

GRADO EN MARINA
TRABAJO FIN DE GRADO

***VIABILIDAD DEL MECANIZADO LÁSER DE
CARBURO DE TUNGSTENO***

Alumno/Alumna: Ibiricu Somavilla, Iker

Director/Directora: Ukar Arrien, Eneko

Curso: 2017-2018

Fecha: 15/27/2018

RESUMEN TRILINGÜE

En este trabajo de fin de grado se estudia la viabilidad del mecanizado láser de carburo de tungsteno. Debido a la dureza del carburo de tungsteno, su mecanizado se ha realizado típicamente mediante rectificado, es por eso que en este trabajo se estudian los parámetros adecuados para el mecanizado láser (profundidad y acabado superficial). Además se llevan a la práctica estos parámetros realizando un rompevirutas sobre una plaquita para fresa.

Palabras clave: Carburo de tungsteno, mecanizado láser, rompevirutas

Gradu amaierako lan honetan tungsteno karburoko mekanizazio laserraren bideragarritasuna aztertzen da. Tungsteno karburoko gogortasuna dela eta, bere mekanizatua normalean rektifikatuaren bidez egiten da, horregatik lan honetan mekanizazio laserraren parametro egokiak aztertzen dira (sakonera eta azaleko itxura). Gainera, parametro hauek probatzen dira *chipbreaker* bat egiten fresarako plakita batean .

Hitz gakoak: Tungsteno karburoa, laser mekanizazioa, *chipbreaker*

In this grade final project, tungsten carbide laser beam machining viability is studied. Due to the hardness of tungsten carbide, its machining has typically been done by grinding, that is why in this project we study the appropriate parameters for laser beam machining (depth and surface appearance). In addition, these parameters are carried out by making a chipbreaker on a milling tool insert.

Key words: Tungsten carbide, laser beam machining, chipbreaker

ÍNDICE

1. MEMORIA	8
1.1. Introducción	8
1.2. Contexto	9
1.3. Objetivos	10
1.4. Estado del arte	10
1.4.1. El láser	10
- Historia	10
- Funcionamiento	18
- Propiedades de la luz láser	21
- Tipos de láser	22
1.4.2. Tratamientos superficiales mediante láser	28
- Pulido láser	29
- Marcado láser	30
1.4.3. Carburo de tungsteno	31
- Proceso de mecanizado	33
- Mecanizado por haz láser	34
2. METODOLOGÍA	36
2.1. Descripción de tareas y diagrama de Gantt	36
2.2. Descripción de equipos	37
- Láser	37
- Herramientas para el análisis	39
2.3. Desarrollo	41
- Tarea 1: Revisión bibliográfica	41
- Tarea 2: Estudio experimental del material	42

- Tarea 3: Estudio de parámetros de profundidad	47
- Tarea 4: Estudio de parámetros de acabado	53
- Tarea 5: Aplicación práctica	58
3. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	68
4. BIBLIOGRAFÍA	70
5. ANEXO I: PERFILES MEDIOS DE MATRIZ DE PRUEBA	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Cuota de mercado de los de los distintos materiales de herramientas de corte (Año 2017	9
Figura 1.2 Emisión estimulada	11
Figura 1.3 Townes con el Máser	11
Figura 1.4 Maiman con el primer láser de la historia	13
Figura 1.5 Robert Hall trabajando en su laboratorio	14
Figura 1.6 Kumar Patel en los laboratorios Bell	15
Figura 1.7 William Bridges con el láser de argón el año 2005	16
Figura 1.8 Portada de la revista Time del 4 de abril de 1983	17
Figura 1.9 Partes del láser	18
Figura 1.10 Tipos de emisiones	19
Figura 1.11 Ilustración del interior de un láser de rubí	23
Figura 1.12 Láser Nd:YAG	23
Figura 1.13 Láser He-Ne	25
Figura 1.14 Láser de argón	25
Figura 1.15 Láser de CO ₂	26
Figura 1.16 Esquema de un láser de diodos	27
Figura 1.17 Láser de fibra	27
Figura 1.18 Variantes del pulido láser	30
Figura 1.19 Grabado láser de una herramienta	31
Figura 1.20 Mineral de Wolframite	32
Figura 1.21 Retrato de John Wilkinson	34
Figura 1.22 Mecanizado por haz láser DMG	35
Figura 2.1 Fresa empleada para la obtención de probetas	41
Figura 2.2 Matriz de prueba	44

Figura 2.3 Puntos a estudiar	45
Figura 2.4 Perfil medio A0	47
Figura 2.5 Perfil medio A1	48
Figura 2.6 Probetas M1 y M2	49
Figura 2.7 Probetas M4 y M5	50
Figura 2.8 Perfiles superpuestos de 200 a 750 pasadas	51
Figura 2.9 Probetas M6 y M7	52
Figura 2.10 Perfiles superpuestos de 1500 a 9000 pasadas	52
Figura 2.11 Gráfico de la tendencia del material	53
Figura 2.12 Topografía rugosidad inicial	54
Figura 2.13 Probeta P1	55
Figura 2.14 Probeta P2	55
Figura 2.15 Probeta P3	56
Figura 2.16 Probeta P4	56
Figura 2.17 Topografía de la mejor rugosidad	58
Figura 2.18 Estado inicial de la pieza a mecanizar	59
Figura 2.19 Diseño del rompevirutas	59
Figura 2.20 Detalle del diseño del rompevirutas	60
Figura 2.21 Probeta con diseño original y diseños descentrados	61
Figura 2.22 Topografía RV diseño original	61
Figura 2.23 Diseño RV desplazado hacia arriba	62
Figura 2.24 Diseño RV desplazado hacia abajo	62
Figura 2.25 Topografía RV 150 pasadas	63
Figura 2.26 Topografía RV 100 pasadas	64
Figura 2.27 Probeta con 100, 150 pasadas y diseño final	65
Figura 2.28 Resultado final del rompevirutas por la cara A	65
Figura 2.29 Resultado final del rompevirutas por la cara B	66
Figura 2.30 Topografía del resultado final por cara A	66

Figura 2.31 Topografía del resultado final por cara B	67
Figura 2.32 Plaquita montada	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1 Diagrama de Gantt	37
Tabla 2.2 Características Láser Trumark 5050	37
Tabla 2.3 Características del cabezal Trumark 5000	38
Tabla 2.4 Características Trumark Station 5000	39
Tabla 2.5 Características Leica DCM3D	40
Tabla 2.6 Configuración del <i>hatching</i> para matriz de prueba	43
Tabla 2.7 Parámetros para matriz de prueba	43
Tabla 2.8 Puntos obtenidos de la matriz de prueba	46
Tabla 2.9 Profundidad de 50 a 250 pasadas	49
Tabla 2.10 Profundidad de 300 a 750 pasadas	50
Tabla 2.11 Profundidad de 1500 a 9000 pasadas	51
Tabla 2.12 Tabla de rugosidades y % de mejora	57

1. MEMORIA

1.1. INTRODUCCIÓN

En el presente proyecto se estudia la viabilidad del mecanizado láser de carburo de tungsteno. El mecanizado láser es un proceso bastante moderno, que permite el mecanizado de materiales de un alto grado de fragilidad y baja maquinabilidad. En nuestro caso el material es un carburo de tungsteno, que es de gran dureza y altamente resistente a la compresión y a al desgaste.

Debido a que el carburo de tungsteno no se puede mecanizar por arranque de viruta, se estudiara si es posible el mecanizado láser de este material.

Para la realización de este proyecto se ha realizado en primer lugar una revisión del estado del arte de todo lo que engloba este proyecto. Empezando por el láser, su funcionamiento, tipos de láser desde su invención hasta los últimos modelos aparecidos en el mercado, y sus aplicaciones. Se han revisado también varios procesos láser como el marcado y el pulido. También se ha estudiado el carburo de tungsteno y sus propiedades, y la evolución histórica del mecanizado, hasta llegar al mecanizado láser.

En lo que se refiere a los ensayos prácticos, se ha estudiado como afectan los distintos parámetros del láser y en que medida, tanto en la profundidad del marcado láser, como el acabado superficial del pulido láser.

Para finalizar y confirmar lo analizado en los ensayos, se han llevado a la práctica estos parámetros, elaborando un diseño de un rompevirutas para una plaquita de fresa, con la finalidad de aumentar el rendimiento de esta.

1.2. CONTEXTO

La industria de la fabricación de las herramientas de corte es muy importante a nivel mundial. Para tener una idea de lo importante que es, la empresa alemana Trumpf facturó 2930,3 millones de dólares en el año 2014 solamente con la fabricación de máquinas herramienta. En lo que respecta a las herramientas de corte, el consumo de herramientas de corte en Estados Unidos en mayo del año 2018 fue de 215,13 millones de dólares, según la USCTI (*U.S. Cutting Tool Institute*).

En lo que a materiales empleados para las herramientas de corte se refiere, más del 50% de las herramientas de corte del mercado están formadas por metales duros.

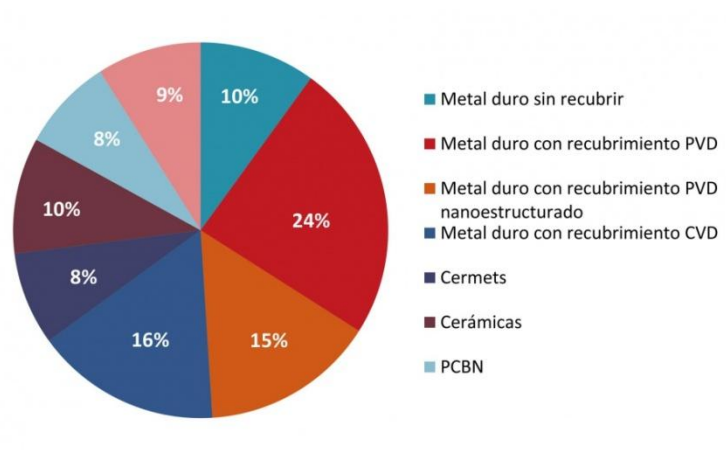


Figura 1.1 Cuota de mercado de los distintos materiales de herramientas de corte (Año 2017)

Para la fabricación de las herramientas de corte de metal duro, el proceso es rígido y está basado en el sinterizado y el rectificado. Por lo tanto se puede decir que tiene poca flexibilidad geométrica.

Tras analizar estos datos, se apreció la necesidad de optimizar rompevirutas para poder aumentar la vida de la herramienta de corte.

1.3. OBJETIVOS

En este proyecto se busca conocer a la perfección el carburo de tungsteno y conocer si es posible realizar un buen mecanizado por haz láser de este material. Por ello se plantean los siguientes objetivos:

- Obtener los parámetros de profundidad
- Obtener los parámetros para un buen acabado
- Aplicar de manera práctica el mecanizado láser en carburo de tungsteno

1.4. ESTADO DEL ARTE

En este punto se explican todos los términos necesarios para entender el proyecto, además del contexto histórico de los elementos relacionados con el proyecto.

1.4.1. EL LASER

El láser (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) es una herramienta muy utilizada hoy en día y en diversos ámbitos, pese a que en muchas ocasiones pasa desapercibido o se ha normalizado su uso.

A continuación se profundizará sobre lo que es láser, su funcionamiento y su importancia histórica

HISTORIA

En 1917 Albert Einstein propuso la existencia de un proceso de interacción átomo-fotón denominado emisión estimulada. En él explicaba la interacción entre un átomo y un fotón inicialmente en estado de excitación. Debido a esta interacción, el átomo pasa a su estado base,

emitiendo en este proceso un fotón con la misma dirección y fase que el fotón inicial. [1]

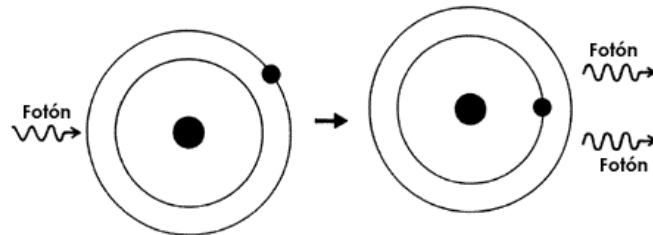


Figura 1.2 Emisión estimulada

En la década de los 50 Charles H. Townes, Arthur Schawlow y Nikolái Basov describieron y desarrollaron el máser (**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation), un dispositivo que produce ondas electromagnéticas coherentes mediante la amplificación por la emisión estimulada de radiación.

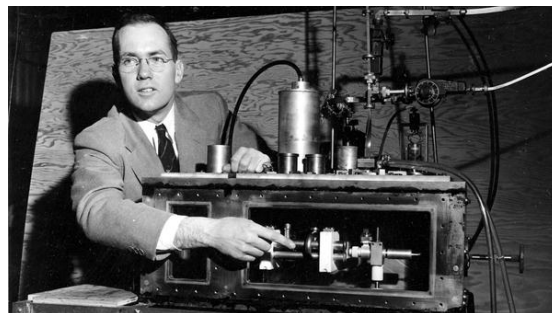


Figura 1.3 Townes con el Máser

Tras la Segunda Guerra Mundial, los científicos de radar y los físicos comenzaron a colaborar, los primeros para descubrir la manera de obtener radiación electromagnética a longitud de onda de menos de un centímetro, y los segundos para investigar la estructura molecular.

A principios de la década de los 50, Charles Townes, en la Universidad de Columbia (NY), tuvo la idea de que las moléculas por si mismas podrían crear emisores de la longitud de onda deseada, si un gran número de moléculas transmitiesen en masa. Para llevarlo a cabo se requería ensamblar una gran cantidad de moléculas excitadas en una cavidad con las dimensiones adecuadas, la radiación emitida por algunas moléculas se reflejaría e interactuaría con otras moléculas, que provocaría una mayor emisión estimulada.

En 1954 Townes construyó el primer máser. Envío un rayo de moléculas de amoníaco excitadas a una cavidad resonante. La emisión se volvió autosostenible, ya que la radiación de las moléculas en la cavidad estimuló la radiación adicional del suministro continuamente renovado de moléculas excitadas. La potencia de aquel primer máser eran 10 nanovatios, radiando a una longitud de onda de poco más de un centímetro.

En 1958 Townes y Arthur Schawlow de Bell Laboratories (Nueva Jersey), propusieron un sistema que funcionaría en longitudes de onda infrarrojas y ópticas. [2]

Por otro lado, en 1952 en la URSS, el ingeniero físico Nikolai Basov descubrió un nuevo método para amplificar las ondas, mediante átomos o moléculas que liberaban ondas de igual fase, a un ratio multiplicado.

En 1964, Townes y Basov fueron galardonados con el Premio Nobel de física, gracias a sus investigaciones sobre el máser. [3]

En 1960, Theodore Harold Maiman desarrollo el primer láser en Hughes Atomic Physics Department en Culver City (California). Después de ser contratado en 1956, Maiman dirigió el proyecto de desarrollar un máser de rubí para la US Army Signal Corps. Consiguió mejorar altamente tanto el rendimiento como el diseño, prueba de ello es que redujo el peso del máser de 5.000 libras que pesaba el original a 25 libras.

Tras fabricar el máser para la US Army Signal Corps, continuó trabajando en mejorar el concepto del máser. En el verano de 1959, presentó un último diseño de máser que pesaba tan solo 4 libras y funcionaba con un enfriamiento de nitrógeno líquido. Más tarde se centró en el desarrollo del láser, pese al poco apoyo de Hughes Atomic Physics Department.

Tras traspasar los laboratorios de Hughes de Culver City a Malibú (California), en mayo de 1960 Maiman presentó el láser en funcionamiento, tras una inversión que ascendía a 50.000\$.

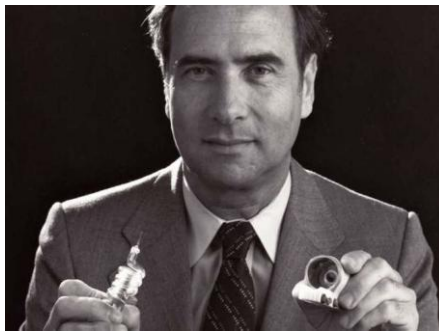


Figura 1.4 Maiman con el primer láser de la historia

Después de la negativa de Physical Review Letters, Maiman publicó su artículo sobre el láser en la revista británica Nature el 6 de agosto de 1960. Este se tituló "Stimulated Optical Radiation in Ruby". [4]

En el artículo Maiman explicaba que había podido aplicar una técnica nueva de bombeo óptico a un sólido fluorescente que le permitió obtener una temperatura negativa y una emisión óptica estimulada a una longitud de onda de 6943 angstroms, empleando como material activo el rubí. [5]

En 1962, Maiman comenzó a desarrollar y fabricar una línea de láseres de alta potencia, una vez fundada la empresa Korad Corporation. Poco después su empresa acabó convirtiéndose en líder del mercado en el campo de los láseres. [6]

El 1 de febrero de 1961, A. Javan, W.R. Bennett Jr. Y D.R. Herriot publicaron un artículo en Physical Review Letters, en el que reportaban que habían

inventado el primer láser de onda continua. El artículo se titulaba "Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He - Ne Mixture" y fue desarrollado en Bell Telephone Laboratories de Murray Hill (Nueva Jersey). Consiguieron una potencia de 15 milivátios en su haz más fuerte a una longitud de onda de 11.530 angstroms.

El láser de Helio - Neón es un láser de gas que emplea la mezcla de gas de helio y gas de neón como medio de ganancia, y a diferencia del láser de rubí emite de manera continua. [7]

En 1962, Robert Hall de General Electric (NY) inventó el primer láser semiconductor. Tras acudir a una charla sobre diodos, se percató de que con la ayuda de una unión semiconductor podría desarrollar un láser más simple y directo. Gracias a este tipo de unión consiguió una generación altamente eficiente de luz coherente desde una fuente muy compacta. A diferencia de otros láseres, los electrones eran inyectados mediante una corriente eléctrica en la unión. [8]



Figura 1.5 Robert Hall trabajando en su laboratorio

Aquel láser funcionaba con un cristal de tan solo 1/3 milímetro, enfriamiento de nitrógeno líquido y solo funcionaba en modo pulsado. [9]

En 1964 Kumar Patel inventó el primer láser de dióxido de carbono. Patel, tras unirse a Bell Telephone Laboratories en el año 1961, se centró en el estudio de la acción de los láseres en gases puros raros. Gracias a esto descubrió en el año 1963 la acción del láser en el dióxido de carbono. A este descubrimiento le sumó su invento de transferencia eficiente de energía vibratoria entre moléculas, dando como resultado la invención en el año 1964 del láser de dióxido de carbono, el primer láser de gas que producía radiación de alta potencia de forma continua. [10]

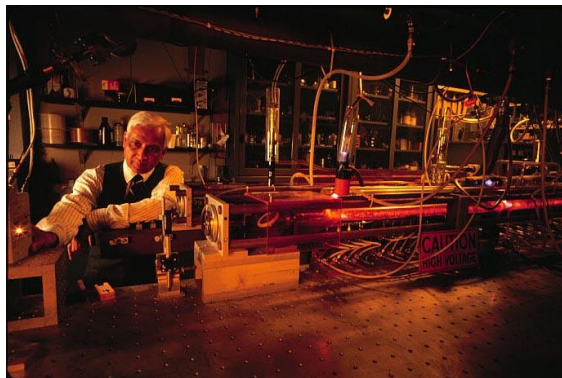


Figura 1.6 Kumar Patel en los Laboratorios Bell

En 1964 se pusieron las bases de los actuales láseres de fibra. Charles Koester y Elias Snitzer demostraron el primer amplificador de fibra, deslizado sobre una lámpara flash una espiral de fibra, influenciados por el diseño del láser de rubí de Maiman. [11]

En febrero de 1964 William Bridges inventó el láser Ion – Argón, mientras trabajaba en Hughes Aircraft Company (California) que era una división de Hughes Research Laboratories.

Bridges descubrió el fundamento de este láser probando un láser de Helio – Mercurio que había construido. Tras cambiar el helio por neón y ver que funcionaba, cambió el neón por el argón. En un primer momento no funcionó, pero cuando volvió a introducir el helio comprobó que algo había cambiado. A una longitud de onda de 4880 angstroms ya no se encontraba

con una línea verde o roja como anteriormente, en esta ocasión era azul debido a la ionización.

Una vez estudiado este suceso, Bridges consiguió crear un láser argón – ión de pulsos con una potencia de 5 vatios.

Por otro lado Eugene Gordon trabajaba en Bell Laboratories estudiando la manera de desarrollar láseres de onda continua. Desistió de todos sus intentos hasta que coincidió con Bridges en un comité y este le explicó el láser ión – argón. Fue entonces cuando se convenció de que tenía que trabajar sobre este láser.

En abril de ese mismo año Gordon llamó a Bridges para comunicarle que ya había conseguido un láser de onda continua, y le pidió que se uniese a él para desarrollarlo.

Tras comenzar trabajando en un laser con una potencia de 150 milivatios a finales del año 1964 llegaron a obtener una potencia de hasta 7 vatios.

