



POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es



Alba González Oviaño

05 TRABAJO FIN DE GRADO

INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

CARACTERIZACIÓN MICROESTRUCTURAL Y MECÁNICA DE COMPONENTES DE ACERO AISI 316L CONFORMADOS MEDIANTE LA TÉCNICA DE DEPOSICIÓN DIRIGIDA DE ENERGÍA POR LÁSER Y ESTUDIO DE LA VIABILIDAD DE LA TÉCNICA LSP PARA LA MEJORA DE SUS PROPIEDADES

JUNIO 2023

Alba González Oviaño

DIRECTOR DEL TRABAJO FIN DE GRADO:
Francisco Cordovilla Baro
Marcos Díaz Muñoz





UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES
TRABAJO FIN DE GRADO

Caracterización microestructural y mecánica de componentes de acero AISI 316l conformados mediante la técnica de Deposición Dirigida de Energía por láser y estudio de la viabilidad de la técnica LSP para la mejora de sus propiedades

AUTORA: Alba González Oviaño
ESPECIALIDAD: Materiales
TUTORES ACADÉMICOS: Francisco Cordovilla Baro
Marcos Díaz Muñoz

Junio 2023

*A Manoli Cenamor Ramos y
Rosa Jurado Rodríguez*

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a Paco y a Marcos la confianza depositada en mi persona para sacar adelante el trabajo, y la paciencia y comprensión con la que me habéis tratado siempre. Habéis hecho todo mucho más fácil. Espero y deseo que vuestra pasión por el saber, por llegar hasta el fondo de cualquier resultado y por el mundo de los materiales, se vea correspondida con muchos alumnos con ganas de aprender de vosotros. Si hablo de pasión, no me puedo dejar a Sandra. Gracias porque, aunque no aparezcas de tutora, te has portado como tal. Tu amplio conocimiento en metalografía nos ha ahorrado más de un quebradero de cabeza y tenerte de guía en el laboratorio ha sido toda una suerte. También quiero dar las gracias a todo el personal de Centro Láser UPM, por dejarme hacer uso de las instalaciones y a Etxetar, porque sin ellos no habría material que estudiar.

De la misma manera, yo no habría realizado este trabajo si no fuera por Javier Oñoro. La intriga que me entró por saber más de los materiales hablando con él en una jornada de puertas abiertas sobre el reciclaje del caucho, entre demasiados estudiantes de bachillerato que no sabían muy bien lo que les esperaba en la universidad, me llevó a elegir esta escuela y esta especialidad. Gracias. Sin embargo, esta curiosidad por los materiales se produjo por un interés en las ciencias que venía de más atrás. Gracias Luismi, porque no se me va de la cabeza el vídeo de una bola de bolos y unas plumas cayendo a la par en una cámara de vacío. Gracias Mar porque contigo aprendí que las matemáticas era otro lenguaje más que buscaba describir la belleza del mundo, y no solo sumas y restas. Gracias Montse, porque tus trabajos de 1500 palabras se han convertido en uno de muchas más, pero con la misma intención de hacer disfrutar al lector. Y gracias, Inma por ser una madre, y permitirme vivir tantas experiencias internacionales en el cole y animarme a presentarme a todas las becas.

Como era de suponer, yo era una de las personas que no sabían muy bien qué les esperaba en la universidad, pero desde luego no era lo que me he terminado encontrando. Gracias Blanca, David, Javi, Kike, Óscar, Pastor, Rubén y Sofía, por ser lo que la Escuela me ha regalado, por haberme cuidado y querido durante estos años, y haber hecho de abrir y cerrar bibliotecas y pasar el día en la universidad algo de lo que disfrutaba si lo podía compartir con vosotros.

Agradecer también a la familia que me ha regalado Dios, entre todos (porque son muchos), quiero dar las gracias a mis queridos Boanerges y a las chicas. Adri, Olaya y Suela, gracias por escucharme y rezar para que esto viera su fin, y proporcionarme un lugar seguro y súper acogedor donde crecer en la fe y como persona. Ángela, María, Marta G., Marta H. y Sheyla, me siento muy afortunada de teneros en mi vida y de poder llamaros amigas. Gracias por ayudarme a asumir mis carencias, a ganar en ternura y a abrir mi interior. Sois las cinco grandes mujeres y grandes referentes para mi vida.

Por último, agradecer a mi familia. Gracias, papá y mamá por cuidarme siempre, por las barritas energéticas, los táperes, los besos de buena suerte antes de cada examen ... tantas cosas que han hecho este camino más fácil. Os quiero. Gracias Diego por ser un gran hermano, y ayudarme siempre que puedes. Te quiero mucho, aunque tampoco te lo diga demasiado. Gracias, abuelo, por preguntar siempre ¿cómo va la chica? y decirme que me aplique mucho.

No me quería alargar más de una página, pero tampoco voy a recortar de lo que ya he escrito, así que esta página sea para ti, aunque si no fuera porque quiero ser breve, también se quedaría corta. Gracias Fernando, por todo el amor incondicional que me has demostrado estos cinco años (y los que quedan). Gracias a ti, soy más libre, más tierna y disfruto mucho más de la vida. Gracias por cuidarme y buscar quererme en cada momento que has pasado conmigo, aunque fuera un jueves a las 21:00 viniéndome a buscar a la ETSII y yo estuviera demasiado cansada como para valorarlo. Te quiero.

Resumen

Las técnicas de fabricación aditiva (FA) están en auge. Permiten fabricar de forma rápida y casi sin conocimientos técnicos cualquier cosa. Prueba de ello son los numerosos institutos y particulares que cuentan con algún dispositivo de impresión 3D entre sus posesiones. También se ha convertido en una técnica de prototipado rápido, y de amplio uso en la industria automovilística y aeroespacial [1]. La materia prima utilizada puede ser polimérica, cerámica o metálica, siendo esta última la más consumida [2].

Son numerosas empresas las que han comenzado a destacar en el sector de la FA de metal, entre la que destaca nacionalmente Etxetar. La tecnología concreta que esconden sus instalaciones es la deposición de energía dirigida (Directed Energy Deposition, DED), que consiste en la deposición capa a capa de polvo de metal, en concreto de AISI 316L, y la fusión mediante haz láser, que permite la unión entre capas. Este proceso, por sus numerosos ciclos térmicos, produce en la estructura de las piezas discontinuidades, además de tensiones residuales que hacen que las propiedades mecánicas se vean reducidas respecto al material fabricado por laminación. En su interés por mejorar el método de fabricación y las propiedades de sus piezas, Etxetar comenzó a colaborar con el Centro Láser UPM (CLUPM) en 2019 [3].

Fruto de estas colaboraciones, donde Etxetar se encarga de la fabricación y el CLUPM del estudio, se han desarrollado diferentes trabajos [4] [5] [6] que permitieron dar los primeros pasos en la caracterización de propiedades mecánicas del acero 316L fabricado por DED en dirección transversal, y la mejora de estas con el tratamiento Laser Shock Peening (LSP). El tratamiento LSP tiene la particularidad de inducir campos de tensiones residuales de compresión mediante ondas de choque generadas por láser, mitigando el efecto de los defectos comentados y aumentando la vida en servicio del material.

El objetivo de este trabajo es caracterizar microestructural y mecánicamente el acero AISI 316L fabricado por DED en dirección longitudinal, ya que debido a la anisotropía asociada a la FA por la construcción capa a capa, las propiedades pueden verse alteradas en función de la dirección de corte. Para ello, se hizo uso de 10 probetas longitudinales de fatiga fabricadas en las instalaciones de Etxetar y una transversal de tracción. Mientras que las probetas longitudinales se usaron para los ensayos de fatiga, tensiones residuales, corrosión y dureza, siguiendo las normas ASTM E466, ASTM E837-08, ASTM G15 y ASTM 384-17 respectivamente, la probeta transversal se utilizó para la caracterización metalográfica, ya que esta dirección permite ver las capas.

El estudio microestructural de la probeta se realizó en primer lugar mediante la preparación metalográfica y análisis de secciones transversales con microscopio óptico, permitiendo hacer un estudio profundo sobre la naturaleza microestructural del material, tipo de grano y espesor de cada capa. Posteriormente, para aclarar su propia composición y la de las heterogeneidades encontradas a lo largo de la estructura, se empleó el SEM/EDX del Museo de Ciencias Naturales.

En cuanto a la caracterización mecánica, seis de las diez probetas disponibles fueron ensayadas a fatiga a distintas amplitudes de carga. Una vez finalizados estos ensayos y con los datos

obtenidos se estudió si, al igual que ocurría en el resto de los casos, las propiedades del material mejoraban tras un tratamiento LSP. De esta manera, se trataron con LSP a 1600 pulsos/cm² las cuatro probetas restantes, y se realizaron los mismos ensayos (fatiga, tensiones, corrosión y dureza).

Los resultados obtenidos demuestran la efectividad del tratamiento LSP, obteniendo un comportamiento ligeramente superior a fatiga frente a las probetas no tratadas. Esto supone un aliciente para seguir investigando acerca de la técnica LSP como técnica de posprocesado para técnicas de FA. También sorprende su resistencia a la corrosión, mejor que la presente en el acero laminado comercial. Este hecho permite concluir que la aplicación del tratamiento LSP prolonga la vida en servicio frente a atmósferas corrosivas de los materiales estudiados. Como se ha dejado ver, el acero laminado posee un comportamiento frente a cargas superior en comparación con cualquiera de los aceros fabricados por DED. Respecto a la intensidad del tratamiento, esta se considera suficiente, ya que otorga al material de tensiones residuales de compresión estables hasta los 0.5mm de profundidad.

Respecto a la microestructura, se ha encontrado una gran dependencia de los granos formados con la velocidad de enfriamiento. Esto se ve reflejado en que las capas más cercanas al sustrato presentan estructuras dendríticas celulares, por tener una mayor velocidad de enfriamiento, frente a la estructura dendrítica columnar que comienza a verse a capas más altas, donde el gradiente térmico es menos severo. Aparte de la morfología, las fases presentes en la probeta también se ven afectadas. Una velocidad de enfriamiento más estable posibilita la transformación en estado sólido mediante mecanismos de difusión de la Fe δ que pudiera haber quedado retenida, como consecuencia de un enfriamiento rápido primario, a Fe γ' , incrementando el porcentaje total de austenita a medida que aumenta la altura. En cuanto a la porosidad, se mantiene estable entorno al 1% a lo largo de la probeta, producida en gran medida por la brusquedad térmica del proceso y el mecanismo de difusión ya comentado.

Por último, indicar que este trabajo ha supuesto un gran avance en la caracterización microestructural para materiales sometidos a procesos con gradientes térmicos severos y alto aporte másico como es la DED. El análisis de la morfología y la cohesión entre capas ha ayudado a comprender mejor los resultados obtenidos tras los ensayos mecánicos.

Palabras clave

Deposición de Energía Dirigida (DED), AISI 316L, Laser Shock Peening (LSP), propiedades mecánicas, microestructura, metalografía, amplitud de carga.

Abstract

Additive manufacturing (AM) techniques are dominating the market. They enable manufacturing mostly everything quickly and with little to no technical knowledge. Proof of this is the numerous institutes and private individuals who have a 3D printing device in their possessions. It has also become a technique for rapid prototyping and is widely used in the automotive and aerospace industries [1]. The raw material used can be polymeric, ceramic, or metallic, with metal being the most consumed [2].

Several companies have begun to stand out in the metal FA sector, among them Etxetar stands out at national level. The specific technology powering Etxetar's facilities is Directed Energy Deposition (DED), which consists of depositing metal powder, more specifically AISI 316L, layer by layer, and melting it by using a laser beam, which allows for the union between layers. This process, due to its numerous thermal cycles, creates discontinuities in the structure of the pieces, as well as residual stresses that reduce the mechanical properties with respect to the same material but manufactured by lamination. Driven by their interest in improving the manufacturing method and the properties of their manufactured pieces, Etxetar began to collaborate with the UPM Laser Centre (CLUPM) in 2019 [3].

As a result of these collaborations, where Etxetar was in charge of the manufacture and CLUPM of the study, different research projects have been developed [4] [5] [6] that have allowed the first steps towards the characterization of the mechanical properties of DED manufactured 316L steel in the transversal direction, and the improvement of these properties with Laser Shock Peening (LSP) treatment. The LSP treatment has the particularity of inducing compressive residual stress fields by a shock waves generated by laser, reducing the effect of the above-mentioned defects and increasing the service life of the material.

This work aims to characterise microstructurally and mechanically the AISI 316L steel manufactured by DED in the longitudinal direction, since due to the anisotropy associated with the FA using a layer-by-layer construction, the properties can be altered depending on the slitting direction. For this purpose, 10 longitudinal fatigue specimens manufactured at Etxetar's facilities, and one transverse tensile specimen were used. While longitudinal specimens were used for fatigue, residual stress, corrosion, and hardness tests, following ASTM E466, ASTM E837-08, ASTM G15 and ASTM 384-17 respectively, the transverse sample was used for metallographic characterisation, as this direction allows to see the different layers.

The microstructural study of the specimen was performed first by a metallographic preparation and analysis of the transverse sections with an optical microscope, allowing an exhaustive study of the microstructural nature of the material, the type of grain, and the thickness of each layer. Afterward, to clarify its own composition and that of the heterogeneities found throughout the structure, SEM/EDX from the Museum of Natural Sciences in Madrid was used.

Regarding mechanical characterization, six of the ten available specimens were fatigue tested at different stress amplitudes. Once these tests were completed and the data collected, it was studied whether, as in the rest of the cases, the material properties improved after LSP treatment. In this way, the remaining four specimens were treated with LSP at 1600

pulses/cm², and the same tests (fatigue, residual stress, corrosion and hardness) were performed.

The results obtained demonstrate the effectiveness of LSP treatment, obtaining a slightly better fatigue behaviour compared to untreated specimens. This is an incentive for further research into the LSP technique as a post-processing technique for FA techniques. The corrosion resistance is also surprisingly better than that of commercial laminated steel. This fact leads to the conclusion that the application of LSP treatment prolongs the service life of the materials studied in corrosive atmospheres. As has been shown, the laminated steel has superior stress resistance compared to any of the steels manufactured by DED. Regarding the intensity of the treatment, it is considered sufficient, as it confers to the material stable compressive residual stresses up to 0.5mm depth.

With regard to the microstructure, a strong dependence on the cooling rate was found in the grains formed. This is reflected in the fact that layers closer to the substrate present cellular dendritic structures, due to the higher cooling rate, compared to the columnar dendritic structure that starts to be seen at higher layers, where the thermal gradient is less severe. In addition to morphology, the phases present in the specimen are also affected. A more stable cooling rate enables the transformation in solid state by diffusion mechanisms of the Fe δ that might have been retained, because of rapid primary cooling, to Fe γ' , increasing the total percentage of austenite as the height increases. Concerning porosity, it remains stable at around 1% throughout the sample, due to the thermal abruptness of the process and the diffusion mechanism mentioned above.

Finally, it should be highlighted that this work has meant a great advance in the microstructural characterisation of materials that have been produced by processes with severe thermal gradients and high mass contribution, such as DED. The analysis of the morphology and cohesion between layers has helped to a better understanding of the results obtained after the mechanical tests.

Keywords

Directed Energy Deposition (DED), AISI 316L, Laser Shock Peening (LSP), mechanical properties, microstructure, metallography, stress amplitude.

Códigos UNESCO

220106 Ondas de choque
220206 Radiación infrarroja, visible y ultravioleta
220407 Ionización
220410 Física del plasma
220809 Confinamiento del plasma
220910 Láseres
221121 Metalurgia
330307 Tecnología de la corrosión
330707 Dispositivos láser
331003 Procesos industriales
331208 Propiedades de los Materiales
331209 Resistencia de Materiales
331212 Ensayo de materiales
331290 Materiales Metalúrgicos Avanzados
331507 Productos metalúrgicos (especiales)
331511 Pulvimetalurgia

Índice de contenidos

CAPÍTULO 1 ESTUDIO DE LAS TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA Y LSP ..	17
1.1. Introducción	17
1.2. Introducción a las técnicas de Fabricación Aditiva (FA)	18
1.2.1 Procesos de FA.....	20
1.3. Introducción al Laser Shock Peening (LSP).....	26
1.3.1. Principios físicos	28
1.3.2. Aplicaciones.....	30
1.4. Objetivos.....	33
CAPÍTULO 2 ESTUDIO DEL MATERIAL Y LAS TÉCNICAS EXPERIMENTALES EMPLEADAS.....	35
2.1. Materiales y métodos.....	35
2.2. Material empleado.....	35
2.2.1. Obtención de probetas para ensayos normalizados.....	38
2.2.2. Preparación de las probetas	40
2.3 Técnicas de caracterización	46
2.3.1. Micrografía óptica.....	46
2.3.2. Microscopía Electrónica de Barrido.....	47
2.3.3. Ensayo de fatiga	47
2.3.4. Tratamiento LSP	49
2.3.5. Ensayo de medida de tensiones residuales.....	50
2.3.6. Ensayo de Polarización Lineal Directa (PLD).....	52
2.3.7. Ensayo de dureza Vickers	53
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	55
3.1. Caracterización microestructural	55
3.1.1. Micrografía óptica.....	55
3.1.2. Micrografía electrónica de barrido.....	63
3.2. Ensayos de fatiga.....	68
3.2.1. Superficies de fractura	72
3.3. Ensayos de medida de tensiones residuales	74

3.4. Ensayo de polarización lineal directa (PLD).....	76
3.5. Ensayo de dureza	79
CAPÍTULO 4 CONCLUSIONES.....	81
4.1 Conclusiones.....	81
4.2 Líneas futuras.....	82
Referencias.....	83
Anexo A – Planificación y presupuesto	89
Anexo B – Evaluación de impactos	93
Anexo C.....	95
Anexo D.....	99
Anexo E.....	101
Índice de figuras.....	107
Índice de tablas.....	111

CAPÍTULO 1

ESTUDIO DE LAS TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA Y LSP

1.1. Introducción

Las técnicas de Fabricación Aditiva (FA) han ido ganando cada vez más popularidad en distintos sectores industriales tanto por la libertad creativa que permite el método, como por la gran funcionalidad que pueden adquirir las piezas generadas. Tanto es así, que en un estudio realizado por IFI Claims Patent Services donde se analizaba el número de patentes registradas en un periodo de cinco años, el sector de la FA contaba con un crecimiento anual del 27,14% (Figura 1) entre 2016 y 2020, convirtiéndose en una de las 10 categorías con mayor crecimiento [7].



Figura 1: Empresas líderes en el sector de la FA y número de patentes registradas [8]

Otro estudio, esta vez realizado por la empresa IDTechEx en 2022 [2], muestra como en contra de lo que popularmente se cree, la materia prima más usada en el ámbito de la FA es el polvo de metal, y se espera que siga siendo así (Figura 2). El uso de metales en vez de polímeros permite desarrollar estructuras con mejores propiedades mecánicas y mucho más versátiles, ya que existen mayores rangos de temperatura y ambientes donde pueden aplicarse. Sin embargo, los metales tienen a su vez un gran hándicap, y es la dificultad a la hora de trabajar con ellos. Los altos aportes energéticos unido a la inestabilidad microestructural, ya que el desarrollo de una fase o tipo de grano es muy dependiente de otros factores como la velocidad de enfriamiento, hacen del uso del polvo de metal un verdadero reto. Gracias a los avances de los últimos años en los que se ha podido mejorar el control del proceso, cada vez más fabricantes se suman al mercado de la FA de metal, entre los que destacan *3D Systems*, *SLM Solutions* y

Arcam, sin dejar de mencionar a Etxetar, cuyos avances tecnológicos han permitido el desarrollo de este trabajo.

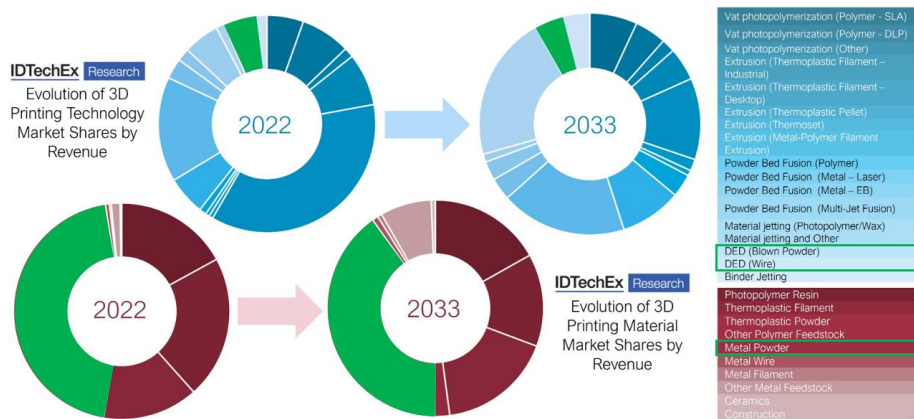


Figura 2: Evolución de las tecnologías de FA [2]

Pese a que piezas fabricadas con polvo de metal ya se usan en la industria automovilística y aeroespacial [1], ambas con grandes requerimientos técnicos, no siempre es posible alcanzar los acabados y requisitos mecánicos necesarios. La realización de tratamientos de posprocesado es por tanto esencial en este tipo de piezas. Entre todos los disponibles destaca la técnica de *Laser Shock Peening* (LSP), que consiste en una inducción de campos de tensiones residuales compresivas mediante ondas de choque generadas por láser. Además de por ser objeto de este trabajo, sobresale por su capacidad de alargar la vida en fatiga de una pieza entre 5 y 10 veces [9].

1.2. Introducción a las técnicas de Fabricación Aditiva (FA)

Según la norma ISO/ASTM 52900:2021, se define la FA como el proceso en el que a partir de archivos STL, sigla de *Standard Triangulation Language*, se crean piezas u objetos generalmente capa a capa, diferenciándose así de los métodos de fabricación más tradicionales de eliminación de material o conformado [10]. Generalmente su proceso consta de seis etapas (Figura 3) [11]:

1. **Diseño CAD:** creación de una superficie de representación o un diseño sólido 3D que defina dimensiones, volumen y complejidad de la pieza. También debe tenerse en cuenta a la hora de realizar el primer diseño la posibilidad de fabricación de este, implementando si fuera necesario optimizaciones topológicas.
2. **Conversión a STL y volcado en el equipo:** del dibujo en CAD se pasa a un archivo STL que procesa la imagen y la triangula, evitando los posibles desperfectos debidos a huecos o solapamientos. Posteriormente se vuelve a dividir la pieza, pero esta vez en planos horizontales, que determinan el espesor de capa que tendrá el producto final.

3. **Preparación del equipo:** en función de la técnica usada se requerirá de una preparación u otra como puede ser la carga de consumibles, la limpieza y calentamiento del equipo o la calibración de la placa soporte. En esta etapa también se cargan los parámetros con los que se va a realizar el proceso: velocidad de pasada, trayectoria o temperatura.
4. **Fabricación de la pieza:** dependiendo del proceso que se realice, las capas del producto final se crearán aportando calor directamente sobre el filamento extruido o sobre un lecho, creando uniones adhesivas, térmicas o químicas.
5. **Retirada de la pieza:** tras estabilizar térmicamente las piezas, se sacan de la máquina y se eliminan todos los soportes creados con el objetivo de posibilitar la fabricación.
6. **Posprocesado:** algunos de los procesos requieren, además de lo comentado, distintos acabados. Estos pueden ir desde una limpieza superficial hasta tratamientos termomecánicos, como puede ser el tratamiento LSP que se dará a las piezas de este trabajo.

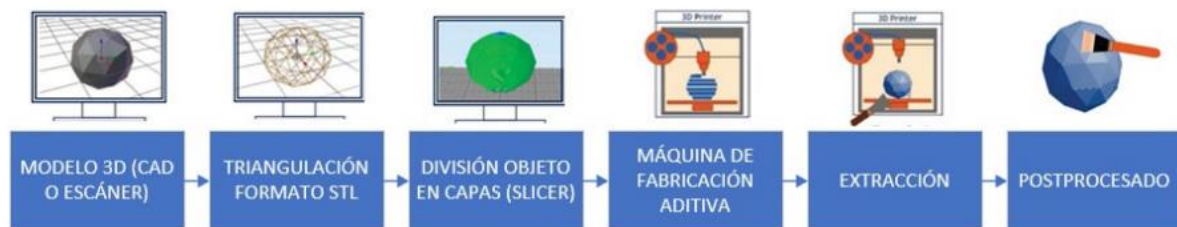


Figura 3: Diagrama de bloques del proceso de FA desde su ideación hasta el producto final [12]

A pesar de ser una tecnología que obtuvo su primera patente en 1986 [12], ha tenido un amplio desarrollo en los últimos años ya no solo como técnica de prototipado [13], sino como técnica de fabricación de producto final y recambios [14] en el sector de la construcción, médico y aeroespacial en su mayoría [15]. Un gran ejemplo de la extensión y desarrollo de la FA ha estado en la pandemia con la creación de la red de *Coronamakers*, En ella participaban alrededor de unos 15.000 particulares que mediante técnicas de modelado por deposición fundida (FDM), popularmente conocido como impresión 3D, generaron más de 110.000 piezas [16] entre viseras, salvaorejas, y válvulas para respiradores (Figura 4).



Figura 4: Ejemplo de piezas fabricadas por un grupo de Coronamakers [17]

1.2.1 Procesos de FA

En función del tipo de materia prima: metal, polímero, cerámica o compuesto; y el estado físico en el que se encuentre: filamento, polvo o líquido; se escogerá un mecanismo de unión u otro. En concreto la ISO/ASTM 52900:2021 contempla siete procesos [10]. Cabe destacar que las tecnologías que usan material metálico como materia prima (presentadas en la segunda mitad del apartado) necesitan proporcionar mayores temperaturas a las que usarían con polímeros. Este hecho dificulta el trabajo con metales, así como la elección de parámetros para el diseño de las máquinas.

1.2.1.1. Material extrusión (MEX)

La extrusión de material es, como ya se ha destacado en la introducción, uno de los procesos más extendidos. Consiste en extruir un filamento termoplástico continuo a través de una boquilla móvil y a una temperatura suficiente como para hacer fluir el material sin que pierda su viscosidad (Figura 5). Cada capa comienza su proceso de solidificación una vez depositada, permitiendo la fusión con las capas previas. Una vez finalizada la pieza se extrae de la plataforma y se eliminan los soportes estructurales.

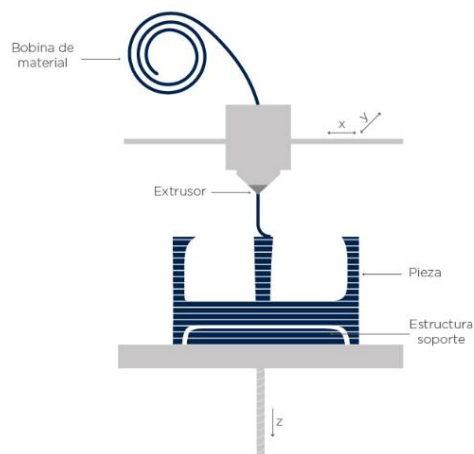


Figura 5: Esquema de funcionamiento del proceso MEX [21]

A pesar de ser una técnica de impresión rápida y accesible al público general, su acabado tiene una calidad entre baja e intermedia, que se puede mejorar en el posprocesado mediante el uso de resinas. Los materiales usados son en su mayoría polímeros termoplásticos, aunque también se han usado materiales en pasta como hormigón, cerámica e incluso chocolate [11]. Si se dispone de más de una boquilla, se pueden usar varios colores e incluso utilizar un termoplástico soluble para la impresión de los soportes.

1.2.1.2. Material jetting (MJT)

En el caso de la proyección de material, se requiere de dos cabezales, uno con un fotopolímero que formará las capas de la pieza final, y otro con un polímero soluble, que creará la estructura soporte de la impresión (Figura 6). Sobre la plataforma de construcción se van depositando, mediante goteo y gracias a una boquilla móvil, las distintas capas del material, que son posteriormente curadas con luz ultravioleta. Una vez endurecida la capa, la plataforma desciende y se repite el proceso. Al finalizar la pieza, esta se extrae y se introduce en baño de hidróxido de sodio o agua con el fin de eliminar los soportes.

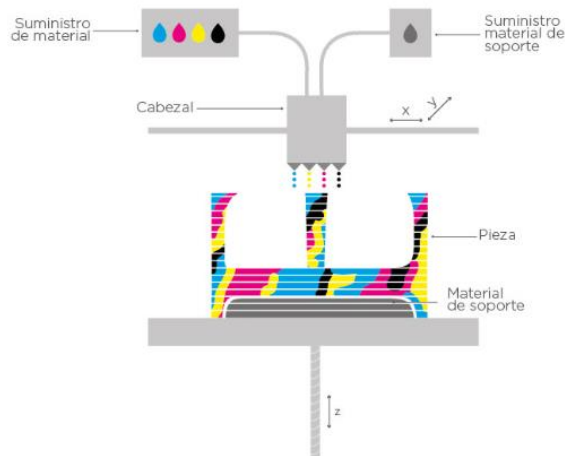


Figura 6: Esquema de funcionamiento del proceso MJT [20]

Al igual que en el caso de MEX, las piezas pueden imprimirse en diversos colores añadiendo tintes a los fotopolímeros e incluyendo más boquillas en su cabezal. Además, se genera poco desperdicio y se alcanza una gran precisión. Como desventaja se encuentra la limitación de materiales, en su mayoría polímeros y ceras, ya que permiten el goteo por su naturaleza viscosa.

1.2.1.3. Vat photopolymerization (VPP)

El proceso de fotopolimerización consiste en sumergir la plataforma de construcción una cota equivalente al espesor de una capa, en una cuba llena de un fotopolímero. Posteriormente una luz ultravioleta endurece la resina dibujando sobre el fluido el área correspondiente (Figura 7). Una vez ha curado, la plataforma vuelve a descender para dejar hueco a la siguiente capa y un enrasador barre la superficie para evitar defectos y que el fotopolímero quede liso. Se volvería a dibujar con la luz UV y se repetiría el proceso hasta terminar la pieza.

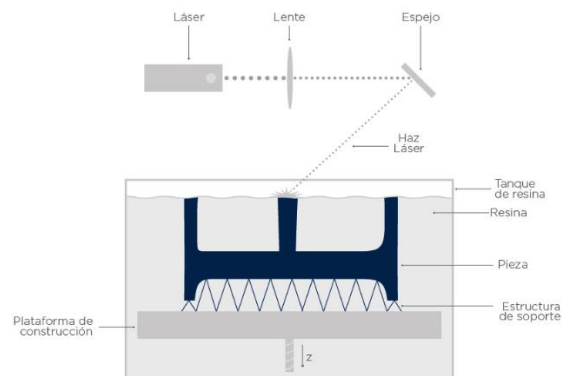


Figura 7: Esquema de funcionamiento del proceso VPP [24]

Una vez extraída, la pieza requiere de un posprocesado largo. En él, se elimina el exceso de resina sobre la pieza y los soportes creados para la fabricación. Además, se realiza una etapa final de secado con el que se garantiza una mayor resistencia y calidad.

Los materiales disponibles son caros y están limitados a fotoresinas. Por otra parte, es un proceso con un alto nivel de precisión y genera muy buen acabado superficial. Se utiliza en la mayoría de los casos para piezas con mucho detalle y orientado a aplicaciones médicas o moldes de joyería.

1.2.1.4. Sheet lamination (SHL)

En el laminado de hojas las capas se depositan mediante hojas de un material cubierto con un adhesivo o que permite la unión por ultrasonidos. Una vez cubierta la superficie de fabricación, se procede a cortar el perfil de la capa con un láser o cuchilla, en función del tipo de material. Acto seguido pasa por encima de la superficie un rodillo calefactado con el objetivo de unir cada capa combinando la fuerza mecánica con el adhesivo. En caso de que se usara la unión por ultrasonidos, se pasaría un sonotrodo por la superficie. Mediante el mecanismo de dos rodillos se recoge el material sobrante y se posiciona una nueva hoja sobre la superficie de construcción, que ha descendido una cota igual al espesor de la lámina (Figura 8).

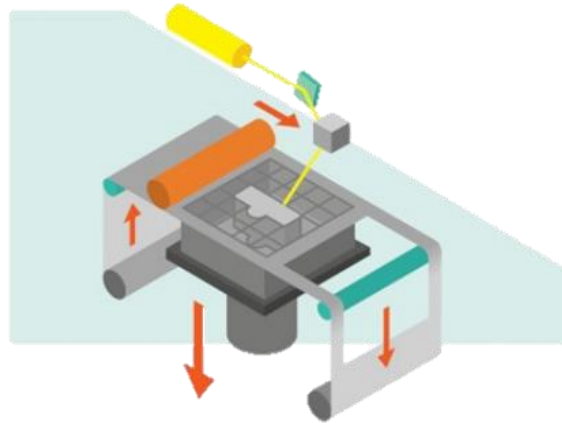


Figura 8: Esquema de funcionamiento del proceso SHL [22]

Los materiales tienen que ser laminados, para poder ser enrollados. Entre los más usados se encuentra el papel para la realización de maquetas, plásticos y chapas de acero o aluminio recubierto de adhesivo. También se fabrican componentes funcionales para las industrias aeroespaciales o automotrices [11].

Es un proceso que no requiere un alto aporte térmico, por lo que su coste se abarata considerablemente frente a otras tecnologías. Sin embargo, se desperdicia mucho material si no se hace un diseño adecuado y requiere de un fresado final para mejorar el acabado.

1.2.1.5. Binder jetting (BJT)

En el proceso de proyección de aglutinante se requiere de dos cubas, una donde se almacenan los polvos de materia prima, y otra donde se realiza la fabricación de la pieza. Los polvos son llevados de una cuba a otra mediante un rodillo, que esparce una capa fina de material sobre el área de construcción. Una vez extendido el polvo, unas boquillas sujetas a un dispositivo móvil pulverizan aglutinante sobre ellos. En esta parte del proceso también se pueden pulverizar tintas, permitiendo colorear la pieza para darle un acabado más vivo. Después, la cubeta de fabricación se moverá hacia abajo, mientras que la cubeta de almacenamiento subirá para poder repetir el proceso (Figura 9).

