



**Universidad
Rey Juan Carlos**

Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo Fin de Grado

**RECUBRIMIENTOS DUROS PARA ÁLABES DE
TURBINA PROCESADOS POR LASER-DED. ESTUDIO
MICROESTRUCTURAL Y TRIBOLÓGICO.**

Carmen Requena García

Director: Claudio José Múñez Alba

Curso Académico 2023/24



Universidad
Rey Juan Carlos

Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

El presente trabajo, titulado *Recubrimientos duros para álabes de turbina procesados por Láser-DED. Estudio microestructural y tribológico*, constituye la memoria correspondiente a la asignatura Trabajo Fin de Grado que presenta *D^a. Carmen Requena García* como parte de su formación para aspirar al Título de Graduada en Ingeniería Mecánica. Este trabajo ha sido realizado en la *Universidad Rey Juan Carlos* en el *Departamento de Tecnología Química, Energética y Mecánica*, bajo la dirección de *Claudio José Múnez Alba*.

Móstoles, 06 de junio de 2024

ÍNDICE

| | | |
|--------|--|----|
| 1. | RESUMEN | 4 |
| 2. | ABSTRACT | 6 |
| 3. | INTRODUCCIÓN..... | 8 |
| 3.1. | Turbinas | 8 |
| 3.2. | Recubrimientos..... | 11 |
| 3.2.1. | Fabricación aditiva | 11 |
| 3.2.2. | Recubrimientos duros | 11 |
| 3.2.3. | Láser-DED..... | 12 |
| 4. | OBJETIVOS..... | 17 |
| 5. | METODOLOGÍA Y CÁLCULOS | 19 |
| 5.1. | Material de partida..... | 19 |
| 5.1.1. | Preparación de muestras..... | 21 |
| 5.2. | Microscopio óptico | 22 |
| 5.3. | Ensayo de microdureza..... | 24 |
| 5.4. | Medida de la rugosidad..... | 25 |
| 5.5. | Ensayo de rayado..... | 26 |
| 5.6. | Microscopía Láser Confocal..... | 28 |
| 5.7. | Microscopio electrónico de barrido (SEM)..... | 31 |
| 6. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 33 |
| 6.1. | Microestructura..... | 33 |
| 6.2. | Espesores | 34 |
| 6.3. | Porosidad y partículas de carburo de vanadio | 35 |
| 6.4. | Ensayos de microdureza | 36 |
| 6.5. | Rugosidad | 39 |
| 6.6. | Ensayo de rayado..... | 40 |
| 6.7. | Análisis de desgaste..... | 46 |
| 6.8. | Microscopio electrónico de barrido..... | 48 |
| 7. | CONCLUSIONES..... | 59 |
| 8. | TRABAJOS FUTUROS..... | 60 |
| 9. | BIBLIOGRAFÍA | 61 |

1. RESUMEN

La técnica láser-DED es un proceso que permite la generación de recubrimientos superficiales con el fin de mejorar las propiedades de las mismas. Los álabes de turbina son piezas que trabajan bajo condiciones extremas, sufriendo un desgaste temprano que obliga a repararlos o sustituirlos con elevada frecuencia.

La finalidad de este estudio es determinar si la aplicación de recubrimientos de Inconel 625 reforzado con carburo de vanadio sobre superficies de Inconel 625 supone una mejora en las propiedades microestructurales y tribológicas de las piezas tratadas, permitiendo alargar la vida útil de las mismas y reducir los costes de mantenimiento.

Los recubrimientos pueden generarse en diferentes direcciones de fabricación y con distintas proporciones de partículas de carburo de vanadio. Se han analizado muestras con recubrimientos producidos en la dirección de fabricación larga, corta y angular con respecto a las dimensiones del sustrato, y con un 10% y un 30% de partículas de carburo de vanadio para cada dirección de fabricación.

El objetivo de este trabajo es determinar si la aplicación de estos recubrimientos supone una mejora en las propiedades finales de las piezas tratadas, especialmente en la resistencia al desgaste, y qué parámetros de fabricación proporcionan los mejores resultados.

Para ello se realiza un estudio microestructural con el fin de determinar cómo afecta la aplicación de recubrimientos en la superficie. Además, se realizan ensayos de microdureza y rugosidad para estudiar la influencia de los parámetros de fabricación en estas propiedades.

También se llevan a cabo ensayos de rayado en el sustrato y en el recubrimiento con diferentes fuerzas de indentación, determinando el desgaste en función de la fuerza aplicada y el porcentaje de carburo de vanadio presente en los recubrimientos.

Finalmente, se calcula el volumen desplazado durante el ensayo de rayado, y sobre las huellas realizadas con una fuerza de 200N se determinan los mecanismos de desgaste que tienen lugar en la superficie mediante un microscopio electrónico de barrido (SEM). Además, se caracterizan las huellas determinando los elementos presentes en cada punto de interés de las mismas mediante un análisis de espectroscopía de energía dispersiva de rayos (EDX).

Analizando los resultados obtenidos se puede concluir que los recubrimientos mejoran las propiedades de trabajo de las probetas, especialmente la resistencia al desgaste, por lo que su aplicación es una solución óptima para retrasar el deterioro de las piezas tratadas.

Se confirma además que los recubrimientos fabricados con un 30% de carburo de vanadio tienen una mejor resistencia que los que tienen un 10%, así como un menor coeficiente de rozamiento. Por otro lado, a mayor fuerza de indentación, mayor desgaste de la superficie.

Los mecanismos de desgaste que tienen lugar en las huellas de 200N fabricadas en la dirección larga son el desgaste adhesivo y el desgaste abrasivo a tres cuerpos.

Palabras clave: recubrimientos duros, Láser-DED, Inconel 625, Carburo de vanadio, desgaste,

2. ABSTRACT

Laser-DED technique is a process that enables the creation of surface coatings with the aim of enhancing their properties. Turbine blades operate under extreme conditions, experiencing early wear that necessitates frequent repairs or replacements.

The purpose of this study is to determine if the application of Inconel 625 coatings reinforced with vanadium carbides on Inconel 625 surfaces improves the microstructural and tribological properties of the treated parts, extending their service lifespan and reducing maintenance costs.

Coatings can be generated in different manufacturing directions and with varying proportions of vanadium carbide particles. Samples with coatings produced in the long, short, and angular manufacturing directions relative to the substrate dimensions have been analyzed, with 10% and 30% vanadium carbide particles for each direction.

The objective of this work is to determine whether the application of these coatings results in an improvement in the final properties of the treated parts, especially in terms of wear resistance, and to identify which manufacturing parameters yield the best results.

To achieve this, a microstructural study is conducted to determine how the application of coatings affects the surface.

Additionally, microhardness and roughness tests are carried out to study the influence of manufacturing parameters on these properties.

Scratch tests are also performed on the substrate and the coating with different indentation forces, determining the wear based on the applied force and the percentage of vanadium carbide present in the coatings.

Finally, the displaced volume during the scratch test is calculated, and wear mechanisms occurring on the surface are identified using a scanning electron microscope (SEM) on the scratches made with a force of 200N. Furthermore, the scratches are characterized by determining the elements present at each point of interest using energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) analysis.

Analyzing the obtained results, it can be concluded that the coatings improve the working properties of the samples, especially wear resistance, making their application an optimal solution to delay the deterioration of the treated parts.

It is also confirmed that the coatings manufactured with 30% vanadium carbide have better resistance than those with 10%, as well as a lower coefficient of friction. On the other hand, higher indentation forces result in greater surface wear.

The wear mechanisms occurring on the 200N scratches fabricated in the long direction are adhesive wear and three-body abrasive wear.

Keywords: hard coatings, Laser-DED, Inconel 625, vanadium carbide, wear.

3. INTRODUCCIÓN

3.1. Turbinas

Las **turbomáquinas** son dispositivos que intercambian energía debido a la variación del momento cinético del fluido a su paso por los conductos de un órgano que se mueve con movimiento de rotación, y que está dotado de álabes, denominado rotor. Su funcionamiento está basado en la ecuación de Euler [1].

Existen dos tipos de turbomáquinas [2]:

- Generadoras: la energía se transfiere desde la máquina al fluido mediante el aumento de la presión del fluido. Un ejemplo de turbomáquinas generadoras son las bombas y los compresores.
- Motoras: la energía es extraída de un fluido, aprovechando su energía cinética y energía de presión. Las turbinas pertenecen a este tipo de turbomáquinas.

Por otro lado, la dirección del flujo puede ser axial, radial o mixta.

Las **turbinas** son turbomáquinas que absorben la energía de un fluido y la restituyen en energía útil. Están formadas por un estátor, que dirige el fluido hacia el rotor con un ángulo específico, y un rotor, que consiste en la parte móvil y está formada por álabes. Dependiendo del tipo de turbina el rotor tiene una geometría específica [3].

Los **álabes** son superficies con una geometría determinada que se mueven a través de un fluido y están sujetos a fuerzas de agarre y fuerzas de sustentación ejercidas por este. Esta parte de las turbinas tiende al desgaste debido a su función [3].



Figura 1. Álabes de una turbina [4].

El **desgaste** es la pérdida gradual de material de una superficie sólida, como resultado del movimiento relativo de esta superficie con respecto a otra superficie o sustancia, cuando están en contacto en presencia de cargas. Este mecanismo se ve favorecido por condiciones de servicio extremas, como elevadas presiones, altas velocidades, alta temperatura o falta de lubricación (o lubricante en mal estado) [5, 6].

Hay ciertas zonas de los álabes que, debido a la incidencia del fluido en ellos, tienden a desgastarse a una mayor velocidad [3]:

- Borde de ataque: zona que entra primero en contacto con el flujo de entrada. Se debe diseñar de modo que se reduzca al máximo la resistencia al contacto con el fluido.
- Borde de arrastre: zona que tiene el último contacto con el flujo. Debe evitar turbulencias al encontrarse los fluidos de presión y succión.
- Superficie de presión y succión: son las superficies expuestas a diferentes presiones del fluido, en ellas pueden darse diferentes mecanismos de desgaste, como la cavitación o la erosión.

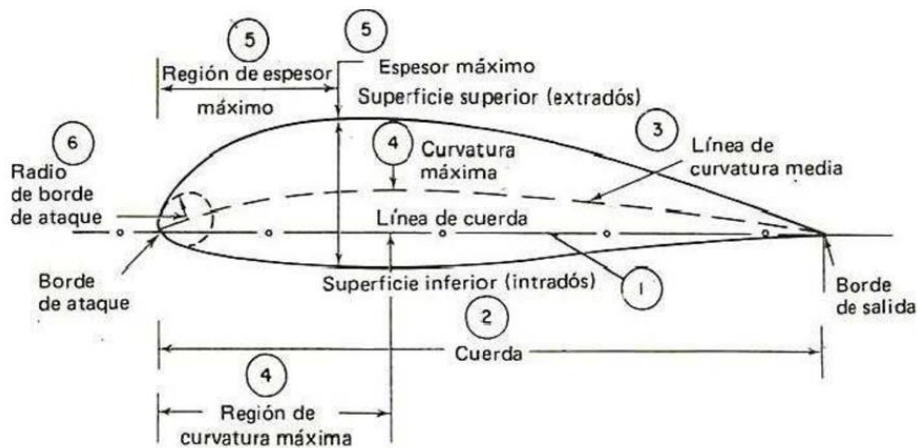


Figura 2. partes del álabe de una turbina [7].

El desgaste tiene lugar por fenómenos mecánicos y químicos, y se puede clasificar en diferentes mecanismos: adhesivo, abrasivo, corrosivo, por fatiga, por erosión, por cavitación, por vibración (fretting), etc, [8].

Las zonas de los álabes que sufren un desgaste erosivo mayor son las que tienen un paso de fluido más restringido, y por ello la velocidad en ese punto es mayor. A mayor presión también aumenta el desgaste, ya que la parte de los álabes que soporta una mayor presión tiene que soportar mayores esfuerzos [9].

En los álabes se dan diferentes mecanismos de desgaste [8, 9]:

- Erosión por turbulencia: se debe a las altas velocidades relativas, y ocurre a la salida del álabe guía.
- Erosión por flujo secundario: ocurre cuando el flujo entra en el álabe, y produce vórtices en forma de remolinos que dañan el material en esa zona.
- Erosión por fuga: se produce por la diferencia entre la presión del flujo entre las caras del álabe. Este flujo pasa de una cara a otra produciendo vórtices en forma de remolino, dañando así el material de la zona afectada.
- Fatiga: se debe a los sobreesfuerzos que soporta el álabe.
- Abrasión: se produce un desgaste superficial ocasionado por la presencia de partículas sólidas en el fluido.
- Corrosión: debido a las elevadas temperaturas de operación, a los ácidos acumulados y a las sales que se encuentran en el fluido, llegando a producirse un desgaste por corrosión de los álabes [10].
- Cavitación: ocurre debido a un descenso repentino de la presión por debajo de la presión de vapor del fluido, que junto con la temperatura constante en el interior del rodete provocan la formación de burbujas dentro del fluido. Estas burbujas son llevadas por el flujo a áreas de elevada presión, y chocan contra las superficies sólidas, ocasionando implosiones a altas velocidades y erosionando el material de los álabes, reduciendo así el rendimiento de la turbina [11].



Figura 3. Álabes desgastados de una turbina [12].

La vida útil de los álabes depende de diferentes factores: condiciones de operación, mantenimiento, materiales, calidad del fluido, etc. Esta también puede alargarse mediante tratamientos superficiales que mejoran las propiedades, reduciendo el desgaste de las piezas, como puede ser la aplicación de recubrimientos en las zonas más afectadas por los mecanismos de desgaste en los álabes

3.2. Recubrimientos

En ambientes de trabajo desfavorables la maquinaria tiende a desgastarse, corroerse, etc., reduciendo así la vida útil de esta, y aumentando los costes de mantenimiento.

Con el objetivo de mejorar la calidad superficial de objetos, así como sus características, existen diferentes procesos que se pueden llevar a cabo. Uno de ellos es la generación de recubrimientos sobre la superficie [13]. Dependiendo de las propiedades que se desee mejorar en una pieza se pueden aplicar diferentes técnicas de recubrimiento.

3.2.1. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva (AM) es, según la ASTM (Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales), *“el proceso de unión de materiales, normalmente por capas, para la creación de objetos a partir de modelos 3D”* [14]. Esta técnica tiene diferentes utilidades, como la reparación de objetos, la creación de recubrimientos de un elevado espesor y la fabricación de modelos desde cero. Se puede clasificar en dos tipos: fabricación aditiva indirecta y fabricación aditiva directa.

La fabricación aditiva indirecta utiliza materiales de unión para generar recubrimientos que son sinterizados posteriormente. Entre sus técnicas se encuentran el modelado por deposición fundida, la estereolitografía y la fabricación de objetos laminados [15].

En el caso de la fabricación aditiva directa, los recubrimientos generados no necesitan ser sinterizados posteriormente, lo que le confiere mayor pureza y proporciona mejores características mecánicas que los de fabricación aditiva indirecta. Dentro de este tipo de fabricación se incluyen las técnicas Láser-DED y la sinterización selectiva por láser [15].

3.2.2. Recubrimientos duros

Según Ernest F. Nippes *“un recubrimiento duro es la aplicación superficial por soldadura, spray térmico o un proceso similar de una o varias capas, cordones o puntos de un material*

generalmente duro, resistente a uno o varios tipos de desgaste, sobre un componente metálico” [16].

El objetivo de aplicar este tipo de recubrimientos es mejorar las características de la pieza tratada, principalmente la resistencia al desgaste y la dureza, permitiendo alargar la vida de servicio de la misma. También permiten la mejora de otras propiedades, como el coeficiente de fricción, la resistencia a la corrosión o diferentes propiedades superficiales como el color o la textura. Los recubrimientos duros pueden ser de composición metálica o cerámica [6].

La aplicación de estas técnicas suele ser sencilla y permite abaratar los costes de producción, debido a que facilita la reparación y reconstrucción de piezas en vez de reemplazarlas. Algunos de los procesos de aplicación de los recubrimientos duros son las técnicas de proyección en frío (Cold Spray), deposición química en fase vapor (CVD), deposición física en fase vapor (PVD) y deposición por energía directa (Láser-DED). Esta última será estudiada en este proyecto [17].

En la actualidad este tipo de recubrimientos se puede encontrar en una gran variedad de áreas de trabajo, entre las que se encuentran [6]:

- Moldes de inyección de metales semifundidos y plásticos abrasivos.
- Matrices de embutición y conformado.
- Superficies de trabajo sometidas a deslizamientos y rozamientos.
- Herramientas de corte de alta velocidad.
- Materiales cerámicos que trabajan a desgaste.

3.2.3. Láser-DED

La técnica de deposición por energía directa es un proceso de fabricación aditiva directa, tal como se ha definido en el punto 3.2.1, que utiliza energía térmica focalizada, fundiendo y uniendo los materiales mientras se van depositando en capas funcionales a partir del material de aporte. De esta manera se forma un recubrimiento de elevado espesor, que tiene como objetivo reparar y fortalecer las superficies. En este proceso se integra la tecnología láser, la tecnología de fabricación asistida por ordenador (CAM), y la tecnología de control [14, 18].

En el proceso láser-DED una fuente de energía térmica, que puede ser un haz de electrones, un haz láser o un arco de plasma, irradia el sustrato creando un baño fundido en la superficie. Simultáneamente se añade el material de aporte, que también es fundido, y se incorpora al baño creando un enlace metalúrgico entre ambos. El baño solidifica rápidamente generando una capa de revestimiento sobre la superficie de la pieza.

En la pieza final se puede distinguir cuatro zonas: zona de revestimiento (CZ), intercara (IZ), zona afectada por el calor (HAZ), y sustrato [19].

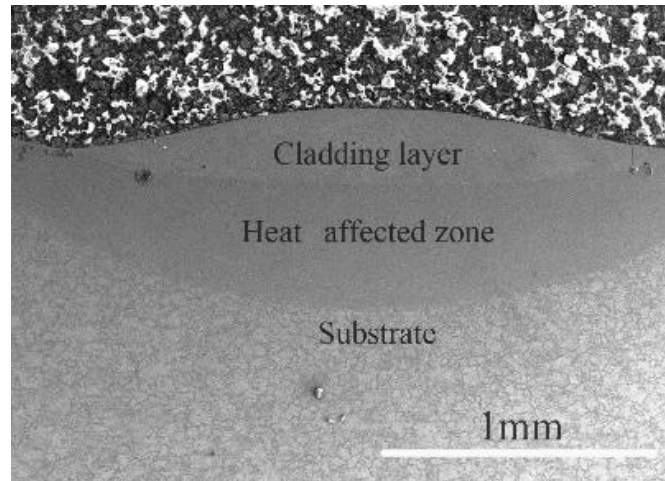


Figura 4. zonas de una pieza con un recubrimiento Láser-DED [20].

Existen diferentes **técnicas Láser-DED** dependiendo del método de alimentación empleado y teniendo en cuenta el material de aporte, que puede incorporarse en forma de polvo o de alambre [21].

En el sistema de alimentación de polvo coaxial, el polvo es expulsado a través de una boquilla mediante un gas portador. Este gas suele ser argón, que genera una atmosfera inerte. La boquilla puede tener diversas morfologías, repercutiendo en las características del recubrimiento.

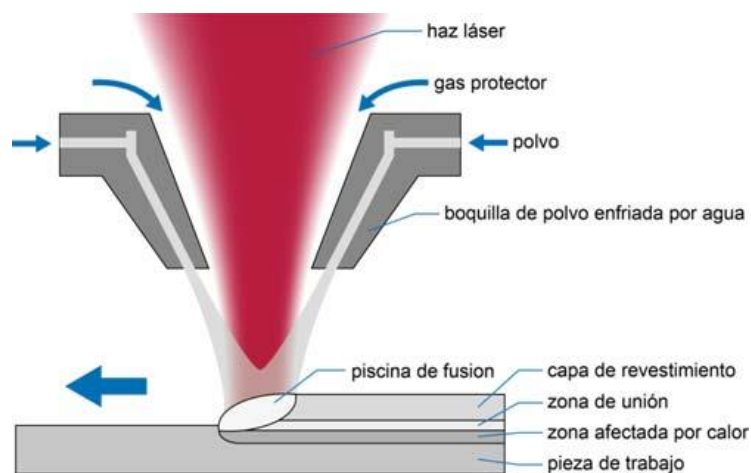


Figura 5. sistema de alimentación de polvo coaxial [22].