Una vez conseguido un buen funcionamiento de este láser, Bridges rápidamente comenzó a estudiar su aplicación en el ámbito militar y médico. [12]



Figura 1.7 William Bridges con el laser de argón en el año 2005

Hasta los años 80 la batalla por ver quien lograba inventar el láser de rayos X había sido intensa, pero todos los intentos acabaron fracasando.

Una de las compañías más famosa y prestigiosa en el estudio de los láseres de rayos X fue Livermore Laboratories, compañía que era líder en láseres de fusión. Tras muchos intentos fallidos, en el año 1984 Dennis Mathews, el jefe de los investigadores anunció en una convención en Boston que finalmente habían conseguido hacer funcionar un láser de rayos X.

En aquellos años se llevo a cabo en Estados Unidos el programa popularmente conocido como "Star Wars", impulsado por el presidente Reagan. Denominada oficialmente como Iniciativa de Defensa Estratégica, tenía como idea principal el desarrollo de una defensa anti-misiles instalada en el espacio para interceptar cualquier misil balístico soviético. El proyecto no se pudo llevar a cabo, debido a la inexistencia de la tecnología necesaria para ello. Uno de los benefactores y piedra angular de este proyecto fue Livermore Laboratories. [13]

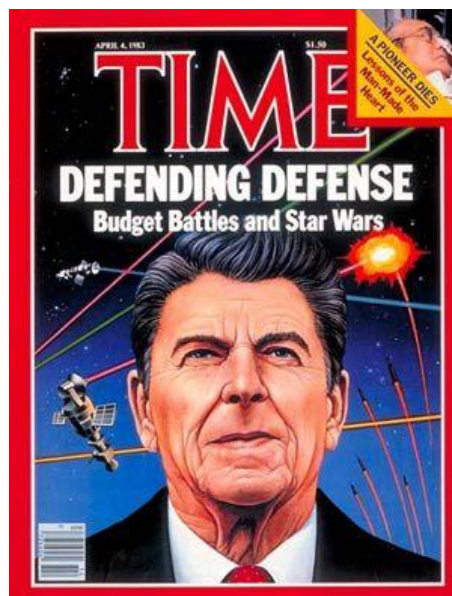


Figura 1.8 Portada de la revista Time del 4 de abril de 1983

FUNCIONAMIENTO

El funcionamiento del láser se divide en tres elementos principales:

- Ganancia o medio activo, consiste en la ganancia de la radiación electromagnética mediante la excitación que le produce una fuente de energía externa.
- Fuente de suministro de energía externa o bombeo, es el proceso que excita los átomos del medio activo, lo que provoca que emitan fotones que se propagan en el medio activo y generan más fotones.
- Sistema de retroalimentación óptico, que permite que los fotones generen más fotones, que formen un rayo de luz, que salga del medio activo como rayo laser o rebote por el medio activo generando más fotones. Esto se consigue gracias a una cavidad resonante, esto es, dos espejos paralelos.



Figura 1.9 Partes del láser

Ganancia o medio activo

Para entender bien la ganancia, es necesario entender el concepto de inversión de población, o lo que es lo mismo, que haya más átomos en estado excitado que en estado de menor energía.

Se supone el medio activo como una cavidad cilíndrica por la cual pasa un flujo de fotones. Dentro de la cavidad se encuentran multitud de átomos que pueden estar o bien excitados o bien en su estado base de energía. Al entrar en contacto el flujo de fotones con los átomos excitados se produce la emisión estimulada descubierta por Einstein, esto es, de un fotón inicial se genera un segundo fotón idéntico al primero (misma longitud de onda, misma dirección, misma fase y misma polarización). Cuando finaliza este proceso el átomo inicialmente excitado vuelve a su estado base.

Por otro lado si el flujo de fotones entra en contacto con un átomo en estado base, este absorbe un fotón, pasando de estar en estado base a estar en un estado excitado. A esto se le conoce como absorción.



Figura 1.10 Tipos de emisiones

Por lo tanto la ganancia depende del estado de los átomos que se encuentran en el medio activo, cuanto mas átomos se encuentren en estado de excitación mayor será la ganancia (medio amplificador).

El medio activo puede estar en estado sólido, líquido, gaseoso o plasma.

Sistema de bombeo

Se conoce como bombeo al proceso de energizar el medio amplificador.

Existen diferentes tipos de sistemas de bombeo, los más importantes son:

- Ópticos, los cuales habitualmente son empleados en sistemas láser con medios activos sólidos o líquidos. En este sistema de bombeo se suele emplear una o varias lámparas flash, que al ser disparadas liberan gran cantidad de fotones que excitan los átomos en estado base. En lugar de lámparas también pueden ser empleados otros láseres como sistemas ópticos de bombeo.
- Eléctricos, son empleados en sistemas láseres con medio activo gaseoso. El funcionamiento está basado en una descarga eléctrica, que libera electrones desde el cátodo al ánodo, colisionando con los átomos, transfiriéndoles energía, haciendo pasar los átomos de estado base a un estado excitado.

También existen otros tipos menos comunes de sistemas de bombeo como son los de por excitación química, los nucleares, aceleradores,...

Retroalimentación óptica

Para permitir que los fotones reboten en el medio activo se dispone de dos espejos paralelos, también llamado resonador óptico. Uno de estos espejos refleja el 100% y el otro tiene una reflectancia similar al 90%. Cuando los fotones inciden en el espejo del 90% de reflectancia, el 10% sale del resonador óptico formando un haz de luz muy compacto, debido a que todos los fotones son coherentes y monocromáticos.

Al fenómeno de reflejar los fotones en el resonador para conseguir una mayor amplificación se le conoce como retroalimentación positiva. A un amplificador con retroalimentación positiva se le denomina oscilador. [14]

PROPIEDADES DE LA LUZ LÁSER

Las propiedades de la luz láser son monocromaticidad, direccionalidad, coherencia y luminosidad.

Monocromaticidad

Las ondas son monocromáticas, es decir, son de una sola frecuencia.

Pese a esto no hay luz láser que sea completamente monocromática, se emite en un rango de frecuencias, a lo que se denomina ancho espectral.

Esta propiedad se debe a que la cavidad del láser forma un sistema resonante, y la oscilación solo puede ocurrir en las frecuencias de resonancia de esta cavidad. Debido a esto el ancho espectral del láser es mas estrecho.

Direccionalidad

El rayo láser es altamente direccional, esto es, la luz láser es de muy pequeña divergencia. Esto es una consecuencia directa de que el rayo láser provenga de la cavidad resonante, y solo las ondas que se propagan en el eje óptico se puedan mantener en la cavidad. La direccionalidad está sujeta al ángulo de divergencia del haz láser.

Coherencia

En el haz láser hay que distinguir dos tipos de coherencia: la coherencia espacial y la temporal.

La coherencia temporal mide las correlaciones de fase en la misma posición en diferentes momentos. Si en los diferentes momentos medidos el desfase entre la forma de onda del campo eléctrico es idéntica, se considera una coherencia temporal perfecta. Si se da una variación se considera una coherencia temporal parcial.

La coherencia espacial mide las correlaciones de fase en distintas posiciones en el mismo momento. Si tomamos puntos del mismo frente de onda se puede dar una coherencia espacial perfecta o una coherencia espacial parcial, al igual que en la coherencia temporal.

Luminosidad

La luminosidad de una fuente de luz se define como la potencia emitida por unidad de superficie y por ángulo unitario. Sabiendo que P es la potencia del láser, con una sección transversal de haz circular de diámetro D y un ángulo de divergencia θ , y el ángulo sólido de emisión resultante es $\pi \theta^2$, la luminosidad del haz láser es:

$$B=4P/(\pi D\theta)^2 \quad (1)$$

La máxima luminosidad se alcanza cuando el haz es coherente espacial perfecto, y se obtiene la mayor concentración de energía. [15]

TIPOS DE LÁSER

Láser de estado sólido

En los láseres de estado sólido, el medio activo es un sólido, pudiendo ser desde una varilla hasta una plancha de aislante cristalino.

Entre este tipo de láseres se encuentra el láser de rubí (Figura 1.11), que como se ha explicado en el apartado de Historia, se considera el primer

láser de la historia. En este caso el medio activo es un cristal cilíndrico de rubí sintético no purificado. El bombeo se lleva a cabo gracias a la energía óptica de un tubo de destello. Emiten luz con una longitud de onda de 694 nm. La eficiencia de estos láseres es del 0,5%

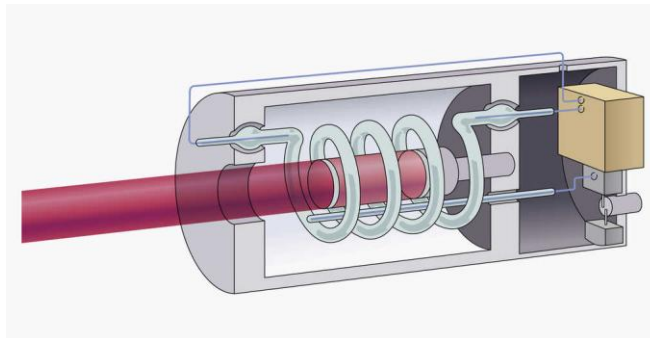


Figura 1.11 Ilustración del interior de un láser de rubí

Otro láser perteneciente a los láseres de estado sólido es el láser de Nd:YAG (Neodymium Yttrium Aluminium Garnet). En este láser el medio activo es un cristal de granate de itrio y aluminio, dopado con iones de neodimio. La excitación se realiza mediante lámparas de arco y de flash, debido a su bajo coste, pero en la actualidad ha ganado fuerza el bombeo mediante diodos láser, debido a su alta eficiencia. Emiten luz con una longitud de onda de 1064 nm. La eficiencia de estos láseres ronda el 12%.



Figura 1.12 Láser Nd:YAG

Los láseres de estado sólido son empleados en diversos ámbitos:

- En el ámbito médico-estético, para la eliminación de varices, eliminación de tatuajes y depilación láser.
- En el ámbito militar se emplean tanto para marcar objetivos para atacar (designador láser), como para calcular la distancia a la que se encuentran los objetivos (telémetros láser).
- En el ámbito industrial estos láseres son habituales para el corte y soldadura de acero y para el grabado y marcado de plásticos y metales. [16]

Láser de estado gaseoso

En los láseres de estado gaseoso, el medio activo es un gas. El medio activo está cerrado en un tubo cilíndrico sellado en cada extremo por un espejo, formando la cavidad óptica. En estos láseres, el bombeo se realiza mediante una descarga eléctrica que atraviesa el gas.

El primer láser de estado gaseoso que funcionó fue el láser de He-Ne, al igual que también fue el primer láser de estado gaseoso en producir un haz de salida continuo. El medio activo de este láser es una mezcla gaseosa de helio y neón, contenida en un tubo de cuarzo. La excitación de los átomos se produce gracias a una descarga eléctrica continuada que se da entre dos electrodos situados en ambos extremos del tubo. La excitación provocada por la descarga solo afecta a los átomos de helio, que acto seguido excitan a los átomos de neón mediante colisiones atómicas.



Figura 1.13 Láser He-Ne

Otro láser de estado gaseoso es el láser de iones de argón, cuyo medio activo es un plasma de iones excitados. Esta excitación se da, al igual que en el láser He- Ne, mediante una descarga eléctrica. Esta descarga eléctrica atraviesa el tubo de argón gaseoso, ionizando los átomos de argón y excitándolos mediante múltiples colisiones con los electrones.



Figura 1.14 Laser de argón

También pertenece a los láseres de estado gaseoso el láser de CO_2 . Al igual que el resto de láseres de estado gaseoso la excitación del medio activo se produce gracias a una descarga eléctrica. El medio activo de este láser esta formado en mayor parte por dióxido de carbono, combinado con una mínima parte de otro gas como puede ser el nitrógeno, el helio o el hidrógeno. Su eficiencia oscila entre el 10-25%.



Figura 1.15 Laser de CO₂

Los láseres de estado gaseoso se emplean en los siguientes campos:

- En aplicaciones de procesamiento de materiales, como el corte, soldadura y recocido.
- Cirugía ocular y óptica general.
- Holografía, topografía, procesamiento de imágenes y procesamiento de semiconductores.
- Espectáculos de luz

Láseres semiconductores o de diodos

Los láseres semiconductores han sufrido una gran evolución, convirtiéndose a día de hoy en uno de los láseres mas utilizados debido a su relación eficiencia-precio, a esto se suma también el fácil manejo que tienen debido a su bajo peso. Son muy empleados como sistema de bombeo de los láseres de estado sólido.

La emisión estimulada en este láser se consigue gracias a la recombinación de electrones cuando se aplica un voltaje en las capas p y n de los diodos. Mediante una combinación de capas del diodo se puede obtener una amplificación de energía.

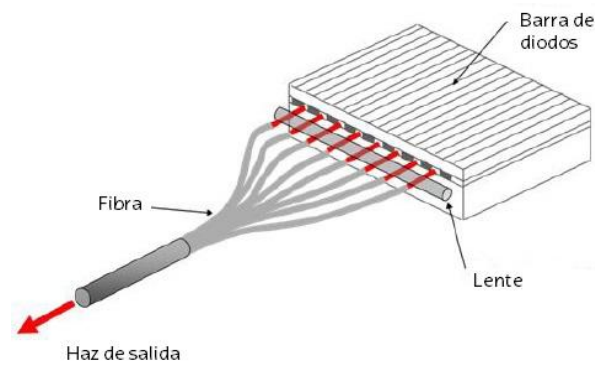


Figura 1.16 Esquema de un Láser de diodos

Láseres de fibra

Los láseres de fibra se están convirtiendo en los láseres más empleados en la actualidad. Esto es debido a su alta eficiencia, superior al 20%, su bajo coste y que se trata de equipos compactos.

Su tecnología se basa en estirar una barra de Yb:YAG (Yterbium: Ytrium Aluminium Garnett) hasta conseguir una fibra de unas micras, que permite una más sencilla refrigeración. La potencia depende de la longitud de la fibra generadora. El sistema de bombeo de los láseres de fibra suelen ser habitualmente láseres de diodos.

Estos láseres se emplean en la medicina, en aplicaciones en automoción, aplicaciones en aviación y todo tipo de trabajos de corte y soldadura de precisión.



Figura 1.17 Láser de fibra

1.4.2. TRATAMIENTOS SUPERFICIALES MEDIANTE LÁSER

El láser, como se ha visto en el punto 1.4.1 ha ido ganando fuerza con el paso de los años, y a día de hoy su uso está muy extendido en todo tipo de ámbitos y para todo tipo de procesos. Esto surge gracias al avance de la tecnología que permite nuevos procesos y a la normalización del uso de nuevos materiales, que trae como consecuencia directa el abaratamiento del coste de estos materiales poco comunes hasta el momento.

El primer uso del láser y el más extendido en el tiempo ha sido el corte por láser de chapa, pero gracias a la gran precisión de los láseres, su empleo para otros procesos se empezó a extender a otros ámbitos, siendo a día de hoy una de las herramientas más importantes, por ejemplo, en el sector médico.

Las principales ventajas del empleo del láser son las siguientes:

- Alta precisión
- Excelente repetibilidad
- Gran abanico de materiales sobre los que puede trabajar
- Alta focalización energética, que permite una distorsión mínima en las zonas afectadas por el calor
- No hay contacto sobre el material, por lo tanto no hay desgaste de herramienta ni acabados indeseados en el material

En esta sección se describirán los dos procesos para el tratamiento superficial de piezas empleados en este documento: el marcado láser (*Laser marking*) y el pulido láser (*Laser polishing*).

PULIDO LÁSER (*LASER POLISHING*)

La rugosidad de la superficie de una pieza o producto influye fuertemente en sus propiedades y funciones. Entre estas se encuentran la resistencia a la abrasión y a la corrosión, propiedades ópticas, hasta el acabado visual deseado por el cliente.

En principio, hay tres variantes de pulido láser diferentes:

La primera variante es el pulido por ablación de área grande (*Polishing by large-area ablation*), donde se realiza la ablación sobre toda la superficie del material. El pulido se logra realizando una mayor ablación en los picos de las superficies y una menor ablación en los valles.

La segunda variante es el pulido por ablación localizada (*Polishing by localized ablation*) donde se requiere de un dispositivo preciso de medición, para medir el perfil de la superficie inicial. Tras obtener los valores y compararlos, solo los picos de la superficie son eliminados por el láser. En la industria se ha utilizado principalmente para la fabricación de microherramientas.

La tercera variante es el pulido por refundición (*Polishing by remelting*). En esta variante se funde una fina capa superficial, y la tensión superficial conduce a un flujo de material desde los picos hacia los valles. No se elimina ningún material, solo se recoloca mientras está fundido. En comparación con la superficie inicial, la rugosidad de la superficie pulida con láser se reduce significativamente hasta longitudes de onda espaciales de 80 micras, por lo que el brillo aumenta considerablemente.

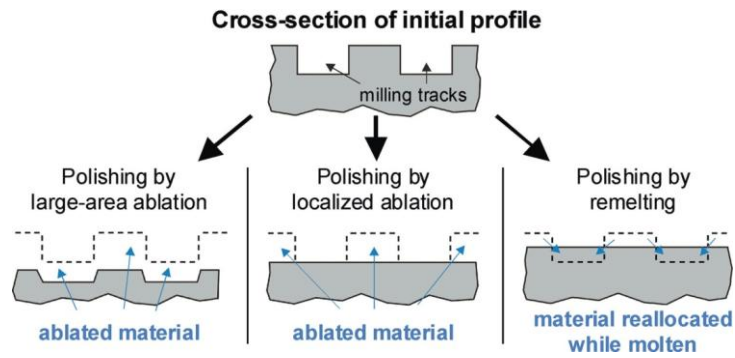


Figura 1.18 Variantes del pulido láser

MARCADO LÁSER (LASER MARKING)

El marcado láser se puede realizar de diferentes maneras: carbonización, cambio de color, cambio físico del acabado de la superficie (mediante un cambio de reflectividad en la superficie), vaporización (eliminando el material de la superficie gracias a una fuente de calor muy intensa) y fusión y soplado (calentando la superficie hasta el punto de fusión y extrayendo los residuos derretidos con la ayuda de un gas. En este documento cuando se refiera al marcado láser se hará referencia a un marcado láser mediante vaporización. Como se realizará un marcado realizando un gran número de pasadas, se puede considerar que se llegará a arrancar material (*laser engraving*)

La principal ventaja del marcado láser es la ausencia de desgaste de la herramienta, al realizarse el marcado sin contacto gracias al haz láser. Al no existir contacto, se reduce considerablemente la posibilidad de que la superficie del material sufra daño alguno. Los últimos años se han reducido mucho los costes de los láseres que posibilitan el marcado y se ha aumentado mucho la velocidad de este proceso, convirtiendo el marcado láser en la opción mas extendida para el marcado. [18]



Figura 1.19 Grabado láser de una herramienta

1.4.3. CARBURO DE TUNGSTENO

En este proyecto se ha empleado como material a estudiar un acero para herramientas de Carburo de tungsteno. Este tipo de material al igual que el diamante policristalino son difícilmente mecanizables por los sistemas habituales. En los siguientes puntos se explicaran el material, el proceso de mecanizado típico y el proceso de mecanizado por láser.

El carburo de tungsteno o carburo de wolframio es un compuesto químico inorgánico compuesto de átomos de wolframio y de carbono. Las partículas de carburo de wolframio están unidas por un aglutinante de cobalto metálico. Esta unión se realiza mediante sinterizado.

El sinterizado es un tratamiento térmico de densificación de componentes. Es el proceso de unión de partículas que combina altas temperaturas y presiones, partiendo de los materiales en polvo.

El tungsteno se obtiene de los minerales Wolframite y Scheelita, que se obtienen de minas situadas en Portugal, China, Canadá, Rusia y Austria.



Figura 1.20 Mineral de Wolframite

Pertenece a los denominados metales duros. Tiene un módulo de Young de aproximadamente 550 GPa, es aproximadamente tres veces más rígido que el acero, y mucho más denso que el titanio y el acero.

El carburo de tungsteno tiene como nombre comercial WIDIA, que es la abreviatura del alemán "*Metall hart Wie Diamant*"

Las principales ventajas del metal duro son:

- Resistencia al desgaste
- Dureza
- Resistencia a la compresión

El metal duro prácticamente no es susceptible a la corrosión. Solo comienza a sufrir corrosión tras algún tiempo de trabajo, pero únicamente en la superficie, la estructura base del material no es destruida como en los aceros. La corrosión que aparece en la superficie se debe al aglomerante, en este caso al cobalto.

En términos históricos, en 1914 fue patentado el primer carburo de tungsteno fundido por Lohman y Voigtlaender. Este primer carburo de tungsteno no tuvo mucho éxito debido a su fragilidad.

Fue en 1923 cuando Osram compró la patente creada por Karl Heinrich Schroeter y Baumhauer, pero no fue hasta 1926 cuando se empezó a utilizar de manera industrial. [19] [20]

PROCESO DE MECANIZADO

El mecanizado es el conjunto de procesos industriales realizados en una pieza de materia prima para darle una forma y tamaño final deseados.