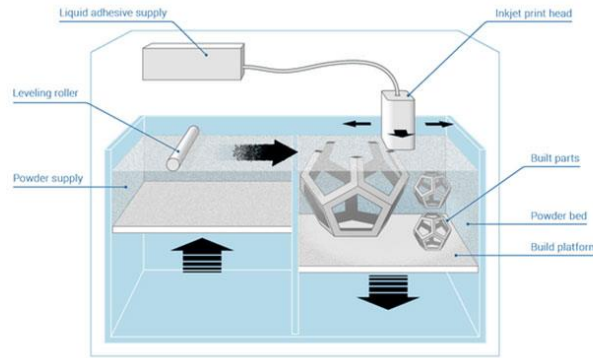


Figura 9: Esquema de funcionamiento del proceso BJT [18]

La pieza sale de la impresión en estado verde, con una porosidad entorno al 60% [11], por lo que requiere de un posprocesado. Este puede ser un sintetizado o agregar una sustancia infiltrante. Para esta segunda opción se suele usar cianocrilato para polvos cerámicos y bronce para metales [19], ya que se requieren sustancias con una alta capilaridad que permitan introducirse en los poros de la pieza.

Las principales ventajas del proceso es que no requiere de una fuente de calor en la construcción, además de tampoco necesitar crear soportes estructurales de la pieza, ya que el polvo no aglutinado actúa como tal. Sin embargo, las piezas obtenidas no están completamente fusionadas (hay huecos entre los granos del material), por lo que tienen una naturaleza frágil. Su uso por tanto se limita a la creación de modelos para fundición u objetos estéticos.

1.2.1.6. Powder bed fusion (PBF)

La fusión de lecho de polvo es similar al proceso de BJT, solo que en vez de aglutinante se utilizará una fuente de calor. El proceso comienza con la distribución, gracias a un rodillo, de una capa de polvo de material almacenado en un sistema de dispensación de polvo sobre la plataforma de fabricación. Una vez depositado, la fuente de calor se encargará de dibujar sobre el polvo la capa correspondiente de la pieza a fabricar, sintetizando el material. Esta fuente de calor puede ser un cabezal calefactado, un láser o un haz de electrones. Una vez terminada la capa, la plataforma de fabricación bajará, mientras que la plataforma de dispensación subirá, permitiendo la repetición del proceso (Figura 10). Finalizada la pieza, se extrae del polvo no sintetizado.

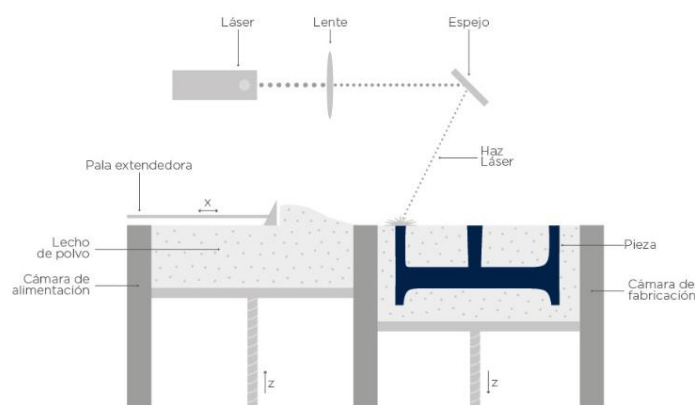


Figura 10: Esquema de funcionamiento del proceso PBF [23]

Al igual que en BJT, no se requiere de la creación de soportes estructurales, pues el polvo no sintetizado actúa como tal. Por el contrario, es una tecnología lenta y necesita de una alta potencia, por el aporte energético. Los polvos son en su mayoría metálicos, pero también se pueden encontrar aplicaciones con materiales cerámicos y polímeros.

1.2.1.7. Directed energy deposition (DED)

La deposición de energía directa es el último proceso por explicar y el empleado en la fabricación de las muestras a estudiar en este trabajo. Requiere de dos cabezales, uno que suministre el material de fabricación a través de una boquilla, y otro que contenga la fuente de irradiación térmica, que puede ser láser, haz de electrones o arco de plasma (Figura 11). El material se deposita sobre el sustrato o sobre una capa anterior y posteriormente se funde, de manera que la solidificación es rápida por el gran gradiente térmico que se produce.

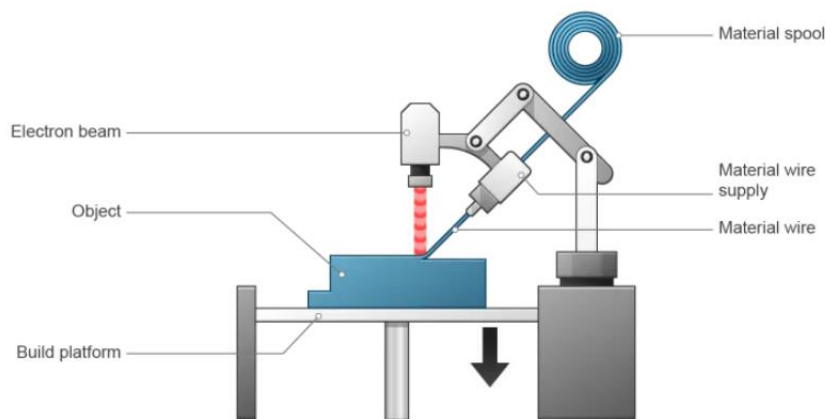


Figura 11: Esquema de funcionamiento del proceso DED [25]

La DED es la técnica que utiliza la irradiación del láser como mecanismo de unión que produce las piezas con mayor complejidad estructural. Además, tiene una ratio resistencia-peso alta a la que se añade un desperdicio mínimo de material [26]. Generalmente se usan metales en filamento o polvo y una atmósfera con gas o en vacío que evite la oxidación de la pieza. El principal uso que se le ha dado a la técnica es el de reparación de componentes en el sector aeroespacial, médico y automovilístico, debido a su capacidad de construcción ágil (4-5 ejes) y con muy pocos componentes [27]. Otras aplicaciones de la DED son la aplicación de revestimientos y la creación de productos con aleaciones metálicas complejas [27], ya que la disposición de más boquillas permite hacer una mezcla de polvos de diversos metales en cada capa, incluso variar la composición a lo largo de la impresión.

Sin embargo, la pieza final presenta distintos comportamientos mecánicos en función del grado de anisotropía, que se varía con la dirección y patrón con el que se dibujan las capas (Figura 12). Tal es así, que las probetas con las capas en dirección longitudinal (paralelas a la longitud característica) presentan un comportamiento más elástico que las probetas con las capas en dirección transversal (perpendiculares a la longitud característica) [5].

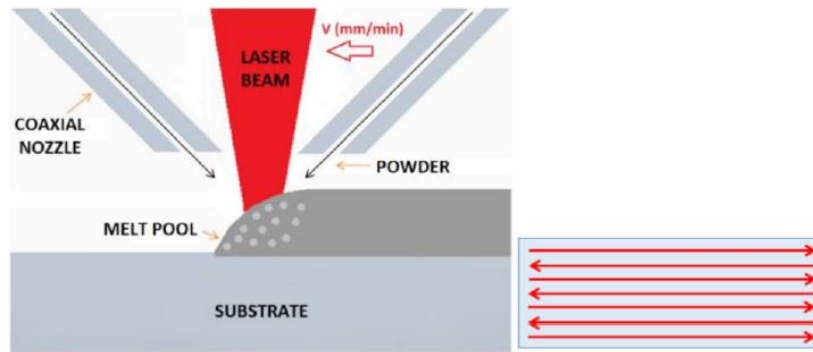


Figura 12: Detalle de la boquilla en DED y posible patrón de dibujo [30]

La velocidad de enfriamiento del proceso [28] también influye altamente en las propiedades mecánicas del material, ya que altera la estructura interna de la pieza. En concreto, en estructuras de acero AISI 316L se ha encontrado que, en zonas cercanas al sustrato, donde la velocidad de enfriamiento es mayor ya que aún hay poca interacción entre capas, aparece un mayor porcentaje de $\text{Fe}\delta$, frente al menor porcentaje encontrado en capas más elevadas (Figura 13) [31]. Este parámetro puede alterarse precalentando el sustrato, sin embargo, es difícil garantizar una estabilidad en los resultados [29].

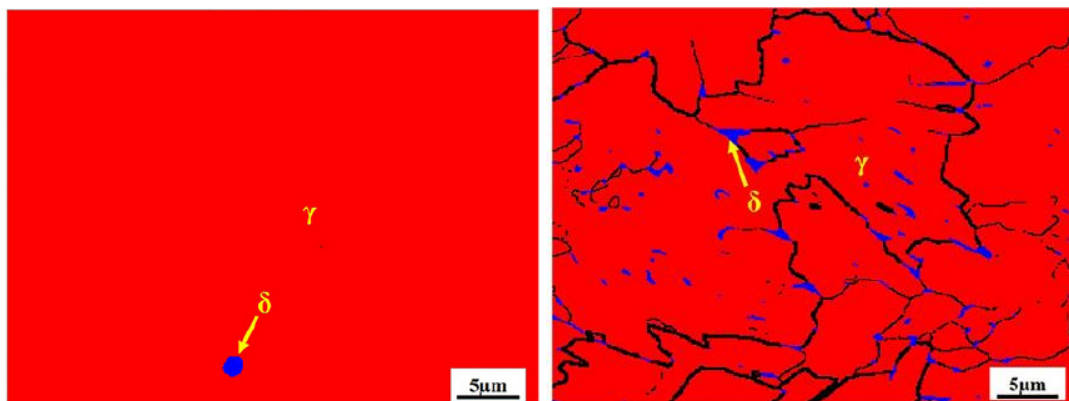


Figura 13: Acero AISI 316L enfriado a $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (izquierda) y $1200^{\circ}\text{C}/\text{min}$ (derecha) [31]

Las piezas obtenidas también ven empobrecido su comportamiento mecánico por la porosidad y las tensiones residuales que se producen, causadas por la propia brusquedad térmica del proceso. Esto, incluido a un acabado superficial tosco y rugoso (Figura 14), obliga a la realización de distintas técnicas de posprocesado que permitan mejorar el producto. Así, la rugosidad superficial se eliminará efectuando un mecanizado que mejore el acabado, y la porosidad se podrá disminuir con un prensado isostático en caliente [11]. Respecto a las tensiones residuales, se ha demostrado [4] que el tratamiento LSP es capaz de inducir tensiones residuales de compresión hasta 1mm de profundidad, mejorando la vida a fatiga y la resistencia a desgaste de los materiales tratados. Además, en función del acabado inicial dado en los procesos de mecanizado y de la intensidad del tratamiento, también permitiría mejorar el acabado superficial de la pieza, suavizando la superficie. Es por esto por lo que se escoge realizar un tratamiento LSP a las probetas fabricadas por DED, con el objetivo de estudiar si las tensiones generadas en la pieza se pueden ver revertidas con la técnica de posprocesado y así mejorar las propiedades mecánicas.

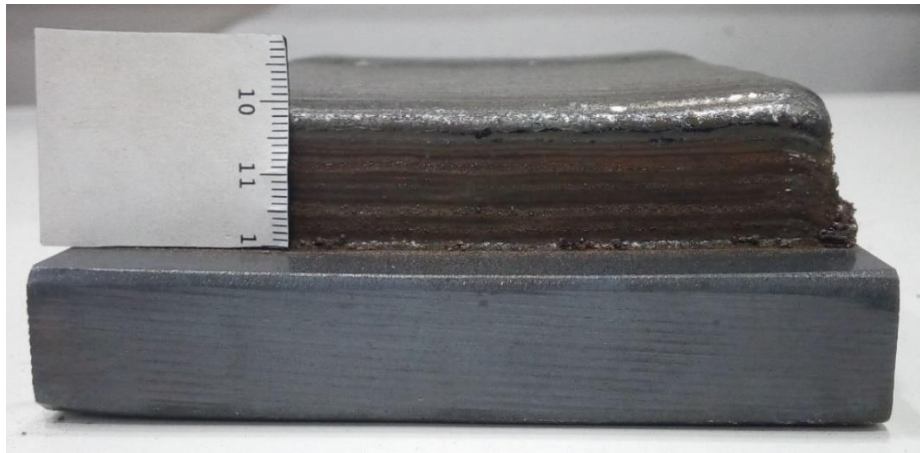


Figura 14: Tocho de AISI 316L obtenida por DED en las instalaciones de Etxetar

1.3. Introducción al Laser Shock Peening (LSP)

Para poder entender y apreciar la tecnología que se esconde tras los procesos de inducción de campos de tensiones residuales compresivas mediante ondas de choque generadas por láser, se debe hacer primero un recorrido por la historia del láser y de su aplicación concreta a la técnica denominada Laser Shock Peening (LSP).

Láser es un acrónimo que, traducido al castellano, puede definirse como amplificación de luz mediante emisión estimulada de radiación, en inglés Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. A pesar de que Albert Einstein en 1915 ya estableciera los fundamentos para su desarrollo, tuvieron que transcurrir 45 años hasta que se inventara el primer láser. Este descubrimiento comparte crédito entre dos laboratorios que trabajaron paralelamente, el del físico Theodore Maiman, quien construyó un láser de rubí, y el grupo de investigación formado por Charles H. Townes y Arthur Leonard Schawlow, quienes excitaron un máser con haces de luz óptica en vez de con microondas.

En cuanto al proceso de LSP, los primeros trabajos se remontan a 1962. Después de la invención del láser, Askaryan y Moroz midieron las presiones que ejercía un haz de alta intensidad sobre una superficie metálica y descubrieron que éstas eran varios órdenes de magnitud superiores a la presión de los fotones [31]. En 1964, Neuman observó que estas presiones aumentaban a medida que el pulso del haz se acortaba [32]. Hasta ese momento todos los ensayos se realizaban en atmósferas de vacío, evitando el fenómeno conocido como ruptura dieléctrica del medio. En 1968 N.C. Anderholm descubrió que usando recubrimientos de pequeño espesor se pueden lograr altas presiones en el material y evitar la ruptura dieléctrica [33]. Este hecho abrió un nuevo campo de investigación de esta tecnología, ya que pasaba de ser un experimento de laboratorio a poder aplicarse en la industria.

A partir de 1970 se comenzó a estudiar la afectación del material por las ondas de choque. Las investigaciones de Mirkin concluyeron que, con pulsos más cortos y energéticos, la onda de choque provocada por la interacción laser-materia generaba una presión relativamente alta que influía a la superficie del metal, generando maclas en los granos de ferrita que se encontraron hasta 0,5mm por debajo del cráter generado con el láser [34].

En 1972 comenzó la verdadera revolución, ya que se estudiaron las primeras aplicaciones que podía tener el LSP. Barry Fairand y Philip Mallozzi, con la ayuda y consejo de Benjamin Wilcox trataron por primera vez piezas de aluminio 7075 mediante LSP [35]. El límite elástico de la probeta tratada con silicato de sodio aumentó un 18%, un 28% en el caso de la probeta 7075 T73¹ y una ligera disminución en el caso de la probeta 7075 T6², debido a la prevalencia del endurecimiento por precipitación sobre el efecto del LSP [36].

A partir de entonces, y más concretamente desde 1984 hasta 1994, se realizaron estudios para perfeccionar la técnica, parametrizarla y poder llevarla al terreno industrial, concluyendo con su primera aplicación en los álabes de los ventiladores de las turbinas de los aviones de las Fuerzas Aéreas Americanas [37], aumentando su vida en fatiga (Figura 15). Actualmente el tratamiento por LSP está ampliamente extendido y su uso es recomendado si existen problemas de fatiga o la necesidad de doblar contornos de manera precisa y controlada. Prueba de ello es el aumento de patentes relacionadas con el proceso, como se puede ver en la Figura 16.

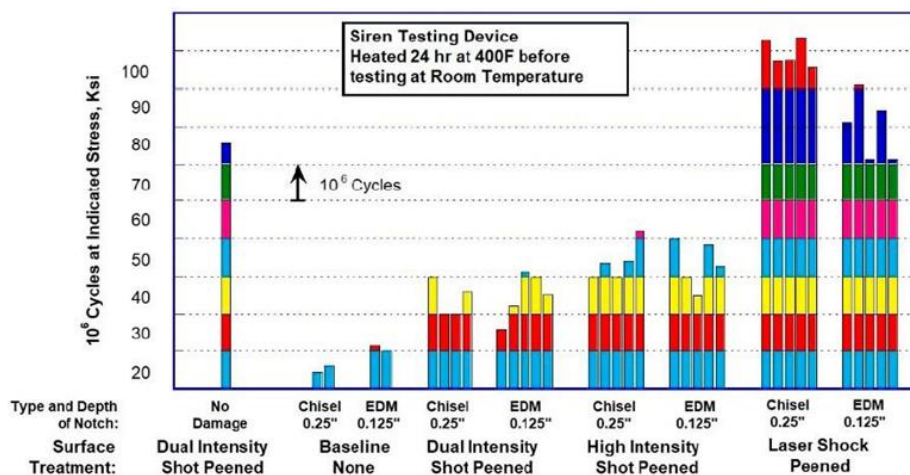


Figura 15: Resistencia a fatiga de las aspas de ventilador F101 que compara la influencia de varios tratamientos superficiales [34]

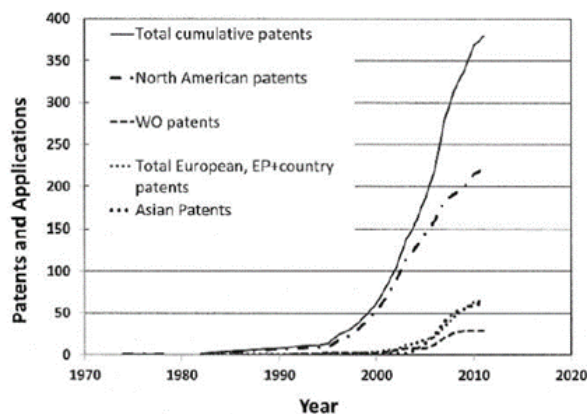


Figura 16: Crecimiento del número de patentes asociadas al LSP [34]

¹ Tratamiento térmico de solución, temple y maduración con doble tratamiento

² Tratamiento en solución y envejecido artificialmente

Poniendo el foco en nuestro país, a finales de los 90 se comienzan a desarrollar en la Universidad Politécnica de Madrid nuevos procesos que permiten disminuir el área de interacción del haz sobre la pieza haciendo uso de energías más altas. Lideradas en su momento por el profesor José Luis Ocaña, son varias las investigaciones realizadas y reconocidas dentro del sector [34].

1.3.1. Principios físicos

El tratamiento de LSP consiste en hacer incidir un pulso láser de elevada intensidad y corta duración sobre un material. La intensidad utilizada vendrá determinada por el alcance energético que se desee. Esta intensidad puede medirse a su vez mediante el número de pulsos por centímetro cuadrado, parámetro cuantificable mediante la noción del Equivalent Overlapping Factor (EOF). La magnitud de este parámetro puede elegirse en función del tipo de material, área a tratar o nivel de penetración deseado para la pieza. Al tratarse de un proceso altamente energético, la intensidad será del orden de los GW/cm^2 y la duración del pulso láser estará alrededor de los nanosegundos (ns). Actualmente hay equipos que ya funcionan en femtosegundos (fn) [38]. Como se puede deducir, los principios físicos detrás del LSP incluyen la generación de un haz láser y la interacción de este con el material.

1.3.1.1. Haz láser

Un láser es un dispositivo óptico que genera un haz luminoso de una sola frecuencia, monocromático, coherente y muy intenso, mediante la estimulación eléctrica o térmica de los átomos, moléculas o iones de un material [39]. Para su correcto funcionamiento necesita de tres componentes principalmente [38]. El esquema lo encontramos en la Figura 17.

- **Medio activo:** material que emite la luz debido a la excitación provocada por la fuente de bombeo. Este puede ser sólido (rubí, Nd:YAG), líquido (colorantes) o gaseoso (He-Ne, CO_2) [40]. En concreto para aplicaciones de LSP el medio activo más común es Nd:YAG o Nd:Vidrio.
- **Fuente de bombeo:** aporta energía en forma de radiación al láser. Se suele diferenciar entre bombeo eléctrico y bombeo óptico, siendo este último el usado para el proceso.
- **Resonador:** se trata de una construcción con dos espejos, uno con reflectividad máxima y otro con transmisividad parcial. Este último dejará pasar parte de la radiación y será lo que forme el haz láser. La radiación sobrante se quedará en la cavidad resonante y servirá para excitar al medio activo y amplificar la radiación.

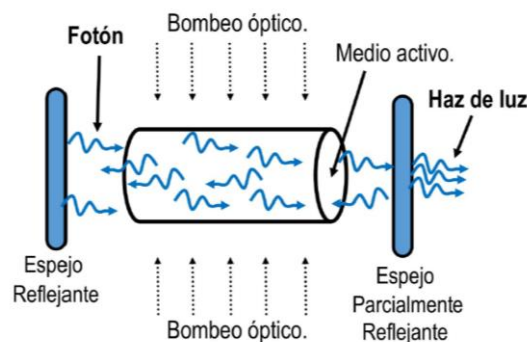


Figura 17: Esquema de la cavidad lineal de un láser [41]

A continuación, se van a desarrollar algunas de sus características más relevantes [42].

- **Monocromaticidad:** la luz de salida se puede aproximar a una sola longitud de onda (Figura 18). Esto hace que la luz pueda ser transmitida grandes distancias y concentrarse en puntos de pequeño diámetro.
- **Coherencia:** relacionada con la propiedad anterior, se refiere a la invariabilidad del haz tanto en su dirección, como en su longitud de onda.
- **Elevada intensidad (densidad de energía):** al poder concentrar en un solo punto el haz, la energía que recibe el material en ese diferencial de área es muy alta. Concretando para aplicaciones de LSP, como ya se ha comentado antes, esta es del orden de GW/cm^2 .

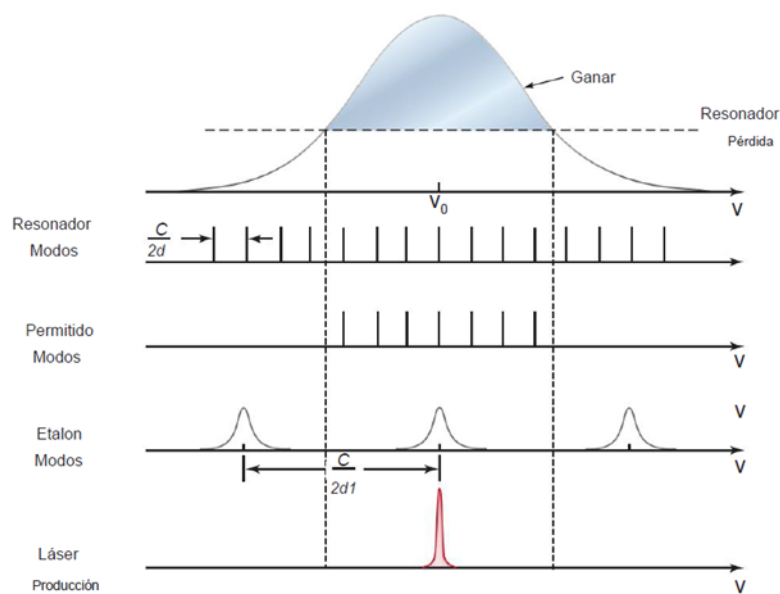


Figura 18: La oscilación puede ocurrir solo para los modos de resonador permitidos que se encuentran por debajo del ancho de banda de ganancia (parte superior de la figura) y la selección de modo longitudinal único mediante el uso de un resonador (etalón) [38]

1.3.1.2. Interacción de pulsos láser con elevada intensidad de energía sobre el material

Al enfocar el láser en un solo punto de la pieza, la energía que recibe el material es tal que se genera plasma. Este plasma tiene una alta temperatura, ya que lleva parte de la energía del láser, y se propaga tanto en la dirección del haz, hacia la pieza, como en sentido contrario, hacia el ambiente.

El plasma que se mueve hacia la pieza se expande, y por conservación de cantidad de movimiento, genera una onda de choque que provoca una deformación en el material [43]. Estas deformaciones son las que consiguen crear campos de tensiones residuales de compresión que, entre otros efectos como la mejora de su comportamiento frente a la corrosión química o la rugosidad, aumentan la resistencia a fatiga de la pieza y por tanto prolongan su vida útil [44], principal objetivo de cualquier tratamiento peening.

Como ya aventuró Anderholm [33], usando un medio confinante se conseguirán mayores presiones en el material. El plasma que sale expelido en sentido contrario al haz láser se podrá retener cerca de la superficie a tratar, aumentando la presión de la onda de choque y por tanto la deformación final del material. Este medio confinante debe ser transparente a la radiación del láser y no debe reaccionar con la pieza a tratar. Habitualmente se usa agua por su bajo coste, disponibilidad y flexibilidad en el montaje de equipo. Los cristales de cuarzo han sido también ampliamente usados, aunque más caros y menos versátiles.

El uso de recubrimientos volátiles también se puede usar para facilitar la generación de plasma y así aumentar la presión de la onda, aumentando la tensión final [45].

En la Figura 19 se puede ver la diferencia entre usar una interacción libre y el montaje confinado, usado para LSP.

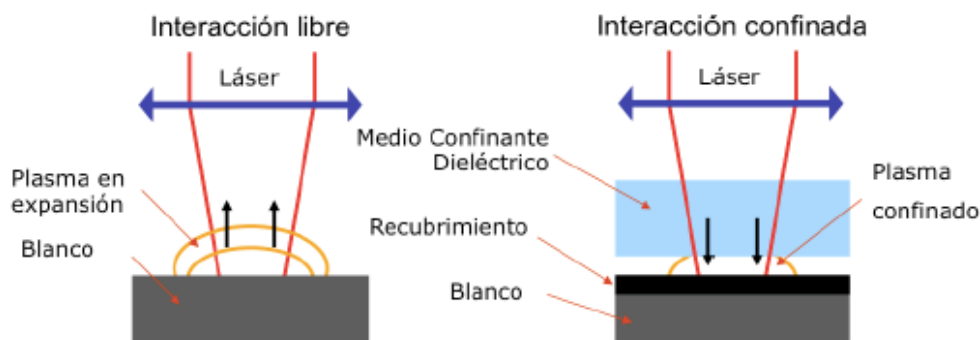


Figura 19: Esquema de la interacción láser-materia en un tratamiento LSP sin medio confinante (izq.) y con (dcha.) [43]

1.3.2. Aplicaciones

El LSP se usa principalmente para aumentar la resistencia a fatiga de las piezas tratadas (Figura 20). Las ventajas de esta técnica frente a otros procesos más tradicionales de granallado residen en el mayor control del área tratada, permitiendo también una mayor flexibilidad en el proceso. Esta posibilidad de variación se debe a la multitud de parámetros a definir que tiene el proceso.

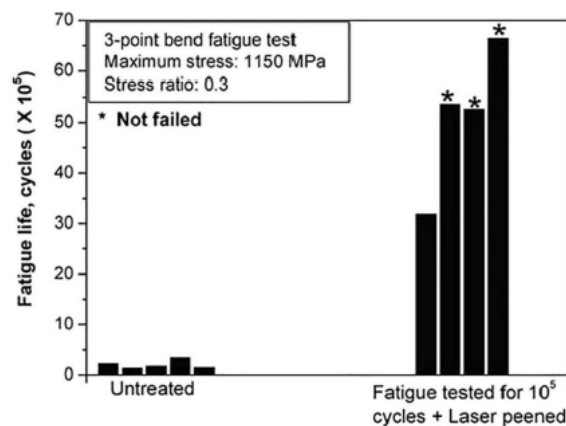


Figura 20: Comparación de la vida a fatiga de especímenes endurecidos y revenidos sin granallar y tratados con LSP [46]

Por otra parte, la profundidad de la zona afectada es entre cinco y diez veces mayor, obteniendo menor rugosidad residual (Figura 21). El tratamiento también ofrece protección frente a la corrosión intergranular y corrosión bajo tensión (Figura 22).

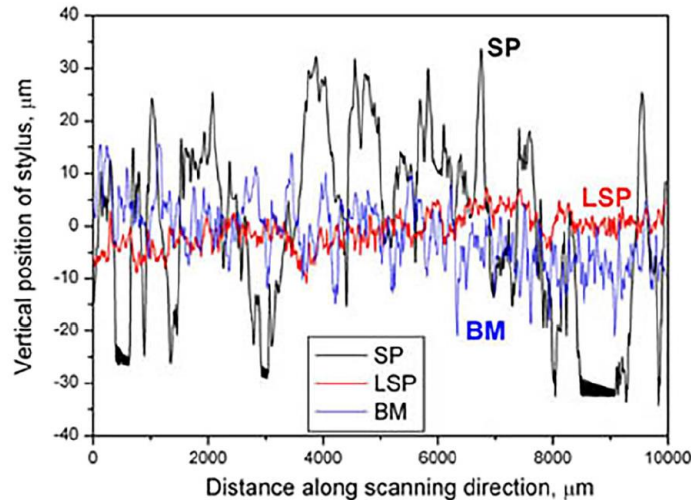


Figura 21: Comparación de perfiles de superficies para SP (granallado tradicional), LSP (granallado con láser) y BM (metal base) [47]

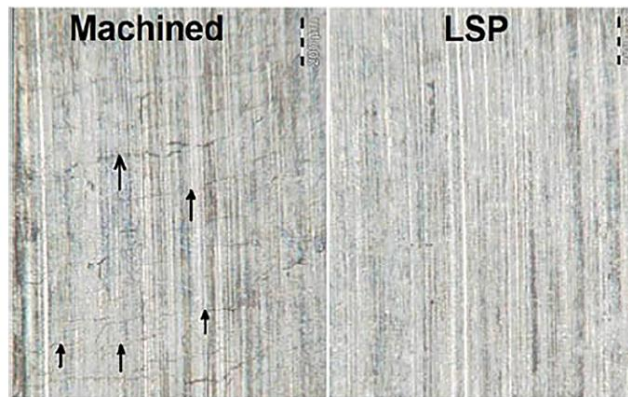


Figura 22: Superficie de agrietamiento por corrosión bajo tensión probada parcialmente con LSP1400 [48]

A pesar de que la técnica habitual de LSP sea usando un recubrimiento de sacrificio, para evitar dañar la superficie del material tratado, hay estudios que usando el segundo armónico ($\lambda = 532\text{nm}$, verde) del láser de Nd:YAG consiguieron aumentar la resistencia a fatiga respecto al material base y eliminar el efecto de corrosión bajo tensión sin usar un recubrimiento volátil [49]. Esta técnica se denomina LPwC (Laser Peening without Coating) [50] y es la que se realiza en el caso de este trabajo. Permitiendo el uso bajo el agua, tiene aplicación en la mejora en servicio de las plantas nucleares.

Otro proceso en desarrollo es el WLSP (Warm Laser Shock Peening [50]. Este se caracteriza por tratar el material a alta temperatura en vez de en frío. Permite la activación de procesos de nucleación y disolución de precipitados.

1.3.2.1. Procesos similares

Existen muchos procesos que no usan un láser y sin embargo también inducen tensiones residuales de compresión en la pieza a tratar [5]. A pesar de no disponer de la excelencia que garantiza el LSP, es importante conocerlos para rentabilizar procesos con menores sollicitaciones. Estos son:

- **Granallado tradicional:** disparo de pequeñas bolas de acero o cerámica a alta velocidad sobre la superficie del material. Se crean cavidades que comprimen la pieza, creando las tensiones residuales de compresión, y la endurecen (Figura 23 izq.).
- **Bruñido:** se erosiona una pieza con un objeto más duro, eliminando material para mejorar el acabado superficial y las propiedades mecánicas del mismo (dureza y tensiones residuales) (Figura 23 drcha.).



Figura 23: Detalle granallado [51] (izq.) y bruñido [52] (drcha.)

- **WJP (Water Jet Peening):** disparo continuo con un chorro de agua a alta velocidad, generando deformaciones que inducen tensiones residuales de compresión.
- **Granallado por cavitación:** similar al WJP solo que, con el añadido de la introducción de aire en el chorro de agua, de forma que al impactar las burbujas de aire contra la superficie colapsan y explotan (Figura 24 izq.).
- **USP (Ultrasonic Shot Peening):** la deformación se realiza mediante ondas de ultrasonidos generadas por la vibración de un sonotrodo (Figura 24 drcha.).

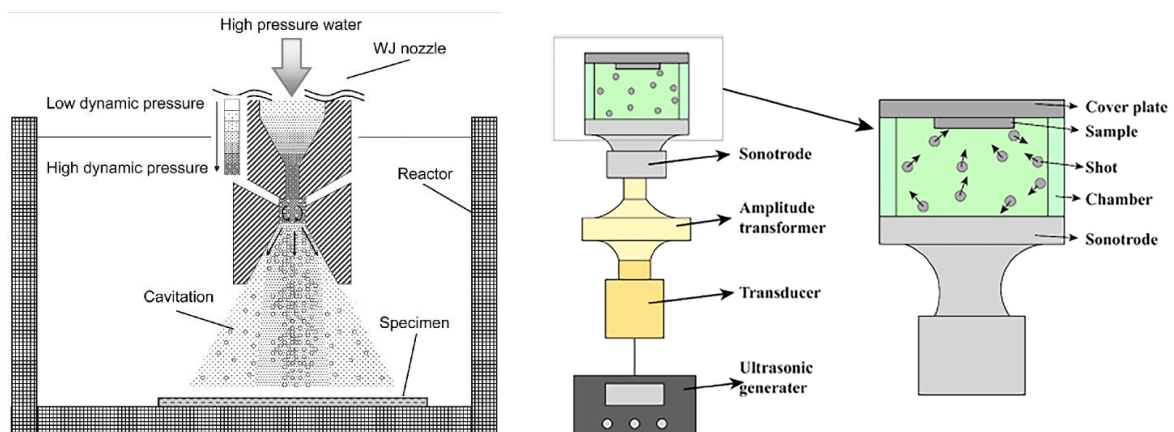


Figura 24: Detalle granallado por cavitación [53] (izq.) y USP [54] (drcha.)

1.4. Objetivos

El objetivo final de este TFG es el análisis microestructural y mecánico de las probetas longitudinales fabricadas mediante DED en las instalaciones de Etxetar y la influencia, en estos mismos aspectos, de la realización de un tratamiento LSP efectuado en las instalaciones del Centro Láser UPM (CLUPM). Todo ello se materializa en los siguientes aspectos:

- Caracterización microestructural.
- Caracterización mecánica mediante ensayos de dureza, obtención de la curva S-N del material base a partir de ensayos de fatiga y medida de la corrosión del material base.
- Elección de los parámetros para el tratamiento LSP y realización del tratamiento.
- Caracterización mecánica mediante ensayos de dureza, obtención de la curva S-N del material base a partir de ensayos de fatiga y medida de la corrosión del material tratado con LSP.
- Medida de la tensión residual inducida por el tratamiento LSP a partir del ensayo *hole drilling*.
- Análisis de los resultados.
- Comparación con los resultados obtenidos en otros trabajos para el material base y las probetas transversales.