En el sistema de polvo precolocado, el polvo se coloca previamente sobre la superficie del sustrato y se funde mediante escaneo láser.

El sistema de alimentación en alambre funciona de la misma manera que el sistema de polvo precolocado, pero en este caso, el material de aporte es un alambre.

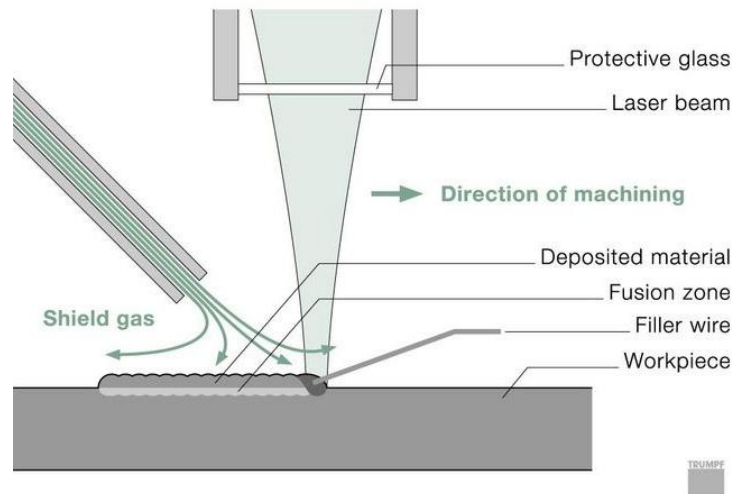


Figura 6. sistema de alimentación en alambre [23].

Los **parámetros** del proceso laser-DED son los siguientes [24, 25, 26]:

- Potencia del láser: es el parámetro más importante del proceso. Con una elevada potencia se aumenta el espesor, la velocidad de fusión y la anchura del cordón, debido a que se funde una mayor cantidad de material de aporte y aumenta la profundidad de fusión. Si la potencia es excesivamente elevada puede deformarse el sustrato y oxidar la superficie; por el contrario, si ésta es demasiado baja se reduce la calidad del sustrato, al tener una fusión insuficiente.
- Velocidad de pasada: es la velocidad con la que la boquilla se mueve sobre la superficie que se desea recubrir. Si la velocidad es baja, se reduce el espesor del recubrimiento; por otro lado, si es elevada, aumenta el rendimiento del proceso, pero como efecto adverso existe una mayor posibilidad de que se generen poros y grietas.
- Solapamiento: este parámetro se refiere a la superposición entre las capas de recubrimiento. Influye en el acabado superficial y rendimiento. A mayor solapamiento, mayor posibilidad de generarse defectos en la zona solapada, pero mayor planitud de superficie. Si se reduce el solapamiento se aumenta el rendimiento, pero pueden generarse surcos superficiales.

- Velocidad de aporte del material: es la velocidad de suministro del material de refuerzo a la zona de deposición. Afecta principalmente al espesor, aumentando este al incrementarse la velocidad de aporte. Si es excesivamente elevada puede causar defectos por una falta de fusión. Con una menor velocidad se consigue mejorar la calidad del acabado, así como mayor precisión en el espesor requerido.

Otros parámetros que se pueden modificar son: el tamaño del haz láser, la distancia entre el láser y el sustrato o la morfología del material de aporte, entre otras. Optimizando todos estos parámetros se puede conseguir una mejora en el proceso, reduciendo los defectos.



Figura 7. proceso de recubrimiento Láser-DED [27].

Algunas de las **ventajas** del proceso Láser-DED son las siguientes [28]:

- La unión entre el recubrimiento y el sustrato tiene una gran adherencia.
- La zona afectada por el calor (HAZ) es pequeña.
- La microestructura es fina y las capas formadas son de elevada resistencia, debido a la rápida solidificación y al gradiente de temperatura.
- Se trata de una técnica ecológica, sencilla y que permite abaratar costes debido a la reducida cantidad de material necesaria.
- La energía del láser provoca una mínima distorsión térmica, así como poca profundidad de fusión, debido a que solo afecta a las capas más superficiales del sustrato.

Las **desventajas** del proceso laser-DED son las siguientes [28]:

- Debido a la gran cantidad de parámetros que hay que tener en cuenta a la hora de realizar este proceso, es fácil que se produzcan defectos en la superficie, como porosidad o grietas, ocasionados por las tensiones residuales.
- Pueden producirse problemas de segregación de elementos en la microestructura.

Este tipo de recubrimientos puede realizarse con diferentes **materiales de aporte**, que mejoran distintas propiedades. Por ejemplo, los metales aportan resistencia al desgaste y a la corrosión, y son bastante económicos. Los compuestos intermetálicos son resistentes al calor y tienen una elevada resistencia a la corrosión. Si se utilizan materiales cerámicos se aumenta la resistencia a la abrasión, a la corrosión y a la oxidación [29].

En cuanto a las **aplicaciones**, los recubrimientos fabricados mediante láser-DED se utilizan especialmente en condiciones extremas de trabajo, como son elevadas temperaturas, elevada presión o ambientes corrosivos, alargando la vida útil de las piezas tratadas. Actualmente se utilizan en el campo aeroespacial, químico, energía y medicina, entre otros.

Mediante el proceso láser-DED se puede llevar a cabo la reparación de piezas mecánicas de alto rendimiento, como engranajes, ejes, etc. De esta manera se reduce el coste de mantenimiento, al no ser necesario reemplazar la pieza entera, restaurando la forma de diseño inicial [30].

Las **investigaciones futuras** deberán centrarse en la reducción de defectos y optimización de los parámetros de producción, con el objetivo de mejorar los recubrimientos. Se deben desarrollar nuevos sistemas de materiales, mejorar los equipos, y conseguir un mejor control y simulación del proceso [29].

4. OBJETIVOS

La finalidad de este trabajo es el estudio de las propiedades microestructurales y tribológicas de recubrimientos duros fabricados mediante la técnica Laser-DED, con el fin de determinar si la aplicación de este tipo de recubrimientos mejora las propiedades de trabajo de los álabes de turbinas.

Los álabes de turbinas trabajan bajo condiciones extremas, de modo que se favorece el desgaste, reduciéndose su vida útil, haciendo necesaria la reparación o sustitución con elevada frecuencia.

Se estudiarán recubrimientos de Inconel 625 reforzados con carburo de vanadio sobre un sustrato de Inconel 625, aplicados con diferentes parámetros de deposición láser, de modo que se consigan los siguientes objetivos:

- Conocer la microestructura del recubrimiento y el sustrato, en función de los parámetros utilizados.
- Evaluar si la aplicación de los recubrimientos afecta a la rugosidad y microdureza.
- Caracterizar la propiedad de desgaste, de modo que se determine si la aplicación de este tipo de recubrimientos mejora la resistencia al desgaste, y qué porcentaje de carburo de vanadio es el óptimo a la hora de recubrir una pieza que trabaje bajo condiciones extremas.

Con el fin de cumplir estos objetivos, se han estudiado diferentes probetas con recubrimientos de carburo de vanadio en función del porcentaje de carburo del polvo depositado y la dirección de deposición laser. Se ha seguido la siguiente programación de actividades:

- 1) Preparación de muestras: se han preparado las probetas cortando, embutiendo y posteriormente puliendo el material de partida, de modo que se diferencien según la dirección de fabricación, la proporción de carburo de vanadio presente en el recubrimiento y la dirección transversal.
- 2) Análisis microestructural: se ha medido mediante un microscopio metalográfico el espesor de los recubrimientos generados, y el porcentaje de poros y partículas de carburo de vanadio presentes en estos. De este modo se ha podido caracterizar la microestructura del recubrimiento y del sustrato.

- 3) Ensayos de microdureza y rugosidad: mediante un microdurómetro con un indentador Vickers, se han tomado medidas de microdureza en el sustrato, intercara y recubrimiento de cada una de las muestras transversales. Además, utilizando un rugosímetro, se han determinado los valores de rugosidad de las muestras, diferenciando entre muestras mecanizadas y sin mecanizar. Posteriormente se ha analizado si los parámetros de fabricación afectan a estas propiedades.
- 4) Ensayo de rayado: este ensayo se ha realizado utilizando un tribómetro, con el objetivo de caracterizar el desgaste de las muestras aplicando diferentes fuerzas.
- 5) Análisis del desgaste: una vez realizado el ensayo de rayado, se ha evaluado el desgaste mediante un microscopio confocal, y se ha medido el volumen de desgaste de cada una de las huellas realizadas con el fin de determinar los parámetros de fabricación que confieren a la pieza tratada la mayor resistencia al desgaste. También se ha caracterizado la morfología de la huella y composición de los materiales de fabricación de las muestras con un microscopio electrónico de barrido.
- 6) Discusión de los resultados: tras la realización de todos los ensayos y recogida de datos han analizado los resultados para evaluar su impacto en las propiedades de las piezas tratadas y los parámetros que proporcionan mejores resultados.

5. METODOLOGÍA Y CÁLCULOS

5.1. Material de partida.

Las probetas utilizadas para el estudio de sus propiedades han sido fabricadas por la técnica Laser-DED (Deposición de Energía Directa). El recubrimiento que se ha generado sobre sustratos de Inconel 625 consiste en diferentes proporciones de partículas de carburo de vanadio (VC) sobre una base del mismo material usado para la fabricación del sustrato.

El Inconel 625 es una superaleación a base de níquel reforzada mediante la adición principalmente de carbono, cromo, molibdeno y niobio. Esta aleación tiene una elevada resistencia al ser una aleación a base níquel que puede endurecer por envejecimiento, y además cuenta con muy buenas características de fabricación. También tiene muy buena resistencia a la corrosión y a la fluencia, así como una elevada resistencia mecánica. Tiene una gran variedad de aplicaciones en distintos campos de trabajo, como el aeroespacial, químico o petrolero [31].

La aleación de Inconel 625 tiene la siguiente composición [32]:

Tabla 1. Composición de la superaleación Inconel 625.

| Elemento | Ni | C | Fe | Cr | Mo | Nb | otros |
|----------|-------------|------|-------|-------------|------------|-----------|-------|
| % | 58,0 – 63,0 | 0,04 | ≤ 5,0 | 20,0 - 23,0 | 8,0 – 10,0 | 3,0 – 5,0 | < 1 |

En cuanto a la microestructura de la aleación, cuenta con una matriz de austenita con presencia de diferentes precipitados: carburos y fases secundarias.

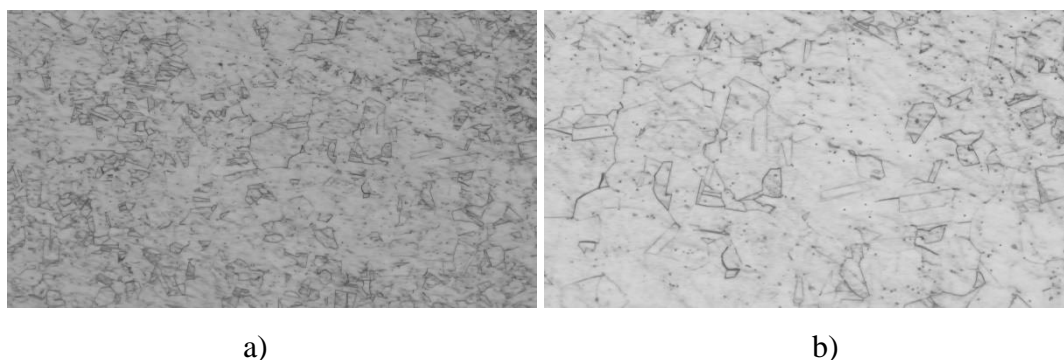
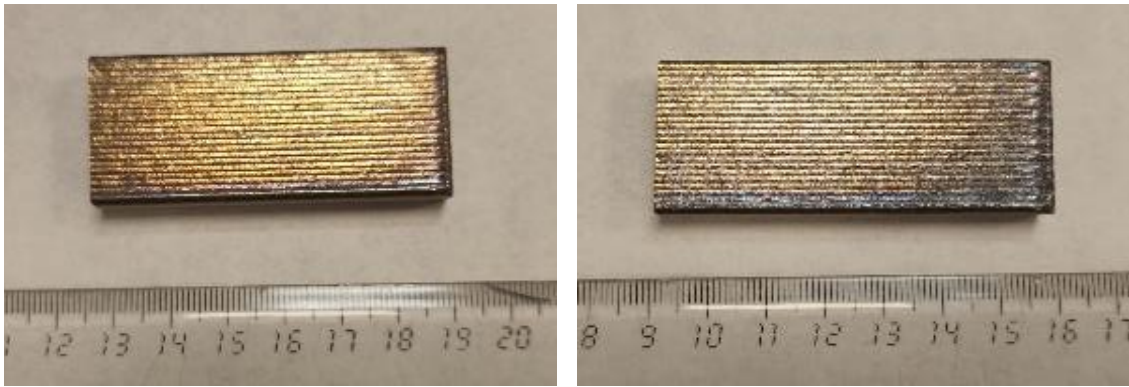


Figura 8. Microestructura del Inconel 625 observada mediante el microscopio óptico a) 5 aumentos, b) 10 aumentos.

Las muestras han sido fabricadas con un diámetro láser de 2,2 mm, una velocidad de 4 m/min, y un solapamiento promedio del 50%. Dichas muestras pueden clasificarse según la dirección de fabricación láser: dirección larga, dirección corta y dirección diagonal (dirección a 45°); y en función el porcentaje de carburo de vanadio que contenga el recubrimiento, un 10%, un 20% o un 30%.

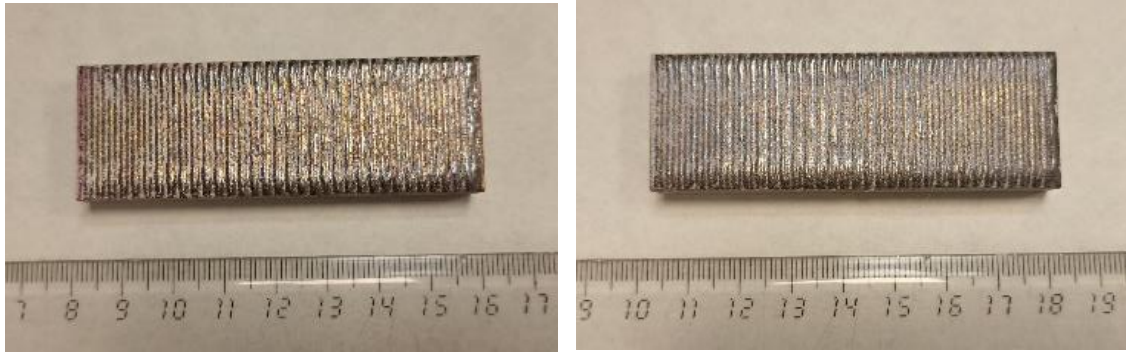
Para nombrar las probetas se utiliza una letra, correspondiente a la dirección de fabricación, y un número, que indica el porcentaje de carburo de vanadio del recubrimiento. Las letras empleadas según la dirección de deposición láser son L (dirección larga), S (dirección corta) y D (dirección diagonal), y los números 10 o 30 según el porcentaje de carburo de vanadio. Por ejemplo, para la muestra fabricada en la dirección larga con un 10% de carburo de vanadio, la nomenclatura sería L10.



a)

b)

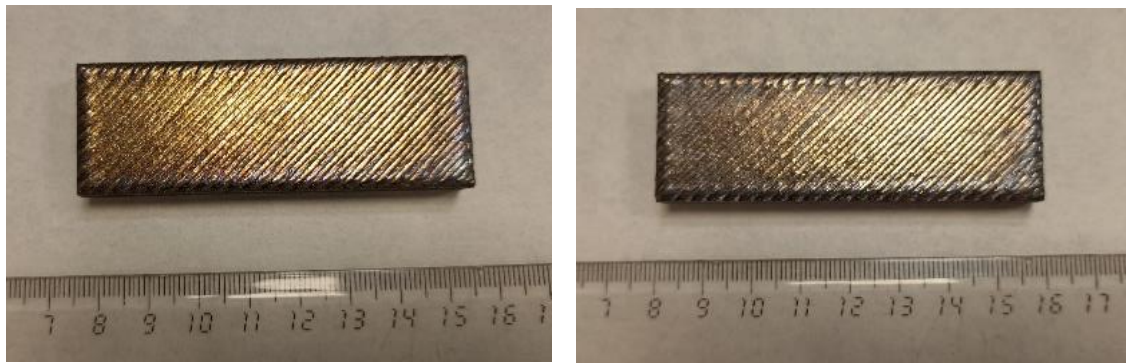
Figura 9. Probetas correspondientes a recubrimientos depositados en la dirección larga con a) un 10% de carburo de vanadio, b) un 30% de carburo de vanadio



a)

b)

Figura 10. Probetas correspondientes a recubrimientos depositados en la dirección corta con a) un 10% de carburo de vanadio, b) un 30% de carburo de vanadio.



a)

b)

Figura 11. Probetas correspondientes a recubrimientos depositados en la dirección diagonal con a) un 10% de carburo de vanadio, b) un 30% de carburo de vanadio.

5.1.1. Preparación de muestras.

Para el posterior estudio de la microestructura de las probetas es necesario preparar muestras de las secciones transversales. Se han cortado dos secciones de cada una de las probetas, empleando una microcortadora de precisión (IsoMet 5000). Se ha utilizado un disco de corte de corindón con las siguientes dimensiones: $\varnothing 150 \times 0,6 \times 12,7$ mm.

La nomenclatura de los cortes transversales será 1 y 2, siendo 1 el ancho de la probeta y 2 el largo. En el caso de las muestras fabricadas mediante la dirección larga el corte 1 es perpendicular al sentido de fabricación, y el 2 es paralelo, y al contrario para las muestras fabricadas en la dirección corta. Para las muestras fabricadas en diagonal, ambas transversales, tienen la misma dirección.

Por ejemplo, para la muestra L10, la nomenclatura para nombrar la dirección perpendicular a la dirección de fabricación sería L10-1.

Una vez cortadas las secciones, se han embutido las muestras en resina utilizando una prensa de montaje automática (SimpliMet 1000), colocándolas de modo que se observasen las dos transversales (1 y 2) de cada una de las probetas iniciales.

Tras embutir las probetas, se han desbastado y pulido para preparar la superficie que se va a estudiar posteriormente. Esto se realiza en diferentes etapas, utilizando distintos tipos de paño para conseguir cada vez acabados más finos. Para el desbaste se han utilizado papeles de carburo de silicio, lubricados mediante agua. A continuación, se han pulido las muestras mediante dos paños diferentes de diamante embebido, de 45μ y 15μ , y otros para el pulido final, en el que se añadía diamante de 3μ y 1μ respectivamente. Todos ellos se han lubricado con etilenglicol. Se ha realizado este proceso hasta obtener una superficie lisa, plana y especular, para poder utilizar en el microscopio óptico.

En la siguiente figura se observan las probetas preparadas superficialmente:

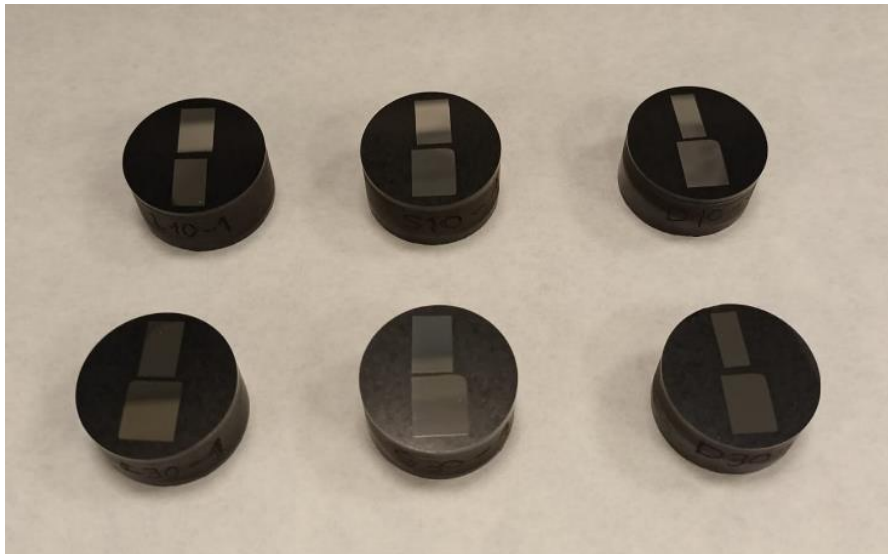


Figura 12. Imagen de las probetas transversales con la preparación superficial realizada.

