

GRADO EN MARINA

TRABAJO FIN DE GRADO

DESARROLLO DEL PROCESO DE PULIDO LÁSER EN INCONEL 718

Alumno/Alumna: Cid, Gutierrez, Janire

Director/Directora (1): Ukar, Arrien; Eneko

Curso: 2017-2018

Fecha: Bilbao, 23 de Julio de 2018

RESUMEN

En este trabajo fin de grado se aborda el estudio de los parámetros de los procesos de pulido láser y arranque de material (*engraving*) láser con ayuda de la estación de marcado Trumark 5050. Se realizaron ensayos experimentales de ambos procesos sobre superficies rectificadas de Inconel 718 ya que dicho material es termo resistente a altas temperaturas (por encima de los 700 °C) presentando prestaciones como alta resistencia mecánica, a la fatiga y a la corrosión. Mediante esta técnica se pretende generar finalmente superficies pulidas, con acabados superficiales donde el índice de mejora, con respecto a la superficie inicial, supera el 90 %, obteniendo valores de rugosidad por debajo de las 0,5 µm. Con la caracterización y la optimización de estos parámetros se generan superficies funcionales para mejorar el contacto entre las superficies de las piezas en movimiento de las máquinas.

Palabras claves: pulido láser, arranque de material láser, Inconel 718.

Azken proiektu honetan, laserreko leuntzeko eta laser grabaketa prozesuen parametroak aztertzen dira Trumark 5050 markako geltokiaren laguntzarekin. Inconel 718 gainazaleko gainazalen bi prozesuen saiakuntza esperimentalak egin dira. material hori temperatura altuetarako termo-erresistentzia da (700 °C-tik gorakoa), hala nola indar mekaniko handia, nekea eta korrosioa. Teknika hau azkenik azalera leunduak sortzen dira, gainazaleko akabera dutenak, hobekuntza-tasa, hasierako azalerari dagokionez,% 90 baino handiagoa denean, 0,5 µm baino gutxiagoko zurruntasun balioak lortuz. Parametro horien karakterizazio eta optimizazioarekin, gainazal funtzionalak sortzen dira makinaren mugikorren gainazalen arteko harremana hobetzeko.

Gako-hitzak: laser bidezko leuntzea, laser bidezko materiala hasita, Inconel 718.

In this final project, laser polishing and laser engraving processes parameters are studied with the help of the Trumark 5050 marking station. Experimental tests of both processes were carried out on Inconel 718 ground surfaces since said material is thermo resistant to high temperatures (above 700 °C) presenting features such as high mechanical strength, fatigue and corrosion. This technique is intended to finally generate polished surfaces, with surface finishes where the rate of improvement, with respect to the initial surface, exceeds 90%, obtaining roughness values below 0.5 μm . With the characterization and optimization of these parameters, functional surfaces are generated to improve the contact between the surfaces of the moving parts of the machines.

Keywords: laser polishing, laser material starting, Inconel 718.

ÍNDICE

1. MEMORIA	4
1.1 INTRODUCCIÓN	4
1.2 CONTEXTO	5
1.3 OBJETIVOS.....	6
1.4 BENEFICIO	7
1.5 ESTADO DEL ARTE	8
1.5.1 EL LÁSER	8
1.5.2 PRINCIPIOS BÁSICOS	10
LA ESTADÍSTICA DE BOLTZMANN	10
EMISIÓN ESPONTÁNEA.....	11
EMISIÓN ESTIMULADA	12
ABSORCIÓN.....	12
1.5.3 INVERSIÓN DE POBLACIÓN	13
1.5.4 PRINCIPIOS DEL HAZ LASER	17
1.5.5 ESQUEMAS DE BOMBEO	19
1.5.6 PROPIEDADES DEL HAZ DEL LÁSER	22
MONOCROMACIDAD.....	22
COHERENCIA	23
DIRECCIONALIDAD.....	24
BRILLO.....	25
1.5.7 TIPOS DE LÁSER Y SUS APLICACIONES	28
LASER DE ESTADO SÓLIDO	28
LASERES SEMICONDUCTORES O DE DIODOS	29
LASER EN ESTADO GASEOSO	30
LASER DE FIBRA	31
1.5.8 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES.....	32
LASER POLISHING	32
LASER ENGRAVING	43
2. METODOLOGÍA	46
2.1 DESCRIPCIÓN DE TAREAS.....	46
2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS	48

CARACTERÍSTICAS DE LA ESTACIÓN TRUMARK 5000	48
CARACTERÍSTICAS DEL MICROSCOPIO LECIA DCM 3D	51
2.3 MATERIAL A ESTUDIAR: ALEACIÓN TERMORESISTENTE INCONEL 718	52
2.4 EXTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO ENGRAVING Y POLISHING	54
2.4.1 BÚSQUEDA DEL DIÁMETRO DEL SPOT	54
2.4.2 ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE ENGRAVING Y PULIDO LÁSER	65
PROCESO DE <i>ENGRAVING</i>	69
PROCESO DE PULIDO LÁSER	70
Estudio de la influencia de la velocidad, el número de pasadas y el desenfoque.....	71
Estudio de la influencia del índice de solape	87
Influencia del área de pulido, obtenidos los parámetros finales	90
Influencia de la geometría de la superficie pulida.....	99
3. CONCLUSIONES	105
4. BIBLIOGRAFÍA.....	106

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Número de átomos en cada estado energético según la estadística de Boltzmann	11
Figura 2 Esquema de proceso. a) Emisión espontánea; b) Emisión estimulada; c) Absorción ...	16
Figura 3 Esquema básico del láser	17
Figura 4 Esquema láser de 3 niveles	19
Figura 5 a) Esquema de bombeo de 3 niveles b) Esquema de bombeo de 4 niveles	20
Figura 6 Concentración en el punto O de una serie de nodos planas e.m. y b) concentración o luminosidad de un rayo láser de diámetro D	26
Figura 7 Láser Nd: YAG	28
Figura 8 Láser de diodos.....	29
Figura 9 Esquema láser de CO2	30
Figura 10 Láser de fibra	31
Figura 11 Esquema de rugosidad superficial	32
Figura 12 esquema de los principales parámetros del láser	33
Figura 13 Esquema de macro pulido.....	34
Figura 14 Esquema de micro pulido.....	35
Figura 15 Esquema del proceso de pulido láser	36
Figura 16 Superficie después del pulido	37
Figura 17 Superficie inicial.....	37
Figura 18 Resultados de los ensayos.....	37
Figura 19 Esquema de los principales activos para la estructuración por fusión	40
Figura 20 Esquema de los parámetros de potencia láser	42
Figura 21 Esquema del proceso	43
Figura 22 Estación de marcado trumark 5000.....	48
Figura 23 Cabezal de Trumark 5000	49
Figura 24 Láser Trumark 5000	50
Figura 25 Leica DCM 3D	51
Figura 26 Evolución de la temperatura máxima que han llegado a alcanzar las superaleaciones	53
Figura 27 Gráfico diámetro-desenfoque.....	58
Figura 28 Gráfico diámetro-desenfoque en comparación al parámetro teórico	59
Figura 29 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 0 mm.....	60
Figura 30 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 1 mm.....	61
Figura 31 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 2 mm.....	61
Figura 32 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 3 mm.....	62
Figura 33 Resultados de las mediciones de los tres puntos con un desenfoque de 4 mm	63
Figura 34 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 5 mm.....	63
Figura 35 Curva creciente del diámetro-desenfoque	64
Figura 36 Topografía de la superficie inicial.....	70
Figura 37 Resultados sobre Inconel 718	72
Figura 38 resultados sobre Inconel 718	73
Figura 39 Resultados sobre Inconel 718	75
Figura 40 Resultados en Inconel 718	77

Figura 41 Resultados sobre Inconel 718	79
Figura 42 Resultados sobre Inconel 718	81
Figura 43 Resultados sobre Inconel 718	82
Figura 44 Resultados sobre Inconel 718	83
Figura 45 Resultados sobre Inconel 718	85
Figura 46 Resultados sobre Inconel 718	86
Figura 47 Resultados sobre Inconel 718	89
Figura 48 Resultados sobre Inconel 718	90
Figura 49 Topografía comparativa engraving-pulido.....	91
Figura 50 Zoom zona pulida	91
Figura 51 3D.....	92
Figura 52 Perfil de la topografía	92
Figura 53 Topografía comparativa pulido-engraving.....	93
Figura 54 3D.....	93
Figura 55 Perfil de la topografía	94
Figura 56 zoom zona pulida.....	94
Figura 57 Topografía comparativa pulido-engraving.....	94
Figura 58 Perfil de la topografía	95
Figura 59 Zoom zona pulida	95
Figura 60 Topografía comparativa pulido-engraving.....	95
Figura 61 Perfil de la topografía	96
Figura 62 Topografía comparativa pulido-engraving.....	96
Figura 63 Perfil de la topografía	97
Figura 64 Topografía comparativa pulido-engraving.....	97
Figura 65 Perfil de la topografía	98
Figura 66 Pulido en Inconel 718	98
Figura 67 Topografía con los parámetros A4	99
Figura 68 Topografía engraving	99
Figura 69 Topografía parámetros A5	100
Figura 70 Topografía engraving	100
Figura 71 Topografía parámetros A4	100
Figura 72 Topografía parámetros A5	100
Figura 73 Topografía engraving	101
Figura 74 Topografía parámetros A4	101
Figura 75 Topografía parámetros A5	101
Figura 76 Topografía engraving	102
Figura 77 Topografía parámetros A4	102
Figura 78 Topografía parámetros A5	102
Figura 79 Topografía parámetros A4	102
Figura 80 Topografía engraving	102
Figura 81 Topografía parámetros A5	103
Figura 82 Topografía engraving	103
Figura 83 Topografía parámetros A4	103
Figura 84 Topografía parámetros	103
Figura 85 Resultados sobre Inconel 718 a) engraving b) parámetros A4 c) parámetros A5	104

Figura 86 Resultados sobre Inconel 718 a) engraving b) parámetros A4 c) parámetros A5104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Experimentación de los principales parámetros de láser engraving	44
Tabla 2 Variación de los parámetros óptimos	45
Tabla 3 Diagrama de Gant	47
Tabla 4 Diagrama de Gant	47
Tabla 5 Características del cabezal de la estación de marcado Trumark 5050	49
Tabla 6 Características de la estación de marcado Trumark 5050	50
Tabla 7 Características técnicas de Leica DCM 3D	51
Tabla 8 Parámetros y resultados de los ensayos con papel	55
Tabla 9 Parámetros y resultados de los ensayos con papel	56
Tabla 10 Parámetros y resultados de los ensayos con papel	56
Tabla 11 Parámetros y resultados de los ensayos con Inconel	57
Tabla 12 Valores definitivos para introducir en la máquina	59
Tabla 13 Resultados del diámetro de spot a 0 mm de desenfoque	60
Tabla 14 Resultados del diámetro de spot a 1 mm de desenfoque	60
Tabla 15 Resultados del diámetro de spot a 2 mm de desenfoque	61
Tabla 16 Resultados del diámetro de spot a 3 mm de desenfoque	62
Tabla 17 Resultados del diámetro de spot a 4 mm de desenfoque	62
Tabla 18 Resultados del diámetro de spot a 5 mm de desenfoque	63
Tabla 19 Valores de la distancia entre líneas dependiendo del diámetro y del índice de solape	67
Tabla 20 Parámetros constantes	71
Tabla 21 Resumen de los resultados obtenidos	72
Tabla 22 Parámetros constantes	73
Tabla 23 Resumen de los resultados obtenidos	74
Tabla 24 Parámetros constantes	74
Tabla 25 Resumen de los resultados obtenidos	75
Tabla 26 Parámetros constantes	76
Tabla 27 Resumen de los resultados obtenidos	77
Tabla 28 Parámetros constantes	78
Tabla 29 Resumen de los resultados obtenidos	79
Tabla 30 parámetros constantes	80
Tabla 31 Resumen de los resultados obtenidos	81
Tabla 32 Parámetros constantes	81
Tabla 33 Resumen de los resultados obtenidos	82
Tabla 34 Parámetros constantes	83
Tabla 35 Resumen de los resultados obtenidos	84
Tabla 36 Parámetros constantes	84
Tabla 37 Resumen de los resultados obtenidos	85
Tabla 38 Parámetros constantes	86
Tabla 39 Resumen de los resultados obtenidos	87
Tabla 40 Parámetros constantes	87
Tabla 41 Resumen de los resultados obtenidos	88
Tabla 42 Parámetros constantes	89

Tabla 43 Resumen de los resultados obtenidos90

1. MEMORIA

1.1 INTRODUCCIÓN

Las superficies de las piezas de las máquinas en funcionamiento están en contacto permanente, generando, por lo tanto, una fuerza de rozamiento opuesta al movimiento de estas piezas. Este rozamiento es difícil de eliminar o de controlar, aumentando así el largo y costoso mantenimiento de las máquinas y en muchos casos, disminuyendo la vida útil de las mismas. Para evitar este problema, existe la ciencia de la tribología, que estudia la interacción de superficies en movimiento relativo, dando soluciones para que en cada aplicación se obtenga el mayor grado de optimización posible. En el ejemplo de aplicaciones tribológicas que se centra este documento, es en las superficies funcionales hidrófobas de los micro depósitos de lubricante.

En este trabajo se estudia como poder evitar dicho rozamiento entre superficies de piezas en movimiento y así evitar un mantenimiento continuado de máquinas, haciendo de estas, mecanismos óptimos y eficientes. Para la obtención de dichas superficies funcionales, se realizan ensayos experimentales donde se varían los parámetros de arranque de material y de pulido láser sobre Inconel 718, con el fin de presentar la tendencia de dichos parámetros y demostrar cuál de los tiene mayor influencia sobre los resultados finales de los procesos. Con el primero de los dos procesos, se obtienen topografías controladas sobre superficies de este material termo resistente y con el proceso de pulido se generan superficies pulidas con valores de rugosidad por debajo de las $0,5 \mu\text{m}$.

1.2 CONTEXTO

Según los estudios llevados a cabo por los miembros de la Society of Tribology and Lubrication Engineers, una tercera parte de la energía mundial que se consume es debido a la fricción o rozamiento. Esto es una señal de la importancia que tiene la optimización de las condiciones de rozamiento, con el fin final de disminuir la pérdida de energía y reducir los costos de consumo.

Las consecuencias directas de que existe el rozamiento entre superficies son dos: el calentamiento de las zonas de contacto y el desgaste de los cuerpos en contacto. La primera de estas consecuencias es un fenómeno que resulta deseable si se encuentra en cierto rango de tolerancia, ya que si está fuera de estos márgenes se produce una pérdida de energía. La segunda consecuencia, origina la pérdida del material y una posterior posible rotura de los componentes de la máquina.

Es muy importante tener en cuenta que la fricción o el rozamiento no se puede evitar, pero sí se puede controlar o reducir. Por ello, se ha realizado el estudio de los parámetros de arranque de material láser y los de pulido láser. Al generar superficies con acabados donde la rugosidad adquiere valores bajos la fricción entre ambas superficies en contacto no generará una pérdida de material tan devastadora que acabe destruyendo la superficie.

1.3 OBJETIVOS

El principal objetivo de este estudio es caracterizar y optimizar los parámetros del proceso de arranque y pulido láser para la obtención de superficies funcionales. Se plantea como objetivo llegar a valores medios de rugosidad en torno a $0,5 \mu m$, partiendo de superficies iniciales con una rugosidad entre 18 y $14 \mu m$.

Para conseguir lo descrito, se han elaborado los siguientes objetivos específicos:

- Obtener parámetros y la tasa de arranque de material
- Determinar experimentalmente el diámetro del *spot del haz láser*, con el fin de controlar la densidad de energía aportada.
- Obtener parámetros de proceso de pulido láser para llegar a rugosidades medias por debajo de $0,5 \mu m Ra$.
- Generación de una estructura funcional combinando procesos de arranque y pulido láser.

1.4 BENEFICIO

Como se ha comentado antes, la fricción o el rozamiento de superficies en contacto genera una gran problemática en torno a la máquina. Por lo tanto, del estudio realizado se pueden obtener diversos beneficios como son un aumento de la vida útil de la máquina, reduciendo el mantenimiento de esta y, por lo tanto, el costo y el consumo; incrementar la resistencia mecánica de los componentes de las máquinas; y mejorar la estética de las superficies.

Si lo relacionamos con el mundo marino, el principal beneficio que se puede encontrar en este sector es un aumento significativo de las horas de servicio de las máquinas. Estando alejado de tierra, es muy complicado gestionar las averías o la rotura de las piezas mecánicas que componen la propulsión naval. Además, si se moderarían los valores de la fricción y el rozamiento entre superficies, habría una reducción del consumo específico de la nave.

1.5 ESTADO DEL ARTE

1.5.1 EL LÁSER

Hace unos 50 años ha comenzado a desarrollarse la tecnología láser y desde entonces se ha estado evolucionando constantemente, hasta llegar a la actualidad, donde existen diferentes tipos de láser, con diversas aplicaciones para cubrir los múltiples propósitos en torno a las ocupaciones humanas.

La palabra Laser es un acrónimo de “Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation”, es decir, Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación.

En 1917 Albert Einstein predijo la existencia de la emisión estimulada y espontánea. Conceptos que forman las bases del funcionamiento de los láseres y de los máseres. Para llegar a dichas conclusiones, se valió de la ley de Planck que describe la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico a una temperatura definida.

Pero hasta el 16 de mayo de 1960, no apareció el primer láser operativo. Éste estaba compuesto por un cristal de rubí como medio óptico introducido entre dos espejos de plata y excitado por una potente lámpara de destellos. Este instrumento, desarrollado por Theodore Maiman, logró convertir un proyecto teórico basado en el razonamiento de Einstein en un proyecto pragmático.

Aunque otras fuentes, revelan que este acontecimiento clave se remonta a 1958 cuando Townes y Schawlow patentaron un dispositivo que denominaron “máser óptico” basado, al igual que el láser, en el fenómeno de la emisión estimulada y absorbida.

En 1969 se encontró la primera aplicación relacionada con la industria del láser. Entre estas aplicaciones están la soldadura de los elementos de chapa en la fabricación de vehículos y poco después, se descubrieron infinidad de empleos para este proceso.

Hoy en día, los generadores láser con potencia en el rango de kW trabajan varios turnos en la industria realizando aplicaciones de corte y soldadura, mientras unidades de potencia menor son utilizadas en medicina, metrología...

1.5.2 PRINCIPIOS BÁSICOS

Como se puede leer en el libro Principes Of Láasers de Orazio Svelto [1], los principios básicos del láser están determinados por la emisión espontánea, la emisión estimulada y la absorción. Para poder describir cualquiera de estos tres conceptos, es necesario determinar dos niveles de energía, 1 y 2, de algún átomo que aporta un material determinado. A partir de ahora, estos dos niveles serán denominados como E_1 y E_2 , respectivamente, donde E_2 es mayor que E_1 . Y además tendremos en cuenta que E_1 se encuentra al nivel del suelo y que el átomo pretende alcanzar en todo momento, el nivel 2 de energía.

LA ESTADÍSTICA DE BOLTZMANN

De acuerdo con los resultados se obtienen en mecánica estadística, cuando una colección de átomos idénticos se encuentra en equilibrio térmico a la temperatura T , el cociente entre los niveles poblacionales (número de átomos) de dos estados del sistema de energías $E_2 > E_1$ se puede expresar por la relación de Boltzmann:

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(\frac{-(E_2 - E_1)}{kT}\right) \quad (1)$$

donde:

N_2 y N_1 = número de átomos en los niveles de energía E_2 y E_1

E_1 y E_2 = energía de los átomos en los estados 1 y 2.

T = temperatura absoluta del conjunto de átomos.

k = constante de Boltzmann.

Teniendo presentes las propiedades de la función exponencial, en la Figura 1 puede apreciarse el rápido decrecimiento del número de átomos en cada nivel energético al crecer la energía asociada a los estados. [2]

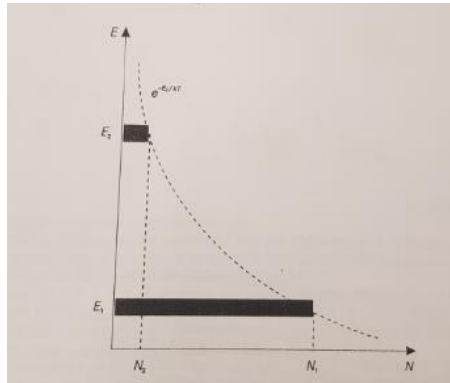


Figura 1 Número de átomos en cada estado energético según la estadística de Boltzmann

EMISIÓN ESPONTÁNEA

Si la liberación de energía, hecha por el átomo por medio de la diferencia de energía entre $E_2 - E_1$, se produce en forma de onda electromagnética, el proceso es conocido como emisión espontánea. [1]

La frecuencia ν_0 radiada por la onda está dada por la expresión:

$$\nu_0 = (E_2 - E_1)/h \quad (2)$$

donde h es la constante de Planck.

Una de las características principales de la emisión espontánea es que emite un fotón de energía cuyo valor es igual a $h\nu_0 = E_2 - E_1$ en el momento que dicho átomo decae del nivel 2 de energía al 1.

La liberación de energía arriba mencionada no tiene por qué ser soltada en forma de onda electromagnética. En este proceso la energía puede darse en cualquier otra forma de energía, como por ejemplo térmica, cinética o interna. En este caso, el proceso es conocido como caída no radiactiva.

EMISIÓN ESTIMULADA

El átomo se encuentra inicialmente en el nivel 2 de energía, y, además, la liberación de energía se realiza mediante una onda electromagnética de frecuencia $V = V_0$, es decir, igual a la frecuencia de la onda emitida de manera espontánea. Esta onda es incidente sobre un material determinado. Como se ha tenido en cuenta que dicha onda tiene la misma frecuencia que la atómica, existe una posibilidad finita de que tal onda obligue al átomo a realizar la transición del nivel 2 de energía al 1.

Por lo tanto, en este caso, la energía liberada se desarrolla en forma de onda incidente. Este fenómeno es conocido como emisión estimulada.

Existe una diferencia principal entre los dos tipos de emisiones (estimulada y espontánea). En el caso de la emisión espontánea sólo se desprende un fotón y este tiene una dirección y sentido aleatorio. Por el contrario, en la emisión estimulada el fotón radiado es idéntico al fotón incidente, conociendo así, la dirección, sentido y frecuencia de este. [1]

ABSORCIÓN

En el caso de la absorción, se asume que el átomo se localiza en el nivel 1 de energía. Como ya se ha mencionado con anterioridad, el nivel 1 de energía se encuentra en el suelo, por lo tanto, a menos que se aplique un estímulo externo al átomo, este permanecerá impasible en dicho nivel. Así que suponiendo que una onda electromagnética incidente sobre un material determinado con una frecuencia $V = V_0$. En estas condiciones existen finitas posibilidades de que el átomo alcance el nivel 2 de energía, y como consecuencia la diferencia de energía, $E_2 - E_1$, que el átomo

necesita para dicha transición, se obtiene de la energía incidente de la onda mencionada arriba. [1]

1.5.3 INVERSIÓN DE POBLACIÓN

Se considerará el número N como el número de átomos o moléculas por unidad de volumen, con el fin de poder conocer las posibilidades que se encuentren para que los fenómenos descritos anteriormente (absorción, emisión estimulada y emisión espontánea) se puedan dar. Este número N es el número de átomos o moléculas que residen en un instante de tiempo t en un nivel de energía determinado por unidad de volumen. Desde ese momento se denominará “población” de dicho nivel de energía.

En el caso de la emisión espontánea, las probabilidades de que el proceso ocurra se pueden definir como la velocidad de decadencia de la inversión de población del nivel superior al inferior, $(dN_2/dt)_{sp}$, y además ha de ser proporcional a la inversión de población del nivel 2 de energía N_2 . Por lo tanto, se puede escribir que:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{esp} = -AN_2 \quad (3)$$

donde el signo negativo representa que la derivada respecto al tiempo es negativa. Y A es una constante positiva conocida como la velocidad de emisión espontánea o como el coeficiente de Einstein. Este coeficiente ya fue determinado primero por Einstein partiendo de las leyes de la termodinámica. Esta expresión determina el ritmo o la velocidad de caída del átomo o molécula hacia niveles de energía menores.

Además, se puede determinar el tiempo de vida de la emisión espontánea a través de la expresión $\tau_{sp} = 1/A$.

Similarmente, para la decadencia no-radiactiva, se puede escribir:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{nr} = -\frac{N_2}{\tau_{nr}} \quad (4)$$

donde τ_{nr} es la caída no-radiactiva.