CAPÍTULO 2

ESTUDIO DEL MATERIAL Y LAS TÉCNICAS EXPERIMENTALES EMPLEADAS

2.1. Materiales y métodos

La caracterización de un nuevo material, o el estudio de los cambios que puede producir en las propiedades mecánicas el uso de una nueva técnica de fabricación (como es el caso), pasa por una investigación previa que permita conocer qué es lo esperado y cuál es la manera más adecuada de analizarlo. Así, en este capítulo se describirá brevemente las características metalúrgicas del acero AISI 316L, además de explicar los ensayos empleados para caracterizar el material.

2.2. Material empleado

El material a caracterizar es AISI 316L, un acero inoxidable austenítico cuya composición se puede leer en la Tabla 1. Este material destaca por su ductilidad en caliente y frío, su alta tenacidad y especialmente resistencia a la corrosión electroquímica. Su bajo contenido en carbono, grado L, además de conferirle mejor soldabilidad, evita la corrosión intergranular. Este tipo de corrosión se caracteriza por la precipitación entre 400 y 800 °C de carburos magnéticos en el borde de grano [55].

	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Si	Fe
AISI 316L	0,02	17,5	12	1,5	2,2	0,2	Balance

Tabla 1: Composición química del acero AISI 316L (porcentaje en peso) [56]

Para este trabajo, las probetas han sido fabricadas mediante técnicas de FA y posterior DED (Directed Energy Deposition) (Apartado 1.2.1.7) en las instalaciones de Etxetar, ubicadas en Elgoibar, Guipúzcoa. Por su parte, la materia prima para dicho proceso de fabricación se obtiene mediante técnicas pulvimetalúrgicas, que consisten en la obtención de polvo de metal mediante procesos de atomizado, químicos o electrolíticos. En el caso del producto comercial usado en Etxetar, el material base se fabrica mediante atomización por gas (Figura 25). Esta

técnica utiliza una corriente a alta velocidad de aire o gas inerte que atomiza el metal líquido al final de la boquilla por la que fluye.

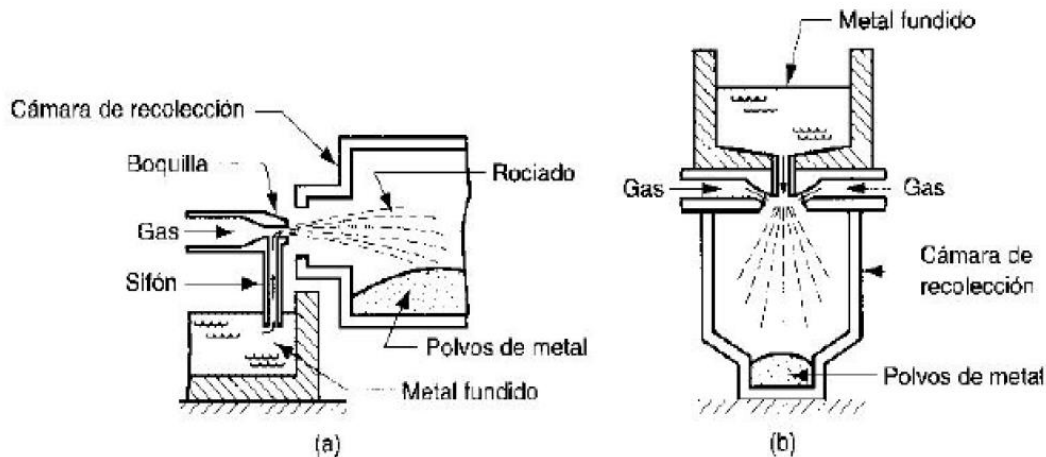


Figura 25: Esquema del proceso de atomización por gas [57]

Según fabricante (Figura 26), las partículas obtenidas tienen un diámetro que oscila entre las 15 y las 45 μm , $\pm 5\%$, y una porosidad de partícula inferior al 0.8% [56]. Este tamaño de partícula se ha vuelto a medir en las instalaciones del Centro Láser UPM (Figura 27) tomando muestras aleatorias del producto comercial, obteniendo un diámetro de media 3 veces superior al indicado, que oscila entre las 45 y las 106 μm .

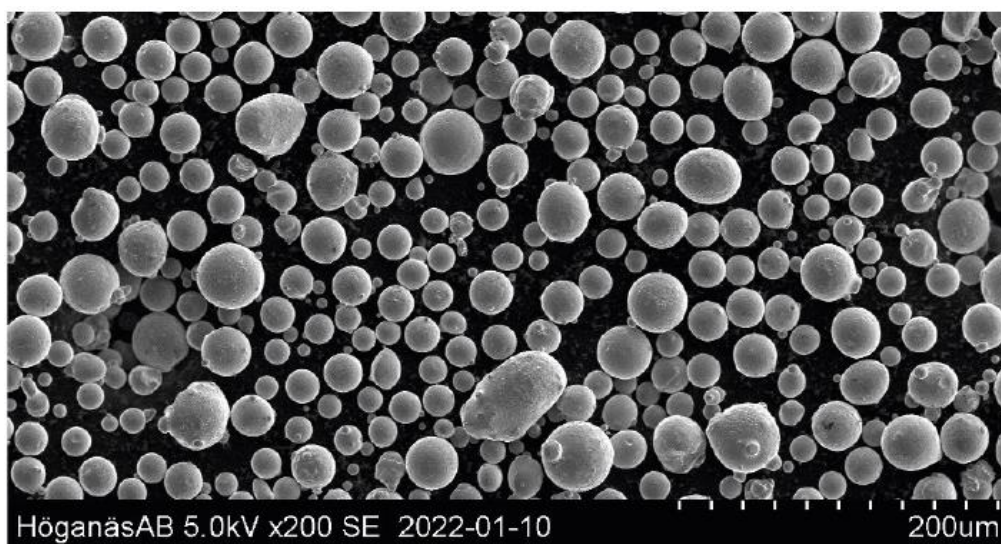


Figura 26: Polvo de acero AISI 316L dado por el fabricante [56]

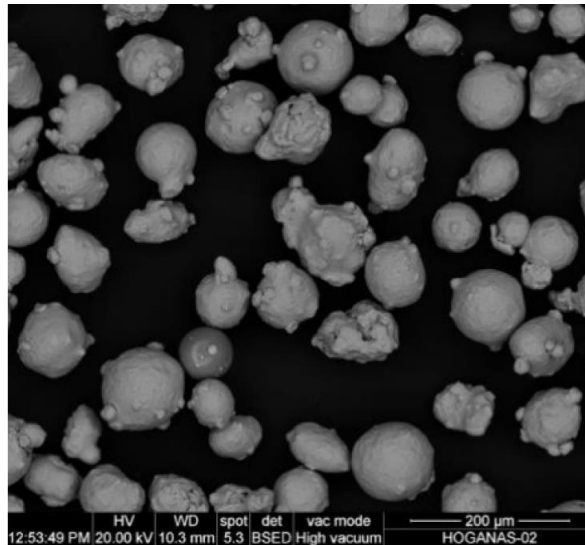


Figura 27: Polvo de acero AISI 316L obtenido en las instalaciones del Centro Láser UPM

Al tratarse de un acero inoxidable austenítico sometido a unos altos gradientes térmicos es habitual encontrar en su composición final dos fases: austenita ($Fe\gamma$) y ferrita delta ($Fe\delta$). Esta última, mejora la resistencia a la corrosión tanto por picaduras como bajo tensión, además de prevenir el agrietamiento en caliente [5] siempre que no se obtengan valores superiores al 6% [58], por lo que es imprescindible poder prever el porcentaje de $Fe\delta$ esperado. Un buen método de aproximación debido a la naturaleza térmica del proceso de fabricación es el uso del diagrama WRC-1992, empleado habitualmente para la determinación de la compatibilidad microestructural de uniones soldadas. Para ello se determina el Cr y Ni equivalente siguiendo las ecuaciones que se pueden ver a continuación.

$$Cr_{eq} = \%Cr + \%Mo + 0,7 \%Nb = 19,70$$

$$Ni_{eq} = \%Ni + 35 \%C + 0,25 \%Cu + 20 \%N = 12,70$$

Una vez obtenidos los valores, se ingresa con ellos al gráfico (Figura 28), obteniendo una cantidad máxima de $Fe\delta$ del 5,44% [59], que al ser menor del 6% se considera aceptable.

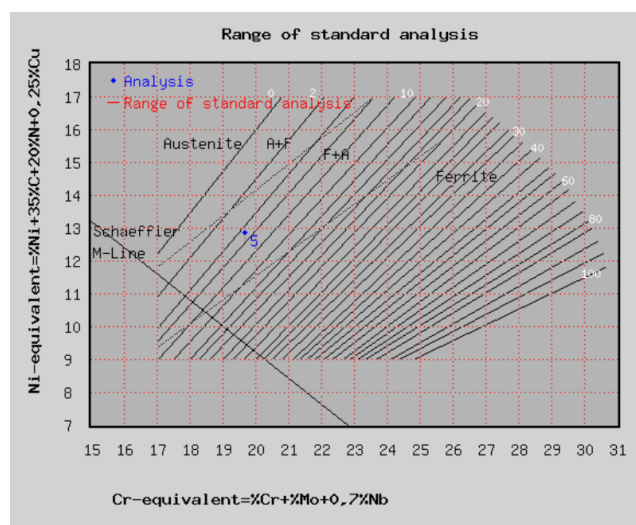


Figura 28: Diagrama WRC-1992 para AISI 316L [60]

Sin embargo, existen estudios que relacionan a su vez la cantidad de $Fe\delta$ obtenida en aceros inoxidables austeníticos con la velocidad de enfriamiento a la que se somete la pieza, variable en procesos de DED [61]. De esta manera, las zonas con mayores velocidades de enfriamiento tendrán mayor cantidad de $Fe\delta$ (Figura 29), mientras que a menor velocidad se favorece la difusión en caliente de $Fe\delta \rightarrow Fe\gamma'$, obteniendo una matriz austenítica más homogénea.

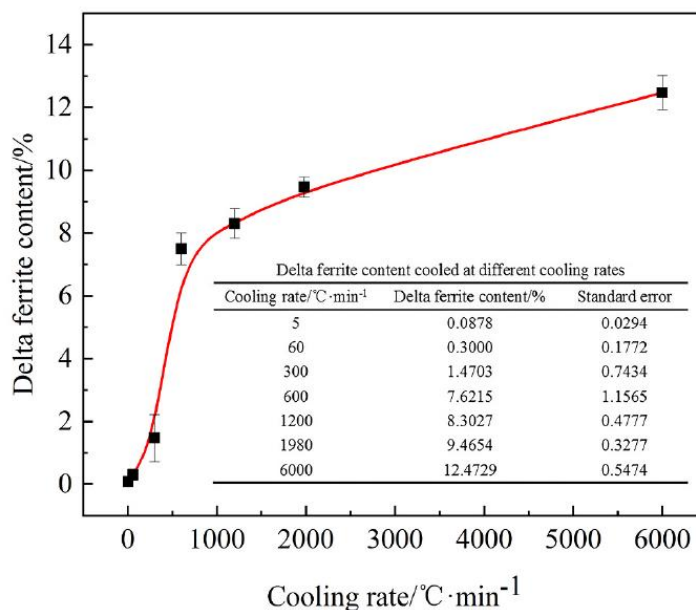


Figura 29: Porcentaje de $Fe\delta$ obtenido en función de la velocidad de enfriamiento [61]

2.2.1. Obtención de probetas para ensayos normalizados

Tras la obtención de los polvos de AISI 316L, se fabricaron las probetas objeto de estudio mediante la técnica de DED en las mismas instalaciones cuyos parámetros se pueden observar en la Tabla 2. Para la formación de las capas, se guiaron los polvos hacia una fuente láser a través de una boquilla coaxial (*Powerline 12, Fraunhofer IWS*). La fuente láser, de fibra y onda continua (*YL 600 - BR*), era también guiada hacia el material con el objetivo de producir un baño de fusión mediante una guía de fibra óptica de 1 mm de diámetro. Finalmente se obtuvo una pared como la de la Figura 30, que tras ser acabada superficialmente (pulido, rectificado y ataque), quedaba lista para el corte.

PARÁMETROS DEL PROCESO DED	
Potencia haz láser (W)	2600-3000
Velocidad de avance (mm/s)	10-17
Flujo de los polvos (gr/min)	2 - 3
Gas protector	N ₂
Flujo de gas protector (l/min)	8
Flujo de gas portador (l/min)	4
Estrategia de avance	Zigzag

Tabla 2: Parámetros del proceso de LSM realizado en las instalaciones de Etxetar

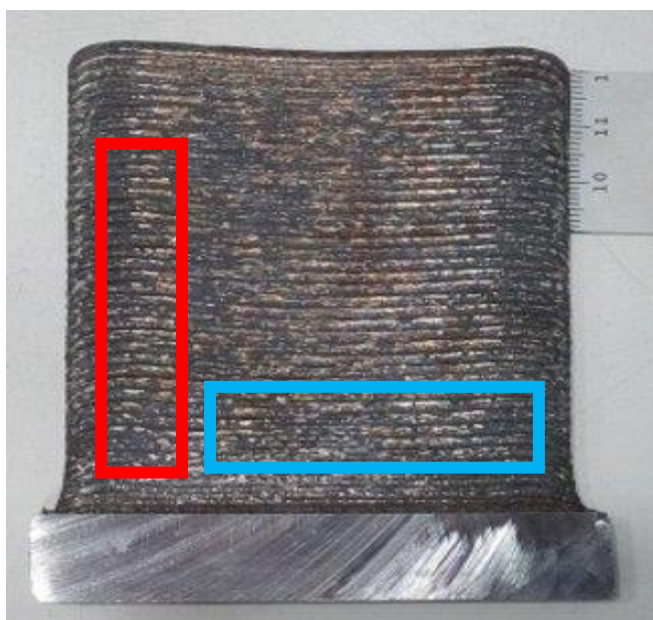


Figura 30: Paredes obtenidas mediante técnicas de DED en las instalaciones de Etxetar

Como se puede comprobar en la Figura 30, existen dos tipos de orientaciones en las probetas:

- Probetas transversales (rojo): la deposición de material se ha realizado en dirección perpendicular al eje principal de la probeta.
- Probetas longitudinales (azul): la deposición de material se ha realizado en dirección paralela al eje principal de la probeta.

Estas últimas son objeto de estudio de los ensayos mecánicos, mientras que las primeras se utilizan en el estudio metalográfico, ya que permiten ver la sección transversal de las pasadas. Ambas caracterizaciones se desarrollan en los siguientes apartados y han sido realizadas en las instalaciones del Centro Láser UPM.

2.2.2. Preparación de las probetas

Para poder hacer un análisis profundo de la microestructura del material, se deben fabricar probetas metalográficas. Estas facilitan el estudio al microscopio óptico y de barrido, proporcionando un soporte estable y permitiendo su manipulación si contaminar la superficie de interés. Las probetas se fabrican en el laboratorio de Metalurgia, dentro de las instalaciones de la ETSII UPM. Su método de obtención se describe en los siguientes apartados.

2.2.2.1. Materiales y equipos

Materiales:

- Probeta
- Polvo de metacrilato
- Papel y bolígrafo
- Pinzas
- Agua
- Alcohol
- Etanol
- Solución con polvo de diamante
- Soluciones para el ataque (ácido clorhídrico, sosa al 10%)
- Tenazas
- Pletina
- Plastilina

Equipos

- Cortadora
- Empastilladora
- Lijas refrigeradas de grano 200, 400, 600, 800, 1200, 2400 y 4000
- Pulidora para materiales duros
- Secador
- Prensa
- Microscopios ópticos
- Cámara

2.2.2.2. Procedimiento

Corte

El primer paso en cualquier análisis metalográfico es seleccionar la parte del material a inspeccionar. Para poder visualizar las pasadas de material por FA, se procedió a cortar una de las probetas transversales por la mitad, a la vez que se dividía en cinco secciones (base superior, base inferior, estrechamiento superior, estrechamiento inferior y cuello), dando como resultado 10 probetas de estudio (Figura 31). Para obtener las muestras se hace uso de la cortadora *ISOMET 1000* (Figura 32). Esta se compone por un disco de diamante de 2.5 cm de diámetro y una compuerta que impide el funcionamiento si no se encuentra cerrada. Como lubricante se usa una solución de agua y taladrina, que tiene también función refrigerante.

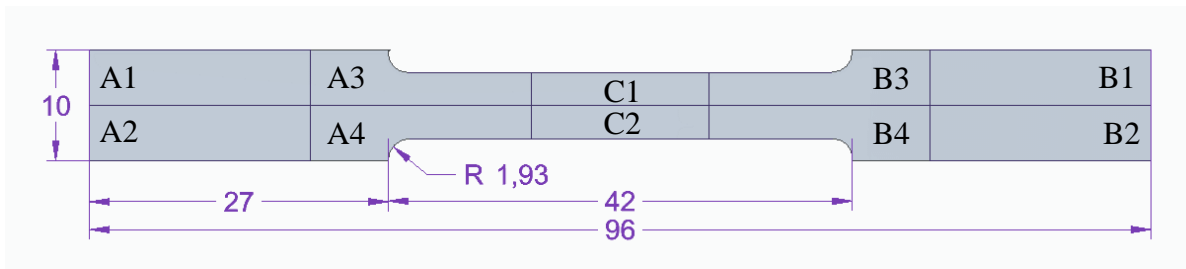


Figura 31: Esquema de corte de la probeta



Figura 32: Cortadora

Embutición en resina

Para poder sujetar bien el material a inspeccionar en los procesos siguientes y para evitar lo máximo posible la contaminación de este, se empastilla la probeta. Se usará metacrilato en polvo (*Transoptic Powder – Methacrylate*), que se curará en el proceso de empastillado. El uso de metacrilato permite obtener un acabado transparente, por lo que se verán todas las caras de la probeta.



Figura 33: Empastilladora

Lo primero de todo es asegurarse de que las variables operacionales de la máquina (Figura 33) están correctas. Esta opera a 180°C, con 15kN de presión, debe estar 5 minutos en el calentamiento y entre 3,5 – 4 minutos en el enfriamiento.

Una vez comprobado y corregido si fuese necesario, se comenzará el proceso.

2.2. Material empleado

1. Quitar la tapa y pulsar la flecha que señala hacia arriba, para subir la plataforma de apoyo.
2. Cubrir la base de la plataforma con polvos antiadherentes y colocar la probeta con la cara de interés hacia abajo (apoyada). En el caso de que no hubiera un apoyo estable, se haría uso de una pinza.
3. Pulsar la flecha que señala hacia abajo para bajar la plataforma.
4. Llenar el cazo grande de medida que viene en el recipiente de los polvos de metacrilato. Con ayuda de un embudo espolvorear el contenido. Se debe tomar la precaución de verterlo por las paredes del embudo, para no desplazar la probeta.
5. Cuando quede poco polvo en el cazo, se debe hacer el cartel identificativo de la probeta usando papel y bolígrafo. En él se debe incluir la información fundamental del material que permita su correcta identificación posterior. Una vez hecho, hacer un doblez en una esquina muy pequeña y con unas pinzas cogerlo desde ahí para posteriormente introducirlo (con la información hacia arriba) en el canal de la empastilladora. En este caso las identificaciones son: A1, A2, A3, A4, C1, C2, B1, B2, B3 y B4 (Figura 34).
6. Verter el resto del cazo.
7. Cubrir la parte metálica de la tapa con polvos antiadherentes y cerrar.
8. Iniciar el proceso pulsando el botón verde.

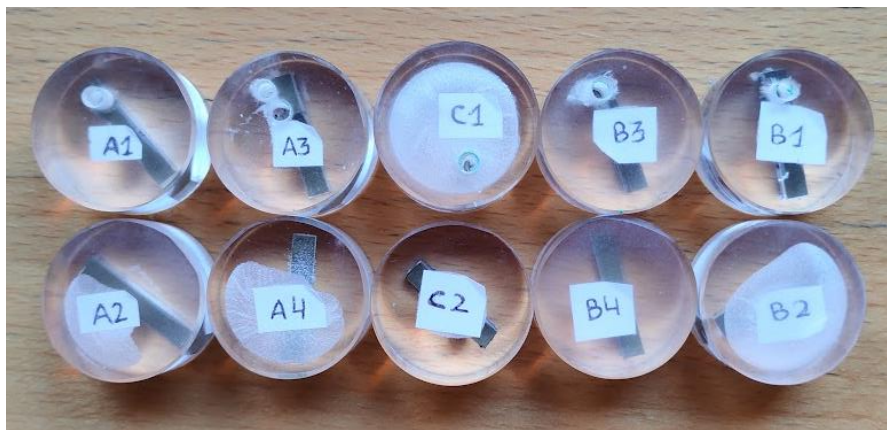


Figura 34: Probetas empastilladas con identificación

Desbaste

Se va a pasar cada probeta por siete lijas con corriente de agua, que hará función lubricante y refrigerante. El caudal de agua debe estar centrado en el eje de rotación de la lija y debe ser pequeño, de forma que cree una capa fina que permita el contacto de la lija con el material.

El desbaste se realizará en orden creciente de granos de las lijas, es decir 200, 400, 600, 800, 1200, 2400 y finalmente 4000 (Figura 35). Para evitar la contaminación entre lijas y eliminar partículas, antes de pasar a la siguiente se debe limpiar con un poco de agua.

Para realizar un buen desbaste, se sigue la estrategia de los giros de 90°. Esta consiste en girar la probeta 90° con respecto a la posición que se ha tomado en la lija anterior. Se debe permanecer en la misma lija hasta que todas las líneas impresas en el material estén en la misma dirección. Es importante también procurar aplicar una presión uniforme en toda la probeta y no girarla, para evitar la formación de planos. Si esto ocurriera, volver a la lija anterior.

Una vez se haya terminado el proceso de desbaste, se deben limpiar las probetas. Se pondrán bajo un chorro de agua para posteriormente pulverizarlas con alcohol. Se secarán formando un ángulo de 45° con el chorro de aire del secador.



Figura 35: Lijas de (izq. a drcha.) 200, 400, 600 y 800

Pulido

Al contrario que ocurre en el desbaste, en las lijas de pulido (Figura 36) la probeta no permanecerá fija, sino que se hará girar en el sentido contrario al giro de la propia lija. Como lubricante se usa una solución con polvo de diamante. El proceso se debe repetir hasta que quede una superficie especular. Al tratarse de acero 316L se usará la lija para materiales duros.

El proceso de limpieza final es similar al del desbaste. La probeta se debe limpiar bien con agua y jabón, para eliminar los restos de la solución de polvo de diamante. Posteriormente se pulveriza etanol y se seca formando un ángulo de 45° con el chorro de aire del secador.



Figura 36: Pulidora para materiales duros (izqda.) y materiales blandos (dcha.)

Ataque

Se disponen de dos soluciones para el ataque: solución de ácido oxálico al 10% y de cúprico. La solución cúprica contiene 3 gramos de cloruro cúprico (CuCl_2), 66 ml de ácido clorhídrico, 66 ml de etanol y 66 ml de agua (Figura 37). En primer lugar, se atacaron químicamente todas las probetas con la solución de cúprico mediante inmersión. Sin embargo, al obtener un contraste pobre a pesar de los largos tiempos de ataque, se procedió a realizar el ataque electrolítico con la solución de ácido oxálico a las probetas con número impar (A1, A3, C1, B1 y B3).



Figura 37: Solución para ataque químico. Cloruro cúprico

El ataque de una probeta habrá terminado cuando se pierda el brillo especular y la superficie quede mate. Para no sobreatacar la probeta, es necesario vigilar el ataque cada pocos segundos.

- **Ataque químico** la probeta se sumerge en un recipiente con el líquido de ataque y la reacción se produce de forma espontánea. Para evitar el contacto directo con la solución cúprica por parte del operario se debe coger la muestra con unas tenazas. Su uso favorecerá el ataque, permitiendo la realización de movimientos circulares que distribuyan homogéneamente la solución.

TIEMPO (min)	2	3	3,5	4
Probetas	A1, A2	B1, B2	C2	A3, A4, C1, B1, B4

Tabla 3: Tiempos de ataque con solución de sosa al 10%

La Tabla 3 muestra el tiempo de inmersión por cada probeta. Como se puede apreciar, el tiempo no es el mismo en todas, tendiendo a un aumento. Esto se debe, muy probablemente, a la degradación de la solución de ataque, perdiendo reactividad a medida que pasa el tiempo.

- **Ataque electrolítico:** la probeta vuelve a estar sumergida en el líquido de ataque, sin embargo, esta vez se le hace pasar una corriente continua, encargada de impulsar la reacción. En este caso la corriente debe ser de 1 Amperio/ cm^2 . El área del material a atacar es de $0,8\text{cm}^2$ (Figura 38), por lo que el valor de la corriente será de 0,8 Amperios.

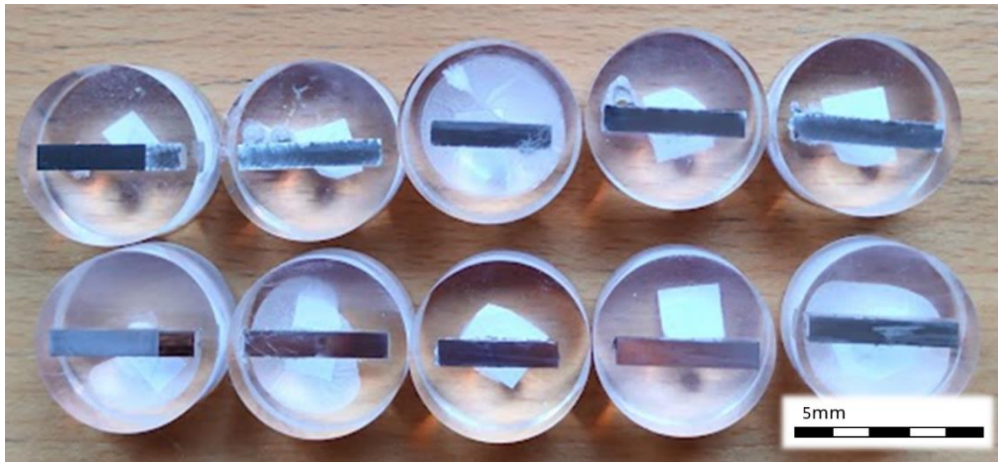


Figura 38: Probetas a tratar con sección vista

El montaje requiere de un ánodo, un cátodo y un electrolito. El ánodo es la muestra a atacar. Para que pueda reaccionar correctamente, se debe realizar un taladro y un roscado en la probeta, de forma que la varilla metálica por la que pasa la corriente tenga contacto con el metal de muestra (Figura 39). El cátodo es la otra varilla metálica que se introduce en el electrolito, que en este caso es la disolución de ácido oxálico. En el montaje final que se puede visualizar en la Figura 40 se puede identificar el ánodo siguiendo el cable rojo y el cátodo siguiendo el cable negro.

El tiempo de ataque es de 25 segundos por probeta, lo que permite colorear los carburos y el borde de grano austenítico. Si bien es cierto que el tiempo de preparación de la muestra es mayor en este tipo de ataque, la mejora en el contraste y la reducción del tiempo de ataque de hasta un 90% compensa.

Una vez se haya finalizado cualquier ataque, se deben limpiar las probetas con agua y etanol. Cuando se sequen estarán listas para su análisis microscópico.



Figura 39: Taladrado de la probeta



Figura 40: Montaje ataque electrolítico

2.3 Técnicas de caracterización

Toda la parte experimental que permite el estudio de las propiedades mecánicas del material se ha realizado en las instalaciones del CLUPM salvo el análisis EDX, para el cual se ha tenido que hacer uso del equipo que se encuentra en el Museo de Ciencias Naturales. Los ensayos a continuación descritos son de fatiga, para obtener la curva S-N; de medida de tensiones residuales, para medir la influencia del tratamiento LSP sobre la superficie (también descrito); de resistencia a la corrosión y de dureza. También se recurre a la microscopía óptica y electrónica de barrido para el estudio microestructural del material.

2.3.1. Micrografía óptica

En esta parte del proceso se utilizará una lupa (*Olympus SZ-CTU*) y un microscopio óptico (*Olympus PMG3*) conectado al ordenador a través de una cámara (Figura 41), permitiendo la toma de fotos y con el objetivo de caracterizar los espesores de cada capa de fabricación, así como la evolución del crecimiento dendrítico y la existencia o no de poros. Para poder medir el tamaño de los poros se hará uso del software *Perfect image ~ Claravision*.



Figura 41: De izquierda a derecha. Microscopio óptico, lupa y monitor

Para realizar la observación, se debe colocar la pastilla en una pletina con un poco de plastilina para posteriormente prensarla. De esta forma la superficie a analizar queda totalmente paralela con el suelo, garantizando una imagen adecuada en la cámara. Una vez situada la probeta en el soporte, se enfoca la imagen para distintos aumentos. Con el microscopio se trabajará con los objetivos de 5, 10 y 20, tomando siempre la precaución de que la lente no toque con la probeta. A la hora de guardar las instantáneas, se deberá tener en cuenta el aumento de la cámara. Para ello se debe haber realizado previamente un calibrado (Tabla 4).

Nombre	$\mu\text{m}/\text{Píxel}$ (Eje X)	$\mu\text{m}/\text{Píxel}$ (Eje Y)	Objetivo	Escala	Signo ancho de imagen	Signo alto de imagen	Calibrar
OBJ_5	1,05634	1,0582	25	true	2000	1500	true
OBJ_10	0,53381	0,53239	50	true	2000	1500	true
OBJ_20	0,25926	0,25547	100	true	2000	1500	true
OBJ_50	0,10608	0,10534	250	true	2000	1500	true

Tabla 4: Calibración microscopio óptico Olympus PMG3

2.3.2. Microscopía Electrónica de Barrido

También se hará uso de un microscopio electrónico de barrido (MEB), que permita caracterizar la microestructura de la probeta, así como la composición de los poros. Para ello se hará uso del MEB en bajo vacío disponible en el Museo Nacional de Ciencias Naturales, junto con el sistema de análisis EDX (Energía Dispersa de Rayos X). Al operar en bajo vacío, no se necesita una preparación previa de la muestra.

2.3.3. Ensayo de fatiga

Con el objetivo de ver el comportamiento del material frente a cargas oscilantes y determinar el número de ciclos que es capaz de soportar antes de romperse, se han realizado pruebas de fatiga. La máquina utilizada para tal fin es la máquina de ensayos universales MTS 810 (Figura 42), que en este caso se ha configurado para actuar en tracción-tracción siguiendo la norma ASTM E466. Además, cuenta con un control servohidráulico que le permite la aplicación de cargas de hasta 100 kN con una frecuencia máxima de carga y descarga de 60 Hz. Para manejar los datos obtenidos, se ha hecho uso del software TestWorks 4 Servohydraulic Test System.

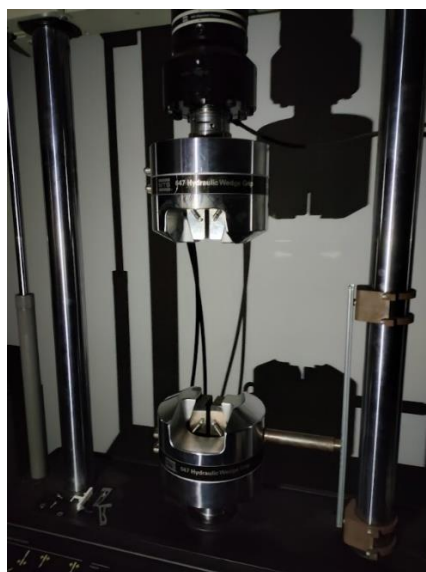


Figura 42: Máquina de ensayos universales MTS 810

Al depender de un proceso de fabricación tan sofisticado, se cuenta solo con 10 probetas de tracción para realizar los distintos ensayos. De cara a poder analizar las alteraciones del material por el tratamiento LSP, se decidió realizar 5 ensayos antes del tratamiento y 5 una vez efectuado. Las amplitudes medias de carga (200, 150, 130, 120 y 100 MPa) han sido escogidas tomando como referencia trabajos previos donde se trabajaba con el mismo material [5]. Estos estudios proporcionan resultados del comportamiento frente a la fatiga del material base laminado, así como del material fabricado mediante DED en dirección transversal. Todos estos datos permitirán complementar el análisis del material objeto de estudio en este trabajo, favoreciendo la comparación entre técnicas de fabricación disponibles.

El procedimiento del ensayo fue el siguiente:

1. Medida con un calibre de tolerancia $\pm 0,02$ mm del espesor y del ancho en el cuello de cada una de las probetas.
2. Cálculo de la presión en las mordazas y carga máxima y mínima del ensayo.

$$P_{mordazas}(MPa) = \frac{F_{max}}{66,45} \quad F_{max}(kN) = \text{ancho} * \text{espesor} * \frac{\text{amplitud}}{0,45} \quad F_{min}(kN) = \frac{F_{max}}{10}$$

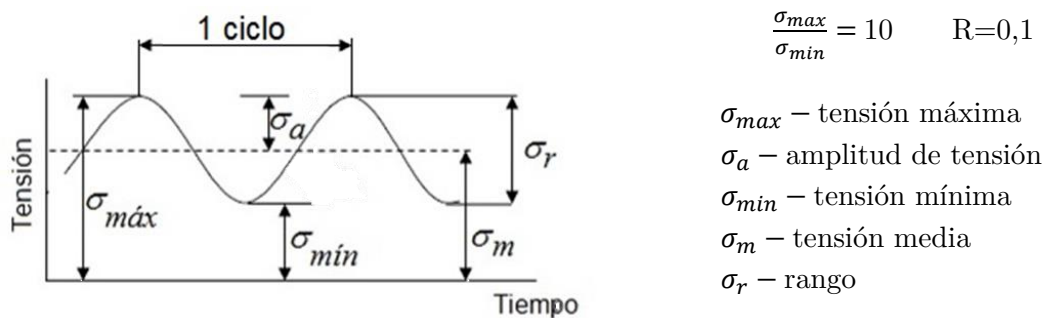


Figura 43: Curva de esfuerzo cíclico en tracción-tracción [62]

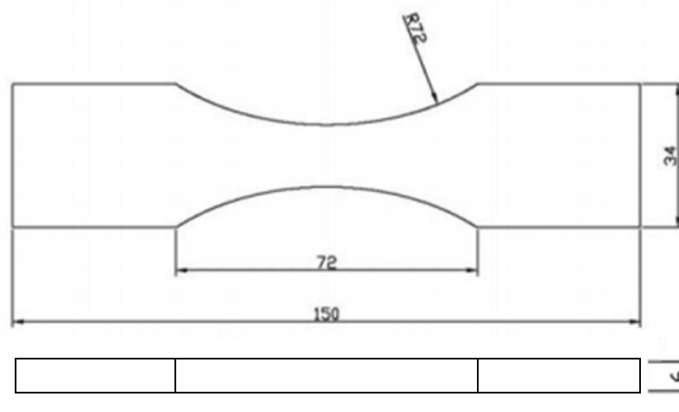


Figura 44: Dimensiones probetas de fatiga

3. Montar la probeta en la máquina asegurándose de posicionarla lo más centrada posible y a continuación cargar los datos en el software para que den comienzo los ciclos de carga (Figura 45).