5.2. Microscopio óptico

Una vez preparadas las probetas, se ha analizado su estructura interna mediante el microscopio óptico (Axioscope 5), equipado con análisis de imagen, midiendo su espesor, y contando la cantidad de poros y partículas de carburo de vanadio presentes en el recubrimiento. También se ha comparado la microestructura del sustrato con la del recubrimiento.

Para revelar la microestructura ha sido necesario realizar un ataque metalográfico en la superficie de las secciones transversales, aumentando el contraste entre los límites de grano de la muestra (Figura 13). Se han mezclado 15 mL de ácido clorhídrico, 10 mL de ácido acético, 5 mL de ácido nítrico y una o dos gotas de glicerol. Esta mezcla se ha aplicado durante 10 segundos sobre las probetas con un bastoncillo, y lavado posteriormente con agua.

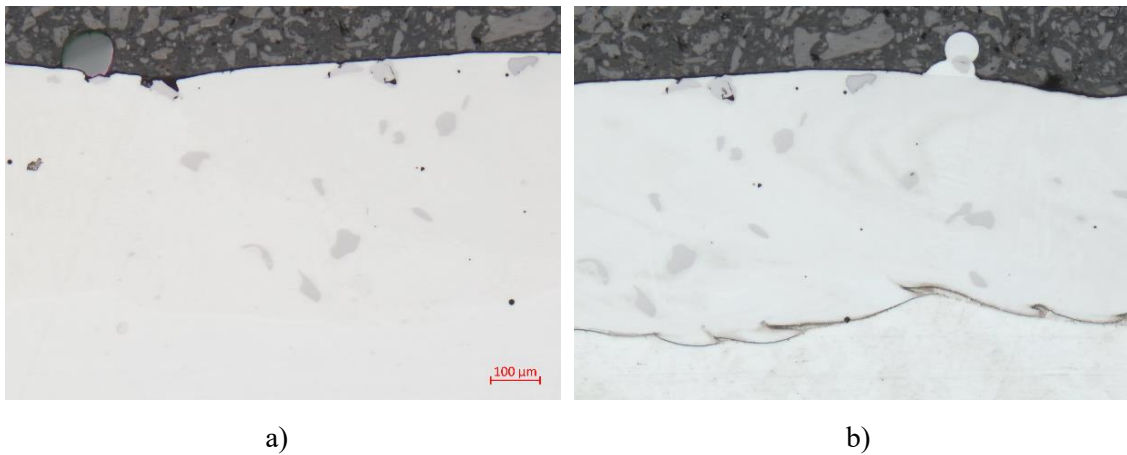


Figura 13. Probetas a) antes y b) después de realizar el ataque metalográfico sobre las secciones transversales.

Mediante este ataque se ha podido observar con mayor claridad la intercara, pudiendo así tomar medidas de los espesores del recubrimiento las probetas con la aplicación ZEN CORE, de Zeiss. Para cada una se han tomado 10 medidas en 5 tramos diferentes del recubrimiento (Figura 14).

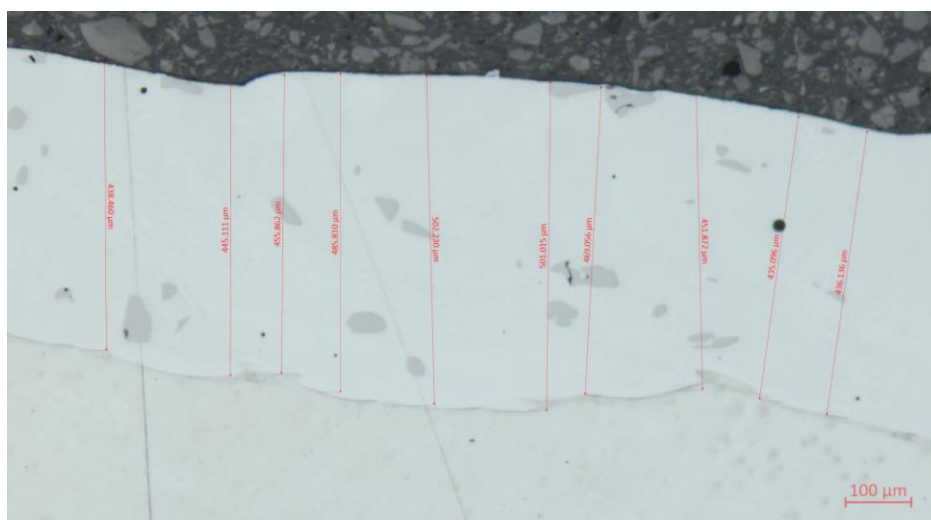


Figura 14. Medición de los espesores en la aplicación ZEN CORE, de Zeiss.

La porosidad es el volumen de los espacios vacíos en relación con el volumen total de material estudiado [33]. Mediante la misma aplicación utilizada para medir los espesores, se han realizado imágenes y se ha analizado el porcentaje de poros presentes en el recubrimiento para cada una de las secciones transversales. También se ha calculado el porcentaje de partículas de carburo de vanadio con respecto al área (Figura 15). Para cada muestra transversal se han analizado cuatro imágenes.

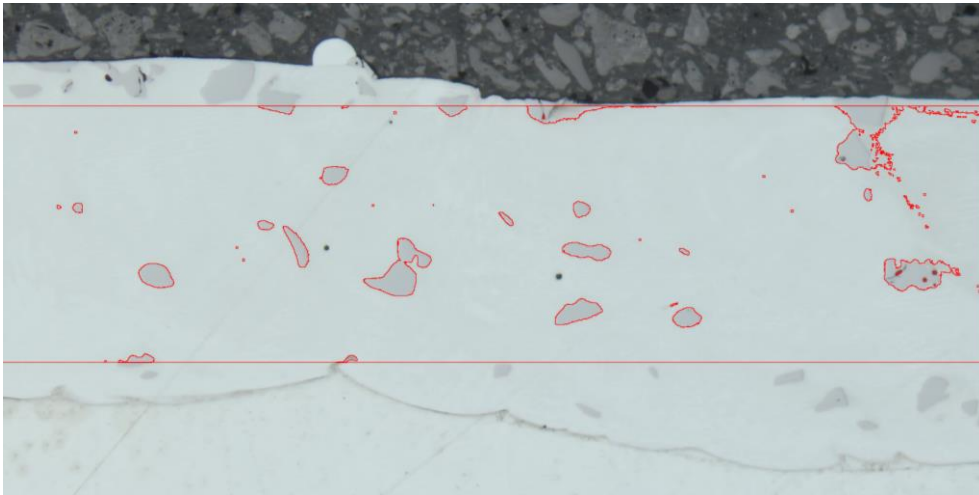


Figura 15. Análisis de partículas de carburo de vanadio en el sustrato mediante el programa ZEN CORE de Zeiss

5.3. Ensayo de microdureza

La microdureza es la propiedad física que determina la capacidad de un material de resistir cargas pequeñas que lo penetran, deformándolo plásticamente [34]. Puede medirse en diferentes escalas:

- Ensayo Vickers, que utiliza un indentador de diamante en forma de pirámide.
- Ensayo Brinell, que mide la dureza mediante una bola de acero.
- Ensayo Rockwell, con un indentador cónico de diamante.

El ensayo de microdureza se ha realizado utilizando un micrómetro Buehler Serie 1600, sobre las probetas de las secciones transversales. El indentador usado ha sido una pirámide de diamante, y se ha realizado aplicando una fuerza de HV 0,5. Para realizar el ensayo Vickers se ha tenido en cuenta la norma ISO 6507 [35], en la que se describe la metodología para realizar este tipo de ensayos, regulando la distancia entre indentaciones, el tiempo de aplicación y los cálculos necesarios para la medida de microdureza.

A partir de este ensayo se han obtenido los valores de microdureza del sustrato, intercara y recubrimiento de cada una de las muestras, con el objetivo de analizar cómo afecta la fabricación de recubrimientos Láser-DED con diferentes parámetros.

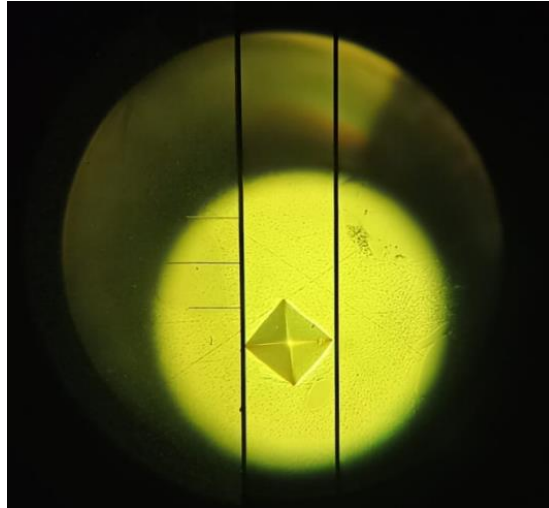


Figura 16. Indentación una vez realizado el ensayo de microdureza.

5.4. Medida de la rugosidad

La rugosidad se define como las desviaciones pequeñas, espaciadas de la superficie nominal, determinadas por las características del material y el procesado. Se diferencian tres tipos de rugosidades: la rugosidad media (R_a), que corresponde al promedio de los valores de las desviaciones verticales respecto la superficie geométrica, la rugosidad cuadrática media (R_q), y la profundidad de la rugosidad media (R_z) [36].

Para determinar la rugosidad superficial de las probetas se ha utilizado un rugosímetro Mitutoyo SJ-301. Se han tomado las medidas de R_a , R_z y R_q . El ensayo se ha realizado bajo la norma ISO 4287 [37], siempre de forma perpendicular a la dirección de fabricación láser.

Se han tomado medidas en las probetas con recubrimiento, antes y después de mecanizar la superficie (Figura 17), así como el sustrato. Para cada una de ellas se han tomado 5 medidas de rugosidad.

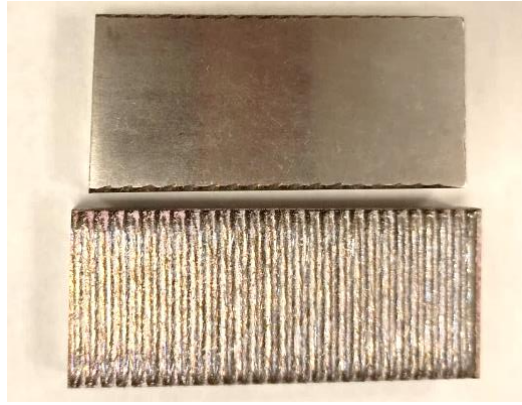


Figura 17. Probetas mecanizadas (arriba) y sin mecanizar (abajo) para la realización de los ensayos de rugosidad.

5.5. Ensayo de rayado

La tribología es la ciencia que estudia la interacción y movimiento relativo de dos superficies sólidas en contacto, mediante el estudio de tres fenómenos: la fricción, el desgaste y la lubricación. La mejora de las propiedades tribológicas permite reducir costes y energía, debido al ahorro de materias primas, el aumento de la vida de servicio de la pieza y la ganancia de eficiencia [38].

El ensayo de rayado, “scratch” en inglés, consiste en evaluar la dureza y desgaste de una muestra mediante su resistencia al rayado. El tribómetro utilizado (MFT-500, de Rtec Instruments) tiene como indentador una bola de acero endurecido de 6,34 mm de diámetro.



Figura 18. Tribómetro MFT-500, utilizado para realizar los ensayos de rayado.

Los ensayos de rayado se han llevado a cabo en las probetas mecanizadas L10 y L30, y en el sustrato, con el objetivo de comparar la resistencia a desgaste, en función del porcentaje de carburo de vanadio del recubrimiento, y tomando como referencia los valores del sustrato.

Antes de realizar el ensayo es necesario programar en el equipo los parámetros de entrada necesarios para realizar la prueba. Se ha programado una fuerza de 1N para que el indentador baje y se mantenga hasta entrar en contacto con el material, durante 10 segundos, antes de comenzar el ensayo. Los ensayos se han realizado sobre una distancia de 10 mm, a una velocidad de 1 m/s y una aceleración de 1 m/s^2 . El tiempo que tarda en realizar la huella es de 10 segundos. Entre cada una de las huellas hay una distancia de 5 mm. La prueba se realiza con tres fuerzas diferentes, 100N, 150N y 200N. Cada una de las medidas se ha repetido tres veces. El indentador se desliza sobre la muestra colocada en el portamuestras, rayando la superficie (Figura 19). Dependiendo de la resistencia al desgaste del material, la huella tendrá diferentes características.

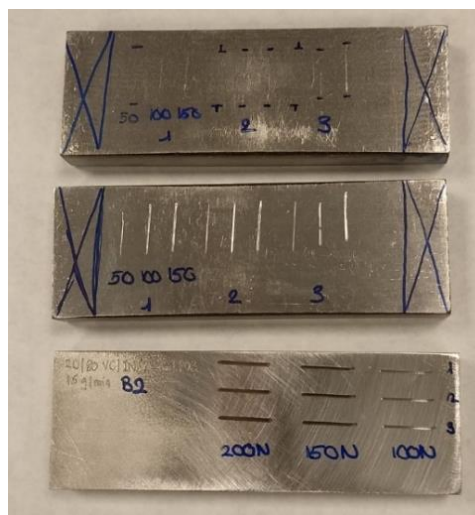
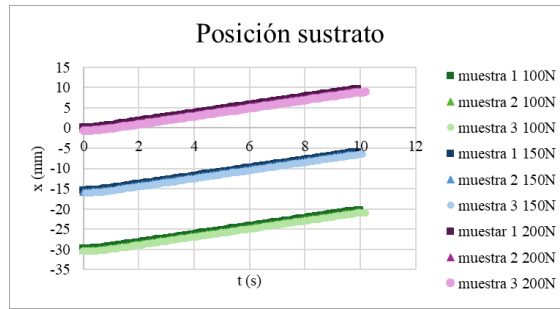


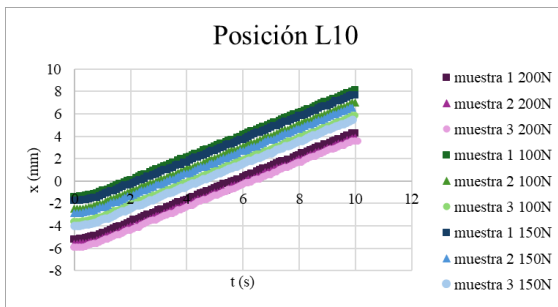
Figura 19. De arriba abajo, probetas L30, L10 y sustrato. Ensayos de rayado realizados sobre los recubrimientos y el sustrato.

Se han recogido como datos de salida la fuerza en el eje z, la fuerza en el eje x, la posición y la profundidad del indentador. Para el sustrato también se han recogido los valores de salida del coeficiente de rozamiento, que permitirán compararlos con los valores del coeficiente al calcularlo matemáticamente.

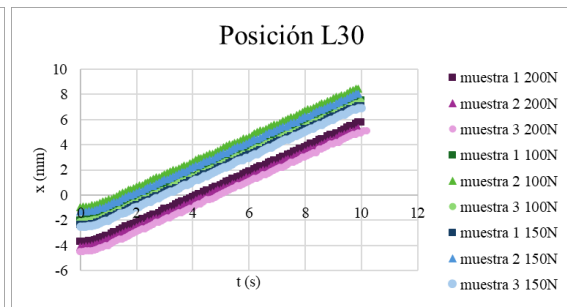
Previamente a la realización del análisis de los resultados, se comprueba que todas las huellas realizadas tengan una longitud de 10 mm mediante las gráficas que indican la posición del indentador a lo largo del tiempo de duración del ensayo.



a)



b)



c)

Figura 20. Posición del ensayo de rayado sobre a) el sustrato, b) la probeta L10, c) la probeta L30.

Para calcular la fuerza de rozamiento se utiliza la siguiente ecuación.

$$F_{roz} = \mu \cdot N \quad (1)$$

N es la fuerza normal, y su valor es equivalente a F_z pero en sentido contrario, es decir a la fuerza aplicada por el indentador a la hora de hacer el ensayo en negativo. En este caso su valor es de 100N, 200N o 300N dependiendo de la muestra.

El coeficiente de fricción (μ) se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

$$\mu = \frac{F_x}{-F_z} \quad (2)$$

5.6. Microscopía Láser Confocal

El microscopio confocal fue patentado por Marvin Minsky en 1957. Si se compara con un microscopio óptico, el confocal ofrece una mayor resolución y nitidez de imagen, así como la

capacidad de estudiar la morfología tridimensional de la muestra de forma no invasiva. Para lograr esto, la luz del haz interactúa con la muestra, escaneándola mediante la variación del punto focal. El microscopio bloquea la luz fuera del foco, y la restante se registra creando una imagen detallada [39].

En nuestro caso, a partir de las marcas obtenidas en el material mediante los ensayos de rayado, se ha realizado un estudio de su morfología mediante un microscopio confocal (Zeiss UP-24).

Para tomar las imágenes se ha utilizado el interferómetro de diez aumentos. Con el programa Lamda 20 se ha ajustado el objetivo y se ha escaneado la muestra. En la figura 21 se muestran imágenes de los surcos del ensayo tomadas con el microscopio confocal, y en la figura 22 se puede observar una imagen 3D de uno de los surcos.

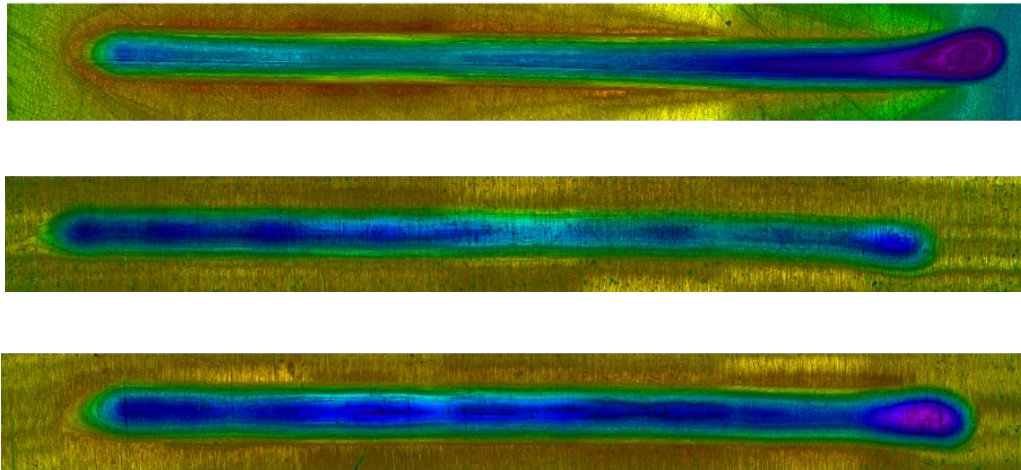


Figura 21. De arriba abajo, imágenes realizadas con el microscopio confocal muestra Sustrato_200N, L10_200N y L30_200N.

