos acumulados tienden a suavizar o incluso rellenar parcialmente las estructuras más profundas, lo que podría traducirse en una disminución de la profundidad funcional de los valles, y, por tanto, una reducción del valor de  $Sk$ . Sin embargo, también es posible que, en algunos casos, las pasadas adicionales generen estructuras más definidas y profundas, elevando nuevamente  $Sk$ .

La principal diferencia entre ambas probetas es que en la segunda pasada la Probeta A alcanza su valor máximo y a partir de la tercera se estabiliza debido a los fenómenos físicos comentados, mientras que, para la Probeta B, la segunda pasada es donde obtiene su valor mínimo, entrando entonces en la etapa donde se acumulan los efectos térmicos.

#### 4.2.4. Estudio de la influencia del número de pasadas en el parámetro de rugosidad superficial $V_{vc}$

En este apartado se analiza cómo influye el número de pasadas del haz láser sobre el parámetro  $V_{vc}$  (volumen de los valles del núcleo) de las probetas tratadas.

En el caso de la Probeta A (ver **Figura 71**), se observa un comportamiento del  $V_{vc}$  que crece inicialmente con el número de pasadas, alcanzando un valor máximo en la segunda pasada  $50,2 \text{ ml/mm}^2$ . A partir de ese punto, el valor de  $V_{vc}$  desciende ligeramente y luego se estabiliza alrededor de  $40 \text{ ml/mm}^2$  entre las 4 y 8 pasadas. Esto sugiere que, durante las primeras pasadas, la superficie sufre una ablación intensa que profundiza los valles y aumenta significativamente el volumen disponible en la textura. No obstante, a partir de la tercera o cuarta pasada, el efecto del láser parece entrar en una fase de saturación térmica, donde la energía adicional no genera estructuras más profundas, sino que comienza a redistribuir o incluso fundir parcialmente el material tratado, provocando una estabilización del relieve funcional, como también se observó en el estudio de los otros parámetros

Por otro lado, en la Probeta B, el comportamiento de  $V_{vc}$  es muy diferente. El valor inicial de  $V_{vc}$  es más bajo que en la Probeta A ( $18,83 \text{ ml/mm}^2$ ) en la primera pasada y muestra una caída en la segunda pasada, llegando a su valor mínimo  $8,68 \text{ ml/mm}^2$ . Para las siguientes pasadas,  $V_{vc}$  vuelve a aumentar y se mantiene entre  $15$  y  $18 \text{ ml/mm}^2$  hasta la octava pasada. Esta tendencia indica que, en la Probeta B, la segunda pasada posiblemente provocó una re-fusión importante del material, colapsando los valles generados en la primera pasada. Las pasadas siguientes no aumentan significativamente la  $Sk$ , lo que podría atribuirse a un menor acoplamiento de energía o a una mayor homogeneización térmica de la superficie.

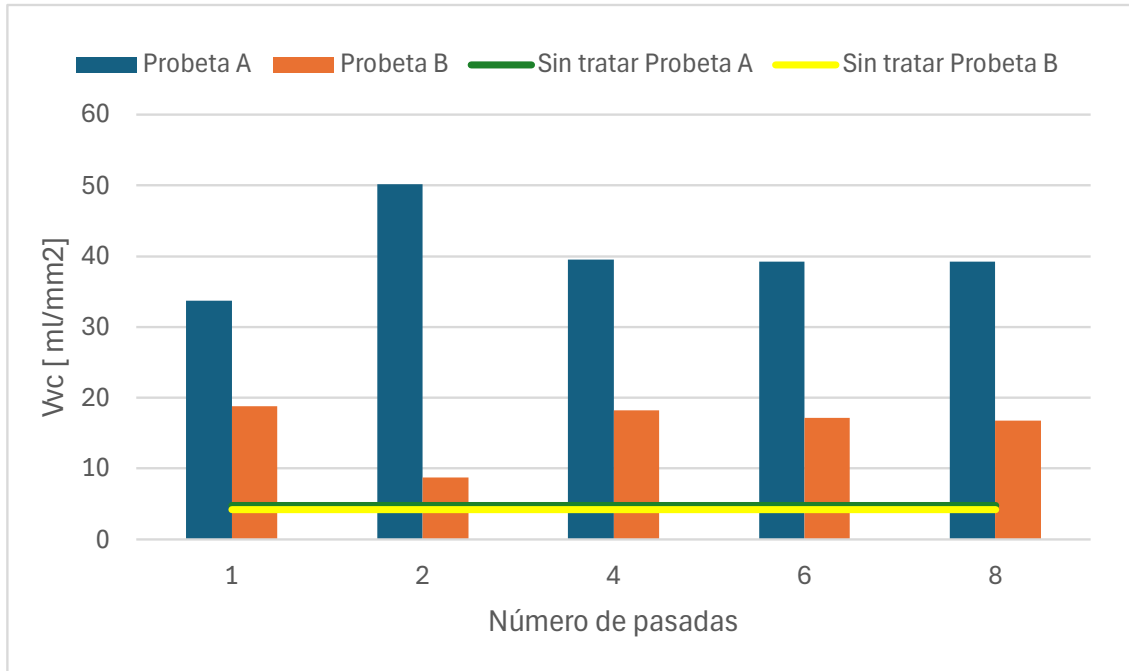


Figura 71, variación de  $V_{vc}$  en función del número de pasadas

Los resultados observados pueden explicarse por la acumulación de energía y la redistribución térmica durante el proceso de texturizado. En la Probeta A, el aumento inicial de  $V_{vc}$  seguido de una estabilización es coherente con una primera fase de ablación intensa y una posterior saturación térmica, como describe el modelo de Narayanan et al. (2024) [61]. En cambio, la Probeta B muestra una reducción temprana de  $V_{vc}$ , probablemente por re-fusión del material, y luego entra en la fase de saturación térmica.

En el estudio *“Texturing design of WC-Co through laser parameter selection to improve lubricant retention ability of cutting tools”* [68], se afirma que el volumen de valles,  $V_{vc}$ , incrementa en la segunda pasada por el desarrollo de estructuras más profundas, pero a partir de la tercera pasada tiende a estabilizarse o disminuir levemente, lo que en parte se puede relacionar con este estudio, ya que para ambas probetas a partir de la tercera pasada las tendencias se estabilizan y muestran un comportamiento más estable, sin embargo, en la segunda pasada sí se aumenta el  $V_{vc}$  en la Probeta A pero en la B disminuye, como ocurría de igual manera en el estudio del parámetro  $S_a$ .

Los resultados observados y analizados en esta segunda etapa del estudio revelan una respuesta muy parecida de los parámetros de rugosidad superficial en función del número de pasadas de texturizado láser que han recibido.

Se ha de distinguir entre la Probeta A, que fue escogida por presentar resultados desfavorables en la primera etapa y la Probeta B, que fue escogida por lo contrario.