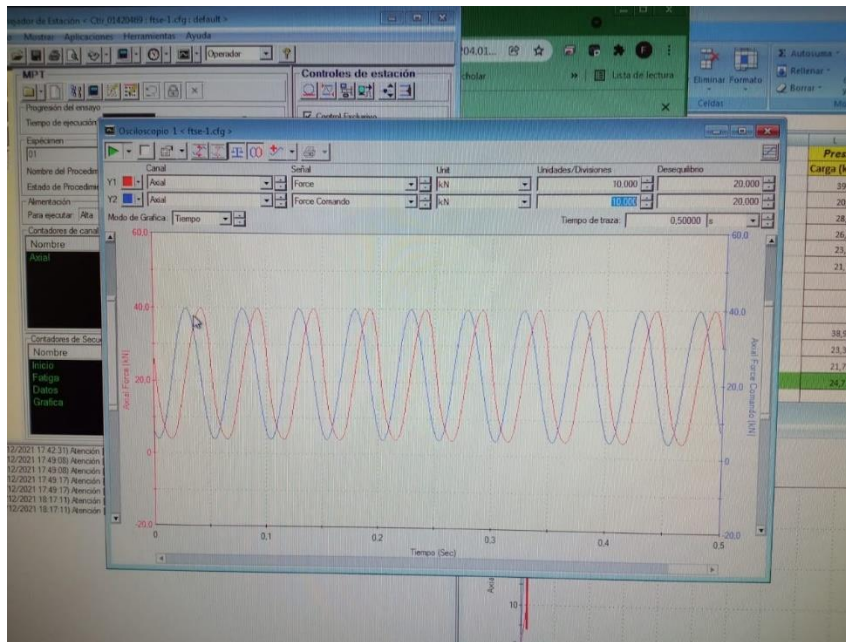


Figura 45: Ciclos de carga para uno de los ensayos. Visión de la interfaz "Osciloscopio" desde el software usado

La máquina operará en todos los ensayos con una frecuencia de 20 Hz y se detendrá una vez producida la fractura o alcanzados los 10^7 ciclos, donde se considerará vida infinita para la amplitud de carga ensayada.

2.3.4. Tratamiento LSP

El láser utilizado para este tratamiento es un láser pulsado de estado sólido. El modelo, situado en las instalaciones del Centro Láser UPM, es un Quanta-Ray PRO 350 Nd:YAG, de la marca Spectra-Physics. Este láser de neodimio dopado con cristales de granate de itrio y aluminio (Y3A15O12) es uno de los láseres más utilizados en la industria [63]. Con el objetivo de amortizar al máximo el sistema de bombeo, que genera un pulso cada vez que la lámpara flash se enciende, se incorpora al resonador un dispositivo Q-switch. Este facilita el acortamiento del pulso además de aumentar el pico de potencia a la salida del dispositivo, obteniendo finalmente una potencia pico del orden de las decenas de MW y un ancho de pulso menor a 10 ns. Las especificaciones en función de la longitud de onda del equipo se pueden encontrar en la Tabla 5.

Especificaciones			
Longitud de onda (nm)	Energía (J/pulso)	Ancho de pulso (ns)	Frecuencia (Hz)
1064	2,4	8-12	10
532	1,52	1-2	10
355	0,77	2-3	10

Tabla 5: Especificaciones del láser Quanta-Ray PRO-350 Nd:YAG

Para este trabajo, el equipo láser opera a una longitud de onda de 1064 nm. Además, el haz sigue un camino óptico representado en la Figura 46 que tiene como objetivo concentrar y enfocar el pulso. Se usa también agua como medio confinante del plasma. Los parámetros (Tabla 6) para el tratamiento se han escogido en base a investigaciones previas, donde se buscaba la optimización del método para materiales metálicos de características similares al AISI 316L [4]. Con el objetivo de aprovechar al máximo posible el pulso emitido, y que toda la energía absorbida por el material sea transformada en tensiones de compresión solo se ha tratado el área reducida de la probeta. Debido a la alta energía por unidad de superficie y un ancho de pulso corto marcado por las condiciones del equipo, se consiguen irradiancias del orden de GW/cm^2 .

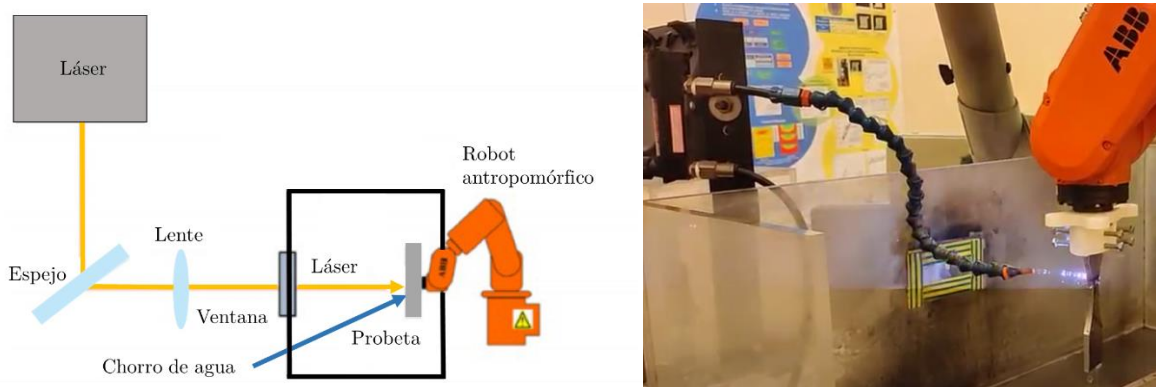


Figura 46: Esquema del montaje para el tratamiento LSP en las instalaciones del CLUPM y fotografía in situ

Parámetros del tratamiento LSP	
Longitud de onda (nm)	1064
Frecuencia (Hz)	10
Energía (J/pulso)	2,4
Ancho de pulso (ns)	9
Diámetro de spot (mm)	1,5
EOF (pulsos/ cm^2)	1600
Medio confinante	Chorro de agua
Recubrimiento absorbente	No

Tabla 6: Parámetros tratamiento LSP a las probetas de fatiga

2.3.5. Ensayo de medida de tensiones residuales

Al ser la principal motivación del tratamiento LSP la creación de campos de tensiones de compresión en el material, es necesario acompañar este tratamiento con un ensayo de medida de tensiones que cuantifique la efectividad de este. A pesar de que existen muchos métodos que permiten el cálculo de las tensiones inducidas, todos deben efectuarse de manera indirecta. Se

debe medir otra magnitud, como un patrón de difusión o deformaciones, y mediante cálculos se obtiene finalmente el valor de las tensiones. Para este trabajo se ha utilizado la técnica del agujero ciego o *hole drilling*, siguiendo la norma ASTM E837-08 y empleando la máquina RESTAN 182 del año 2016 y marca SINT technology. El software usado para el procesamiento los datos es Residual Stress Measurement System 6.3.9 (Figura 47).

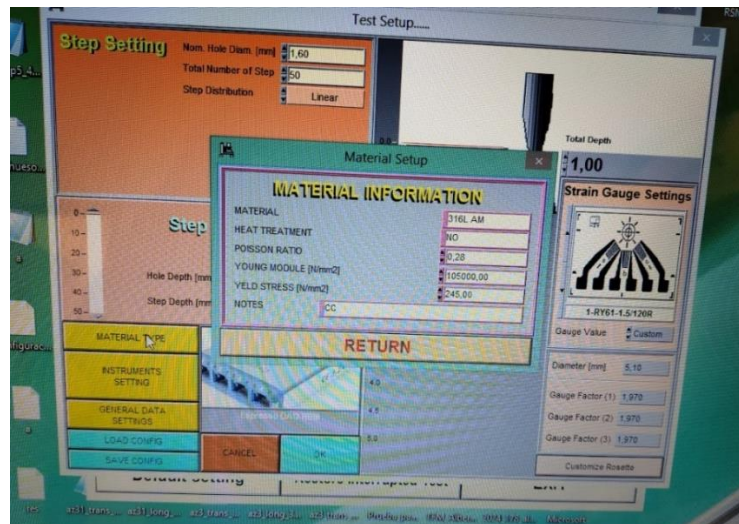


Figura 47: Interfaz del software Residual Stress Measurement Systema 6.3.9

Este ensayo requiere de una galga extensiométrica y de un taladro de avance incremental, incorporado en la máquina (Figura 48). El método consiste en que una vez el taladro alcance la cota de paso definida por el ensayo (en este caso $20\ \mu\text{m}$), se para y se miden las tensiones liberadas a través de la deformación de tres galgas dispuestas a 45° una de otra. Esta disposición permite la medida de la tensión en todas las direcciones del plano. Además de la deformación, al final del ensayo se mide también la excentricidad final del agujero del taladro para corregir posibles desviaciones y dar un resultado aún más preciso.

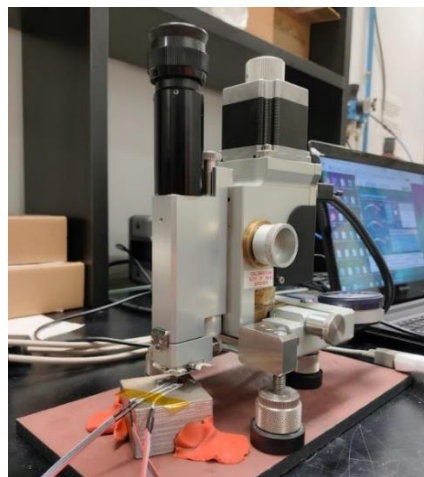


Figura 48: Máquina RESTAN 182 y galgas extensiométricas sobre pieza a ensayar

Este ensayo, por el empleo de galgas, requiere de una preparación superficial muy exhaustiva que consta de cinco pasos. El primero pasa por una limpieza superficial con alcohol y secado con aire comprimido, para la posterior aplicación del acondicionador (M-PREP Conditioner

A), que realiza una limpieza más precisa. Para que la composición del acondicionador no interfiera en el ensayo, se hace uso de un neutralizador (M-PREP Neutralizer 5A). Para acelerar el curado del pegamento se aplica un catalizador (200 Catalyst) y finalmente el pegamento (M-BOND 200 Adhesive). Todos los productos son del catálogo de Micro Measurements de la marca VPG (Figura 49).



Figura 49: Productos necesarios para la correcta preparación superficial de la muestra a ensayar

El ensayo se ha realizado tanto en tochos fabricados por DED tratados por LSP y sin tratar, para, como se ha comentado al inicio del apartado, medir el cambio que produce el proceso comparando ambos resultados y las tensiones previas derivadas del método.

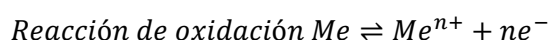
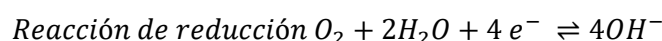
2.3.6. Ensayo de Polarización Lineal Directa (PLD)

A pesar de que el acero AISI 316L laminado sea inoxidable, también es especialmente sensible a la corrosión en ambientes con presencia de cloruros en condiciones aireadas, produciendo en ellos un fuerte picado [57]. Para comprobar si tras el proceso de FA y posterior tratado por LSP sus propiedades frente a la oxidación se conservan, se ha decidido poner al material en esta situación y medir su comportamiento. El software utilizado para manejar los datos es NOVA 1.10.1.9, y el modelo que permite realizar el ensayo potenciodinámico, creando una diferencia de potencial electroquímico entre los electrodos escogidos y siguiendo la norma ASTM G15, es el potenciostato Metrohm Autola PGSTAT 302N.



Figura 50: Celda electroquímica de las instalaciones del CLUPM.

La celda electroquímica disponible en el Centro Láser UPM (Figura 50) permite poner en contacto una pequeña parte de la superficie del material a caracterizar (electrodo de trabajo) con una solución de interés. En este caso al ser especialmente interesante el comportamiento del acero en ambientes con presencia de cloruros, el electrolito es una solución NaCl 0,5M en H₂O destilada. El electrodo de referencia frente al que se mide la diferencia de potencial y por el que no circula corriente es un electrodo de cloruro de plata, conectado al cable azul en la Figura 50. Para cerrar el circuito se hace uso también de un contraelectrodo, conectado al cable negro en la Figura 50. Su presencia no debe influir en el proceso, por lo que para el caso de estudio se escoge un electrodo de acero 316L, siendo el material más inerte disponible. Las reacciones de reducción (catódica) y de oxidación (anódica) son:



El ensayo se ha realizado tanto en probetas tratadas por LSP, como en DED, como en acero laminado. De esta forma se puede relacionar, como se ha dicho antes, la influencia del proceso con la capacidad inoxidable del material.

2.3.7. Ensayo de dureza Vickers

De cara a medir la dureza del material existen distintos ensayos en función de la forma y material del penetrador estático utilizado. Para este proyecto se ha usado el ensayo Vickers, realizado por el durómetro MXT30 y siguiendo la norma ASTM 384-17. El procedimiento es similar a otros ensayos de dureza. El penetrador de diamante, con forma de pirámide recta de base cuadrada cuyas caras opuestas forman un ángulo de 136° [55], es introducido en el material con una carga de 200 gramos. Una vez la carga deja de ser aplicada, se mide la huella obtenida, en concreto las dos diagonales correspondientes a las aristas de la pirámide. Aplicando la siguiente fórmula se obtiene el valor de la dureza en HV.

$$HV = 2 * \sin(68^\circ) * \frac{P}{d} = 1,854 * \frac{P}{d^2}$$

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. Caracterización microestructural

Una vez realizados todos los ensayos, llega el momento de exponer y analizar los resultados. En primer lugar, se presentan los datos obtenidos tras el estudio microestructural, ya que conocer cómo es la interacción entre capas o las discontinuidades que presenta el material puede ser de gran ayuda de cara a interpretar resultados de comportamiento en servicio, simulados por el resto de los ensayos.

3.1.1. Micrografía óptica

La probeta de tipo transversal de la Figura 38 está compuesta por un total de 78 capas. Estas han sido analizadas y cuantificadas haciendo uso del software Motic Images Plus 3.0. Para ello, de cada fotografía tomada con la lupa, se ha extraído cada capa y tomado cuatro medidas: espesor de la capa por el centro (D2), espesor de la capa en su extremo izquierdo (L2), espesor de la capa en su extremo derecho (L1) y espesor de la probeta (D1). Esta última permite poner el resto de las medidas a escala, ya que el espesor se considera constante e igual a 3 mm, por no depender este del proceso de fabricación, sino del diseño de la probeta, que a su vez va marcado por la norma ASTM E8.

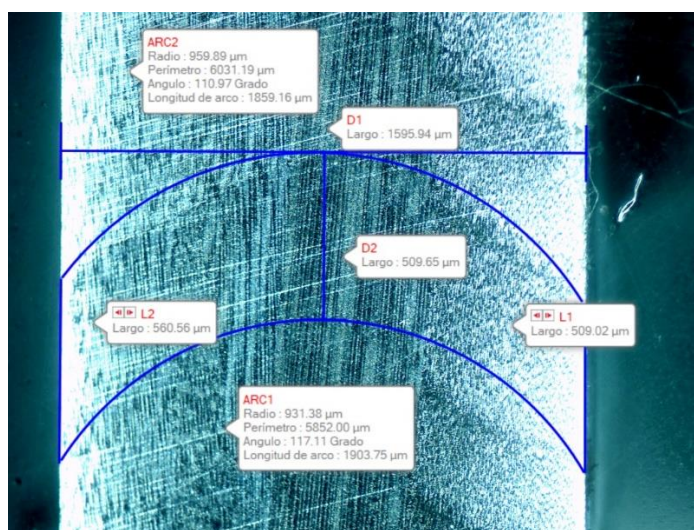


Figura 51: Medidas de espesor de la capa CI-11

3.1. Caracterización microestructural

Se dibujan también dos arcos en la parte superior e inferior de la capa con el objetivo de ayudar a la toma de medidas, marcando así los límites de cota (Figura 51). Una vez anotadas las tres medidas a escala real, que a partir de ahora serán referidas como *espesor centro*, *espesor izquierda* y *espesor derecha*, se ha efectuado una media aritmética entre ellas, referida como *espesor medio* y que se toma como el espesor de la capa.

Dividiendo las 78 capas contabilizadas entre la longitud total de la probeta (96 mm), se obtiene un espesor medio de 1,23 mm por capa, frente a los 0,87 mm obtenidos de media por el método experimental. Esto se debe principalmente a que la primera capa no aparece hasta 16,25 mm después de la base. Este espesor de soporte sobre el que se depositan las capas de metal fundido se puede apreciar tras el ataque químico tanto en la probeta A1 como en la A2 (Figura 52). Tras el ataque electrolytico se puede ver que la zona previamente especular en realidad es donde se depositan las primeras capas de FA (Figura 53).



Figura 52: Probeta A1 y A2 tras el ataque químico

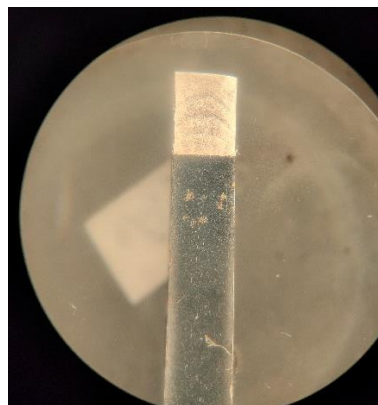


Figura 53: Probeta A1 tras el ataque electrolytico y examinada con lupa

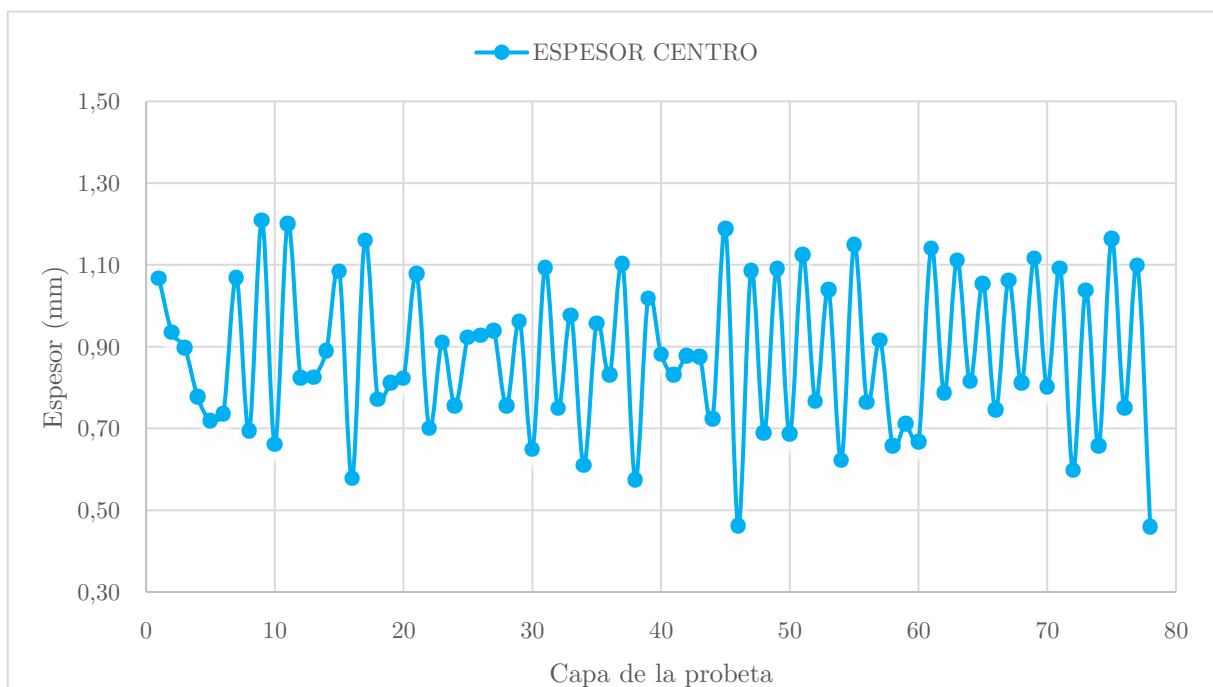
Restando a la probeta inicial los 16,25 mm de soporte se obtiene un espesor de capa medio de 1,02 mm, mucho más próximo a lo que sucede realmente, obteniendo un error final del 17% frente al 40% previo (Tabla 7). Para la realización de estos cálculos se ha seguido la fórmula que aparece a continuación.

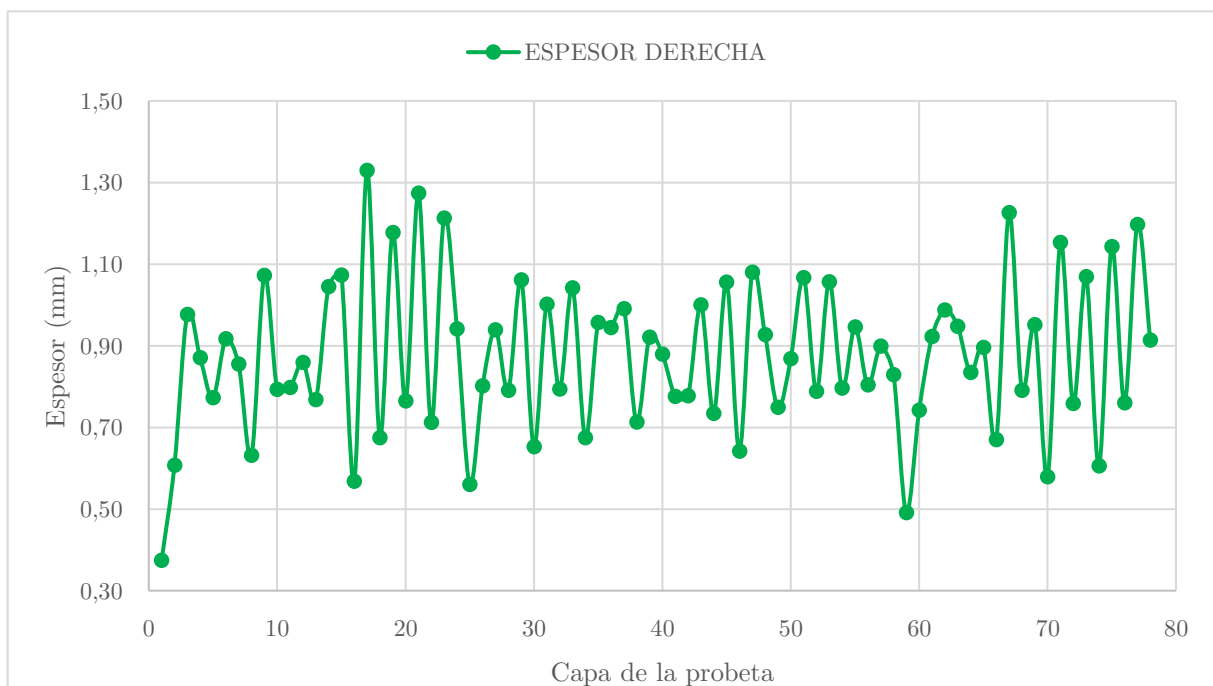
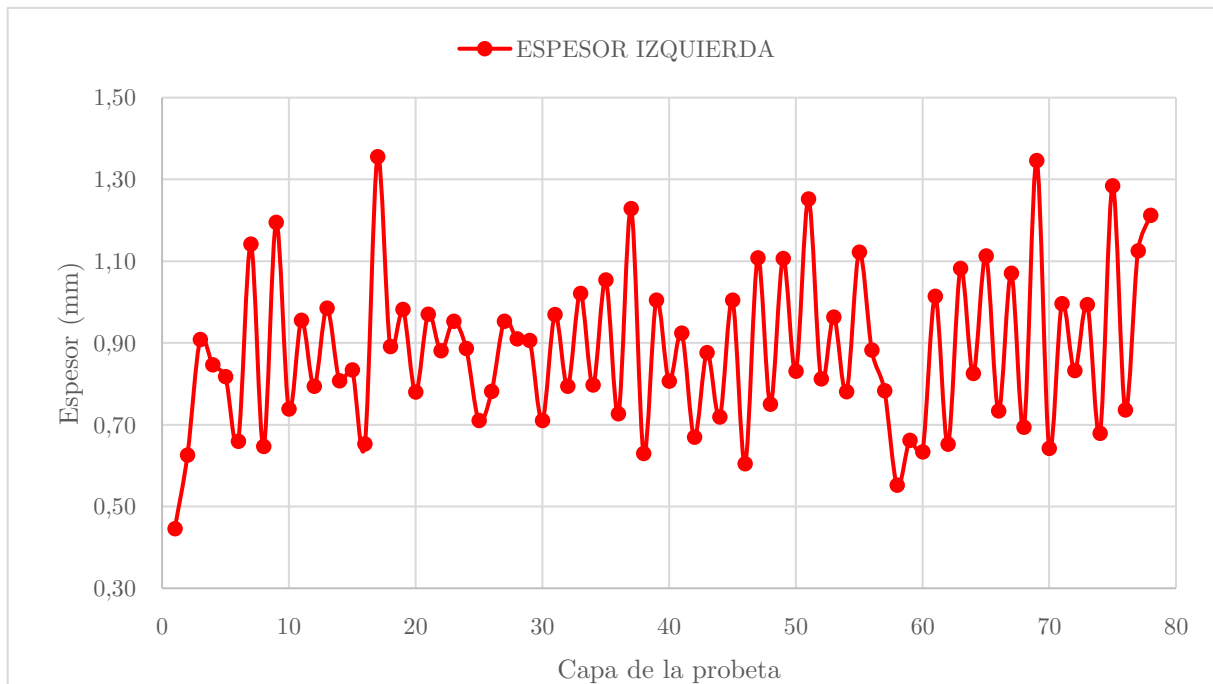
$$\%Error = \frac{|V_{real} - V_{teórico}|}{V_{real}} * 100$$

		ESPESOR CENTRO	ESPESOR IZQUIERDA	ESPESOR DERECHA	ESPESOR MEDIO
Media total (mm)		0,87653	0,88196	0,87466	0,87772
Error medio	Real	0,14%	0,48%	0,35%	-
	Teórico con soporte	40,41%	39,55%	40,71%	40,22%
	Teórico sin soporte	16,65%	15,93%	16,89%	16,49%

Tabla 7: Medida espesor medio por zonas y porcentajes de error real y teórico

La Figura 54 muestra el espesor de la capa en función de su altura. La tendencia general como se puede observar es alterna. Si n es menor que la media general, $n+1$ tendrá un espesor mayor que la media, y así sucesivamente. Los espesores centrales, izquierdos y derechos siguen la misma tendencia, siendo las zonas de la derecha las que tienen un comportamiento más similar, frente a las zonas centrales. En el Anexo C se encuentra una tabla con todas las medidas tomadas en la que se puede apreciar de forma más exacta la tendencia de la probeta.





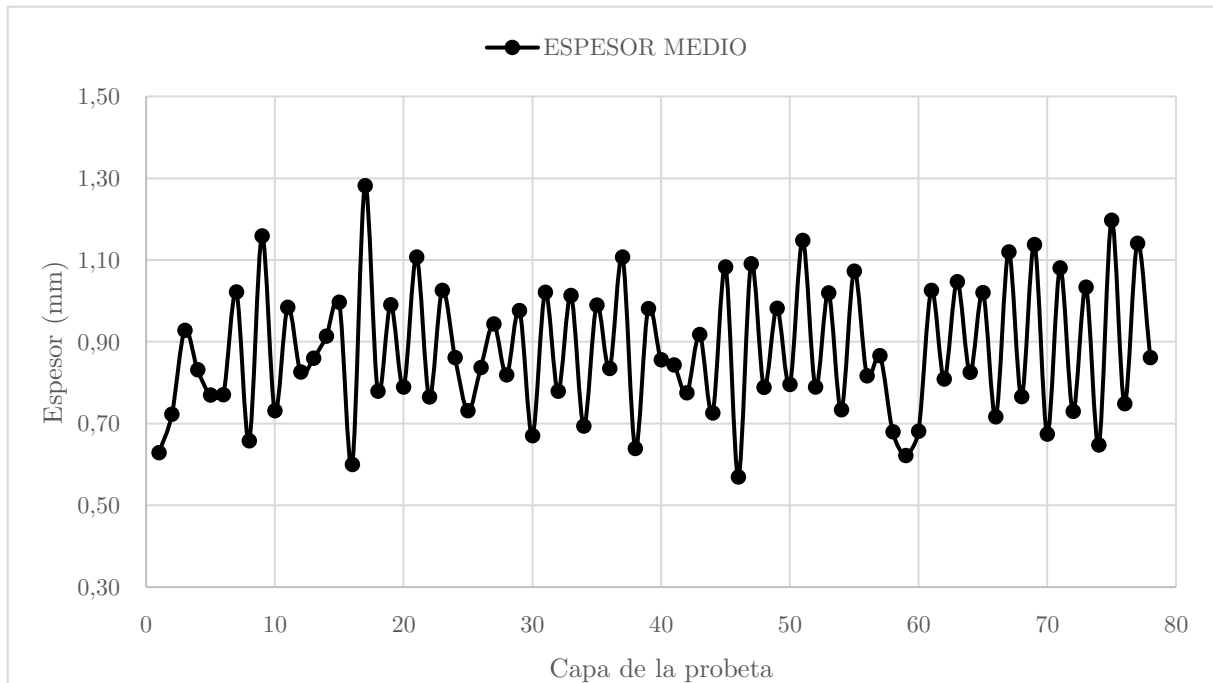


Figura 54: Espesor de las capas en función de su altura

En cuanto a la forma de la capa, esta tiene forma semielíptica, que recuerda al perfil de los cordones de soldadura. En la Figura 55 encontramos un corte de un cordón de soldadura por fusión con material de aporte, si se compara con la Figura 56 obtenida por DED se deduce que, si la estructura es similar, es porque la evacuación de calor sigue la misma tendencia, que se puede encontrar en la Figura 57. También se pueden apreciar macroscópicamente zonas entre capa y capa en la que la estructura presenta pequeñas discontinuidades. Estas zonas más oscuras son zonas afectadas térmicamente (ZAT) y son muy finas en comparación con una soldadura habitual. Se producen cuando una capa de material $n+1$ es depositada encima de la capa de material n .

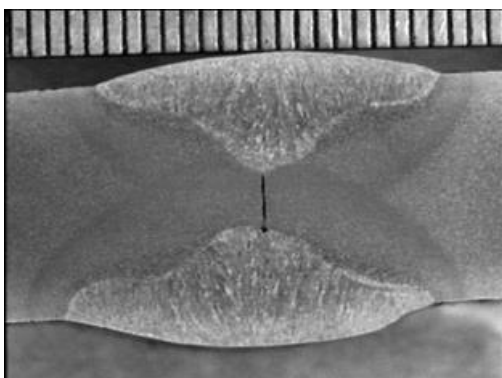


Figura 55: Corte y metalografía de soldadura [64]

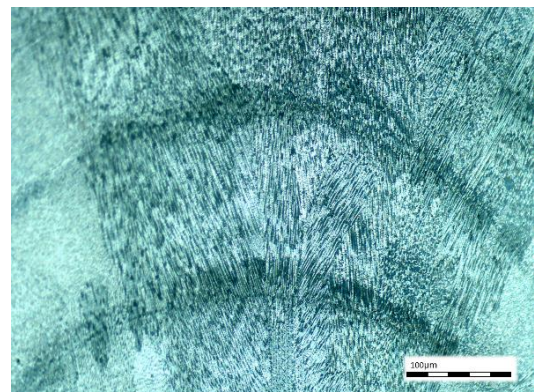


Figura 56: Metalografía de la capa 3 de la probeta A1

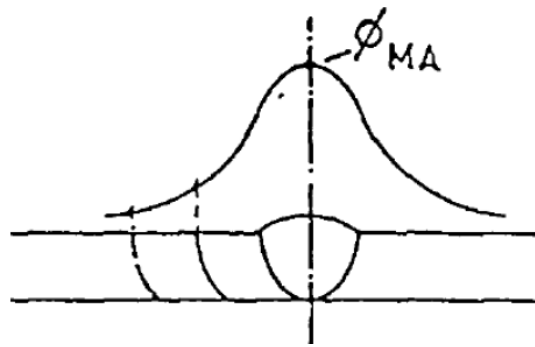
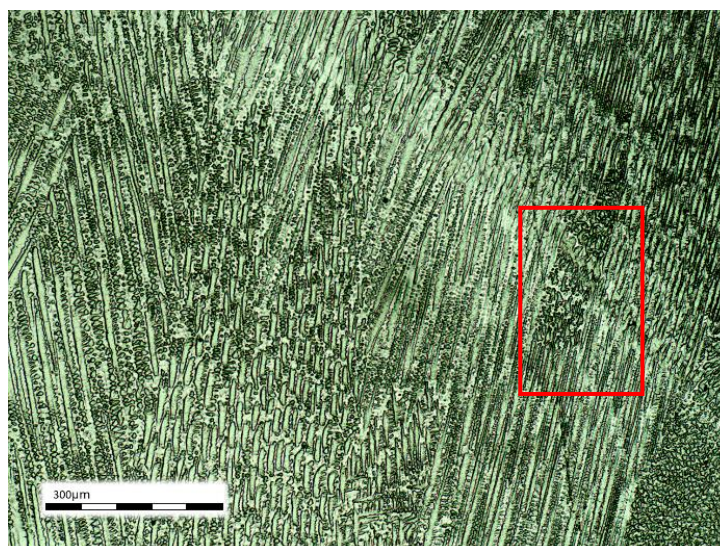
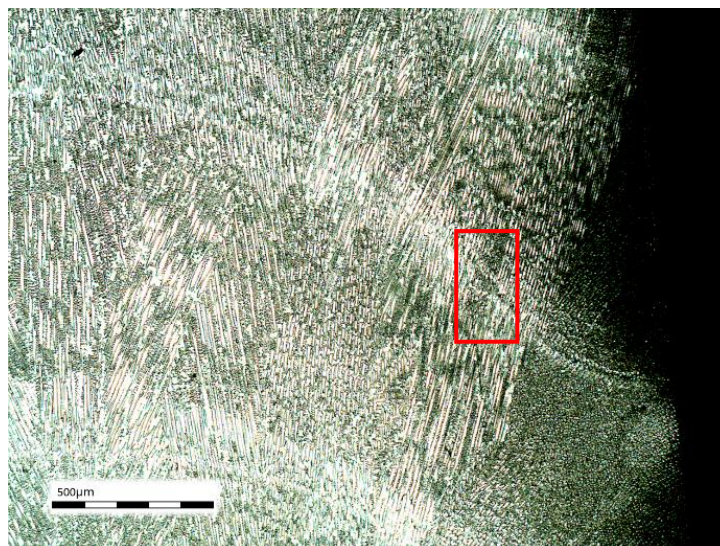


Figura 57: Distribución de temperaturas en un cordón de soldadura

En la Figura 58 se puede apreciar un mayor aumento de la capa 3 usando hasta el objetivo 20 del microscopio óptico Olympus PMG3. Se puede ver que esta discontinuidad tan distinguible en primera instancia entre las dos capas, a pequeños aumentos en realidad es mínima. El hecho de continuar con la direccionalidad de los granos y microestructura entre capas, a pesar de realizarse en dos instantes de tiempo diferentes, favorece la unión entre pasadas y por tanto el comportamiento mecánico del material [30].