Se destaca que, para la emisión espontánea, el valor numérico A depende tan solo de la transición en sí, mientras que en la caída no-radiactiva depende también de las características del medio circulante además de la transición que se considere.

De la misma manera, se actúa con el proceso de emisión estimulada. Se puede escribir:

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{est} = -W_{21}N_2 \quad (5)$$

donde $(dN_2/dt)_{sp}$ es la velocidad a la que ocurre la transición de 2 a 1 como resultado de la emisión estimulada y W_{21} es la expresión que determina el ritmo de la emisión estimulada.

Del mismo modo que el coeficiente A es definido con la Ecuación (2), w_{21} también está definido por la dimensión temporal (tiempo)⁻¹. A diferencia de A , W_{21} no depende solo de la transición de niveles, además, tiene dependencia directa con la intensidad con la que la onda electromagnética incide.

Concretando, para una onda plana, se puede escribir que:

$$W_{21} = \sigma_{21}F \quad (6)$$

donde F es el flujo de fotones de la onda y σ_{21} es la dimensión de un área denominada sección de cruce de la emisión estimulada y depende de las características del material a tratar.

De una forma similar a la Ecuación 4, se puede definir la absorción W_{21} por medio de la ecuación:

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_a = -W_{12}N_1 \quad (7)$$

donde $(dN_1/dt)_a$ es la velocidad de transición de 2 a 1 debido a la absorción y N_1 es la población del nivel 1. Además, tal como en la Ecuación 8, se puede escribir:

$$W_{12} = \sigma_{12} F \quad (8)$$

donde σ_{21} es un área característica (sección de cruce de la absorción), que depende solo de la transición tratada en todo el escrito. [1]

Como ya se ha mencionado, se han determinado los fenómenos de emisión estimulada y de absorción en función de la sección de cruce de ambas, siendo σ_{21} y σ_{12} respectivamente. Einstein demostró a principios del siglo XX que si dos niveles de energía son no-degenerativos, entonces $W_{21} = W_{12}$ y $\sigma_{21} = \sigma_{12}$. Si los niveles no-degenerativos son g_1 y g_2 respectivamente, por lo tanto, se puede escribir:

$$g_2 W_{21} = g_1 W_{12} \quad (9)$$

$$g_2 \sigma_{21} = g_1 \sigma_{12} \quad (10)$$

En resumen, a todo lo mencionado con anterioridad, los procesos de emisión espontánea, la emisión estimulada y la absorción pueden describirse en torno a los fotones emitidos o absorbidos de la siguiente forma:

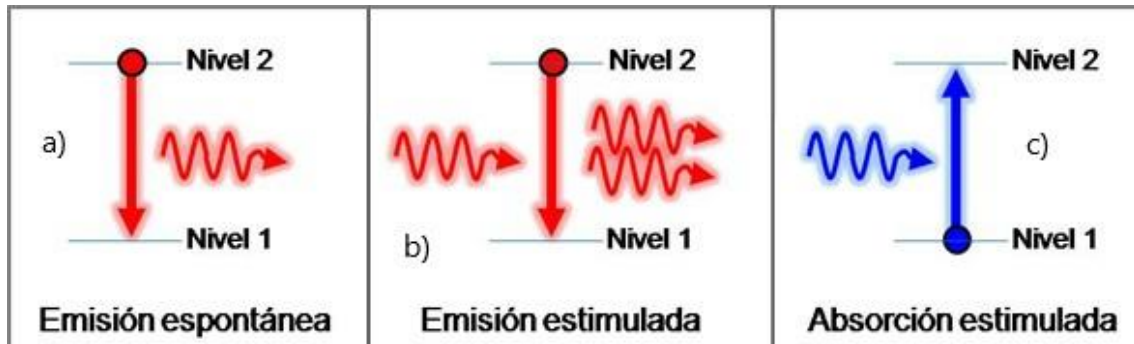


Figura 2 Esquema de proceso. a) Emisión espontánea; b) Emisión estimulada; c) Absorción

En el proceso de emisión espontánea, el átomo decae del nivel 2 de energía al nivel 1 por medio de la emisión de un fotón.

El proceso de emisión estimulada, el fotón incidente estimula la transición de 2 a 1 y por

lo tanto se obtienen dos fotones (el estimulante y el estimulado).

En el proceso de absorción, el fotón incidente simplemente se absorbe para producir la transición de 1 a 2.

Por lo tanto, se puede decir que en todo aquel proceso de emisión se crean fotones y en los procesos de absorción se aniquilan los mismos. [1]

1.5.4 PRINCIPIOS DEL HAZ LASER

Como se ha comentado en la introducción el acrónimo LASER significa Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, que a la traducción es amplificación de luz por emisión estimulada de radiación. La amplificación se produce en la iteración de la radiación con la materia. Los láseres están compuestos por un medio activo en el cual se genera el haz láser.

En el mercado se pueden encontrar diversos tipos de láser, diferenciados unos de otros por la potencia que son capaces de emitir. [3]

Los láseres están compuestos por dos espejos reflectores paralelos, dentro de los cuales está localizado el medio activo. Este medio activo genera el haz láser y el fin de su localización es amplificar la radiación a una determinada frecuencia. Si los espejos están ajustados al medio activo, se cumplirá que:

$$L_1 = L \cdot \eta \quad (11)$$

donde L_1 es la longitud existente entre los espejos paralelos, L la longitud del material activo y η el índice de refracción. [3]

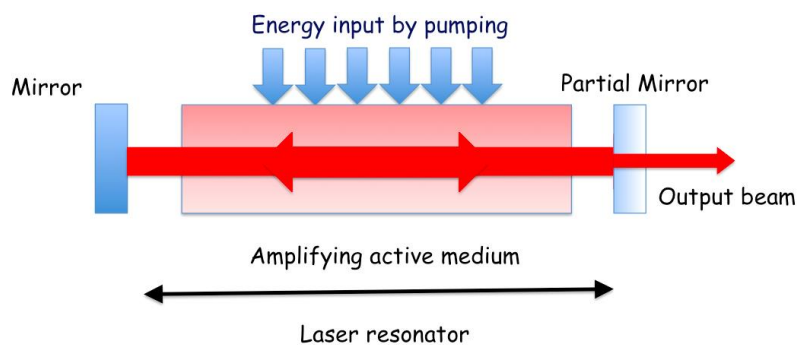


Figura 3 Esquema básico del láser

El índice de refracción es dependiente del material activo, de tal manera que, si los espejos se colocan dentro del material activo, este índice será cercano a uno, como es el caso actual. Normalmente, los espejos están colocados fuera del material activo y por lo tanto la longitud entre espejos L_1 será mayor que la distancia entre el medio activo L ($L_1 > L$). Uno de los dos espejos ha de ser parcialmente trasmisor (coeficiente de reflexión menor de uno), para que una parte de la intensidad luminosa no sea reflejada.

La intensidad o la cantidad de fotones que residen en el láser una vez finalizado el recorrido viene dado por:

$$e^{-2\gamma} = r_1 r_2 \quad (12)$$

Donde r_1 es el coeficiente de reflexión del espejo trasmisor, r_2 es el coeficiente de reflexión del espejo parcialmente trasmisor y γ la fracción de intensidad.

La única forma de que las oscilaciones del láser se mantengan constantes, es compensando las pérdidas de energía con la radiación a través del medio. Sabiendo que la intensidad de radiación varía de 1 a $F = e^{\alpha L - \gamma}$, donde $e^{\alpha L}$ es el factor de intensidad de radiación, se generarán oscilaciones fácilmente cuando $F \geq 1$, y serán extinguidas cuando $F < 1$.

Además, cuando $\alpha L > \gamma$ la intensidad de radiación aumenta de tal forma que deshabita el nivel superior de energía, y en el caso contrario, cuando $\alpha L < \gamma$ la radiación no aumenta en ningún momento.

Por lo tanto, y para que las oscilaciones del láser se mantengan constantes, deben seguir la ecuación umbral, determinando así un máximo m :

$$\alpha L = \gamma \quad (13)$$

La amplificación de la onda mencionada depende directamente de la frecuencia y de la inversión de población de cada material determinado. Todos los materiales siguen la ecuación:

$$\alpha(\nu) = k(\nu)_0 n \quad (14)$$

donde $\alpha(\nu)$ es la amplificación del material, $k(\nu)_0$ es el coeficiente de absorción del material láser sine excitar y n es la inversión de población relativa.

La inversión ha de ser lo suficientemente alta para que un láser de una determinada longitud o una reflectividad de espejos dada, actúe.

Esta inversión de población se genera como consecuencia de una cantidad de átomos por de unidad de volumen mayor que la cantidad de átomos en estado fundamental. Esta condición solo se crea mediante el bombeo. [3]

1.5.5 ESQUEMAS DE BOMBEO

Como se ha comentado en el apartado anterior, el proceso de bombeo es el proceso mediante el cual los átomos reciben la energía que precisan para poder ascender de nivel energético.

Solo si existiera la incidencia de una onda electromagnética producida, por ejemplo, por una lámpara con una energía $E = h\nu$ y de frecuencia $\nu = \nu_0$, la inversión de población existiría en cualquier medio. Por lo tanto, y tan solo en equilibrio térmico, la absorción predomina sobre las emisiones puesto que $g_1 N_1 > g_2 N_2$. [1]

Es posible la existencia de láseres de mayor cantidad de niveles de energía. Aquí se mostrarán los láseres de tres y cuatro niveles de energía. Las figuras muestran el funcionamiento de dichos láseres:

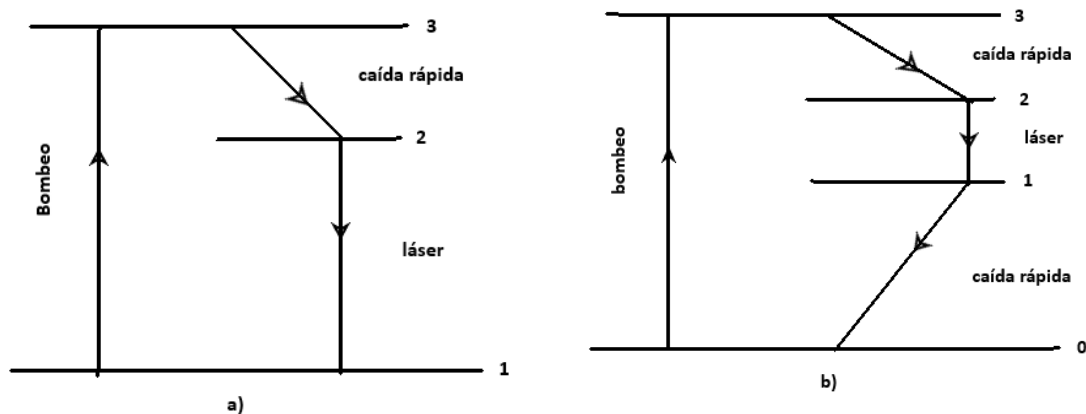


Figura 5 a) Esquema de bombeo de 3 niveles b) Esquema de bombeo de 4 niveles

Primero se comentan los láseres de tres niveles de energía (Figura 5.a). En este caso, los átomos son bombeados desde el nivel 1 de energía hasta el nivel 3. Cuando estos átomos llegan al nivel 3 de energía, nivel máximo, se produce un fenómeno de caída rápida. Esto representa un cambio energético no radiante del átomo, donde la energía se transforma en otra forma que no es radiación como por ejemplo en térmica, cinética, energía interna...

A partir de este nivel de energía, al que se denomina nivel superior del láser o nivel metaestable de energía, la inversión de población se obtiene generando el láser.

Por otro lado, está el láser de cuatro niveles, donde el nivel de reposo es denominado nivel 0 de energía y, por lo tanto, los niveles de energía bombeados son tres. Una vez en el nivel superior de energía, ocurre exactamente lo mismo que en el láser de tres niveles de energía: una caída rápida no radiante. Una vez en este nivel energético, llamado 2, se produce la inversión de población, y la emisión estimulada entre este último nivel y el nivel inferior del láser. Entre este último nivel y el nivel de reposo se vuelve a producir una caída no radiante. Es imprescindible para los láseres continuos este último paso.

El factor común que se puede reconocer entre los dos láseres es el proceso mediante el cual los átomos son bombeados del nivel 1 al nivel 3 o del nivel 0 al nivel 3, respectivamente. Este proceso es conocido como bombeo. Esto se puede lograr mediante, por ejemplo, una lámpara lo suficientemente intensa o con una descarga eléctrica en el medio activo.

Si el nivel 3 de energía, nivel superior, se encuentra vacío, el ritmo al que se comienza a poblar de átomos $(dN_2/dt)_p$ puede escribirse como:

$$(dN_2/dt)_p = W_p N_g \quad (15)$$

donde W_p representa un valor que describe el proceso de bombeo y N_g es la población en el nivel de reposo tanto para un láser de tres niveles de energía (Nivel 1), como para un láser de cuatro niveles (Nivel 0).

En este texto se explican dos tipos de procesos de bombeo: el óptico de luz incoherente y el eléctrico.

En el primero de los citados, es la energía de una lámpara lo suficientemente potente la que es absorbida por los átomos del medio activo y genera que estos se eleven hasta el nivel superior de energía. Este método está dirigido a los láseres de estado sólido y líquido.

El segundo mencionado consiste en una descarga eléctrica suficientemente intensa y especialmente afín a los láseres de estado gaseoso y de tipo semiconductor. [3]

1.5.6 PROPIEDADES DEL HAZ DEL LÁSER

Las principales características de la radiación láser son cuatro: monocromaticidad, coherencia, direccionalidad y brillo.

MONOCROMACIDAD

La perfecta monocromaticidad de una onda, esto es, una onda que vibre con una única frecuencia es una situación ideal no alcanzable cuando se trabaja con ondas luminosas reales. Las ondas reales están formadas por paquetes de ondas que llevan asociadas una determinada anchura espectral y temporal. Se cumple la siguiente relación entre ambas magnitudes: [2]

$$\tau \approx \frac{1}{\Delta\nu} \quad (16)$$

donde: τ = duración de dicho paquete (s).

$\Delta\nu$ = anchura espectral (Hz).

Según la Ecuación 15, una onda que oscila en una única frecuencia tendría una anchura espectral nula y una duración temporal infinita, lo cual sucede en la realidad.

La medida del grado de monocromaticidad se puede expresar en términos de $\Delta\nu$ o de $\Delta\lambda$. La anchura espectral de la emisión de las fuentes luminosas varía de unas a otras. En general, la luz que emiten es un conjunto de colores en forma de bandas continuas o un conjunto de colores discretos. La observación experimental de este fenómeno se puede realizar por medio de un prisma que produzca la dispersión de diferentes componentes de la luz.[2]

Para una fuente de luz blanca $\Delta\lambda$ es del orden de 300 nm. En el caso de una raya obtenida de un tubo de descarga, dicho valor puede ser del orden de 0,01 nm. Para un láser funcionando en un único modo se puede conseguir valores notablemente por debajo de los obtenibles por medio de tubos de descarga. [3]

COHERENCIA

Dentro de esta propiedad podemos distinguir dos tipos de coherencia: la coherencia espacial y la coherencia temporal.

Para definir la coherencia espacial, se consideran dos puntos P_1 y P_2 , en un instante determinado igual a $t = 0$, en el mismo frente de onda de una onda electromagnética dada. Por otra parte, se suponen las correspondientes áreas eléctricas de dichos puntos, E_1 y E_2 , respectivamente.

La diferencia que existe entre las fases de las dos áreas, en el instante $t = 0$, es igual a cero. Si esta diferencia permanece invariable en el valor cero para los instantes $t > 0$, se puede decir que en este momento, existe una perfecta coherencia entre los dos puntos. Y además si dicho caso, ocurre en cualquier pareja de puntos de la onda, la coherencia espacial es perfecta.

Para cualquier punto P_1 , el punto P_2 debe estar situado dentro del área finita que constituye los alrededores del punto P_1 , si se pretende que exista una buena correlación entre fases. En este caso, se dice que la onda tiene una coherencia espacial parcial. Generalizando, para cualquier punto P , se puede presentar $S_c(P)$ como el área de coherencia. [1]

Con el fin de definir la coherencia temporal, se va a considerar un campo eléctrico de la onda para un punto determinado P , en el instante t y $t + \tau$. Si para un instante τ con un valor mayor que cero (> 0), con un correspondiente aumento del instante t , la diferencia entre fases permanece invariable para cualquier otro instante t , se puede decir que existe una coherencia temporal durante este instante τ . Y además, si esto

ocurre para cualquier valor de τ , la onda electromagnética tiene una coherencia temporal perfecta.

Pero, si, por el contrario, τ tiene un valor tal como $0 < \tau < \tau_0$, la onda tiene una coherencia espacial parcial, con un instante de coherencia igual a τ_0 . [1]

DIRECCIONALIDAD

Esta propiedad aparece del hecho de que el medio activo se encuentre en la cavidad resonante. Se consideran por separado el caso del haz de láser de coherencia espacial perfecta y el caso de coherencia espacial parcial, con el fin de entender la propiedad de direccionalidad.

Por una parte se comenta el caso de la coherencia espacial perfecta. Incluso en este caso, el haz láser tiene una divergencia inevitable como consecuencia de la difracción.

Primero se considera el caso de la coherencia espacial perfecta. Incluso en este caso, el haz láser de una abertura finita tiene una divergencia inevitable debido a la difracción. Esto se entiende mejor con la ayuda de la imagen, donde un haz monocromático de una intensidad uniforme y un frente de onda plano es asumido que es incidente en una pantalla S que contiene una abertura D. De acuerdo con el principio de Huyghen, el frente de onda de un plano P detrás de la pantalla se puede obtener de la superposición de las ondas principales emitido por dicho punto de abertura. Así vemos que, a causa del tamaño de la abertura, el haz láser tiene una divergencia finita θ_d . Su valor puede ser obtenido de la teoría de la difracción. De una amplitud de distribución arbitraria se obtiene que: [2]

$$\theta_d = \beta\lambda/D \quad (17)$$

donde λ y D son la longitud de onda y el diámetro del haz láser. β es un coeficiente numérico del orden de la unidad, cuyo valor depende de la forma de la amplitud de distribución y en la forma en que la divergencia y el diámetro del haz está definido. El haz cuya divergencia se pueda expresar como en la Ecuación 15 es descrita como difracción límite.

Si, en el caso de una onda con coherencia espacial parcial, su divergencia es más larga que el valor mínimo establecido por la difracción.

Si la onda tiene solo una coherencia espacial parcial, su divergencia fuese más larga que el valor mínimo establecido por la difracción. En efecto, para cualquier punto P' del frente-onda, argumento de Huygens solo se puede aplicar a los puntos acostados en el área de coherencia S_c alrededor del punto P' .

El área de coherencia, por lo tanto, actúa como una apertura limitante de la superposición de las ondas elementales. El haz de láser divergente viene dado por:

$$\theta = \beta\lambda/[S_c]^{1/2} \quad (18)$$

donde, de nuevo, β es un coeficiente numérico del orden de la unidad cuyo valor exacto depende de modo en el que dicha divergencia θ y el área de coherencia S_c están definidas. [1]

BRILLO

Se define la propiedad de brillo de una fuente dada de onda electromagnética como la potencia emitida por unidad de área con respecto a la superficie por unidad de ángulo sólido.

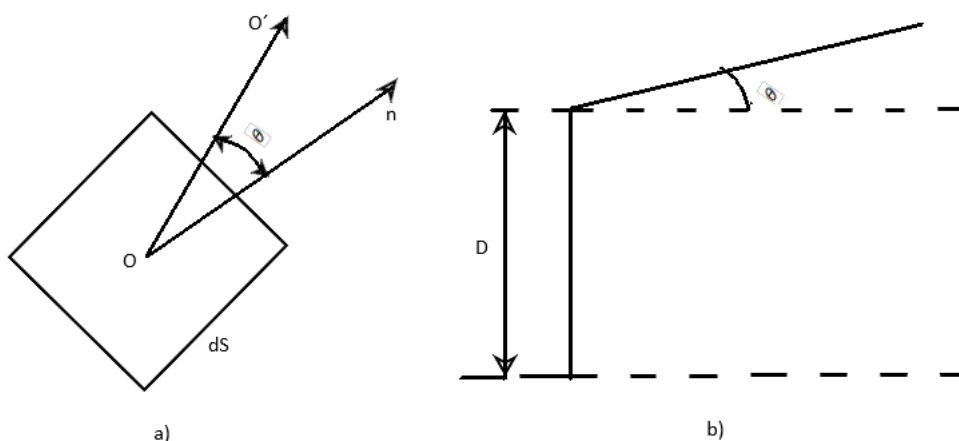


Figura 6 Concentración en el punto O de una serie de nodos planas e.m. y b) concentración o luminosidad de un rayo láser de diámetro D

Para ser más precisos, se considerará dS como el área superficie elemental del punto O de la fuente (Ilustración 6.a.). La potencia dP emitida por dS dentro del ángulo sólido $d\Omega$ entorno a la dirección OO' , se puede escribir:

$$dP = B \cos \theta \, dS \, d\Omega \quad (19)$$

donde θ es el ángulo entre OO' y la normal n de la superficie. Anótese que el factor $\cos \theta$ surge del hecho de que la cantidad físicamente importante de la emisión a lo largo de la dirección OO' es la proyección de dS en el plano ortogonal de la dirección OO' . La cantidad B definida mediante la Ecuación 19 es llamada la fuente de brillo del punto O en la dirección OO' . Esta cantidad generalmente depende de las coordenadas polares θ y ϕ de la dirección OO' y en el punto O. Cuando B es constante, la fuente se dice que es isotrópica. [3]

Vamos a considerar un haz de láser con una potencia P , con una sección de cruce circular de un diámetro D y con una divergencia θ (Ilustración 6.b). θ normalmente es muy pequeña, se tiene que $\cos \theta \cong 1$.

El área del haz es igual a $\pi D^2/4$ y la emisión del ángulo sólido es $\pi\theta^2$, entonces, de acuerdo con la Ecuación 17, obtenemos que el brillo del haz láser es:

$$B = 4P/(\pi D\theta)^2 \quad (20)$$

Si el haz es difracción limitante, tendremos que $\theta = \theta_d$ y, con ayuda de la ecuación 17, obtenemos la ecuación 21.

$$B = \left(\frac{2}{\beta\pi\lambda}\right)^2 P \quad (21)$$

Que es el brillo máximo que el haz láser a una potencia P puede tener. [1]

1.5.7 TIPOS DE LÁSER Y SUS APLICACIONES

LASER DE ESTADO SÓLIDO

En general, la excitación en estos láseres se consigue mediante lámparas de arco y de flash y la potencia de salida, normalmente, no suele superar los 10 kW. El láser más común de estado sólido en la industria es el láser Nd: YAG (Neodymium Yttrium Aluminium Garnet).

La eficiencia de estos láseres está en el 12 %, y sus principales funciones son el corte, la soldadura, el taladro y el fresado. Otra de las aplicaciones está dentro del ámbito militar, puesto que se utilizan también para seguimientos de largas distancias. Su longitud ronda los 10,7 μm . [1]

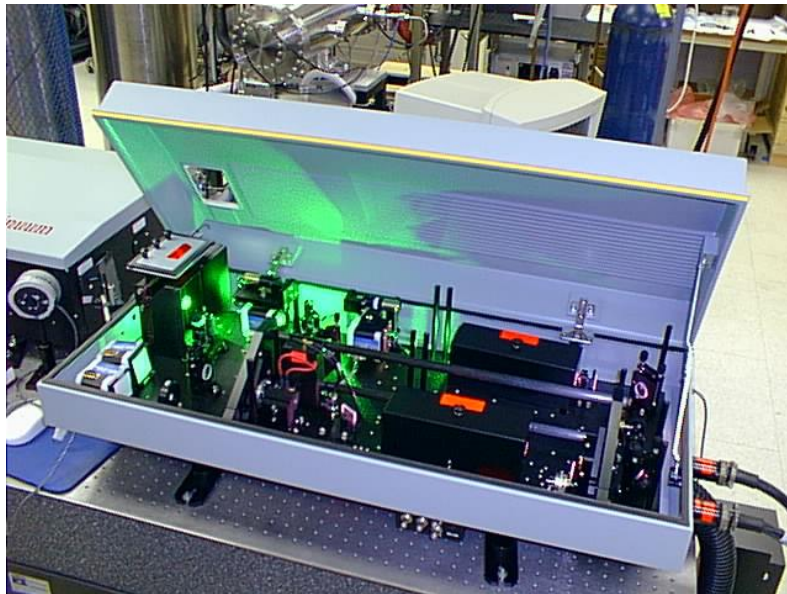


Figura 7 Láser Nd: YAG

LASERES SEMICONDUCTORES O DE DIODOS

Hoy día, los láseres semiconductores o de diodos están adquiriendo mayor importancia ya que, aunque siempre habían estado limitados debido a su baja potencia, se pueden utilizar para el bombeo de otros láseres, en especial para los láseres en estado sólido. Esto se debe a su bajo peso, alta eficiencia y fiabilidad.