En la Probeta A las variaciones de los parámetros ha sido prácticamente idéntica para todos ellos, experimentando un primer aumento considerable del parámetro estudiado en las primeras pasadas, hasta llegar a un punto de inflexión en la segunda o cuarta pasada, donde la acumulación de energía en la superficie provoca una saturación térmica, donde los valores se estabilizan y fluctúan mínimamente con las pasadas posteriores [65,68,69].

Para la Probeta B los resultados muestran una primera reducción del parámetro estudiado, alcanzando los valores mínimos siempre en la segunda pasada, siendo esta un punto de inflexión en el que la superficie se satura térmicamente y se comporta de manera similar a la Probeta A, con fluctuaciones mínimas con las pasadas sucesivas.

Siendo el objetivo del estudio estudiar los parámetros de entrada del texturizado con el fin de lograr un acabado de pulido o cercano a él, se puede afirmar que, en combinaciones de potencia, velocidad y frecuencia adecuados, el número ideal de pasadas para la reducción de los parámetros de rugosidad superficial es de dos pasadas, que constituyen el punto de inflexión en la variación de los parámetros.

### 4.3. Tercera etapa: estudio de la influencia de altas velocidades de texturizado en los parámetros de rugosidad superficial

Paralelamente al estudio de la influencia del número de pasadas, en base a los resultados de la primera etapa, se identificó que la velocidad es un parámetro crítico en la modificación superficial. Debido a esto, se ha realizado una serie de ensayos donde, para bajos valores de potencia y frecuencia, se ha incrementado la velocidad de barrido para evaluar su influencia sobre la rugosidad obtenida.

En este tercer ensayo se ha utilizado una única probeta, con tal de que los valores originales de rugosidad superficial distintos en cada probeta no afecten a los resultados. En esta probeta se han texturizado 15 pequeñas superficies, variando los valores de potencia y velocidad.

En la primera etapa se texturizó a 50 mm/s, 150 mm/s y 500 mm/s, para esta etapa se descartan las velocidades más bajas y se aumentará la velocidad máxima, estudiando valores intermedios entre ellos.

Para la velocidad se han elegido 5 valores, entre 100 mm/s y 900 mm/s, incrementando en 200 mm/s cada vez. Para la potencia se ha texturizado a 15%, 25% y 35% de potencia del equipo láser, los dos primeros son valores ya estudiados en la primera etapa donde se obtuvieron según la combinación



resultados positivos, y el valor de 35% se ha seleccionado por estudiar un valor más alto de potencia, sin llegar al 40% que en la primera etapa se observó ser demasiado agresivo para la superficie.

La combinación de estos parámetros hace un total de 15 texturizados, que se analizan a continuación.

#### 4.3.1. Estudio de la influencia de altas velocidades en el parámetro de rugosidad superficial $S_a$

En este apartado se analiza la influencia de velocidades de texturizado elevadas sobre el parámetro  $S_a$  (ver **Figura 72**), con el objetivo de evaluar cómo afecta la reducción del tiempo de exposición láser a la rugosidad superficial del titanio.

Para velocidad igual a 100 mm/s los valores de  $S_a$  son significativamente más altos que para el resto de las velocidades, especialmente a potencias del 25% y 35%, alcanzando valores de rugosidad muy superiores al de la superficie sin tratar (línea azul). Esto se debe a que, a baja velocidad, el láser permanece más tiempo sobre cada punto, generando una ablación más profunda y agresiva, lo que incrementa fuertemente la rugosidad superficial. Este efecto se ve amplificado por el aumento de potencia ya que, a mayor energía entregada por pulso, mayor es el volumen de material removido o fundido, y por tanto, mayor es el relieve creado.

A partir de 300 mm/s en adelante, la rugosidad  $S_a$  desciende bruscamente y se mantiene en valores bajos y bastante estables, con muy poca variación entre potencias. En todos estos casos,  $S_a$  se sitúa por debajo del valor de la superficie sin tratar, lo que indica que el tratamiento láser en estas condiciones no solo deja una textura controlada, sino incluso más lisa que la original. Este comportamiento se explica porque a mayor velocidad, el tiempo de interacción del láser con la superficie es menor, reduciendo la energía acumulada por unidad de área. Así, la ablación es menos intensa y la superficie resulta más uniforme. La escasa diferencia entre potencias a altas velocidades sugiere que el parámetro dominante en esta región es la velocidad, no la energía total.

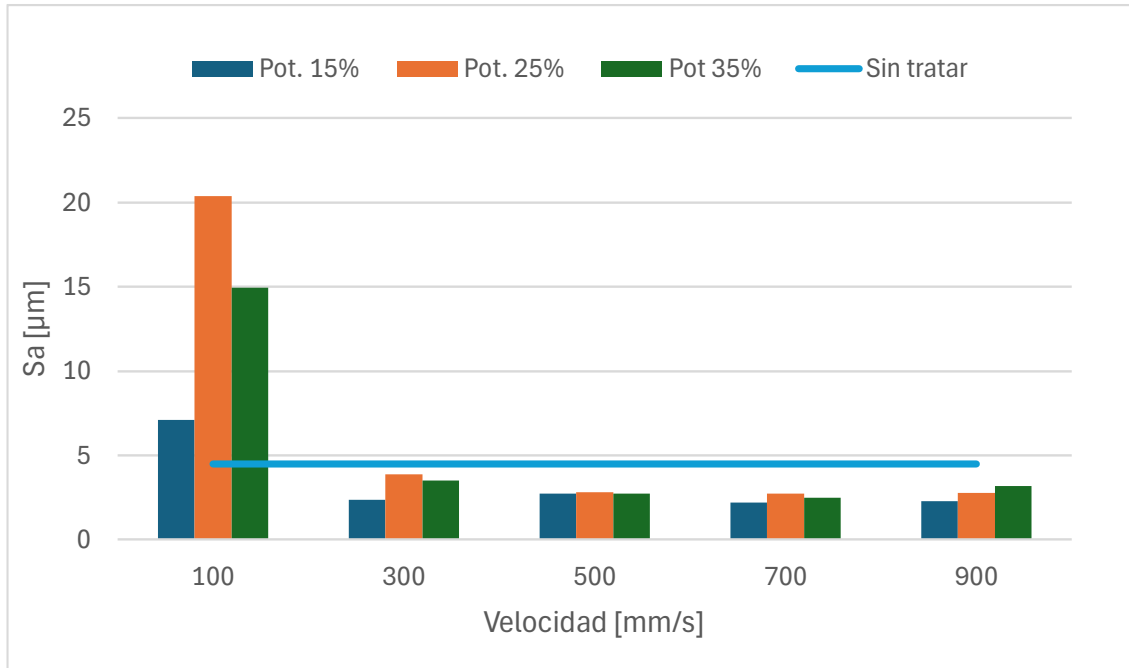


Figura 72, variación de Sa en función de la potencia y la velocidad

En resumen, se observa una fuerte dependencia de Sa con la velocidad a baja escala, con un pico de rugosidad en condiciones de alta energía (baja velocidad y potencia media-alta), mientras que a velocidades superiores el sistema se estabiliza y produce superficies suaves, más uniformes que el estado inicial. Este resultado coincide con los mecanismos térmicos y de ablación controlada descritos en la literatura, como en el estudio de Narayanan et al. (2024) [61], y Vázquez et al. (2022) [69].