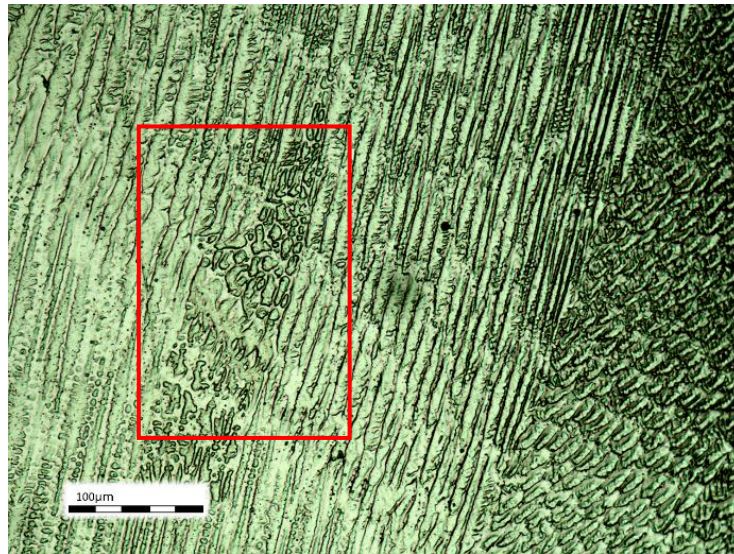


Figura 58: Fotografía del extremo derecho de la capa 3 (Probeta A1) x25, x50 y x100 respectivamente

Observando el resto de la probeta se puede apreciar cómo la direccionalidad del crecimiento de grano se mantiene. Aun así, también se ve una orientación de las dendritas en las capas inferiores según un gradiente térmico gaussiano, como el visto en la Figura 57, favorecido a su vez por la presencia del sustrato, que se encuentra a temperatura ambiente. A medida que se añaden capas, esta estabilidad que provoca el sustrato durante el enfriamiento se va perdiendo, y el flujo de calor en la capa $n+1$ se produce por conducción a través de la capa n , generando una orientación dendrítica totalmente perpendicular a la dirección de deposición y paralela a la dirección de propagación del haz láser (Figura 59) en las últimas capas. Esto se debe al crecimiento dendrítico en dirección del máximo gradiente térmico [26], más paralelo al haz láser a medida que aumenta la altura y la capa se aleja del sustrato.

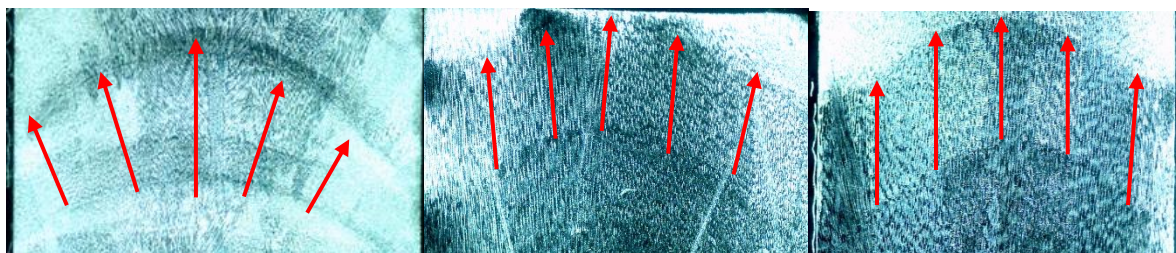


Figura 59: Capa 2(A1), 18(A3) y 78(B1) respectivamente

Este cambio de direccionalidad de gradiente térmico se relaciona a su vez con la velocidad de enfriamiento de cada capa, que influirá también en la microestructura y composición obtenida. En la Figura 60 se puede ver cómo a mayores gradientes, asociados a la proximidad del sustrato, los granos tendrán una morfología más celular, frente a la estructura columnar dendrítica propia de los menores gradientes.

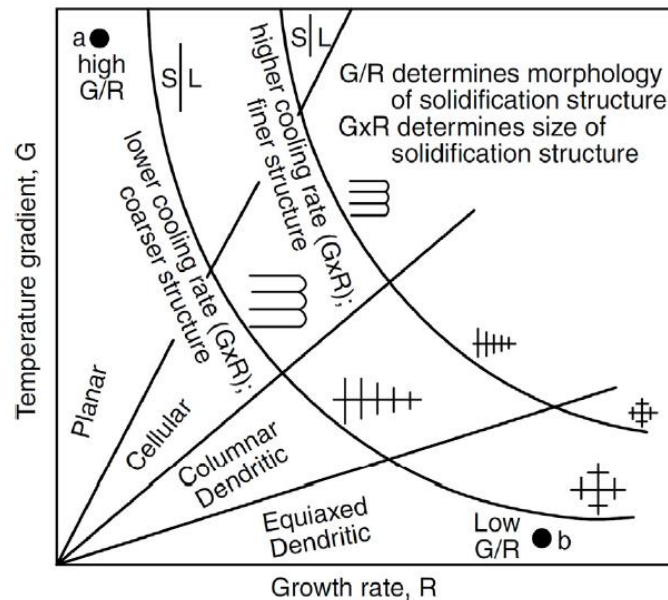


Figura 60: Efecto del gradiente de temperatura (G) y la tasa de crecimiento de grano (R) sobre la morfología y el tamaño de la microestructura obtenida en la solidificación [65]

En cuanto a la composición, tal y como se comentó en el apartado 2.2, la velocidad de enfriamiento determina también el porcentaje de $Fe\delta$ obtenido, siendo la cantidad retenida menor a menores velocidades. Combinando ambos razonamientos, se concluye que en las capas inferiores se obtendrá una microestructura dendrítica celular con un porcentaje de $Fe\delta$ mayor que en capas superiores. A mayores alturas, donde el calor se escapa solo direccionalmente y hay una gran influencia térmica de las capas inferiores, ocurre justo lo contrario. La microestructura obtenida tendrá un porcentaje de $Fe\delta$ menor que en zonas más cercanas al sustrato, presentando además una morfología columnar dendrítica.

En la Figura 61 se puede observar cómo se cumple esta explicación. Mientras que en la Figura 61 (a), microestructura perteneciente a la primera capa depositada, se aprecia una estructura claramente delimitada que recuerda a una célula (dendritas celulares), cuyo borde de grano aparece oscurecido ocupando casi la totalidad de la superficie y dejando por tanto poco espacio para la matriz que rodea estos granos y presenta un color más claro, en la Figura 61 (b) se ve justo lo contrario. La imagen, perteneciente a la capa 58 de 78, muestra una morfología claramente columnar, dificultando incluso la diferenciación entre la fase dispersa y matriz, ya que visualmente no se puede percibir el final de la estructura dendrítica y solo les distingue la intensidad cromatográfica que presentan.

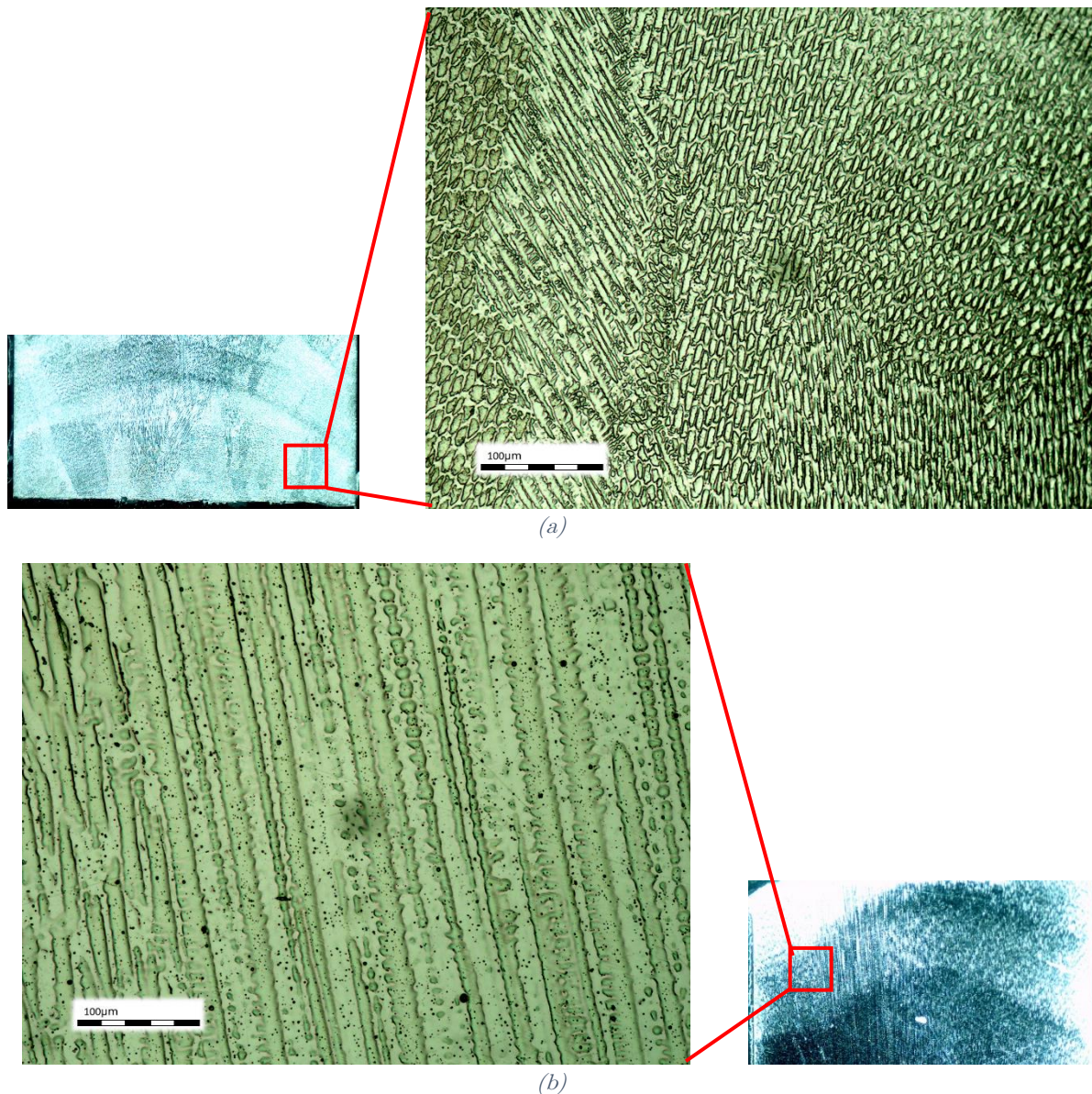


Figura 61: Estructura dendrítica celular en la capa 1 (A1), frente a (b) Estructura dendrítica columnar en la capa 58 (B3)

3.1.2. Micrografía electrónica de barrido

La observación con el microscopio óptico permitió también la detección de pequeñas heterogeneidades con respecto al resto de la microestructura esparcidas por la matriz, y en mayor densidad a medida que se aumenta en altura por la probeta. Estas esferas de color oscuro que se pueden ver también en la Figura 61 (b) se analizan con el SEM/EDX para poder obtener su composición. En concreto se realizaron un total de 20 medidas, 11 en la probeta A3 y 9 en la probeta C1. Con el fin de poder analizar si las manchas visibles eran poros o algún otro tipo de inclusión, primero se analizaba la composición de una zona cualquiera de la probeta que pareciera material base, y posteriormente se estudiaba la composición del posible poro. Así, de estas 20 medidas, 9 son de caracterización del material base y 11 de estudio de heterogeneidad, resultando en un 55% de las ocasiones poro y en el otro 45% inclusiones. Las inclusiones se deben a un mal control en la atmósfera de fabricación, caracterizada por el uso de N_2 como gas protector, cuyo principal objetivo es reducir al máximo el contenido de oxígeno

3.1. Caracterización microestructural

residual. Por su parte la porosidad en la probeta se debe a las altas velocidades de enfriamiento, que favorecen la creación de bolsas de gas a las que les resulta imposible difundirse por estar rodeadas de sólido, y al propio mecanismo de difusión de la $Fe\delta$ en estado sólido.

Un ejemplo de cómo se han tomado estas medidas se puede ver en la Figura 62. Para esta sección de la probeta A3 se han cogido cinco muestras, dos correspondientes al material base (5 y 6) y tres para el estudio de posibles discontinuidades (7, 8 y 9). Los resultados de composición en porcentaje en peso dados por el SEM/EDX se muestran en la Tabla 8.

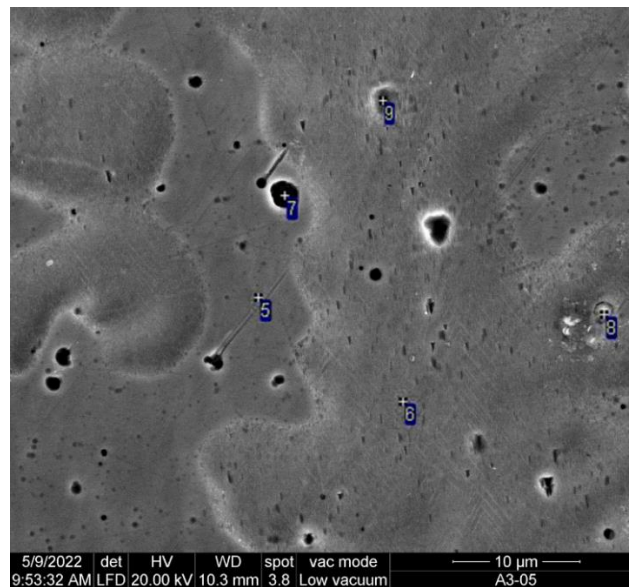


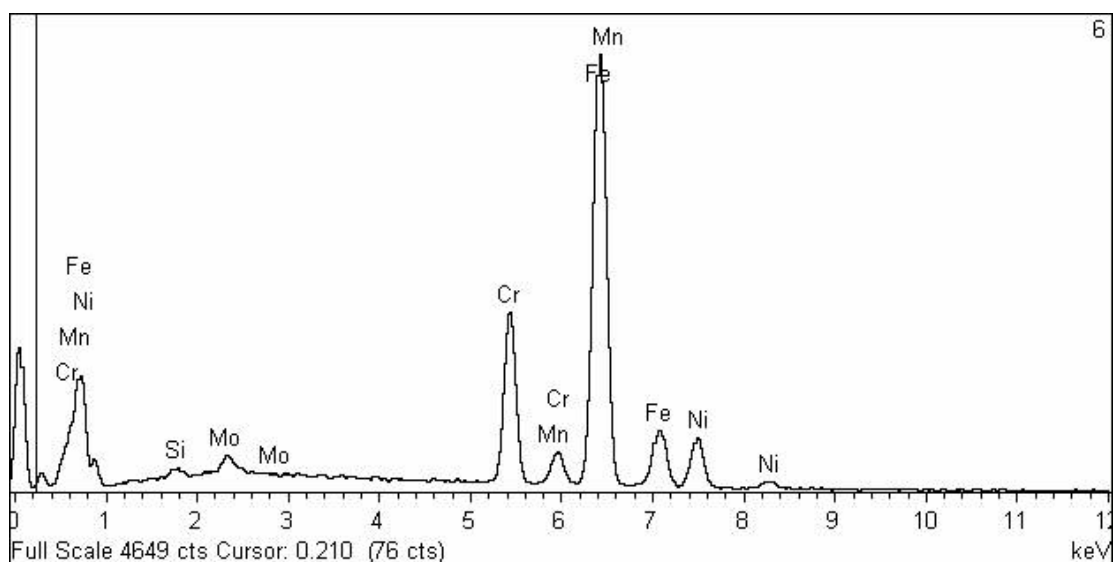
Figura 62: Imagen SEM de una sección de la probeta A3 indicando las medidas tomadas

	PESO (%)					
	AISI 316L	MEDIDA 5	MEDIDA 6	MEDIDA 7	MEDIDA 8	MEDIDA 9
Si K	0,2	0,71	0,53	3,95	2,98	0,40
Cr K	17,5	18,35	17,05	17,05	16,26	17,24
Mn K	1,5	1,70	1,64	1,95	4,05	1,37
Fe K	66,58	63,07	66,45	58,25	56,39	67,26
Ni K	12	12,89	12,27	11,22	11,11	11,71
Mo K	2,2	3,28	2,05	2,25	2,53	2,02
O K	-	-	-	5,33	5,81	-
Co K	-	-	-	-	0,86	-

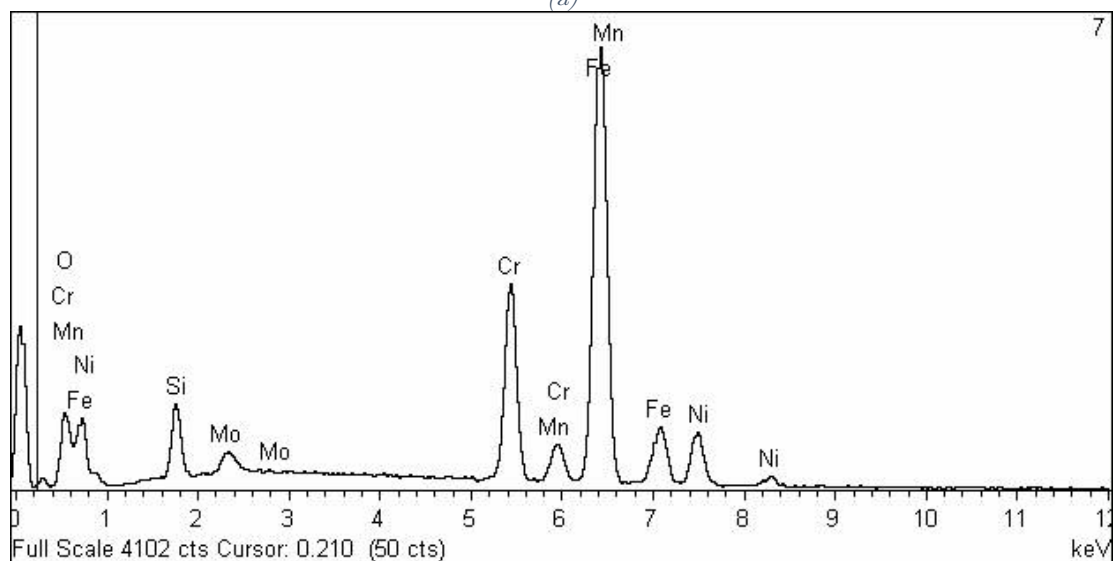
Tabla 8: Resultados de composición dados por el SEM/EDX para las distintas medidas de la probeta A3 en comparación con la composición dada por el fabricante

De los resultados obtenidos se extraen dos conclusiones principales. La primera es que el material no tiene una composición uniforme, independientemente del número de

heterogeneidades. Las dos medidas de material base (5 y 6) a pesar de ser similares, no son idénticas, que es lo que cabría esperar idealmente del material. Esto se ve reflejado principalmente en la variación en el porcentaje en peso del Fe, Cr y Mo. En la Figura 63 se muestran espectros de SEM/EDX generados para las muestras 6, 7 y 9, que no se superponen para facilitar su lectura. El espectro facilita la comparación de las muestras, que posibilita llegar a la conclusión de que la muestra 9 es un poro, ya que tiene una curva idéntica a la muestra 6. Por su parte la muestra 7 da un pico más alto en el indicador de Si, además de incluir una nueva tendencia a la izquierda del espectro en forma de “M”, donde aparece el indicador de O y disminuyen los correspondientes a Fe y Ni. Todo ello indica que la muestra 7 se trata de una inclusión, sin embargo, en los compuestos más pesados (Cr, Cr Mn, Mn Fe, Fe y Ni) se mantiene la tendencia. Este hecho permite concluir que a pesar de no ser deseables este tipo de discontinuidades en la matriz, son mínimas y difícilmente evitables con la tecnología disponible (se recuerda que se ha hecho uso de N₂ como gas protector).



(a)



(b)

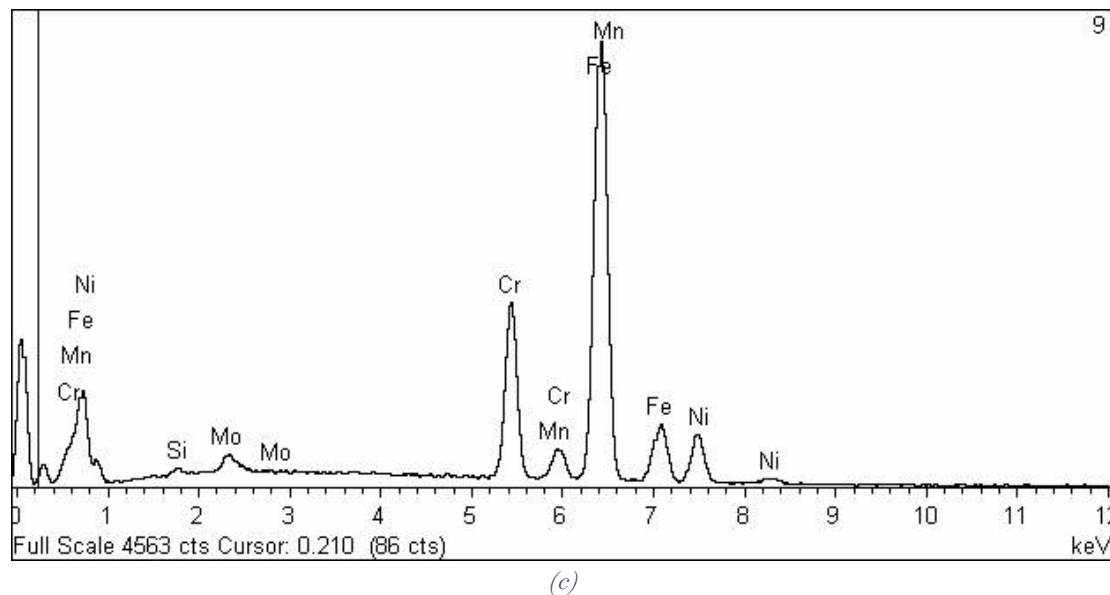
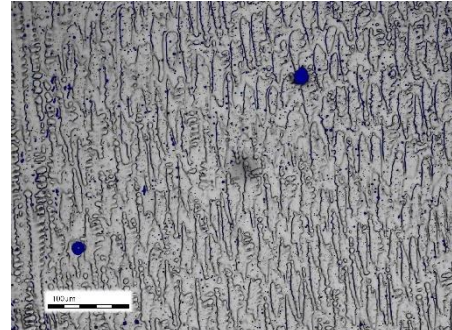
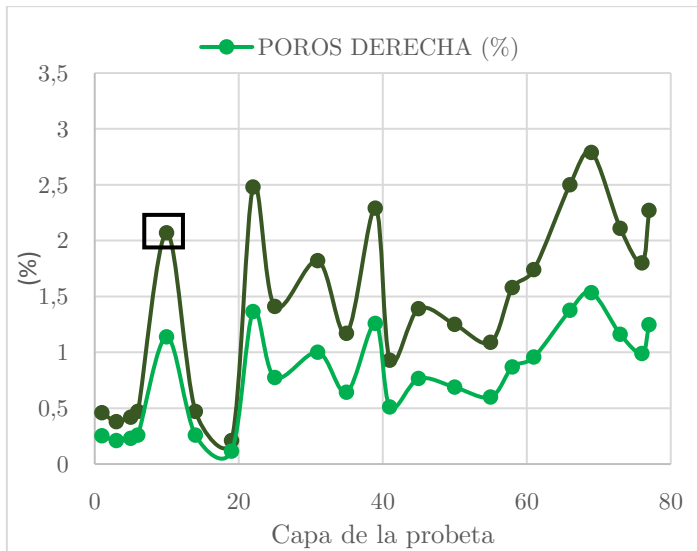
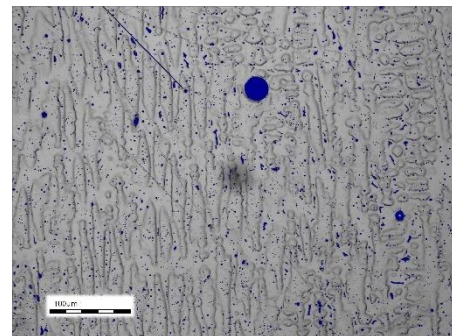
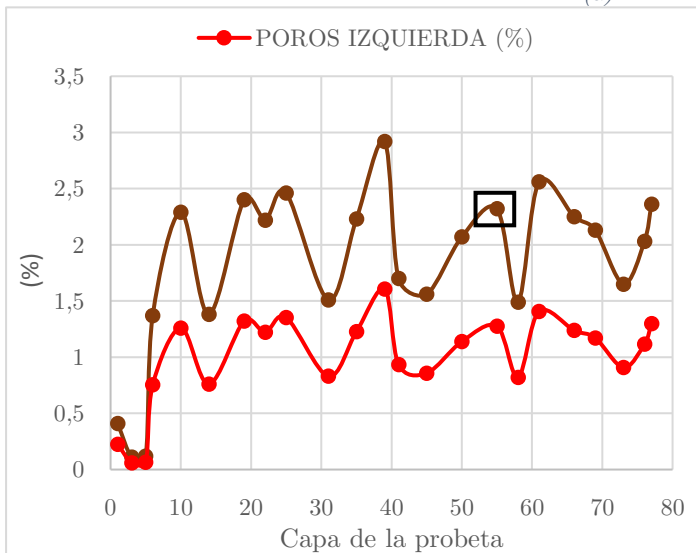


Figura 63: Espectros SEM/EDX para las muestras 6 (a), 7 (b) y 9 (c) siendo respectivamente material base, inclusión y poro

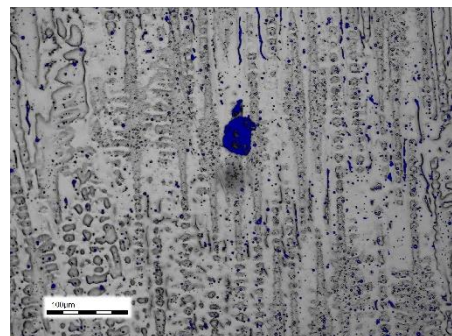
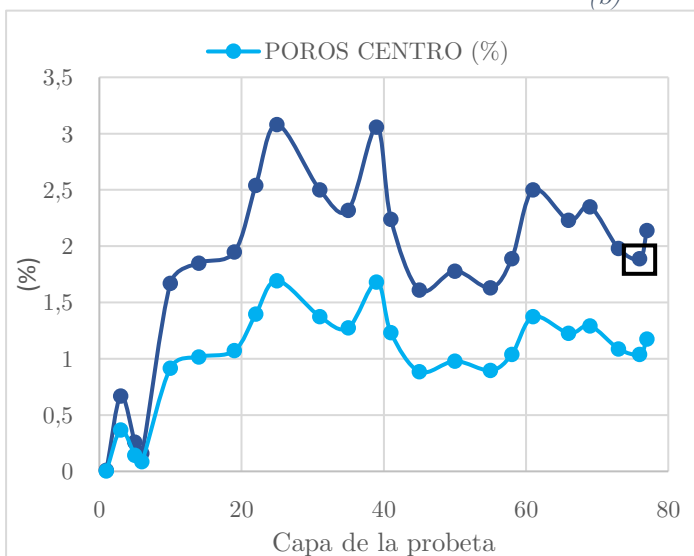
La conclusión obtenida para las inclusiones no es extrapolable a los poros, ya que un mayor control térmico permitiría su disminución. Además, en la Figura 62 se pueden percibir zonas con la misma tonalidad que la muestra 9, que analizadas resultan ser microporosidades. Este hecho ha llevado a buscar una manera de poder estimar de forma económica el porcentaje de porosidad de la probeta. En la Figura 64 vemos a la izquierda tres gráficas que representan, separadas por zonas: centro (a), izquierda (b) y derecha (c), esto mismo. Un primer porcentaje de estimación de la heterogeneidad (tonalidad oscura de las gráficas) se logra mediante el tratamiento de la imagen con el software *Perfect image ~ Claravision*, que colorea en azul las zonas más oscuras de la fotografía (derecha de la Figura 64). Tras la corrección de este resultado con un factor de 0.55, por haber hallado poros en un 55% de las muestras estudiadas, se obtiene el porcentaje de porosidad (izquierda de la Figura 64). Se puede observar como en las zonas más cercanas al sustrato, donde la velocidad de enfriamiento es más rápida y hay menor difusión, el porcentaje de poros es menor. Los polvos metálicos en esta zona solidifican a mayor velocidad, sin embargo, no se ven sometidos a tantos ciclos térmicos como en las capas superiores. En el Anexo E se pueden encontrar todas las fotografías tomadas, tanto de la microestructura como de los poros, ordenadas por filas y objetivo usado.



(a)



(b)



(c)

Figura 64: Porcentaje de porosidad en la muestra frente a la altura con detalle de las discontinuidades coloreadas en la zona derecha de la capa 10 (a), zona izquierda de la capa 55 (b) y zona central de la capa 76 (c)

De media se obtiene un 0.93% de porosidad (Figura 65), muy cercano al 1% indicado por Etxetar tras un ensayo de densidad siguiendo el principio de Arquímedes. Sin embargo, más allá de la conclusión obtenida para la porosidad en las primeras capas, no se puede extraer una tendencia clara para cotas más elevadas, siendo la porosidad, al igual que las discontinuidades, altamente variables.

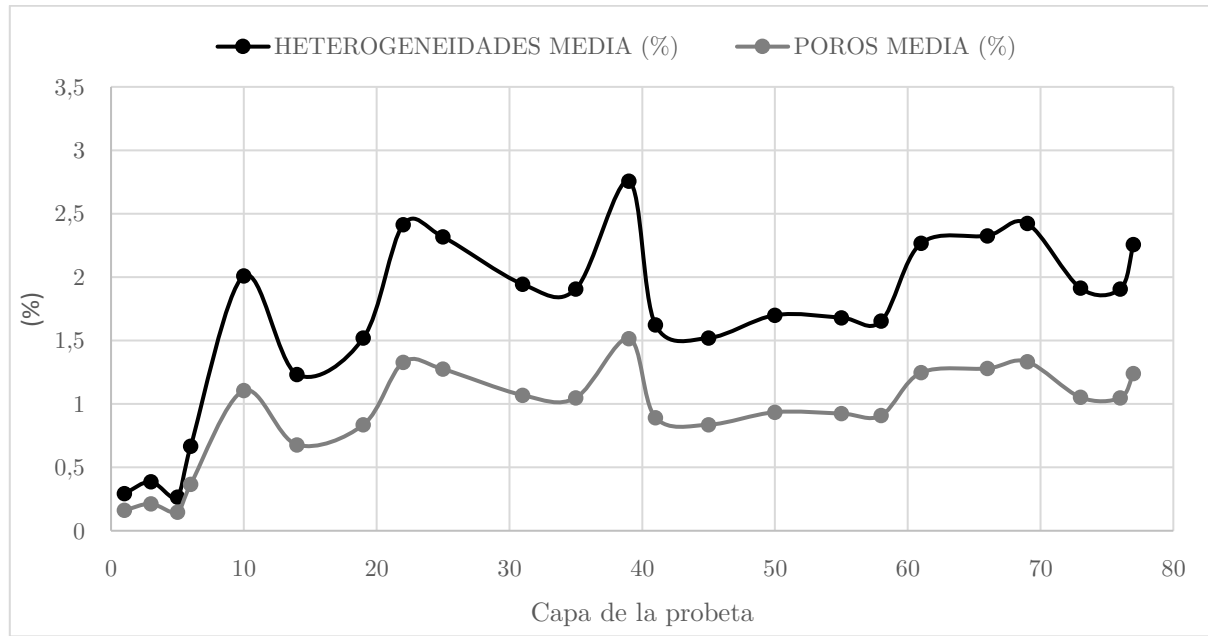


Figura 65: Porcentaje de heterogeneidades (oscuro) y porosidad (claro) medio por capas

3.2. Ensayos de fatiga

El mecanismo que lleva a un material a la rotura por fatiga es la iniciación y propagación de grietas bajo el efecto de cargas cíclicas, que van reduciendo la sección resistente de la pieza sin poder apreciar su efecto externamente, hasta que termina por romperse. La carga a la que se produce el fallo es significativamente menor a la carga de rotura en condiciones estáticas, debido a este avance gradual de la grieta en cada ciclo de carga y descarga donde se producen deformaciones tanto plásticas como elásticas. Este desarrollo escalonado se puede ver esquematizado en la Figura 66, donde (a) representa la situación al inicio del ciclo de tensión, y (d) el inicio de la descarga. La disminución de la carga de rotura, unida a que no puede predecirse cuándo ocurrirá esta, hace que los ensayos de fatiga sean imprescindibles para conocer la carga a la que la probeta presenta vida infinita, es decir, aguante 10^7 ciclos sin fracturarse. De esta forma se podrá hacer una mejor selección del material y organizar de manera más eficiente la periodicidad de las inspecciones.