En este caso, la emisión estimulada viene dada por la recombinación de los electrones cuando se aplica un voltaje en las capas n y p de los diodos. Se ha extendido el uso de este tipo de láseres ya que presentan una alta eficiencia a un bajo coste debido a un mantenimiento reducido. [1]

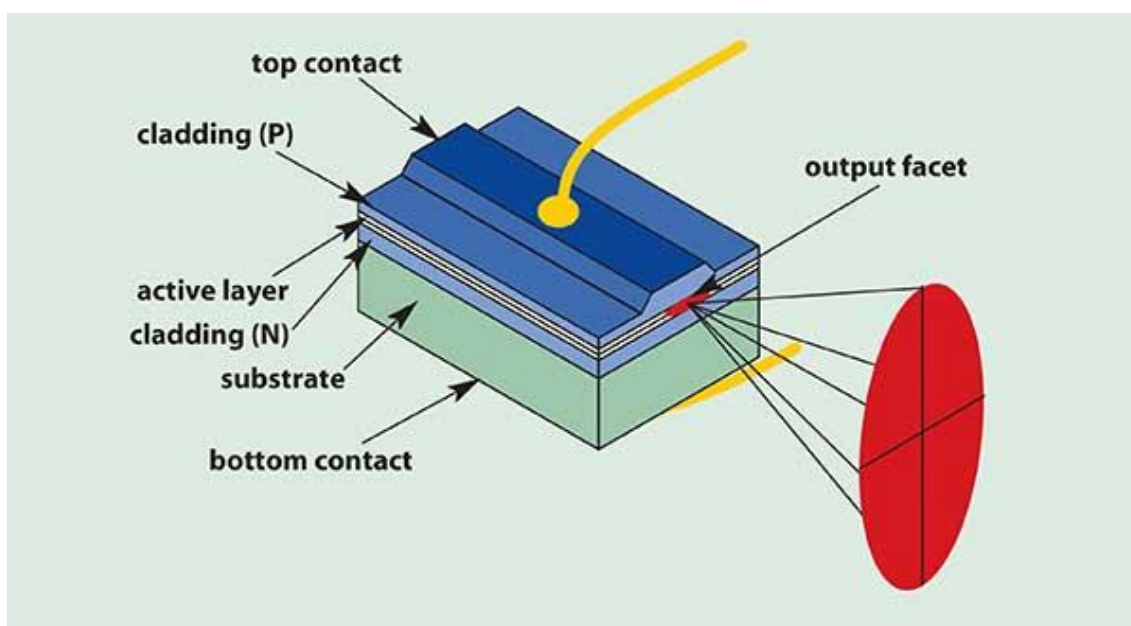


Figura 8 Láser de diodos

LASER EN ESTADO GASEOSO

Son los láseres más desarrollados y utilizados en la industria por su eficiencia eléctrica (15-20%) y por una mayor potencia de salida en comparación con otros tipos de láseres (0,1-50 kW), además de por tener una alta gama de aplicaciones.

Por otra parte, este tipo de láseres tienen una longitud de onda más larga que otros láseres y como consecuencia de esta propiedad, la interacción con ciertos materiales es más compleja.

El funcionamiento se basa en una cavidad donde el gas entra y mediante corriente directa, se ioniza el gas obteniendo así la emisión estimulada necesaria para formar el láser. [2]

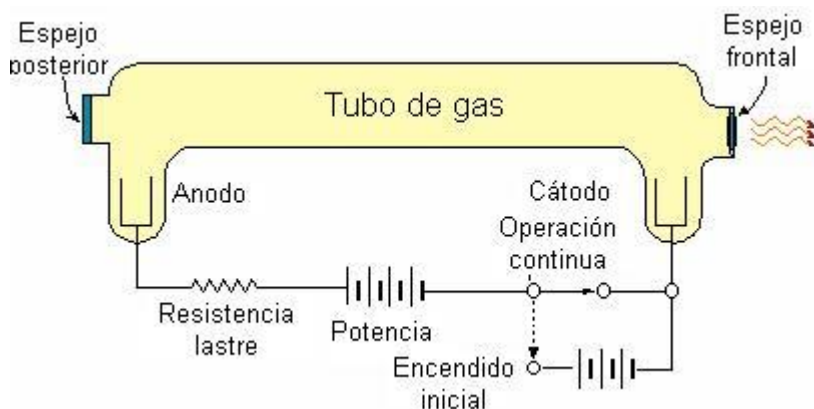


Figura 9 Esquema láser de CO₂

LASER DE FIBRA

Este tipo de láseres se encuentran en desarrollo y están adquiriendo cada vez más importancia hasta el extremo de llegar a sustituir a los actuales láseres Nd:YAG y CO₂. Esto es debido a que su potencia de salida se puede controlar con mayor facilidad y porque ofrecen unas características de haz de láser una diez veces superiores. Además, se han desarrollado de tal manera que la longitud de onda está dentro del rango de ondas seguras para el ojo humano.

Este tipo de láseres consisten en estirar un disco de YAG hasta terminar consiguiendo una fibra muy fina de tal solo unas micras con el fin de realizar refrigeraciones más sencillas.

Otras de las ventajas que presentan es que son equipos de bajo coste y muy compactos. [3]

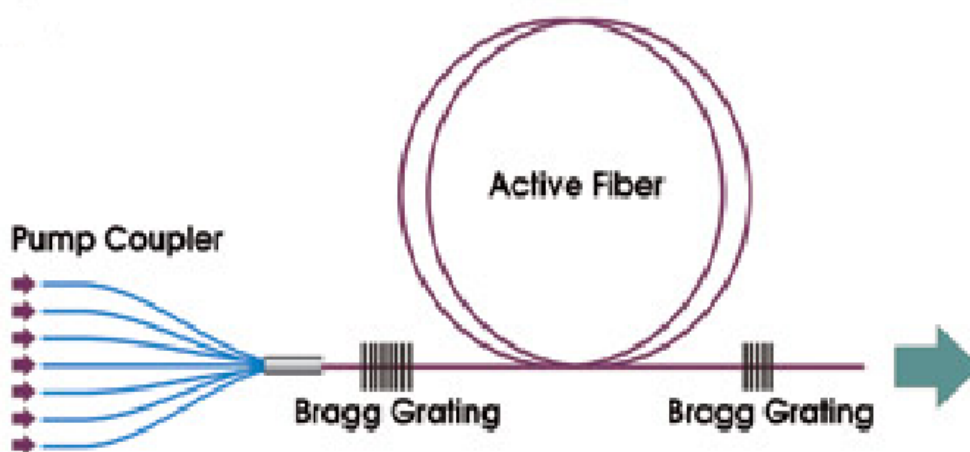


Figura 10 Láser de fibra

1.5.8 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES

LASER POLISHING

El láser polishing utiliza una fuente láser para fundir de manera controlada una capa superficial y mejorar el acabado dando como resultados una reducción de la rugosidad. Es un proceso de fabricación emergente que pretende reemplazar el caro, largo y específico pulido manual.

Existen dos regímenes asociados a este proceso. Por una parte, el denominado Shallow Surface Melting (SSM) y por otro lado, el conocido como Surface Over Melting (SOM).

Ramos-Grez escribió que el primero de estos dos regímenes (SSM) se da cuando el láser funde una capa que no supera el valor de la altura que existe entre el valle y el pico de la pieza a tratar. En este régimen el material fluye desde los picos hasta los valles de la superficie de la pieza, y así se reduce la rugosidad superficial que la pieza tiene en un primer instante. De tal manera, que el principal objetivo del pulido, mejorar el acabado superficial de la pieza, queda resuelto.

En cambio, en el régimen SOM se funde una capa de material que sí supera a la distancia pico-valle. Por lo tanto, la totalidad de la topografía superficial cambia y la solidificación depende directamente del gradiente térmico que es diferente en cada punto de la superficie de la pieza. Esto generará corrientes que dan como resultado una superficie ondulada. [4]

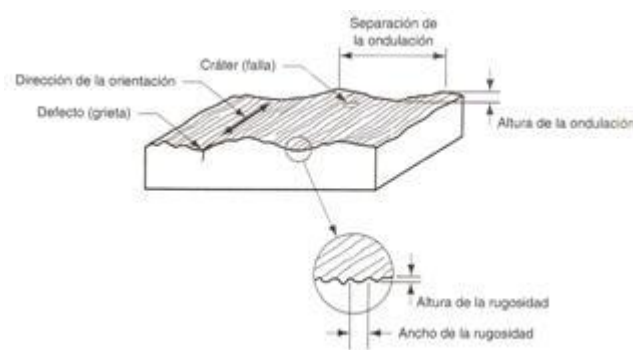


Figura 11 Esquema de rugosidad superficial

Es muy difícil saber con certeza qué régimen predominará en el momento de realizar el pulido. Esto es debido a que en una pieza real la distancia entre pico y valle es diferente en los diferentes puntos de la superficie. La solución a dicho problema es conocer los parámetros que intervienen en el pulido láser. El parámetro que resulta más complicado de controlar es el diámetro del haz o spot láser ya que, la densidad de energía aportada depende directamente del diámetro de *spot* y el espesor de la capa fundida, a su vez, depende de la densidad de energía. [5]

Por lo tanto, durante este proceso no hay ablación y el material no es eliminado, a diferencia del *engraving*.

La Figura 12 muestra un esquema de los procesos fundamentales y los principales parámetros.

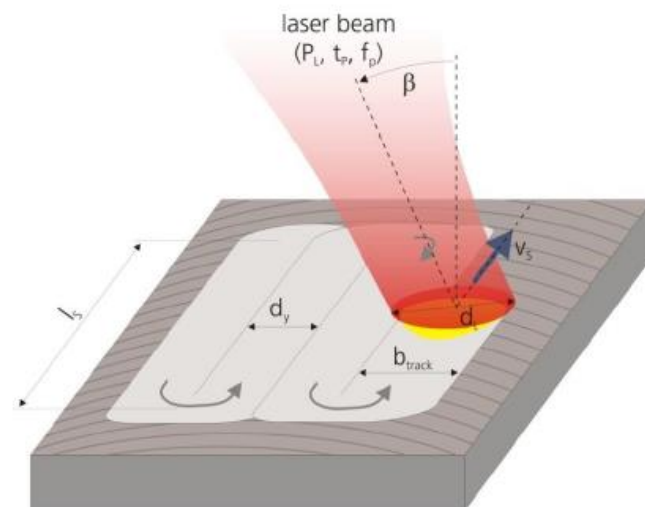


Figura 12 esquema de los principales parámetros del láser

Dependiendo del material y la topografía inicial, el proceso de pulido se puede llevar a cabo con un haz láser continuo o pulsado.

Se pueden diferenciar otros dos tipos de procesos de pulido láser: el macro pulido y el micro pulido, que están basados en operar con una onda continua (CW) y con radiaciones de láser pulsado, respectivamente.

En cuanto al macro pulido, se realiza una fusión continuada con una profundidad que abarca desde los 20 hasta los 100 μm . Se crean áreas con una rugosidad en el perfil de $R_a = 1 \mu m$ o mayor. En cambio, en el micro pulido se realiza una fusión mucho más localizada, combinando la fusión de una capa fina superficial y la vaporización de los micro picos, donde se deja un acabado de rugosidad en el perfil de $R_a = 0,8 \mu m$ o menos, teniendo así estructuras más grandes no afectadas.

Los principales parámetros del micro pulido son: la potencia de láser, la duración de pulso, la frecuencia, el tamaño del spot láser, la velocidad de escaneo del láser, el desenfoque, la distancia entre líneas y el ángulo de incidencia. [5]

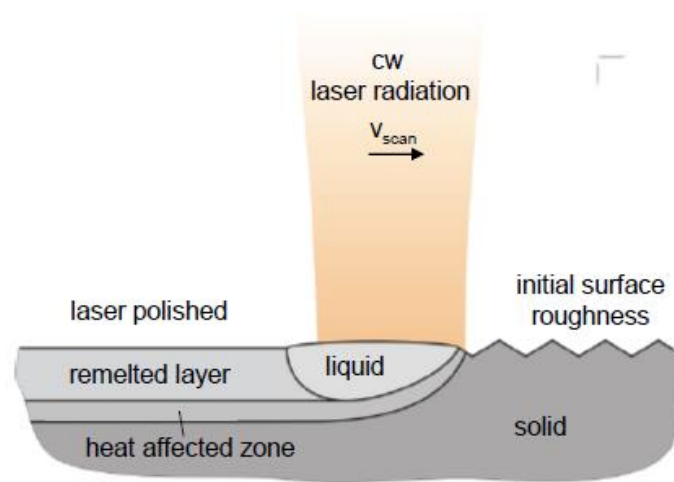


Figura 13 Esquema de macro pulido

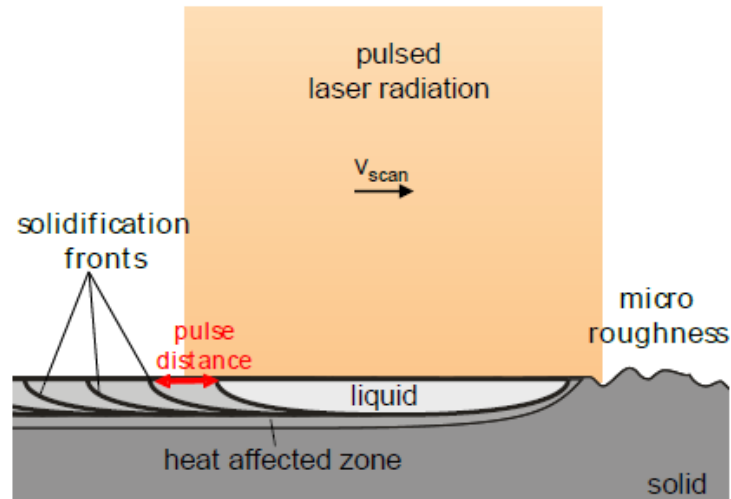


Figura 14 Esquema de micro pulido

Se han realizado diferentes investigaciones en torno a esta técnica con el fin de realizar trabajos en la industria de manera mucho más eficiente y rápida. [5]

Lamikiz *et al* realizaron ensayos con piezas fabricadas mediante la técnica SLS (Selective Laser Sintering), con el fin de crear aleaciones de acero inoxidable con bronce y evitar así las posibles porosidades.

El estudio sobre pulido se basó en caracterizar los parámetros óptimos para dicho material, tanto para las superficies planas como para las inclinadas. En estos casos, se obtuvieron superficies con una reducción de la rugosidad de hasta el 80,1%, con valores cercanos de rugosidad a $1 \mu\text{m}$.

Además, se dedujo que la densidad de energía era un parámetro muy destacable en todo el proceso de pulido, teniendo que ajustar el resto de los parámetros al mismo. [6]

En estos ensayos, también quedó patente la influencia de un parámetro nuevo. Este parámetro se denominó índice de solape del láser y se introdujo como una variable. Este consiste en que las líneas descritas por el láser queden solapadas unas con otras, de tal forma que la línea a dibujar recorra un porcentaje del camino que la línea anterior ya ha generado. El solape óptimo que se determinó en estos ensayos fue de 15 al 30% de solape.

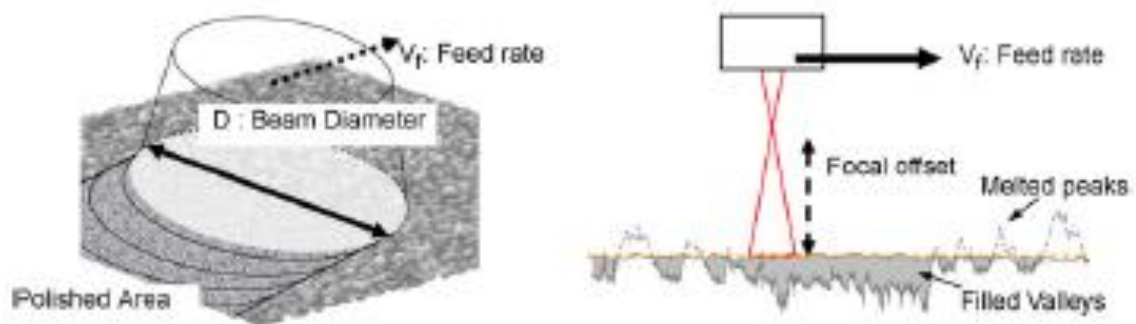


Figura 15 Esquema del proceso de pulido láser

Más tarde, Hafiz et al evaluó la influencia de este solape entre pasadas del láser cuando se pretende pulir un acero de herramientas H13.

En este estudio, se mantuvo constante la densidad de energía en un valor de $3,5 \text{ kJ/cm}^2$, que llevado dicho valor a los parámetros principales de la máquina, se obtiene una potencia de 300 W y una velocidad de avance de 10 mm/s.

Por lo tanto, la única variación que se dio fue en el índice de solape del láser, que varió entre los valores de 80%, 90%, 95% y 97.5%, que se corresponde con pasadas del láser con una separación de $200 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$ y $25 \mu\text{m}$, respectivamente. [7]

Lo que se concluyó con estos ensayos es que cuanto mayor sea el índice de solape del láser, mayor será la mejora de la rugosidad superficial en las piezas a tratar. Pero llegado a un índice determinado, la mejora en la calidad decae, dejando ver que dicho índice es dependiente directo del material procesado. [7]

Como valor óptimo conseguido por la caracterización, se encuentra una reducción del 86,7% de la rugosidad. Se consigue reducir la rugosidad de 1.35 μm a 0.18 μm .

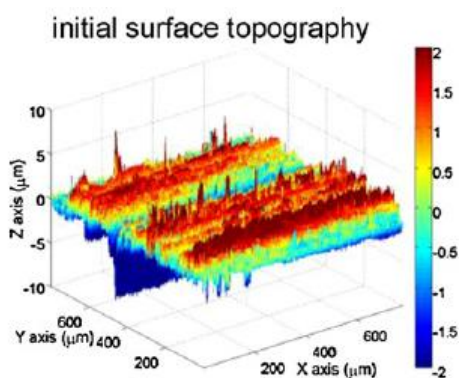


Figura 17 Superficie inicial

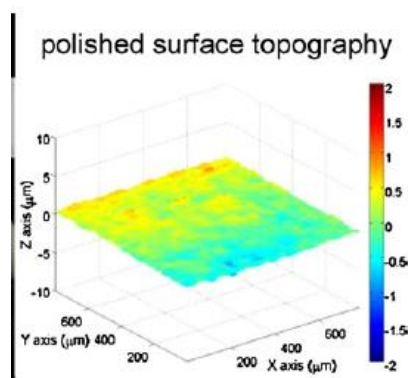


Figura 16 Superficie después del pulido

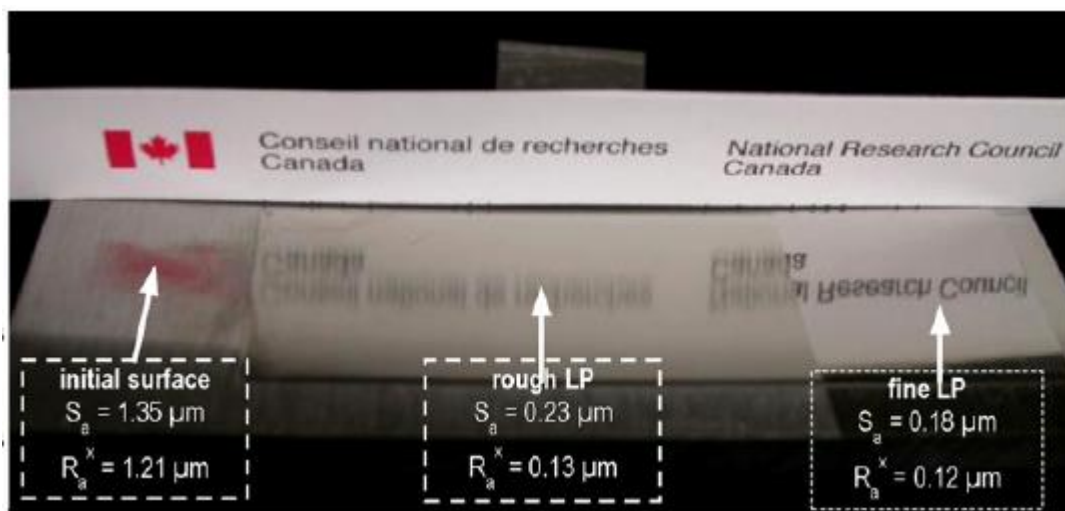


Figura 18 Resultados de los ensayos

Ukar et al evaluaron la posibilidad de pulir mediante láser el acero de herramientas DIN 1.2379, utilizado principalmente en matricería y troquelería.

Para dicho fin utilizaron dos tipos de láseres industriales: uno de 3100 W de diodos y otro de 2500 W de CO₂.

En este trabajo realizado se trató de mantener constantes todos los parámetros en torno a la máquina y trabajar con tres variables. Estos tres parámetros son: la potencia del láser; la velocidad de avance; y el *offset* del láser respecto a su plano focal, que tomaron valores de 800, 1200 y 1600 W en el caso de la potencia; 1000, 1200 y 1400 mm/min para la velocidad de avance.

Se llegó a la conclusión de que ambos láseres consiguen altos porcentajes de reducción de la rugosidad, ambos por encima del 75 % y en el caso del láser de CO₂ por encima del 80 %. [8]

Aun habiendo obtenido unos valores de reducción de rugosidad notables, también se indica que el láser de diodos obtiene la mayor reducción con la menor densidad de energía y un *spot* mayor, con el que se consigue una productividad mayor.

Por otro lado, se encuentran limitaciones a la hora de eliminar las ondulaciones creadas por los procesos de fabricación de la pieza, en este caso, mecanizado.

Se añade también que se ha observado un régimen SSM predominante en este proceso, y se determina la transición entre los regímenes cuando la capa de material fundido es seis veces la altura entre pico y valle.

Todos los ensayos realizados hasta ahora están realizados con un láser

Hasta ahora, se ha expuesto el trabajo realizado a nivel macroscópico en lo que al pulido láser de metales se refiere y con un láser trabajando en modo continuo. Sin embargo, también es posible llegar a niveles microscópicos con el uso de un láser pulsado. [8]

El principio de funcionamiento del láser pulsado es el mismo que el de un láser en modo continuo, con la salvedad de que el pulsado es capaz de enviar cierta energía en pulsos de muy corta duración, alcanzando así picos de potencia de varias decenas de kW [9]

Como se ha podido comprobar existen diversos estudios acerca de la caracterización de los parámetros óptimos en el pulido láser y por consiguiente, el ensayo de los efectos microestructurales como funcionales que estos pueden producir en las piezas a tratar. Pero lo que se pretende es predecir los resultados del pulido láser en función de los parámetros de entrada y por ello, se han diseñado ciertos modelos para cumplir el fin descrito.

Ukar *et al* en resumen, se puede decir que el objetivo principal del pulido láser es la reducción máxima de la rugosidad superficial, y en general de los defectos de la superficie que puedan existir en la pieza. Por ello, se desarrolló un modelo que pretende prever el proceso de pulido láser teniendo en cuenta los posibles cambios de microestructura que pueda sufrir el material debido a esta adición de calor.

Este último detalle es importante, ya que esta transformación metalúrgica requiere de una energía que afectará al balance térmico del conjunto, conllevando a un error notable en los cálculos numéricos si no se tiene en cuenta. [8]

El modelo se basa en filtrar las frecuencias espaciales de la superficie inicial, de tal forma que eliminando los picos y los valles de la superficie con el fin de seguir el principal objetivo del pulido láser, las ondulaciones de alta frecuencia son eliminadas, pero las de baja frecuencia no está afectadas. Para conseguir lo descrito, se trabaja entre los regímenes SSM y SOM, de tal forma que se funde una capa superficial mayor que la distancia entre pico-valle. Para que estas ondulaciones desaparezcan, el tiempo que el material permanece fundido ha de ser suficiente para que, mediante corrientes de convección, las ondulaciones se corrijan. El modelo pretende calcular ese tiempo que permanece fundido el material bajo unos parámetros de entrada.