En el mecanizado intervienen dos movimientos:

- El movimiento principal o de corte, que es el que elimina el material de la pieza.
- El movimiento de avance, que es el que dirige la pieza mientras se está dando el movimiento principal.

Existen diferentes tipos de mecanizado:

- En el mecanizado por arranque de viruta, el sobrante de la pieza se corta o arranca en forma de viruta por medio de una herramienta.
- EDM o electroerosión, es un proceso de arranque térmico, donde el calor que funde el material es generado por descargas eléctricas controladas entre la herramienta y la pieza.
- USM o mecanizado por ultrasonidos, que emplea una herramienta que vibra a frecuencias muy elevadas.
- WJM o corte por chorro de agua, donde se emplea un chorro de agua de alta presión y alta velocidad.
- CM o Mecanizado químico, donde se emplea un agente químico para el mecanizado.

El mecanizado industrial nació a raíz de la máquina de vapor y la revolución industrial. La primera máquina-herramienta fue inventada por John Wilkinson en el 1774. [21] [22]



Figura 1.21 Retrato de John Wilkinson

En el caso del carburo de tungsteno no se puede mecanizar por arranque de viruta, hay que rectificarlo porque tiene poca flexibilidad geométrica.

MECANIZADO POR HAZ LÁSER (LBM)

El mecanizado por haz láser es un proceso de mecanizado por avance sin contacto basado en la energía térmica. El haz láser se enfoca para fundir y vaporizar el material no deseado de la pieza original. Se emplea para cortar perfiles geoméricamente complejos a elevada velocidad y para realizar orificios de diámetro reducido.

El surgimiento de materiales de ingeniería avanzados, rigurosos requisitos de diseño y materiales de baja maquinabilidad hacen complicado el uso de los métodos convencionales de mecanizado. El mecanizado por haz láser es idóneo para materiales que tienen un alto grado de fragilidad o dureza, y pueden ser vaporizados. El haz láser se puede emplear para procesos de perforación, corte, marcado, soldadura y tratamiento térmico.

El mecanizado por haz láser se emplea en multitud de sectores: sector del automóvil, industria aeronáutica, industria electrónica y sector nuclear. En cuanto a materiales se refiere, habitualmente se emplea en:

- El acero inoxidable, muy empleado en el sector del automóvil y en los electrodomésticos, es ideal para corte por haz láser.
- Los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) mecanizados por haz láser se emplean en el sector del automóvil y la calderería.
- Las láminas de aleación de titanio empleadas en los motores a reacción en la industria aeroespacial son cortadas por haz láser.
- Las aleaciones de aluminio utilizadas en aeronáutica se están empezando a mecanizar con haz láser.
- El mecanizado por láser es un proceso adecuado y utilizado para mecanizar superaleaciones de base de níquel, un importante material aeroespacial.
- Además de metales y aleaciones, el mecanizado por haz láser también se emplea con materiales cerámicos.

Debido a la reciente demanda, algunas empresas especializadas en láseres están empezando a comercializar láseres de precisión, configurados para este tipo de mecanizado. Es importante remarcar que se trata de láseres pulsados, esto quiere decir que emiten luz en forma de pulsos. Los pulsos son de muy corta duración, pudiendo llegar a ser de hasta unos pocos femtosegundos.

Estos láseres de precisión permiten las siguientes aplicaciones: el conseguir un afilado perfecto, la realización de rompevirutas, separación y corte, y la realización de prototipos.

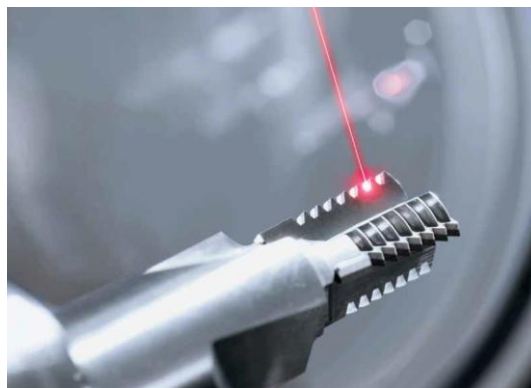


Figura 1.22 Mecanizado por haz láser DMG

2. METODOLOGÍA

En este punto se explica la manera en la que se ha llevado a cabo este proyecto. Se explican las tareas realizadas, los equipos empleados, el desarrollo del proyecto y la aplicación práctica de este.

2.1. DESCRIPCIÓN DE TAREAS Y DIAGRAMA DE GANTT

Los objetivos de este proyecto son el estudio del material carburo de tungsteno y la obtención de los parámetros correctos para la mecanización de este por haz láser. Para cumplimentar estos objetivos se ha propuesto el llevar a cabo las siguientes tareas:

- T1 Revisión bibliográfica: Recopilación de información sobre las disciplinas a estudiar, así como los avances más significativos hasta la fecha.
- T2 Estudio experimental del material: Realización de una matriz de prueba para obtener los primeros parámetros del material.
- T3 Estudio de parámetros de profundidad: Realización de pruebas para obtener los parámetros óptimos del *engraving*.
- T4 Estudio de parámetros de acabado: Realización de pruebas para obtener los parámetros óptimos del *polishing*.
- T5 Aplicación práctica: Llevar a la práctica los parámetros obtenidos en los estudios previos.

A continuación se muestra un diagrama de Gantt (Tabla 2.1), en el cual aparece de forma visual el inicio y final de cada una de las tareas llevadas a cabo en el proyecto

Tabla 2.1 Diagrama de Gantt

TAREAS	FEBRERO				MARZO				ABRIL				MAYO				JUNIO			
	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20
Revisión bibliográfica	■	■	■	■	■	■														
Estudio experimental del material						■	■	■												
Estudio de parametros de profundidad									■	■	■	■	■							
Estudio de parametros de acabado														■	■	■	■			
Aplicación práctica																		■	■	■

2.2. DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS

En este apartado se describirán los equipos empleados para la realización de este proyecto.

LÁSER

Para la realización de este trabajo se ha empleado un láser de marcado Trumark 5050 de la serie 5000, integrado en el puesto de trabajo Trumark Station 5000. Es un láser pulsado de nanosegundos.

Tabla 2.2 Características Láser Trumark 5050

LÁSER DE FIBRA TRUMARK 5050	
	<p>Potencia</p> <p>50 W en continuo 10 kW en modo pulsado</p>
	<p>Longitud de onda</p> <p>1062 ± 3 nm</p>
	<p>Tamaño de haz</p> <p>50 μm</p>
	<p>Rango de duración de pulso</p> <p>Nanosegundos</p>

El láser Trumark 5050 de fibra, combina una alta potencia, altas frecuencias de pulso y una duración de pulso de ajuste variable en el rango de ns. El láser Trumark 5050 tiene una calidad del haz elevada (1,6 M²) y una longitud de onda de 1062 nm

Tabla 2.3 Características del cabezal Trumark 5000

CABEZAL TRUMARK 5000		
	Area de trabajo	110x 110 mm
	Velocidad máxima de escaneo	12 mm/s
	Defocusing máximo	6mm
	Cinemática	Trumark 5000

La Trumark Station 5000 puede ser configurada como puesto de trabajo de pie o sentado. También permite su integración a una línea de producción, gracias a sus aberturas laterales. Mediante a un sistema de aspiración integrado, elimina todo tipo de emisiones generadas.

Tabla 2.4 Características Trumark Station 5000

PUESTO DE TRABAJO TRUMARK STATION 5000		
	Dimensiones max. de la pieza	680mm x 500mm x 700mm
	Dimensiones de la estación	860mm x 2000mm x 1310mm
	Recorrido del eje X	300mm
	Recorrido del eje Y	300mm
	Recorrido del eje Z	500mm
	Avance eje X	6 m/min
	Avance eje Y	6 m/min
	Avance eje Z	1,5 m/min

El marcado de este láser se realiza mediante un programa de CAD que viene instalado en el ordenador que la Trumark Station 5000 lleva integrado. Mediante este programa se pueden dibujar las formas deseadas o introducir el texto deseado para su grabado, también permite importar archivos .dwg de otros programas CAD mas completos como por ejemplo el Autocad o el Solidworks.

HERRAMIENTAS PARA EL ANÁLISIS

Para la obtención de topografías se ha empleado un microscopio confocal Leica DCM3D.

Tabla 2.5 Características Leica DCM3D

MICROSCOPIO CONFOCAL LEICA DCM3D		
 A photograph of the Leica DCM3D microscope, showing its white and blue body mounted on a black base with a perforated surface. The microscope is positioned on the left side of the table.	Modelo	Leica DCM3D
	Aumentos	Hasta x150
	Resolución vertical	< 2nm en x150
	Número de luces	Blanca y azul
	Principio de medición	Confocal o interferometría

Leica Microsystems es una compañía que desarrolla y fabrica microscopios e instrumentos ópticos para el análisis de microestructuras y nanoestructuras. La compañía es una de las líderes del mercado en microscopía.

El DCM3D es de tecnología de doble núcleo y ha sido diseñado para el análisis rápido y sin contacto de estructuras microscópicas y nanoestructuras en superficies técnicas.

El sistema combina la tecnología confocal con la interferometría para realizar mediciones a alta velocidad con una resolución de hasta 0,1nm.

Mediante los softwares LeicaScan y LeicaMap se obtienen y se tratan las topografías.

Para el estudio de los datos obtenidos con el el Leica DCM3D se ha empleado el programa Matlab, de la compañía Mathworks.

La compañía Mathworks, fundada en 1984 y con sede en Massachusetts, es líder en desarrollo de software de cálculo matemático para ingenieros y científicos.

2.3. DESARROLLO

Para realizar los pertinentes ensayos en un metal duro (Carburo de tungsteno), se han cortado por electroerosión dos herramientas enterizas de fresado de diámetro 20 mm, obteniendo unas probetas de 20 mm de diámetro y de 5 mm de grosor. Debido a que tras la electroerosión se muestra una leve capa de óxido en la superficie de la probeta, a causa del cobalto, antes de llevar a cabo cualquier acción con las probetas, se ha realizado una pasada de "limpieza" con el láser, para la eliminación de esa capa de óxido. Los parámetros de limpieza son: velocidad de avance 7000 mm/s, frecuencia de pulso 190 kHz y duración del pulso 40 ns.



Figura 2.1 Fresa empleada para la obtención de probetas

En este punto se describirán los pasos que se han llevado a cabo para la obtención de los parámetros óptimos del carburo de tungsteno para poder realizar un mecanizado por haz láser.

TAREA 1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

En primer lugar, la primera tarea realizada ha sido la búsqueda de información referente a todo lo relacionado con este proyecto: el láser, el

mecanizado por haz láser, el carburo de tungsteno,... Una vez encontrada toda la información y antecedentes posibles, y tras leerlos, se comenzó con las tareas prácticas.

TAREA 2: ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL MATERIAL

Debido a que no se conocían previamente los parámetros de arranque de material, la segunda tarea llevada a cabo ha sido la realización mediante el láser de una matriz de prueba en una de las probetas para poder conocer cuales son los mejores parámetros del láser a la hora de arrancar material mediante *engraving*.

Las variables del láser que se han estudiado han sido las siguientes:

- Potencia (w)
- Velocidad (mm/s)
- Frecuencia de pulso (kHz)
- *Defocusing* (Nivel de desenfoque del láser) (mm)
- *Number of hatching* (Numero de pasadas)

La matriz de prueba llevada a cabo es una matriz de 6 filas x 5 columnas, formada por cuadrados, que graba el láser en la probeta arrancando material. Las filas se enumeran con letras de la A a la E, y las columnas se enumeran del 0 al 5. Esta matriz se configura en el programa CAD que lleva integrado la estación láser. En la matriz de prueba, entre filas se varía la velocidad del láser, y entre columnas se varía la frecuencia de pulso.

Los parámetros de la matriz de prueba son los siguientes:

Tabla 2.6 Configuración del *hatching* para matriz de prueba

Hatching	
Line spacing: 0,05mm	Angle increment: 17°
Hatching angle: 0°	Beveled angle: 0°
Number of hatchings: 50	Alternating: <input checked="" type="checkbox"/>

El número de pasadas (*Nº of hatching*) se mantiene constante en todos los cuadrados de la matriz de prueba. En cada pasada la cantidad de material eliminado es de pocos μm . Para poder medir el resultado se han empleado 50 pasadas.

A continuación se indican los valores del láser en cada uno de los cuadrados de la matriz de prueba:

Tabla 2.7 Parámetros para matriz de prueba

#	Power	Velocity	P. Frequency	P. Duration
A0	100%	800 mm/s	144 kHz	55 ns
A1	100%	800 mm/s	201kHz	37 ns
A2	100%	800 mm/s	258 kHz	27 ns
A3	100%	800 mm/s	315 kHz	23 ns
A4	100%	800 mm/s	372 kHz	20 ns
A5	100%	800 mm/s	429 kHz	17 ns
B0	100%	1100 mm/s	144 kHz	55 ns
B1	100%	1100 mm/s	201kHz	37 ns
B2	100%	1100 mm/s	258 kHz	27 ns
B3	100%	1100 mm/s	315 kHz	23 ns
B4	100%	1100 mm/s	372 kHz	20 ns
B5	100%	1100 mm/s	429 kHz	17 ns
C0	100%	1400 mm/s	144 kHz	55 ns
C1	100%	1400 mm/s	201kHz	37 ns
C2	100%	1400 mm/s	258 kHz	27 ns

C3	100%	1400 mm/s	315 kHz	23 ns
C4	100%	1400 mm/s	372 kHz	20 ns
C5	100%	1400 mm/s	429 kHz	17 ns
D0	100%	1700 mm/s	144 kHz	55 ns
D1	100%	1700 mm/s	201kHz	37 ns
D2	100%	1700 mm/s	258 kHz	27 ns
D3	100%	1700 mm/s	315 kHz	23 ns
D4	100%	1700 mm/s	372 kHz	20 ns
D5	100%	1700 mm/s	429 kHz	17 ns
E0	100%	2000 mm/s	144 kHz	55 ns
E1	100%	2000 mm/s	201kHz	37 ns
E2	100%	2000 mm/s	258 kHz	27 ns
E3	100%	2000 mm/s	315 kHz	23 ns
E4	100%	2000 mm/s	372 kHz	20 ns
E5	100%	2000 mm/s	429 kHz	17 ns

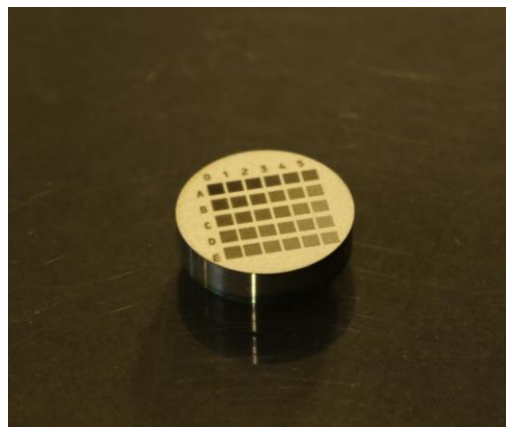


Figura 2.2 Matriz de prueba

Una vez obtenida la matriz de prueba se estudió cada uno de los cuadrados, estudiando los siguientes puntos:

- M1: Punto mas alto del extremo izquierdo
- M2: Punto mas alto del extremo derecho
- B1: Punto mas bajo del extremo izquierdo
- B2: Punto mas bajo del extremo derecho
- D: Distancia entre la superficie y el punto mas bajo de la zona regular
- R: Diferencia entre el punto mas alto y el punto mas bajo de la zona regular

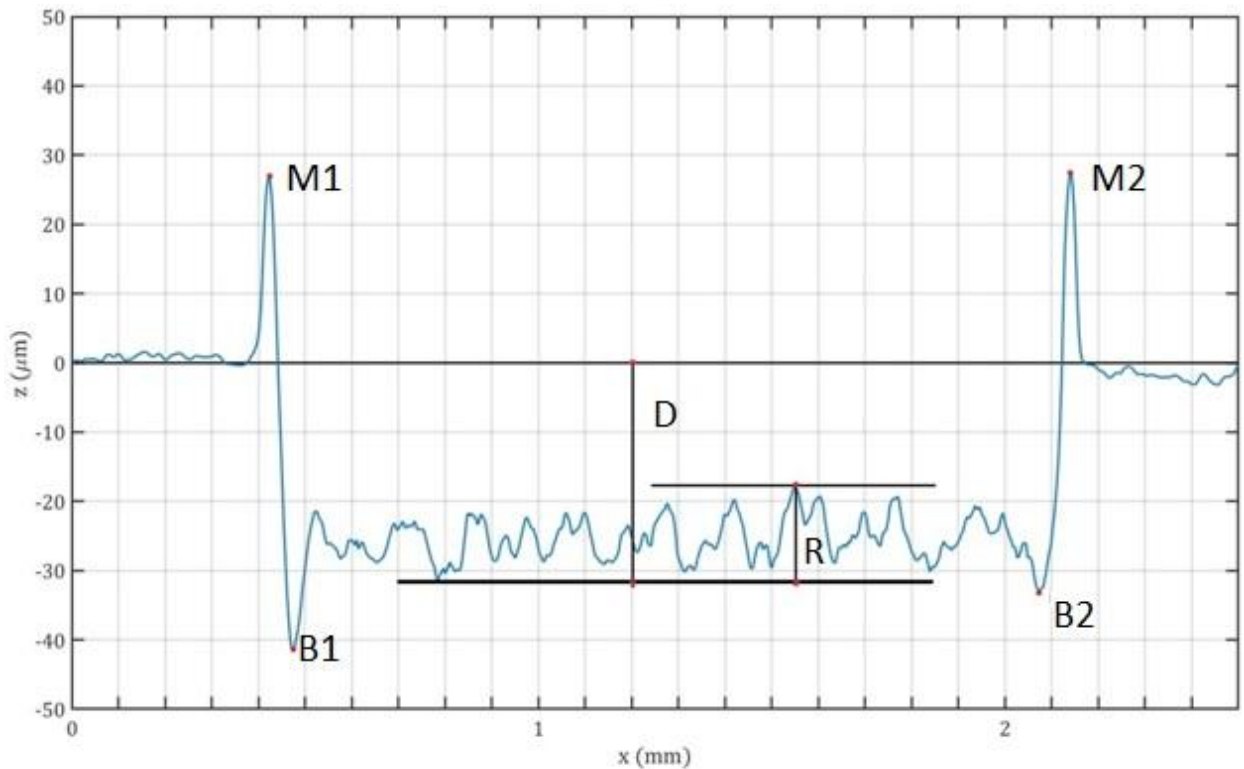


Figura 2.3 Puntos a estudiar

Para obtener cada uno de estos puntos, se han llevado a cabo mediciones 3D con x10 aumentos en el microscopio confocal Leica DCM3D.

Una vez obtenidas las topografías del Leica, se obtuvieron los perfiles medios de cada una de las pruebas, empleando un programa específico en Matlab para el análisis de los resultados. Con estos perfiles medios se consiguieron los puntos de la Figura 2.3 de todos los cuadrados de la matriz de prueba.

Tabla 2.8 Puntos obtenidos de la matriz de prueba

Fila A									
Identificador	Velocity (mm/s)	P. Freq (kHz)	P. Dur (ns)	D (μm)	R (μm)	M1 (μm)	M2 (μm)	B1 (μm)	B2 (μm)
0	800	144	55	31,53	13,56	26,82	27,28	-41,6	-32,89
1		201	37	31,42	20,81	21,55	17,16	-44,16	-26,24
2		258	27	23,42	19,48	18,85	19,12	X	X
3		315	23	23,32	25,1	15,69	7,63	-5,28	-12,75
4		372	20	17,25	18,71	12,12	6,42	X	X
5		429	17	X	X	X	X	X	X
Fila B									
Identificador	Velocity (mm/s)	P. Freq (kHz)	P. Dur (ns)	D (μm)	R (μm)	M1 (μm)	M2 (μm)	B1 (μm)	B2 (μm)
0	1100	144	55	24,45	13,04	17,64	21,9	-32,25	-24,48
1		201	37	21,23	11,83	15,24	9,27	-32,48	-20,4
2		258	27	17,77	13,12	13,73	9,99	-25,03	-19,9
3		315	23	12,48	13,08	15,98	10,1	-14,26	-5,93
4		372	20	13,66	12,69	10,73	1,98	-8,79	X
5		429	17	13,3	12,65	10	10	-9,83	-9,72
Fila C									
Identificador	Velocity (mm/s)	P. Freq (kHz)	P. Dur (ns)	D (μm)	R (μm)	M1 (μm)	M2 (μm)	B1 (μm)	B2 (μm)
0	1400	144	55	24,89	10,13	14,85	17,5	-35,14	-28,21
1		201	37	20,13	13,93	13,68	10,62	-25,67	-18,21
2		258	27	14,95	11,61	14,36	9,66	-17,98	-14,48
3		315	23	X	12,11	X	X	X	X
4		372	20	X	11,2	X	X	X	X
5		429	17	X	10,48	X	X	X	X
Fila D									
Identificador	Velocity (mm/s)	P. Freq (kHz)	P. Dur (ns)	D (μm)	R (μm)	M1 (μm)	M2 (μm)	B1 (μm)	B2 (μm)
0	1700	144	55	25,43	8,99	13,68	10,97	-34,9	-30,34
1		201	37	15,74	8,54	12,11	12,63	-19,8	-11,84
2		258	27	16,83	14,93	12,5	5,24	-12,54	-12,45
3		315	23	X	12,16	X	X	X	X
4		372	20	X	8,61	X	X	X	X
5		429	17	X	8,34	X	X	X	X
Fila E									
Identificador	Velocity (mm/s)	P. Freq (kHz)	P. Dur (ns)	D (μm)	R (μm)	M1 (μm)	M2 (μm)	B1 (μm)	B2 (μm)
0	2000	144	55	26,38	10,68	15,59	8,74	-35,92	-33,71
1		201	37	18,06	9,39	10,57	9,5	-22,94	-19,31
2		258	27	X	12,02	X	X	X	X
3		315	23	X	11,64	X	X	X	X
4		372	20	X	9,21	X	X	X	X
5		429	17	X	7,28	X	X	X	X

TAREA 3: ESTUDIO DE PARAMETROS DE PROFUNDIDAD

Una vez obtenidos los valores de la matriz de prueba, se decidió estudiar cuanto material se podía arrancar manteniendo la coordenada Z del láser constante.