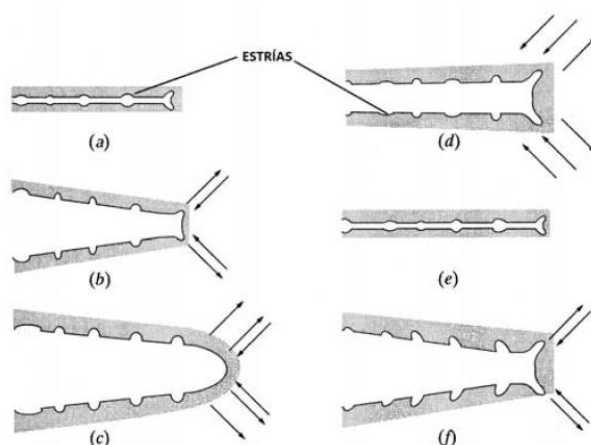


Figura 66: Mecanismo de propagación de grieta por fatiga [57]

Una manera de presentar los resultados obtenidos en el ensayo es mediante curvas S-N o de Wöhler, donde los ciclos se representan en escala logarítmica frente a la tensión máxima, o la amplitud de la tensión [57], siendo esta última la escogida para el análisis. Los datos obtenidos en el ensayo se muestran en la Tabla 9, y se pueden ver representados en la Figura 67.

ENSAYO DE FATIGA			
σ_a (MPa)	σ_{max} (MPa)	Ciclos probetas LONG	Ciclos probetas LONG LSP
100	222	6.000.000	-
110	244	10.000.000	-
120	267	1.300.000	858.662
130	289	283.397	660.382
150	333	199.288	267.411
200	444	51.609	44.387

Tabla 9: Resultados de los ensayos de fatiga

La Figura 67 muestra la curva S-N tanto de las probetas longitudinales sin tratar (verde) como de las tratadas con LSP (amarillo). Cabe indicar que finalmente se han realizado seis ensayos para la probeta sin tratar debido a que en el último ensayo planteado para las mismas ($\sigma_a = 100$ MPa) no se alcanzó vida infinita por fallos en el sistema eléctrico del CLUPM. Con el objetivo de no perder la oportunidad de ensayar amplitudes de carga más altas y así conseguir un ajuste más preciso, unido a la necesidad de repetir el montaje, se decidió someter a la probeta a una $\sigma_a = 110$ MPa, consiguiendo vida infinita. Este hecho se representa en la Figura 67 con una línea horizontal punteada, del mismo color que los puntos obtenidos del ensayo. La recta indica que con amplitudes de carga menores a 110MPa para las probetas sin tratar, no se espera rotura por fatiga.

3.2. Ensayos de fatiga

De la misma manera, al no disponer de probetas tratadas con LSP suficientes para ensayar a todas las σ_a deseadas, y sabiendo por estudios previos [5] [4] que a menores amplitudes de carga el efecto de LSP permite obtener mejores resultados, se ha estimado vida límite para $\sigma_a = 115$ MPa.

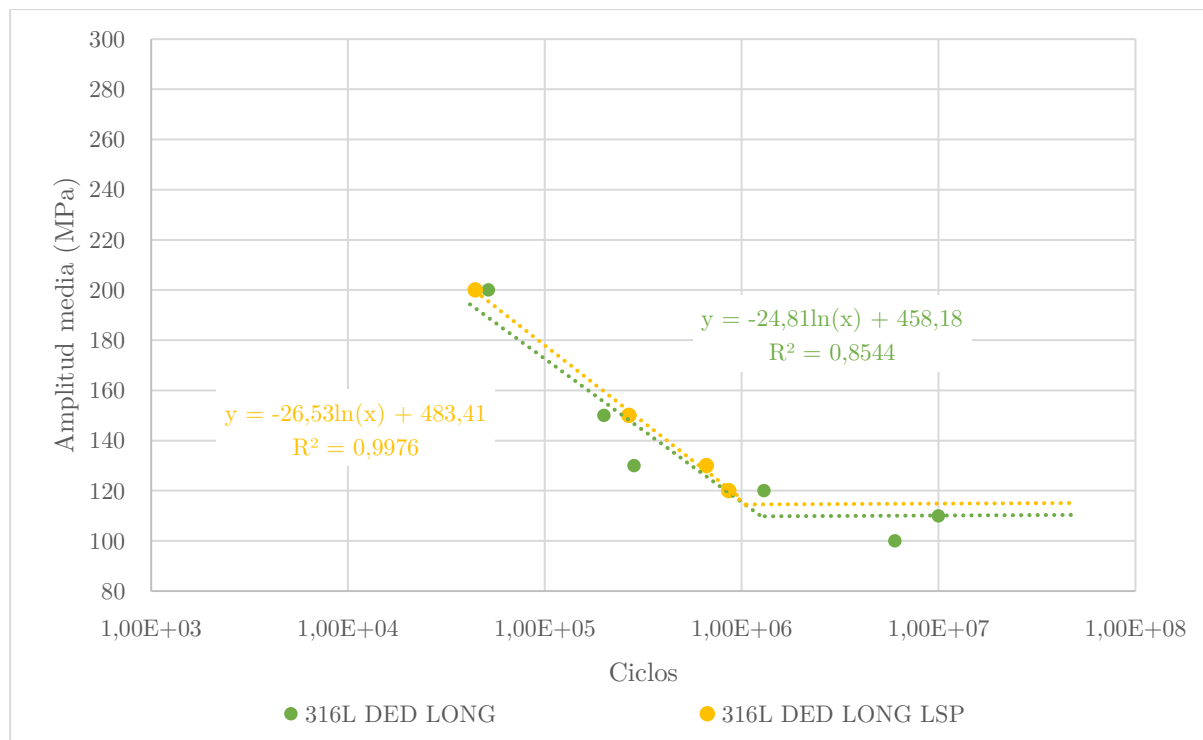


Figura 67: Curvas S-N para las probetas longitudinales de 316L fabricadas por DED sin tratar (verde) y tratadas con LSP (amarillo)

Tras la representación de los resultados, se puede observar que la vida en fatiga de las probetas tratadas por LSP es ligeramente superior que sin la realización de esta técnica. Hay dos puntos sin embargo que vistos individualmente pueden alterar esta conclusión, ya que a $\sigma_a = 120$ MPa y $\sigma_a = 200$ MPa, los puntos amarillos se encuentran más a la izquierda que los puntos verdes, lo que quiere decir que el material sin tratar tendría mejor comportamiento. Mientras que a altas cargas este resultado si es más común, dado que el efecto de las tensiones de compresión introducidas se pierde en pocos ciclos de tracción al tener estos gran amplitud [4], no ocurre lo mismo a bajas cargas. Es por esto por lo que prevalece la conclusión obtenida con el análisis de la línea de tendencia. Una forma de evitar esta incertidumbre en el estudio es la realización de un mayor número de medidas por carga (tres o más) y aumentar el número de tensiones a analizar. En este trabajo se ha visto limitada la profundidad de la investigación por el número de probetas disponibles.

Una vez analizado el material individualmente, es interesante ver la comparativa con los resultados obtenidos para probetas transversales [5] y el material base [4]. En la Figura 68 se puede ver el contraste de estas probetas sin tratamiento posterior, siendo destacable la superioridad en cuanto a comportamiento mecánico del material base (AISI 316L laminado –

azul oscuro), llegando a soportar hasta 60MPa más que las probetas transversales en vida infinita (azul claro).

También es reseñable que las probetas transversales soporten más ciclos que las probetas longitudinales (verde) cuando se someten a la misma tensión, pero sin embargo su vida infinita sea a una carga 10MPa menor. La conclusión a la que se llega es la misma que la comentada anteriormente, un mayor número de probetas con las que realizar el ensayo a distintas cargas habría permitido ajustar mejor la curva S-N y obtener un resultado más preciso, indicando muy probablemente que las probetas transversales tienen mejor comportamiento a fatiga.

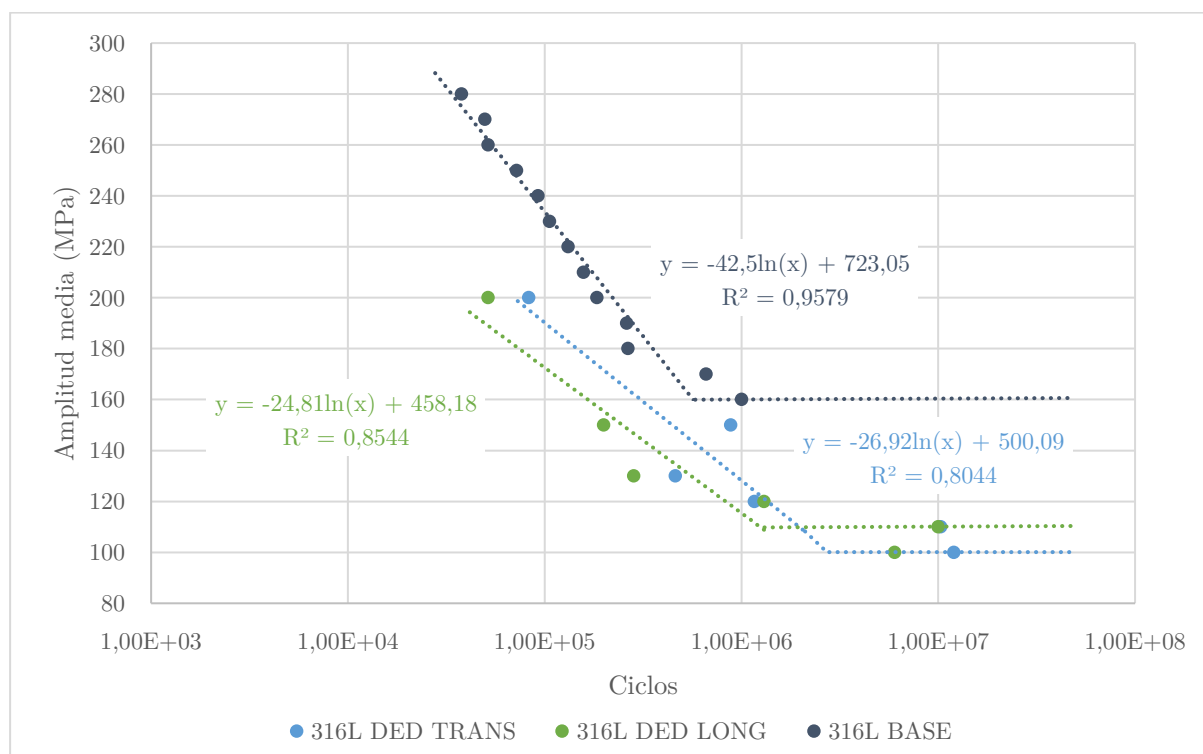


Figura 68: Curvas S-N para las probetas sin tratamiento LSP de 316L fabricado por DED en dirección transversal (azul claro), en dirección longitudinal (verde) y de 316L laminado (azul oscuro).

Por último, en la Figura 69, donde se comparan los mismos tres tipos de probetas pero esta vez con un tratamiento LSP, se puede apreciar un comportamiento muy similar al visto en la gráfica anterior. Sorprende que las cargas con las que se llega a alcanzar la vida infinita son mayores en los tres casos, destacando especialmente el material base, donde el tratamiento le hace aumentar su resistencia a fatiga hasta en 40MPa. También se confirma el mejor comportamiento de las probetas tratadas con LSP a medida que disminuyen las cargas, comentado anteriormente, ya que la línea de tendencia se desplaza más a la derecha a menores tensiones. Finalmente, en la Tabla 10 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

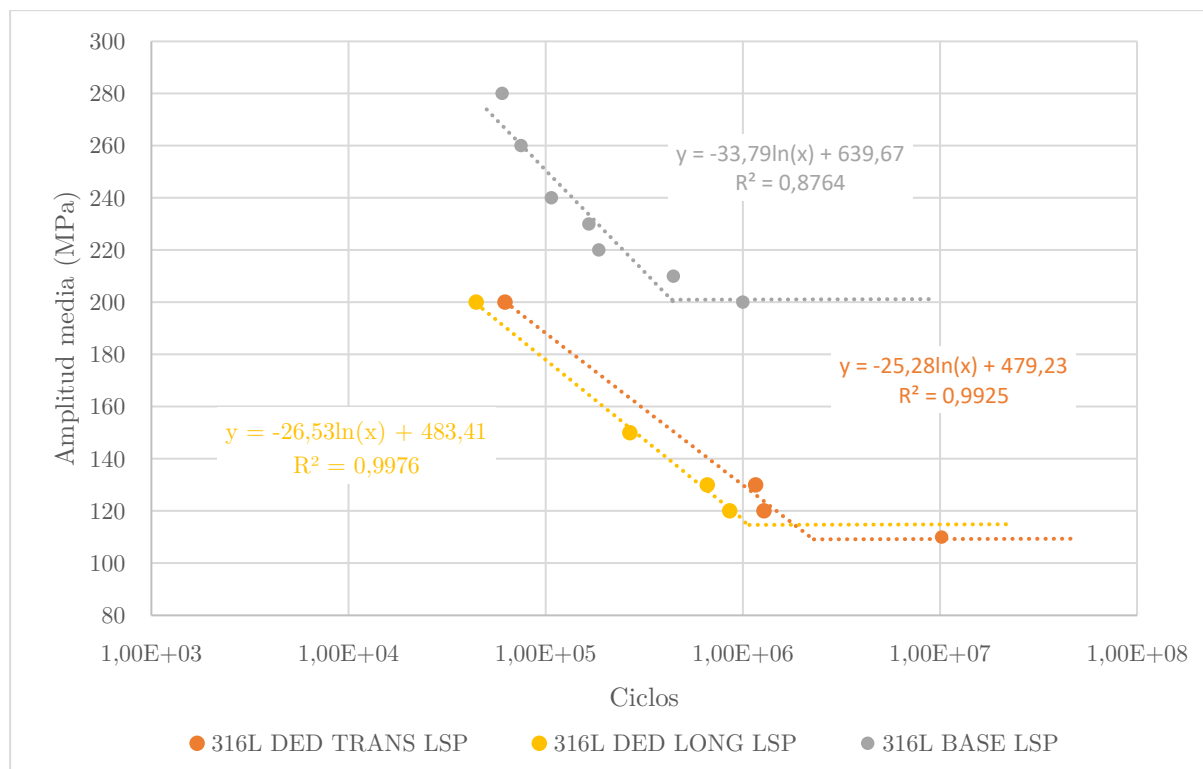


Figura 69: Curvas S-N para las probetas con tratamiento LSP de 316L fabricado por DED en dirección transversal (rojo), en dirección longitudinal (amarillo) y de 316L laminado (gris).

	σ_a (MPa) a la que se obtiene vida infinita	
	Sin tratamiento LSP	Con tratamiento LSP
316L base	160	200
316L DED transversal	100	110
316L DED longitudinal	110	115

Tabla 10: Tabla comparativa de la amplitud de carga con la que las diferentes técnicas de fabricación presentan vida infinita.

3.2.1. Superficies de fractura

A pesar de tener una dirección de capas longitudinal, todas las probetas rompieron en la zona calibrada y dejando una superficie de rotura donde la grieta se ha propagado en dirección perpendicular a la tensión aplicada, demostrando la cohesión entre capas (Figura 70). Las etapas de nucleación y crecimiento de grieta también suceden como cabía esperar, sin embargo, tal y como ocurrió en los ensayos de fatiga de las probetas transversales [5], en algunos casos se producen dos inicios de fractura.



Figura 70: Probeta de fatiga rota por la zona calibrada

Un ejemplo de esta doble nucleación se encuentra en la Figura 71, perteneciente a la superficie de fractura de la probeta 7 de fatiga. En esta vemos como aparece un frente de grieta superior (izquierda) y otro lateral (derecha). Ambos se propagan inicialmente en dirección radial (etapa de nucleación) para acto seguido pasar a la etapa de crecimiento, caracterizado por las marcas de playa de fatiga. Finalmente se ve como la grieta lateral absorbe a la superior y continua con su avance en dirección perpendicular a la tensión.

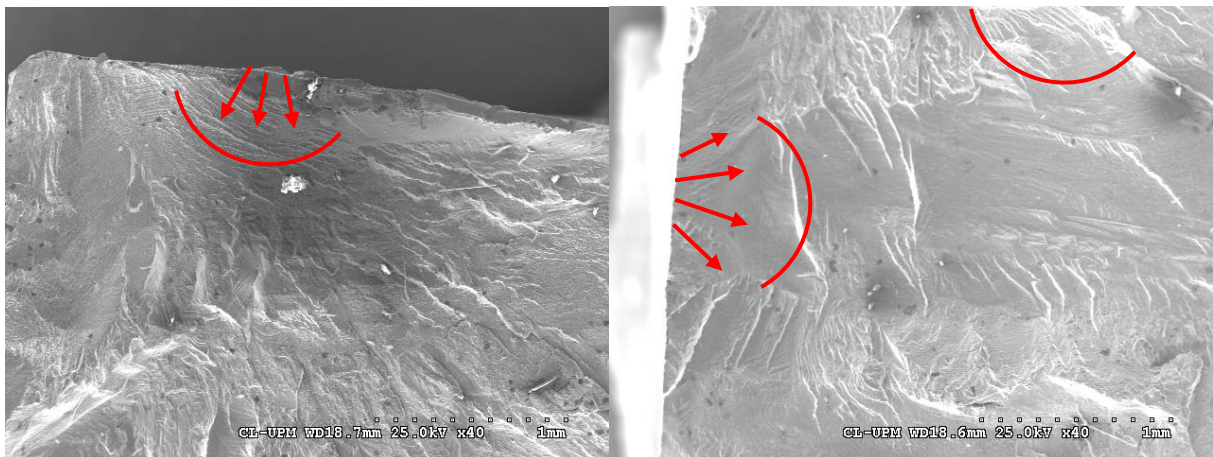


Figura 71: Inicio de grieta de fatiga en la zona superior (izquierda) y lateral (derecha) de la probeta 7

Cada marca de playa contiene a su vez pequeñas líneas microscópicas denominadas estrías. Cada estría representa el avance de la grieta durante un ciclo de carga (Figura 72 izquierda). Las superficies de fractura de fatiga también están caracterizadas por zonas de transición de rotura dúctil y frágil como respuesta a los diferentes mecanismos de propagación. En la Figura 72 derecha se puede apreciar esta particularidad, donde la zona dúctil aparece con una textura más rugosa por la presencia de microvacíos.

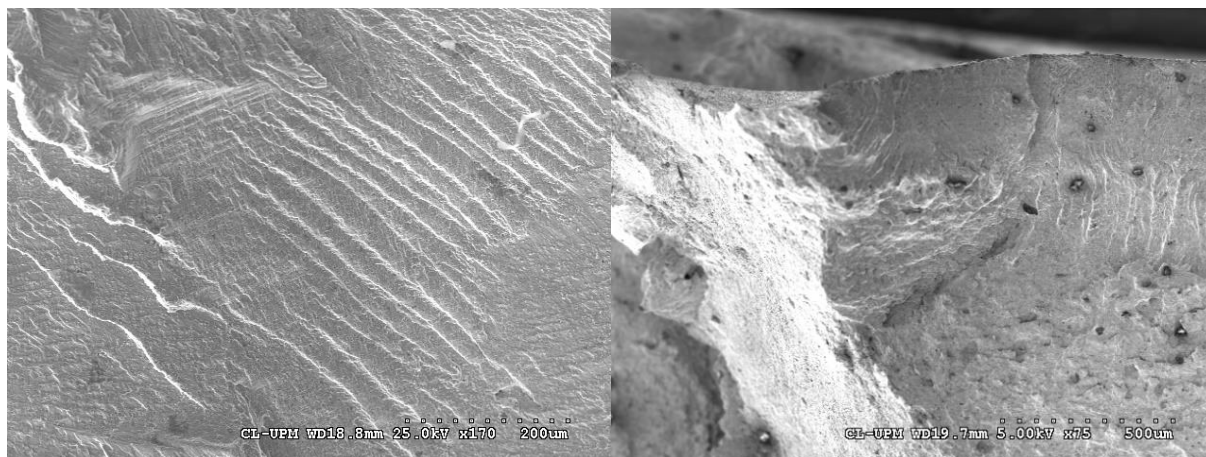


Figura 72: Estrías de fatiga (izquierda) y zona de transición dúctil-frágil (derecha)

3.3. Ensayos de medida de tensiones residuales

Tras el procesamiento de los datos obtenidos en el ensayo del taladro incremental se muestra para cada profundidad una tensión residual máxima y mínima, representada en las gráficas con los colores verde y rojo, y azul y amarillo respectivamente. Al ser un ensayo mucho menos costoso tanto por tiempo como económicamente, ya que no ya que no se requiere de una probeta normalizada para su realización, se han tomado en el caso del acero AISI 316L fabricado por DED tres medidas, de las que se ha graficado en la Figura 73 el promedio de estas. En el Anexo D se pueden encontrar los datos obtenidos individualmente en cada ensayo. Como era de esperar las tensiones residuales máximas (verde) están en la zona de tracción (positiva) y a medida que se desciende en espesor, aunque hay una tendencia a crear un campo más compresivo, a partir de los 0.8mm de profundidad se ve revertido con un crecimiento exponencial. Este cambio en la pendiente también aparece en la tensión mínima, que pasa en 0.2mm de una tensión de compresión de 200MPa (0.7mm) a una tensión de tracción de 9MPa (0.9mm).

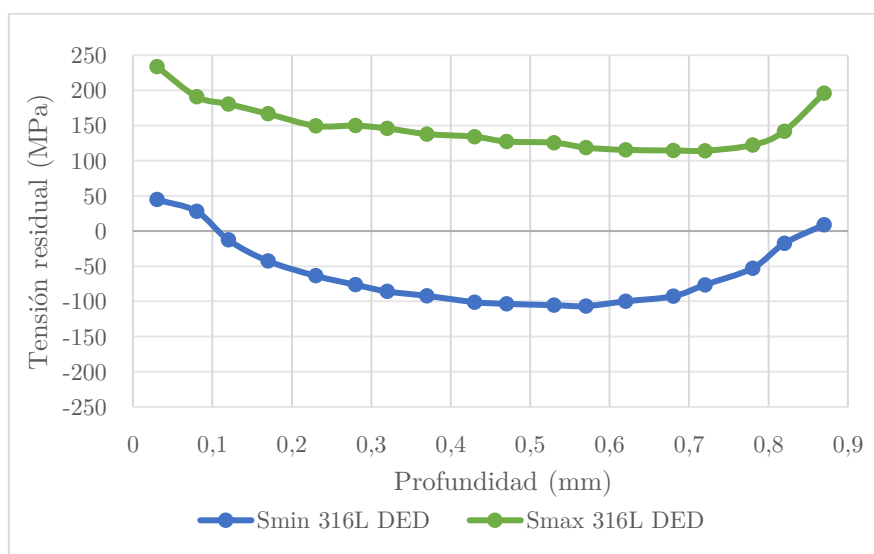


Figura 73: Mapa de tensiones residuales de 316L fabricado por DED

Sorprende además que el cambio de tendencia se produzca en los 0.8mm de profundidad, muy cercano al valor del espesor medio de capa medido experimentalmente (0.87mm). Sería interesante poder realizar un ensayo de medida de tensiones residuales que pudiera alcanzar cotas superiores al milímetro, con el objetivo de estudiar si la tendencia se repite. En caso afirmativo, demostraría que la zona de unión entre capas es, tal y como cabe esperar, donde mayores tensiones residuales de tracción se almacenan.

En la Figura 74 se pueden observar los resultados obtenidos de este mismo ensayo, solo que analizando el material tratado superficialmente con LSP. Como se puede observar, la realización del tratamiento LSP no solo consigue eliminar las tensiones indeseables de tracción propias del método de fabricación DED, sino que además logra crear un campo de tensiones de compresión. Estas tensiones residuales de compresión acumuladas en el material hasta los 0.5mm de profundidad, que oscilan entre los 200 y 125 MPa son beneficiosas para el comportamiento mecánico, especialmente en fatiga, del material.

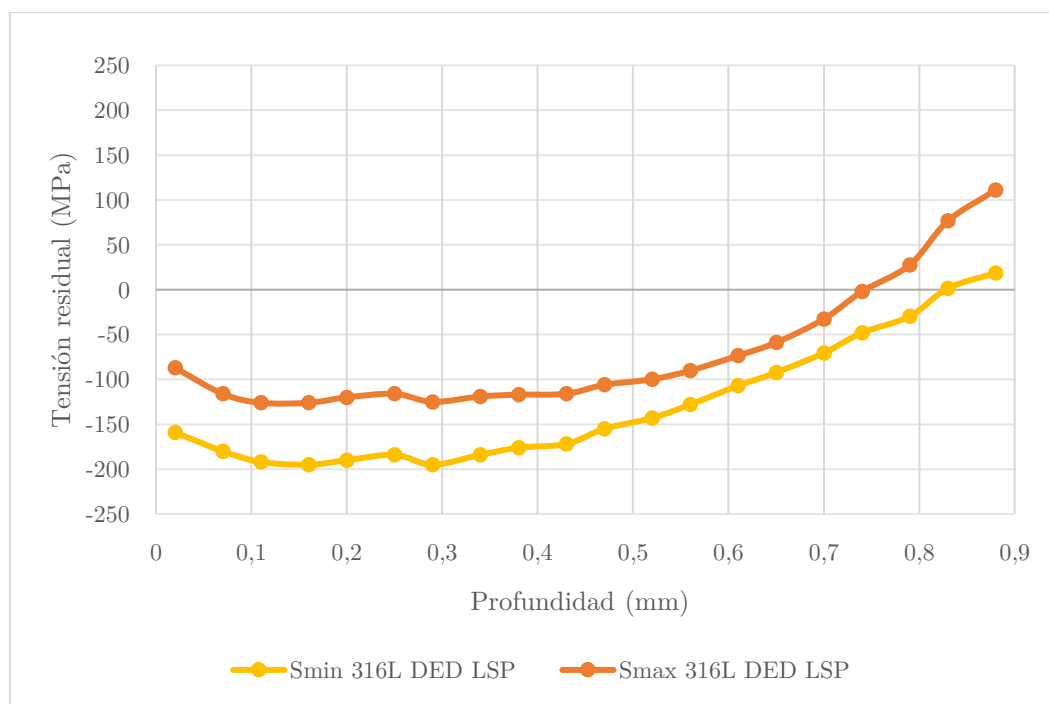


Figura 74: Mapa de tensiones residuales de 316L fabricado por DED con tratamiento LSP

Es reflejo también del comportamiento esperado tras la aplicación de la técnica LSP que a partir de cierta profundidad se pierda el efecto producido por la onda de choque, y que el material siga su tendencia natural. Esto se puede observar en la Figura 75 donde se perfectamente como a partir de los 0.5mm el mapa de tensiones residuales del material tratado comienza a acoplarse al mapa del material sin tratar, siendo prácticamente coincidente 0.1mm después, en su tensión residual mínima (curvas amarilla y azul).

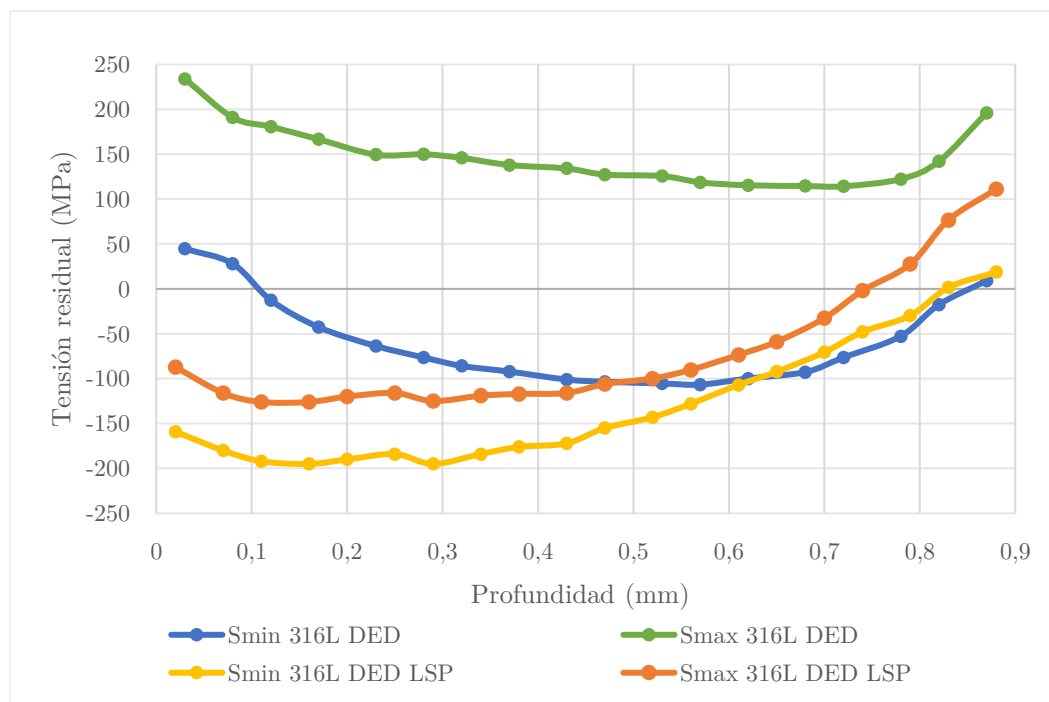


Figura 75: Comparativa de mapa de tensiones residuales

3.4. Ensayo de polarización lineal directa (PLD)

Las curvas de polarización se han obtenido tomando un potencial de barrido de 0.01 V/s. Para evitar entrar en la zona de pasividad imperfecta y hacer el ensayo cíclico, se ha detenido el ensayo a los 120 segundos. A su vez, el software estaba configurado para iniciar la toma de datos, y por tanto el ensayo, cuando se detectara el cambio en la corriente de anódica a catódica (cruz roja de la Figura 76 izquierda – E_{corr}/I_{corr}). Para ello se ha realizado un barrido previo desde un voltaje negativo de -0.6 V.

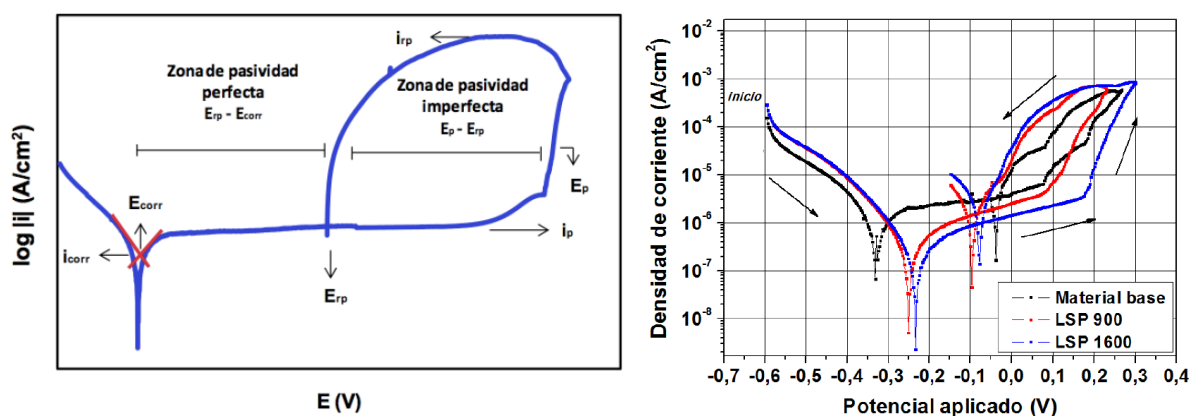


Figura 76: Parámetros de la curva potenciodinámica cíclica [66] (izquierda) y ensayos potenciodinámicos cíclicos sobre el acero inoxidable AISI 316L en diferentes estados [4] (derecha)

A pesar de haber realizado hasta 9 ensayos potenciodinámicos, los resultados han sido redundantes. Por esto, y con el objetivo de facilitar la lectura, se ha decidido mostrar solo una curva de pasividad por tipo de probeta estudiada. Así, en la Figura 77 se encuentran en azul los resultados obtenidos para el acero AISI 316L fabricado por DED en dirección longitudinal y sometido a un tratamiento con LSP, en verde este mismo material solo que sin tratar con LSP y en negro este mismo acero solo que fabricado por laminación. En contrario a lo que cabía esperar, en base a estudios previos (Figura 76 derecha), el acero tratado por LSP es el más susceptible a ser corroído, ya que el inicio de su curva se produce a un menor potencial. Además, también tiene la densidad de corriente de corrosión más alta, indicando una mayor velocidad de corrosión y por tanto unos efectos de inicio más problemáticos. Sorprende de la misma manera que el material menos susceptible a la corrosión sea el fabricado por DED, ya que como se ha visto en apartados anteriores su microestructura presenta distintas heterogeneidades composicionales (impurezas, poros) susceptibles de ser lugares donde se inicie el proceso.