#### 4.3.2. Estudio de la influencia de altas velocidades en el parámetro de rugosidad superficial Sz

En este apartado se analiza la influencia de velocidades de texturizado elevadas sobre el parámetro Sz (ver **Figura 73**), con el fin de evaluar cómo se ve afectada la altura máxima entre picos y valles generados en la superficie del titanio.

A baja velocidad (100 mm/s), los valores de Sz son considerablemente más altos, en especial a potencias medias y altas. En particular, a 35% de potencia, Sz alcanza valores superiores a los 110 μm, lo que indica una ablación muy profunda y agresiva. Esta condición favorece la formación de relieves más extremos (picos y valles muy marcados), lo que es coherente con un prolongado tiempo de interacción y una elevada energía por unidad de superficie.

A partir de los 300 mm/s, el parámetro Sz comienza a reducirse de forma significativa, aunque se mantienen algunas diferencias entre niveles de potencia. Esto sugiere que, a velocidades intermedias, la potencia sigue siendo influyente, como se observa a 500 mm/s, el aumento de Sz con potencias más altas es

notable. A altas velocidades, sin embargo, como a 700 y 900 mm/s, los valores de Sz tienden a estabilizarse y las diferencias entre potencias se reducen, aunque no desaparecen del todo. En estas condiciones, el menor tiempo de interacción por unidad de área hace que la energía no se acumule tanto, limitando la ablación. Estos resultados son idénticos a los que se presentan en el estudio *“Effects of Laser Processing Parameters on Texturized Layer Development and Surface Features of Ti6Al4V Alloy Samples”* [67], la única diferencia radica en que en este estudio citado comienzan a reducir el parámetros Sz a 700 mm/s, mientras que en este estudio se observan resultados positivos desde 300 mm/s, posiblemente debido a la combinación de parámetros seleccionados, que favorecen una reducción en los parámetros de rugosidad superficial.

Se destaca el texturizado a 700 mm/s, donde se obtienen los valores más bajos de Sz en todas las potencias, lo cual indica que esta velocidad proporciona un equilibrio óptimo entre interacción láser y control del relieve superficial. A esta velocidad, incluso con la potencia más alta (35%) se obtiene un Sz inferior al de la superficie sin tratar. Esto refuerza la idea de que una velocidad alta permite controlar mejor la textura, reduciendo la formación de picos y valles pronunciados.

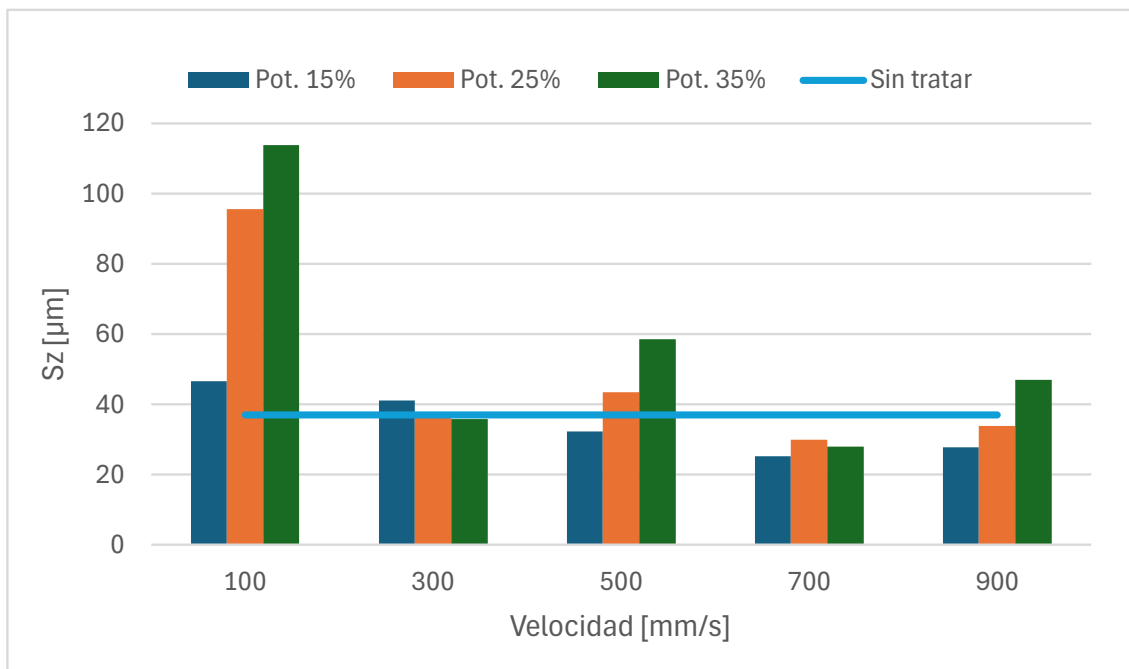


Figura 73, variación de Sz en función de la potencia y la velocidad

Estos resultados evidencian que, a diferencia de lo observado con Sa, el parámetro Sz es más sensible a la potencia, especialmente a bajas velocidades, como se vio en la primera etapa. Los valores más bajos de Sz se obtuvieron a

700 mm/s, donde se logra una combinación eficaz de ablación superficial y homogeneización térmica, coincidiendo con estudios previos [61,71].

#### 4.3.3. Estudio de la influencia de altas velocidades en el parámetro de rugosidad superficial $S_k$

En este apartado se estudia el efecto de altas velocidades de escaneo sobre el parámetro  $S_k$ , con el objetivo de comprender cómo se modifica la porción funcional de la superficie que soporta carga.

La **Figura 74** muestra la evolución del parámetro  $S_k$  (profundidad del núcleo de la rugosidad) en función de la velocidad de escaneo y la potencia del láser.

En el texturizado a 100 mm/s se observa un aumento muy marcado de  $S_k$ , especialmente con potencias del 25% y 35%, alcanzando valores de aproximadamente 59  $\mu\text{m}$  y 43  $\mu\text{m}$  respectivamente. Esto indica que, a baja velocidad y alta potencia, la ablación es intensa y genera un núcleo superficial profundo y agresivo, con estructuras capaces de soportar carga, pero también indicativas de una superficie muy rugosa.

A partir de 300 mm/s, los valores de  $S_k$  descienden bruscamente y se estabilizan en un rango de entre 7 y 12  $\mu\text{m}$  para las potencias evaluadas y por debajo de la  $S_k$  original de la pieza. Este comportamiento sugiere que velocidades más altas reducen el tiempo de interacción por unidad de área, lo que limita la energía acumulada en la zona del núcleo de la textura y produce una superficie más homogénea y controlada. Además, a diferencia de lo que ocurre con  $S_z$ , las diferencias entre potencias en esta zona son menores, y logrando el valor más bajo de  $S_k$  a 15% de potencia (6,79  $\mu\text{m}$ ).