Otro lo de los estudios destacables que se puede hallar a la literatura son los procesos basados en la estructuración de la superficie mediante la modulación de la fusión.

Los procesos de fabricación de estructuración superficial, tradicionalmente se han basado en la eliminación de material. Por lo tanto, los pasos de limpieza y acabado son necesarios con las consiguientes implicaciones económicas. La estructuración láser por fundición es un nuevo enfoque basado en la redistribución del material en estado fundido. Las ventajas del proceso son un ahorro económico y un acabado directo. La obtención de un acabado directo se debe al alisamiento de la superficie que ocurre durante el proceso de estructuración.

Esta modulación se puede lograr por medio de la potencia del láser variable de modo que se obtenga una nueva topografía de superficie determinada por el movimiento del punto trifásico.

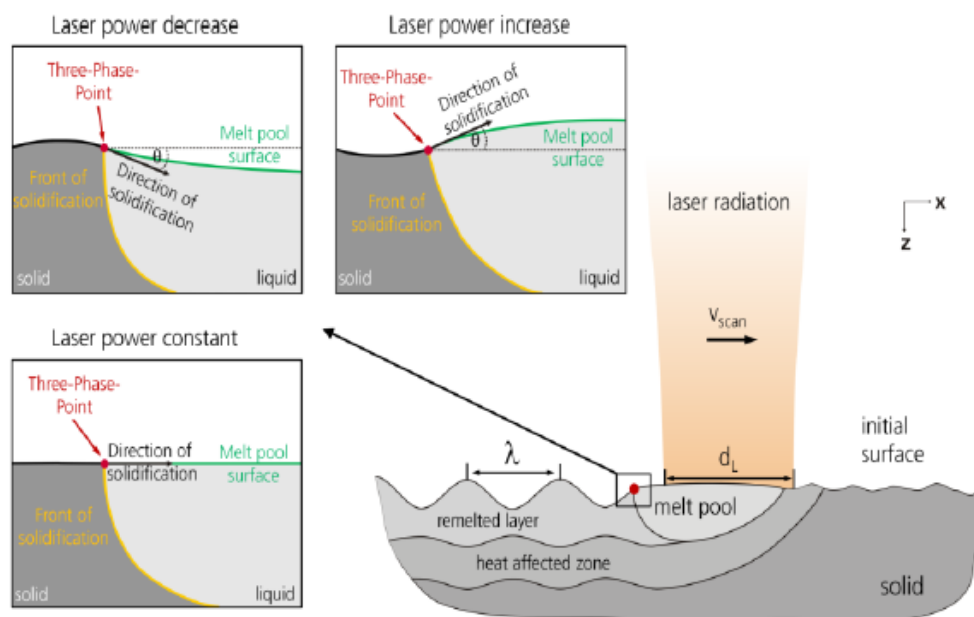


Figura 19 Esquema de los principales activos para la estructuración por fusión

El principio de la estructuración mediante fusión se presenta en la Figura 19, donde una capa fina (profundidad menor de $100 \mu m$) es fundida.

En el proceso el material se funde en el frente de fusión y luego se solidifica en el frente de solidificación siguiendo la superficie del baño de fusión. La solidificación real se lleva a cabo en el punto de tres fases, que se resaltan en la Figura 19. Por lo tanto, cuando la potencia del láser es constante, la superficie del baño fundido se reduce, el volumen del baño varía y ocurre la estructuración.

A continuación, aumentar la potencia del láser implica un aumento del baño del conjunto fundido debido al cambio de densidad de sólido a líquido, la dilatación térmica del material fundido y una mayor velocidad de fusión en comparación con la velocidad de solidificación.[5]

Como resultado, la superficie del baño fundido se amplía hacia *a fuera* y se logra la estructuración de una elevación. Alternativamente, la disminución de potencia conduce a una contracción del baño fundido y funciona al revés, logrando la estructuración de un valle. Por lo tanto, al volver a fundir una capa superficial delgada mientras se modula la potencia del láser, se puede lograr una estructuración de la superficie.

La topografía final de la superficie depende de cómo es modulada la potencia. Con el fin de obtener estructuras periódicas, la potencia láser es modulada sinusoidalmente. Para este propósito, los límites superiores e inferiores de potencia láser necesitan estar determinados, siendo $P_{L\ melt}$ la potencia mínima requerida para comenzar a fundir y tener un grupo de fusión estable y $P_{L\ evap}$ la máxima potencia láser después de que dicho material comience a evaporarse. [5]

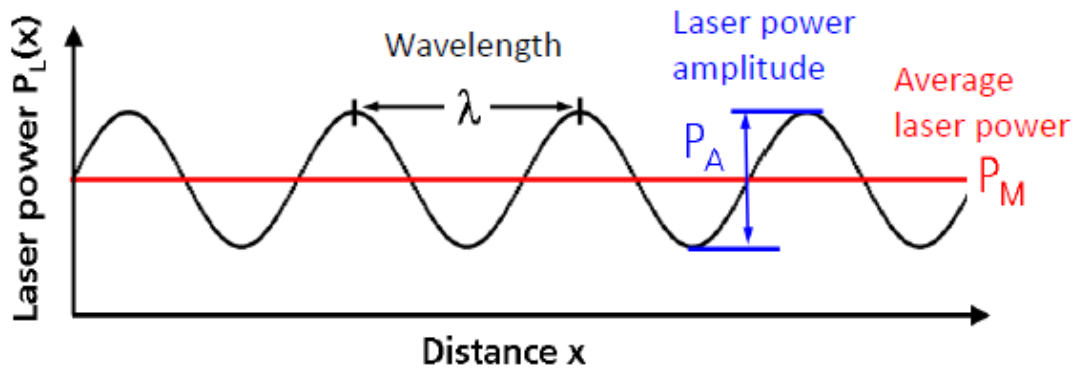


Figura 20 Esquema de los parámetros de potencia láser

El rango de la potencia $P_{L\ melt}$, $P_{L\ evap}$ consecuentemente define la potencia media del láser P_M y la amplitud de la potencia P_A . Por una parte, la media de la potencia se define:

$$P_M = \frac{P_{L\ evap} + P_{L\ melt}}{2} \quad (20)$$

Por otro lado, la amplitud de la potencia láser está determinada por:

$$P_A = \frac{P_{L\ evap} - P_{L\ melt}}{2} \quad (21)$$

Mientras la potencia láser sea modulada, el haz láser con diámetro d_L es guiada unidireccionalmente sobre la superficie con una velocidad de escáner definida, V_{scan} , y con una distancia entre líneas dy , como se muestra en la Figura 21:

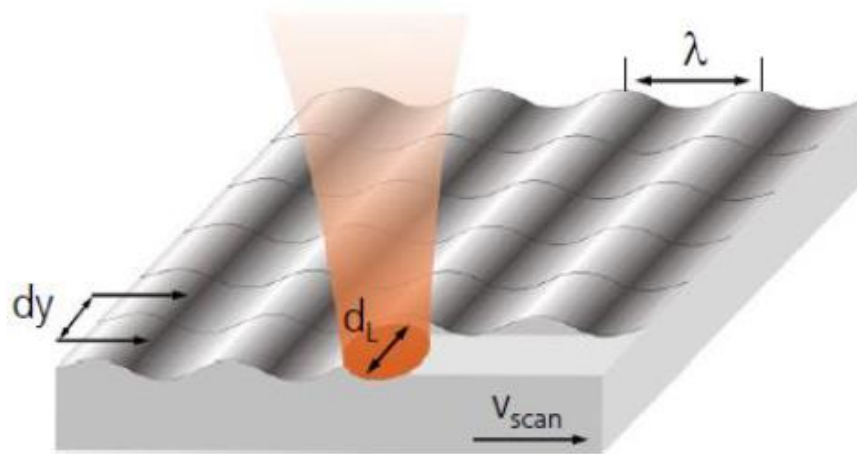


Figura 21 Esquema del proceso

Así, los parámetros más relevantes son la media de la potencia láser, la amplitud de la potencia del láser, la longitud de onda de la modelación, la velocidad de avance y el tamaño del diámetro del haz de láser. Por lo tanto, el proceso puede ser conducido y automatizado por medio de software, que resulta importante para los propósitos de las industrias. [5]

LASER ENGRAVING

El láser engraving puede traducirse como tallado láser, y está más orientado al micro mecanizado puesto que esta técnica busca lograr profundidad a la vez que generar una superficie final diferente a la inicial, es decir, se pretende arrancar cierta cantidad de material, dependiente de las características deseadas.

El láser *engraving* es un proceso en el que un haz láser incide sobre una superficie que, absorbe cierta cantidad de radiación. Este proceso también se conoce como mecanizado láser, del inglés, *laser machining*, que consiste en arrancar material utilizando un haz láser.

Este haz láser ha de moverse de acuerdo con la geometría que se desee mecanizar, y la energía que absorberá el material dependerá de la potencia del láser, de la velocidad de escaneo y del solape entre pasadas del láser. De esta manera, cuando el material reciba cierto nivel de energía, se vaporizará dejando un cráter. Así se conseguirá una profundidad y un acabado superficial determinado [10].

Para conocer la influencia de estos tres parámetros determinantes en el laser engraving, Kasman se llevaron a cabo ensayos donde se variaron de forma lineal dichos parámetros. En estos estudios se utilizó una aleación de acero con vanadio conocida como Vanadis 10. [11]

Se utilizaron los valores expuestos en la Tabla 1:

PARÁMETRO	VALOR		
Potencia (W)	25	37,5	50
Velocidad de escaneo (mm/s²)	200	500	800
Frecuencia de pulso (kHz)	20	30	40

Tabla 1 Experimentación de los principales parámetros de láser engraving

La optimización se realiza optimizando el valor del Ra (el menor posible) y el de la profundidad de material arrancado (máximo).

Kasman determina que los parámetros óptimos para la aleación Vanadis 10, son las siguientes para su láser de Yb:YAG de 50W de potencia media de salida máxima:

PARÁMETROS	Ra	D (PROFUNDIDAD DEL ARRANCADO)
Velocidad de escaneo (mm/s ²)	800	200
Frecuencia de pulso (kHz)	30	30
Potencia media (W)	25	50

Tabla 2 Variación de los parámetros óptimos

De cara un resultado óptimo, es necesario que el láser se encuentre en posición perpendicular a la superficie que vaya a ser procesada con el fin de aprovechar toda la energía proveniente de este maximizando la absorción. Para ello, es necesario la implementación de los 5 ejes en el movimiento cinético para poder alcanzar cualquier orientación en el espacio. [11]

Para poder evitar estos problemas, Diaci *et al* desarrollan un método para poder realizar marcados en superficies complejas. Para ello utilizan la técnica de la triangulación láser que consiste en irradiar la superficie en cuestión con un haz de menor potencia para poder recrear la superficie de manera previa al marcado y poder así eludir las dificultades anteriormente descritas. [12]

2. METODOLOGÍA

2.1 DESCRIPCIÓN DE TAREAS

Como se ha comentado en los párrafos anteriores, el objetivo principal es la optimización y caracterización de los parámetros del proceso de pulido láser, para lo cual se ha subdivido en objetivos específicos. Para el cumplimiento de dichos objetivos, se ha desarrollado una metodología acorde, que cubra los objetivos mencionados.

Dicha metodología es la que se presenta a continuación:

- T1: Revisión bibliográfica. En este apartado se recopila información acerca de las disciplinas a estudiar, así como los avances más significativos hasta la fecha en cada campo.
- T2: Estudio experimental del proceso de láser engraving. En esta tarea se realizaron ensayos experimentales con el fin de lograr superficies controladas de Inconel 718 con cierta rugosidad.
- T3: Ensayos experimentales del proceso de pulido láser. Se desarrollaron dichos ensayos para obtener los parámetros de pulido que redujeran la rugosidad superficial inicial hasta en un 90 %.
- T4: Optimización de los parámetros de pulido láser. En esta tarea se analizó la influencia.
- T5: Obtención de superficies funcionales. Se estudió la influencia del tamaño y la geometría del área de trabajo.

La metodología que se expone en los párrafos anteriores es la que ha permitido el desarrollo por completo del estudio ya que la obtención de los resultados en cada uno de los apartados o tareas es crítica para determinar las conclusiones o los parámetros del proceso de pulido láser.

Se añade un diagrama de Gantt en la Tabla 3:

Tabla 3 Diagrama de Gantt

TAREAS	ENERO				FEBRERO				MARZO				ABRIL			
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16
T1: Revisión bibliográfica	■	■	■	■	■											
T2: Estudio experimental del proceso de láser engraving						■	■	■								
T3: Ensayos experimentales del proceso de pulido láser.									■	■	■	■	■	■	■	■
T4: Optimización de los parámetros de pulido láser																
T5: Obtención de superficies funcionales																

Tabla 4 Diagrama de Gantt

TAREAS	MAYO				JUNIO				JULIO				
T1: Revisión bibliográfica													
T2: Estudio experimental del proceso de láser engraving													
T3: Ensayos experimentales del proceso de	■	■											

pulido láser.												
T4: Optimización de los parámetros de pulido láser												
T5: Obtención de superficies funcionales												

2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS

En cuanto a los equipos utilizados para el estudio experimental, el principal equipo usado es una célula de marcado Trumark 5000. Esta máquina dispone de un láser de fibra de Trumpf de 50 W que puede trabajar con pulsos de ns y es capaz de pulir, texturizar y arrancar material (engraving). Por otro lado, otro equipo imprescindible para este proyecto ha sido el microscopio confocal Leica DCM 3D, con el que se ha hecho las topografías y la toma de todas las medidas de las pruebas realizadas.

A continuación, se exponen los equipos utilizados con sus características técnicas:

CARACTERÍSTICAS DE LA ESTACIÓN TRUMARK 5000



Figura 22 Estación de marcado trumark 5000

PARÁMETROS DEL HAZ LÁSER	VALORES
CALIDAD DEL HAZ	$\leq 1,6$
LONGITUD DE ONDA	1062 nm \pm 3 nm
FRECUENCIA DE REPETICIÓN DE IMPULSOS	Onda continua, onda continúa modulada 1kHz-1000 kHz
DIÁMETRO MÍNIMO DEL FOCO	36 μ m a distancia focal de 100 mm
MANO MÁXIMA DEL SISTEMA DE ENFOQUE	\pm 60 mm a distancia focal de 420 mm
TAMAÑO MÁXIMO DEL CAMPO DE CARACTERES	290 mm x 290 mm a distancia foca, de 420 mm
FORMA CONSTRUCTIVA	VALORES
DIMENSIONES DEL CABEZAL LÁSER	414 mm x 131 mm x 147 mm
DIMENSIONES DEL APARATO DE ALIMENTACIÓN	445 mm x 550 mm x 420 mm
MONTAJE	VALORES
TIPO DE PROTECCIÓN	IP54
TEMPERATURA AMBIENTE	15 °C-40°C

Tabla 5 Características del cabezal de la estación de marcado Trumark 5050



Figura 23 Cabezal de Trumark 5000

DIMENSIONES MÁXIMAS DE LA PIEZA	680 mm x 500 mm x 700 mm
RECORRIDO DEL EJE X	300 mm
RECORRIDO DEL EJE Y	300 mm
RECORRIDO DEL EJE Z	500 mm
AVANCE EJE X	6 m/min
AVANCE DEL EJE Y	6m/min
AVANCE DEL EJE Z	1,5 m/min
DIMENSIONES DE LA ESTACIÓN	860mm x 2000mm x 1310mm

Tabla 6 Características de la estación de marcado Trumark 5050



Figura 24 Láser Trumark 5000

CARACTERÍSTICAS DEL MICROSCOPIO LEICA DCM 3D



Figura 25 Leica DCM 3D

MODELO	LEICA DCM 3D
AUMENTOS	Hasta x150
RESOLUCIÓN VERTICAL	Operando en x150, hasta <2nm
NÚMERO DE LUCES	Luz blanca y azul
PRINCIPIO DE MEDICIÓN	Confocal o interferometría

Tabla 7 Características técnicas de Leica DCM 3D

2.3 MATERIAL A ESTUDIAR: ALEACIÓN TERMORESISTENTE INCONEL 718

El término superaleación se usa para nombrar a un grupo de nuevas aleaciones (base níquel, base hierro-níquel y base cobalto). Este tipo de aleaciones son empleadas en turbocompresores y en las turbinas de motores de avión, ya que, a altas temperaturas por encima de los 700 °C presentan prestaciones como alta resistencia mecánica, a la fatiga y a la corrosión, además de estabilidad de las fases.

Estas superaleaciones presentan grandes ventajas frente a otras aleaciones utilizadas puesto que, aceros y aleaciones de titanio, no pueden trabajar en rangos de temperaturas tan altos y, por otro lado, el acero sufre una corrosión mucho más acelerada.

El campo de aplicación de estos materiales se ha extendido en la actualidad, siendo normal su uso en partes sometidas a grandes esfuerzos a altas temperaturas como: turbinas de gas, motores de cohetes, plantas químicas y de petróleo, reactores nucleares...

La eficiencia de motores o de turbinas es directamente proporcional a la temperatura máxima que puede llegar a alcanzar dichas máquinas. Por lo tanto, el desarrollo de estas superaleaciones ha mejorado la eficiencia de las mismas puesto que son capaces de soportar temperaturas mucho más altas que cualquier otro material como se describe en los párrafos anteriores. En la Figura 25 se puede observar el desarrollo a lo largo de la historia de dichas superaleaciones.

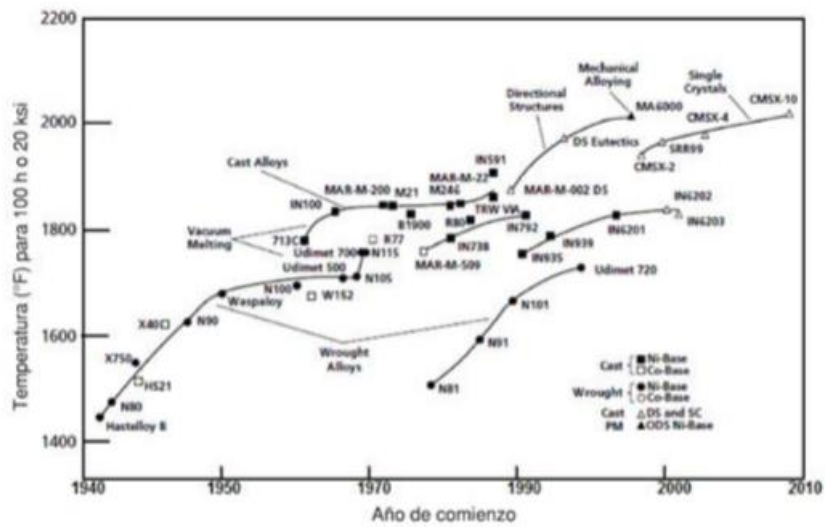


Figura 26 Evolución de la temperatura máxima que han llegado a alcanzar las superaleaciones

Esta aleación fue creada en 1959 por la compañía Internacional Nickel (INCO) en sus laboratorios de Suffern (New York) y de Huntington (West Virginia). La novedad que presentaba esta superaleación frente a las conocidas hasta ese momento era la inclusión de niobio como elemento endurecedor a elevadas temperaturas. Se trata de una superaleación termo-resistente utilizada principalmente en puntos calientes de diversos ámbitos de la industria como el de la propulsión. (tesis). Además de presentar unas excelentes prestaciones ante la corrosión, oxidación, buena maleabilidad y propiedades de deformación por fluencia lenta y soldadura excelentes. [13]

El Inconel 718 es la superaleación base níquel cuyo uso se ha extendido más rápidamente, suponiendo en la actualidad el 35% de la producción de este tipo de superaleaciones. La combinación de níquel y cromo otorga a estas aleaciones resistencia a la corrosión tanto en soluciones reductoras como oxidantes.

2.4 EXTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO ENGRAVING Y POLISHING

Por medio de este estudio experimental se pretende encontrar variables de pulido láser, con el fin de obtener acabados superficiales tipo espejo, utilizando la estación de marcado Trumark 5050 y de este modo demostrar, además, que máquinas más económicas son capaces de dar resultados de pulido de alta calidad

2.4.1 BÚSQUEDA DEL DIÁMETRO DEL SPOT

Un parámetro que presenta una cierta influencia en el acabado superficial es el índice de solape. Por ello, se introdujo el experimento con la búsqueda del tamaño del diámetro del *spot* del haz de láser puesto que, al conocer dicha distancia, se podría variar, en los siguientes estudios, la distancia entre líneas. Primero, es necesario conocer que el diámetro del *spot* aumenta a medida que el desenfoque del láser también lo hace. Por otro lado, el diámetro del *spot* debe de ser $50\ \mu\text{m}$ teóricamente, cuando el desenfoque es 0 milímetros, por lo que inicialmente en el estudio se ha variado los parámetros del láser hasta encontrar dicha medida, para después ver de qué manera varía el diámetro, al aumentar el desenfoque.

Es importante añadir que en el estudio realizado se ha trabajado en modo pulsado, en vez de modo continuo. Esto implica que el láser acumula una cantidad determinada de energía para después soltarla. Así se concentra una cantidad de energía por unidad de volumen en un punto en concreto. El principal parámetro de proceso es el denominado densidad de energía y es la energía por unidad de área empleado (J/cm^2).

Otro de los factores a tener en cuenta es el material utilizado para realizar las pruebas. De cara a evitar efectos derivados de la fusión de material, para medir el diámetro del spot láser, los primeros experimentos se realizaron en un recuadro de papel con tinta negra impresa. En este ensayo el objetivo es que el láser pudiera marcar el papel con facilidad, sin llegar a traspasarlo, con puntos lo suficientemente separados para después poder realizar las mediciones del diámetro real.

El fin de la tinta negra es captar toda la energía del láser y poder diferenciar la marca que éste hace sobre el recuadro.

En este primero ensayo se sacaron como conclusiones que el papel no era el material adecuado para realizar estas pruebas puesto que o bien la tinta se esparcía por el calor aportado por el láser, dejando pequeñas manchas en vez de círculos; o el diámetro que describía era demasiado pequeño en comparación al valor que se perseguía. Esto último es consecuencia de una potencia demasiado pequeña.

A continuación, se expone dos tablas resumen de las pruebas realizadas sobre papel tintado:

Papel				
Fila 1				
Pulse duration	250	460	250	460
Frecuencia	57843 (mínima)	57843 (mínima)	57843 (mínima)	57843 (mínima)
Power	100%	100%	1%	1%
Velocity	12000 (máx)	12000 (máx)	12000 (máx)	12000 (máx)
Defocusing	0.00 mm	0.00 mm	0.00 mm	0.00 mm
Resultado	No son círculos, deformaciones	No son círculos, deformaciones	10 μ mm	12 μ mm

Tabla 8 Parámetros y resultados de los ensayos con papel

Papel		
Fila 1		
Pulse duration	250	460
Frecuencia	57843 (mínima)	57843 (mínima)
Power	1%	1%
Velocity	5000 (mitad)	5000 (mitad)
Defocusing	0.00 mm	0.00 mm
Resultado	12 μ m	12 μ m

Tabla 9 Parámetros y resultados de los ensayos con papel

Fila 2		
Pulse duration:	7	7
Frecuencia:	100.000 Hz (máx)	100.000 Hz (máx)
Power:	1%	100%
Velocity:	12000 (máx)	12000 (máx)
Defocusing	0.00 mm	0.00 mm
Resultado:	No levanta la pintura	13 μ m

Tabla 10 Parámetros y resultados de los ensayos con papel

Las pruebas siguientes se realizaron con Inconel 718 puesto que este material iba a ser el usado para las posteriores pruebas de pulido. La conclusión final de estos ensayos fue que dicho material tampoco era el adecuado para esta búsqueda puesto que las mediciones daban como resultados círculos con diámetros muy pequeños y difíciles de medir.