Como lo deseado era conocer cuanto podía profundizar el láser en el material, teniendo en cuenta la tabla de la matriz de prueba (Tabla 2.8), era necesario fijarse en el punto D, esto es, la profundidad entre la superficie y el punto mas bajo de la zona regular. Valorando los datos de la tabla de la matriz de prueba las configuraciones del láser que más habían profundizado la probeta eran A0 y A1.

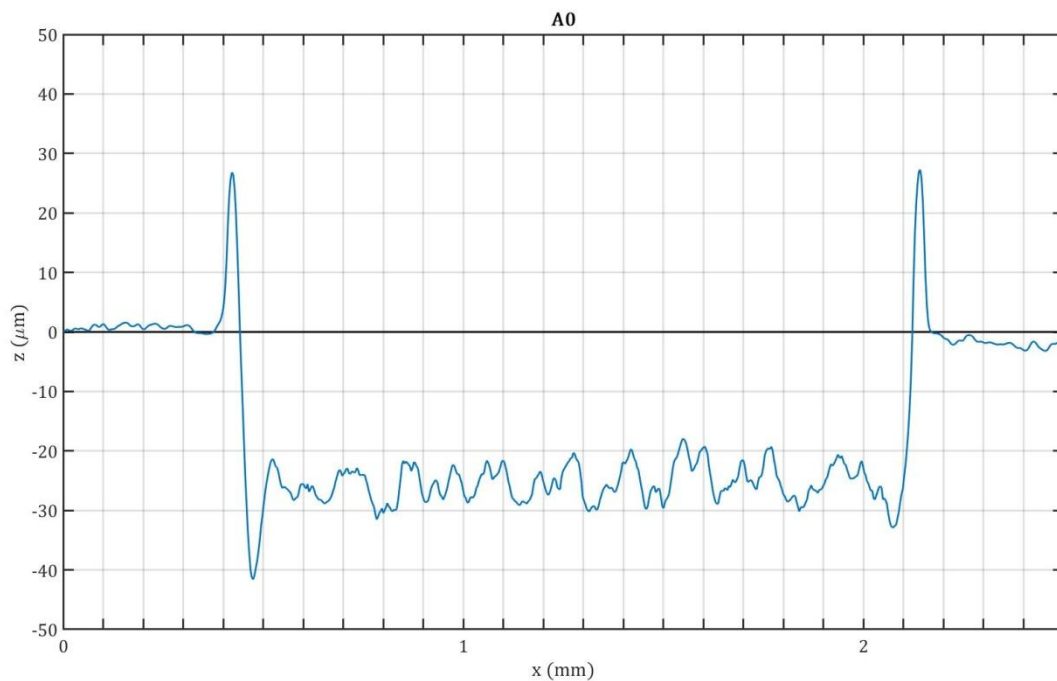


Figura 2.4 Perfil medio A0

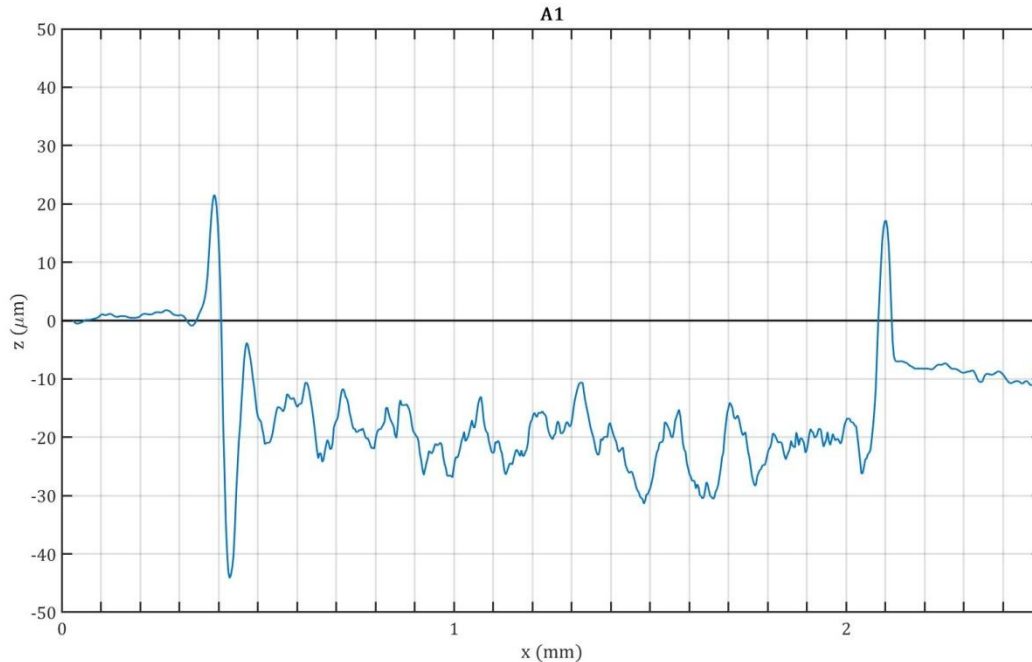


Figura 2.5 Perfil medio A1

Pese a que A0 y A1 profundizaban prácticamente lo mismo, como tenía mejor acabado A0 se decidió elegir el parámetro de A0. Esto es:

- Potencia: 100%
- Velocidad: 800 mm/s
- Frecuencia de pulso: 144 kHz
- Duración de pulso: 55 ns

Una vez seleccionado el parámetro A0, era necesario estudiar la variación de la profundidad variando el número de pasadas. Para ello se realizaron con el láser en las probetas cuadrados de 5 mm de ancho x 5 mm de largo, aumentando el número de pasadas. Para obtener las topografías de estas pruebas, se realizó una topografía simple con x5 aumentos.

De cara a obtener la máxima profundidad, se llevaron a cabo nuevos ensayos aumentando el número de pasadas. En primer lugar, comenzando por 50 pasadas, como en la matriz de prueba, se comenzó aumentando en 25 el número de pasadas hasta llegar a una prueba de 250 pasadas.

Tabla 2.9 Profundidad de 50 a 250 pasadas

Nº pasadas	Probeta	Profundidad
50	M1	30μ
75	M1	40μ
100	M1	47μ
125	M1	60μ
150	M1	70μ
175	M2	90μ
200	M2	90μ
225	M2	100μ
250	M2	115μ

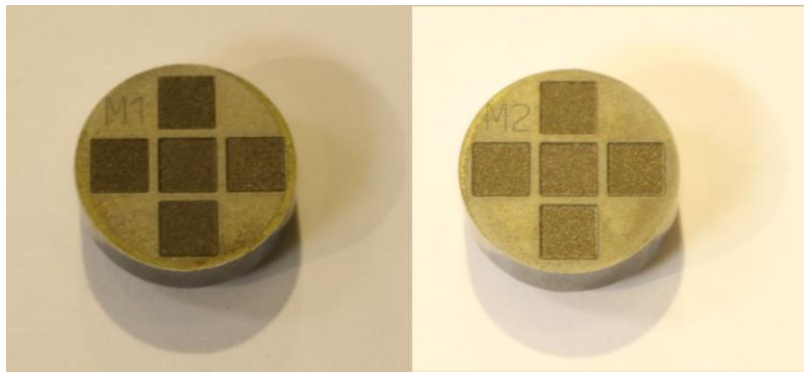


Figura 2.6 Probetas M1 y M2

A partir de las 250 pasadas viendo que seguía aumentando la profundidad, se decidió aumentar la diferencia entre pruebas a 50 pasadas en lugar de las 25 iniciales, llegando a las 750 pasadas.

Tabla 2.10 Profundidad de 300 a 750 pasadas

N° pasadas	Probeta	Profundidad
300	M4	125μ
350	M4	140μ
400	M4	145μ
450	M4	150μ
500	M4	165μ
550	M5	210μ
600	M5	215μ
650	M5	230μ
700	M5	240μ
750	M5	250μ

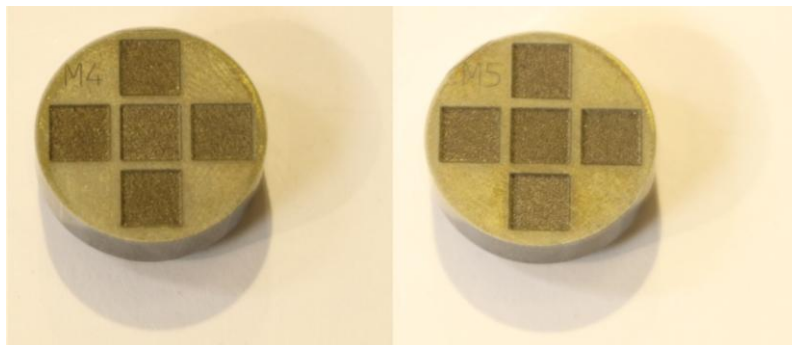


Figura 2.7 Probetas M4 y M5

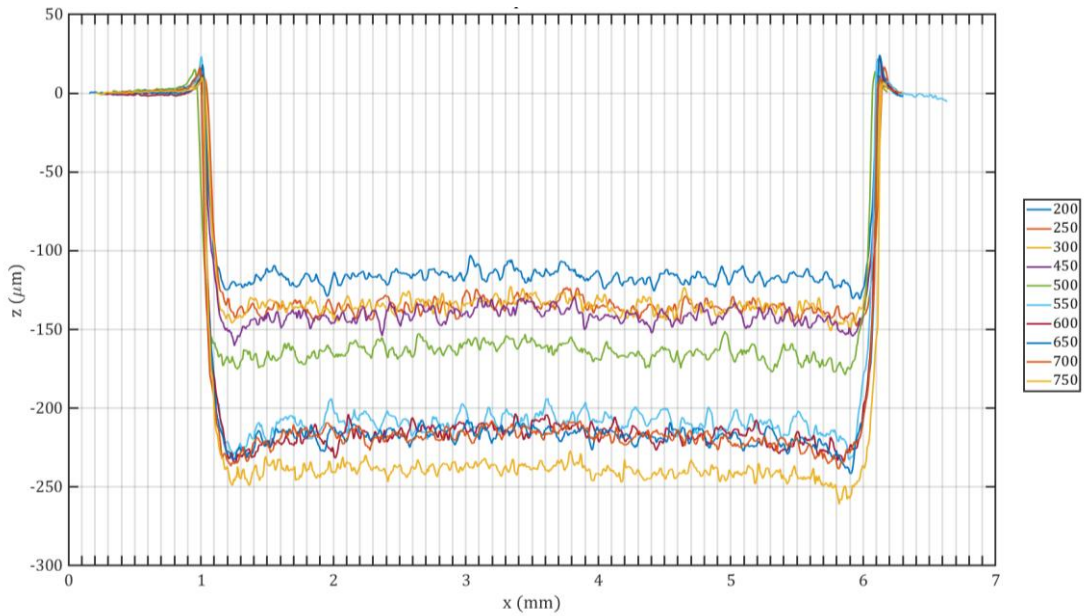


Figura 2.8 Perfiles superpuestos de 200 a 750 pasadas

A partir de las 750 pasadas se decidió aumentar considerablemente el número de pasadas para encontrar el límite a partir del cual es necesario volver a ajustar la distancia focal.

Tabla 2.11 Profundidad de 1500 a 9000 pasadas

Nº pasadas	Probeta	Profundidad
1500	M6	475μ
3000	M6	825μ
4000	M6	925μ
5000	M6	950μ
6000	M7	1030μ
7000	M7	1207μ
8000	M7	1214μ
9000	M7	1256μ

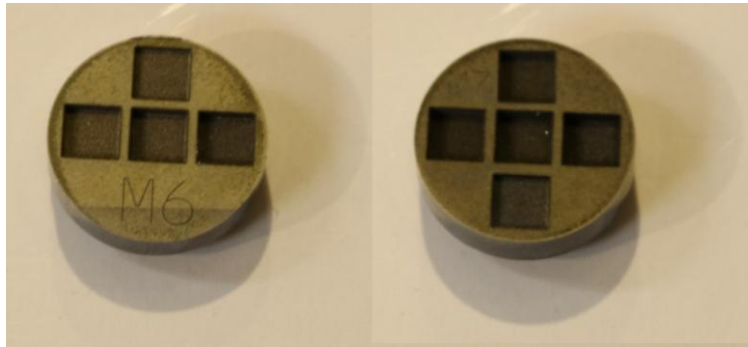


Figura 2.9 Probetas M6 y M7

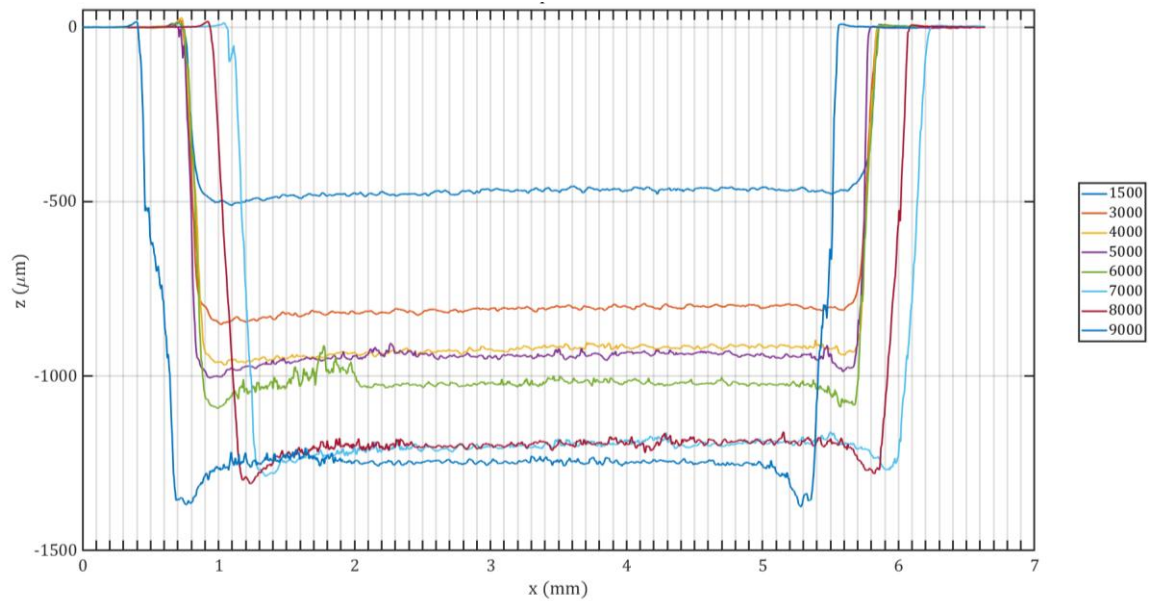


Figura 2.10 Perfiles superpuestos de 1500 a 9000 pasadas

En la Figura 2.11 se puede apreciar la tendencia del material. Como se puede apreciar, en las últimas pasadas apenas gana profundidad.

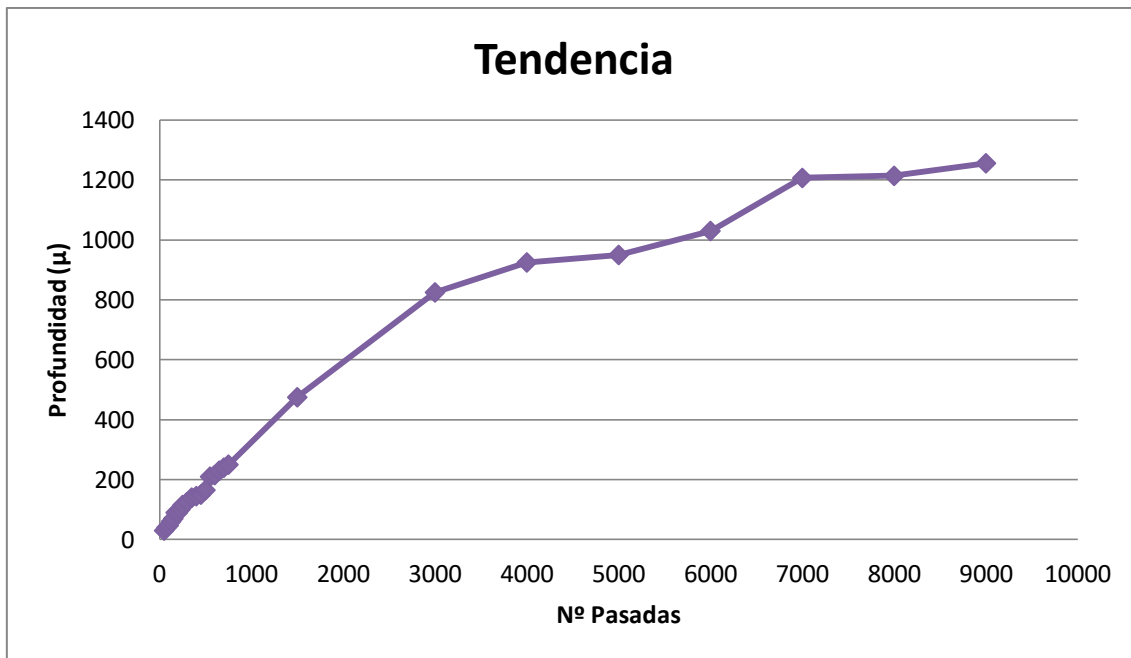


Figura 2.11 Gráfico de la tendencia del material

Finalmente se calcularon los mm^3 que arranca el láser al carburo de tungsteno por hora, llegando este a ser de $43,4 \text{ mm}^3/\text{hora}$

TAREA 4: ESTUDIO DE PARAMETROS DE ACABADO

Debido a la rugosidad superficial resultante del *engraving*, se consideró necesario llevar a cabo un estudio sobre parámetros para la mejora superficial.

Para ello, como punto inicial se tomó la configuración de láser E5 de la matriz de prueba, dado que era el que daba la superficie más regular, esto es, el punto R mas bajo. Los parámetros del E5 son:

- Potencia: 100%
- Velocidad: 2000 mm/s
- Frecuencia de pulso: 429 kHz
- Duración de pulso: 17 ns

Mediante el Leica DCM3D se midió la rugosidad inicial de la superficie del carburo de tungsteno.

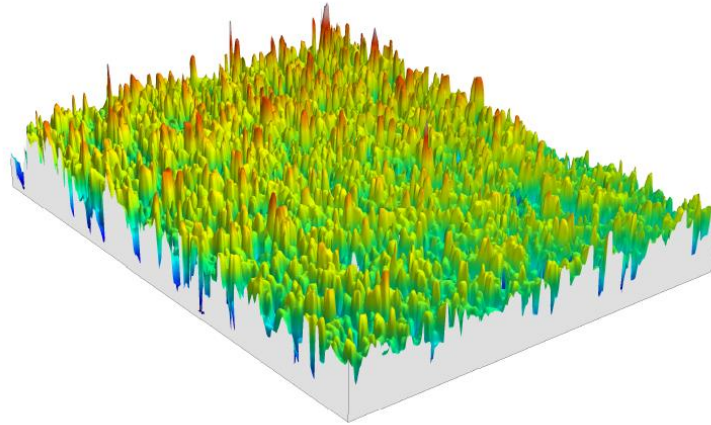


Figura 2.12 Topografía rugosidad inicial

Se obtuvo una rugosidad S_a de $20 \mu\text{m}$, esto se consiguió gracias a la realización de tres topografías simples con x5 aumentos en tres lugares diferentes de la superficie, y calculando la media de estas.

Se calculó un solape del 90% entre pasadas y se decidió tomar un *defocusing* inicial del láser de 4 mm.

Tras un par de pruebas a velocidades y frecuencias muy bajas que no resultaron óptimas, se comenzó a probar el cambio de número de pasadas.