En el rango entre 500 y 900 mm/s los valores de  $S_k$  se estabilizan entre los 6 y 9  $\mu\text{m}$ , sin observarse una influencia de carácter especialmente relevante de las potencias. El valor más bajo se registró a 900 mm/s y 15% de potencia, siendo este 6,48  $\mu\text{m}$ , que en comparación con los 14,24  $\mu\text{m}$  originales de la probeta, constituye una reducción de más del 50% de la  $S_k$  en una sola pasada.

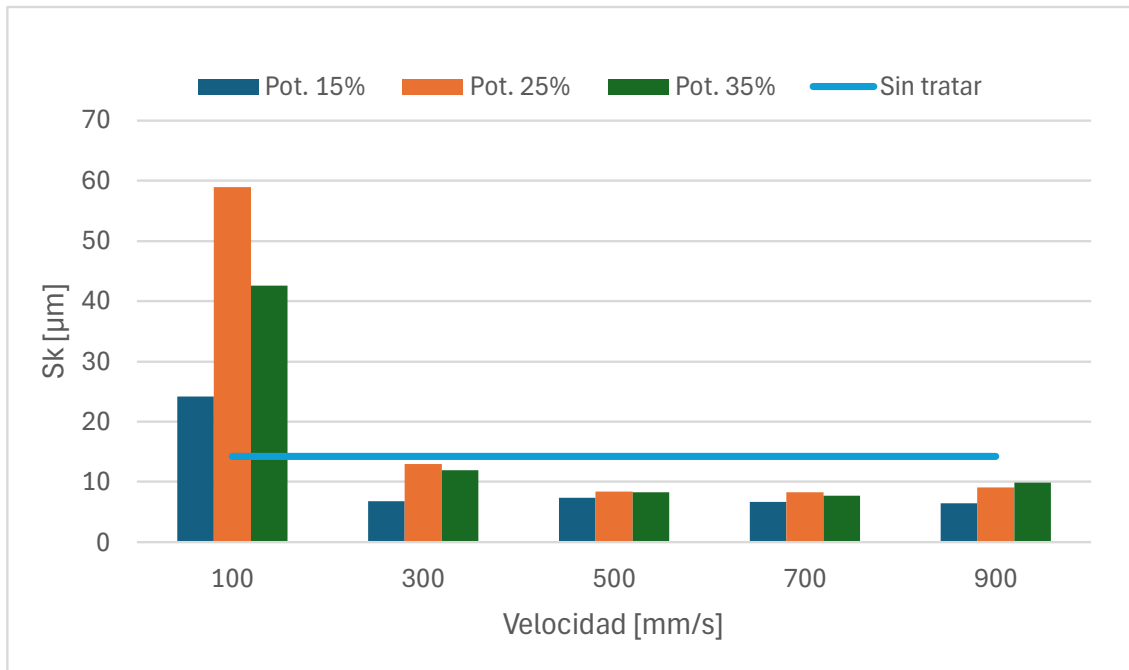


Figura 74, variación de Sk en función de la potencia y la velocidad

Este patrón es coherente con lo observado en otros parámetros como Sa y Sz, y se explica por el equilibrio entre ablación superficial controlada y baja acumulación térmica gracias a las altas velocidades.

Sk es altamente dependiente de la velocidad. En bajas velocidades y potencias medias, se registran valores máximos de Sk, mientras que en altas velocidades el parámetro disminuye y se estabiliza [76].

#### 4.3.4. Estudio de la influencia de altas velocidades en el parámetro de rugosidad superficial Vvc

Este apartado se centra en el análisis del parámetro Vvc bajo condiciones de texturizado a alta velocidad, con el propósito de determinar cómo varía la capacidad de la superficie para retener fluidos o lubricantes. El comportamiento de este volumen funcional es clave en aplicaciones tribológicas o biomédicas.

En la **Figura 75** se analiza el parámetro Vvc (volumen del núcleo de los valles), en función de la velocidad de escaneo y la potencia del láser. A baja velocidad (100 mm/s), se observan valores de Vvc muy elevados, especialmente a potencias del 25% y 35%, alcanzando los 26–27 ml/mm<sup>2</sup>. Este comportamiento es esperable, ya que a bajas velocidades el láser permanece más tiempo sobre la superficie, acumulando más energía por unidad de área y generando estructuras profundas que incrementan el volumen en los valles.

Sin embargo, al aumentar la velocidad a 300 mm/s y superiores, los valores de Vvc descienden drásticamente y se mantienen muy por debajo del valor de la

superficie sin tratar (línea azul), estabilizándose en un rango de 3 a 5 ml/mm<sup>2</sup> independientemente de la potencia aplicada. Este descenso refleja una reducción de la agresividad del proceso: al tener menos tiempo de interacción, la ablación es menos profunda y los valles generados son más moderados. Además, en este rango, el efecto de la potencia se vuelve menos relevante, ya que la energía entregada no es suficiente para generar cráteres amplios o profundos.

Es con velocidades de 500 mm/s o más donde se obtienen los valores más bajos de  $V_{vc}$ , siendo la combinación de 900 mm/s y 15% de potencia la que obtiene el valor más bajo (3,19 ml/mm<sup>2</sup>), siendo coherente con una baja potencia que recibe la superficie y un breve tiempo de exposición de láser.