Se expone una tabla resumen con las pruebas realizadas:

Inconel			
Pulse Duration	Frecuencia	Velocidad	Power
7	1.000.000 HZ (máx)	Mínima	1%
7	1.000.000 HZ (máx)	Mínima	100%
250	1.000.000 HZ (máx)	Mínima	100%
250	1.000.000 HZ (máx)	Mínima	100%
250	1.000.000 HZ (máx)	Mínima	1%
250	1.000.000 HZ (máx)	Mínima	1%
250	1.000.000 HZ (máx)	12.000 (Máx)	100%
250	1000000 Hz (Máx)	12.000 (Máx)	100%
250	1000000 Hz (Máx)	12.000 (Máx)	1%
250	1000000 Hz (Máx)	12.000 (Máx)	1%
250	5700 Hz	Mín	100%
250	5700 HZ	Mín	100%
250	5700 Hz	Mín	1%
250	5700 HZ	Mín	1%
250	5700 HZ	5,000	100%
250	5700 HZ	5,000	100%
250	5700 HZ	5,000	1%
250	5700 HZ	5,000	1%
250	5700 HZ	12.000 (Máx)	1%
250	5700 HZ	12.000 (Máx)	1%

Tabla 11 Parámetros y resultados de los ensayos con Inconel

Por último, se utilizaron piezas de aluminio que se tintaron con grafito (negro) para crear el mismo efecto del papel y toda la energía del láser se concentrase sobre la superficie y se pudieran diferenciar los círculos cuando el haz láser los marcara en el aluminio. En este caso, los resultados fueron favorables. Como se dijo en la introducción, se buscaba un diámetro de *spot* de 50 μm teóricamente, y en estos ensayos se lograron conseguir diámetros de 60 μm aproximadamente. Por lo que, una

vez encontrados los parámetros que diesen este resultado, se hicieron tres (3) puntos por cada milímetro de desenfoque, para realizar luego, una media de las tres mediciones.

Los parámetros fijos utilizados para conseguir los valores representados en el gráfico son:

Duración de pulso: 250 μ s

Frecuencia: 1.000.000 Hz (valor máximo)

Velocidad: 12.000 mm/s (valor máximo)

Potencia: 10 %

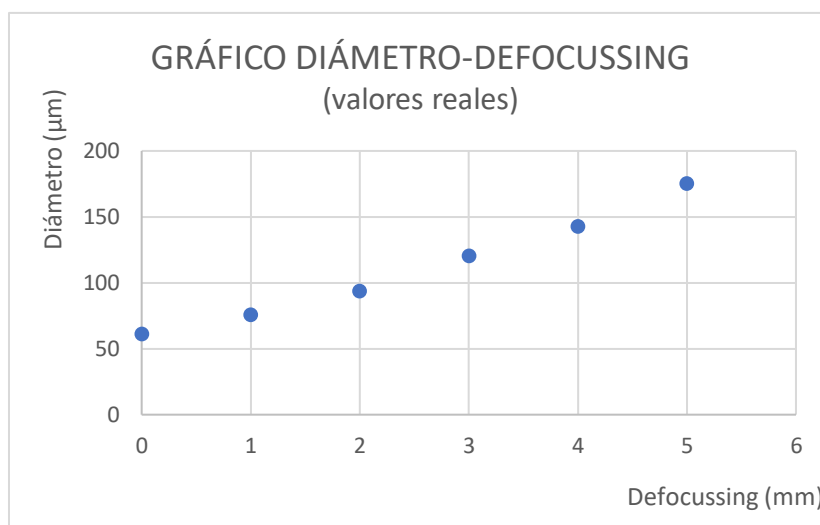


Figura 27 Gráfico diámetro-desenfoque

Como muestra la Figura 28, se ha realizado un barrido desde el valor 0 milímetros de desenfoque hasta 5 milímetros. Para ver como varia el diámetro a medida que aumenta el eje Z (desenfoque).

Como conclusión, se observa un crecimiento lineal del diámetro desde 61 μm hasta 175,33 μm .

Aun así, el diámetro del *spot* cuando el desenfoque es 0 milímetros no es exactamente de 50 μm , por lo que se ha realizado otra gráfica donde mediante una regla de 3 se han sacado los valores entorno a las 50 μm .

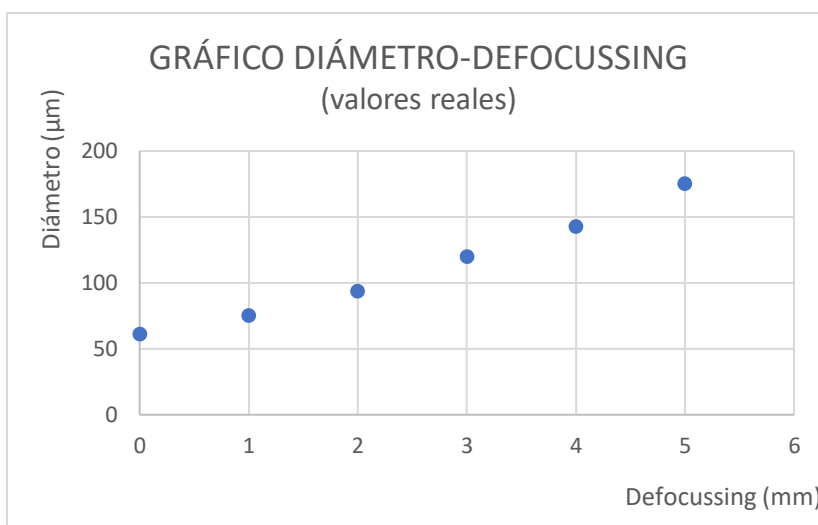


Figura 28 Gráfico diámetro-desenfoque en comparación al parámetro teórico

A continuación, se exponen las tablas correspondientes, donde se puede encontrar la relación entre el desenfoque y el diámetro del *spot* del haz láser y que, además, son las medidas que más tarde, se utilizan para los ensayos de pulido:

Valores comunes	
Duración de pulso	250 μs
Frecuencia	1.000.000 Hz
Velocidad	12.000 mm/s
Potencia	10%

Tabla 12 Valores definitivos para introducir en la máquina

Desenfoque 0 mm		
Punto 1: 60 μm	Punto 2: 55 μm	Punto 3: 69 μm
MEDIA: 61,33 μm		

Tabla 13 Resultados del diámetro de spot a 0 mm de desenfoque

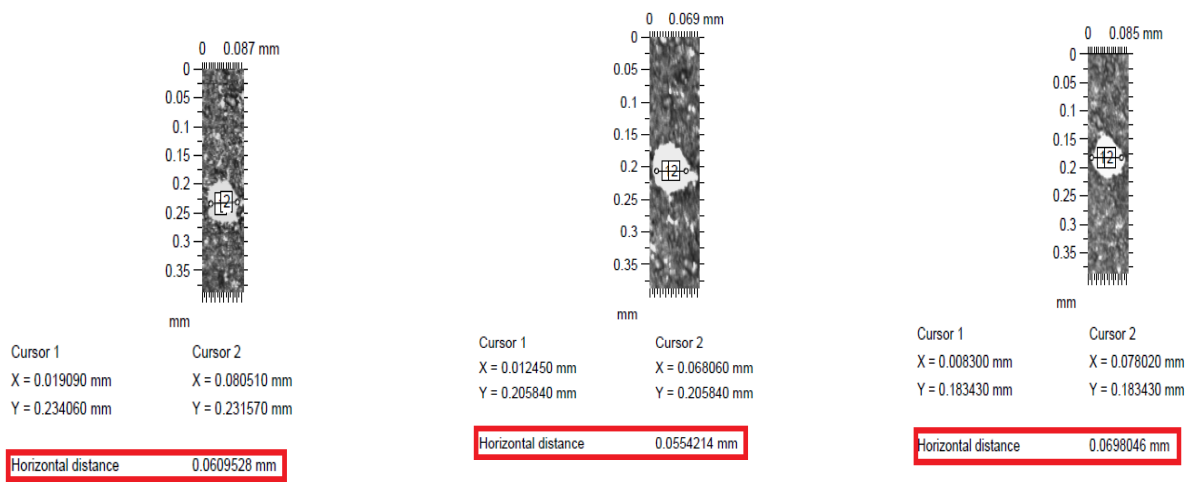


Figura 29 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 0 mm

Desenfoque 1 mm		
Punto 1: 77 μm	Punto 2: 68 μm	Punto 3: 82 μm
MEDIA: 75,66 μm		

Tabla 14 Resultados del diámetro de spot a 1 mm de desenfoque

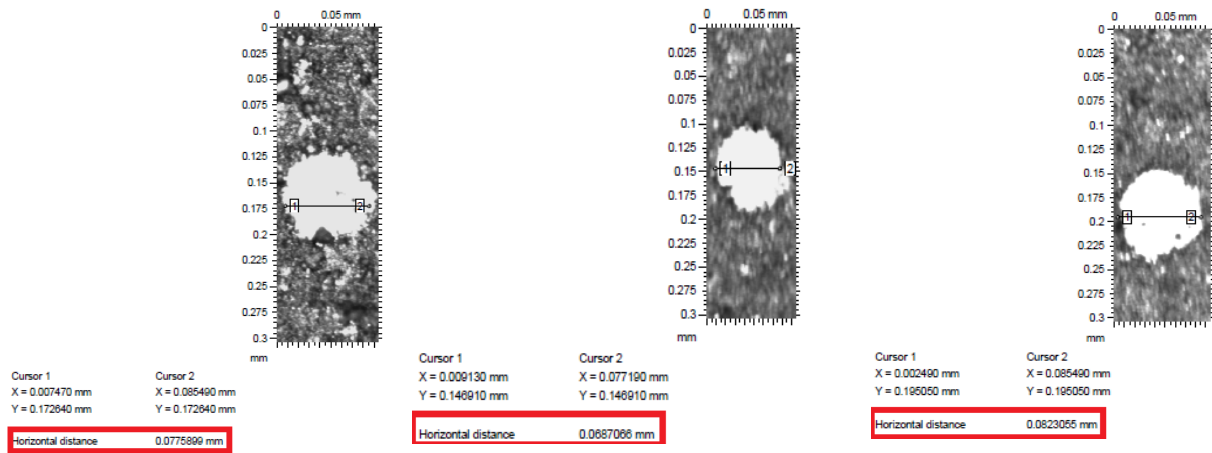


Figura 30 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 1 mm

Desenfoque 2 mm		
Punto 1: 91 μ m	Punto 2: 101 μ m	Punto 3: 90 μ m
MEDIA: 94 μm		

Tabla 15 Resultados del diámetro de spot a 2 mm de desenfoque

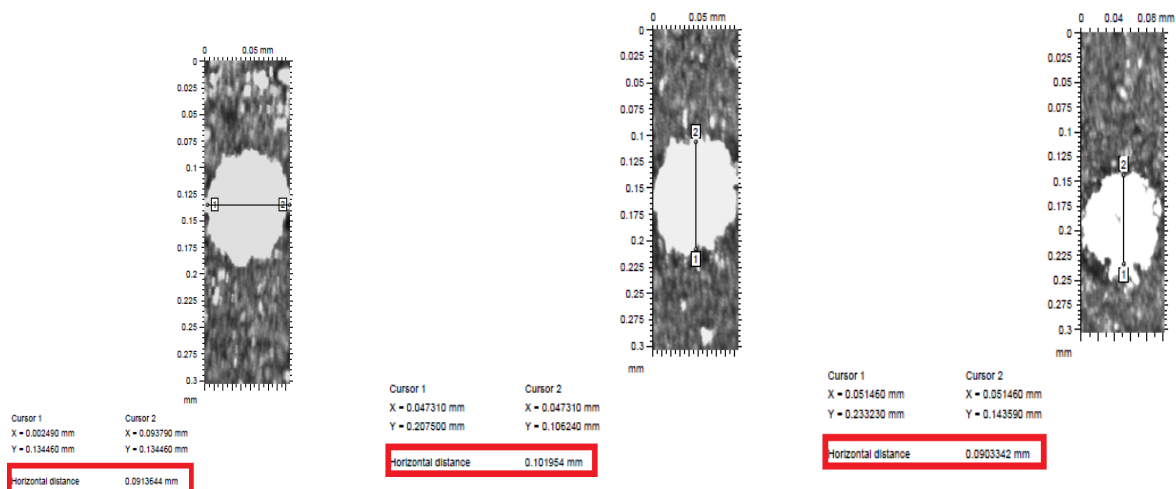


Figura 31 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 2 mm

Desenfoque 3 mm		
Punto 1: 119 μm	Punto 2: 122 μm	Punto 3: 120 μm
MEDIA: 120,33 μm		

Tabla 16 Resultados del diámetro de spot a 3 mm de desenfoque

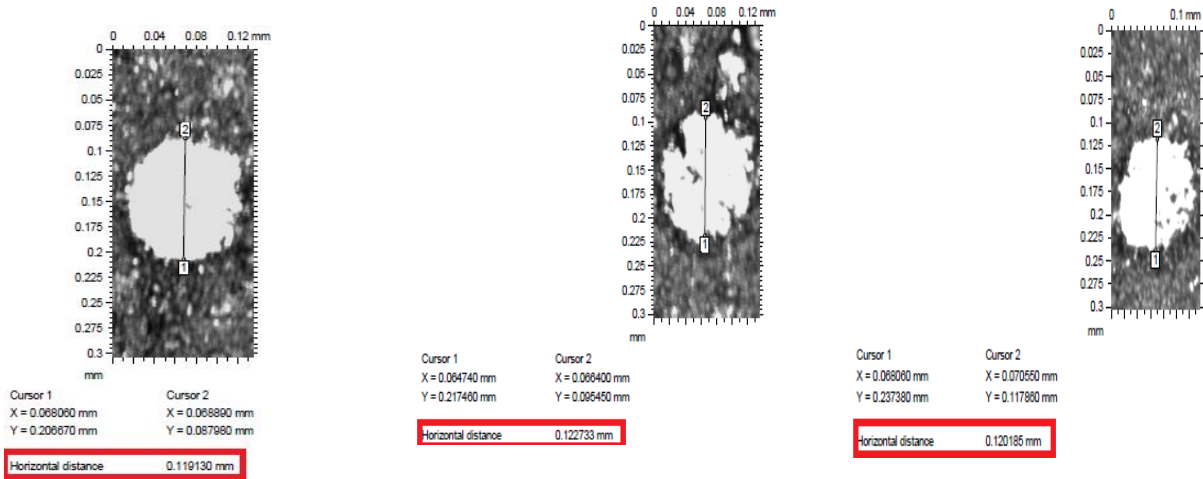


Figura 32 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 3 mm

Desenfoque 4 mm		
Punto 1: 139 μm	Punto 2:	Punto 3: 147 μm
MEDIA: 143 μm		

Tabla 17 Resultados del diámetro de spot a 4 mm de desenfoque

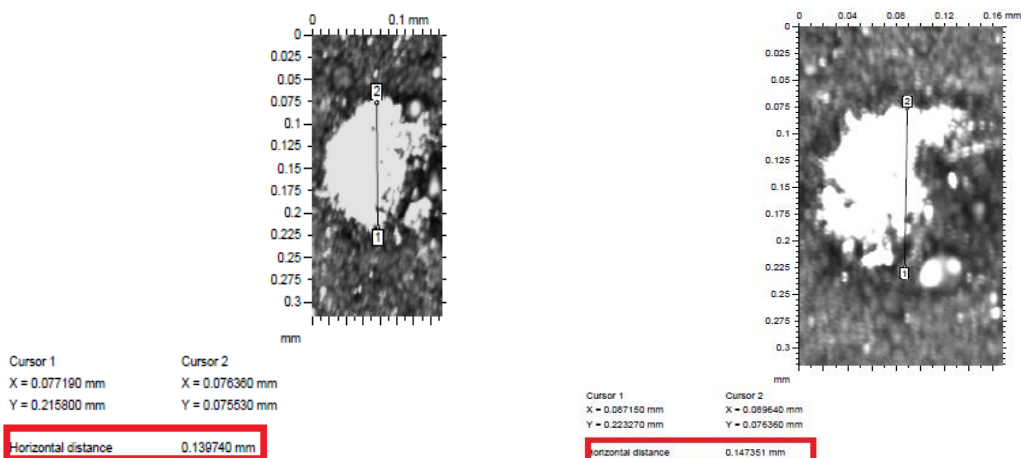


Figura 33 Resultados de las mediciones de los tres puntos con un desenfoque de 4 mm

Desenfoque 5 mm		
Punto 1: 178 μm	Punto 2: 173 μm	Punto 3: 175 μm
MEDIA: 175,33 μm		

Tabla 18 Resultados del diámetro de spot a 5 mm de desenfoque

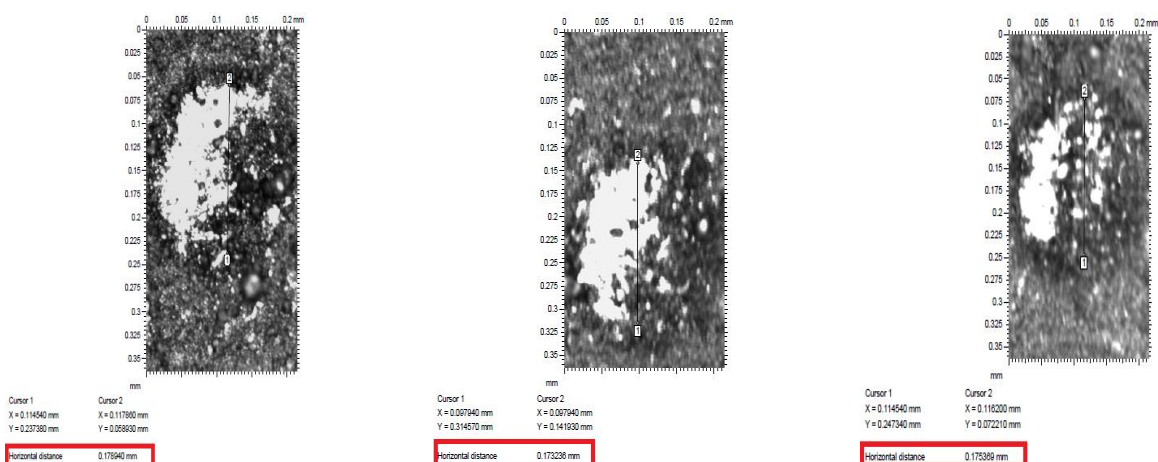


Figura 34 Medición de los tres puntos con un desenfoque de 5 mm

Según el método de mínimos cuadrados, se ha concluido la siguiente función parabólica con el fin de dibujar una curva que represente los diferentes diámetros:

$$D(x) = p_1x^2 + p_2x + p_1 \quad (22)$$

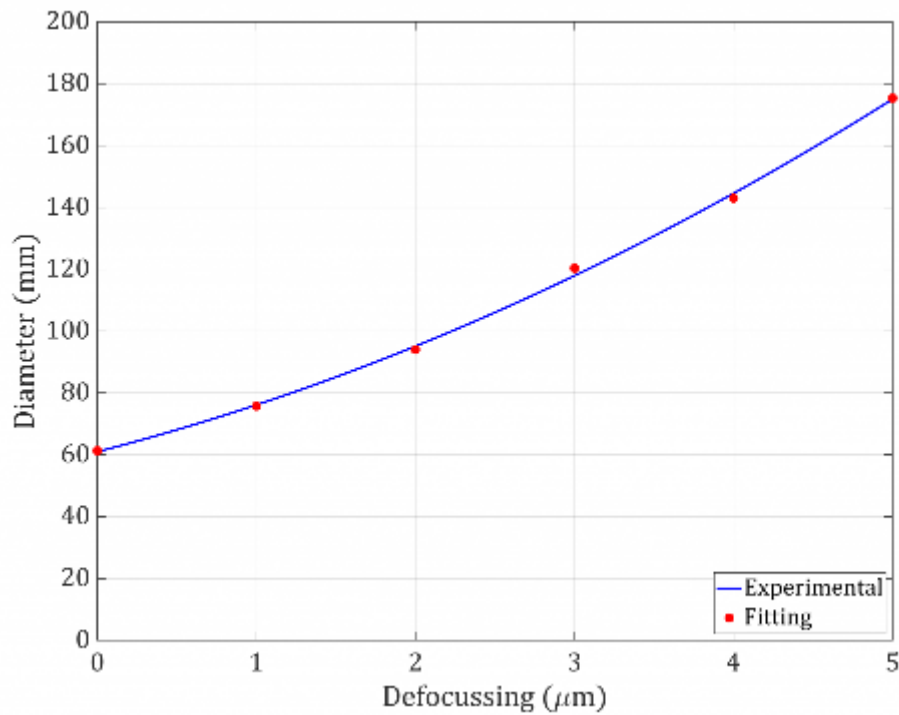


Figura 35 Curva creciente del diámetro-desenfoque

2.4.2 ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE ENGRAVING Y PULIDO LÁSER

El principal objetivo de estos ensayos de pulido es la caracterización y optimización de las variables del proceso de pulido, encontrando los parámetros exactos que dieran como resultado superficies con una rugosidad máxima de $0,5 \mu m$ partiendo de superficies con una rugosidad entorno a $20 \mu m$.

Para poder conocer los valores de rugosidad, se analiza la superficie pulida mediante la evaluación de los parámetros R_a , R_z y R_q , buscando así obtener una información más representativa de la topografía. También se añadirá el parámetro de área S_a , con el fin de dar una visión general de la topografía en el área de medida. Estos cuatro parámetros se calcularán siguiendo las siguientes ecuaciones, expuestas en la Norma ASME B 45-1-2002:

$$R_a = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |Z_i| \quad (22)$$

donde:

N = al número de puntos que se miden

Z = a la altura de

$$S_a = \frac{1}{NM} \sum_{K=1}^M \sum_{j=1}^N |Z_{jk}| \quad (23)$$

En todo proceso en el que el láser esté involucrado, el material que se trate toma cierta importancia, puesto que debido a sus propiedades físicas podrá absorber más o menos energía del haz incidente. Del mismo modo, el estado inicial de la superficie en la que incidirá el láser también juega un papel importante, ya que, en una superficie con acabado a espejo, parte de la energía es reflejada y no es absorbida. La superficie que ensayar ha sido previamente rectificada y posteriormente limpiada con alcohol. Estos pasos previos son debidos al alto nivel de óxido existente en la pieza. De no haber sido eliminado, la energía del láser hubiese sido absorbida por esta capa de óxido, variando el grado de absorción entre ensayos. Al rectificar las probetas se consigue uniformidad de superficie y eliminar dicha variable.

El material que en este caso se ha utilizado para la realización de los ensayos es Inconel 718. Este material, como ya se ha explicado, es termo-resistente a la corrosión y oxidación.

Para estas pruebas se ha utilizado la estación de marcado láser Trucell 5000 que cuenta con un láser pulsado TruMark 5050 de 50W de potencia media de salida y capaz de generar pulsos de nanosegundos para obtener potencias de salida de hasta 10kW por pulso. Esta estación de marcado permite una tasa de arranque de material significativo debido a puede alcanzar frecuencia de pulsos muy altas. Por otra parte, es la fuente láser es compacta y, con un mantenimiento mínimo. Por último, y más importante, esta máquina, en comparación con otros láseres de pulso ultracorto que pueden realizar las mismas acciones, resulta más económica. Si bien los láser de pulso ultracorto son capaces de proporcionar mayores densidades de energía que minimizan la zona afectada térmicamente, el precio de estos es varios órdenes de magnitud mayor. Así, otro de los objetivos de estos ensayos, es demostrar que con máquinas más económicas también se pueden alcanzar resultados de pulido con rugosidades por debajo de $0,5 \mu m$.

Los parámetros principales de la estación de marcado que se han ensayado, son los siguientes:

- a) **Desenfoque:** su unidad de medida son los milímetros. Puede abarcar valores tanto negativos como positivos, pero en este caso, se varía desde 0 hasta 5,5 mm. El desenfoque nos permite concentrar mayor o menor densidad de energía en área, y además es proporcional al diámetro del *spot*.
- b) **Índice de solape:** está representado en tanto por ciento. Realmente, este no es un parámetro de la máquina, pero se incluye en este apartado por que determina junto al diámetro del *spot*, una variable que sí está incluida en la estación: distancia entre líneas. En los ensayos, se varía entre valores del 25% hasta 85%.
- c) **Distancia entre líneas:** su unidad de medida es μm . Como se ha mencionado en los párrafos anteriores, es proporcional al índice de solape, al diámetro del *spot* y, por tanto, también al desenfoque.