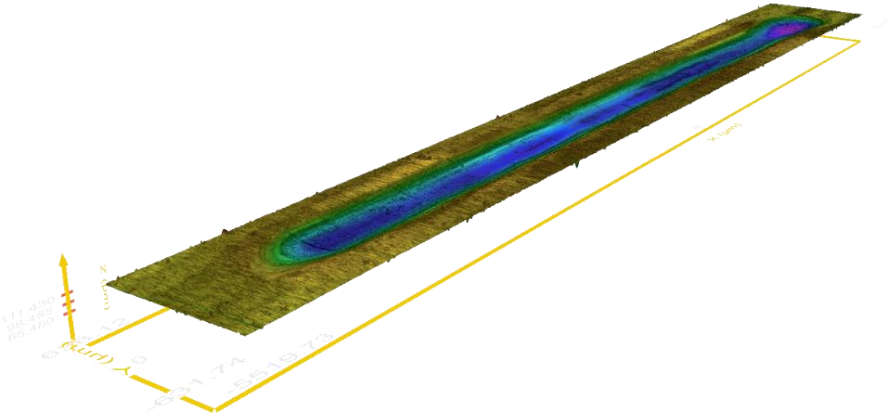


Figura 22. Imagen 3D realizada con el microscopio confocal de la muestra L10_200N.

Tras la toma de imágenes 3D, se ha analizado la muestra con el programa Gwyddion (Figura 23). De este modo se ha obtenido el valor del volumen desplazado en cada una de las huellas realizadas mediante los ensayos de rayado, pudiendo así evaluar el desgaste en cada una de ellas. También se han obtenido gráficas de la morfología transversal, cuatro para cada huella, en total 108 gráficas (Figura 24).

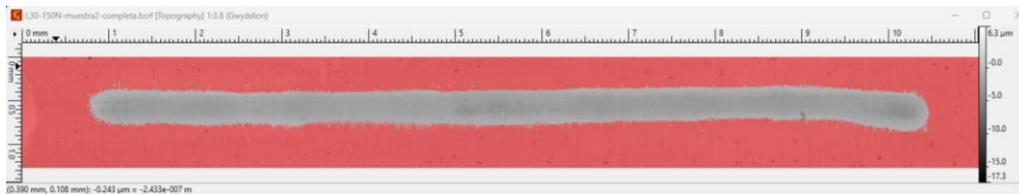


Figura 23. Máscara aplicada sobre la muestra L30_150N en el programa Gwyddion para realizar el análisis del volumen desplazado y la morfología transversal.

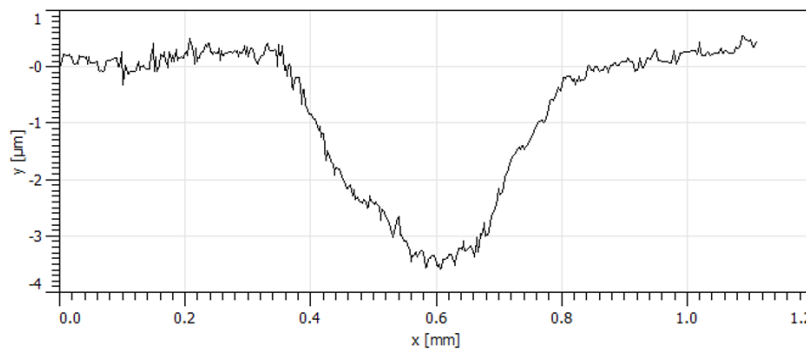


Figura 24. Gráfica de la sección transversal de la muestra L30_150N

5.7. Microscopio electrónico de barrido (SEM)

La microscopía de barrido (SEM) es una técnica de obtención de imágenes de alta resolución mediante la respuesta de un material a un haz de electrones, que permite analizar las características estructurales, morfológicas y químicas de las probetas [40].

Al realizar el ensayo de rayado se va deformando el material, pudiendo llegar a fracturarse y desprenderse partículas. Por ello, se han analizado las huellas realizadas con una fuerza de 200N sobre las muestras L10 y L30, y sobre el sustrato, con el microscopio electrónico de barrido (S-3400N). De este modo se ha estudiado la morfología tras el ensayo de rayado, con el fin de intentar explicar los mecanismos de desgaste que se han dado en la pieza.

Para cada muestra se han tomado imágenes a distintos aumentos: x250 y x1000. Se han comparado, pudiendo determinar los mecanismos de desgaste presentes en los surcos realizados durante el ensayo de rayado. Los ensayos se han realizado desde el lado derecho de la muestra hasta el lado izquierdo, como se indica en la figura 25.

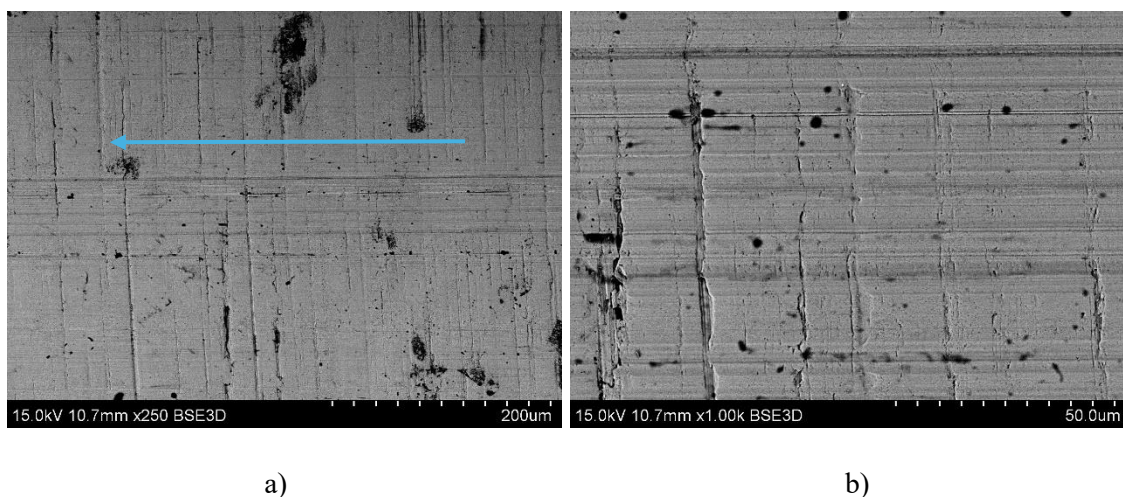


Figura 25. Imágenes realizadas mediante el microscopio electrónico de barrido de las huellas sobre la probeta L10 a) 250 aumentos, b) 1000 aumentos. La flecha indica la dirección de realización del ensayo.

También se ha estudiado la composición de los materiales de fabricación de las muestras mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos (EDX), determinando los elementos que forman el sustrato y el recubrimiento (Figura 26).

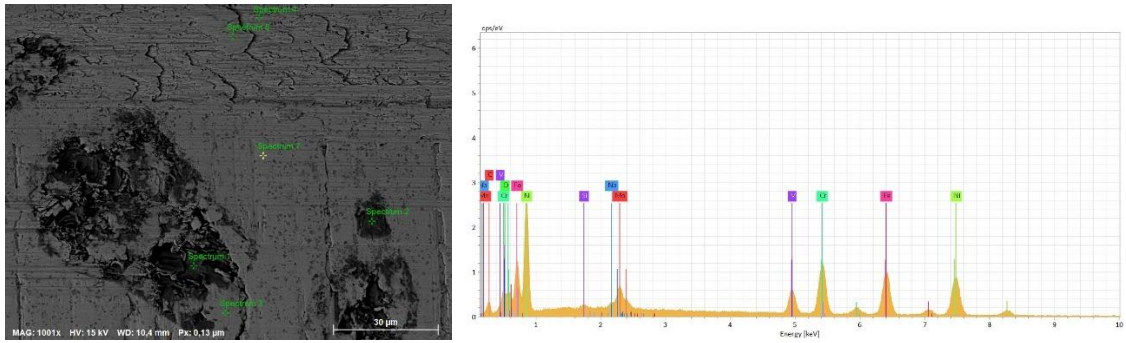


Figura 26. Análisis de la huella L30_200N a 1000 aumentos y gráfica del punto 4

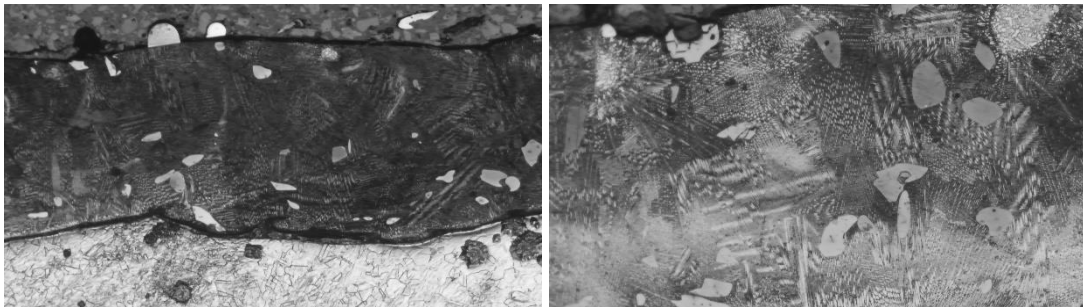
Los picos de las gráficas dan información acerca de los elementos que se encuentran en el material, su posición indica el elemento presente en la muestra y su intensidad la cantidad del mismo. Analizando las gráficas con los datos de salida se pueden determinar los puntos de interés, tanto de las huellas del sustrato como de las huellas realizadas con una fuerza de 200N en las probetas con recubrimiento.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

6.1. Microestructura.

La microestructura del sustrato, como se ha comentado previamente en el punto 4.1., está formada por granos equiaxiales de níquel con precipitados. Se compara esta microestructura (Figura 8) con la microestructura del recubrimiento con un 10% y un 30% de partículas de carburo de vanadio.

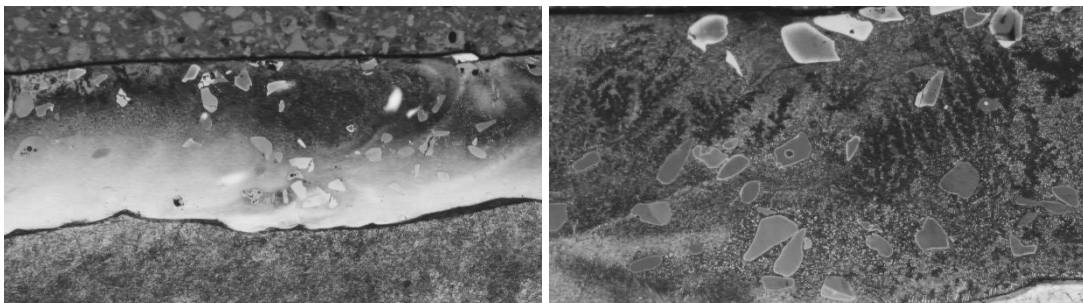
Tanto en la figura 27 como en la figura 28 se observan partículas de carburo de vanadio embebidas en la matriz de Inconel 625. En la primera se ve un menor número de partículas, debido a que solo tiene un 10% de carburo de vanadio, comparado con el 30% de la segunda.



a)

b)

*Figura 27. Microestructura del recubrimiento con un 10% de partículas de carburo de vanadio
a a) 5 aumentos, b) 10 aumentos.*



a)

b)

*Figura 28. Microestructura del recubrimiento con un 10% de partículas de carburo de vanadio
a a) 5 aumentos, b) 10 aumentos.*

En las imágenes con más aumentos (Figura 27 y 28 b) puede verse como la microestructura es diferente a la del sustrato, estando más orientada. Esto es típico en las solidificaciones con mayor velocidad de enfriamiento. También se observa que hay una abundante precipitación secundaria, debido al aumento en carbono y vanadio en la matriz como consecuencia de la fusión total o parcial de las partículas de carburo de vanadio durante la fabricación.

Si se comparan las microestructuras se puede determinar una diferencia entre la formación de los granos de la matriz, ya que los del sustrato (Figura 8) tienen una forma equiaxial, y los de los recubrimientos (Figuras 27 y 28) forman dendritas orientadas debido a la rápida solidificación.

6.2. Espesores

Las figuras 29 y 30 representan los valores medios de los espesores para cada una de las transversales de las probetas, diferenciando entre la dirección de fabricación (L, S o D) y la cantidad de porcentaje de VC (10% o 30%).

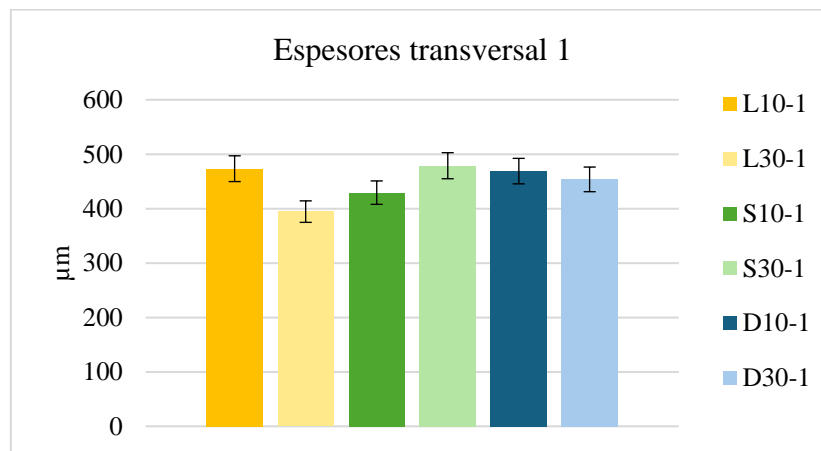


Figura 29. Espesores medios en la transversal 1 para todas las direcciones de fabricación y porcentajes de carburo de vanadio.

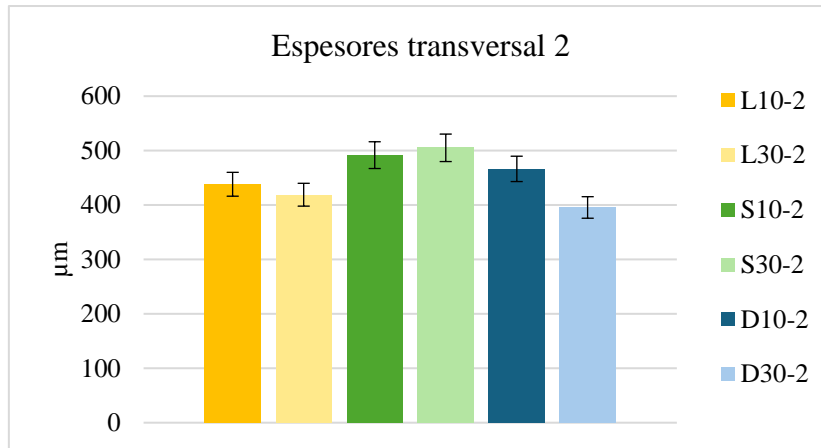


Figura 30. Espesores medios en la transversal 2 para todas las direcciones de fabricación y porcentajes de carburo de vanadio.

Se puede observar que la dirección de fabricación y el porcentaje de refuerzo afectan significativamente al espesor del recubrimiento generado, ya que en todas las muestras el espesor toma valores entre 400 μm y 500 μm aproximadamente.

6.3. Porosidad y partículas de carburo de vanadio

La siguiente tabla recoge los valores del porcentaje de porosidad y de partículas de carburo de vanadio que hay en los recubrimientos de las probetas transversales:

Tabla 2. Porcentaje de porosidad y partículas de carburo de vanadio presentes en los recubrimientos L10, L30, S10, S30, D10 y D30, en función de la sección transversal.

| | | Poros | | Carburo de vanadio | |
|-----|----|-------|-------------|--------------------|-------------|
| | | % | σ | % | σ |
| L10 | T1 | 0,137 | $\pm 0,060$ | 3,411 | $\pm 0,825$ |
| | T2 | 0,107 | $\pm 0,047$ | 4,216 | $\pm 0,426$ |
| L30 | T1 | 0,222 | $\pm 0,107$ | 10,562 | $\pm 2,711$ |
| | T2 | 0,151 | $\pm 0,034$ | 11,543 | $\pm 1,134$ |
| S10 | T1 | 0,078 | $\pm 0,076$ | 2,942 | $\pm 0,506$ |
| | T2 | 0,182 | $\pm 0,148$ | 3,845 | $\pm 0,873$ |

| | | Poros | | Carburo de vanadio | |
|-----|----|-------|-------------|--------------------|-------------|
| | | % | σ | % | σ |
| S30 | T1 | 0,214 | $\pm 0,049$ | 16,845 | $\pm 0,755$ |
| | T2 | 0,290 | $\pm 0,087$ | 18,947 | $\pm 5,119$ |
| D10 | T1 | 0,149 | $\pm 0,082$ | 2,354 | $\pm 0,767$ |
| | T2 | 0,072 | $\pm 0,059$ | 4,041 | $\pm 1,247$ |
| D30 | T1 | 0,234 | $\pm 0,121$ | 14,518 | $\pm 2,398$ |
| | T2 | 0,363 | $\pm 0,047$ | 12,245 | $\pm 1,651$ |

Si se comparan los valores medios de porosidad, se puede observar que la sección transversal no determina la cantidad de poros presentes en el recubrimiento, sin embargo, en las probetas con un 30% de carburo de vanadio la porosidad se incrementa ligeramente.

Por otro lado, el porcentaje de partículas de carburo de vanadio aumenta considerablemente en los recubrimientos fabricados a partir de la mezcla de polvo con mayor porcentaje de refuerzo. Las secciones transversales estudiadas no muestran cambios considerables en el porcentaje de partículas, pero en la mayoría de los casos se observa que es mayor para la transversal 1.

6.4. Ensayos de microdureza

Los valores de microdureza del sustrato, intercara y recubrimiento de las secciones transversales de cada una de las probetas, se han representado en las siguientes gráficas. Se han agrupado teniendo en cuenta la dirección de fabricación. En las figuras 31, 32 y 33 se muestran los perfiles de microdureza para cada dirección.

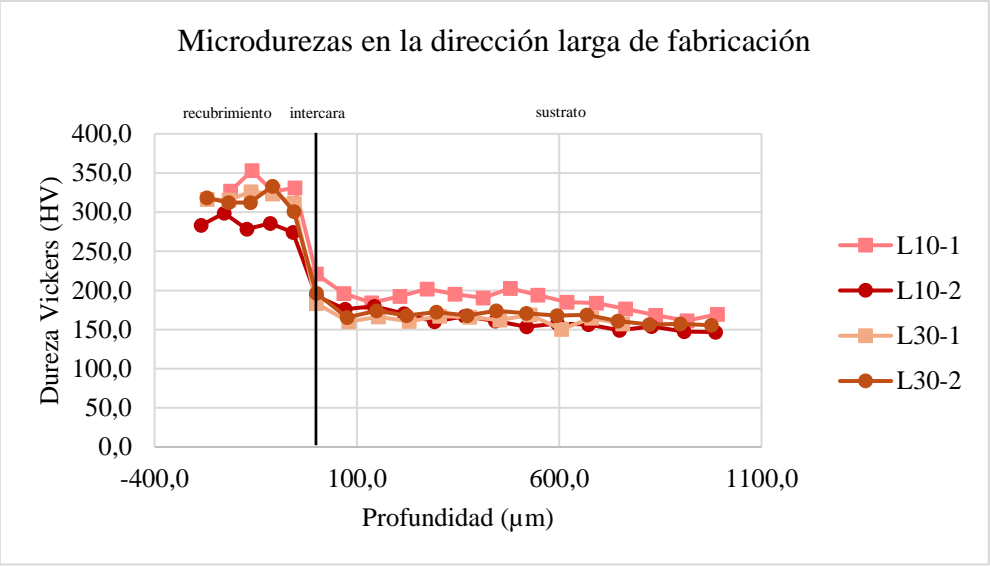


Figura 31. Perfiles de microdureza en la dirección de fabricación larga.