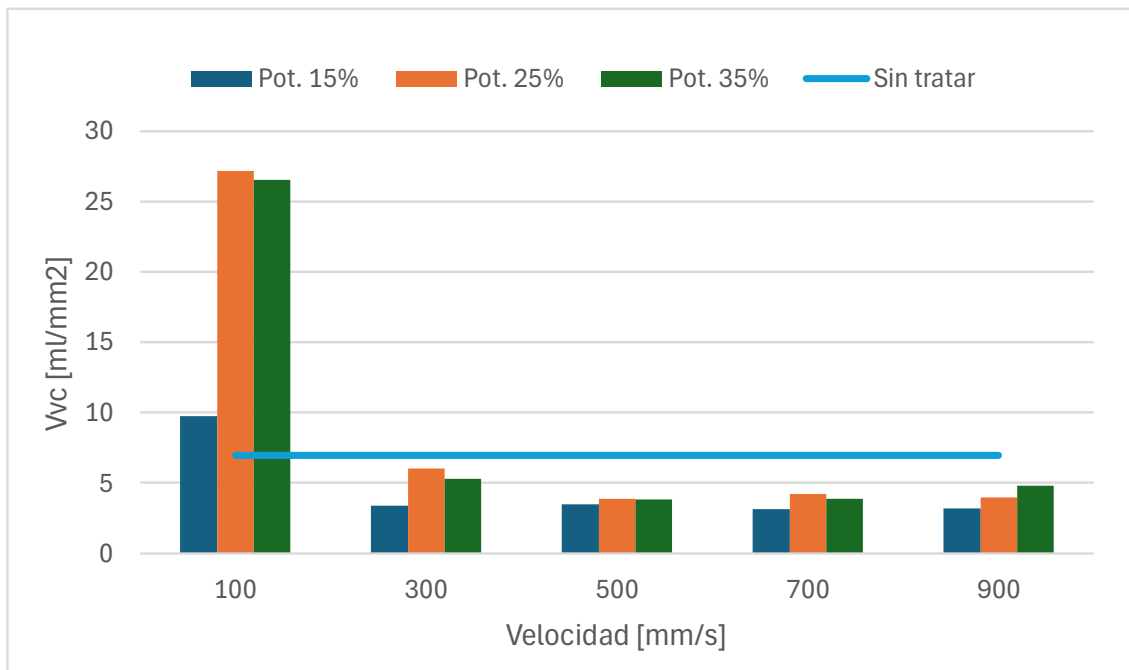


Figura 75, variación de  $V_{vc}$  en función de la potencia y la velocidad

Este comportamiento indica que, para obtener superficies más homogéneas y con menor capacidad de retención (deseable, por ejemplo, para reducir la acumulación de contaminantes o fluidos), las condiciones más estables y eficaces son las de velocidades altas con cualquier potencia. La tendencia observada es coherente con los mecanismos térmicos descritos por Narayanan et al. (2024) [61], donde se demuestra que el volumen de valles se reduce con velocidades elevadas debido a una menor acumulación energética y menor ablación localizada.

El volumen de los valles,  $V_{vc}$ , se ve reducido drásticamente a medida que aumenta la velocidad, debido al menor tiempo de interacción y a la menor energía entregada por unidad de superficie [70].



A partir de los resultados observados en las cuatro gráficas correspondientes a los parámetros  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_k$  y  $V_{vc}$ , se concluye que la velocidad de escaneo del láser tiene un efecto determinante sobre la rugosidad superficial obtenida tras el texturizado. En todos los casos, las condiciones de baja velocidad (100 mm/s) generan superficies con una rugosidad notablemente elevada, con relieves profundos y estructuras agresivas. Este efecto se intensifica al aumentar la potencia, lo que indica que, en este régimen, la energía acumulada por unidad de área es suficiente para provocar una ablación intensa y formar cráteres pronunciados.

Sin embargo, a medida que se incrementa la velocidad, se observa una reducción drástica de todos los parámetros medidos. A partir de 300 mm/s, y con mayor claridad entre 500 y 700 mm/s, los valores de  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_k$  y  $V_{vc}$  se estabilizan en niveles considerablemente más bajos, e incluso por debajo del valor registrado para las superficies sin tratar. Esto sugiere que velocidades más altas reducen el tiempo de interacción del láser con la superficie, evitando la acumulación térmica excesiva y favoreciendo la formación de una textura más uniforme y controlada.

Por otro lado, aunque la potencia influye de forma clara a bajas velocidades, su impacto se vuelve mucho más limitado conforme aumenta la velocidad. A 500 mm/s o más, las diferencias entre potencias del 15%, 25% y 35% son pequeñas, lo que indica que es la velocidad (y no la energía total) el factor que define el carácter final de la superficie en esas condiciones.

En conjunto, estos resultados permiten concluir que las combinaciones más favorables para obtener una textura controlada, homogénea y con bajo relieve se sitúan en velocidades de escaneo intermedias a altas, entre 500 y 700 mm/s, con potencias bajas o moderadas. Estas condiciones son ideales para aplicaciones que requieran superficies suaves, con poca retención de material en los valles y rugosidad reducida.

## 5. Conclusiones

En la primera etapa, los resultados mostraron una alta variabilidad, reflejando la complejidad del fenómeno de interacción láser-material. A pesar de ello, se obtuvieron indicios claros de que la velocidad de escaneo tenía un papel crucial, especialmente en la forma en que controlaba la altura media de la superficie ( $S_a$ ) y la altura máxima pico-valle ( $S_z$ ). De manera destacada, se observó que la segunda pasada del láser tendía a reducir los valores de rugosidad en varios parámetros, lo que sugería un posible efecto de redistribución térmica o re-fusión superficial que suavizaba el relieve creado en la primera pasada.

En la Segunda Etapa se centró exclusivamente en el estudio del efecto del número de pasadas, confirmando que este parámetro tiene un comportamiento no lineal sobre la topografía superficial. Los resultados indicaron que los mejores valores de rugosidad se obtenían generalmente con dos pasadas, particularmente en el caso de  $S_k$  y  $V_{vc}$ , mientras que un número mayor de pasadas tendía a estabilizar los valores o incluso incrementarlos o reducirlos ligeramente debido a la acumulación térmica y la posible saturación del material. Esta tendencia fue consistente con lo descrito en la literatura, donde se señala que la primera y segunda pasada generan las principales estructuras de la textura, y que pasadas sucesivas provocan efectos térmicos acumulativos con capacidad para suavizar o distorsionar la morfología superficial.

En la Tercera Etapa se profundizó en el análisis de la velocidad de escaneo y sus efectos sobre todos los parámetros estudiados. Los resultados fueron concluyentes: a partir de 300 mm/s, la rugosidad se redujo de forma significativa y se mantuvo estable en todos los casos, siendo la velocidad el factor con mayor influencia positiva sobre el acabado superficial. En particular, se observó que a velocidades altas (500–700 mm/s), se lograban superficies más homogéneas, con valores bajos de  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_k$  y  $V_{vc}$ , incluso por debajo de los obtenidos en la superficie sin tratar. La potencia del láser mostró mayor influencia a velocidades bajas, pero su efecto se diluía a medida que la velocidad aumentaba, lo que refuerza el rol dominante de este parámetro en el control del proceso.

Además, el análisis de la frecuencia del láser mostró que, aunque su impacto era más moderado, frecuencias altas ayudaban a suavizar la superficie al reducir la energía por pulso, lo cual fue particularmente beneficioso para disminuir  $S_a$  y  $S_z$ . Por su parte, el parámetro  $S_k$  mostró menor sensibilidad a la frecuencia, pero sí se vio afectado por el número de pasadas y la velocidad.

En conjunto, estos ensayos han demostrado que el texturizado láser puede ser ajustado con gran precisión mediante el control de parámetros como velocidad y número de pasadas. Las mejores condiciones para un acabado superficial fino y



estable fueron aquellas con velocidades altas y dos pasadas, confirmando tanto experimentalmente como mediante revisión de literatura que una adecuada gestión de la energía térmica y el número de impactos resulta clave para el control de la rugosidad en procesos de texturizado con láser de nanosegundo.