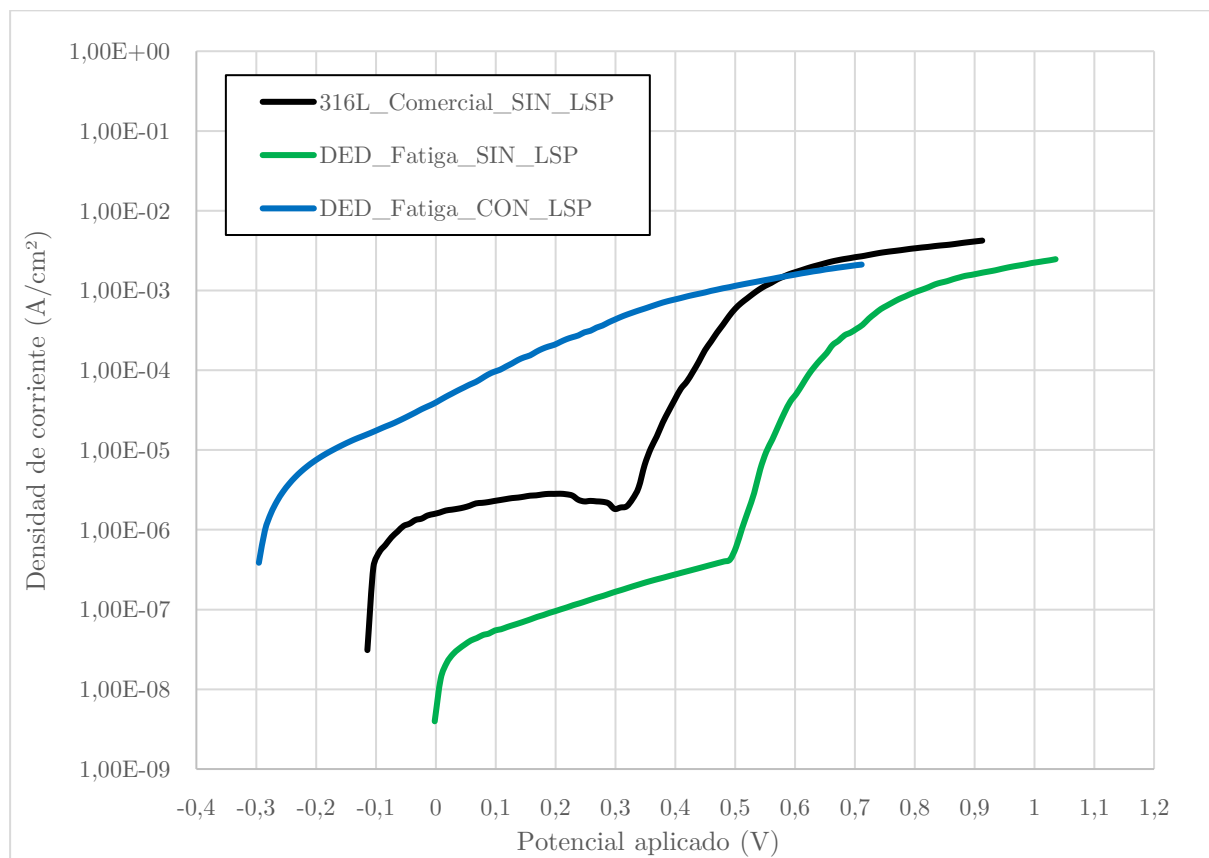


Figura 77: Ensayos PLD sobre el acero AISI 316L en estado comercial, fabricado por DED en dirección longitudinal y fabricado por DED con posterior tratamiento LSP

Sin embargo, para caracterizar la resistencia a la corrosión de un material se debe medir también el potencial de picadura (E_p). La distancia entre E_p y E_{corr} determinará la zona de pasividad. Una vez sobrepasado E_p el material pierde la capa de óxido protectora frente al medio corrosivo y las picaduras producidas (Figura 78 izquierda) nuclean y se propagan. Gráficamente este punto se encuentra en el segundo cambio de pendiente de la curva, cuyo valor numérico se encuentran en la Tabla 11. Tras su análisis, se concluye que la fabricación

3.4. Ensayo de polarización lineal directa (PLD)

de las probetas siguiendo la técnica DED no solo mantiene, sino que supera las propiedades de resistencia a la corrosión del acero AISI 316L. Además, la aplicación de un tratamiento LSP, a pesar de que permita la corrosión a potenciales más bajos, favorece el mantenimiento de la capa de óxido protectora. A esta reflexión se llega por la ausencia del marcador de potencial de picadura en los 120 s que ha durado el ensayo.

ENSAYOS PLD			
Parámetros	316L base	316L DED	316L DED + LSP
E _{corr} (V)	-0,11429	-0,00183	-0,29556
I _{corr} (μA/cm ²)	0,03098	0,00397	0,38574
E _p (V)	0,30869	0,49164	-
I _p (μA/cm ²)	1,90247	0,42368	-
ΔV zona de pasividad	0,42298	0,49347	-

Tabla 11: Resultados cuantitativos de los ensayos potenciodinámicos

Por último, cabe destacar que la probeta tratada con LSP es la única en la que se ha producido un cambio en la apariencia superficial (Figura 78 derecha) visible al ojo humano. Este hecho hace que el tratamiento no solo sea mejor opción de uso en ambientes con cloruros por generar una capa pasiva más estable, sino por tener la capacidad de producir un aviso externo claro que facilita la inspección y mantenimiento del material.

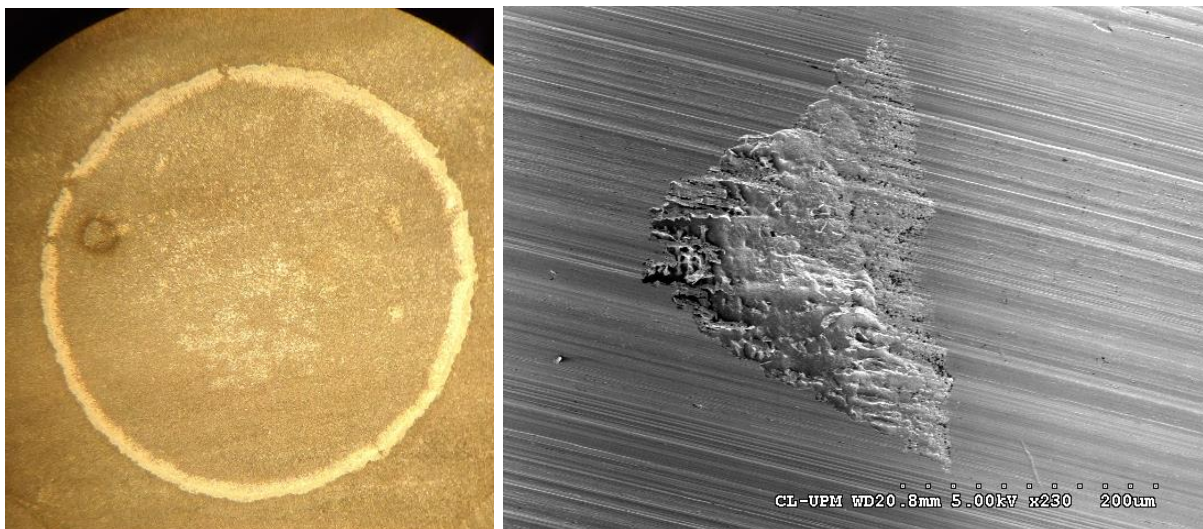


Figura 78: Aspecto de la probeta de 316L DED + LSP tras el ensayo (izq..) y picadura vista al SEM (drcha.)

3.5. Ensayo de dureza

La técnica LSP, al producir campos de tensiones residuales de compresión, también endurece superficialmente el material. Para el acero 316L fabricado por laminación se tiene constancia de que el tratamiento LSP a 1600pulsos/cm² produce un aumento de la dureza superficial que supera en un 18% al resultado obtenido sin el tratamiento y que el efecto se mantiene mínimo hasta 1mm de profundidad (Figura 79) [4]. Se quiere observar, a partir de la toma de medidas de dureza Vickers, si este efecto también se produce en el material fabricado mediante técnicas de FA.

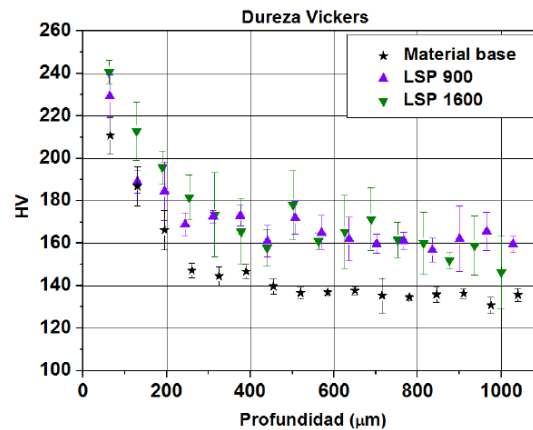


Figura 79: Evaluación de la dureza del acero 316L laminado en estado base y tratado LSP [4]

Para ello se realiza el ensayo aplicando una carga de 200 gramos, partiendo desde el borde hacia el centro de la pieza, deteniendo el ensayo a las 500µm de la superficie, ya que a partir de los 0.5mm se pierde el efecto del tratamiento LSP (Apartado 3.3). El primer punto se toma a 15µm. Las siguientes medidas se toman a una distancia de 15µm, hasta alcanzar las 105µm. Después, se toma otra medida a 150µm de la superficie, y en intervalos de 50µm, se llegan hasta los 0.5mm. Se han tomado un total de 15 medidas por probeta. Una vez realizada la huella en forma de pirámide (Figura 80), se toma medida de las diagonales, y haciendo uso del libro *Vickers Hardness number table for microhardness tester M-400 MVK-E*, donde se encuentran tabulados la dureza en función de la medida obtenida y la carga aplicada, se anota el resultado obtenido.

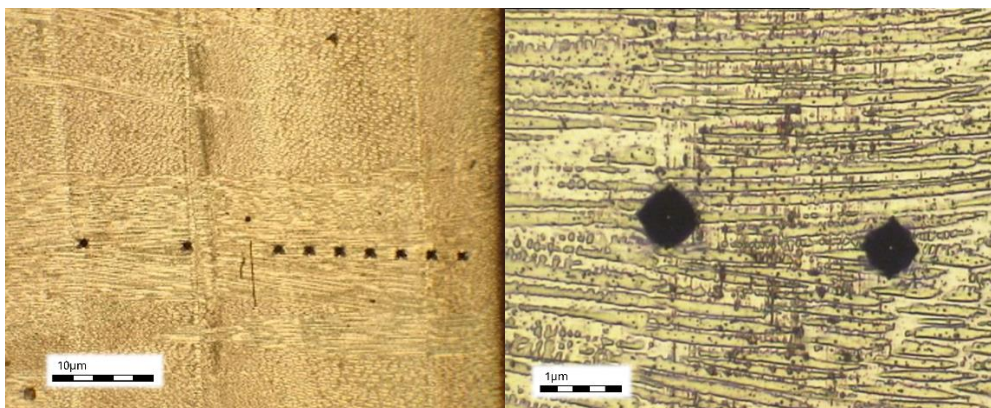


Figura 80: Huellas cuadrangulares del ensayo Vickers sobre 316L DED

3.5. Ensayo de dureza

Los resultados representados gráficamente en la Figura 81 muestran cómo, al contrario de lo que ocurría en el acero fabricado por laminación, el efecto de endurecimiento superficial del LSP no llega a superar las 100µm de profundidad. Por otra parte, la fabricación mediante la técnica DED endurece el material, obteniendo una dureza media de 221 Hv, un 58% superior a la del material fabricado por laminación.

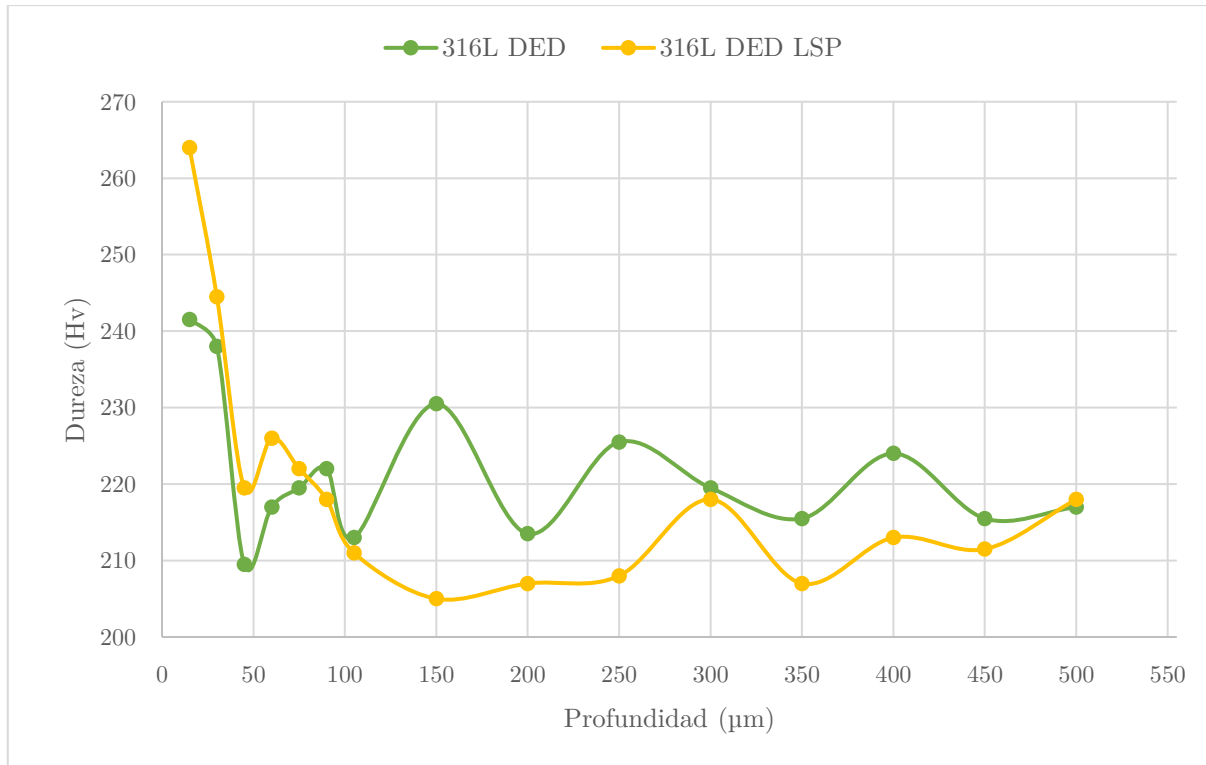


Figura 81: Evaluación de la dureza del acero 316L fabricado por DED (verde) y tratado con LSP (amarillo)

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

4.1 Conclusiones

El principal objetivo de este trabajo era la caracterización mecánica y el estudio microestructural de las probetas fabricadas por DED del acero inoxidable austenítico AISI 316L. Una vez descrito el proceso para la realización de los ensayos y presentados los resultados, se llega a las siguientes conclusiones:

- El método de fabricación de las probetas mediante la técnica DED seguido en las instalaciones de Etxetar no produce un espesor de capa constante. Sin embargo, sí favorece la creación de una microestructura cohesionada, ya que entre capas se continúa con la direccionalidad de los granos debido al crecimiento epitaxial de los mismos.
- La velocidad de enfriamiento de la capa una vez depositada es un parámetro clave del método de fabricación, ya que tiene una gran influencia en el desarrollo de la microestructura y composición final. Así, en las capas más alejadas del sustrato, donde se producen menores velocidades de enfriamiento, aparece una estructura de dendrita columnar más alargada.
- A lo largo de la probeta se observan pequeñas discontinuidades que son en su mayoría poros. A pesar de obtener un porcentaje bajo para tratarse de una técnica de FA, se debe intentar reducir el número al mínimo posible, ejerciendo un mayor control sobre la temperatura de proceso.
- El acero 316L en fabricación por DED en cualquiera de las dos direcciones estudiadas (longitudinal y transversal) presenta un peor comportamiento a fatiga que el acero 316L comercial, fabricado por laminación.
- El tratamiento de LSP mejora esta respuesta a fatiga de forma general a medias y bajas amplitudes de carga, sin embargo, solo en el acero comercial tiene un resultado verdaderamente provechoso considerando el sobrecoste de realizar un tratamiento LSP.
- La pieza fabricada por DED en dirección longitudinal tenía tensiones residuales mayoritariamente de tracción. El uso de un tratamiento LSP a 1600 pulsos/cm² es suficiente para cambiar la tendencia y generar tensiones residuales de compresión estables hasta una profundidad de 0.5mm.

- El acero AISI 316L fabricado por DED es el que más resiste sin oxidarse a una atmósfera corrosiva. El tratamiento LSP en este caso favorece el inicio de la corrosión, ya que esta se inicia a menores potenciales.
- El óxido producido en la probeta fabricada por DED es ligeramente más protector que el que se produce en el acero comercial. En este caso el tratamiento LSP sobre el acero 316L fabricado por DED mejora de forma considerable la protección a la corrosión, creando una capa pasiva altamente estable.
- El acero AISI 316L fabricado por DED presenta una dureza superior en un 58% a la obtenida en el acero fabricado por laminación. Sin embargo, la influencia en el endurecimiento superficial de la técnica LSP es mucho menor y se pierde a los 100 μ m de profundidad.

4.2 Líneas futuras

Como se ha ido exponiendo a lo largo del trabajo, el estudio del material se ha visto limitado por multitud de factores que impiden tomar este análisis como autoconclusivo. La inquietud por seguir ampliando el conocimiento respecto a la combinación de técnicas de FA con un LSP como posprocesado debe seguir. A continuación se detallan posibles estudios con los que profundizar en la materia y así mejorar y completar el trabajo realizado.

- Realizar ensayos de fatiga a un mayor número de amplitudes de carga.
- Realizar ensayos potenciodinámicos cíclicos, que permitan la identificación del fin de la zona pasiva en los aceros fabricados por DED y tratados con LSP.
- Realizar ensayos de tensiones residuales a mayores profundidades para estudiar la influencia de la unión entre capas.
- Estudiar la densidad de dislocaciones en el acero fabricado por DED y su influencia en el análisis de la dureza.
- Realizar ensayos de desgaste en el acero AISI 316L fabricado por DED y medir la influencia que tendría en esta propiedad la realización de un tratamiento LSP.
- Desarrollar modelos numéricos que sean capaces de predecir la velocidad de enfriamiento de las capas depositadas por FA y los parámetros que influyen en la misma.
- Desarrollar mecanismos para establecer un mayor control térmico en la fabricación de probetas mediante la técnica DED.

Referencias

- [1] 3Dnatives, «3Dnatives,» 16 05 2023. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/guia-impresion-3d-metal/>.
- [2] S. Dadhania, «IDTechEx,» 02 08 2022. [En línea]. Available: <https://www.idtechex.com/en/research-report/3d-printing-and-additive-manufacturing-2023-2033-technology-and-market-outlook/882>.
- [3] F. Cordovilla Baró, Á. García Beltrán, M. Á. Montealegre y J. L. Ocaña Moreno, « Non-linear thermal model of the Direct Laser Melting Process considering the adhesion of the consolidated material to the substrate using a domain with discontinuous material properties,» de *Lasers in Manufacturing*, Munich, 2019.
- [4] L. Ruiz de Lara de Luis, Desarrollo de métodos para la evaluación integrada de propiedades mecánicas y superficiales inducidas en materiales metálicos mediante tratamiento superficial por ondas de choque generadas por láser, Madrid, 2016.
- [5] S. J. Rodríguez Pozo, «Análisis microestructural y mecánico de piezas metálicas obtenidas mediante fabricación aditiva con la tecnología de fusión directa por láser y valoración de la tecnología LSP para la mitigación de los defectos inherentes al proceso de conformado,» 2021.
- [6] A. Calleja García, Caracterización de campos de tensiones residuales en materiales metálicos tratados por onda de choque generada por láser, Madrid: ETSII UPM, 2020.
- [7] A. M., «3Dnatives | El sector de la fabricación aditiva presentó más de 800 patentes en 2020,» 19 1 2021. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/fabricacion-aditiva-patentes-210120212/#:~:text=El%20n%C3%BAmero%20de%20patentes%20registradas,General%20Electrics%20y%20Kinpo%20Electronics..>
- [8] IFI CLAIMS® Patent Services, «Fast Growing Technologies of 2020,» 2021. [En línea]. Available: <https://www.ificlaims.com/rankings-tech-growth-2020.htm>.
- [9] LSP Technologies, «Laser Peening Benefits & Applications | LSP Technologies,» 06 01 2023. [En línea]. Available: <https://www.lsptechnologies.com/why-laser-peening/>.
- [10] UNE, «UNE-EN ISO/ASTM 52900:2021,» Madrid, 2022.

- [11] Grupo de Investigación en Ingeniería de Fabricación, Tema 12 - Fabricación Aditiva, Madrid: ETSII, 2020.
- [12] Blog Ingenius, «Fabricación aditiva e industria 4.0,» 29 11 2018. [En línea]. Available: <https://eddm.es/blog-ingenius/fabricacion-aditiva-e-industria-4-0/>.
- [13] B. Berman, «3-D printing: The new industrial revolution,» *Business Horizons*, vol. 55, nº 2, pp. 155 - 162, 1 03 2012.
- [14] C. M. Thakar, S. S. Parkhe, A. Jain, K. Phasinam, G. Murugesan y R. J. M. Ventayen, «3d Printing: Basic principles and applications,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 51, pp. 842 - 849, 30 06 2021.
- [15] L. Chen, H. Yong, Y. Yang, S. Niu y H. Ren, «The research status and development trend of additive manufacturing technology,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 89, nº 9-12, pp. 3651 - 3660, 8 11 2017.
- [16] M. Martínez, «El · lipse,» 14 05 2020. [En línea]. Available: <https://ellipse.prbb.org/es/los-coronamakers-y-sus-impresoras-3d-suplen-material-sanitario-contra-la-covid-19/>.
- [17] P. Romero, «Radio Surco,» 25 03 2021. [En línea]. Available: <https://radiosurco.es/impresoras-3d-el-arma-de-los-coronamakers-contra-el-virus-tras-un-ano-de-pandemia/>. [Último acceso: 2023].
- [18] L. C., «3Dnatives | Inyeccion de aglutinante, te lo contamos,» 2 1 2023. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/>.
- [19] Dassault Systèmes, «Binder Jetting,» 5 7 2022. [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/binder-jetting>.
- [20] EDDM, «Blog Ingenius | Material Jetting, Inyección de Material,» 27 11 2018. [En línea]. Available: <https://eddm.es/blog-ingenius/material-jetting-inyeccion-material/>.
- [21] EDDM, «Blog Ingenius | Fused Deposition Modeling FDM,» 29 11 2018. [En línea]. Available: <https://eddm.es/blog-ingenius/fused-deposition-modeling-fdm/>.
- [22] Radio Club Uruguayo, «Apuntes Informática | Tecnologías de impresión 3D,» 2019. [En línea]. Available: <http://cx1aa.org/articulos/Impresion%203D.pdf>.

- [23] EDDM, «Blog Ingenius | Sintetizado Láser Selectivo SLS,» 29 11 2018. [En línea]. Available: <https://eddm.es/blog-ingenius/sinterizado-laser-selectivo-sls/>.
- [24] EDDM, «Blog Ingenius | Estereolitografía SLA,» 29 11 2018. [En línea]. Available: <https://eddm.es/blog-ingenius/estereolitografia-sla/>.
- [25] Dassault Systèmes , «Deposición de energía dirigida,» 23 8 2022. [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/directed-energy-deposition>.
- [26] A. Saboori, A. Aversa, F. Bosio, E. Bassini, E. Librera, M. de Chirico, S. Biamino, D. Ugues, P. Fino y M. Lombardi, «An investigation on the effect of powder recycling on the microstructure and mechanical properties of AISI 316L produced by Directed Energy Deposition,» *Materials Science and Engineering: A*, vol. 766, n° 1, p. 138360, 2019.
- [27] M. L. Dezaki, A. Serjouei, A. Zolfagharian, M. Fotouhi, M. Moradi, M. H. A. Ariffin y M. Bodaghi, «A review on additive/subtractive hybrid manufacturing of directed energy deposition (DED) process,» *Advanced powder materials*, vol. 1, n° 4, p. 100054, 1 4 2022.
- [28] P. Guo, B. Zou, C. Huang y H. Gao, «Study on microstructure, mechanical properties and machinability of efficiently additive manufactured AISI 316L stainless steel by high-power direct laser deposition,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 240, pp. 12 - 22, 1 2 2017.
- [29] S. K. Moheimani, L. Iuliano y A. Saboori, «The role of substrate preheating on the microstructure, roughness, and mechanical performance of AISI 316L produced by directed energy deposition additive manufacturing,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, n° 11-12, pp. 7159 -7174, 24 1 2022.
- [30] P. Alvarez, M. Montealegre, F. Cordovilla, N. García-Beltrán, I. Angulo y J. Ocaña, «Direct Generation of High-Aspect-Ratio Structures of AISI 316L by Laser-Assisted Powder Deposition,» *Materials*, vol. 13, n° 24, p. 5670, 2020.
- [31] C. Askaryan y E. Moroz, «Pressure on evaporation of matter in a radiation beam,» *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics*, vol. 16, p. 1638, 1963.
- [32] F. Neuman, «Momentum transfer and cratering effects produced by giant laser pulses,» *Applied Physics Letters*, vol. 4, n° 9, 1964.
- [33] N. Anderholm, «Laser-generated stress waves,» *Applied Physics Letters*, vol. 16, n° 3, 1970.

- [34] A. Clauer, «Laser Shock Peening, the Path to Production,» *Metals*, vol. 9, n^o 6, p. 626, 2019.
- [35] B. Fairand, B. Wilcox, W. Gallagher y D. Williams, «Laser shock-induced microstructural and mechanical property changes in 7075 aluminum,» *Journal of Applied Physics*, vol. 43, n^o 9, pp. 3893 - 3895, 1972.
- [36] Tratamientos térmicos Biltra, «BILTRA,» 13 04 2022. [En línea]. Available: <https://www.biltra.com/tratamientos-vizcaya-bizkaia/temple-de-aluminio/>. [Último acceso: 19 05 2022].
- [37] Wikipedia contributors, 23 05 2022. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Rockwell_B-1_Lancer. [Último acceso: 20 05 2022].
- [38] Office of the CTO, MKS INSTRUMENTS HANDBOOK - Principles and Applications in Photonics Technologies, Milpitas, California: MKS, 2019, pp. 7, 13-24.
- [39] Real Academia Española, Diccionario de la Lengua Española, 2021.
- [40] C. Molpeceres, «Tipos de láseres,» 2022.
- [41] H. Ibarra Villalón, O. Pottiez y A. Gómez Vieyra, «El camino hacia la luz laser,» *Revista Mexicana de Física E*, vol. 64, n^o 2 Jul-Dec, pp. 100 - 107, 2018.
- [42] A. Granados Calderay, «Estudio de procesos de tratamiento de materiales mediante ondas de choque generadas con pulsos láser de picosegundo,» 2020.
- [43] M. Morales, «Interacción láser-materia,» 2022.
- [44] J. L. Ocaña, J. A. Porro, M. P. Morales, D. Iordachescu, M. A. Diaz, L. R. De Lara, C. Correa y A. Gil-Santos, «Laser Shock Processing: an emerging technique for the enhancement of surface properties and fatigue life of high-strength metal alloys,» *International Journal of Microstructure and Materials Properties*, vol. 8, n^o 1/2, pp. 45 - 52, 18 03 2013.
- [45] J. O'Keefe y C. Skeen, «Laser-induced stress-wave and impulse augmentation,» *Applied Physics Letters*, vol. 21, n^o 10, pp. 464 - 466, 1972.
- [46] P. Ganesh, R. Sundar, H. Kumar, R. Kaul, K. Ranganathan, P. Hedao, G. Raghavendra, S. Anand Kumar, P. Tiwari, D. Nagpure, K. BIndra, L. Kukreja y S. Oak, «Studies on fatigue life enhancement of pre-fatigued spring steel specimens using laser shock peening,» *Materials & Design*, vol. 54, pp. 734 - 741, 2014.

- [47] P. Ganesh, R. Sundar, H. Kumar, R. Kaul, K. Ranganathan, P. Hedao, P. Tiwari, L. Kukreja, S. Oak, S. Dasari y G. Raghavendra, «Studies on laser peening of spring steel for automotive applications,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, n^o 5, pp. 678 - 686, 2012.
- [48] R. Sundar, P. Ganesh, B. Kumar, R. Gupta, D. Nagpure, R. Kaul, K. Ranganathan, K. BIndra, K. Kain, S. Oak y B. Singh, «Mitigation of Stress Corrosion Cracking Susceptibility of Machined 304L Stainless Steel Through Laser Peening,» *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 25, n^o 9, pp. 3710 - 3724, 2016.
- [49] M. Morales, C. Correa, J. Porro, C. Molpeceres, J. Luis Ocaña y G. Ivetic, «Thermomechanical modelling of stress fields in metallic targets subject to laser shock processing,» *International Journal of Structural Integrity*, vol. 2, n^o 1, pp. 51 - 61, 2011.
- [50] R. Sundar, P. Ganesh, R. Kishor Gupta, G. Ragvendra, B. Pant, K. Vivekanand, K. Ranganathan, R. Kaul y K. Brindra, «Laser Shock Peening and its Applications: A Review,» *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, vol. 6, n^o 4, pp. 424 - 463, 2019.
- [51] Webmaster, «Censa Industrial,» 26 10 2019. [En línea]. Available: <https://censaindustrial.com/proceso-de-granallado/>.
- [52] Mireya, «Sacema,» 30 09 2020. [En línea]. Available: <https://sacemagroup.com/es/producto/acabado-de-superficies/cepillo-flexible-brunido/>.
- [53] M. Ijiri, D. Shimonishi, D. Nakagawa y T. Yoshimura, «Evolution of Microstructure from the Surface to the Interior of Cr-Mo Steel by Water Jet Peening,» *Materials Sciences and Applications*, vol. 08, n^o 10, pp. 708-715, 05 09 2017.
- [54] N. K. Alharbi, «Shot peening of selective laser-melted SS316L with ultrasonic frequency,» *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, n^o 3-4, pp. 2285-2299, 03 12 2021.
- [55] V. M. Blázquez Martínez, V. Lorenzo Esteban y B. del Río López, *Ingeniería y Ciencia de Materiales Metálicos*, Madrid: ETSII UPM, 2019.
- [56] Höganäs AB, forAM 316L 15-45 VG - Austenitic stainless steel powder for Additive Manufacturing, Höganäs, Escania, 2022.
- [57] Departamento de Metalurgia, *Apuntes asignatura Tecnología de los Materiales*, Madrid : ETSII UPM, 2022.

- [58] E. Asta, J. C. Ríos y F. Cambiasso, «Análisis comparativo en la determinación de ferrita delta para aceros inoxidable austeníticos,» *Revista MATÉRIA*, vol. 23, nº 2, 30 10 2018.
- [59] NICKEL ALLOYS, «CALCULADORA DE FERRITA | WRC-92 | DeLong | Nickelalloys,» 06 09 2021. [En línea]. Available: <https://nickelalloys.es/calculadora-de-ferrita-wrc-92-delong/>.
- [60] MIGAL, «WRC diagram for standard analysis,» [En línea]. Available: <https://migal.co/en/service/welding-calculators/wrc-diagram-for-standard-analysis>.
- [61] X. Li, F. Gao, J. Junhong, G. Cao, Y. Wang y Z. Lui, «Influences of cooling rates on delta ferrite of nuclear power 316H austenitic stainless steel,» *Materials Characterization*, vol. 174, 01 04 2021.
- [62] «Resistencia mecánica a fatiga - tutorial nº217,» 2023. [En línea]. Available: <https://ingemecanica.com/tutorialesemanal/tutorialn217.html>.
- [63] Trotec Laser GmbH, «Trotec Laser GmbH,» [En línea]. Available: <https://www.troteclaser.com/es/ayuda-y-asistencia/centro-de-ayuda/laser-nd-yag>. [Último acceso: 06 03 2023].
- [64] L. Gracia, «Blog de SEAS,» 09 02 2015. [En línea]. Available: <https://www.seas.es/blog/varios/defectos-internos-en-soldadura-parte-2/>. [Último acceso: 30 05 2022].
- [65] T. Debroy, H. Wei, J. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. E. Wilson-Heid, A. De Caro y W. Zhang, «Additive manufacturing of metallic components – Process, structure and properties,» *Progress in Materials Science*, vol. 92, pp. 112-224, 01 03 2018.
- [66] J. A. Santiago Varela, Estudio de la resistencia a la corrosión de materiales metálicos tratados con LSP mediante técnicas electroquímicas, TFM ETSII, 2014.
- [67] «SDG Impact Assessment Tool,» [En línea]. Available: <https://sdgimpactassessmenttool.org/es-es/tool/assessments>.

Anexo A – Planificación y presupuesto

A.1 Estructura de Descomposición del Proyecto

Al final de este Anexo, en la Figura 83, puede encontrarse la EDP con la que se ha estructurado este trabajo. Las actividades listadas se dividen en 5 bloques: Formación, Organización, Estudios Previos, Caracterización metalográfica y Caracterización mecánica.

A.2 Planificación temporal

Haciendo uso del programa *Microsoft Project*, se ha realizado el diagrama de Gantt del proyecto (Figura 82), proporcionando un marco temporal de planificación.

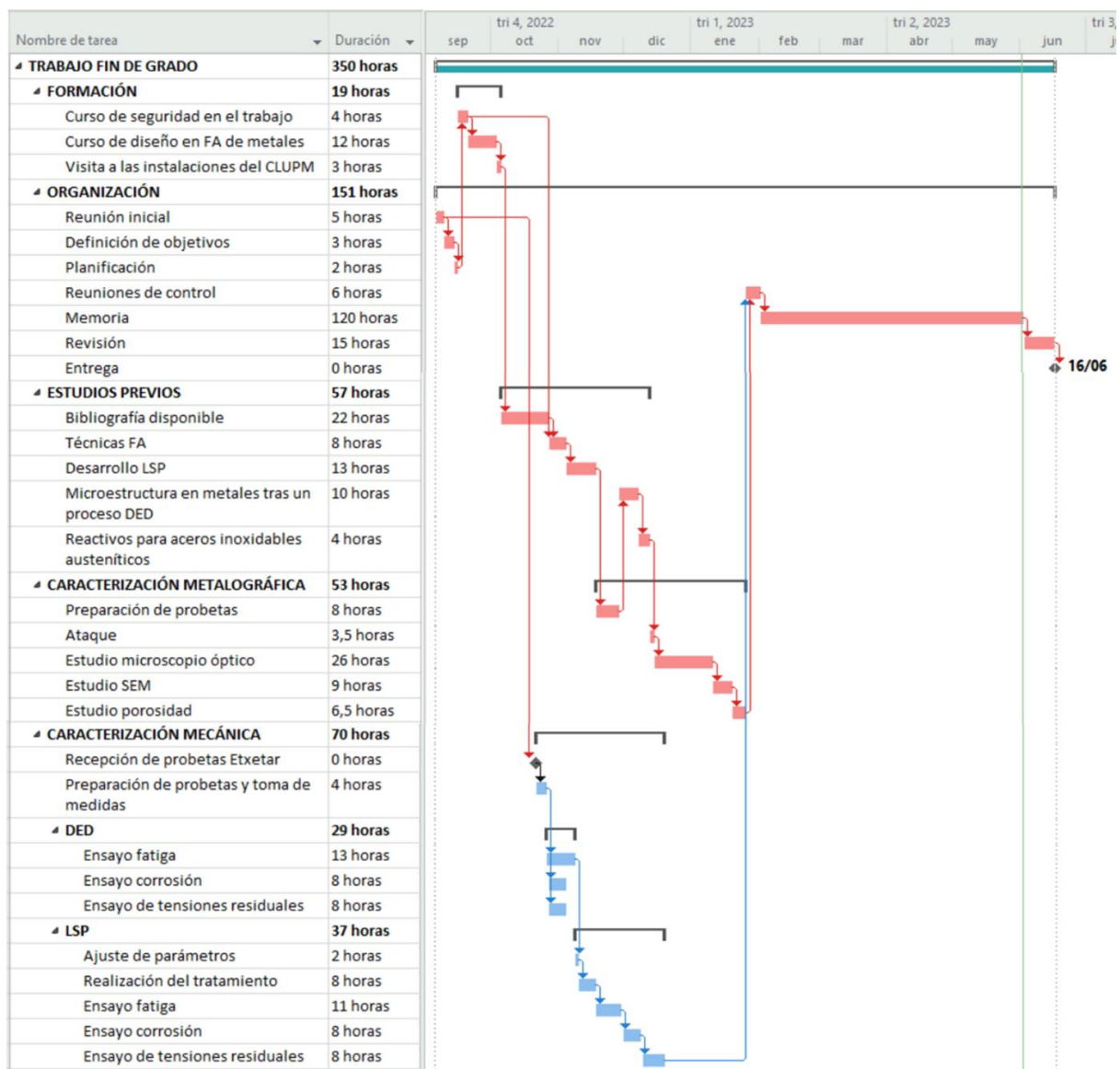


Figura 82: Diagrama de Gantt

A.3 Presupuesto

De cara a dar el presupuesto del proyecto se tienen en cuenta tres partidas: material, amortizaciones y personal.