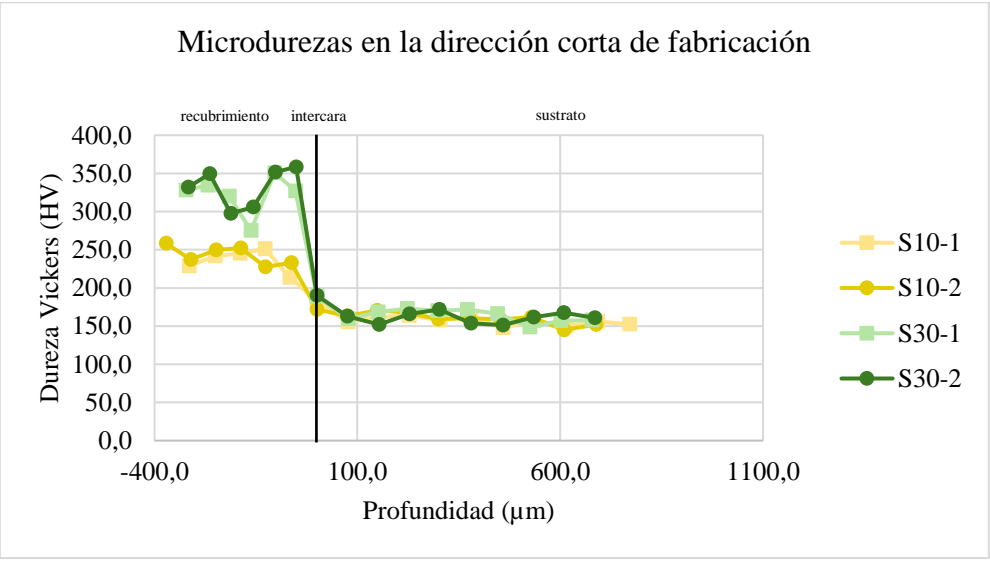


Figura 32. Perfiles de microdureza en la dirección de fabricación corta.

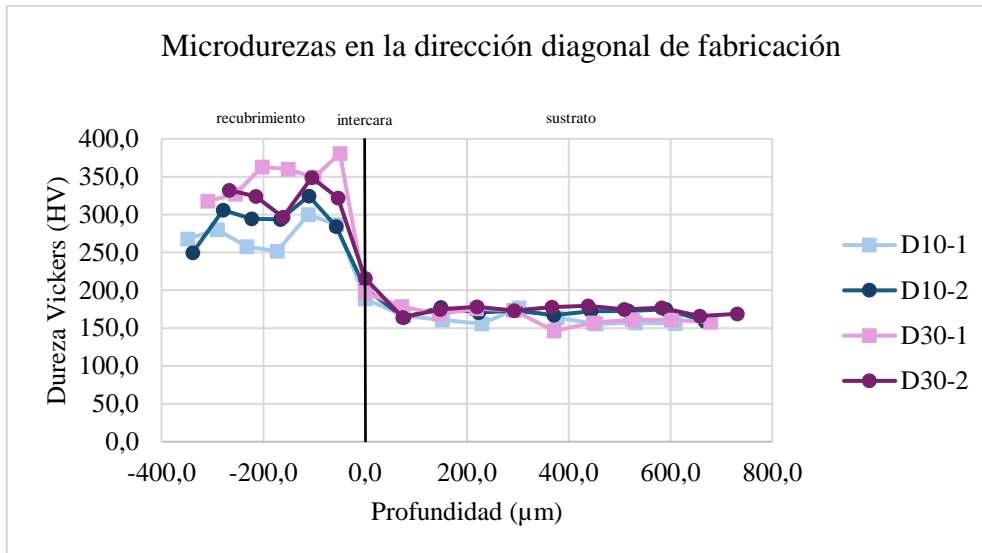


Figura 33. Perfiles de microdureza en la dirección de fabricación diagonal.

Se observa que la zona del sustrato tiene menor dureza que la zona del recubrimiento, y que en la intercara entre ambas, la dureza aumenta ligeramente respecto a la del sustrato, sin llegar a alcanzar los valores del recubrimiento. Esto se debe a que en la zona afectada por el calor y la zona fundida se forman fases duras, y la rápida solidificación provoca un aumento de la dureza.

Con los datos recogidos en la figura 31 se puede determinar que la microdureza no varía excesivamente entre la probeta con un 10% de carburo de vanadio y las de un 30% de carburo de vanadio. Por otro lado, en las figuras 32 y 33 se observa un aumento de la microdureza en las probetas con mayor proporción de carburo de vanadio, especialmente en las fabricadas con una dirección de deposición láser corta.

Las probetas con dirección de fabricación corta tienen menor microdureza que las fabricadas con una dirección larga o diagonal. Esto se debe a que el tiempo de enfriamiento es menor en estas últimas al realizar el láser un mayor recorrido, provocando que los granos sean más grandes y la dureza sea menor.

La diferencia entre las microdurezas de las probetas fabricadas con dirección larga y diagonal es despreciable, debido a que el tiempo de enfriamiento de ambas es similar.

En conclusión, la dureza de las piezas aumenta con la proporción de carburo de vanadio del recubrimiento, y además también aumenta si se fabrica con una dirección de deposición larga o diagonal.

6.5. Rugosidad

Tras realizar el ensayo de rugosidad sobre el sustrato, las probetas con recubrimiento sin mecanizar y las probetas mecanizadas, se han medido los valores medios de los distintos tipos de rugosidades (Ra, Rz y Rq), y se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Medidas de rugosidad media del sustrato, y de los recubrimientos sin mecanizar y mecanizados.

| | | Ra | | Rz | | Rq | |
|------------------|-----|---------------|------------|---------------|-------------|---------------|------------|
| | | μm | σ | μm | σ | μm | σ |
| Sustrato | | 0,09 | $\pm 0,02$ | 0,75 | $\pm 0,20$ | 0,12 | $\pm 0,03$ |
| SIN MECANIZAR | L10 | 7,02 | $\pm 0,76$ | 41,89 | $\pm 6,43$ | 41,89 | $\pm 1,11$ |
| | L30 | 6,69 | $\pm 0,80$ | 43,77 | $\pm 3,60$ | 9,5 | $\pm 1,02$ |
| | S10 | 6,98 | $\pm 0,94$ | 40,15 | $\pm 5,70$ | 9,19 | $\pm 1,52$ |
| | S30 | 9,01 | $\pm 1,48$ | 52,23 | $\pm 10,36$ | 12,15 | $\pm 2,10$ |
| | D10 | 6,01 | $\pm 0,85$ | 39,16 | $\pm 5,90$ | 8,43 | $\pm 1,25$ |
| | D30 | 6,69 | $\pm 1,18$ | 43,29 | $\pm 3,12$ | 9,49 | $\pm 1,44$ |
| MECANIZADO | L10 | 0,28 | $\pm 0,01$ | 2,31 | $\pm 0,25$ | 0,36 | $\pm 0,01$ |
| | L30 | 0,23 | $\pm 0,02$ | 2,67 | $\pm 0,62$ | 0,34 | $\pm 0,06$ |
| | S10 | 0,13 | $\pm 0,02$ | 1,19 | $\pm 0,23$ | 0,18 | $\pm 0,03$ |
| | S30 | 0,12 | $\pm 0,02$ | 1,44 | $\pm 0,42$ | 0,17 | $\pm 0,04$ |
| | D10 | 0,32 | $\pm 0,04$ | 2,56 | $\pm 0,43$ | 0,41 | $\pm 0,06$ |
| | D30 | 0,23 | $\pm 0,03$ | 1,9 | $\pm 0,32$ | 0,3 | $\pm 0,04$ |

Como se puede observar en la Tabla 3, los valores de rugosidad para las probetas sin mecanizar son muy similares entre ellos, al igual que los valores para probetas mecanizadas; pero si se comparan ambos tipos de muestras, se confirma lo esperado, una reducción de la rugosidad al mecanizar la superficie. Por otro lado, el sustrato tiene menor rugosidad que las muestras con recubrimiento.

La fabricación del recubrimiento hace aumentar la rugosidad, y como en todos los casos se ha utilizado el mismo solape entre líneas, 50%, no hay cambios en la rugosidad.

Al mecanizar las muestras se eliminan los surcos producidos por el solapamiento, reduciendo considerablemente la rugosidad superficial de las muestras.

6.6. Ensayo de rayado

Los datos de salida de los ensayos de rayado, realizados en las probetas L10 y L30 y en el sustrato, son la fuerza en el eje z, la fuerza en el eje x, la posición en el eje z, y la posición en el eje x frente al tiempo de duración del ensayo. En el sustrato también se ha obtenido como dato de salida el coeficiente de rozamiento, de modo que, mediante la ecuación 2, se puede comparar y determinar si los valores de salida son correctos, y calcular el coeficiente para el resto de las muestras.

En la figura 34 se puede ver cómo la fuerza aplicada durante los ensayos permanece constante. Es una gráfica de control, para asegurar que el ensayo se ha llevado a cabo de manera correcta, debido a que esta fuerza es un parámetro de entrada. Se observa que los valores son correctos, ya que las fuerzas indicadas en los parámetros de entrada del ensayo han sido de 100N, 150N y 200N.

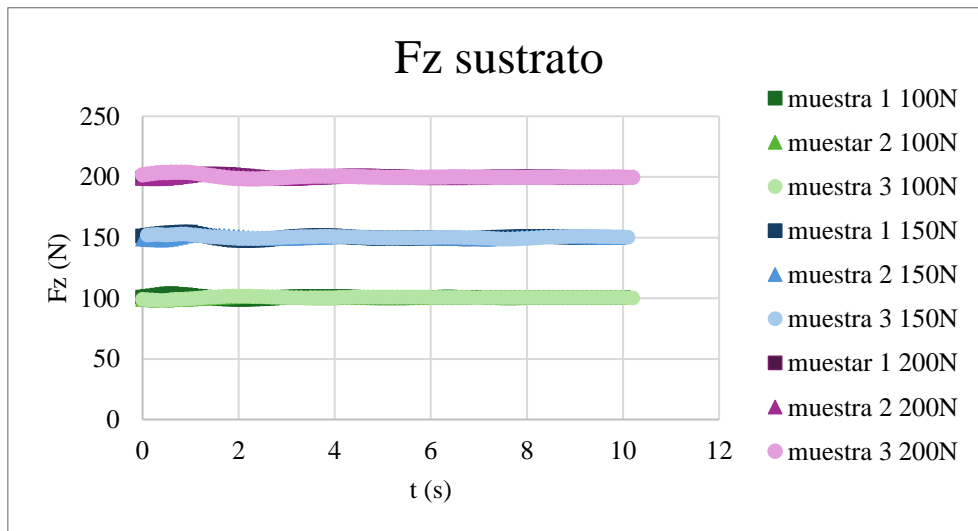


Figura 34. Fuerza del indentador en el ensayo de rayado sobre el sustrato de Inconel 625.

La figura 35 se corresponde a la fuerza en el eje x, es decir, la fuerza de rozamiento. Se observa que las huellas realizadas con una mayor fuerza de indentación tienen una mayor fuerza de rozamiento. Esto se debe a que al aplicar más fuerza el material opone mayor restricción al movimiento de la bola sobre la superficie. La fuerza de rozamiento es aproximadamente constante en todos los surcos, ya que la superficie es igual en cada uno de los ensayos realizados.

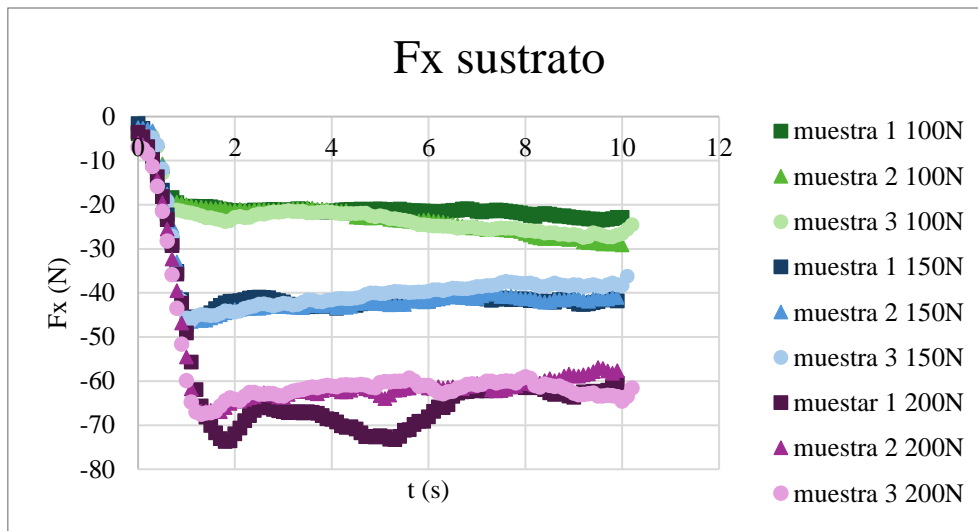
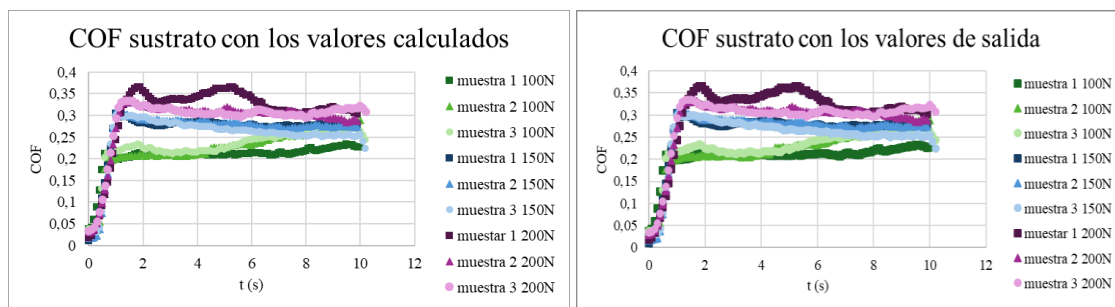


Figura 35. Fuerza en el eje x en el ensayo de rayado sobre el sustrato.

Con estos valores y los representados en la gráfica 34 se puede calcular el coeficiente de rozamiento para cada una de las huellas, mediante la ecuación 2. Estos valores se representan en una gráfica y se contrastan con la del coeficiente de fricción obtenida mediante el tribómetro a la hora de realizar el ensayo de rayado.



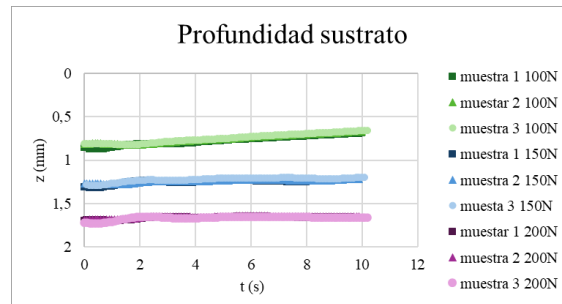
a)

b)

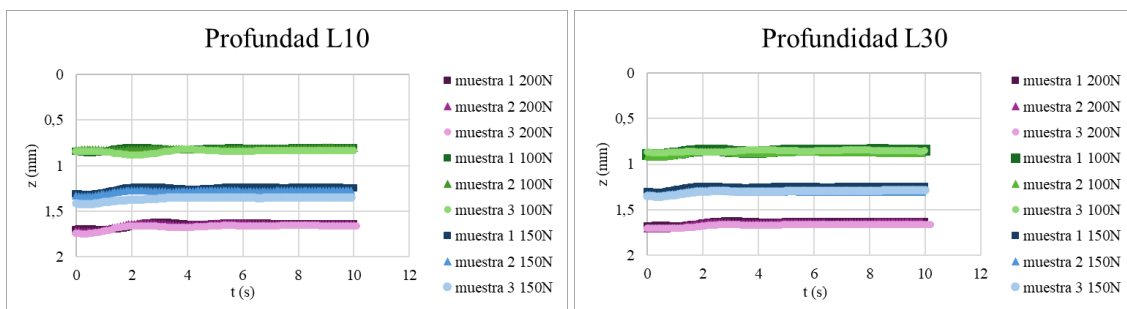
Figura 36. Coeficiente de fricción del ensayo de rayado sobre el sustrato, a) valores calculados, b) valores medidos por el tribómetro.

Se puede observar que ambas gráficas son iguales. Esto indica que los valores de salida del coeficiente de rozamiento son correctos. Los coeficientes de rozamiento más altos son los de las huellas realizadas con 200N, y los más bajos los de las huellas de 100N, por el mismo motivo que en la figura 35.

En cuanto a la profundidad del sustrato, aumenta linealmente la profundidad al aumentar la fuerza aplicada (Figura 37). Para las muestras L10 y L30 se han realizado las mismas gráficas, de modo que se pueden comparar los valores obtenidos con los valores del sustrato.



a)



b)

c)

Figura 37. Profundidad del ensayo de rayado sobre a) el sustrato, b) la probeta L10, c) la probeta L30.

La profundidad de las huellas en los recubrimientos es constante en todo el ensayo. Cuando se aumenta el valor de F_z , aumenta la profundidad del surco

En la figura 38 se ha representado la fuerza del indentador en función del tiempo. Ambas gráficas son muy similares, y al igual que la gráfica 34, indican que los ensayos se han realizado de manera correcta.

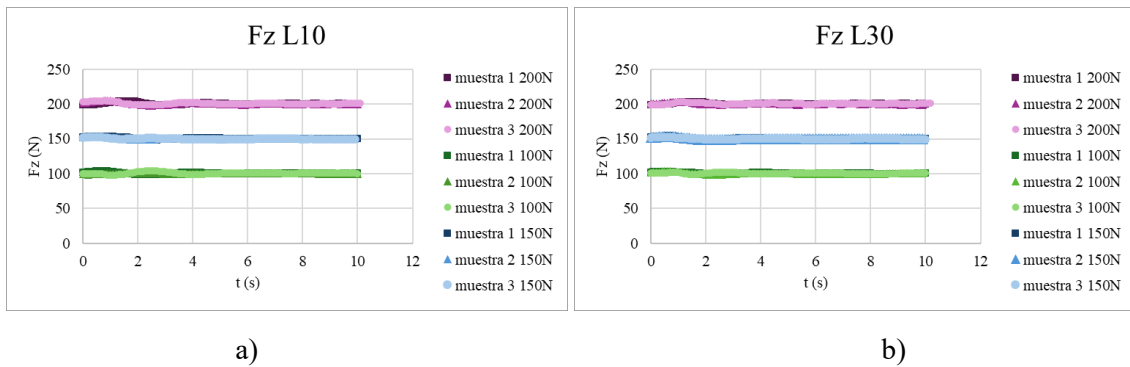


Figura 38. Fuerza en el indentador durante el ensayo de rayado sobre a) la probeta L10, b) la probeta L30.

La fuerza de rozamiento de las huellas realizadas en las muestras L10 y L30, al igual que en el sustrato, aumenta al aumentar la fuerza de indentación (Figura 39 y 40). En este caso la fuerza en el eje x no es constante, debido a que la superficie del recubrimiento no es uniforme a lo largo de la huella, sino que contiene partículas de carburo de vanadio de mayor dureza repartidas a lo largo de la superficie.

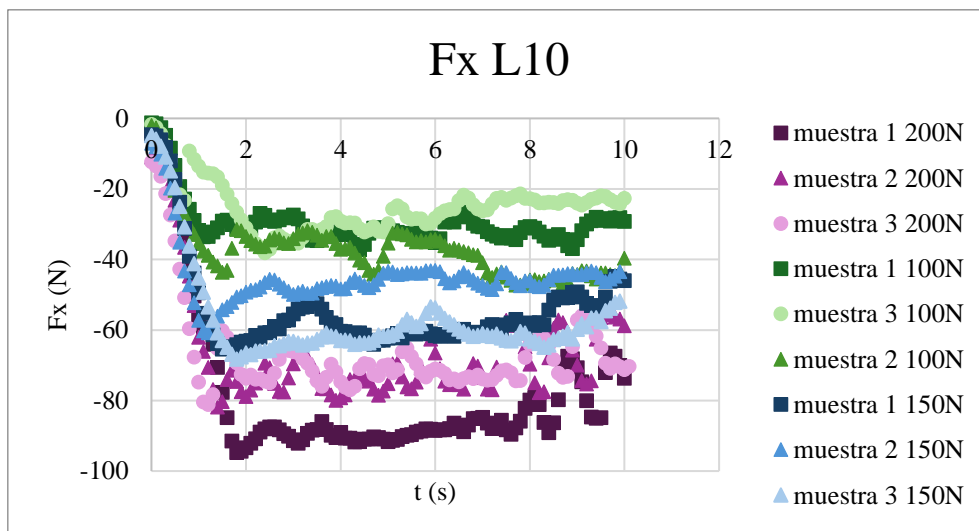


Figura 39. Fuerza en el eje x durante el ensayo de rayado sobre la probeta L10.