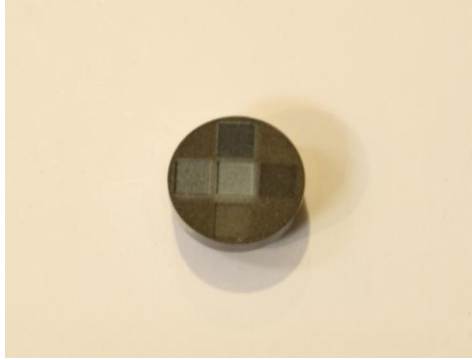


Figura 2.13 Probeta P1

Una vez quedó claro que las pasadas adecuadas eran 500, se varió la frecuencia de pulso, obteniendo como mejor resultado los 429 kHz.

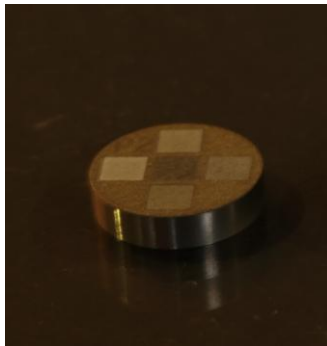


Figura 2.14 Probeta P2

El siguiente parámetro que se varió fue el desenfoque, probando el desenfoque desde 1 hasta 6 mm, dando el mejor resultado los 4 mm de desenfoque seleccionados inicialmente.

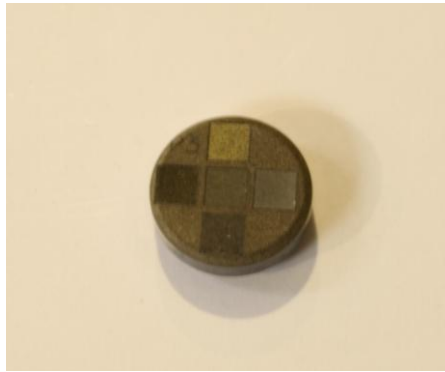


Figura 2.15 Probeta P3

Por último, tras haber sido empleada una velocidad de 2000 mm/s la gran parte de pruebas, se probaron velocidades levemente mayores e inferiores para comprobar si el resultado mejoraba de alguna de estas dos maneras. Tras medir la rugosidad de estas pruebas la velocidad con la que se obtenía el mejor resultado era 2000 mm/s.

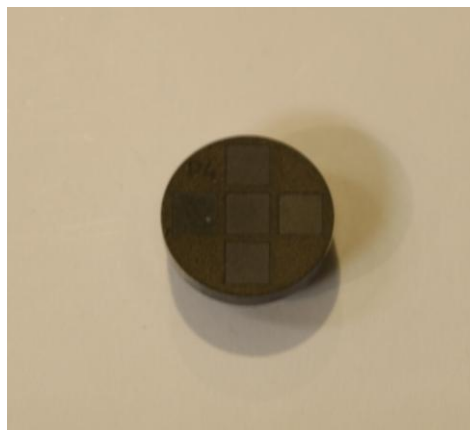


Figura 2.16 Probeta P4

Para la obtención del perfil del área de cada una de las pruebas realizadas en las probetas, se realizó con el Leica DCM3D una topografía enlazada para poder analizar cada una de las pruebas completas. La topografía enlazada permite realizar una medición extendida de una zona que no es posible medir en una única topografía simple. El usuario selecciona el

número de mediciones y el propio Leica las une dando como resultado una única topografía.

Para la obtención de la rugosidad de cada una de las pruebas, se analizó mediante Matlab cada una de las topografías obtenidas mediante el Leica. El programa de evaluación de rugosidad de Matlab está basado en la norma ASME B46 1-2002. Analiza y filtra los resultados obtenidos del Leica, y da como resultado dos rugosidades de la superficie, uno la rugosidad del barrido del eje X (S_a), y otro la rugosidad del barrido del eje Y (S_a perp). Por lo tanto la rugosidad de cada prueba es la media de los dos resultados.

Tabla 2.12 Tabla de rugosidades y % de mejora

Nº Pasadas	Frecuencia (kHz)	Velocidad (mm/s)	Defocusing (mm)	Probeta	Rugosidad (m)	% Mejora
20	180	50	4	P1	12,5	37,5
10	180	10	4	P1	10,6	47
5	180	5	4	P1	11,6	42
100	429	2000	4	P1	11,8	41
300	429	2000	4	P1	11,3	43,5
500	429	2000	4	P2	7,2	64
700	429	2000	4	P2	7,2	64
100	700	2000	4	P2	12	40
300	700	2000	4	P2	11,2	44
500	700	2000	4	P2	7,2	64
500	429	2000	1	P3	12,6	37
500	429	2000	2	P3	13,9	30,5
500	429	2000	3	P3	11,6	42
500	429	2000	5	P3	12,5	37,5
500	429	2000	6	P3	15	25
500	429	3000	4	P4	12,6	37
500	429	2500	4	P4	12,1	39,5
500	429	2750	4	P4	12,5	37,5
500	429	1500	4	P4	13,41	33

En los resultados obtenidos, hasta tres configuraciones del láser dan el mismo porcentaje de mejora, el 64%, reduciendo la rugosidad desde los 20µm hasta los 7,2µm. Por ello se seleccionó como mejor parámetro el que

se obtenía en menos pasadas y con menor frecuencia de pulso. Por ello los parámetros de la mejor configuración del láser obtenidos fueron:

- N° de pasadas: 500
- Velocidad: 2000 mm/s
- Frecuencia de pulso: 429 kHz
- Duración de pulso: 17 ns
- Desenfoque (*Defocusing*): 4 mm

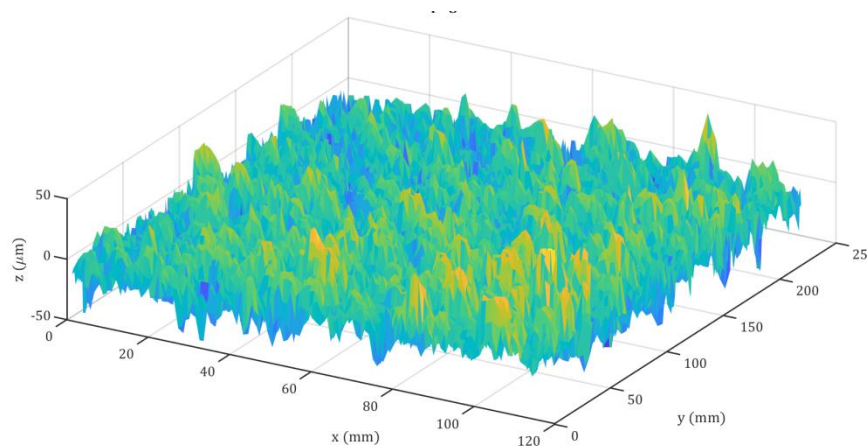


Figura 2.17 Topografía de la mejor rugosidad

Pese a haber reducido la rugosidad de $20\ \mu\text{m}$ a $7,2\ \mu\text{m}$, un porcentaje de mejora de un 64 %, la rugosidad final resulta elevada. Esto se debe a que el punto de fusión de los elementos que componen el material es muy diferente. El punto de fusión del Wolframio es de 3422°C , mientras que el del cobalto es de 1495°C . Esto hace que sea imposible mejorar el acabado del material mediante este método más allá de los $7,2\ \mu\text{m}$.

TAREA 5: APLICACIÓN PRÁCTICA

Una vez obtenidos los mejores parámetros de grabado y pulido del carburo de tungsteno, se decidió llevarlos a la práctica mecanizando por haz láser una plaquita para fresa de corte para acabado.



Figura 2.18 Estado inicial de la pieza a mecanizar

Al ser una plaquita sinterizada, esta no presenta rompevirutas, por lo que se decidió que sería interesante diseñar un rompevirutas para la plaquita, con la intención de mejorar el funcionamiento en el corte de materiales dúctiles. Para ello, se tomaron las dimensiones de la pieza para poder realizar el diseño mediante un programa CAD. Se diseñó el rompevirutas mediante el programa SolidWorks.

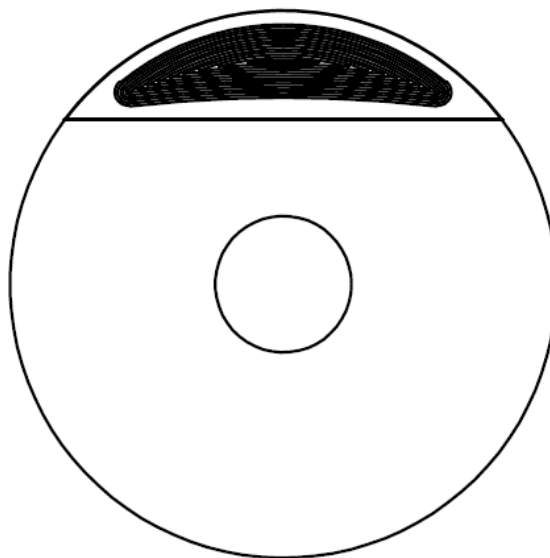


Figura 2.19 Diseño del rompevirutas

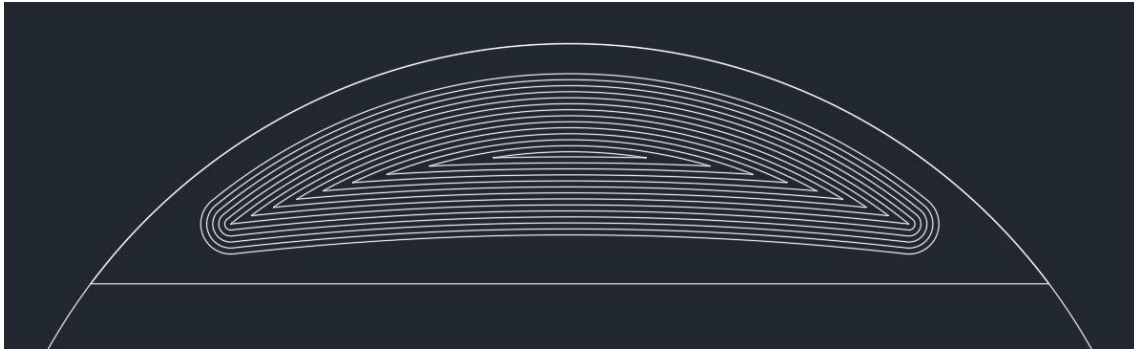


Figura 2.20 Detalle del diseño del rompevirutas

Se decidió profundizar 100 μm por pasada, por lo tanto teniendo en cuenta lo analizado en el estudio de los parámetros de profundidad (Punto 4.3.2), los parámetros para el láser fueron:

- Potencia: 100%
- Velocidad: 800 mm/s
- Frecuencia de pulso: 144 kHz
- Duración de pulso: 55 ns
- 225 pasadas

Una vez realizado el diseño, se importó al programa CAD de la estación Trumark 5000 .

Tras realizar una prueba con estos parámetros y este diseño sobre una probeta, se decidió probar también otros dos diseños alternativos: uno realizando una pared en la media luna y rampa en el lado recto, y otro realizando una pared en el lado recto y una rampa en la media luna. Esto se consiguió descentrando el diseño original hacia arriba para la primera alternativa, y descentrando hacia abajo para la segunda alternativa.



Figura 2.21 Probeta con diseño original y diseños descentrados

Una vez plasmados estos diseños sobre la probeta, se midieron las profundidades obtenidas:

- Diseño original: 687,1 μm

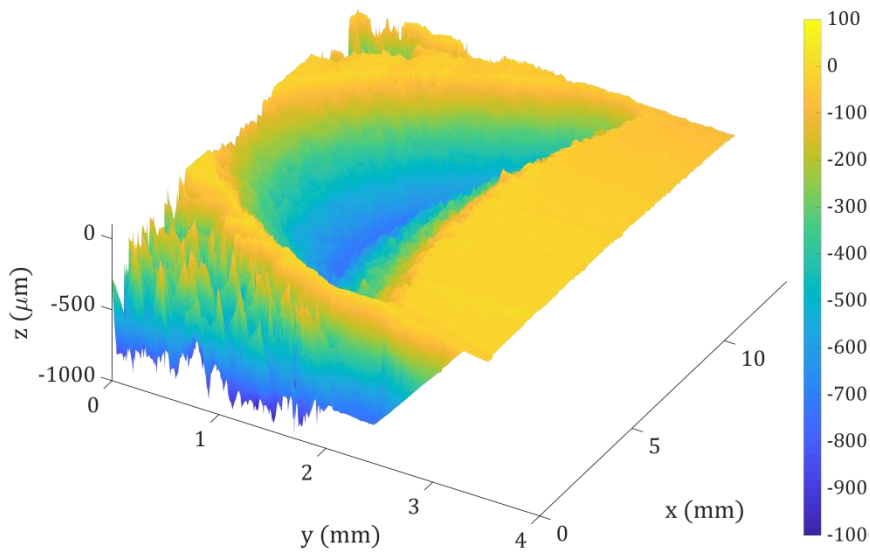


Figura 2.22 Topografía RV diseño original

- Diseño desplazado hacia arriba: 665 μm

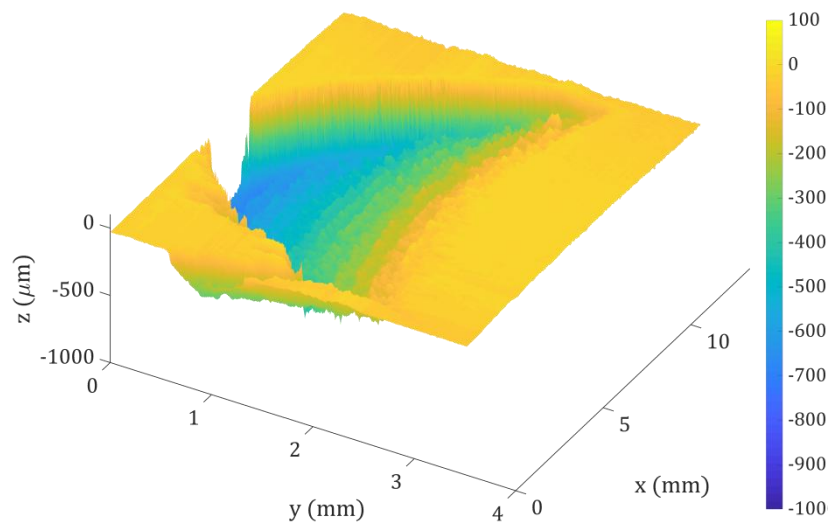


Figura 2.23 Diseño RV desplazado hacia arriba

- Diseño desplazado hacia abajo: 710 μm

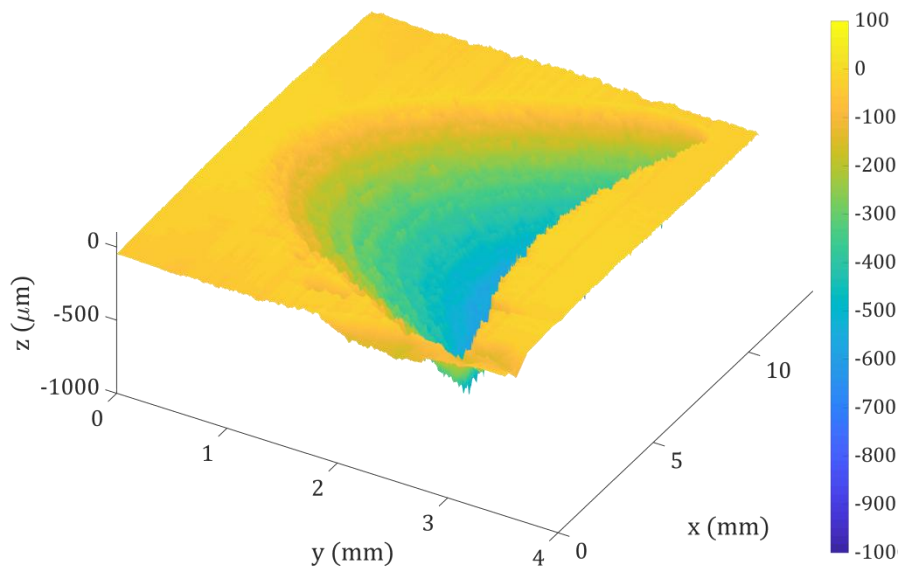


Figura 2.24 Diseño RV desplazado hacia abajo

Una vez vistos los resultados sobre la probeta, se decidió optar por el diseño original.

Tras esto se probaron sobre otra probeta menos pasadas de las realizadas en las primeras pruebas: 150 y 100 pasadas.

- 150 pasadas: 534,6 μm

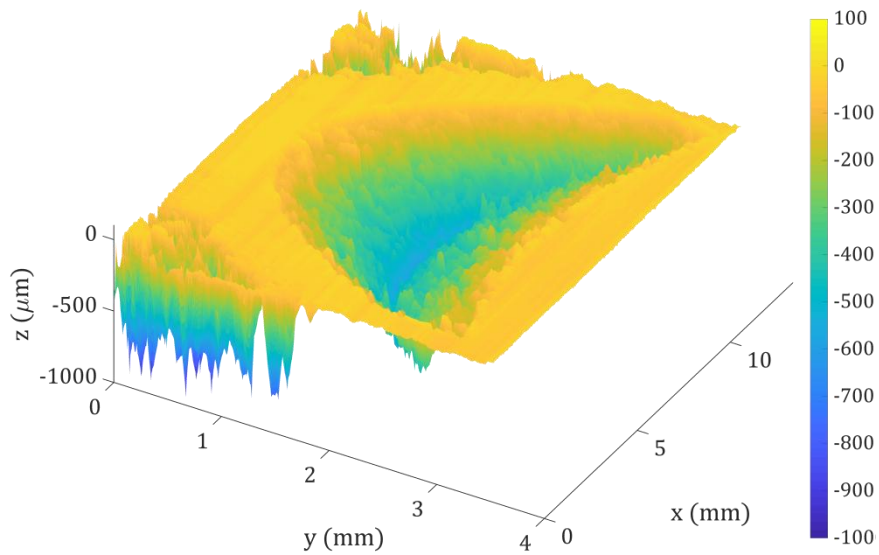


Figura 2.25 Topografía RV 150 pasadas

- 100 pasadas: 415,3 μm

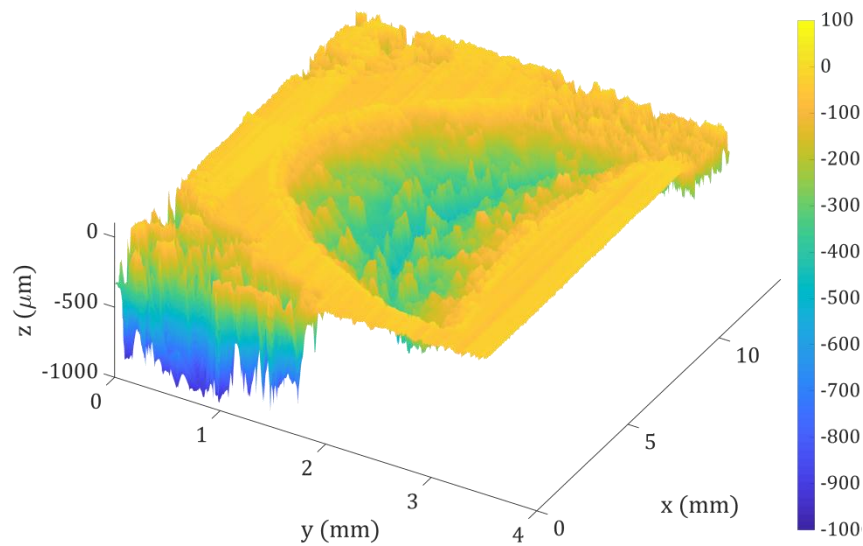


Figura 2.26 Topografía RV 100 pasadas

Tras estos resultados se decidió mantener las 225 pasadas.

Para el acabado se tomaron los mejores valores obtenidos en el estudio de los parámetros de acabado (Tarea 4), que fueron los siguientes:

- Pasadas: 500
- Velocidad: 2000 mm/s
- Frecuencia de pulso: 429 kHz
- Duración de pulso: 17 ns
- Desenfoque (*Defocusing*): 4 mm

El pulido se calculó hacerlo a la distancia de la mitad de la profundidad obtenida tras el *engraving*. En el diseño original se consiguieron 687,1 μm de profundidad, por lo que para realizar la pasada de pulido era necesario situar el cabezal del láser a 343 μm .

Se probó el diseño final, que era la suma del diseño original y la pasada de pulido, en una probeta antes de realizarlo sobre la plaquita.

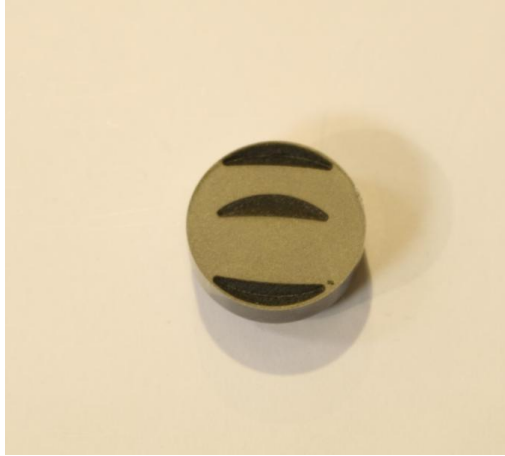


Figura 2.27 Probeta con 100,150 pasadas y diseño final

Tras completar con éxito el diseño final en la probeta, se dio el paso de realizar el diseño final del rompevirutas sobre la plaquita. El diseño fue necesario realizarlo dos veces en la plaquita, dado que tenía la misma forma por ambas caras.