## 6. Líneas futuras de investigación

En este último apartado del trabajo se plantean diversas líneas de investigación futuras, concebidas a partir de los resultados obtenidos y de las limitaciones identificadas durante el desarrollo del estudio. Estas propuestas tienen como objetivo ampliar el conocimiento sobre los fenómenos observados en el texturizado láser, al tiempo que se abren nuevas vías para optimizar las técnicas utilizadas y explorar posibles aplicaciones prácticas. Así, se invita a abordar el tema desde distintos enfoques complementarios, que permitan tanto validar los resultados actuales como mejorar la precisión y eficiencia del proceso en contextos industriales o científicos más amplios.

En cuanto a líneas futuras de investigación, sería interesante seguir estudiando los parámetros que han mostrado resultados más positivos, en especial la velocidad y un mayor número de combinaciones con el resto de los parámetros, que podrían resultar más beneficiosos que los estudiados en este estudio.

A su vez, sería de gran interés estudiar la influencia de otras variables no analizadas en este estudio por la necesidad de acotar las variables de entrada y de salida, pero que igualmente podrían llevar a resultados importantes para según qué sector. Por ejemplo, los patrones de texturizado, la modificación de estos podría conllevar la formación de superficies diferentes, modificando así las propiedades tribológicas del material, que en paralelo podría ser acompañado de estudios de mojabilidad y otros tipos de interacción con el medio, que para aplicaciones biomédicas sería de alta relevancia. También sería interesante estudiar diferentes anchos de pulso, para este estudio el ancho de pulso es fijo y de 200 ns, pero podría estudiarse su influencia reduciéndolo hasta el orden de 1 ns, el mínimo que permite ajustar el equipo de texturizado utilizado, o usar equipos de picosegundo y femtosegundo para reducirlo aún más.

Estudios de texturizado con probetas y materiales que partan con una calidad superficial superior a la de las probetas de este estudio podrían lograr resultados mucho más positivos a la hora de hablar de pulido láser, ya que la alta rugosidad de la que partían las probetas ensayadas ha permitido la reducción de la rugosidad, pero no se ha alcanzado la condición de pulido en ningún caso.

Por último, sería interesante estudiar el texturizado láser en otros materiales con otras aplicaciones en la ingeniería, como aluminios, aceros, otras aleaciones de titanio como Ti6Al4V.



## 7. Bibliografía

1. Froes, F.H. (Sam) Titanium and Titanium Alloys. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* **2001**, doi:10.1002/0471238961.2009200119050107.A01.PUB2.
2. Pushp, P.; Dasharath, S.M.; Arati, C. Classification and Applications of Titanium and Its Alloys. *Mater Today Proc* **2022**, *54*, 537–542, doi:10.1016/j.matpr.2022.01.008.
3. Froes, F.H. (Sam) Titanium and Titanium Alloys. *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* **2001**, doi:10.1002/0471238961.2009200119050107.A01.PUB2.
4. Williams, D.F. Phases in Titanium Alloys. *Med Device Technol* **2005**.
5. Committee, A.H. Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials. *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials* **1990**, doi:10.31399/ASM.HB.V02.9781627081627.
6. Boyer, R.; Welsch, G.; Collings, E.W. Materials Properties Handbook: Titanium Alloys. *Materials Properties Handbook - Titanium Alloys* **1994**, 755–763.
7. Yadava, V.; Kumar, S.; Pandey, P.M. A Bibliometric Review on Ti–6Al–4V Alloy Research. **2021**.
8. Sciencedirect.
9. Iganaki Application and Features of Titanium for the Aerospace Industry Available online: [https://consensus.app/papers/application-and-features-of-titanium-for-the-aerospace-inagaki-takechi/2c2e804c4a995306a7a71906cfb34c8b/?utm\\_source=chatgpt](https://consensus.app/papers/application-and-features-of-titanium-for-the-aerospace-inagaki-takechi/2c2e804c4a995306a7a71906cfb34c8b/?utm_source=chatgpt) (accessed on 24 April 2025).
10. Explorando El Papel Del Titanio En La Industria Aeroespacial - Goldsupplier Available online: <https://blog.goldsupplier.com/es/en-titanium-aerospace/> (accessed on 21 May 2025).
11. McCann, M.L.; Fanning, J. Designing with Titanium Alloys. *Handbook of Mechanical Alloy Design* **2003**, 539–583, doi:10.1201/9780203913307.CH11.
12. Jackson, M.J.; Kopac, J.; Balazic, M.; Bombac, D.; Brojan, M.; Kosel, F. Titanium and Titanium Alloy Applications in Medicine. *Surgical Tools and*



- Medical Devices, Second Edition* **2016**, 475–517, doi:10.1007/978-3-319-33489-9\_15.
13. ¿Cuánto Tiempo Dura Una Prótesis de Cadera o Rodilla? – Institut Bori Available online: <https://institutbori.com/es/cuanto-tiempo-dura-una-protesis-de-cadera-o-rodilla/> (accessed on 21 May 2025).
  14. Implantes Dentales de Titanio Frente a Zirconio: Ventajas, Desventajas y Mejor Opción Available online: <https://www.wisconsinidentalwellness.com/es/zirconia-vs-titanium-dental-implants-which-one-is-right-for-you/> (accessed on 21 May 2025).
  15. Ye, S.; Zhang, Y.; Yu, P. Applications of Titanium in the Electronic Industry. *Titanium for Consumer Applications* **2019**, 269–278, doi:10.1016/B978-0-12-815820-3.00019-8.
  16. Warlimont, H.; Martinka, G. Titanium-Based Fiber Metal Laminates and Hybrid Structures. *Springer Handbook of Materials Data* **2018**.
  17. Dearnley, P.A. Engineering Titanium Surfaces for Biofunctionality. *Surf Coat Technol* **2007**.
  18. Whitehouse, D.J. Handbook of Surface Metrology. *Handbook of Surface Metrology* **2023**, 1–988, doi:10.1201/9780203752609/HANDBOOK-SURFACE-METROLOGY-DAVID-WHITEHOUSE/RIGHTS-AND-PERMISSIONS.
  19. Leach, R.K. *Characterisation of Areal Surface Texture*; 2013;
  20. Brinksmeier, E.; Preuss, W. Micro-Machining. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* **2012**, 370, 3973–3992, doi:10.1098/RSTA.2011.0056.
  21. Gadelmawla, E.S.; Koura, M.M.; Maksoud, T.M.A.; Elewa, I.M.; Soliman, H.H. Roughness Parameters. *J Mater Process Technol* **2002**, 123, 133–145, doi:10.1016/S0924-0136(02)00060-2.
  22. Surface Roughness Measurement—Parameters | Evident Available online: <https://evidentscientific.com/es/applications/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters> (accessed on 21 May 2025).
  23. Surface Roughness Measurement—Parameters | Evident Available online: <https://evidentscientific.com/es/applications/metrology/surface-roughness-measurement-portal/parameters#003> (accessed on 9 June 2025).