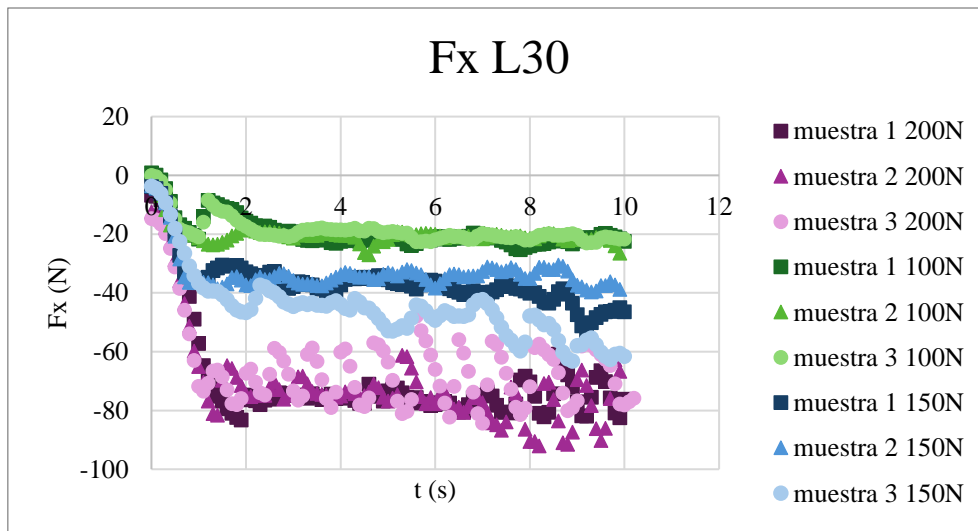
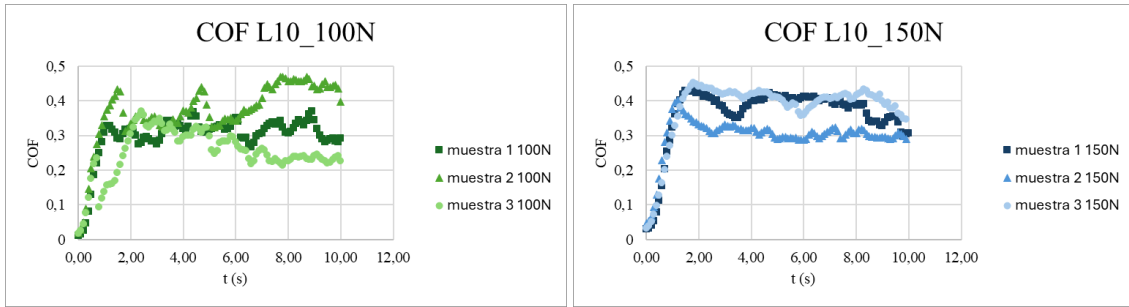


Figura 40. Fuerza en el eje x durante el ensayo de rayado sobre la probeta L30.

Si se comparan las figuras 39 y 40, se puede ver que la fuerza de rozamiento registrada es mayor en los surcos realizados sobre las superficies recubiertas con un 10% de carburo de vanadio que en los realizados en las probetas con un 30% de carburo de vanadio.

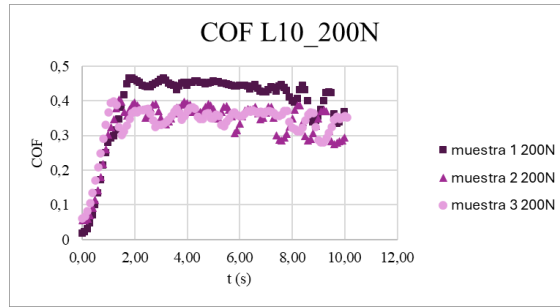
Por otro lado, al comparar estas dos figuras con la figura 35 se observa que la fuerza de rozamiento es menor en el sustrato, a pesar de tratarse de una superficie con una dureza inferior. Esto puede explicarse debido a la composición del material y a la rugosidad superficial. La microestructura del sustrato es más homogénea que la del recubrimiento, ya que esta segunda contiene partículas de carburo de vanadio embebidas en la matriz. Además, como se ha recogido en la tabla 3, el sustrato tiene una menor rugosidad superficial que el recubrimiento mecanizado, por lo que la fricción entre la superficie de la muestra y el indentador es menor.

A partir de la ecuación 2 se calcula el coeficiente de rozamiento de las muestras L10 y L30, y se representan en las figuras 41 y 42.



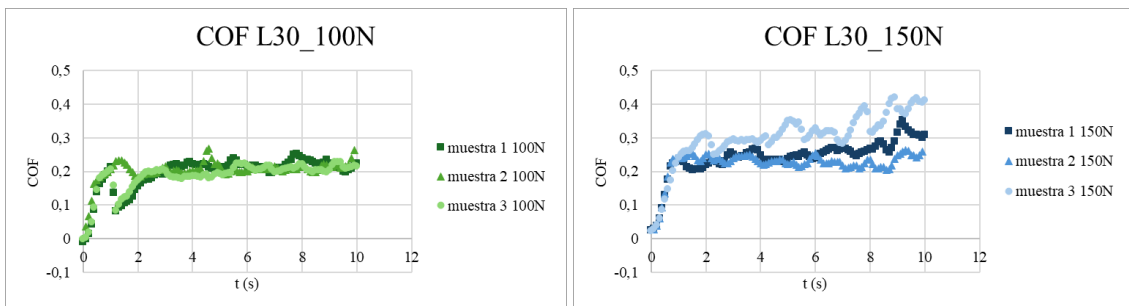
a)

b)



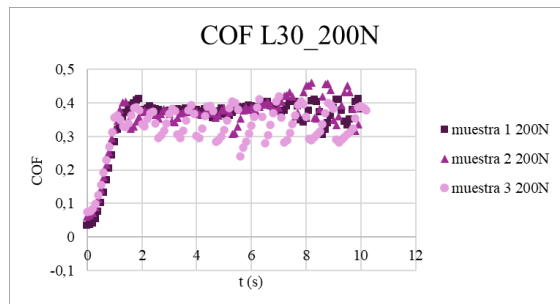
c)

Figura 41. Coeficiente de rozamiento en el ensayo de rayado sobre la probeta L10 aplicando una fuerza de indentación de a) 100N, b) 150N, c) 200N.



a)

b)



c)

Figura 42. Coeficiente de rozamiento en el ensayo de rayado sobre la probeta L30 aplicando una fuerza de indentación de a) 100N, b) 150N, c) 200N.

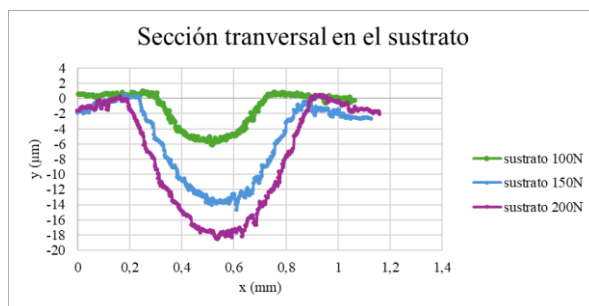
Al igual que ocurre con la fuerza de rozamiento, el coeficiente de rozamiento aumenta al incrementarse la fuerza ejercida por el indentador. También es irregular a lo largo del tiempo debido a la presencia de partículas duras de carburo de vanadio en la matriz de Inconel 625.

Al comparar las figuras 41 y 42 se puede determinar que a mayor cantidad de partículas de carburo de vanadio presentes en el recubrimiento menor coeficiente de rozamiento, y comparando ambas con la figura 36 se observa que las probetas recubiertas tienen un mayor coeficiente de fricción que el sustrato, debido a la composición del material y a la rugosidad superficial, tal y como ocurre con la fuerza de rozamiento.

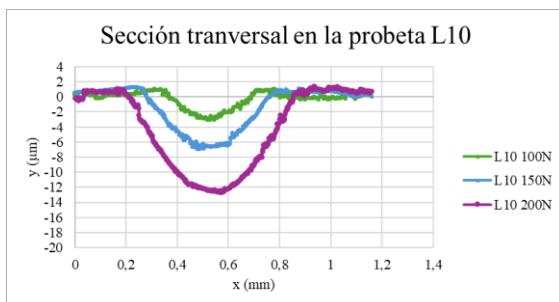
Para explicar la irregularidad de las fuerzas de rozamiento y coeficiente de fricción de las probetas recubiertas, es necesario determinar los mecanismos de desgaste que se producen a la hora de realizar el ensayo de rayado. Para ello se ha realizado un estudio de los surcos en el microscopio electrónico de barrido.

6.7. Análisis de desgaste

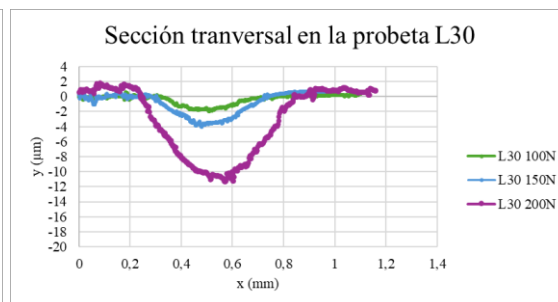
A partir de las imágenes tomadas de las huellas del ensayo de rayado, mediante el microscopio confocal, se estudia la morfología de la sección transversal y el volumen desplazado. A mayor volumen desplazado, mayor desgaste tendrá la probeta. En la figura 43 representan los perfiles transversales de los surcos realizados en el sustrato, en la probeta L10 y en la probeta L30.



a)



b)



c)

Figura 43. Sección transversal de las huellas realizadas a) en el sustrato, b) en la probeta L10 y c) en la probeta L30.

En las tres gráficas se observa que a medida que aumenta la fuerza que ejerce el indentador sobre la superficie, aumenta la profundidad del surco, así como su anchura. Esto indica que el volumen desplazado es mayor cuando la fuerza de indentación es mayor. También se puede comprobar que los surcos realizados en los recubrimientos tienen menor tamaño que los realizados en el sustrato, debido a que el recubrimiento aumenta la resistencia al desgaste de la pieza recubierta. Además, la probeta con un 30% de carburo de vanadio tiene menor pérdida de volumen que la probeta con un 10% de carburo de vanadio, ya que la dureza de las partículas aporta una mayor resistencia al desgaste en la superficie.

Analizando las huellas, se obtienen los valores medios del volumen desplazado (en mm^3), representados en la tabla 4, y divididos en probetas y fuerza aplicada con el indentador. Los valores se han tomado en tres muestras diferentes para cada surco estudiado.

Tabla 4. Volumen desplazado de las huellas realizadas en el ensayo de rayado para cada muestra.

| | 100N | | 150N | | 200N | |
|----------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| | mm ³ | σ | mm ³ | σ | mm ³ | σ |
| Sustrato | -0,0136 | $\pm 0,00043$ | -0,038 | $\pm 0,00456$ | -0,060 | $\pm 0,00507$ |
| L10 | -0,0063 | $\pm 0,00015$ | -0,018 | $\pm 0,00207$ | -0,048 | $\pm 0,00911$ |
| L30 | -0,0034 | $\pm 0,00057$ | -0,009 | $\pm 0,00048$ | -0,038 | $\pm 0,01225$ |

Como se puede observar, a mayor fuerza en el eje z mayor volumen desplazado. El volumen desplazado también aumenta en las probetas con recubrimientos, y si se comparan entre ellas es mayor en la probeta L30. Esto indica que el recubrimiento reduce el desgaste de las muestras, y a mayor proporción de carburo de vanadio a la hora de generar el recubrimiento, mayor resistencia al desgaste adquiere la muestra tratada.

6.8. Microscopio electrónico de barrido

Generalmente al realizar ensayos de rayado el material de la superficie se va deformando y puede llegar a fracturarse. Se han analizado las imágenes tomadas con el microscopio electrónico de barrido para tratar de definir el mecanismo de desgaste que ha tenido lugar durante en ensayo de rayado.

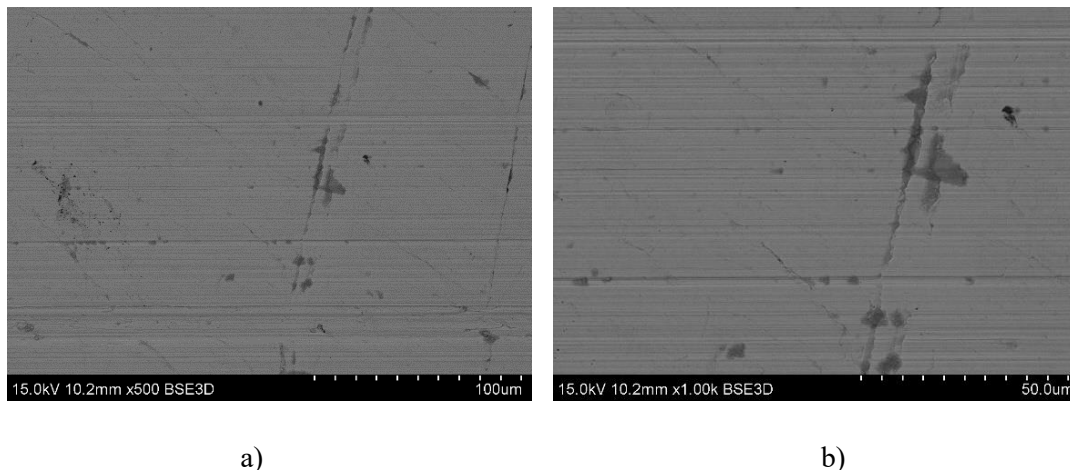


Figura 44. Imágenes tomadas por el SEM de la zona central del surco del sustrato realizado con una fuerza de 200N: a) 500 aumentos, b) 1000 aumentos.

En el sustrato se pueden observar surcos de rayado horizontales dentro de la huella. Esto ha sido provocado por asperezas de la bola y material arrancado de la superficie, que se adhiere a la bola.

También aparecen grietas perpendiculares al surco debido al empuje de material, que se rompe localmente pero no se llega a desgarrar. En esta figura también se puede observar parte del sustrato arrancado.

En las figuras 45 y 46 se puede comparar las probetas L10 y L30:

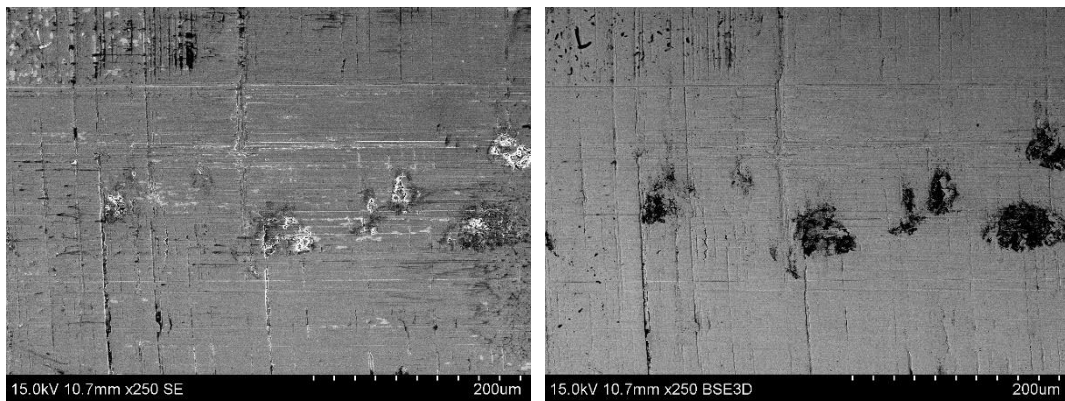


Figura 45. Imágenes tomadas por el SEM a 250 aumentos de la zona central del surco de la probeta L10: a) imagen SE, b) imagen BSE.

Se observa deformación en la matriz de Inconel 625. También se pueden ver partículas de carburo de vanadio (en color negro) y restos de matriz que se depositan sobre las partículas (en color gris). Además, se observan líneas de la deposición que se fracturan al paso de la bola.

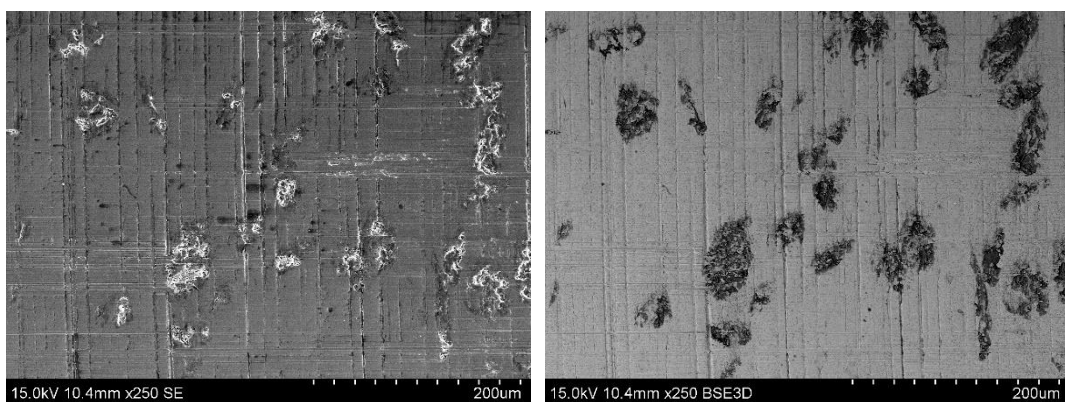


Figura 46. Imágenes tomadas por el SEM a 250 aumentos de la zona central del surco de las probetas a) L10, b) L30.

Comparando esta figura con la figura 45, se observa una mayor cantidad de partículas de carburo de vanadio (de color negro).

En ambos casos se observan rayas perpendiculares al surco, paralelas entre ellas. Estas son las líneas de la fabricación del recubrimiento.

En las figuras 47, 48 y 49 (realizadas con más aumentos) se aprecia mejor la deformación plástica. En el caso del surco realizado en la probeta L30, el material deformado se fractura y se vuelve a depositar, dejando esos restos dentro de los surcos.

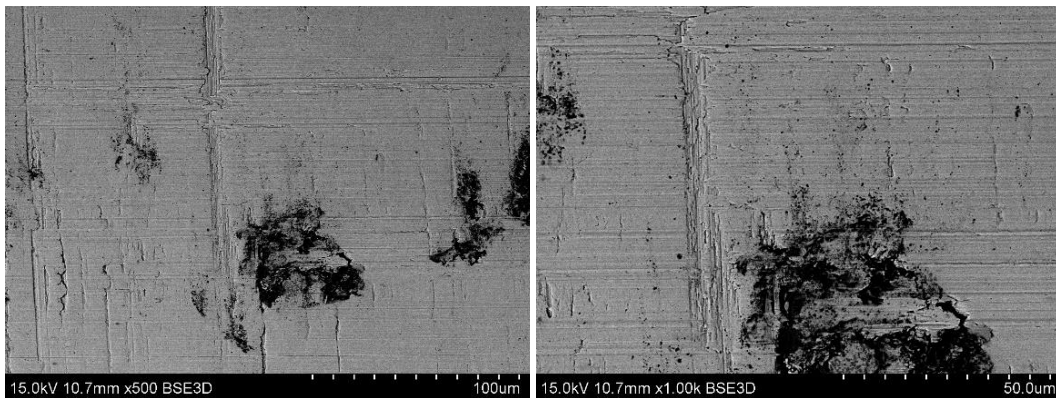


Figura 47. Imágenes tomadas por el SEM de la zona central del surco de la probeta L10 a) 500 aumentos, b) 1000 aumentos.

Comparando esta figura con la del sustrato se observa que los surcos de rayado horizontales se aprecian con menor intensidad, debido a que el material de la superficie tiene una mayor dureza.

También se observan partículas de carburo de vanadio parcialmente cubiertas por la matriz, al arrancarse parte de este material y volver a adherirse a la superficie.

Además, se pueden observar pequeñas porosidades a lo largo del surco.