A.3.1 Partida de material

El material con uso exclusivo para este proyecto y con la imposibilidad de reutilizarse es el presentado en la Tabla 12. En esta partida se tienen en cuenta por tanto los reactivos de ataque de las probetas metalográficas, las galgas extensiométricas usadas para los ensayos de tensiones residuales y el estudio de las discontinuidades subcontratado al Museo de Ciencias Naturales de Madrid.

A pesar de haber hecho uso en este trabajo de diez probetas de fatiga, una probeta de tracción, dos taladros incrementales para el ensayo de tensiones residuales y un soporte para la aplicación del tratamiento LSP, no se tienen en cuenta de cara a hacer la partida. Las probetas fueron cedidas por la empresa Etxetar a cambio de su estudio, por lo que no tienen un coste aplicable de compra y el material de laboratorio es cedido por el CLUPM, y utilizado en diferentes investigaciones propias del centro, por lo que tampoco es un coste asociado exclusivamente a este proyecto.

Concepto	Coste unitario	Unidad	Cantidad	Importe
Oxálico 10%	23,63 €	1000 ml	500	11,82 €
Cloruro cúprico	21,45 €	100 g	3	0,64 €
Ácido clorhídrico	14,65 €	1000 ml	66	0,97 €
Etanol	25,13 €	1000 ml	66	1,66 €
Agua destilada	12,61 €	1000 ml	66	0,83 €
Galgas extensiométricas	40,00 €	5 unid.	6	48,00 €
SEM Museo CN	101,03 €	1 horas	6	606,18 €
Informes SEM Museo CN	46,50 €	1 unid.	1	46,50 €
Total				716,60 €

Tabla 12: Costes de materiales del proyecto

A.3.2 Partida de amortizaciones

Respecto a los equipos amortizables utilizados, solo se encuentra el ordenador portátil personal (Tabla 13). El resto de los equipos utilizados en los ensayos (microscopio óptico, microscopio electrónico de barrido, celda electroquímica, máquina de ensayos de fatiga, equipo láser...) se encuentran todos disponibles en el CLUPM y totalmente amortizados, por lo que no se consideran en la partida.

Concepto	Importe	Amortización en meses	Coste mensual	Tiempo de uso	Importe
Ordenador portátil	621,00 €	60	10,35 €	9	93,15 €

Tabla 13: Costes de amortizaciones del proyecto

A.3.3 Partida de personal

El proyecto ha requerido de la implicación de un estudiante de Ingeniería y dos tutores, uno de ellos con mayor implicación en la parte práctica del proyecto (Tabla 14).

Concepto	Coste horario	Horas	Importe total
Autor del proyecto	16,99 €	350	5.946,50 €
Tutor del proyecto 1	35,10 €	65	2.281,50 €
Tutor del proyecto 2	35,10 €	20	702,00 €
Total			8.930,00 €

Tabla 14: Costes de personal

A.3.4 Coste total

Finalmente, sumando todos los totales de las partidas y añadiendo un 15% de costes indirectos, con el objetivo de cubrir los costes asociados al gasto de luz, agua y gas, se obtiene el presupuesto final del proyecto (Tabla 15).

Partidas	Importe
Material	716,60 €
Amortizaciones	93,15 €
Personal	8.930,00 €
Costes indirectos	15% 1.460,96 €
Total	11.200,71 €

Tabla 15: Costes totales



Figura 83: EDP del Trabajo Fin de Grado

Anexo B – Evaluación de impactos

Haciendo uso de la herramienta *SDG Impact Assesment Tool* [67] se ha realizado una evaluación más exhaustiva del impacto del proyecto, relacionándolo a su vez con los ODS. En la Figura 84 se puede ver el resultado generado. Destaca que no se encuentra ningún impacto negativo, ni directo ni indirecto. Esto puede deberse a que se ha tratado de un proyecto experimental y a baja escala, con atmósferas muy controladas. A gran escala, el tratamiento LSP y el método de fabricación por DED pueden generar partículas y productos volátiles que perjudiquen la seguridad del ambiente, incluso de las aguas residuales si están no son correctamente tratadas. Se recomienda vigilar estos aspectos y estudiar su impacto a medida que las técnicas desarrolladas alcancen un nivel industrial.

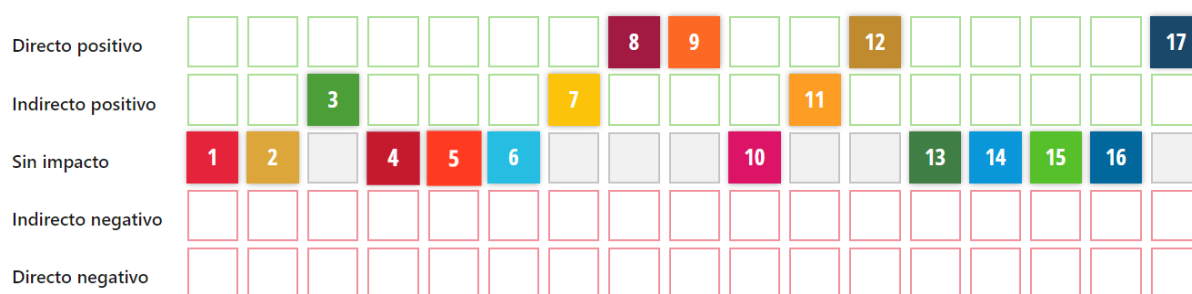


Figura 84: Resultado de impactos en los ODS para el proyecto desarrollado [67]

A continuación, se analizan los impactos directos positivos y los indirectos positivos con mayor profundidad, indicando los motivos económicos, sociales y medioambientales que les afecten.

B.1 Impacto directo positivo

Los impactos directos positivos recogen la influencia económica, social y medioambiental más evidente del proyecto.

ODS 8 – Trabajo decente y crecimiento económico

Este trabajo tiene el fin de ampliar los conocimientos disponibles respecto a la aplicación de tratamientos LSP en distintos modos de fabricación (tradicional por laminación y DED), por lo que en sí mismo es una clara apuesta por la innovación y modernización de la industria metalúrgica. Además, el uso de LSP frente a otros tratamientos de granallado más tradicionales tiene un claro efecto en el aumento de la productividad, ya que permite un mayor control en el método de aplicación. Señalar además que, aunque requiera de una mayor inversión inicial por la compra de un equipo láser de alta potencia, a la larga el gasto por pieza termina siendo menor debido a la posibilidad de automatizar el método y el ahorro en material de perdigonado.

ODS 9 – Industria, innovación e infraestructura

Relacionado con lo anterior, este trabajo está estrechamente relacionado con el desarrollo de la industria y la innovación, ya que, apuesta por la investigación y el progreso de la tecnología nacional, colaborando estrechamente con la empresa vasca Etxetar. Además, los materiales estudiados y tratados con LSP tienen un comportamiento a fatiga y en corrosión mejor que sin tratamiento, aumentando su vida útil, por lo que el trabajo también proporciona una industria sostenible que busca desarrollar productos cada vez más eficaces.

ODS 12 – Producción y consumo responsables

El uso de la técnica DED para la fabricación de las probetas lleva asociado la utilización de una menor cantidad de materia prima, además de reducir al máximo el desperdicio del material. Por otra parte, el uso del tratamiento LSP con el fin de crear tensiones residuales de compresión en las piezas también supone un menor uso de material en comparación con las técnicas tradicionales, ya que el LSP solo requiere de un haz láser frente a la granalla necesaria en el resto. Eso supone una reducción del impacto tanto en la reutilización de los materiales como en la obtención de estos.

ODS 17 – Alianzas para lograr los objetivos

La UPM, y en concreto la ETSII, son lugar de referencia para la transmisión de los ODS. Este trabajo, por haberse realizado en sus instalaciones pretende representar lo mismo. Además, en el caso concreto de este TFG, se ha establecido una alianza público – privada entre el CLUPM y Etxetar. Esta colaboración, aprovechando la experiencia de ambos actores, facilita el desarrollo científico y contribuye de forma positiva a la Agenda 2030.

B.2 Impacto indirecto positivo

Los impactos indirectos positivos recogen, en este caso, las posibles aplicaciones que puede tener la técnica desarrollada, y su influencia con los tres sectores comentados anteriormente: económico, social y medioambiental.

ODS 3 – Salud y bienestar

El uso de técnicas de FA tiene un amplio desarrollo en el cambio biomédico para la fabricación, en su mayoría, de prótesis a medida. La técnica DED junto con el tratamiento LSP ha demostrado tener un mejor comportamiento a corrosión, aumentando su vida en ambientes corrosivo. El uso de estas dos técnicas combinadas puede ser interesante en el sector biomédico, de cara a disminuir la necesidad de realizar operaciones quirúrgicas, disminuyendo a su vez el riesgo de muerte asociado a estas. Por otra parte, la técnica LSP usa solo un haz láser como perdigonado, por lo que los trabajadores industriales no se verían expuestos a la inhalación de material particulado en el momento de aplicar la tecnología.

ODS 7 – Energía asequible y no contaminante

Tanto el método de fabricación por DED como el tratamiento LSP necesitan de un equipo láser para poder efectuarse de manera correcta. Este equipo requiere de conexión a la red eléctrica para poder operar, siendo esta una de las principales materias primas del proceso. El impacto indirectamente positivo es que esta electricidad puede venir de fuentes renovables, reduciendo así el impacto ambiental del proyecto.

ODS 11 – Ciudades y comunidades sostenibles

El diseño y la selección de material es clave para el desarrollo de ciudades sostenibles. Este trabajo propone un proceso mediante el cual el material prolonga su ciclo de vida. La aplicación y el desarrollo de esta técnica a gran escala proporcionará la capacidad de crear estructuras más resilientes, por lo que las labores de mantenimiento y renovación de las infraestructuras se verán reducidas.

Anexo C

PROBETA	CAPA		ESPESOR (mm)			
	TOTAL	PROPIA	CENTRO	IZQUIERDO	DERECHO	MEDIO
A1	1	1	1,06742	0,44536	0,37411	0,62896
	2	2	0,93488	0,62561	0,60700	0,72249
	3	3	0,89752	0,90760	0,97696	0,92736
	4	4	0,77716	0,84630	0,87101	0,83149
A1-A3	5	5	0,71877	0,81698	0,77269	0,76948
A3	6	1	0,73555	0,65933	0,91707	0,77065
	7	2	1,06856	1,14104	0,85473	1,02144
	8	3	0,69467	0,64620	0,63158	0,65749
	9	4	1,20893	1,19486	1,07235	1,15871
	10	5	0,66173	0,73806	0,79285	0,73088
	11	6	1,20086	0,95478	0,79774	0,98446
	12	7	0,82431	0,79340	0,85923	0,82565
	13	8	0,82542	0,98455	0,76768	0,85922
	14	9	0,88939	0,80698	1,04499	0,91379
	15	10	1,08479	0,83325	1,07281	0,99695
	16	11	0,57789	0,65282	0,56791	0,59954
	17	12	1,16101	1,35516	1,32933	1,28183
	18	13	0,77118	0,89063	0,67455	0,77878
	19	14	0,81158	0,98187	1,17729	0,99025
	20	15	0,82288	0,77928	0,76488	0,78901
	21	16	1,07818	0,96989	1,27383	1,10730
	22	17	0,70101	0,88043	0,71227	0,76457
	23	18	0,91070	0,95276	1,21299	1,02549
	A3-C1	24	19	0,75592	0,88594	0,94110
C1	25	1	0,92249	0,71006	0,56045	0,73100

	26	2	0,92805	0,78094	0,80173	0,83691
	27	3	0,93894	0,95297	0,93868	0,94353
	28	4	0,75618	0,90957	0,79094	0,81890
	29	5	0,96250	0,90589	1,06141	0,97660
	30	6	0,64827	0,70958	0,65264	0,67016
	31	7	1,09224	0,96876	1,00200	1,02100
	32	8	0,74962	0,79354	0,79395	0,77903
	33	9	0,97663	1,02090	1,04186	1,01313
	34	10	0,61027	0,79674	0,67435	0,69379
	35	11	0,95802	1,05372	0,95684	0,98953
	36	12	0,83161	0,72668	0,94440	0,83423
	37	13	1,10238	1,22845	0,99104	1,10729
	38	14	0,57379	0,62925	0,71287	0,63864
	39	15	1,01890	1,00416	0,92092	0,98132
C1-B3	40	16	0,88201	0,80626	0,87933	0,85586
B3	41	1	0,83061	0,92341	0,77602	0,84335
	42	2	0,87801	0,66924	0,77719	0,77481
	43	3	0,87576	0,87604	1,00015	0,91731
	44	4	0,72396	0,71877	0,73410	0,72561
	45	5	1,18840	1,00410	1,05579	1,08277
	46	6	0,46151	0,60437	0,64185	0,56924
	47	7	1,08530	1,10746	1,07985	1,09087
	48	8	0,68901	0,75007	0,92691	0,78866
	49	9	1,09055	1,10574	0,74942	0,98190
	50	10	0,68694	0,83041	0,86842	0,79526
	51	11	1,12519	1,25197	1,06709	1,14808
	52	12	0,76662	0,81197	0,78859	0,78906
	53	13	1,03945	0,96283	1,05654	1,01961

	54	14	0,62310	0,77999	0,79637	0,73315
	55	15	1,14910	1,12174	0,94617	1,07233
	56	16	0,76402	0,88202	0,80410	0,81671
	57	17	0,91592	0,78284	0,89924	0,86600
	58	18	0,65772	0,55147	0,82928	0,67949
B3-B1	59	19	0,71192	0,66129	0,49104	0,62142
B1	60	1	0,66721	0,63307	0,74212	0,68080
	61	2	1,14126	1,01339	0,92210	1,02558
	62	3	0,78756	0,65175	0,98735	0,80888
	63	4	1,11120	1,08157	0,94758	1,04678
	64	5	0,81531	0,82494	0,83434	0,82487
	65	6	1,05399	1,11203	0,89547	1,02050
	66	7	0,74579	0,73344	0,66998	0,71640
	67	8	1,06286	1,06981	1,22579	1,11948
	68	9	0,81251	0,69329	0,79053	0,76544
	69	10	1,11603	1,34567	0,95163	1,13778
	70	11	0,80164	0,64198	0,57881	0,67414
	71	12	1,09166	0,99567	1,15278	1,08003
	72	13	0,59762	0,83193	0,75840	0,72932
	73	14	1,03802	0,99324	1,06910	1,03345
	74	15	0,65834	0,67888	0,60557	0,64760
	75	16	1,16404	1,28418	1,14287	1,19703
	76	17	0,75049	0,73592	0,75994	0,74878
	77	18	1,09975	1,12472	1,19726	1,14057
	78	19	0,45913	1,21143	0,91360	0,86139

Tabla 16: Medidas de espesor por capa y zona

PROBETA	
A1 (mm)	0,77596
A3 (mm)	0,89432
C1 (mm)	0,86776
B3 (mm)	0,85858
B1 (mm)	0,89401
TOTAL (mm)	0,87772

Tabla 17: Espesor medio por probeta de metalografía

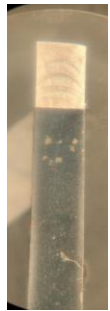

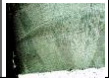

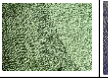
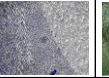


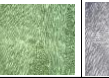
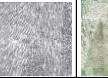
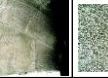
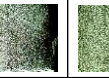
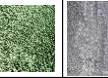




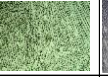


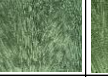
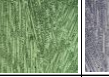
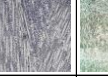
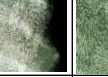
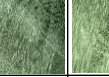
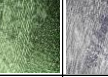

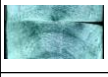



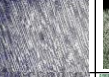



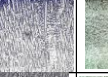
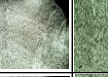
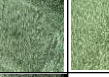
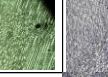






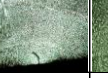

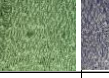
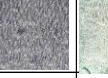
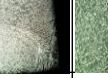
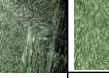
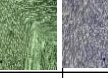










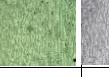
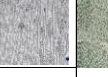
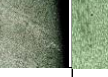
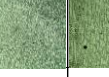
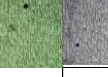



Anexo D









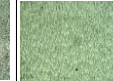
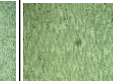
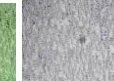
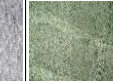
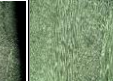
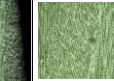
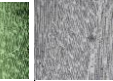







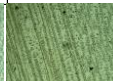
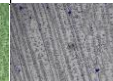

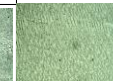
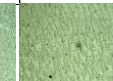
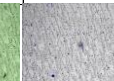

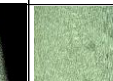
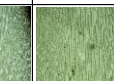
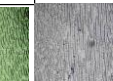








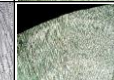

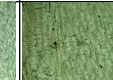
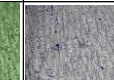
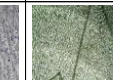
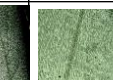
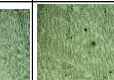
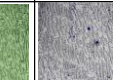

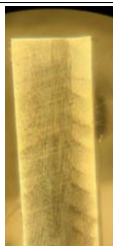









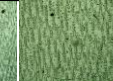
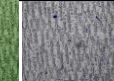
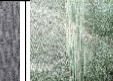
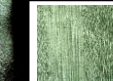
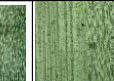
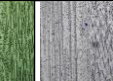

Medidas de tensiones residuales obtenidas en los distintos ensayos.

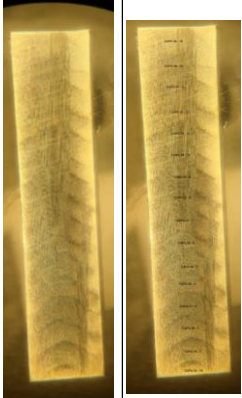
Profundidad [mm]	ENSAYO 1		ENSAYO 2		ENSAYO 3	
	Smin	Smax	Smin	Smax	Smin	Smax
0,03	51,3	91,8	155	269	-72,2	341
0,08	45,1	98,1	147	153	-108	322
0,12	34,9	102	54,4	142	-127	298
0,17	23,2	102	-16	127	-135	271
0,23	11	98,5	-67,8	109	-134	241
0,28	-1,31	92,7	-93,7	110	-134	247
0,32	-6,47	104	-122	98,7	-129	235
0,37	-17,4	103	-138	86,9	-121	224
0,43	-29	98,7	-157	78,7	-117	225
0,47	-36,4	107	-167	63,8	-107	211
0,53	-50	106	-166	58	-100	213
0,57	-62,4	102	-165	47,9	-92,5	206
0,62	-70,4	106	-145	43,1	-84,2	197
0,68	-85,2	104	-115	44,8	-77,8	195
0,72	-92,8	104	-63,5	54,8	-73	184
0,78	-100	105	17,8	83,9	-76	178
0,82	-103	109	135	151	-84,8	166
0,87	-95,9	120	226	314	-103	154
0,93	-75,2	134	398	601	-138	135
0,97	-36,5	171	681	1020	-200	105







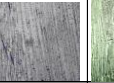
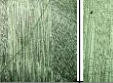
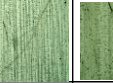
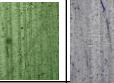
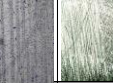
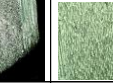
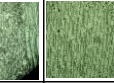









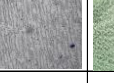




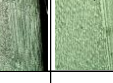

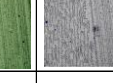














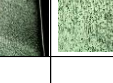





Tabla 18: Datos obtenidos en los ensayos de taladro incrementa









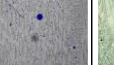

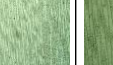

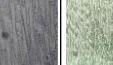
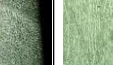










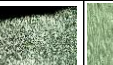
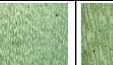
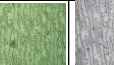
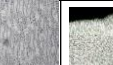
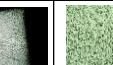
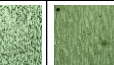
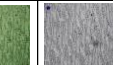











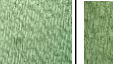
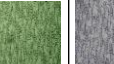

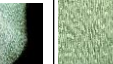
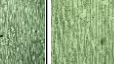
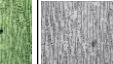





Anexo E








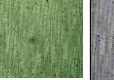
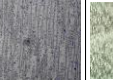
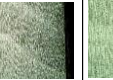
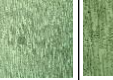
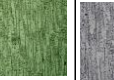














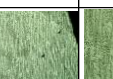














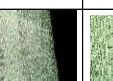













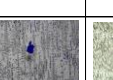

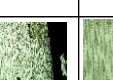









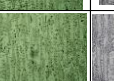

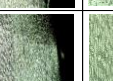
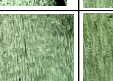
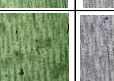


PROBETA	FILAS	FILAS TOTAL	CAPA	ZONA IZQUIERDA				ZONA CENTRAL				ZONA DERECHA				
				OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	
A1		1														
			2													
			3													
			4													
A1-A3		5														
A3		6														
			7													
			8													
			9													
			10													
			11													
			12													
			13													

PROBETA	FILAS	FILAS	CAPA	ZONA IZQUIERDA				ZONA CENTRAL				ZONA DERECHA						
				OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS			
A3			14															
			15															
			16															
			17															
			18															
			19															
			20															
			21															
			22															
A3-C1		23																
C1			24															
			25															
			26															

PROBETA	FILA TOTAL	CAPA	ZONA IZQUIERDA				ZONA CENTRAL				ZONA DERECHA				
			OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	
C1		27													
		28													
		29													
		30													
		31													
		32													
		33													
		34													
		35													
		36													
		37													
		38													
		C1-B3	39												

PROBETA	FILAS	CAPA	ZONA IZQUIERDA				ZONA CENTRAL				ZONA DERECHA				
			OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	
B3		40													
		41													
		42													
		43													
		44													
		45													
		46													
		47													
		48													
		49													
		50													
		51													
		52													

PROBETA	FILAS TOTAL	CAPA	ZONA IZQUIERDA				ZONA CENTRAL				ZONA DERECHA						
			OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS			
B3	 	53															
		54															
		55															
		56															
		57															
B3-B1		58															
B1	 	59															
		60															
		61															
		62															
		63															
		64															
		65															

PROBETA	FILA TOTAL	CAPA	ZONA IZQUIERDA				ZONA CENTRAL				ZONA DERECHA				
			OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	OBJ 5	OBJ 10	OBJ 20	POROS	
B1															
		66													
		67													
		68													
		69													
		70													
		71													
		72													
		73													
		74													
		75													
		76													
		77													
		78													

Índice de figuras

Figura 1: Empresas líderes en el sector de la FA y número de patentes registradas [8]	17
Figura 2: Evolución de las tecnologías de FA [2].....	18
Figura 3: Diagrama de bloques del proceso de FA desde su ideación hasta el producto final [12]	19
Figura 4: Ejemplo de piezas fabricadas por un grupo de Coronamakers [17]	19
Figura 5: Esquema de funcionamiento del proceso MEX [21]	20
Figura 6: Esquema de funcionamiento del proceso MJT [20].....	21
Figura 7: Esquema de funcionamiento del proceso VPP [24].....	21
Figura 8: Esquema de funcionamiento del proceso SHL [22]	22
Figura 9: Esquema de funcionamiento del proceso BJT [18]	23
Figura 10: Esquema de funcionamiento del proceso PBF [23]	23
Figura 11: Esquema de funcionamiento del proceso DED [25].....	24
Figura 12: Detalle de la boquilla en DED y posible patrón de dibujo [30].....	25
Figura 13: Acero AISI 316L enfriado a 5°C/min (izquierda) y 1200°C/min (derecha) [31]	25
Figura 14: Tocho de AISI 316L obtenida por DED en las instalaciones de Etxetar.....	26
Figura 15: Resistencia a fatiga de las aspas de ventilador F101 que compara la influencia de varios tratamientos superficiales [34]	27
Figura 16: Crecimiento del número de patentes asociadas al LSP [34]	27
Figura 17: Esquema de la cavidad lineal de un láser [41]	28
Figura 18: La oscilación puede ocurrir solo para los modos de resonador permitidos que se encuentran por debajo del ancho de banda de ganancia (parte superior de la figura) y la selección de modo longitudinal único mediante el uso de un resonador (etalón) [38].....	29
Figura 19: Esquema de la interacción láser-materia en un tratamiento LSP sin medio confinante (izq.) y con (drcha.) [43]	30
Figura 20: Comparación de la vida a fatiga de especímenes endurecidos y revenidos sin granallar y tratados con LSP [46]	30
Figura 21: Comparación de perfiles de superficies para SP (granallado tradicional), LSP (granallado con láser) y BM (metal base) [47]	31
Figura 22: Superficie de agrietamiento por corrosión bajo tensión probada parcialmente con LSP1400 [48].....	31
Figura 23: Detalle granallado [51] (izq.) y bruñido [52] (drcha.)	32
Figura 24: Detalle granallado por cavitación [53] (izq.) y USP [54] (drcha.)	32
Figura 25: Esquema del proceso de atomización por gas [57]	36
Figura 26: Polvo de acero AISI 316L dado por el fabricante [56]	36
Figura 27: Polvo de acero AISI 316L obtenido en las instalaciones del Centro Láser UPM...	37
Figura 28: Diagrama WRC-1992 para AISI 316L [60]	37
Figura 29: Porcentaje de Fe δ obtenido en función de la velocidad de enfriamiento [61]	38
Figura 30: Paredes obtenidas mediante técnicas de DED en las instalaciones de Etxetar	39
Figura 31: Esquema de corte de la probeta.....	41

Figura 32: Cortadora	41
Figura 33: Empastilladora	41
Figura 34: Probetas empastilladas con identificación	42
Figura 35: Lijas de (izq. a drcha.) 200, 400, 600 y 800.....	43
Figura 36: Pulidora para materiales duros (izqda.) y materiales blandos (dcha.).....	43
Figura 37: Solución para ataque químico. Cloruro cúprico.....	44
Figura 38: Probetas a tratar con sección vista	45
Figura 39: Taladrado de la probeta	45
Figura 40: Montaje ataque electrolítico.....	45
Figura 41: De izqda. a drcha. Microscopio óptico, lupa y monitor	46
Figura 42: Máquina de ensayos universales MTS 810	47
Figura 43: Curva de esfuerzo cíclico en tracción-tracción [62]	48
Figura 44: Dimensiones probetas de fatiga.....	48
Figura 45: Ciclos de carga para uno de los ensayos. Visión de la interfaz "Osciloscopio" desde el software usado	49
Figura 46: Esquema del montaje para el tratamiento LSP en las instalaciones del CLUPM y fotografía in situ	50
Figura 47: Interfaz del software Residual Stress Measurement Systema 6.3.9	51
Figura 48: Máquina RESTAN 182 y galgas extensiométricas sobre pieza a ensayar.....	51
Figura 49: Productos necesarios para la correcta preparación superficial de la muestra a ensayar	52
Figura 50: Celda electroquímica de las instalaciones del CLUPM.	52
Figura 51: Medidas de espesor de la capa C1-11	55
Figura 52: Probeta A1 y A2 tras el ataque químico	56
Figura 53: Probeta A1 tras el ataque electrolítico y examinada con lupa.....	56
Figura 54: Espesor de las capas en función de su altura.....	59
Figura 55: Corte y metalografía de soldadura [64]	59
Figura 56: Metalografía de la capa 3 de la probeta A1	59
Figura 57: Distribución de temperaturas en un cordón de soldadura	60
Figura 58: Fotografía del extremo derecho de la capa 3 (Probeta A1) x25, x50 y x100 respectivamente.....	61
Figura 59: Capa 2(A1), 18(A3) y 78(B1) respectivamente	61
Figura 60: Efecto del gradiente de temperatura (G) y la tasa de crecimiento de grano (R) sobre la morfología y el tamaño de la microestructura obtenida en la solidificación [65]	62
Figura 61: Estructura dendrítica celular en la capa 1 (A1), frente a (b) Estructura dendrítica columnar en la capa 58 (B3).....	63
Figura 62: Imagen SEM de una sección de la probeta A3 indicando las medidas tomadas	64
Figura 63: Espectros SEM/EDX para las muestras 6 (a), 7 (b) y 9 (c) siendo respectivamente material base, inclusión y poro	66

Figura 64: Porcentaje de porosidad en la muestra frente a la altura con detalle de las discontinuidades coloreadas en la zona derecha de la capa 10 (a), zona izquierda de la capa 55 (b) y zona central de la capa 76 (c)	67
Figura 65: Porcentaje de heterogeneidades (oscuro) y porosidad (claro) medio por capas	68
Figura 66: Mecanismo de propagación de grieta por fatiga [57].....	69
Figura 67: Curvas S-N para las probetas longitudinales de 316L fabricadas por DED sin tratar (verde) y tratadas con LSP (amarillo)	70
Figura 68: Curvas S-N para las probetas sin tratamiento LSP de 316L fabricado por DED en dirección transversal (azul claro), en dirección longitudinal (verde) y de 316L laminado (azul oscuro).....	71
Figura 69: Curvas S-N para las probetas con tratamiento LSP de 316L fabricado por DED en dirección transversal (rojo), en dirección longitudinal (amarillo) y de 316L laminado (gris). 72	
Figura 70: Probeta de fatiga rota por la zona calibrada.....	73
Figura 71: Inicio de grieta de fatiga en la zona superior (izquierda) y lateral (derecha) de la probeta 7	73
Figura 72: Estrías de fatiga (izquierda) y zona de transición dúctil-frágil (derecha).....	74
Figura 73: Mapa de tensiones residuales de 316L fabricado por DED	74
Figura 74: Mapa de tensiones residuales de 316L fabricado por DED con tratamiento LSP..	75
Figura 75: Comparativa de mapa de tensiones residuales.....	76
Figura 76: Parámetros de la curva potenciodinámica cíclica [66] (izquierda) y ensayos potenciodinámicos cíclicos sobre el acero inoxidable AISI 316L en diferentes estados [4] (derecha)	76
Figura 77: Ensayos PLD sobre el acero AISI 316L en estado comercial, fabricado por DED en dirección longitudinal y fabricado por DED con posterior tratamiento LSP	77
Figura 78: Aspecto de la probeta de 316L DED + LSP tras el ensayo (izq..) y picadura vista al SEM (drcha.).....	78
Figura 79: Evaluación de la dureza del acero 316L laminado en estado base y tratado LSP [4]	79
Figura 80: Huellas cuadrangulares del ensayo Vickers sobre 316L DED.....	79
Figura 81: Evaluación de la dureza del acero 316L fabricado por DED (verde) y tratado con LSP (amarillo).....	80
Figura 82: Diagrama de Gantt.....	89
Figura 83: EDP del Trabajo Fin de Grado	92
Figura 84: Resultado de impactos en los ODS para el proyecto desarrollado [67].....	93

Índice de tablas

Tabla 1: Composición química del acero AISI 316L (porcentaje en peso) [56]	35
Tabla 2: Parámetros del proceso de LSM realizado en las instalaciones de Etxetar	39
Tabla 3: Tiempos de ataque con solución de sosa al 10%.....	44
Tabla 4: Calibración microscopio óptico Olympus PMG3	47
Tabla 5: Especificaciones del láser Quanta-Ray PRO-350 Nd:YAG	49
Tabla 6: Parámetros tratamiento LSP a las probetas de fatiga.....	50
Tabla 7: Medida espesor medio por zonas y porcentajes de error real y teórico	57
Tabla 8: Resultados de composición dados por el SEM/EDX para las distintas medidas de la probeta A3 en comparación con la composición dada por el fabricante.....	64
Tabla 9: Resultados de los ensayos de fatiga.....	69
Tabla 10: Tabla comparativa de la amplitud de carga con la que las diferentes técnicas de fabricación presentan vida infinita.	72
Tabla 11: Resultados cuantitativos de los ensayos potenciodinámicos.....	78
Tabla 12: Costes de materiales del proyecto	90
Tabla 13: Costes de amortizaciones del proyecto	91
Tabla 14: Costes de personal	91
Tabla 15: Costes totales.....	91
Tabla 16: Medidas de espesor por capa y zona	97
Tabla 17: Espesor medio por probeta de metalografía.....	98
Tabla 18: Datos obtenidos en los ensayos de taladro incrementa	99

Este trabajo terminó de escribirse el día 11 de junio de 2023
Festividad del Corpus Christi