Se puede observar en la Tabla () los valores del desenfoque, los índices de solape, los de los diámetros del *spot* y de la distancia entre líneas que se ha utilizado para las pruebas:

Tabla 19 Valores de las distancia entre líneas dependiendo del diámetro y del índice de solape

Desenfoque (mm)	Diámetro (μm)	Distancia entre líneas (μm), solape 25%	Distancia entre líneas, (μm), solape 75%	Distancia entre líneas, (μm), solape 85%
0	61,33	54	15	9
1	75,76	66	19	11
2	94	82	24	14
3	120	105	30	18
3,25	124	109	31	19
3,5	131	114	33	20
3,75	138	120	34	21
4	143	125	36	21
4,5	159	139	40	24
5	175	153	44	26
5,5	192	168	48	29

- d) **Potencia:** se pide en % ya que lo que se pretende variar es el porcentaje de potencia que va a soltar el láser según la potencia que él mismo tiene. En este caso experimental, se mantendrá siempre en el 100 % de la potencia que el láser puede emitir.
- e) **Velocidad:** la unidad de medida es mm/s. Se trata de la velocidad con la que el láser realiza el marcado que se le ha propuesto. En las pruebas se varía la velocidad desde valores de 50 mm/s hasta 500 mm/s.
- f) **Frecuencia y Duración de pulso:** el primero de estos dos parámetros se mide en Hz y el segundo en ns. Son proporcionales el uno al otro. En este caso se mantienen constantes los dos parámetros en los valores de 180.000 Hz y 460 ns, respectivamente.
- g) **Número de pasadas:** por defecto, el programa realiza una sola vez el programa que se genera. Si tu opción es realizar dicho programa repetitivamente, la opción de “número de pasadas”, te lo permite.
- h) **Ángulo de giro y ángulo de inicio:** con el fin de conocer la dirección de las líneas marcadas por el láser, el programa propone la elección de los ángulos de inicio y de giro. El primero de estos, lo mantendremos en 0º durante todos los procesos para que las líneas en un primer instante permanezcan en orientación vertical y se varía el segundo de estos. La razón de esto es que, al realizar el marcado más de una vez por ensayo (número de pasadas > 1) se pueda elegir el inicio de la siguiente pasada. Se ha ido modificando este parámetro hasta dejarlo definido en 17º puesto que este es el ángulo en el que no se llegan a solapar una pasada con otra, es decir, cuando finaliza una pasada, comienza la siguiente.

PROCESO DE *ENGRAVING*

Como se ha comentado en los párrafos anteriores, el de vital importancia la superficie inicial de la pieza donde se realizarán las pruebas. Por ello, después de realizar el rectificado, se procedió a realizar *engraving* de dicha superficie con el fin de generar una superficie rugosa. Esta superficie se creó de forma controlada, con los siguientes parámetros de *engraving*:

- Desenfoque: 0 mm.
- Potencia: 100 %.
- Velocidad: 800 mm/s.
- Frecuencia: 372 kHz.
- Duración de pulso: 20 ns.
- Número de pasadas: 5.

Para la primera superficie que se creó, se realizó el programa 5 veces sobre la misma superficie, es decir, el programa de *engraving* con los parámetros arriba descritos se repitió 100 veces sobre la superficie a tratar posteriormente con pulido láser. El resultado de la rugosidad R_a dio como resultado $18 \mu m$. Es una rugosidad muy elevada para llegar al fin propuesto en un primer momento de llegar a rugosidades por debajo de los $0,5 \mu m$. Por lo tanto, para la segunda superficie, se hicieron 3 veces el programa, lo que en total son 60 pasadas sobre la superficie.

A continuación, se exponen las topografías de ambas superficies:

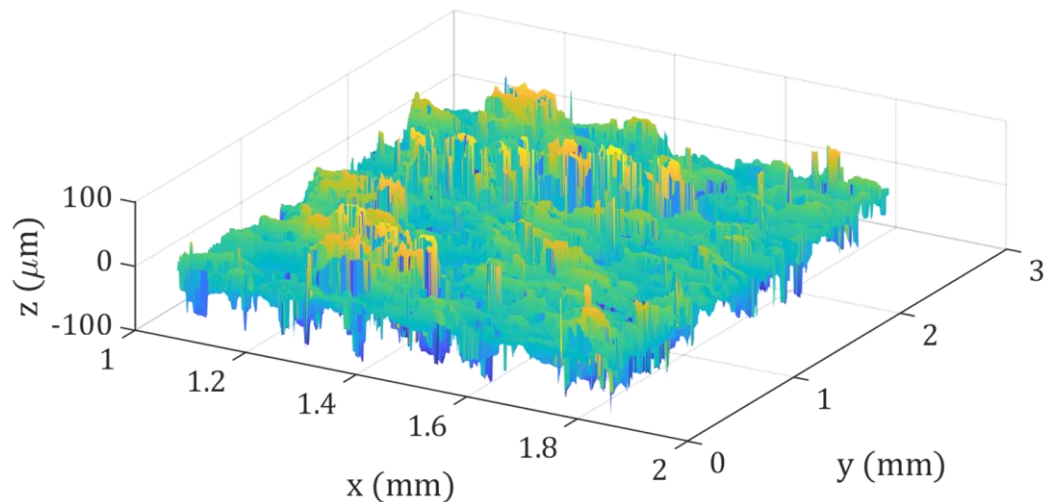


Figura 36 Topografía de la superficie inicial

PROCESO DE PULIDO LÁSER

Una vez generada dicha superficie rugosa, se procede a realizar todas las pruebas de pulido láser. Estas dieron comienzo con el estudio de la influencia de la velocidad, el número de pasadas y el desenfoco, para después con la guía de los mejores resultados (porcentaje de mejora más alto), realizar más pruebas cambiando los parámetros más determinantes. Hasta alcanzar, por último, valores de rugosidad por debajo de $0,5 \mu m$. Con estos últimos resultados, se han realizado también pruebas geométricas y de tamaño.

Estudio de la influencia de la velocidad, el número de pasadas y el desenfoque.

En este primer estudio de los parámetros del pulido láser, se pusieron valores aleatorios con el fin de observar que influencia tenían cada uno de ellos sobre la superficie y que resultados se obtenían variando ciertos parámetros.

Esta primera prueba se denomina Matriz 1 y se divide en las filas A, B, C, D y E. En cada fila se han mantenido constantes dos parámetros de los tres que se estudian en este primer ensayo y se varía tan solo uno. Todas las pruebas se han realizado con un índice de solape entre líneas del 25%.

FILA A:

Tabla 20 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (20) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila A.

En esta primera fila se han realizado nueve pruebas, de las cuales todas tienen 5 pasadas. Por otro lado, tres de ellas están hechas con una velocidad de 100 mm/s, otras tres con una velocidad de 300 mm/s y las últimas tres con una velocidad de 500 mm/s. Por lo tanto, y siguiendo lo mencionado anteriormente donde se dice que tan solo se varía un parámetro manteniendo los otros dos constantes, en este caso se ha variado el desenfoque con valores de 3, 4 y 5 mm. Todos estos valores están basados en estudios anteriores, donde se puede observar ciertas tendencias o mejoras al utilizar parámetros concretos.

Se puede observar a continuación, una tabla resumen de estas pruebas (Tabla (21)) y la Figura (37) que muestra las pruebas sobre la superficie de Inconel.

Tabla 21 Resumen de los resultados obtenidos

Fila A				
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	Marcador
5	100	3	5,81	A1
		4	4,76	A2
		5	5,12	A3
	300	3	7,64	A4
		4	7,91	A5
		5	8,17	A6
	500	3	11,42	A7
		4	11,92	A8
		5	14,68	A9



Figura 37 Resultados sobre Inconel 718

Como se puede observar en la Tabla (21) la prueba A2 es de la que mejores resultados de rugosidad se obtienen, con una rugosidad Ra igual a 4,76 μm , teniendo así un porcentaje de mejora del 73,56%.

FILA B:

Tabla 22 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (22) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila B.

En esta segunda fila se han realizado nueve pruebas, de las cuales todas tienen 10 pasadas. Por otro lado, tres de ellas están hechas con una velocidad de 100 mm/s, otras tres con una velocidad de 300 mm/s y las últimas tres con una velocidad de 500 mm/s. Por lo tanto, y siguiendo lo mencionado anteriormente donde se dice que tan solo se varía un parámetro manteniendo los otros dos constantes, en este caso se ha variado el desenfoque con valores de 3, 4 y 5 mm. Todos estos valores están basados en estudios anteriores, donde se puede observar ciertas tendencias o mejoras al utilizar parámetros concretos.

Se puede observar a continuación, una tabla resumen de estas pruebas (Tabla (23)) y la Figura (38) que muestra las pruebas sobre la superficie de Inconel.



Figura 38 resultados sobre Inconel 718

Tabla 23 Resumen de los resultados obtenidos

Fila B				
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	Marcador
10	100	3	4,16	B1
		4	4,40	B2
		5	3,96	B3
	300	3	4,83	B4
		4	7,47	B5
		5	6,99	B6
	500	3	8,18	B7
		4	9,57	B8
		5	16,56	B9

En el caso de la Fila B, el mejor resultado obtenido corresponde a la prueba B3. Teniendo así una rugosidad Ra igual a 3,96 μm y un porcentaje de mejora de la rugosidad del 78%.

FILA C:

Tabla 24 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (24) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila C.

En esta tercera fila se han realizado nueve pruebas, de las cuales todas tienen 15 pasadas. Por otro lado, tres de ellas están hechas con una velocidad de 100 mm/s, otras tres con una velocidad de 300 mm/s y las últimas tres con una velocidad de 500 mm/s. Por lo tanto, y siguiendo lo mencionado anteriormente donde se dice que tan solo se varía un parámetro manteniendo los otros dos constantes, en este caso se ha variado el desenfoque con valores de 3, 4 y 5 mm.

Todos estos valores están basados en estudios anteriores, donde se puede observar ciertas tendencias o mejoras al utilizar parámetros concretos.

Se puede observar a continuación, una tabla resumen de estas pruebas (Tabla (25)) y la Figura (39) que muestra las pruebas sobre la superficie de Inconel.

Tabla 25 Resumen de los resultados obtenidos

Fila C				
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	Marcador
15	100	3	3,28	C1
		4	4,10	C2
		5	4,04	C3
	300	3	4,61	C4
		4	5,01	C5
		5	6,02	C6
	500	3	7,38	C7
		4	7,62	C8
		5	16,18	C9



Figura 39 Resultados sobre Inconel 718

Los mejores resultados son los de C1, teniendo en esta ocasión una rugosidad Ra de $3,28 \mu\text{m}$ y un porcentaje de mejora del 81,78%.

En estas tres primeras filas se pudo observar que, a velocidades altas, la rugosidad toma valores altos y que además a mayor número de pasadas, menores valores de rugosidad se obtienen. En estos casos los porcentajes de mejoran están en torno al 50 %. Por lo tanto, se realizaron más pruebas donde en la Fila D se reduce la velocidad a 50 mm/s y se aumentan el número de pasadas a 25.

FILA D:

Tabla 26 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (26) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila D.

En esta fila se han realizado nueve pruebas, de las cuales todas tienen 25 pasadas. Por otro lado, todas ellas están hechas con una velocidad de 50 mm/s, pero tres de estas pruebas se han realizado con un ángulo de giro de 72º, otras tres con un ángulo de 36º y las últimas tres con un ángulo de 24º. Por lo tanto, y siguiendo lo mencionado anteriormente donde se dice que tan solo se varía un parámetro manteniendo los otros dos constantes, en este caso se ha variado el desenfoque con valores de 3, 4 y 5 mm.

Se puede observar a continuación, una tabla resumen de estas pruebas (Tabla (27)) y la Figura (40) que muestra las pruebas sobre la superficie de Inconel.

Tabla 27 Resumen de los resultados obtenidos

Fila D				
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	Marcador
25	50	3	9,35	D1
		4	6,31	D2
		5	12,11	D3
	50	3	6,82	D4
		4	4,98	D5
		5	12,07	D6
	50	3	5,63	D7
		4	7,00	D8
		5	6,91	D9



Figura 40 Resultados en Inconel 718

En este caso, el mejor resultado de rugosidad es el D5 con una rugosidad Ra de 4,98 μm y un porcentaje de mejora del 72,33%.

A velocidades altas los resultados de rugosidad no se acercan a los objetivos propuestos, pero tampoco se acercan dichos resultados a velocidades muy pequeñas, como es el caso de la Fila D. Por lo tanto, en el siguiente ensayo, se aumenta la velocidad y el número de pasadas para observar la influencia de este parámetro sobre la superficie. Por otro lado, el ángulo de giro de esta prueba en adelante se ha mantenido en 17º porque es el ángulo en el que no hay solape entre una pasada y la siguiente.

FILA E:

Tabla 28 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (28) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila E.

En esta fila se han realizado nueve pruebas, de las cuales todas tienen 35 pasadas. Por otro lado, tres de los nueve ensayos se han realizado a una velocidad de 50 mm/s, otras tres a 75 mm/s y las últimas tres a 100 mm/s. Por lo tanto, y siguiendo lo mencionado anteriormente donde se dice que tan solo se varía un parámetro manteniendo los otros dos constantes, en este caso se ha variado el desenfoque con valores de 3, 4 y 5 mm.

Se puede observar a continuación, una tabla resumen de estas pruebas (Tabla (29)) y la Figura (41) que muestra las pruebas sobre la superficie de Inconel.

En esta fila el mejor resultado es E7, con una rugosidad de 3,73 μm y un porcentaje de mejor de 79,28%.

Tabla 29 Resumen de los resultados obtenidos

Fila E				
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	Marcador
36	50	3	10,62	E1
		4	8,22	E2
		5	11,67	E3
	75	3	5,68	E4
		4	7,78	E5
		5	3,88	E6
	100	3	3,73	E7
		4	5,51	E8
		5	4,72	E9



Figura 41 Resultados sobre Inconel 718

En estos primeros ensayos se observa que los mejores resultados de rugosidad se realizan con velocidades entre 75 y 100 mm/s, así en las pruebas siguientes se trabaja con estos dos valores de velocidad. El parámetro de número de pasadas no queda totalmente definido puesto que es complementario tanto del desenfoque como de la velocidad y, por lo tanto, en pruebas posteriores se sigue experimentando con él sin poner un límite concreto. Por último, con respecto al desenfoque se cumple que los mejores resultados se obtienen con desenfoques entre 3 y 4.

La Matriz 2 también está dividida por las filas A, B, C, D y E.

FILA A:

Tabla 30 parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (30) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila A.

Esta fila se ha realizado con un 25 % de índice de solape entre líneas. Existen diez pruebas, todas ellas con 20 pasadas. Cinco de dichas diez pruebas se han hecho con una velocidad de 75 mm/s y las otras cinco a una velocidad de 100 mm/s. El parámetro a variar sigue siendo el desenfoque, que se centra en valores desde 3 hasta 4 siendo los siguientes: 3 /3,25/3,5/3,75 y 4.

A continuación, se expone una tabla resumen de los ensayos (Tabla (31)) y la Figura (42) donde se pueden observar las pruebas sobre la superficie de Inconel 718.

En la Tabla (31) se puede observar todos los resultados de rugosidad obtenidos juntos con el porcentaje de mejora de cada uno de ellos. El mejor resultado, como se puede ver es el A5 con una rugosidad de 2,64 μm y un porcentaje de mejora de 85,33 %.

Tabla 31 Resumen de los resultados obtenidos

Fila A				
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	% mejora
20	75	3	5,05	71,94
		3,25	3,18	82,35
		3,5	2,91	83,83
		3,75	3,09	82,83
		4	2,64	85,33
	100	3	6,04	66,44
		3,25	5,43	69,83
		3,5	2,93	83,72
		3,75	2,20	87,78
		4	2,46	86,33



Figura 42 Resultados sobre Inconel 718

FILA B:

Tabla 32 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (32) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila B.

Esta fila se ha realizado con un 25 % de índice de solape entre líneas. Existen diez pruebas, todas ellas con 25 pasadas. Cinco de dichas diez pruebas se han hecho con una velocidad de 75 mm/s y las otras cinco a una velocidad de 100 mm/s. El parámetro que variar sigue siendo el desenfoque, que se centra en valores desde 3 hasta 4 siendo los siguientes: 3, 3´25,3´5,3´75 y 4.

A continuación, se expone una tabla resumen de los ensayos (Tabla (33)) y la Figura (43) donde se pueden observar las pruebas sobre la superficie de Inconel 718.

En la Tabla (33) se puede observar todos los resultados de rugosidad obtenidos juntos con el porcentaje de mejora de cada uno de ellos. El mejor resultado, como se puede ver es el A5 con una rugosidad de 2,39 μm y un porcentaje de mejora de 86,72%.

Tabla 33 Resumen de los resultados obtenidos

Fila B					
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	% mejora	Marcador
25	75	3	5,22	71,00	B1
		3,25	3,28	81,78	B2
		3,5	3,95	78,06	B3
		3,75	3,39	81,17	B4
		4	3,24	82,00	B5
	100	3	4,82	73,22	B6
		3,25	5,88	67,33	B7
		3,5	2,39	86,72	B8
		3,75	2,88	84,00	B9
		4	2,68	85,11	B10

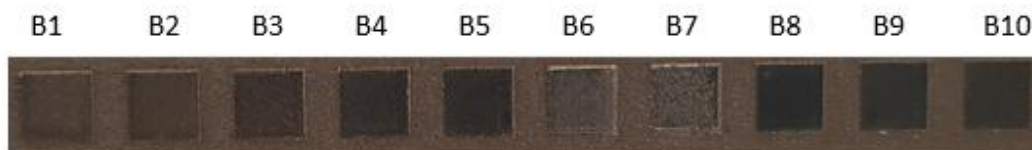


Figura 43 Resultados sobre Inconel 718

FILAC

Tabla 34 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (34) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila C.

Esta fila se ha realizado con un 25 % de índice de solape entre líneas. Existen diez pruebas, todas ellas con 30 pasadas. Cinco de dichas diez pruebas se han hecho con una velocidad de 75 mm/s y las otras cinco a una velocidad de 100 mm/s. El parámetro a variar sigue siendo el desenfoque, que se centra en valores desde 3 hasta 4 siendo los siguientes: 3/ 3,25/3,5/3,75 y 4.

A continuación, se expone una tabla resumen de los ensayos (Tabla (35)) y la Figura (44) donde se pueden observar las pruebas sobre la superficie de Inconel 718.

En la Tabla (35) se puede observar todos los resultados de rugosidad obtenidos juntos con el porcentaje de mejora de cada uno de ellos. El mejor resultado, como se puede ver es el C9 con una rugosidad de 2,60 μm y un porcentaje de mejora de 85,56 %.



Figura 44 Resultados sobre Inconel 718

Tabla 35 Resumen de los resultados obtenidos

Fila C					
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	% mejora	Marcador
30	75	3	8,25	54,17	C1
		3,25	3,87	78,50	C2
		3,5	3,23	82,06	C3
		3,75	2,95	83,61	C4
		4	2,87	84,06	C5
	100	3	6,20	65,56	C6
		3,25	4,69	73,94	C7
		3,5	2,89	83,94	C8
		3,75	2,60	85,56	C9
		4	7,10	60,56	C10

Una vez realizadas estas pruebas, se observa que la velocidad a la que existe una reducción de la rugosidad mayor es a 100 mm/s, por lo que en el resto de las pruebas se han desarrollado con esta velocidad. Otro de los parámetros que en las siguientes pruebas se ha variado es el parámetro de índice de solape. En las pruebas anteriores se mantuvo en 25 % pero los resultados obtenidos no se acercan a los objetivos propuestos, así que una de las alternativas a modificar fue aumentar este parámetro hasta 75 % y ver la influencia que tiene sobre los resultados finales de rugosidad. En cuanto al desenfoque, se tomaron los valores de 4, 4'5 y 5 y el número de pasadas se varió desde 15 hasta 30.

FILA D:

Tabla 36 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (36) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila D.

En esta fila hay nueve pruebas, todas ellas están realizadas con un índice de solape del 75 % y con una velocidad definitiva de 100 mm/s. Los parámetros que se han modificado en este caso, son el número de pasadas que se va aumentando de 10 hasta 20 de cinco en cinco; y el desenfoque que toma valores de 4, 4,5 y 5.

A continuación, se exponen las tablas resumen (Tabla (37)) con las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y el porcentaje de mejora de estos.

En la Tabla (37) se puede observar todos los resultados de rugosidad obtenidos en la Fila D juntos con el porcentaje de mejora de cada uno de ellos. El mejor resultado, como se puede ver es el D1 con una rugosidad de 0,67 μm y un porcentaje de mejora de 96,28 %.



Figura 45 Resultados sobre Inconel 718

Tabla 37 Resumen de los resultados obtenidos

Fila D					
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	% mejora	Marcador
10	100	4	0,67	96,28	D1
		4,5	0,76	95,78	D2
		5	0,72	96,00	D3
15		4	0,78	95,67	D4
		4,5	0,88	95,11	D5
		5	0,94	94,78	D6
20		4	0,78	95,67	D7
		4,5	0,76	95,78	D8
		5	0,62	96,56	D9

Estudio de la influencia del número de pasadas:

FILA E:

Tabla 38 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460

Los parámetros expuestos en la Tabla (38) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila E.

Se han realizado cuatro pruebas, todas ellas al 75 % de índice de solape y con una velocidad definitiva de 100 mm/s. En estos ensayos se han aumentado el número de pasadas a 25 y 30 y se ha mantenido el desenfoque de las pruebas de la Fila D eliminando uno de los valores.

A continuación, se exponen las tablas resumen (Tabla (39)) con las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y el porcentaje de mejora de los mismos.

En la Tabla (39) se puede observar todos los resultados de rugosidad obtenidos en la Fila D juntos con el porcentaje de mejora de cada uno de ellos. El mejor resultado, como se puede ver es el E2 con una rugosidad de 1,41 μm y un porcentaje de mejora de 92,17 %.



Figura 46 Resultados sobre Inconel 718

Tabla 39 Resumen de los resultados obtenidos

Fila E					
Número de pasadas	Velocidad (mm/s)	Desenfoque (mm)	Rugosidad (μm)	% mejora	Marcador
25	100	4,5	1,61	91,06	E1
		5	1,41	92,17	E2
30		4,5	1,64	90,89	E3
		5	1,47	91,83	E4

Los ensayos de la Matriz 2 nos muestran parámetros y resultados muy cercanos al objetivo que se marcó al inicio del experimento. Se puede concretar así que la mejor velocidad para el pulido láser es 100 mm/s. Del parámetro de desenfoque se puede concluir que las distancias de 4,5 y 5 mm dan los mejores resultados. En cuanto al número de pasadas está todavía por determinar en la siguiente Matriz puesto que es dependiente del índice de solape que se modifica en las siguientes pruebas.

Estudio de la influencia del índice de solape

Por último, se desarrolla la Matriz 3 donde se dan los resultados finales puesto que se obtienen rugosidades por debajo de las 0,5 μm . Está compuesta por dos Filas: Fila A y Fila B. En este último estudio se quiso demostrar la influencia del índice de solape sobre la superficie a pulir, aunque ya se obtuvieron indicios de que este parámetro debe de ser mayor a 25 %. Así que se hicieron pruebas a 75 % de solape y a 85 %. Al variar dicho índice, también se tuvieron que encontrar el número de pasadas correcto para este tipo de solape. A aumentar el índice de solape es necesario que se disminuya el número de pasadas ya que si no el trabajo es repetido sobre la misma superficie. Además, también se desarrolló la influencia de la frecuencia de pulso con respecto a los resultados.

FILA A:

Tabla 40 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Frecuencia Hz	180.000
Duración de pulso ns	460
Velocidad mm/s	100

Los parámetros expuestos en la Tabla (40) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila A.

Esta Fila está compuesta por 12 pruebas, dos de ellas hechas con un índice de solape del 75% y el resto de las mismas con 85 %. Para el desenfoque se tomaron dos valores: 4,5 y 5 mm. El parámetro que más se varió fue el número de pasadas, que tomó valores desde 5 hasta 20.

A continuación, se expone una tabla resumen de las pruebas realizadas (Tabla (41)).

Tabla 41 Resumen de los resultados obtenidos

Fila A					
Identificador	Number of pases	% Solape	Defocussing (mm)	Rugosidad (µm)	% mejora
A3	20	75	4,5	1,00	93,10
A4			5	0,45	96,90
A5	10	85	4,5	0,57	96,07
A6			5	0,89	93,86
A7	15		4,5	1,07	92,62
A8			5	1,10	92,41
A1	20		4,5	1,08	92,59
A2			5	1,34	90,76
A9	5		4,5	0,83	94,28
A10			5	0,97	93,31
A11	7		4,5	0,78	94,62
A12			5	2,03	86,00

Como se puede ver en la Tabla (41), los valores de rugosidad se acercan a los objetivos marcados. Además, se puede observar también que, al aumentar el índice de solape,

los mejores resultados aparecen al reducir a la mitad el número de pasadas. Los mejores resultados son los de A4 y A5, donde la rugosidad Ra es 0,45 y 0,57 μm y el porcentaje de mejora de 96,90% y 96,07 %, respectivamente.