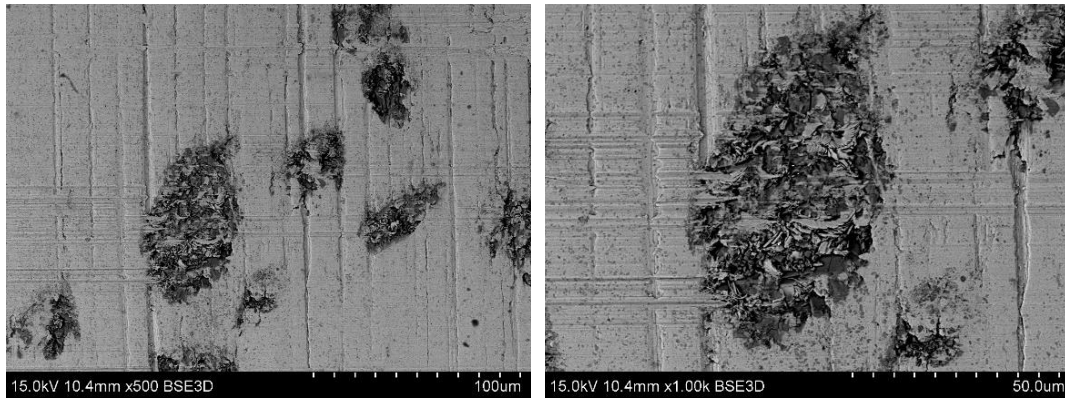


Figura 48. Imágenes tomadas por el SEM de la zona central del surco de la probeta L30, en la que se observan partículas, a) 500 aumentos, b)1000 aumentos.

En estas muestras, al igual que en las de la figura 47, se pueden ver partículas de carburo de vanadio arrancadas. En este caso se observa que esas partículas han rayado la superficie de la matriz, debido a que aparecen una mayor cantidad de surcos horizontales justo después de ser arrancada la partícula.

Esto indica que el mecanismo de desgaste ha sido el desgaste abrasivo a tres cuerpos: el indentador, la superficie de la probeta y la partícula arrancada.

También se observa porosidad a lo largo de la imagen.

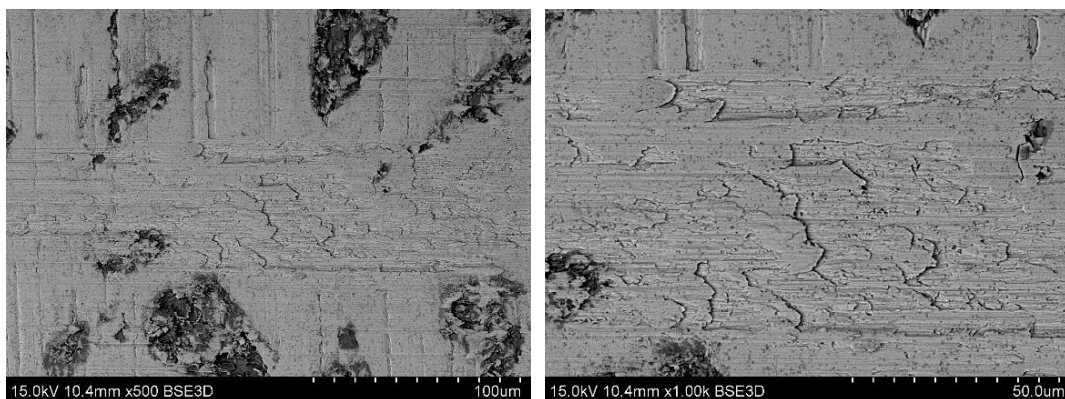


Figura 49. Imágenes tomadas por el SEM de la zona central del surco de la probeta L30, en la que se observan partículas, a) 500 aumentos, b)1000 aumentos.

En esta figura se observa el desgaste de la matriz. Parte del material de la superficie se ha arrancado y adherido de nuevo a la superficie, provocando un desgaste adhesivo a la muestra.

Con el análisis de espectroscopía de energía dispersiva de rayos (EDX) se consigue determinar la composición del sustrato y recubrimiento de las probetas.

En el sustrato se encuentran los siguientes puntos de interés:

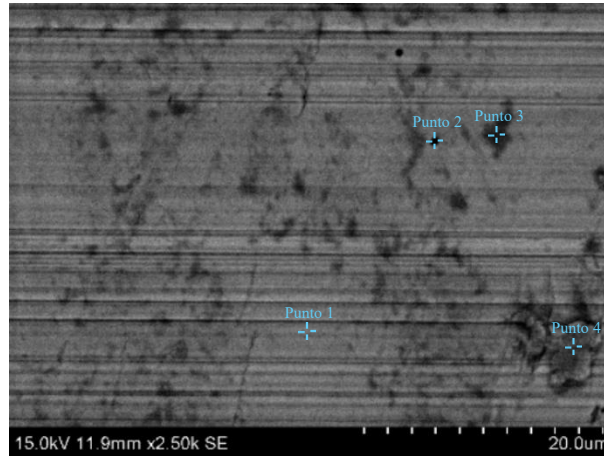


Figura 50. Fotografía tomada con el microscopio SEM a 2500 aumentos para realizar el estudio de EDX. Huella realizada en el sustrato con una fuerza de 100N.

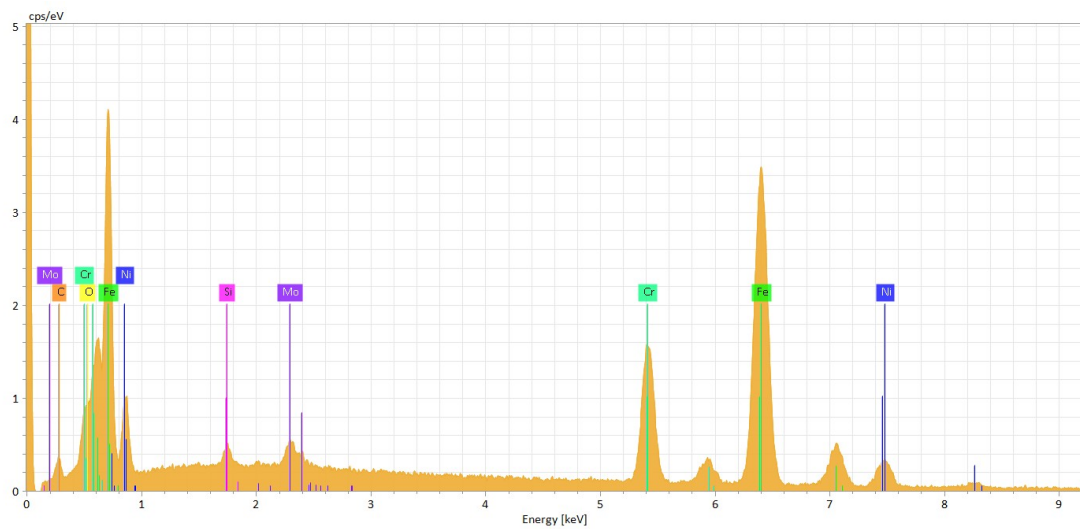


Figura 51. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto 1.

Debido a los elementos que componen esta zona del sustrato se puede determinar que es parte de la matriz de Inconel 625, ya que se encuentran los elementos nombrados anteriormente en la tabla 1.

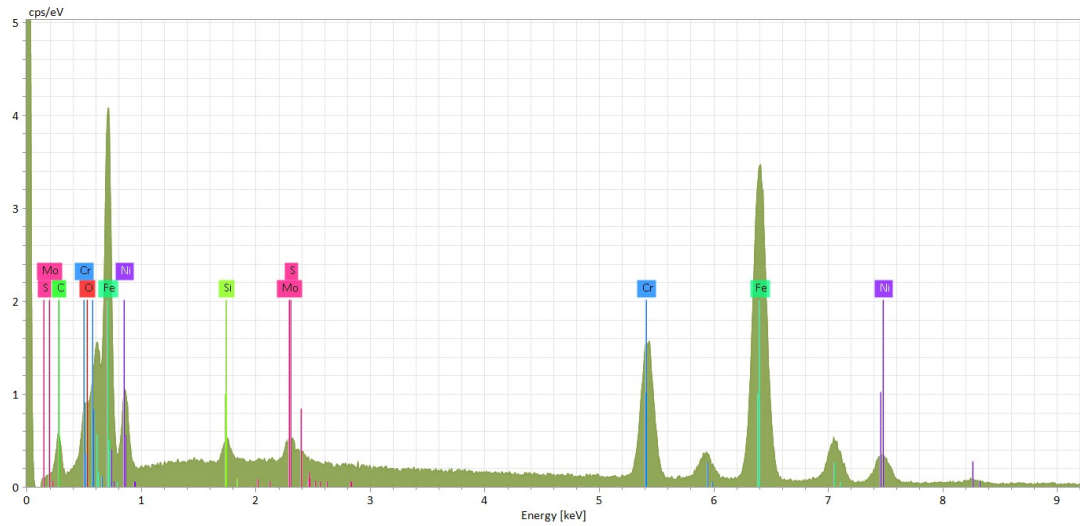


Figura 52. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto 2.

En este caso se observa que se trata de suciedad, ya que los elementos presentes coinciden con los de la matriz, pero también hay azufre.

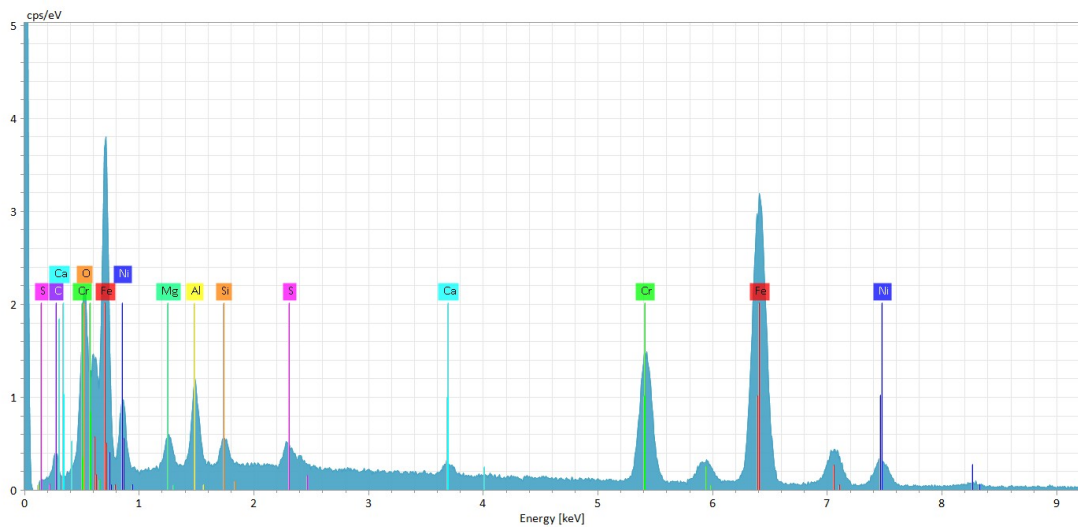


Figura 53. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto 3.

El punto 3 de la figura 50 corresponde a un poro, porque en él se encuentra, aparte de los elementos característicos de la matriz de Inconel 625, aluminio, calcio y manganeso.

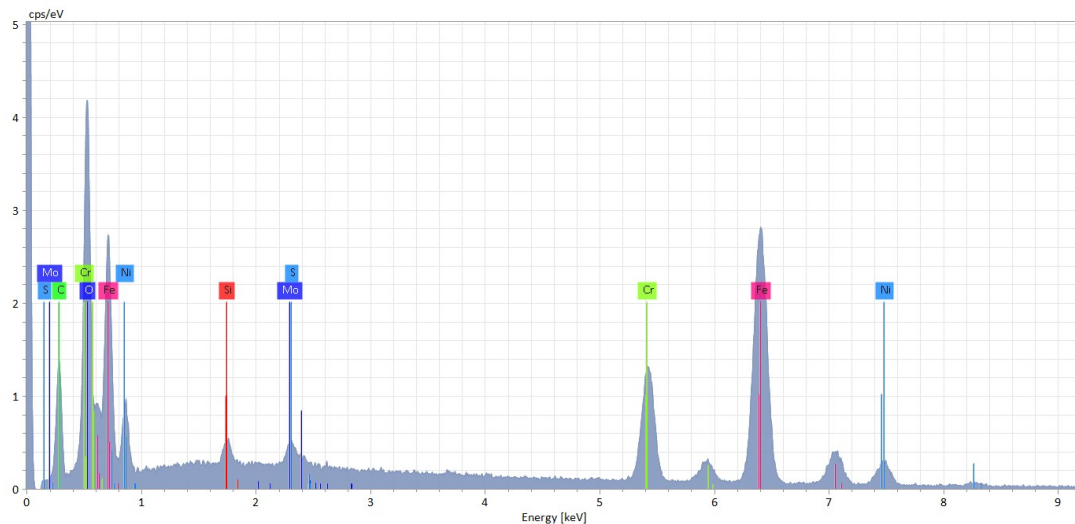


Figura 54. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto 4.

Debido al aumento de oxígeno se puede determinar que el punto 4 corresponde a una partícula arrancada, ya que al arrancarse y adherirse de nuevo a la superficie de la huella se ha oxidado.

En el caso de las probetas recubiertas con partículas de carburo de vanadio se pueden destacar los siguientes puntos:

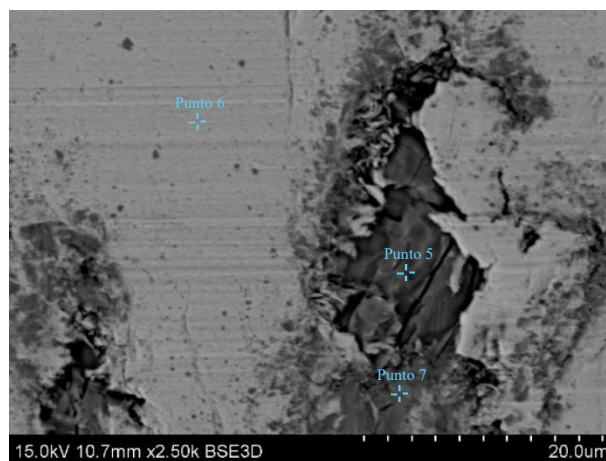


Figura 55. Fotografía tomada con el microscopio SEM a 2500 aumentos para realizar el estudio de EDX. Huella realizada en la muestra L10 con una fuerza de 200N.

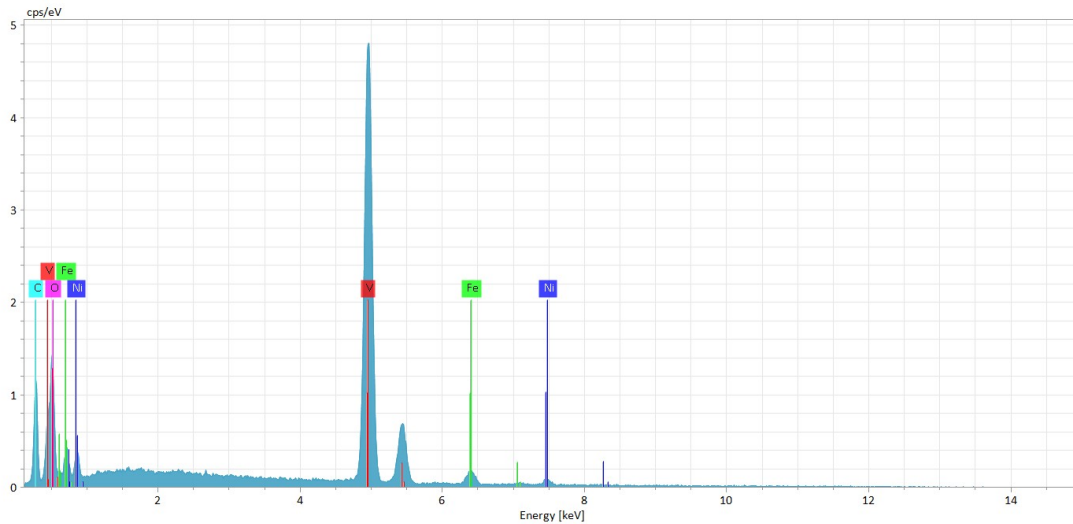


Figura 56. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto 5.

Como se puede observar, el punto 5 contiene principalmente vanadio y carbono, por lo que se trata de una partícula de carburo de vanadio, y no de material arrancado de la superficie.

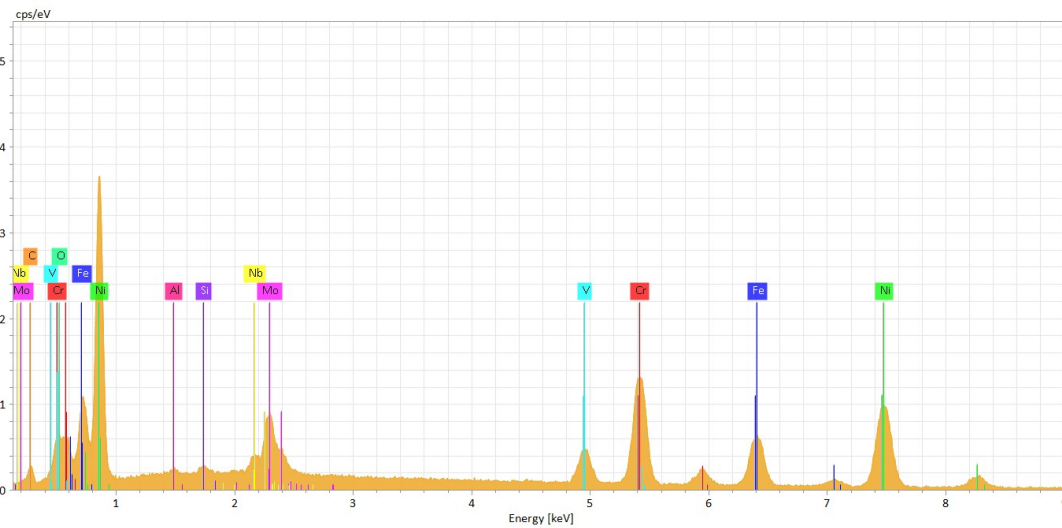


Figura 57. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto 7.

En el punto 6, al igual que ocurre en el sustrato, los elementos presentes corresponden a los de la matriz de Inconel 625.

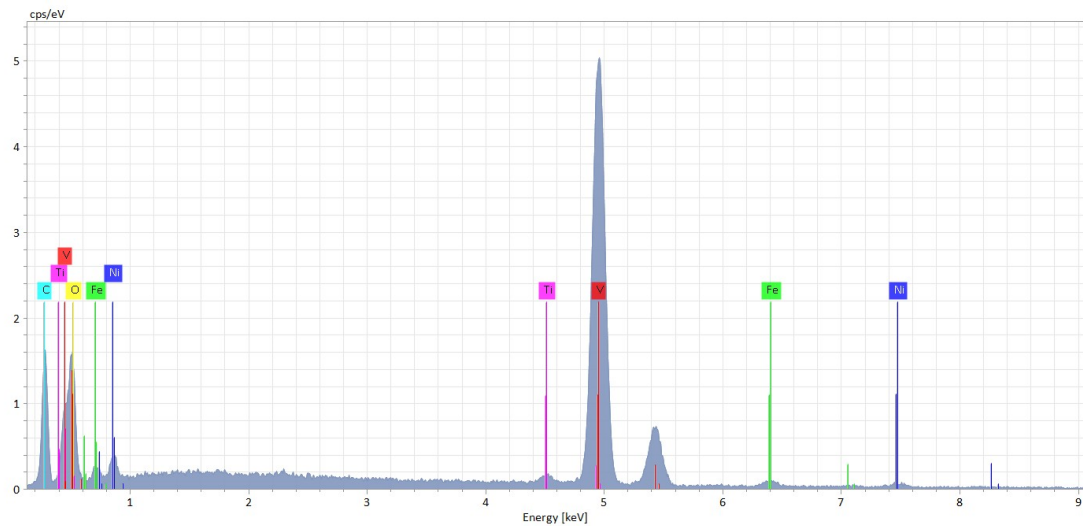


Figura 58. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto 7.