Figura 2.28 Resultado final del rompevirutas por la cara A

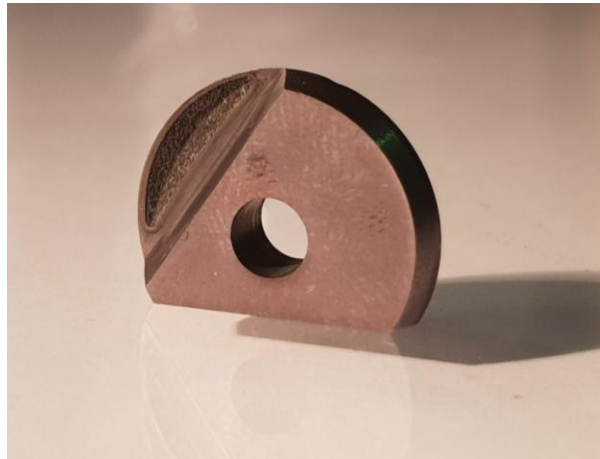


Figura 2.29 Resultado final del rompevirutas por la cara B

También se realizaron topografías del resultado final (Figura 2.30 y Figura 2.31)

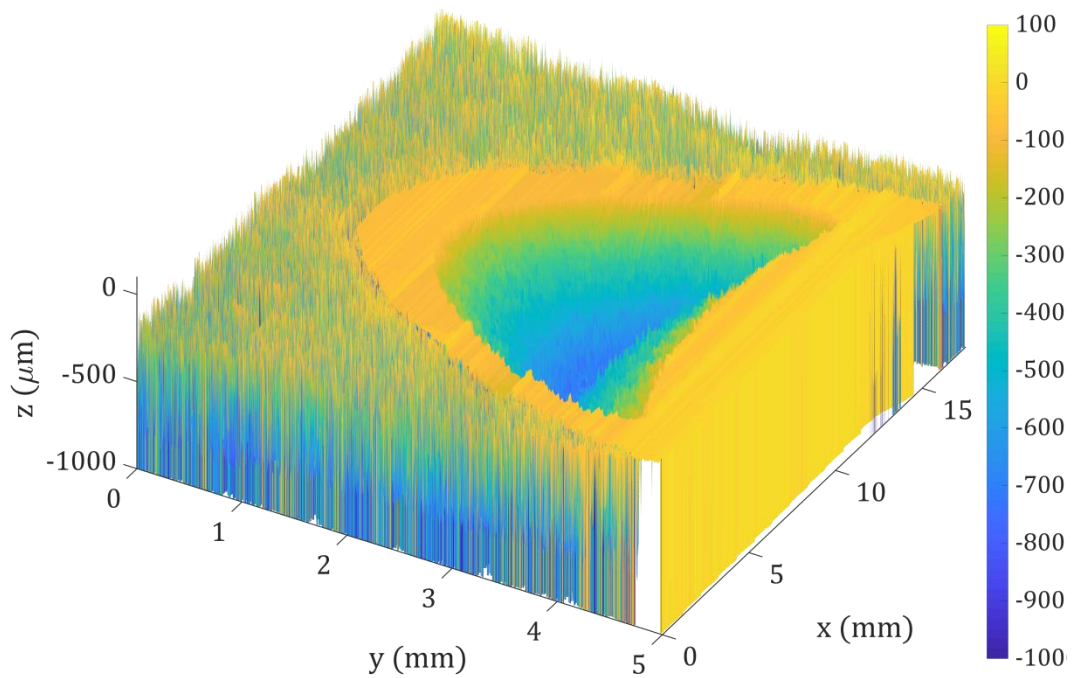


Figura 2.30 Topografía del resultado final por cara A

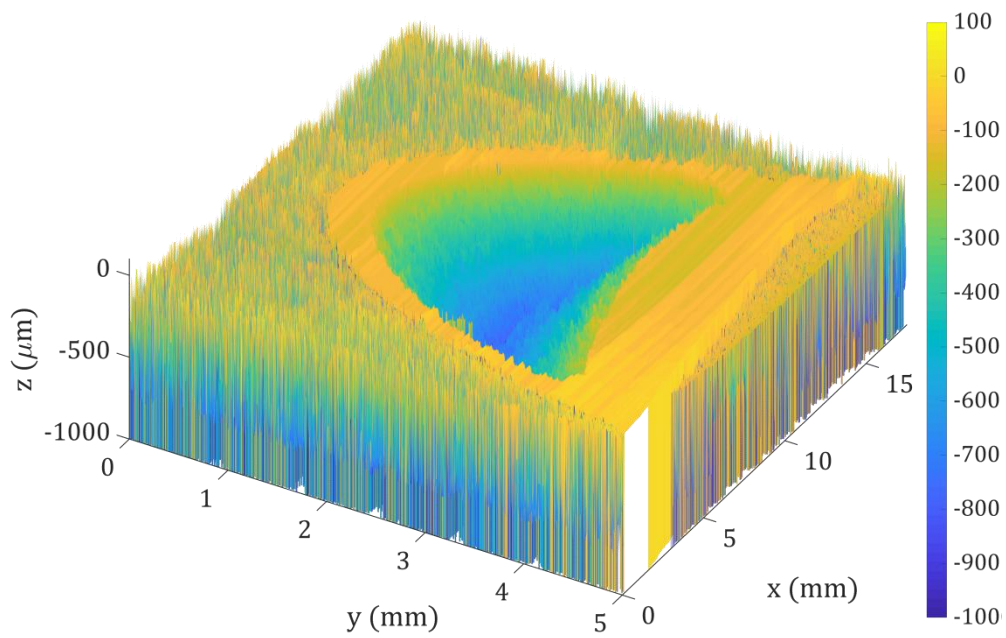


Figura 2.31 Topografía del resultado final por la cara B



Figura 2.32 Plaquita montada

3. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Para finalizar el estudio se recopilan las conclusiones obtenidas tras la realización de todas las tareas y la propuesta de líneas futuras.

En primer lugar, una vez finalizado el estudio de los parámetros de profundidad (Tarea 3), se aprecia que se pueden profundizar en un carburo de tungsteno $1207\mu\text{m}$ (7000 pasadas) sin que se desenfoque el láser. Aumentando las 7000 pasadas quedó claro que el láser no consigue profundizar más en el material.

En el estudio de los parámetros de acabado (Tarea 4), ha quedado claro que mediante pulido láser solo es posible obtener una mejora del 64% como mucho, debido a la diferencia de los puntos de fusión, que hace que solo se funda uno de los elementos.

Tras la realización del rompevirutas en la plaquita de corte (Tarea 5), se puede concluir que el mecanizado láser es un proceso muy útil en la elaboración de rompevirutas en piezas sinterizadas.

A modo de líneas futuras, respecto al estudio de parámetros de profundidad (Tarea 3), sería muy útil calcular a que número de pasadas sería óptimo volver a enfocar el cabezal láser, para reducir tiempos en los trabajos con el láser. Pese a saber que hasta las 7000 pasadas profundiza de manera notoria, sería interesante comparar si enfocando el cabezal láser antes de llegar a estas pasadas se consigue el mismo resultado en menos tiempo.

El posible estudio para el futuro derivado del estudio de los parámetros de acabado (Tarea 4), es el intentar lograr un acabado superficial mejor al obtenido, empleando otros métodos diferentes.

Otro posible estudio, esta vez como consecuencia de la realización del rompevirutas (Tarea 5), es el estudio de qué otras piezas sinterizadas se pueden modificar mediante el mecanizado láser para la mejora de su rendimiento.

Para finalizar las líneas futuras, la metodología empleada en este proyecto podría ser empleada para el estudio de otros materiales de los cuales no se tengan parámetros para el mecanizado láser.

4. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Aboites, V., *El láser*. (Fondo de cultura económica. Mexico. 1991, 1ª Ed. electrónica) Págs. 9-10
- [2] Gordon J. P., Zeiger H. J., y Townes C. H., "The Maser – New type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer" *Phys. Rev.*, 99, 1264 (1955)
- [3] Shampo M. A., Kyle R. A., y Steensma D.P., "Nikolai Basov – Nobel Prize for Lasers and Masers." *Mayo Clin. Proc.* 87, e3 (2012)
- [4] [6] Maiman, T. H., *The Laser Odyssey*. (Laser Pr. USA. 2001. 1ª Ed.) Págs. 45-98
- [5] Maiman T. H., "Stimulated Optical Radiation in Ruby." *Nature*, 187, 493-494 (1960)
- [7] Javan A., Bennett Jr., W. R., y Herriott D. R., "Population Inversion and Continuous Optical Maser Oscillation in a Gas Discharge Containing a He – Ne Mixture." *Phys. Rev. Lett.*, 6, 106 (1961)
- [8] Steen W. M., y Mazumder j., *Laser Material Processing*. (Springer. UK. 2010. 4ª Ed.) Cap. 11
- [9] Sands D., *Diode Lasers*. (IOP Publishing. UK. 2005. 1ª Ed.) Cap. 1
- [10] Mukhtavak k., y Uphadyaya A. K., *Applied Physics*. (I. K. International Publishing House Pvt. Ltd. India. 2010. 1ª Ed.) Cap. 8

- [11] Hecht J., "Short History of Laser Development." *Optical Engineering*, 49(9), 091002 (2010)
- [12] Bromberg, J. L., *The Laser in America 1950-1970*. (MIT Press. USA. 1993 , 2ª Edición) Págs 167-171.
- [13] Chapline G. y Wood L., "X- Ray Lasers." *Phys. Today*, 40-8 (1975)
- [14] Aboites, V., *El láser*. (Fondo de cultura económica. Mexico. 1991, 1ª Ed. electrónica) Págs. 9-10
- [15] Chichkov B. N., "Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids." *Appl. Phys. A63*, 109-115 (1996)
- [16] Vuylsteke A. A., "Theory of Laser Regeneration Switching." *J. Appl. Phys.* 34, 1615 (1963)
- [17] Temmler A., Willenborg E., y Wissenbach K., "Laser polishing." *Proceedings Volume 8243, Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XVII; 82430W* (2012)
- [18] Chryssolouris, G., *Laser Machining: Theory and Practice*. (Springer Science + Business Media. USA. 1991, 1ª Edición) Cap. 6
- [19] Durit página web. Metal duro, Junio 2018
- [20] Appold, H., Feiler, K., Reinhard, A., y Schmidt, P., *Tecnología de los metales*. (Editorial Reverté. España. 1985, 1ª Edición) Cap. 2
- [21] Boothroyd G., y Knight W., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. (Marcel Dekker, Basel, 1995, 1ª Ed.)

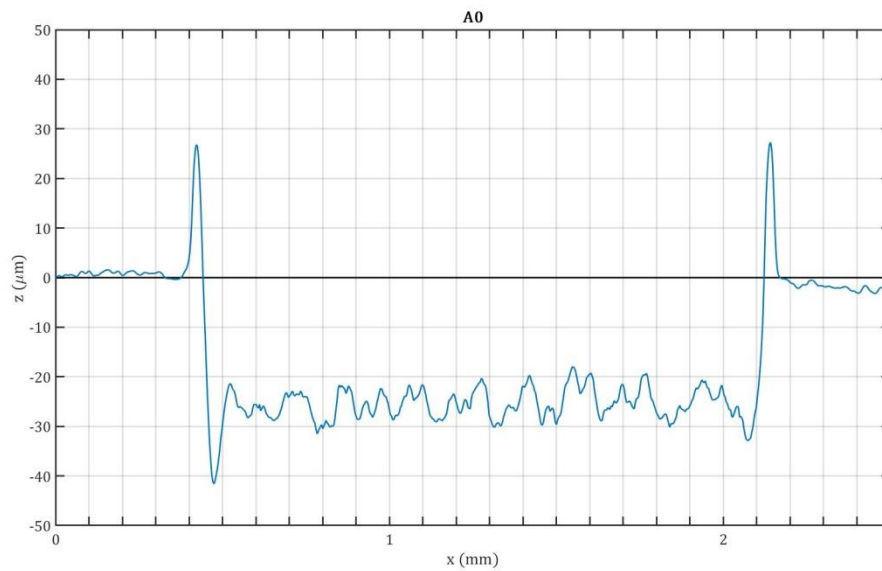
[22] Faura F., y López J., *Fundamentos de fabricación*. (ICE-Universidad de Murcia, Murcia, 1998)

[23] Dubey A.K. y Yadava V., " Laser beam machining." *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 48, 609-628 (2008)

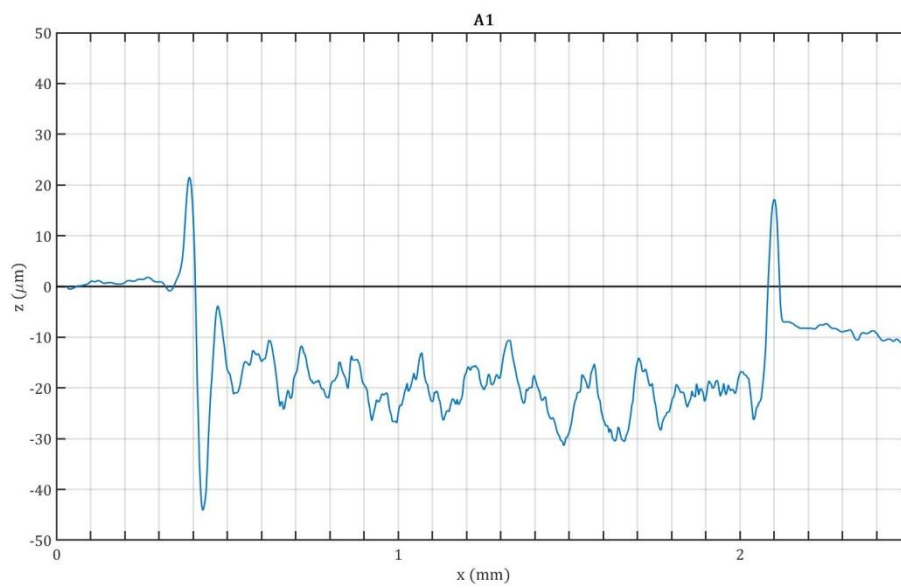
[24] DMG Mori página web, Lasertec Series, Junio 2018

ANEXO I: PERFILES MEDIOS DE MATRIZ DE PRUEBA

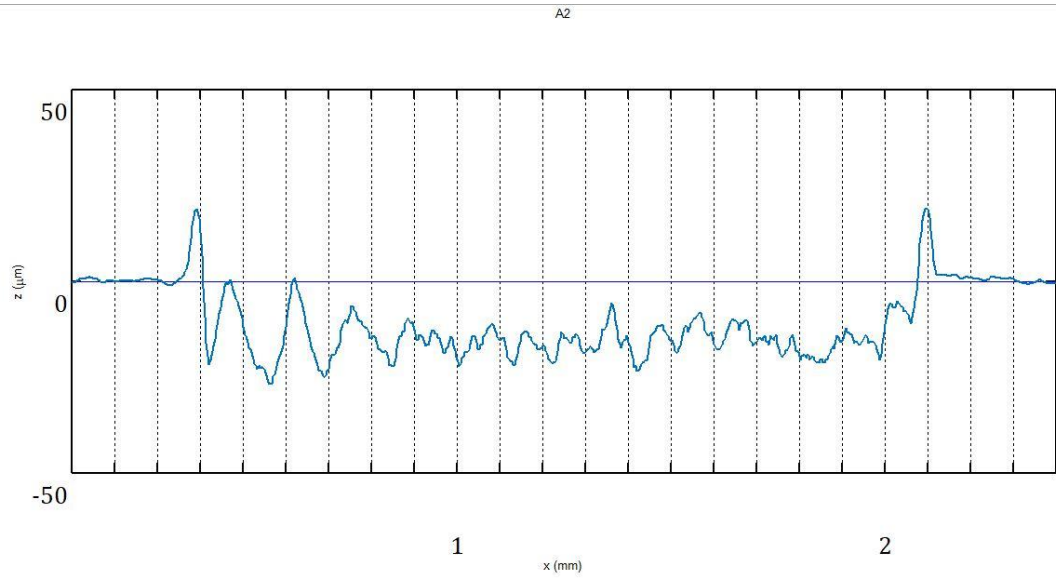
- A0:



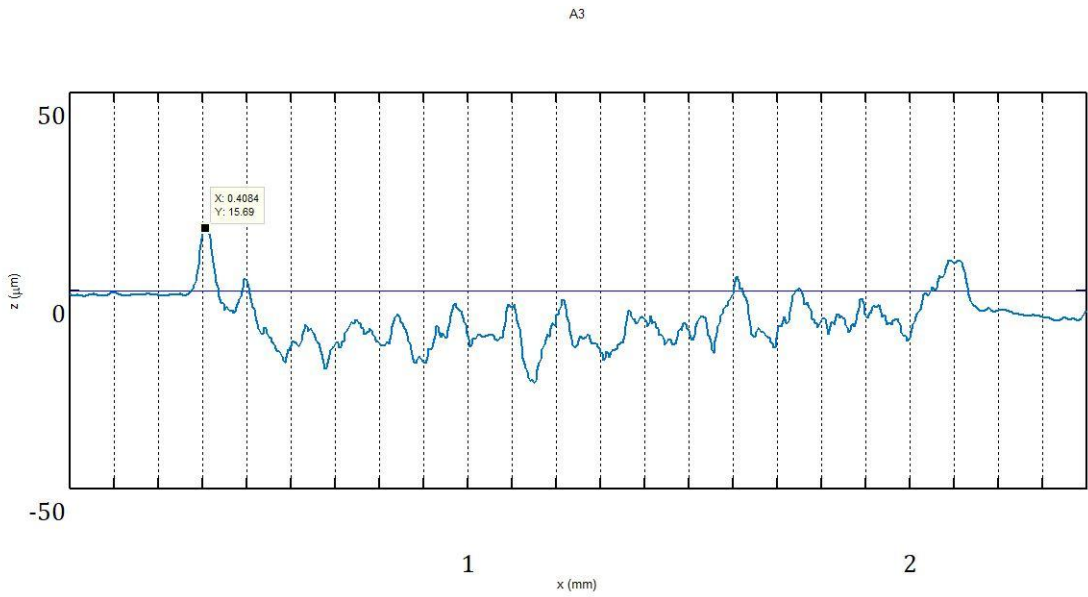
- A1:



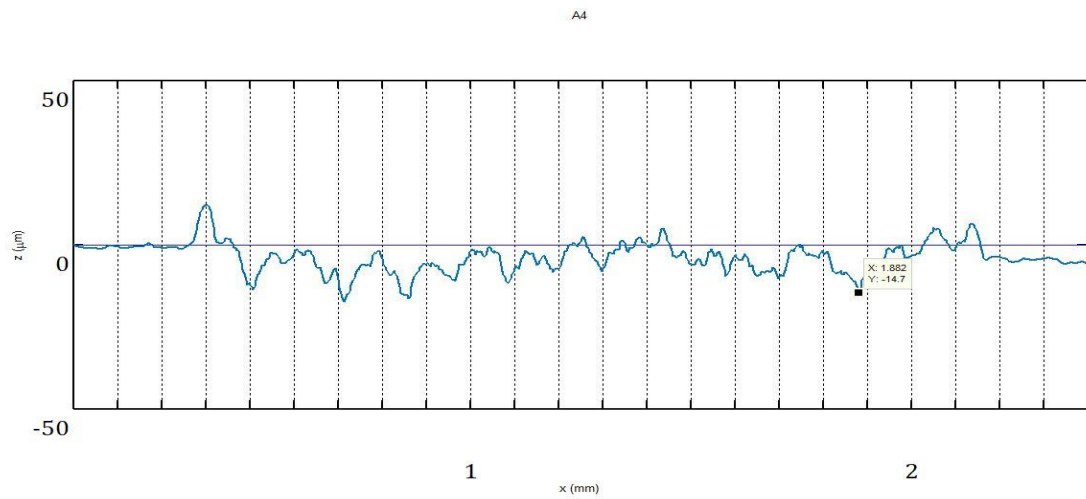
- A2:



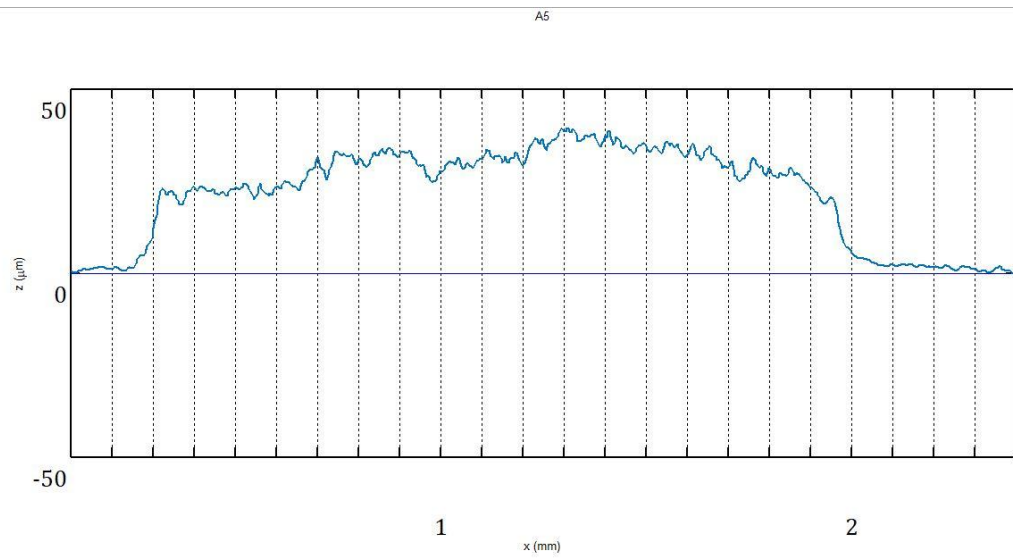
- A3:



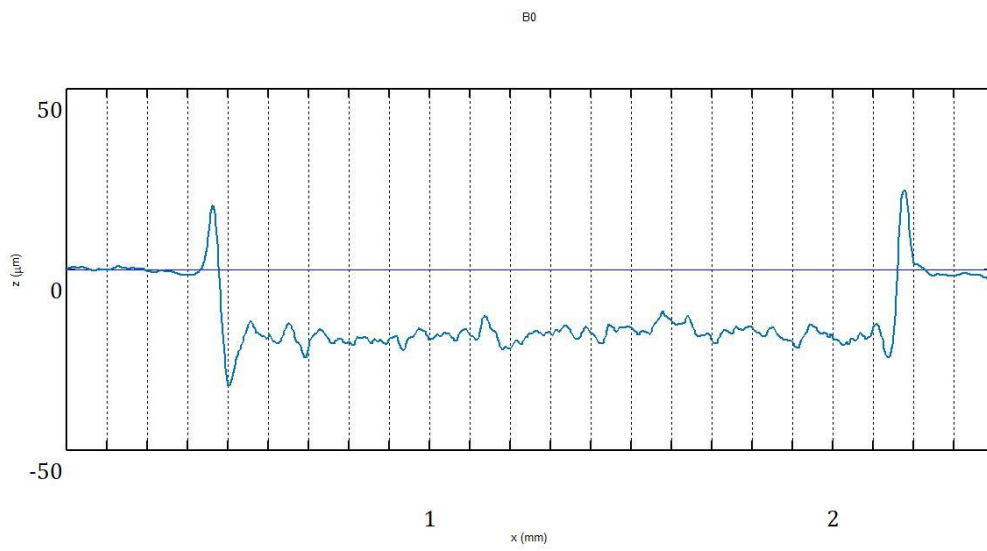
- A4:



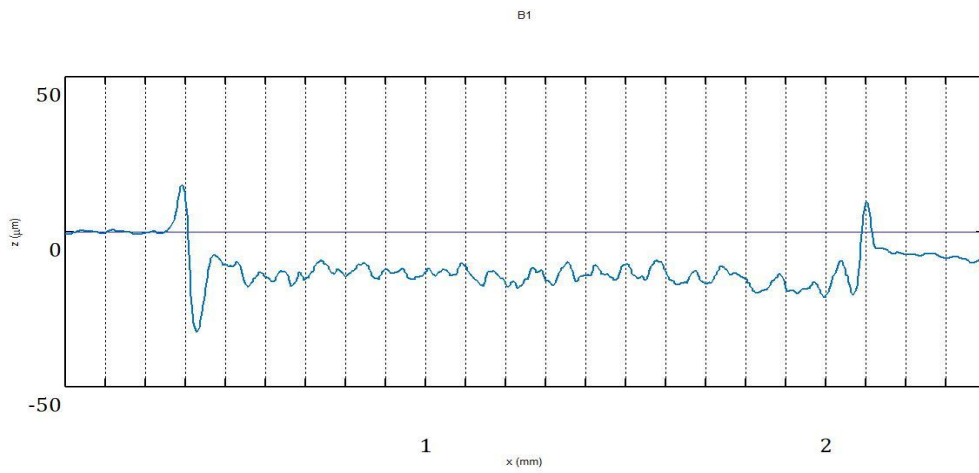
- A5:



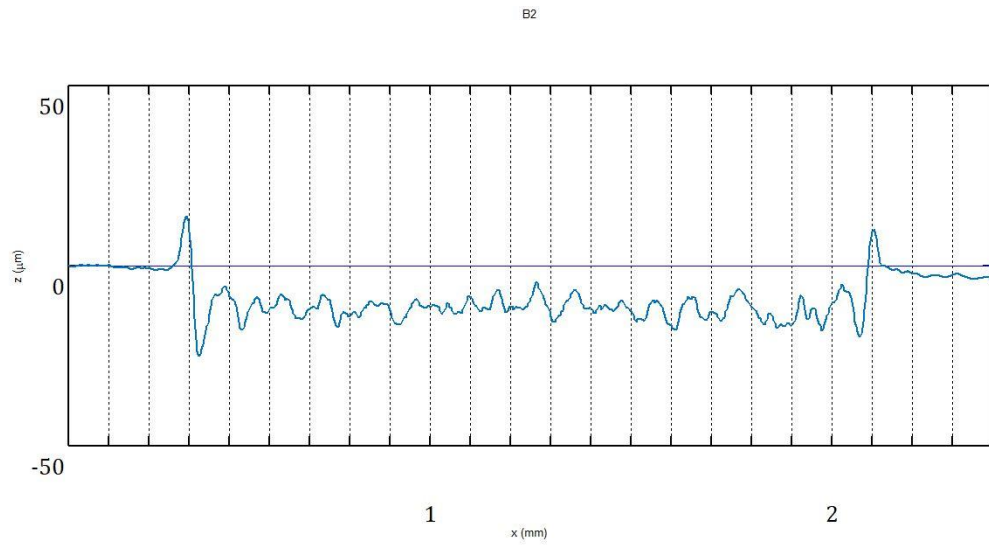
- B0:



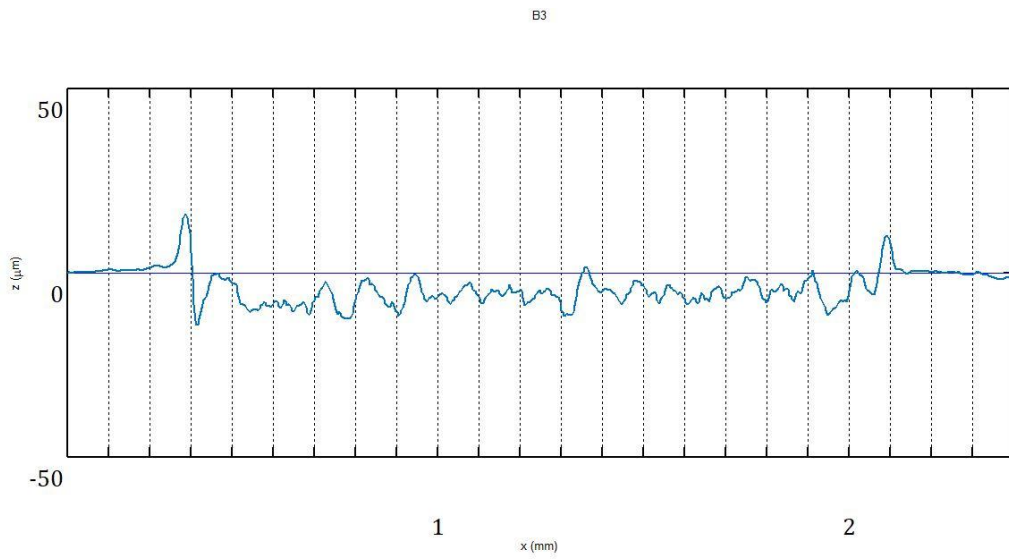
- B1:



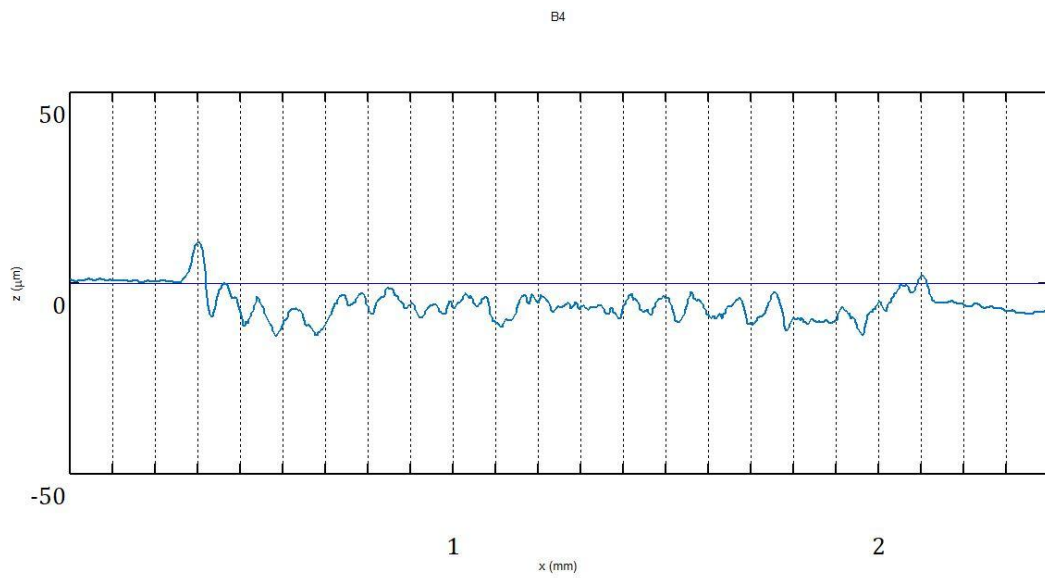
- B2:



- B3:

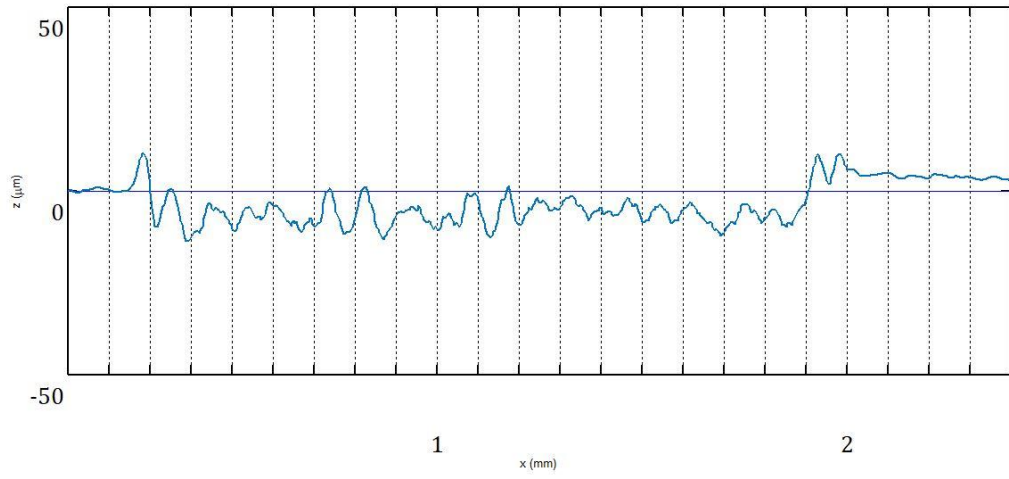


- B4:



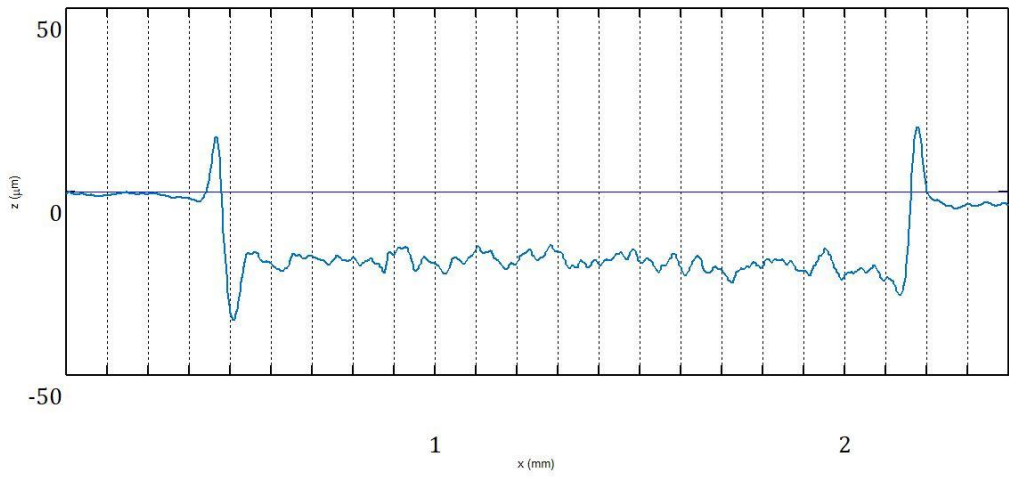
- B5:

B5



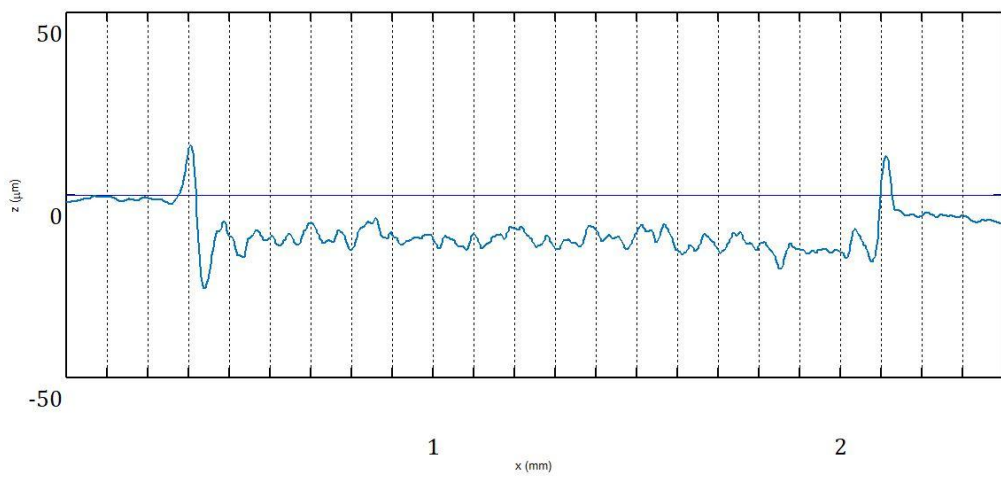
- C0:

C0

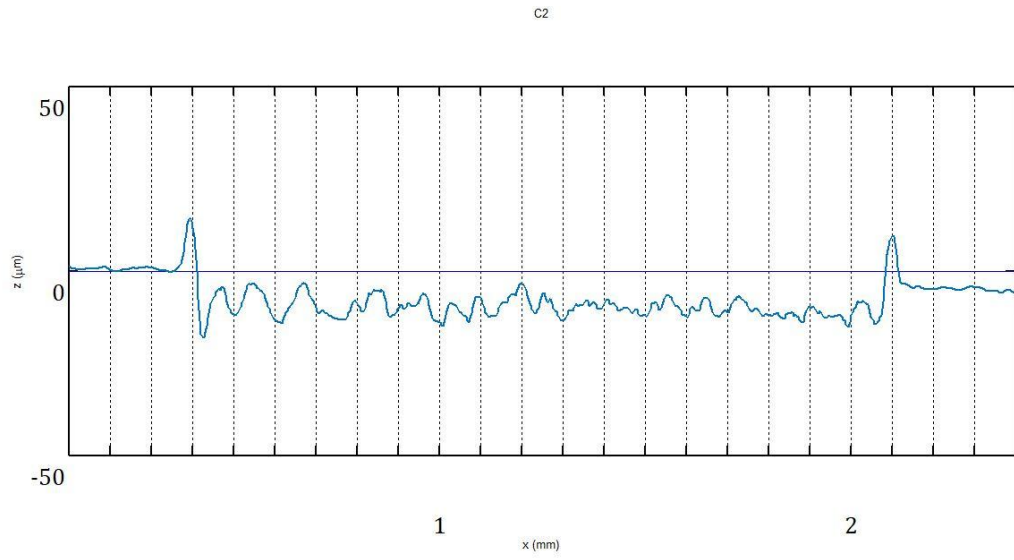


- C1:

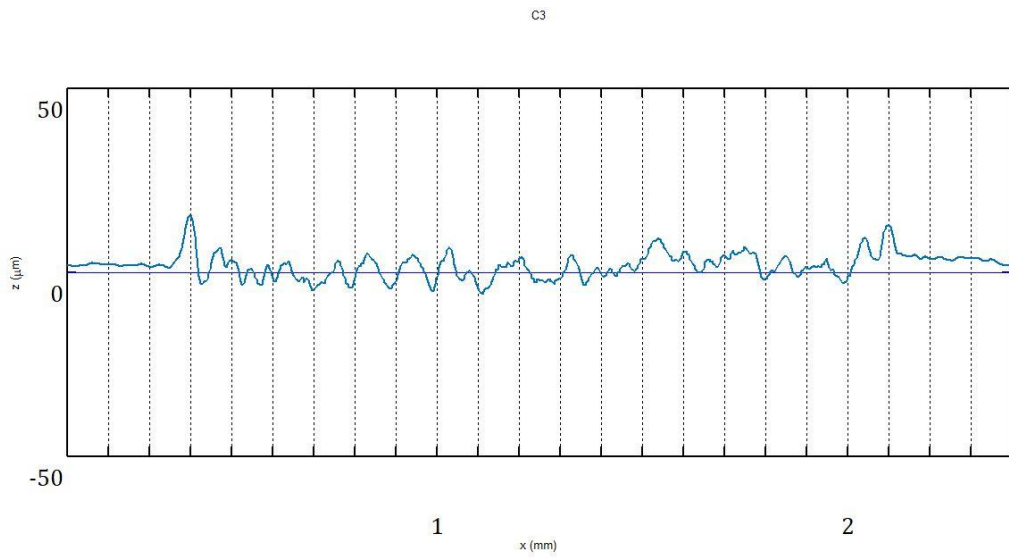
C1



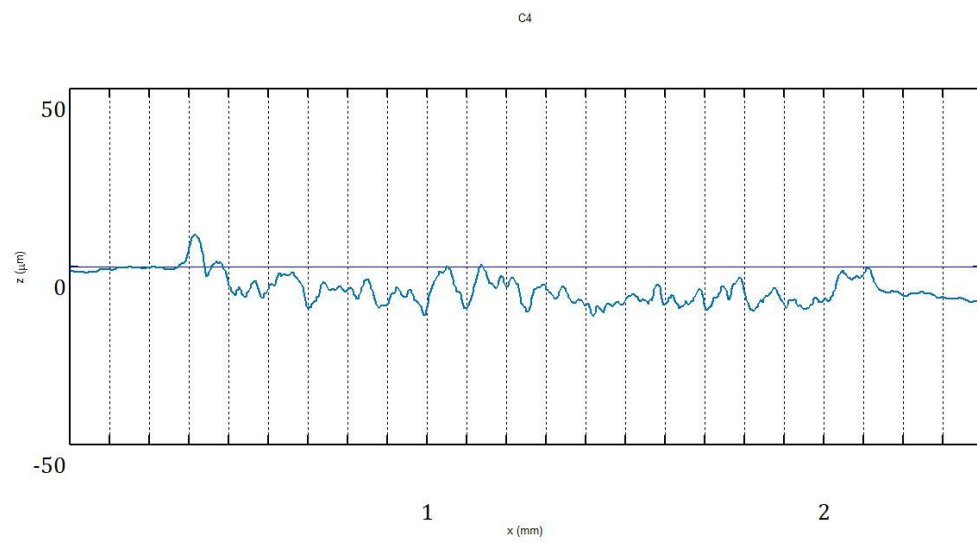
- C2:



- C3:

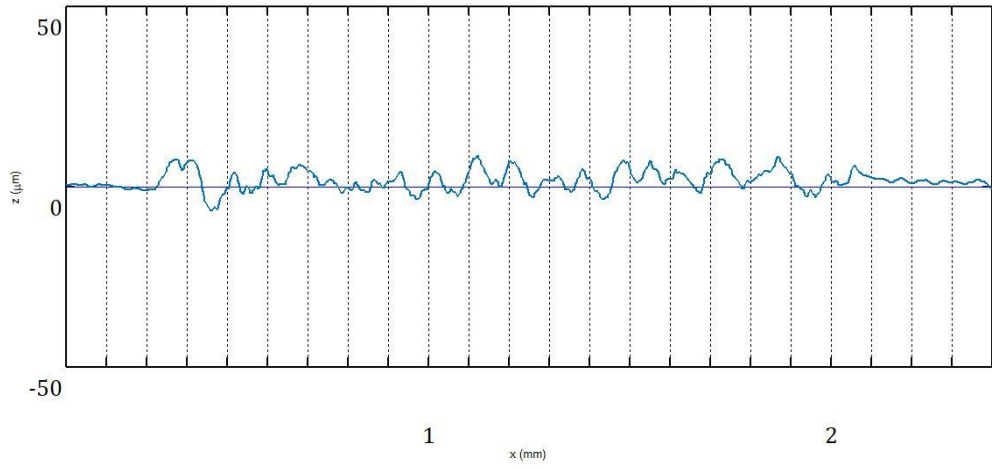


- C4:



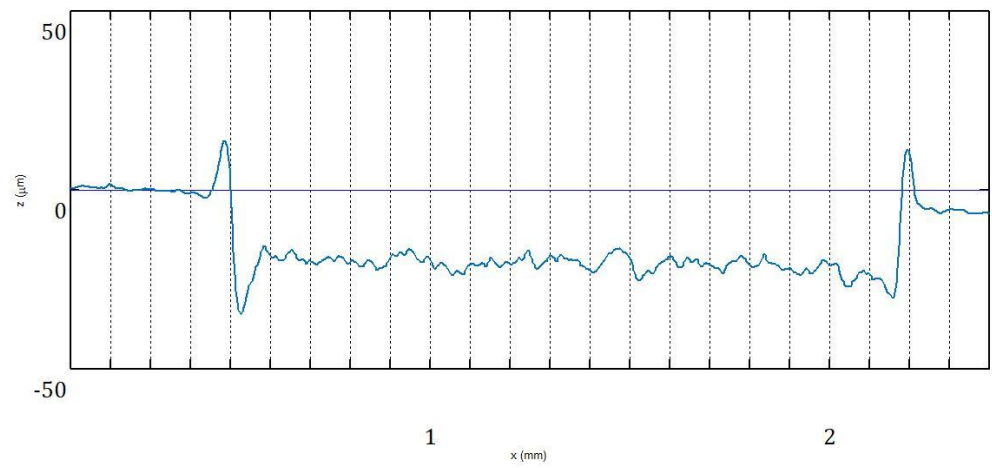
- C5:

C5



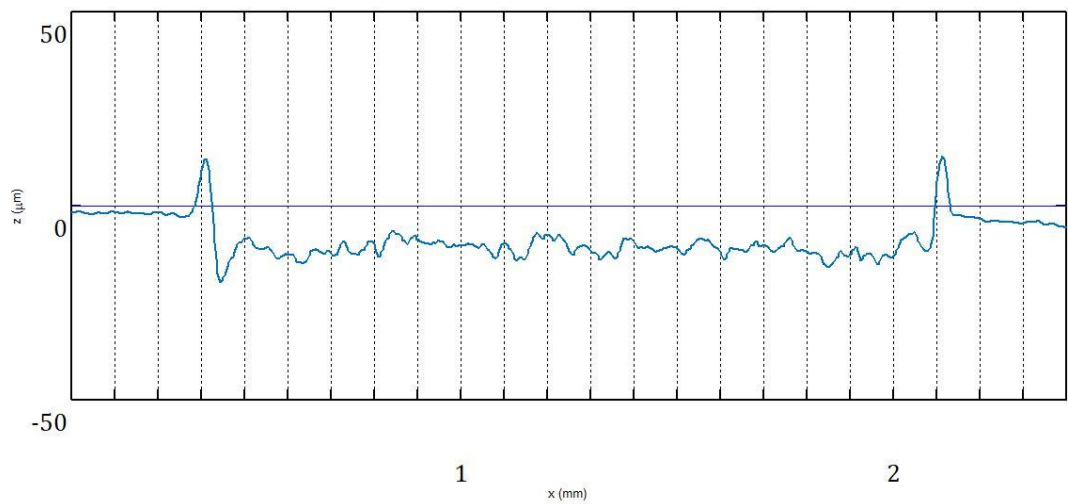
- D0:

D0

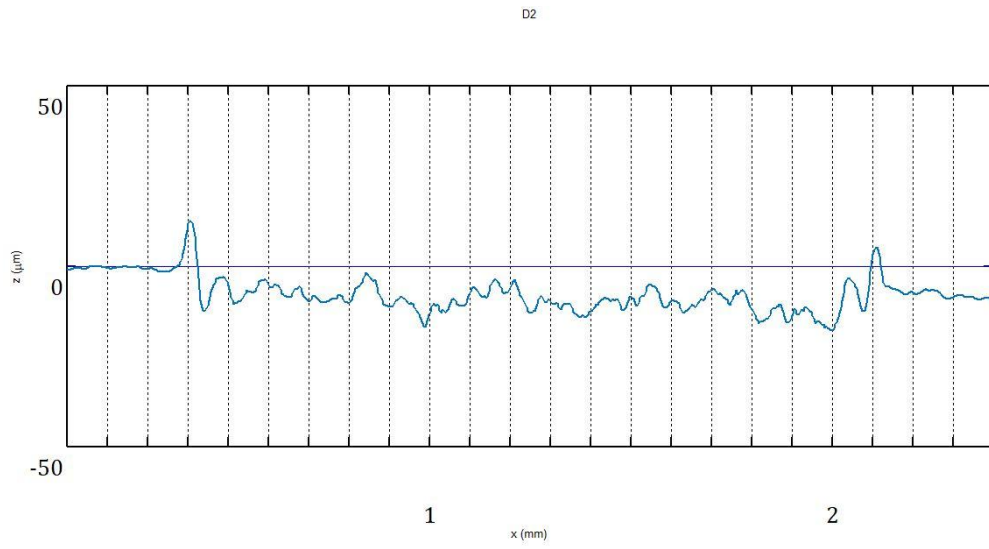


- D1:

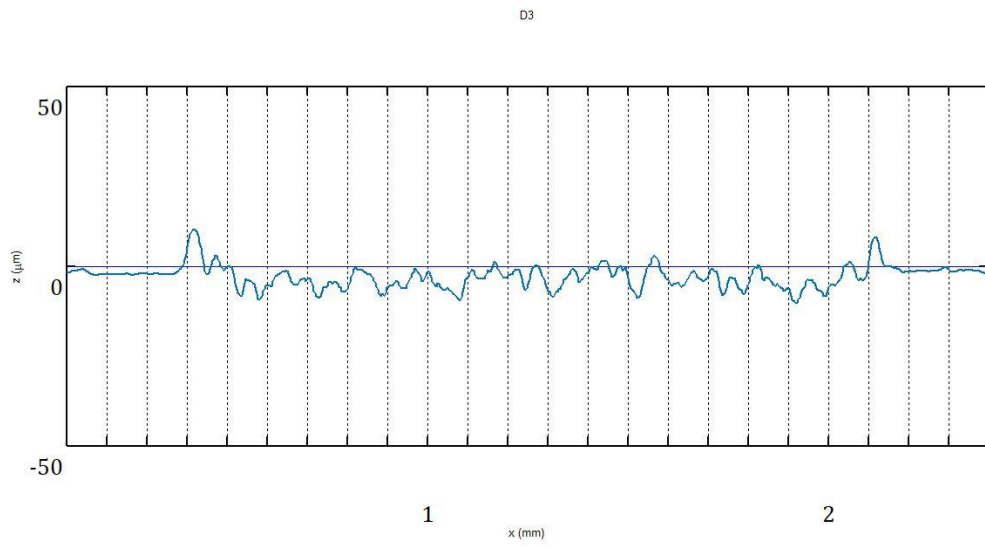
D1



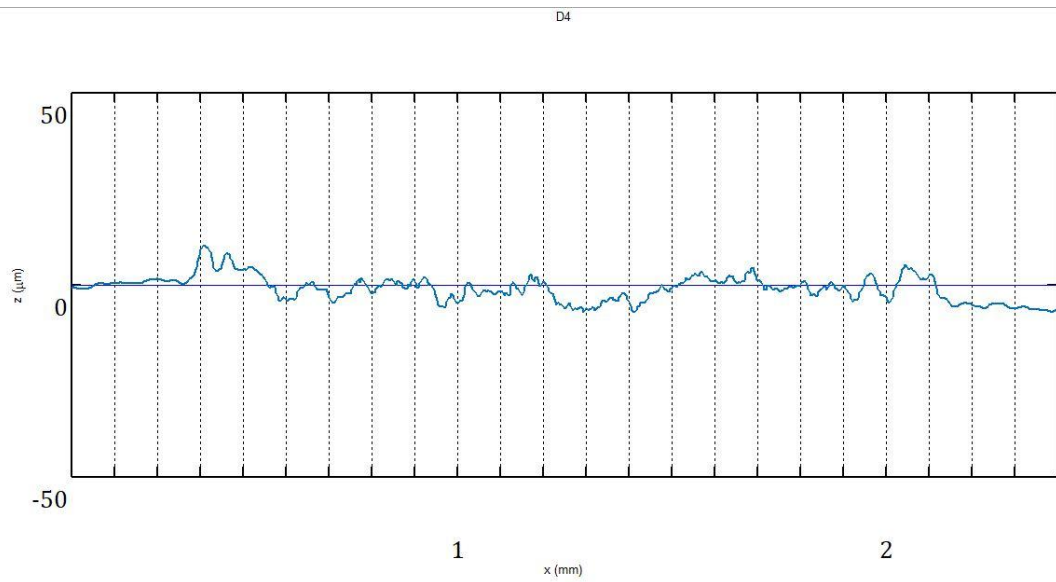
- D2:



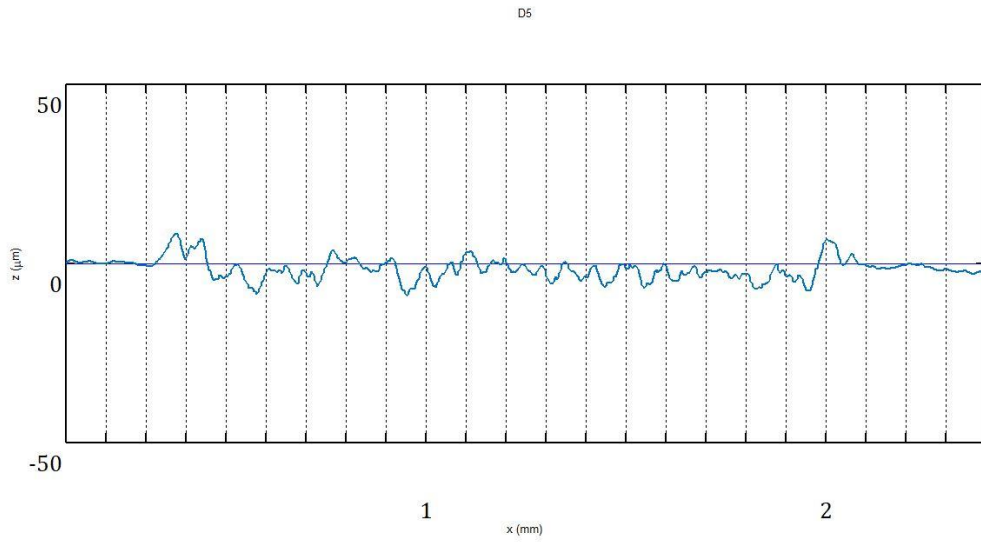
- D3:



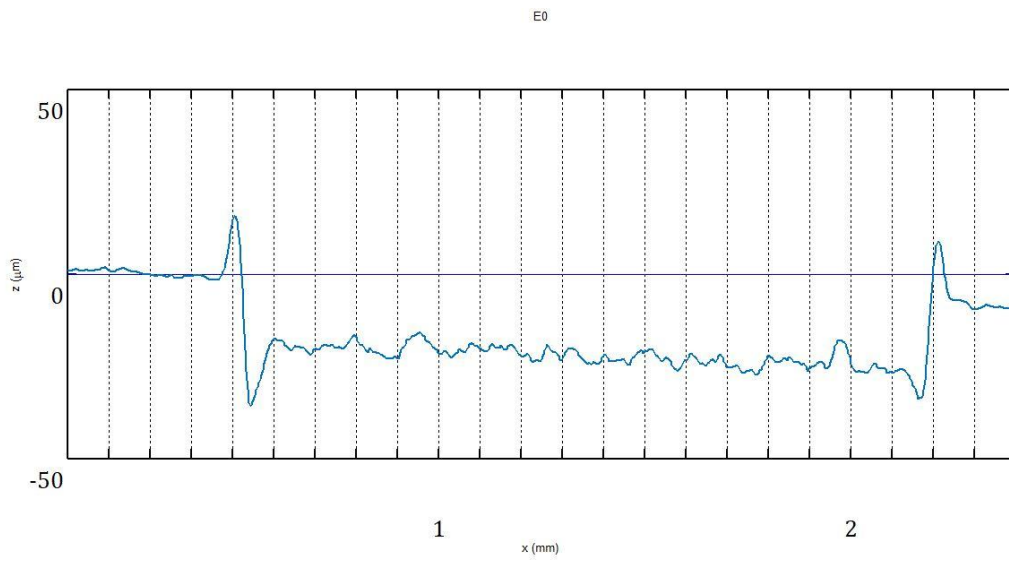
- D4:



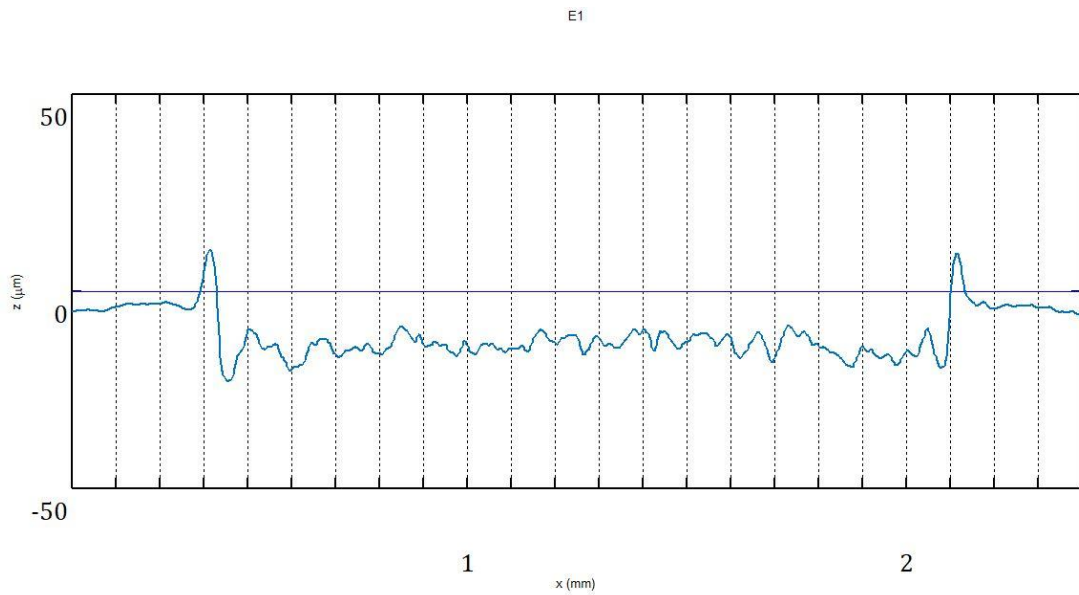
- D5:



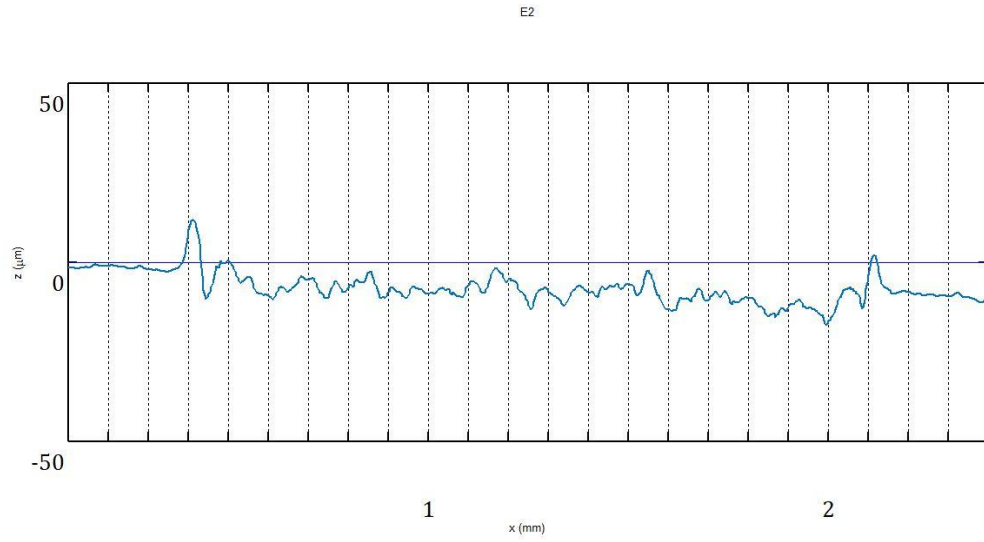
- E0:



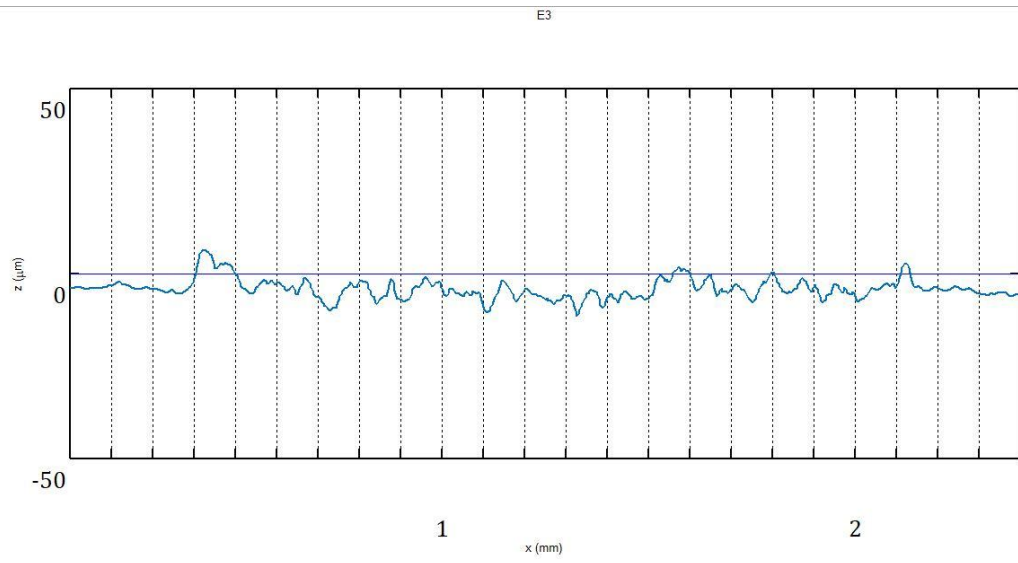
- E1:



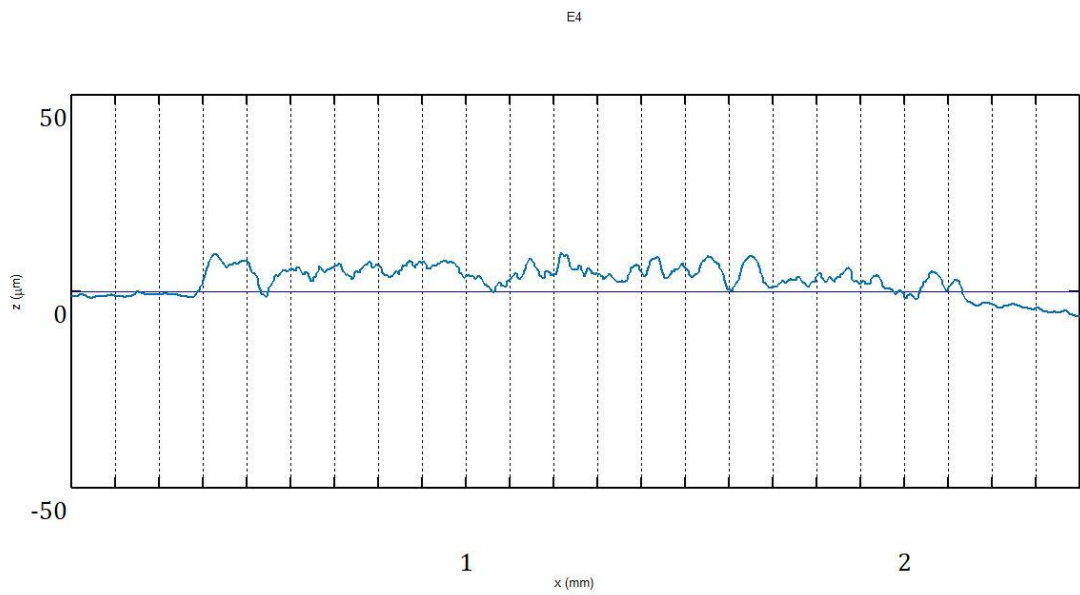
- E2:



- E3:



- E4:



- E5:

E5