Por último, en la Fila B, se quiso demostrar si la frecuencia de pulso tenía influencia en los resultados o si apenas tenía dominio sobre la superficie.

En la Figura (47) se expone las pruebas realizadas sobre Inconel 718:

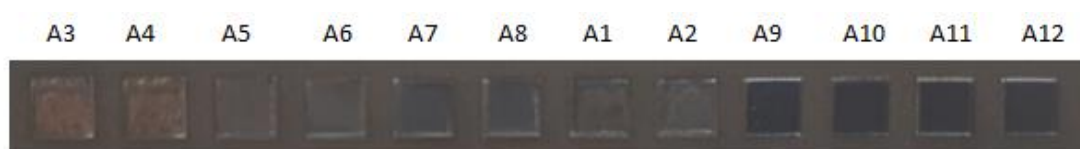


Figura 47 Resultados sobre Inconel 718

FILA B:

Tabla 42 Parámetros constantes

PARÁMETROS CONSTANTES EN TODAS LAS PRUEBAS	
Potencia %	100
Duración de pulso ns	460
Velocidad mm/s	100

Los parámetros expuestos en la Tabla (42) son aquellos que se han mantenido invariables en todas las pruebas de la Fila B.

En el caso de la Fila B se han realizado diez pruebas, donde solo se ha variado la frecuencia de pulso. Los parámetros obtenidos en la Fila A que dieron como resultado los mejores porcentajes de mejora, es decir, A4 Y A5, se han mantenido constantes en las pruebas, variando la frecuencia por lo tanto desde 125 kHz hasta 225 kHz.

A continuación, se expone una tabla resumen (Tabla (43)) de los ensayos realizados, con la rugosidad Ra y el porcentaje de mejora y en la Figura (48) se pueden ver las pruebas sobre Inconel 718:

Tabla 43 Resumen de los resultados obtenidos

Fila B						
Identificador	Number of pases	% Solape	Defocussing (mm)	Pulse Frequency (Hz)	Rugosidad (μm)	% mejora
B1	20	75	5	125000	0,61	95,79
B2				150000	0,74	94,90
B3				175000	0,73	94,97
B4				200000	0,68	95,31
B5				225000	0,77	94,69
B6	10	85	4,5	125000	0,95	93,45
B7				150000	0,90	93,79
B8				175000	0,80	94,48
B9				200000	0,67	95,38
B10				225000	1,42	90,21



Figura 48 Resultados sobre Inconel 718

Como se puede apreciar en la Tabla (43), no hay una gran variación de los resultados al modificar la frecuencia de pulso.

Influencia del área de pulido, obtenidos los parámetros finales

Una vez obtenidos los parámetros definitivos de pulido, se quiso observar la tendencia del porcentaje de mejora al aumentar el área de trabajo. Por ello, se desarrollaron estos parámetros en áreas de $5 \times 5 \text{ mm}^2$ (Fila A), área $10 \times 10 \text{ mm}^2$ y área $20 \times 20 \text{ mm}^2$.

En la Tabla se representan los parámetros definitivos con los que se harán las pruebas de aumento de área:

Marcador	Número pasadas	Desenfoque (mm)	% Solape	Velocidad (mm/s)	Potencia %	Frecuencia Hz	Duración de pulso ns
A4	20	4,5	75	100	100	180.000	460
A5	10	5	85				

Área 5x5 mm² parámetros A4:

Se expone en la Figura (49) la topografía de dicha área, donde se puede observar en el centro la superficie pulida y en los extremos la superficie inicial. En la Figura (50) se puede ver la topografía de la superficie pulida. En la Figura (51) se representa un 3D de la superficie (comparación superficie rugosa-superficie pulida):

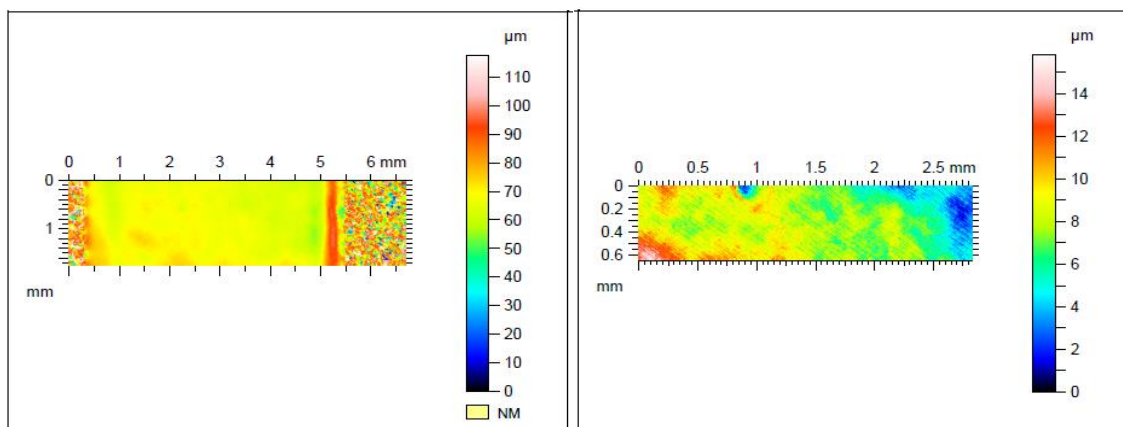


Figura 49 Topografía comparativa engraving-pulido

Figura 50 Zoom zona pulida

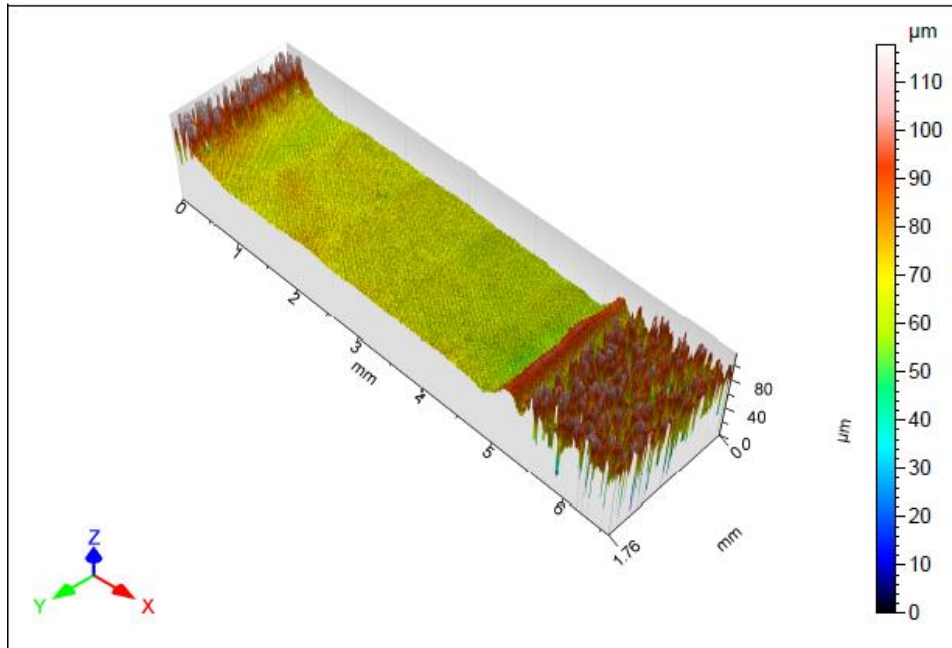


Figura 51 3D

Por último, en la Figura (52) se muestra el perfil de la topografía del pulido, donde se puede apreciar que Ra es igual a 0,45 µm.

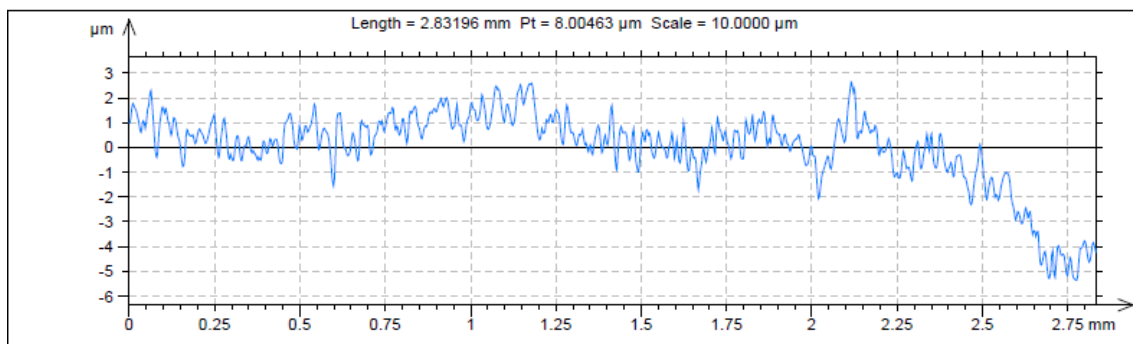


Figura 52 Perfil de la topografía

Área 5x5 mm² parámetros A5:

Se expone en la Figura (53) la topografía de dicha área, donde se puede observar en el centro la superficie pulida y en los extremos la superficie inicial. En la Figura (53) se puede ver la topografía de la superficie pulida. En la Figura (54) se representa un 3D de la superficie (comparación superficie rugosa-superficie pulida):

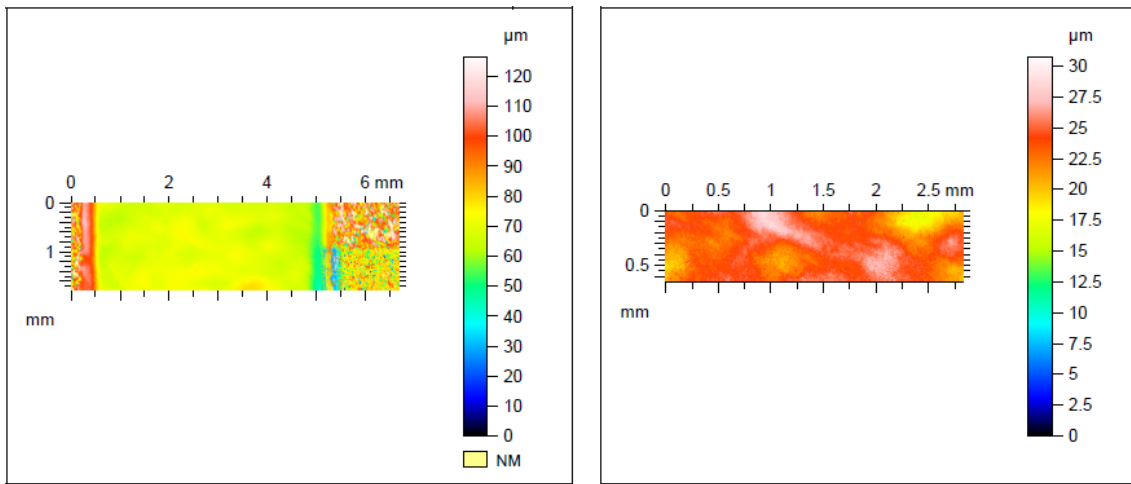


Figura 53 Topografía comparativa pulido-engraving

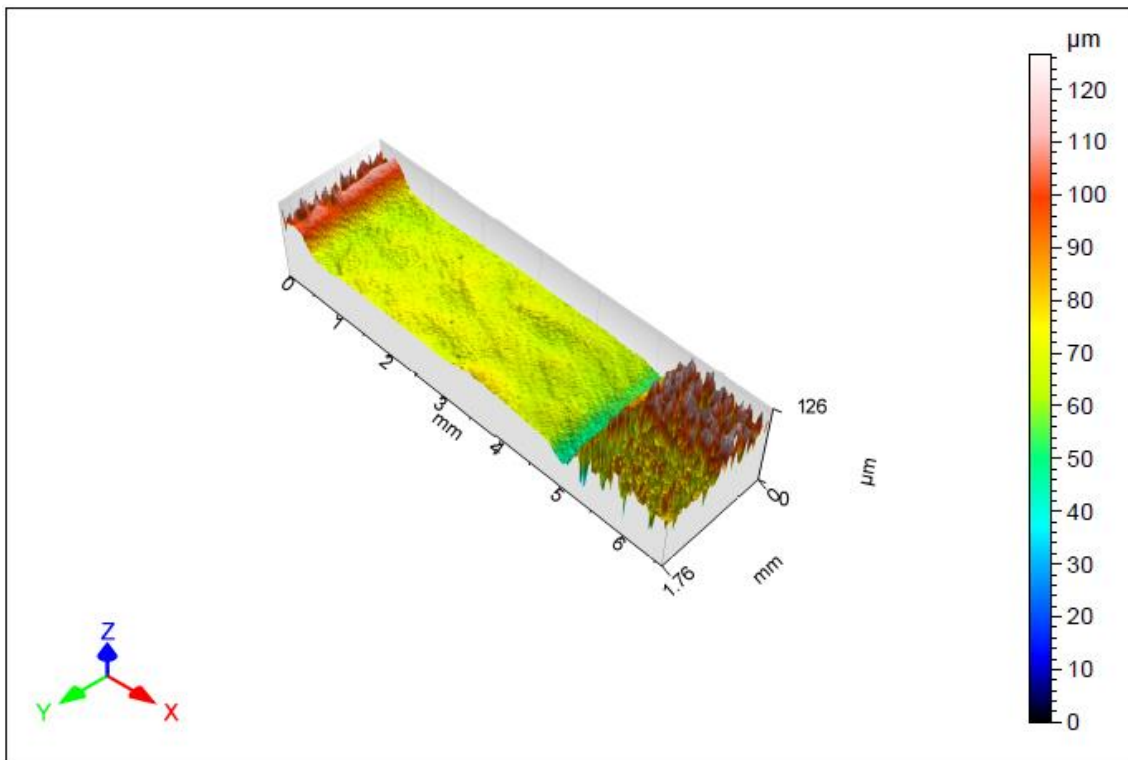


Figura 54 3D

Por último, en la Figura (55) se muestra el perfil de la topografía del pulido, donde se puede apreciar que Ra es igual a 0,57 μm .

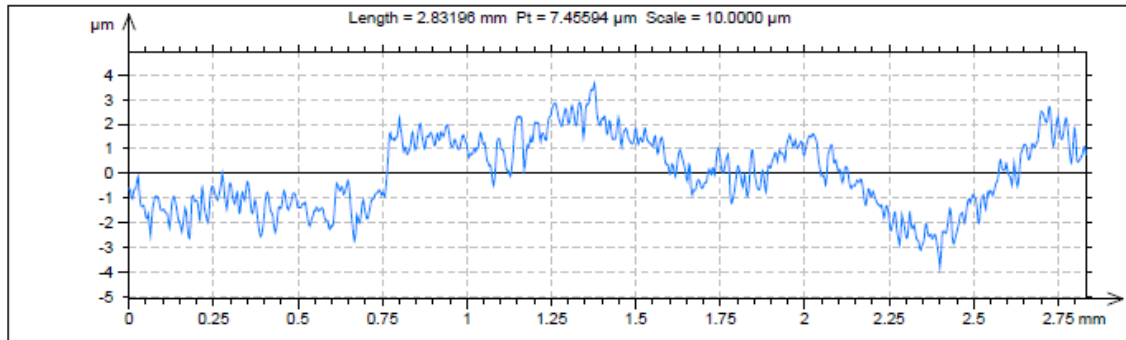


Figura 55 Perfil de la topografía

Área 10x10 mm² parámetros A4:

Se expone en la Figura (57) la topografía de dicha área, donde se puede observar en el centro la superficie pulida y en los extremos la superficie inicial. En la Figura (56) se puede ver la topografía de la superficie pulida

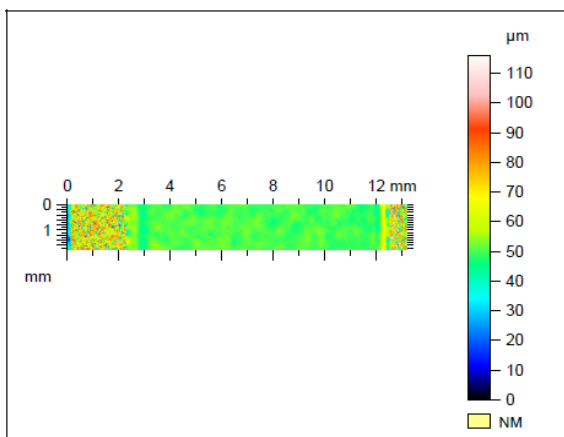


Figura 57 Topografía comparativa pulido-engraving

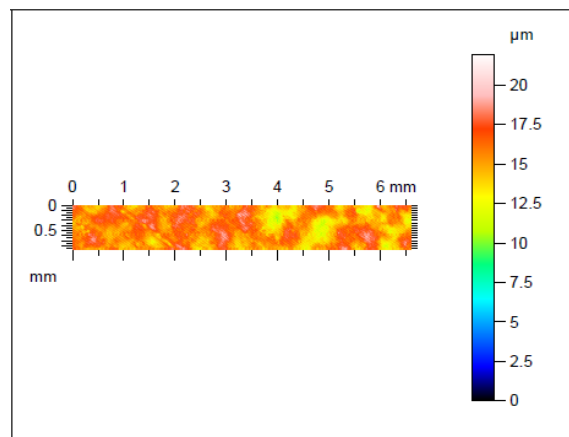


Figura 56 zoom zona pulida

Por último, en la Figura (58) se muestra el perfil de la topografía del pulido, donde se puede apreciar que Ra es igual a 0,72 μm .

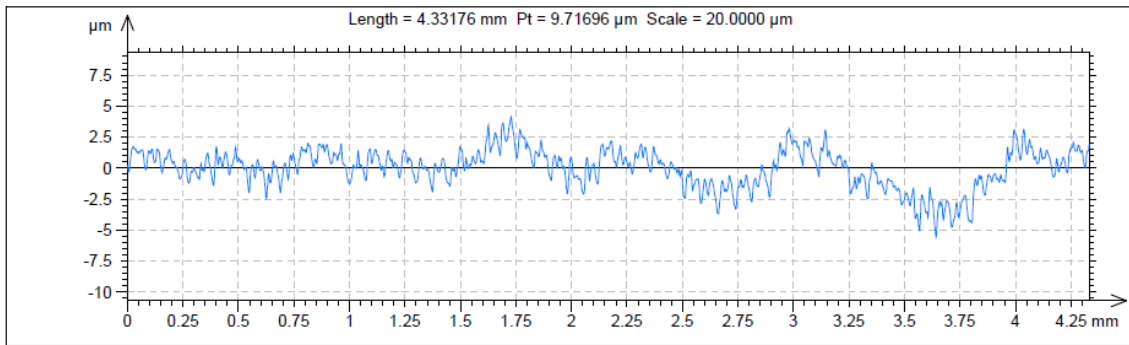


Figura 58 Perfil de la topografía

Área 10x10 mm² parámetros A5:

Se expone en la Figura (59) la topografía de dicha área, donde se puede observar en el centro la superficie pulida y en los extremos la superficie inicial. En la Figura (60) se puede ver la topografía de la superficie pulida

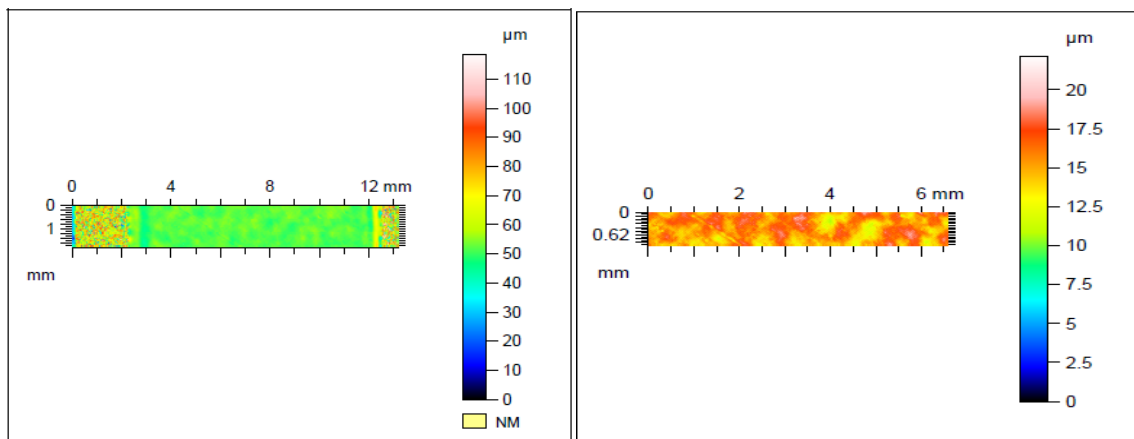


Figura 60 Topografía comparativa pulido-engraving

Figura 59 Zoom zona pulida

Por último, en la Figura (61) se muestra el perfil de la topografía del pulido, donde se puede apreciar que Ra es igual a 0,81 μm .

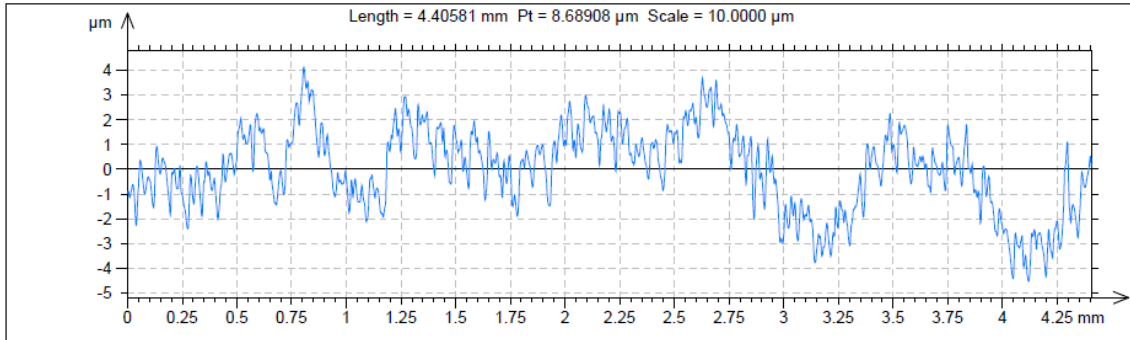


Figura 61 Perfil de la topografía

Área 20x20 mm² parámetros A4:

Se expone en la Figura (62) la topografía de dicha área, donde se puede observar en el centro la superficie pulida y en los extremos la superficie inicial. En la Figura (62) se puede ver la topografía de la superficie pulida:

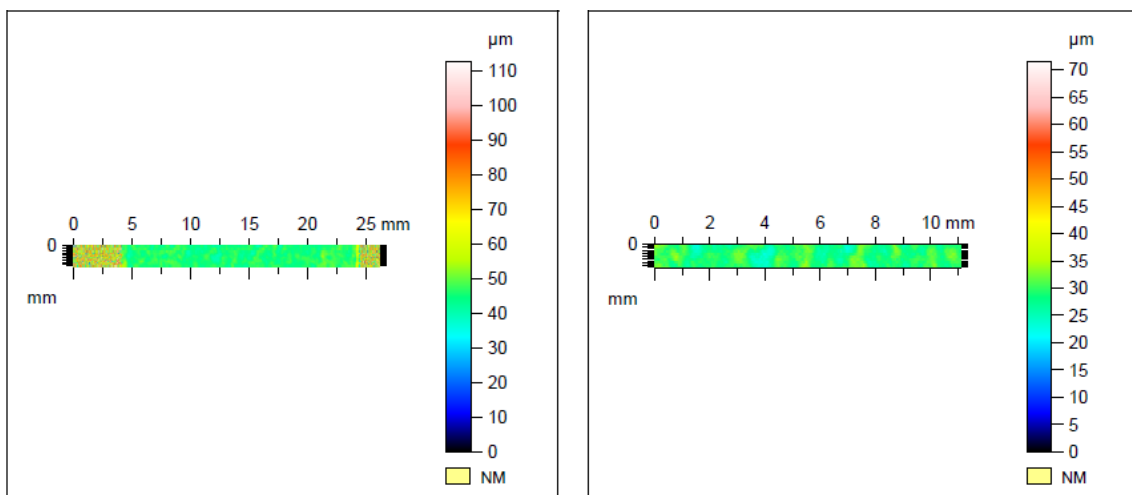


Figura 62 Topografía comparativa pulido-engraving

Por último, en la Figura (63) se muestra el perfil de la topografía del pulido, donde se puede apreciar que Ra es igual a 0,76 μm .