En el caso del punto 7, también se trata de una partícula de carburo de vanadio, pero esta zona de la partícula se encuentra parcialmente recubierta con Inconel 625, al adherirse matriz desprendida de la superficie. El material presente sobre la partícula pertenece a la matriz, debido a que el contraste de esta zona es igual al del punto 6.

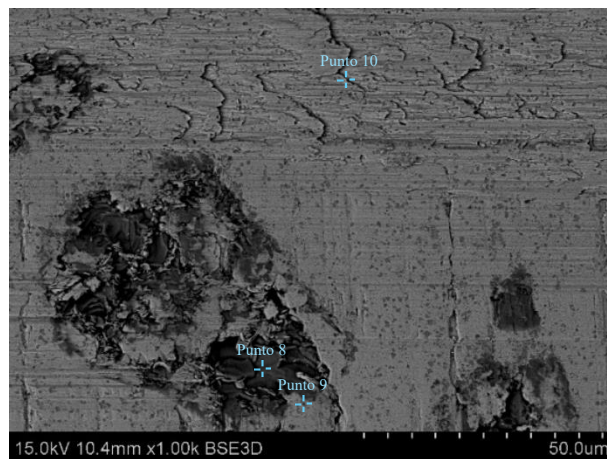


Figura 59. Fotografía tomada con el microscopio SEM a 1000 aumentos para realizar el estudio de EDX. Huella realizada en la muestra L30 con una fuerza de 200N.

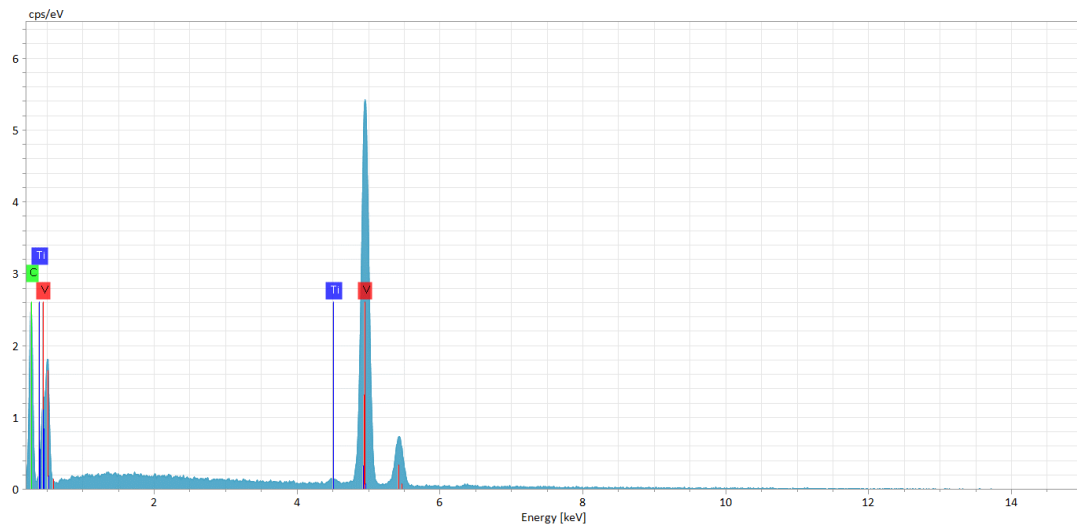


Figura 60. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto 8.

Al igual que en la figura 56, el punto 8 corresponde a una partícula de carburo de vanadio, ya que contiene principalmente carbono y vanadio.

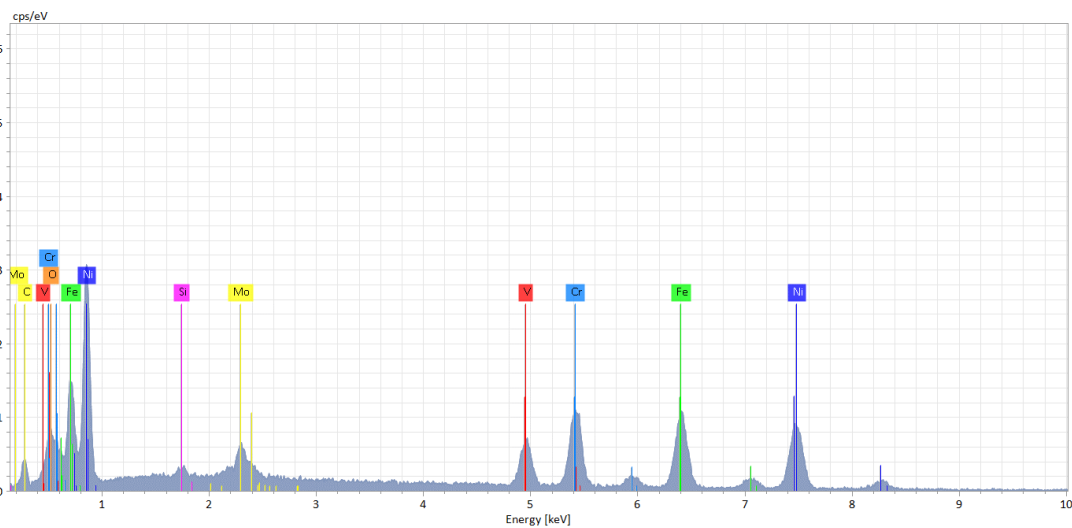


Figura 61. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto 9.

El punto 9 se trata, al igual que el punto 7, de matriz que recubre una partícula al arrancarse y adherirse de nuevo a la superficie.

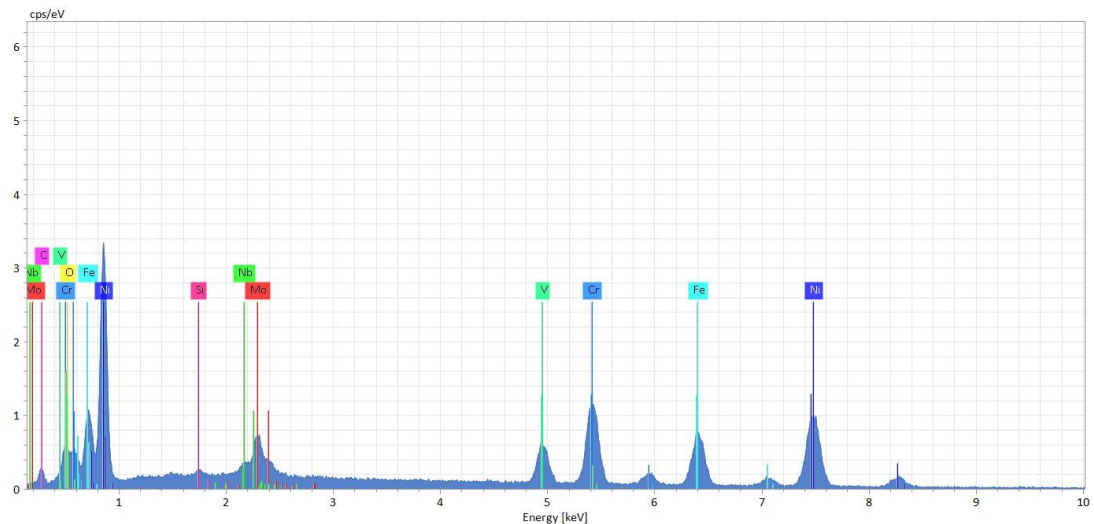


Figura 62. Gráfica EDX con los elementos presentes en el punto10.

El punto 8 se encuentra sobre una zona de la matriz en la que ha habido un desgaste. Los elementos correspondientes son los presentes en el Inconel 625, pero también hay un porcentaje de vanadio y de carbono, a pesar de no tratarse de una partícula de carburo de vanadio. Esto indica que el desgaste en esta zona se ha producido por el mecanismo de desgaste abrasivo a tres cuerpos, al arrancarse una partícula de carburo de vanadio, la cual ha sido responsable de desgastar la superficie.

El desgaste abrasivo a tres cuerpos tiene lugar cuando se liberan partículas de una de las superficies en contacto, y estas quedan atrapadas entre las dos superficies, generando un desgaste abrasivo [41].

Tras el análisis EDX, lo que se observa son las evidencias de un mecanismo de deformación plástica. En el recubrimiento L30 se producen roturas locales de la matriz debido a que esta tiene una mayor rigidez, al contener más cantidad de partículas y de precipitados, además de una mayor dureza medida en estos recubrimientos. Todo esto favorece que, debido a la deformación plástica, acabe fracturándose, se arrastre y se deposite en otras zonas.

7. CONCLUSIONES

El objetivo principal de este trabajo es el estudio del comportamiento microestructural y tribológico de recubrimientos duros de carburo de vanadio sobre sustratos de Inconel 625, procesados mediante la técnica láser-DED. Aplicando esta técnica de recubrimiento a los álabes de turbinas se consigue minimizar el desgaste, alargando su vida útil, lo que permite reducir los costes de mantenimiento.

Al comparar las tres direcciones de fabricación aplicadas (larga, corta y diagonal) y las dos proporciones de carburo de vanadio (10% y 30%), se puede determinar qué parámetros de aplicación de la técnica láser-DED aportan una mejor resistencia al desgaste:

Analizando los resultados se determina que la microdureza en las zonas recubiertas es mayor que en el sustrato, debido a la presencia de los carburos de vanadio. El aumento del porcentaje de carburos aumenta la dureza. Por otro lado, la microdureza es menor en la dirección corta que en las otras dos direcciones, debido a que esta dirección de fabricación hace que la velocidad de enfriamiento sea menor que en las otras dos.

La rugosidad, al igual que el espesor, no se ve afectada significativamente por la dirección de fabricación o la cantidad de carburos.

Los recubrimientos con mayor cantidad de carburo de vanadio presentan una menor fuerza de rozamiento, y por tanto un menor coeficiente de rozamiento. Además, al estudiar el volumen desplazado en los surcos, generados mediante el ensayo de rayado, se observa que aumenta en las probetas con menor proporción de carburos.

Al aplicar mayor fuerza sobre la superficie, el desgaste de las probetas es mayor, independientemente de la cantidad de carburo de vanadio presente en el recubrimiento.

Mediante el estudio con el microscopio electrónico de barrido y el análisis EDX de los surcos generados con una fuerza de 200N, se determina que tiene lugar un desgaste por deformación plástica. Esto da lugar a un desgaste adhesivo de la superficie. En el caso de la probeta L30, además provoca la fractura de la matriz, y su arrastre y deposición en otras zonas del surco, dando lugar también a un desgaste abrasivo de tres cuerpos.

Por esto se puede concluir que el recubrimiento que aporta mejores propiedades a la pieza tratada es el fabricado con un 10% de carburo de vanadio, debido a que la matriz de Inconel 625 no es tan dura como en los recubrimientos generados con un 30% de carburo de vanadio, evitando así el desprendimiento de material. Además se consigue un aumento de la dureza y de la resistencia al desgaste respecto al sustrato.

8. TRABAJOS FUTUROS

La investigación realizada se puede completar estudiando los siguientes puntos:

- Realizar el ensayo de rayado en las direcciones de fabricación corta y diagonal, pudiendo estudiar el volumen desplazado en cada uno de los surcos. De ese modo se podrá determinar si la dirección de fabricación de los recubrimientos afecta al desgaste de la pieza. También se podrá relacionar este parámetro con la rugosidad superficial y la microdureza obtenidas durante la investigación.
- Estudiar los mecanismos de desgaste para todas las fuerzas de indentación mediante el microscopio electrónico de barrido, así como realizar la espectroscopía de energía dispersiva de rayos en todos los surcos realizados en el ensayo de rayado. Con esto se podrá concluir si la fuerza aplicada influye en los mecanismos de desgaste que tienen lugar.
- También se puede investigar el comportamiento de las probetas recubiertas a alta temperatura, debido a que algunos álabes de turbina (como los presentes en los motores de reacción) trabajan bajo esta condición extrema. Así se determinaría si los recubrimientos de carburo de vanadio son adecuados para estas aplicaciones, mejorando no solo su resistencia al desgaste, sino también su resistencia a elevadas temperaturas.

9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] PLANA, Claudio Mataix. *Turbomáquinas hidráulicas: turbinas hidráulicas, bombas, ventiladores*. Universidad Pontificia Comillas, 2009.
- [2] RICONDO RODRÍGUEZ, Sergio, et al. Cálculo y análisis numérico de una turbina hidráulica tipo kaplan utilizando técnicas CFD. 2023.
- [3] YÁNEZ SÁNCHEZ, Jair Alexander. *Diseño Paramétrico de Álabes para Turbina Francis*. 2017. Tesis de Licenciatura. Quito, 2017.
- [4] Selección de materiales: álabes para turbinas de aviones. Imagen. [s. f.]. Disponible en: <https://elrincondemaxwell.wordpress.com/2015/10/20/seleccion-de-materiales-alabes-para-turbinas-de-aviones/>. [consultado el 05/06/2024].
- [5] BECERRA, PCL René Santiago Barral. *Prototipo de tribómetro anillo sobre bloque para obtención de curvas de fricción*. 2014. Tesis Doctoral. UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- [6] GÓMEZ BOTERO, Maryory Astrid. *Caracterización de las propiedades tribológicas de los recubrimientos duros*. Universitat de Barcelona, 2006.
- [7] Imagen. [s. f.]. Disponible en: https://conver2.wordpress.com/wp-content/uploads/2012/11/6-flujo_en_rejillas_de_alabes.pdf. [consultado el 05/06/2024].
- [8] SERRANO, Noelia Saurin. *Estudio tribológico de nuevos nanofluidos iónicos y nanomateriales*. 2016. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena (Spain).
- [9] MONTENEGRO ANDINO, Diego Fernando; CARRILLO PUNINA, Marco Alexander. Análisis del desgaste superficial en los álabes de un rodete Francis mediante simulación por elementos finitos en la interfaz del material metalizado y no metalizado: caso de estudio—San Francisco. 2020.
- [10] HÉCTOR, Luis; VELÁZQUEZ-MARTÍNEZ, Víctor. Sistema de información para la caracterización de imágenes de desgaste en álabes de rotor de una turbina de gas Information system for characterizing wear images on gas turbine rotor blades. *Sistema*, 2020, vol. 4, no 11, p. 27-34.
- [11] BARONA-MEJÍA, Ana Sofía, et al. Cavitación en perfiles hidrodinámicos para turbinas hidrocinéticas. *Revista UIS ingenierías*, 2021, vol. 20, no 2, p. 85-96.
- [12] Regeneración mecánica de una turbina con Lotumrepair. Imagen. [s. f.]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/156796-Regeneracion-mecanica-de-una-turbina-con-Lotumrepair.html>. [consultado el 05/06/2024].
- [13] ERRICO, V.; FUSCO, A.; CAMPANELLI, S. L. Effect of DED coating and DED+ Laser scanning on surface performance of L-PBF stainless steel parts. *Surface and Coatings Technology*, 2022, vol. 429, p. 127965.

- [14] LEÓN-CALERO, Marina; MARCOS-FERNÁNDEZ, Ángel; RODRÍGUEZ-HERNÁNDEZ, Juan. Impresión 3D con materiales elastoméricos. 2019.
- [15] MAHMOOD, Muhammad Arif, et al. Laser coatings via state-of-the-art additive manufacturing: A review. *Coatings*, 2021, vol. 11, no 3, p. 296.
- [16] NIPPES, Ernest F. Metals Handbook Ninth Edition Volume 6: Welding, Brazing, and Soldering (Metals Handbook). 9a ed. ASM International, 1983. ISBN 9780871700124.
- [17] SANGUCHO YANCHAPANTA, Edgar Rolando. Optimización de los parámetros de aplicación del recubrimiento duro Belzona y su incidencia en la resistencia al desgaste abrasivo en álabes de turbinas Francis. 2020. Tesis de Maestría. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Maestría en Mecánica Mención Diseño.
- [18] CASTRO, Pedro Ramiro. *Fabricación de componentes metálicos mediante fabricación híbrida laser ded en máquinas híbridas*. 2021. Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea.
- [19] LIU, Kun, et al. Effect of high dilution on the in situ synthesis of Ni–Zr/Zr–Si (B, C) reinforced composite coating on zirconium alloy substrate by laser cladding. *Materials & Design*, 2015, vol. 87, p. 66-74.
- [20] LI, Guang, et al. Corrosion and wear resistance of Fe-based amorphous coatings. *Coatings*, 2020, vol. 10, no 1, p. 73.
- [21] PÉREZ DE BENITO, Javier. *Diseño y construcción del dispositivo suministrador de polvo en un sistema de "laser cladding"*. 2012. Tesis de Maestría.
- [22] Cladding con láser. Imagen. [s. f.]. Disponible en: <https://www.laserline.com/es-int/cladding-con-laser/>. [consultado el 05/06/2024].
- [23] Soldadura de recargue | TRUMPF. Imagen. [s. f.]. Disponible en: https://www.trumpf.com/es_MX/soluciones/aplicaciones/soldadura-por-laser/soldadura-de-recargue/. [consultado el 05/06/2024].
- [24] LIU, Yanan, et al. Research and progress of laser cladding on engineering alloys: A review. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, vol. 66, p. 341-363.
- [25] TUOMINEN, Jari, et al. Laser strip cladding for large area metal deposition. *Additive Manufacturing*, 2019, vol. 27, p. 208-216.
- [26] YI, Peng, et al. Influence of laser parameters on graphite morphology in the bonding zone and process optimization in gray cast iron laser cladding. *Optics & Laser Technology*, 2019, vol. 109, p. 480-487.
- [27] QUINTINO, Luisa. Overview of coating technologies. En *Surface Modification by Solid State Processing*. Woodhead Publishing, 2014. p. 1-24.

- [28] SVETLIZKY, David, et al. Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications. *Materials Today*, 2021, vol. 49, p. 271-295.
- [29] ZHU, Lida, et al. Recent research and development status of laser cladding: A review. *Optics & Laser Technology*, 2021, vol. 138, p. 106915.
- [30] PISCOPO, Gabriele; IULIANO, Luca. Current research and industrial application of laser powder directed energy deposition. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, vol. 119, no 11, p. 6893-6917.
- [31] LI, Shuai, et al. Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Science & Technology*, 2015, vol. 31, no 9, p. 946-952.
- [32] VERDI, Davide, et al. Erosion behaviour of laser clad Inconel 625—Vanadium carbide metal matrix composites coatings manufactured with different reinforcement contents. *Surface and Coatings Technology*, 2024, vol. 476, p. 130282.
- [33] ALONSO RODRÍGUEZ, Francisco Javier, et al. Caracterización del sistema poroso de calizas y dolomías. *Boletín geológico y minero*, 1987.
- [34] BEDMAR SANZ, Javier, et al. Fabricación aditiva con láser de materiales metálicos: evaluación y mejora de sus propiedades. 2024.
- [35] ISO 6892-1, Metallic materials - Tensile testing - Part 1: “Method of test at room temperature”, 2016
- [36] GONZÁLEZ, Andrés G.; GALVIS, Fabio Vargas; LÓPEZ, María Esperanza. Influencia de la rugosidad en la microdureza y en la resistencia al desgaste de recubrimientos aplicados mediante proyección térmica. *Scientia et Technica*, 2007, vol. 13, no 36, p. 163-168.
- [37] ISO 4287. Geometrical product specifications (GPS). Surface texture. Profile method. Terms. Definitions and surface texture parameters. International Organization for Standardization. 1997+ Amd1: 2009.
- [38] SERRANO, Noelia Saurin. *Estudio tribológico de nuevos nanofluidos iónicos y nanomateriales*. 2016. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Cartagena (Spain).
- [39] GORDILLO SÁNCHEZ, Miriam Inmaculada. *Implementación de un laboratorio de microscopía confocal de materiales*. 2014. Tesis de Maestría.
- [40] CLAVIJO, Josué, et al. Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM). *Elementos*, 2013, vol. 3, no 3.
- [41] CAICEDO, Holman Francisco; VALDÉS, JAIRO ANTONIO; MARÍN, JOHN JAIRO CORONADO. Caracterización de recubrimientos duros frente al desgaste abrasivo a tres cuerpos. *Tecnura*, 2005, vol. 9, no 17, p. 16-24.