24. Stout, K.J.; Sullivan, P.J.; Dong, W.P.; Mainsah, E.; Luo, N.; Mathia, T.; Zahouani, H. *THE DEVELOPMENT OF METHODS FOR THE CHARACTERISATION OF ROUGHNESS IN THREE DIMENSIONS*;
25. Froes, F. Titanium: Physical Metallurgy, Processing, and Applications. **2015**, doi:10.31399/ASM.TB.TPMPA.9781627083188.
26. Geng, Y.; Wu, Y.; Wang, Y. Oxidation-Assisted Thermal Polishing of Sintered SiC for Optical Applications. *J Eur Ceram Soc* **2023**, 43, 651–659.
27. Universidad de Cantabria Tolerancias Geométricas 2021, 1.
28. Totten, G.; Howes, M. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. **2002**.
29. Zhang, M.; Zhang, J.; Huang, J.; Wei, X. Effects of Shot Peening on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Alloy: A Review. *ournal of Materials Research and Technology* **2020**, 9 (6), 14698–14714.
30. ¿Qué Es El Acabado Con Granallado? Todo Lo Que Necesitas Saber Available online: <https://rapiddirect.com/es/blog/bead-blasting-finish-basics/> (accessed on 21 May 2025).
31. La Guía Esencial Para El Acabado Con Granallado Available online: <https://www.madearia.com/es/blog/bead-blasting-finishing/> (accessed on 21 May 2025).
32. Pulido | Hoffmann Group Available online: <https://www.hoffmann-group.com/ES/es/hoec/conocimientos/guia-online/guia-online-de-tecnica-de-rectificado-y-corte/pulido/e/500402/> (accessed on 21 May 2025).
33. Sharma, V.S.; Dogra, M.; Suri, N.M. Advances in Surface Finishing for Enhanced Performance of Titanium and Its Alloys: A Review. In *Materials Today: Proceedings*; 2022; pp. 1482–1490.
34. La Guía Completa Para El Lapeado En Maquinado - Kemet International Available online: <https://www.kemet-international.com/mx/productos/lapeado-de-precision/la-guia-completa-para-el-lapeado-en-maquinado> (accessed on 21 May 2025).
35. Leyens, C.; Peters, M. *Titanium and Titanium Alloys*; Wiley, 2003;
36. Decapado Químico – QSD Available online: <https://www.decapadoindustrialqsd.com/decapadoquimico/> (accessed on 21 May 2025).
37. Macak, J.M.; Tsuchiya, H.; Ghicov, A.; Yasuda, K.; Hahn, R.; Bauer, S.; Schmuki, P. TiO<sub>2</sub> Nanotubes: Self-Organized Electrochemical Formation,



- Properties and Applications. *Curr Opin Solid State Mater Sci* **2007**, *11*, 3–18, doi:10.1016/J.COSSMS.2007.08.004.
38. Abdullah, H.; Selimin, M.A.; Idris, M.I.; Anjang, N.; Malik, Z. Surface Characterisation of Bioactive Titanium Formed Via Anodic Oxidation. *International Journal of Civil and Structural Engineering* **2015**, *2*, 44–48, doi:10.15224/978-1-63248-062-0-33.
39. Kim, K.; Lee, B.A.; Piao, X.H.; Chung, H.J.; Kim, Y.J. Surface Characteristics and Bioactivity of an Anodized Titanium Surface. *J Periodontal Implant Sci* **2013**, *43*, 198–205, doi:10.5051/JPIS.2013.43.4.198.
40. La Guía Definitiva Para Anodizar Titanio - AN-Prototype Available online: <https://an-prototype.com/es/the-ultimate-guide-to-anodizing-titanium/> (accessed on 21 May 2025).
41. ANODISATION DU TITANE - NOS PRODUITS - Aupus : Aupus Available online: <https://aupus.fr/es/produits-chimiques/nos-produits-d-anodisation/> (accessed on 21 May 2025).
42. Rajurkar, K.P.; Sundaram, M.M.; Malshe, A.P. Review of Electrochemical and Electrodischarge Machining. *Procedia CIRP* **2013**, *6*, 13–26, doi:10.1016/J.PROCIR.2013.03.002.
43. Nikolidakis, E.; Papazoglou, E.L.; Karkalos, N.E.; Leszczyńska-Madej, B.; Karmiris-Obratański, P. Surface Topography and Subsurface Integrity of Titanium Grade 2 Machined by Nanosecond Laser: The Effects of Scanning Speed, Laser Power, and Frequency. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* **2025**, *25*, 125, doi:10.1007/s43452-025-01175-w.
44. Lutey, A.H.A.; Jing, H.; Romoli, L.; Kunieda, M. Electrolyte Jet Machining (EJM) of Antibacterial Surfaces. *Precis Eng* **2021**, *70*, 145–154, doi:10.1016/J.PRECISIONENG.2021.02.004.
45. Singh, R.P.; Singhal, S. Rotary Ultrasonic Machining: A Review. *Materials and Manufacturing Processes* **2016**, *31*, 1795–1824, doi:10.1080/10426914.2016.1140188.
46. Bañón, F.; Sambruno, A.; Mayuet, P.F.; Gómez-Parra, Á. Study of Abrasive Water Jet Machining as a Texturing Operation for Thin Aluminium Alloy UNS A92024. *Materials* **2023**, *Vol. 16, Page 3843* **2023**, *16*, 3843, doi:10.3390/MA16103843.



47. Song, J.; Huang, H.; Wang, X.; Shi, W. Status and Prospects of Surface Texturing: Design, Manufacturing and Applications. *Surface Science and Technology 2023 1:1* **2023**, 1, 1–29, doi:10.1007/S44251-023-00022-5.
48. Meylan, B.; Celik, Y.; Ertuğrul, M. Thermal Polishing Models and the Influence of Temperature Gradients on Precision Surface Treatment. *Int J Mach Tools Manuf* **2022**.
49. Tso, C.P.; Wang, L. Thermochemical Polishing of Diamond by Metal Catalyst: Fe-C System Modeling. In *Diamond and Related Materials*; 2009; pp. 276–280.
50. Xia, X.; Li, X.; Zhang, W. Thermal-Enhanced Surface Etching of Titanium Alloys Using  $K_2S_2O_8$ -Based Chemistries. In *Materials Chemistry and Physics*; 2025.
51. Shao, J.; Li, L.; Evans, R. Laser-Assisted Chemical Polishing of Biomedical-Grade Titanium Implants: Process Development and Surface Analysis. In *Surface and Coatings Technology*; 2022.
52. Kim, Y. *Effect of Temperature on CMP of Copper Film*; 2002;
53. Lin, Z.; Zhu, J.; Huang, Q.; Zhu, L.; Li, W.; Yu, W. Mechanism Exploration of the Effect of Polyamines on the Polishing Rate of Silicon Chemical Mechanical Polishing: A Study Combining Simulations and Experiments. *Nanomaterials* **2024**, 14, 127, doi:10.3390/NANO14010127/S1.
54. Semerok, A.; Sallé, B.; Wagner, J.F.; Petite, G. Femtosecond, Picosecond, and Nanosecond Laser Microablation: Laser Plasma and Crater Investigation. In *Proceedings of the Laser and Particle Beams*; Cambridge University Press, 2002; Vol. 20, pp. 67–72.
55. Brown, M.S.; Arnold, C.B. Fundamentals of Laser-Material Interaction and Application to Multiscale Surface Modification., doi:10.1007/978-3-642-10523-4\_\_4.
56. Cheng, J.; Liu, C.S.; Shang, S.; Liu, D.; Perrie, W.; Dearden, G.; Watkins, K. A Review of Ultrafast Laser Materials Micromachining. *Opt Laser Technol* **2013**, 46, 88–102, doi:10.1016/J.OPTLASTEC.2012.06.037.
57. Tanvir Ahmmed, K.M.; Grambow, C.; Kietzig, A.M. Fabrication of Micro/Nano Structures on Metals by Femtosecond Laser Micromachining. *Micromachines (Basel)* 2014, 5, 1219–1253.
58. Fiorucci, M.P.; Jesús, A.; Díaz, L.; Rego, A.R. *Aplicación de La Ablación Mediante Láser Pulsado de Nanosegundo a La Limpieza y Texturizado de Materiales Tesis Doctoral UDC / Año 2015*; 2015;



59. Scopus - Document Search | Signed In Available online: <https://www.scopus.com/search/form.uri?display=basic#basic> (accessed on 9 June 2025).
60. Shivakoti, I.; Kibria, G.; Cep, R.; Pradhan, B.B.; Sharma, A. Laser Surface Texturing for Biomedical Applications: A Review. *Coatings* **2021**, *11*, 1–15, doi:10.3390/COATINGS11020124.
61. Narayanan, V.; Singh, R.; Marla, D. A 3D Computational Model of Nanosecond Pulsed Laser Texturing of Metals for Designing Engineered Surfaces. *J Manuf Sci Eng* **2024**, *146*, doi:10.1115/1.4064833.
62. Wang, S.; Geng, P.; Ma, N.; Wang, W.; Xu, Y.; Zhang, X.; Chen, C. Effect of Nanosecond Pulsed Laser Parameters on Texturing Formation of Metallic Surface: Experiment and Modelling. **2023**.
63. Gujba, A.K.; Medraj, M. Laser Peening Process and Its Impact on Materials Properties in Comparison with Shot Peening and Ultrasonic Impact Peening. *Materials* **2014**, *Vol. 7, Pages 7925-7974* **2014**, *7*, 7925–7974, doi:10.3390/MA7127925.
64. 5. From Duan et al. [DUA 14] a) Output Power versus Injection Current... | Download Scientific Diagram Available online: [https://www.researchgate.net/figure/From-Duan-et-al-DUA-14-a-Output-power-versus-injection-current-of-an-hybrid\\_fig29\\_310441297](https://www.researchgate.net/figure/From-Duan-et-al-DUA-14-a-Output-power-versus-injection-current-of-an-hybrid_fig29_310441297) (accessed on 9 June 2025).
65. Vazquez-Martinez, J.M.; Salguero, J.; Blanco, E.; González-Leal, J.M. Nanosecond Pulsed Laser Irradiation of Titanium Alloy Substrate: Effects of Periodic Patterned Topography on the Optical Properties of Colorizing Surfaces. *Coatings* **2019**, *9*, doi:10.3390/coatings9100658.
66. Salguero, J.; Del Sol, I.; Vazquez-Martinez, J.M.; Schertzer, M.J.; Iglesias, P. Effect of Laser Parameters on the Tribological Behavior of Ti6Al4V Titanium Microtextures under Lubricated Conditions. *Wear* **2019**, *426–427*, 1272–1279, doi:10.1016/j.wear.2018.12.029.
67. Martínez, J.M.V.; Gómez, J.S.; Ponce, M.B.; Pedemonte, F.J.B. Effects of Laser Processing Parameters on Texturized Layer Development and Surface Features of Ti6Al4V Alloy Samples. *Coatings* **2018**, *8*, doi:10.3390/coatings8010006.
68. Vázquez, J.M.; Salguero, J.; Del Sol, I. Texturing Design of WC-Co through Laser Parameter Selection to Improve Lubricant Retention Ability of Cutting Tools. *Int J Refract Metals Hard Mater* **2022**, *107*, doi:10.1016/j.ijrmhm.2022.105880.



69. Gaikwad, A.; Vázquez-Martínez, J.M.; Salguero, J.; Iglesias, P. Tribological Properties of Ti6Al4V Titanium Textured Surfaces Created by Laser: Effect of Dimple Density. *Lubricants* **2022**, *10*, doi:10.3390/lubricants10070138.
70. Bañón, F.; Martín, S.; Vázquez-Martínez, J.M.; Salguero, J.; Trujillo, F.J. Predictive Models Based on RSM and ANN for Roughness and Wettability Achieved by Laser Texturing of S275 Carbon Steel Alloy. *Opt Laser Technol* **2024**, *168*, doi:10.1016/j.optlastec.2023.109963.
71. Rezayat, M.; Moradi, M.; Mateo, A. Nanosecond Multi-Passes Laser Surface Texturing on AISI 301LN TRIP Steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **2024**, *132*, 4753–4764, doi:10.1007/S00170-024-13638-0/METRICS.
72. Ozan, S.; Bilgin, A.; Kasman, Ş. Laser Textured Ti-6Al-7Nb Alloy for Biomedical Applications: An Investigation of Texturing Parameters on Surface Properties. *Proc Inst Mech Eng H* **2023**, *237*, 1139–1153, doi:10.1177/09544119231200537/ASSET/0250A78E-BBD2-4A83-9E99-78D76B31BB37/ASSETS/IMAGES/LARGE/10.1177\_09544119231200537-IMG2.JPG.
73. Petkovšek, M.; Hočevar, M.; Gregorčič, P. Surface Functionalization by Nanosecond-Laser Texturing for Controlling Hydrodynamic Cavitation Dynamics. *Ultrason Sonochem* **2020**, *67*, 105126, doi:10.1016/J.ULTSONCH.2020.105126.
74. Rosa, B.; Hascoët, J.-Y. Laser Polishing of Titanium Surfaces Obtained by Additive Manufacturing Process., doi:10.1051/mateconf/202032103034.
75. Nikolidakis, E.; Antoniadis, A. Modeling and Simulation of the Nanosecond Pulsed Laser Engraving Process. *MATEC Web of Conferences* **2020**, *318*, 01044, doi:10.1051/MATECCONF/202031801044.
76. Vázquez-Martínez, J.M.; Salguero, J.; Botana, F.J.; Contreras, J.P.; Fernández-Vidal, S.R.; Marcos, M. Metrological Evaluation of the Tribological Behavior of Laser Surface Treated Ti6Al4V Alloy. In *Proceedings of the Procedia Engineering*; Elsevier Ltd, 2013; Vol. 63, pp. 752–760.