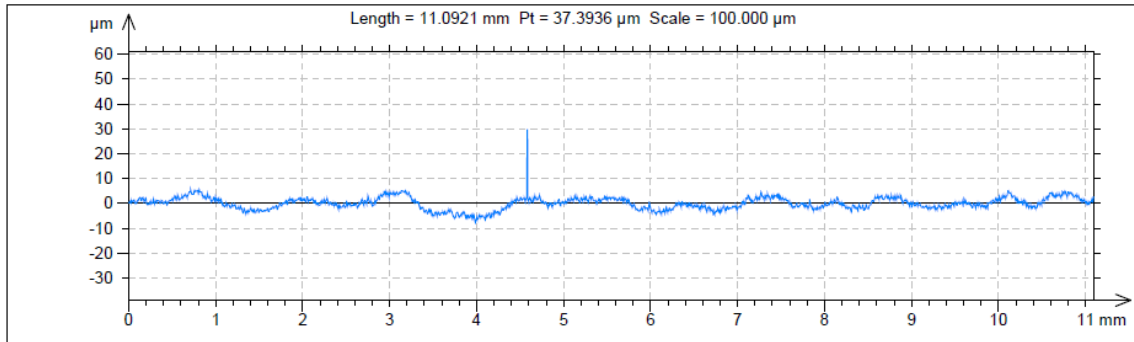


Figura 63 Perfil de la topografía

Área 20x20 mm² parámetros A5:

Se expone en la Figura (64) la topografía de dicha área, donde se puede observar en el centro la superficie pulida y en los extremos la superficie inicial. En la Figura (64) se puede ver la topografía de la superficie pulida:

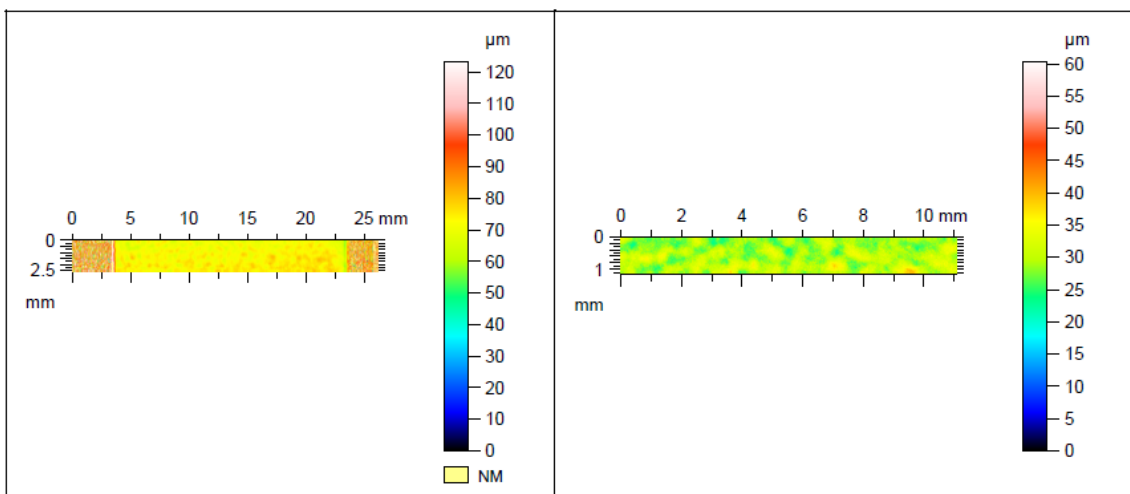


Figura 64 Topografía comparativa pulido-engraving

Por último, en la Figura (65) se muestra el perfil de la topografía del pulido, donde se puede apreciar que R_a es igual a $0,88 \mu\text{m}$.

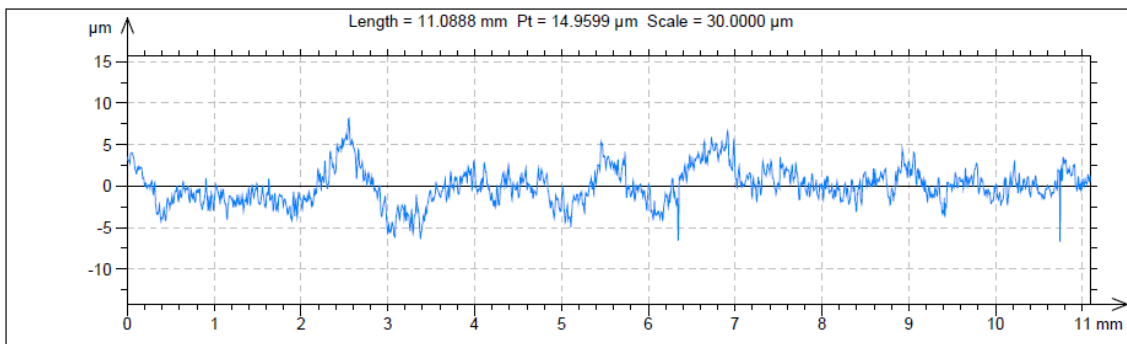


Figura 65 Perfil de la topografía

Como se puede observar en los valores de la rugosidad R_a , al aumentar el tamaño del área a pulir, aumenta la rugosidad R_a , disminuyendo así el porcentaje de mejora de la superficie. Esto es debido a que en un área más pequeña se concentra mayor densidad de energía en un punto en concreto.

En la Figura (66) se puede observar los tres tamaños de pulido en Inconel 718:



Figura 66 Pulido en Inconel 718

Influencia de la geometría de la superficie pulida.

El último ensayo que se estudió fue la influencia de la geometría de la superficie a pulir. Por ello se realizaron dos tipos de geometría: una rectangular y otra circular.

Respecto a la geometría rectangular se hicieron tres tipos de proceso y tres tamaños diferentes. Se realizó una prueba de engraving, una de pulido con los parámetros A4 y otro proceso de pulido con los parámetros A5. En cuanto al tamaño, se hicieron tres rectángulos con tres anchos diferentes, el primero con un ancho de 1 mm, el segundo de 0,5 mm y el tercero de 0,25 mm.

En la geometría circular se desarrolló algo muy similar: tres tipos de proceso y cuatro tamaños de diámetro. Se realizó una prueba de engraving, una de pulido con los parámetros A4 y otro proceso de pulido con los parámetros A5. Se estudiaron los diámetros de 2 mm, de 1 mm, de 0,5 mm y de 0,25 mm.

A continuación, se exponen las topografías de cada una de las geometrías y de cada uno de los procesos:

Círculos diámetro 0,5 mm

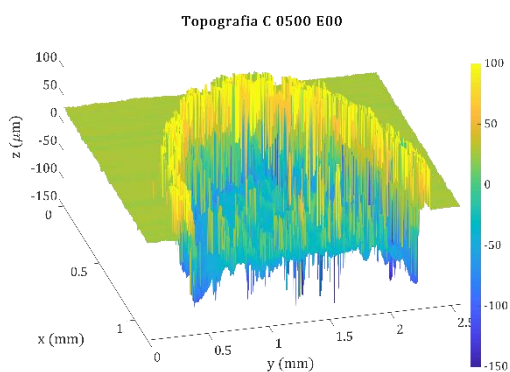


Figura 68 Topografía engraving

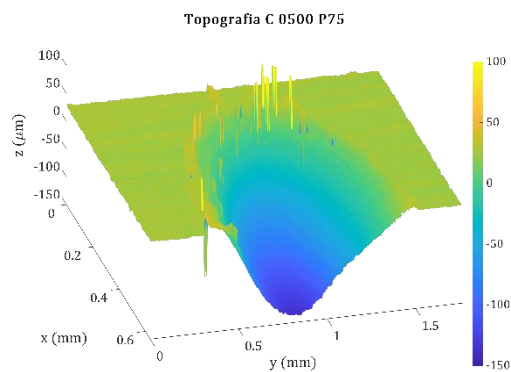


Figura 67 Topografía con los parámetros A4

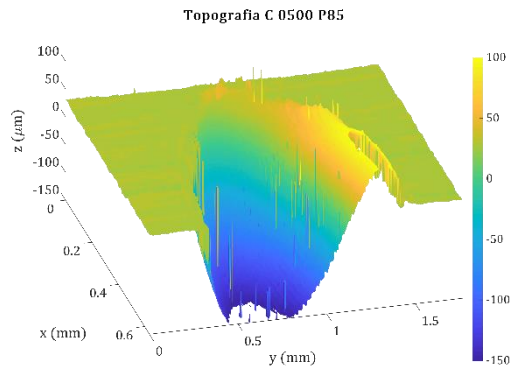


Figura 69 Topografía parámetros A5

Círculos diámetro 1 mm

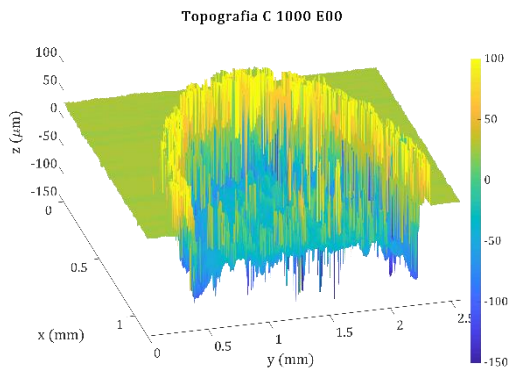


Figura 70 Topografía engraving

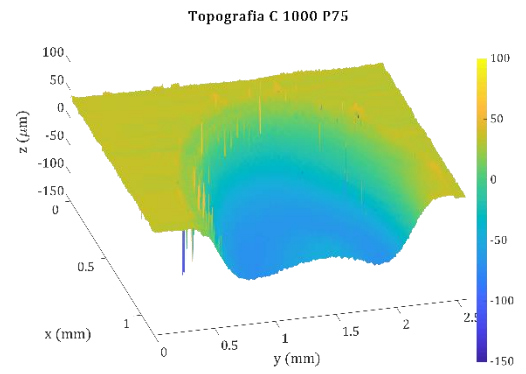


Figura 71 Topografía parámetros A4

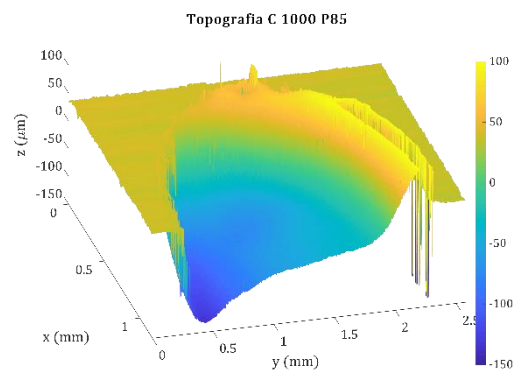


Figura 72 Topografía parámetros A5

Círculos diámetro 2 mm

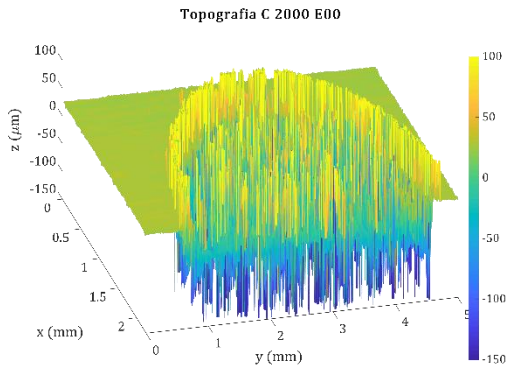


Figura 73 Topografía engraving

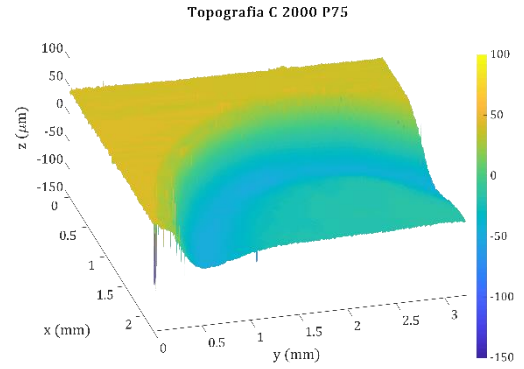


Figura 74 Topografía parámetros A4

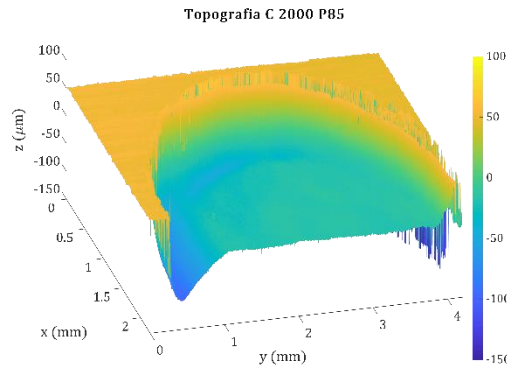


Figura 75 Topografía parámetros A5

Ranuras de 0,25 mm de ancho

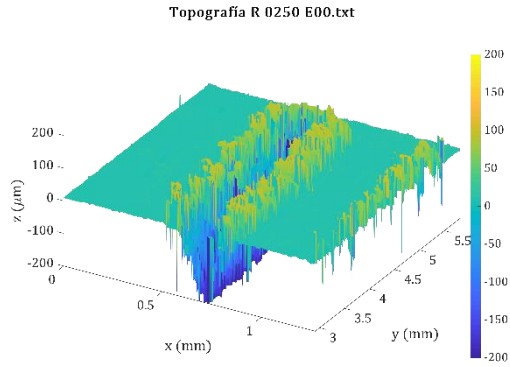


Figura 76 Topografía engraving

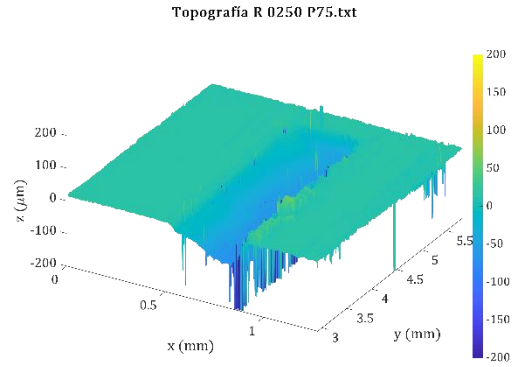


Figura 77 Topografía parámetros A4

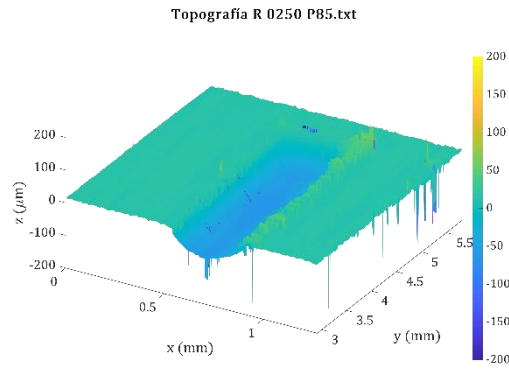


Figura 78 Topografía parámetros A5

Ranuras de 0,5 mm de ancho

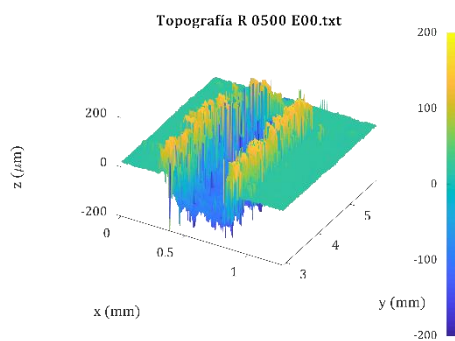


Figura 80 Topografía engraving

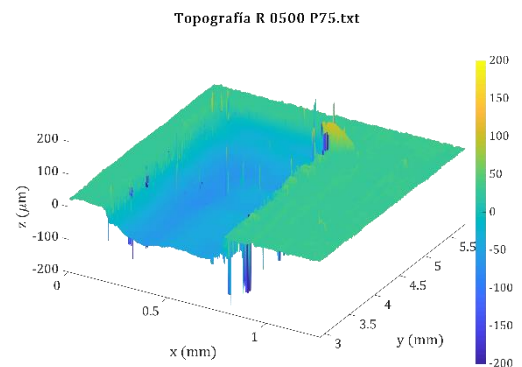


Figura 79 Topografía parámetros A4

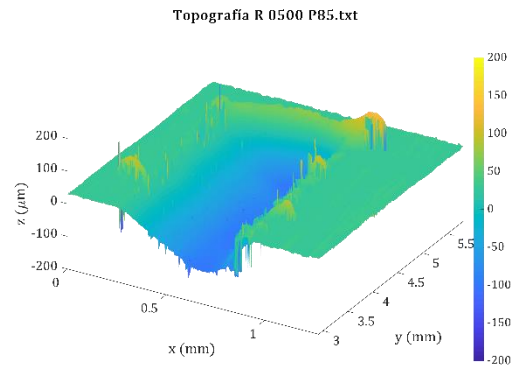


Figura 81 Topografía parámetros A5

Ranuras de 1 mm de ancho

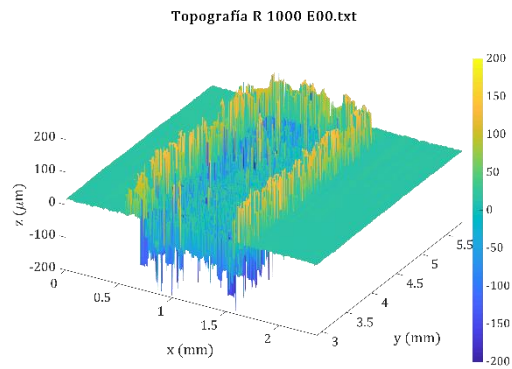


Figura 82 Topografía engraving

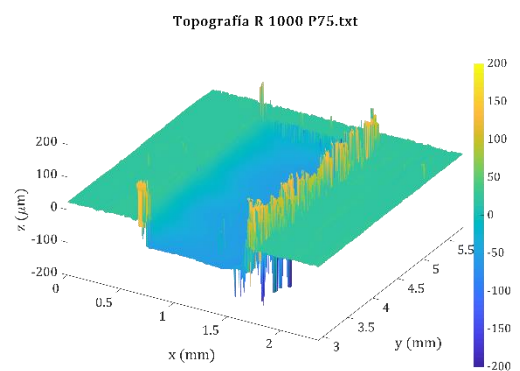


Figura 83 Topografía parámetros A4

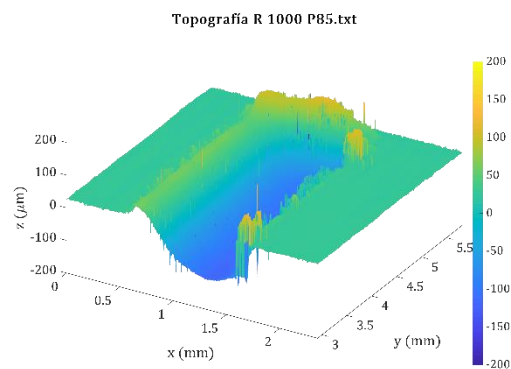


Figura 84 Topografía parámetros A5

Por último, se expone en las Figuras (85) y (86) los resultados en Inconel 718 de las pruebas anteriormente descritas:

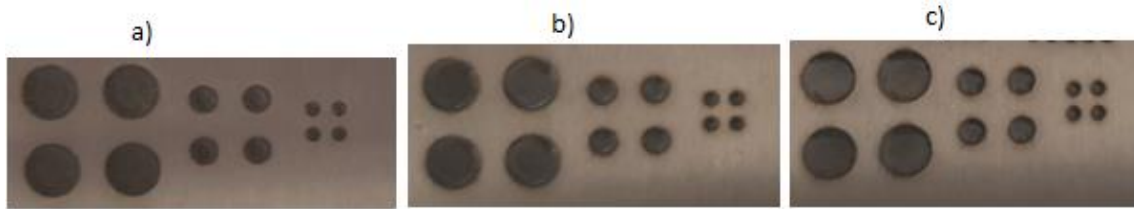


Figura 85 Resultados sobre Inconel 718 a) engraving b) parámetros A4 c) parámetros A5

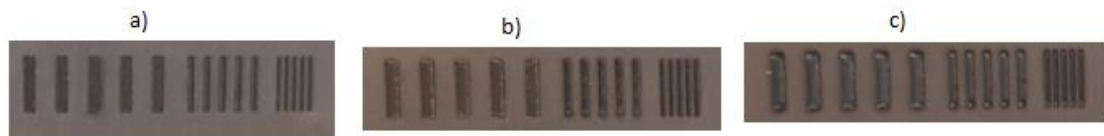


Figura 86 Resultados sobre Inconel 718 a) engraving b) parámetros A4 c) parámetros A5

3. CONCLUSIONES

En lo referente al *laser engraving*, se ha observado que el número de pasadas del láser juega un papel fundamental en el proceso, ya que, al aumentar el número de pasadas, la cantidad de energía entregada al material será mayor y, por lo tanto, mayor será la profundidad lograda como resultado. No obstante, el exceso de energía puede deteriorar la superficie que vaya a ser tratada, siendo esto inadmisibles en muchos casos.

El pulido láser es una disciplina en la que intervienen una gran cantidad de fenómenos físicos de complejidad elevada y de difícil control. Es por ello por lo que el ajuste y estabilidad de los parámetros de proceso es crítica para la obtención de un pulido óptimo. Además, en este campo se ha demostrado que, al variar el tamaño del área de pulido, el índice de mejora disminuye puesto que la densidad de energía es dispersada por más área. Por lo tanto, las aplicaciones más viables para este tipo de pulidos son para superficies de pequeño tamaño y de materiales que no tiendan a oxidarse con facilidad, como es el caso del Inconel 718.

La idea futura de este trabajo es realizar ensayos del desgaste abrasivo en un máquina de pic-on-disc. Este ensayo trata de La prueba tribológica Pin-on-Disk es un estudio basado en el comportamiento de dos probetas (pin y disco) cuando las mismas interactúan entre sí, friccionando una con la otra a razón de una velocidad constante y una carga aplicada.

Y, por otro lado, realizar ensayos de mojado para comprobar que se pueden crear superficies hidrófobas útiles para crear paneles solares que se ensucian o se autolimpian con la lluvia; alas de aviones que resisten la formación de hielo en el extremo.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Svelto, O., & Hanna, D. C. (1998). *Principles of lasers* (Vol. 4). New York: Plenum press.
- [2] Dorronsoro, M. (1996). La tecnología Láser: fundamentos, aplicaciones y tendencias.
- [3] González, E. *El láser: principios básicos*, p.232(2003).
- [4] Ramos-Grez, J. A., & Bourell, D. L. (2004). Reducing surface roughness of metallic freeform-fabricated parts using non-tactile finishing methods. *International Journal of Materials and Product Technology*, 21(4), 297-316.
- [5] Cortina Burón, M. (2016). Laser polishing and structuring by laser remelting of 1.2379+.
- [6] Lamikiz, A., Sanchez, J. A., de Lacalle, L. L., & Arana, J. L. (2007). Laser polishing of parts built up by selective laser sintering. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(12-13), 2040-2050.
- [7] Hafiz, A. M. K., Bordatchev, E. V., & Tutunea-Fatan, R. O. (2012). Influence of overlap between the laser beam tracks on surface quality in laser polishing of AISI H13 tool steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 14(4), 425-434.
- [8] Ukar, E., Lamikiz, A., de Lacalle, L. L., del Pozo, D., & Arana, J. L. (2010). Laser polishing of tool steel with CO2 laser and high-power diode laser. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(1), 115-125.
- [9] Lamikiz A. *aplicaciones del láser en la industria*. Master universitario en ingeniería mecánica. Escuela técnica superior de ingeniería de Bilbao (UPV/EHU), 2017
- [10] Dubey, A. K., & Yadava, V. (2008). Laser beam machining—a review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(6), 609-628.
- [11] Kasman, Ş. (2013). Impact of parameters on the process response: A Taguchi orthogonal analysis for laser engraving. *Measurement*, 46(8), 2577-2584.

- [12] Diaci, J., Bračun, D., Gorkič, A., & Možina, J. (2011). Rapid and flexible laser marking and engraving of tilted and curved surfaces. *Optics and lasers in engineering*, 49(2), 195-199.
- [13] Zhang, Y., Sato, Y. S., Kokawa, H., Park, S. H. C., & Hirano, S. (2008). Microstructural characteristics and mechanical properties of Ti–6Al–4V friction stir welds. *Materials Science and Engineering: A*, 485(1-2), 448-455.
- [14] Pereda, J. A. M., Ros, J. S. L., & Torres, J. S. (1976). El láser en la técnica y la investigación: teoría y práctica. Universidad Politécnica de Madrid.
- [15] Marín, L. D. Introducción al Laser y su aplicación práctica en la óptica moderna. Laboratorio de Fotónica y Tecnología Laser, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica.