

GRADO EN INGENIERIA EN TECNOLOGIA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE GRADO

***FUNCTIONALLY GRADED MATERIALS:
GENERACION DE RECUBRIMIENTOS
MULTIMATERIALES MEDIANTE COMBINACION
DE MATERIALES EN POLVO***

Alumno: Martinez Ramírez, Xabier

Director: Lamikiz Mentxaka, Aitzol

Curso: 2018-2019

Fecha: 10/07/2019

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko Unibertsitatea

BILBOKO
INGENIARITZA
ESKOLA
ESCUELA
DE INGENIERÍA
DE BILBAO

DATOS BASICOS DEL PROYECTO

Alumno: Xabier Martinez Ramírez

Director Técnico: Aitzol Lamikiz Mentxaka

Departamento: Ingeniería Mecánica

Título del proyecto: Functionally Graded Materials: Generación de recubrimientos multimateriales mediante combinación de materiales en polvo.

Plazo de ejecución: 12/11/2018 a 10/07/2019

Resumen: Este documento presenta una propuesta de trabajo de investigación, que consiste en el estudio de los Functionally Graded Materials (FGM). Se analizará una de las tecnologías de fabricación aditiva por láser, para luego fabricar una geometría sencilla de FGM por medio de deposición directa de metal por láser (LMD), combinando acero inoxidable y de herramientas. De esta manera, se profundizará en el conocimiento de un tipo de fabricación con gran futuro por sus ventajas con respecto a los procesos de fabricación por arranque de viruta más habituales.

Palabras clave: láser; fabricación aditiva; acero inoxidable y de herramientas; Functionally Graded Materials

Abstract: This document presents a research paper proposal which consists of the study of Functionally Graded Materials (FGM). One of the additive manufacturing technologies by laser will be analysed to manufacture a simple geometry of FGM by Laser Metal Deposition, combining tool and stainless steel. In this way, we will deepen the knowledge of a type of manufacturing with great future for its advantages over chip starting manufacturing processes, which are more common.

Keywords: laser; additive manufacturing; tool and stainless steel; Functionally Graded Materials

Índice

1. Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos	1
1.1. Tablas y gráficas	1
1.2. Ilustraciones	1
1.3. Acrónimos	2
2. Introducción	3
3. Objetivos	5
4. Alcance	6
5. Contexto	7
6. Descripción de equipos y materias primas	8
7. Desarrollo	14
7.1. Preparación previa	14
7.2. Realización aportes	15
7.3. Estudio difusividad	18
7.4. Creación probetas	19
7.5. Realización ensayo microdureza	21
7.6. Microscopía	21
8. Resultados	22
8.1. Análisis estudio difusividad	22
8.2. Análisis ensayo microdureza	23
8.3. Análisis microscopia	26
8.3.1. Aporte AISI H13	26

8.3.2. Aporte AISI 316L/H13	27
9. Descripción de tareas. Diagrama Gantt	29
9.1. Descripción de tareas	29
9.2. Diagrama Gantt	30
10. Presupuesto	31
11. Discusión y conclusiones	34
11.1. Discusión	34
11.2. Conclusiones	35
12. Referencias.....	37

1. Lista de tablas, ilustraciones y acrónimos

1.1 Tablas y gráficas

Tabla 1. Composición química (%) del sustrato AISI 1045	6
Tabla 2. Composición química (%) del polvo de AISI 316L	6
Tabla 3. Composición química (%) del polvo AISI H13	6
Tabla 4. Composición y parámetros aporte AISI 316L/H13	16
Tabla 5. Valores difusividad aporte AISI H13	22
Tabla 6. Ensayo 1 microdurezas	23
Tabla 7. Ensayo 2 microdurezas	24
Tabla 8. Costes de recursos humanos	31
Tabla 9. Costes de amortizaciones	31
Tabla 10. Costes de gastos	32
Tabla 11. Presupuesto final	32
Gráfica 1. Valores difusividad aporte AISI H13	22
Gráfica 2. Ensayo 1 microdurezas	24
Gráfica 3. Ensayo 2 microdurezas	25

1.2 Ilustraciones

Ilustración 1. Laser Metal Deposition	7
Ilustración 2. Alimentador de polvo “Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder”	8
Ilustración 3. Generador láser de fibra “Rofin FL010”	9
Ilustración 4. Sistema de refrigeración “KKT Kraus OLB-5”	10
Ilustración 5. Centro de procesamiento laser “Kondia Aktinos 500”	11
Ilustración 6. Boquilla	12
Ilustración 7. Sierra automática	14
Ilustración 8. Rectificadora	14
Ilustración 9. Pre calentamiento sustrato AISI 1045	15
Ilustración 10. Ensayo aporte AISI H13	16
Ilustración 11. Ensayo aporte AISI 316L/H13.....	17
Ilustración 12. Aporte AISI H13	17
Ilustración 13. Máquina de corte por electroerosión	18
Ilustración 14. Placas zona 1 y 2 AISI H13.....	19
Ilustración 15. Placas zona 1 y 2 AISI H13.....	19
Ilustración 16. Sierra metalográfica.....	19
Ilustración 17. Corte aporte FGM.....	19
Ilustración 18. Ataque ácido oxálico.....	20
Ilustración 19. Probeta FGM tras ataque ácido oxálico.....	20
Ilustración 20. Microdurómetro Vickers Future Tech FM 800	21
Ilustración 21. Ensayo de dureza Vickers	21
Ilustración 22. Indentaciones ensayo 2 microdurezas	25

Ilustración 23. Cordones aporte AISI H13	26
Ilustración 24. Poro aporte AISI H13	26
Ilustración 25. Microestructura primeras capas	26
Ilustración 26. Microestructura ultimas capas	26
Ilustración 27. Aporte AISI 316L/H13	27
Ilustración 28. Concentración de grietas	27
Ilustración 29. Poro aporte AISI 316L/H13	27
Ilustración 30. Grieta aporte AISI 316L/H13	27
Ilustración 31. Aporte AISI 316L/H13	28
Ilustración 32. Cordones Aporte AISI 316L/H13	28

1.3 Acrónimos

LMD: Método de aporte por laser (*Laser Metal Deposition*)

FGM: Funtionally Graded Material

FEPA: Federación Europea de Productos Abrasivos

AISI: Instituto americano del hierro y acero (*American Iron and Steel Institute*)

UPV/EHU: Universidad del País Vasco (*Euskal Herriko Unibertsitatea*)

2. Introducción

Los métodos tradicionales de mecanizado se basan en el arranque de viruta hasta conseguir la geometría deseada, a partir de una pieza de material en bruto. Sin embargo, existen tecnologías capaces de fabricar piezas añadiendo material a un sustrato base. Dichas técnicas son conocidas como fabricación aditiva. Sus capacidades no solo se limitan a la creación de geometrías, sino que además son capaces de realizar reparaciones en piezas creadas por diferentes métodos de fabricación. Pese a su flexibilidad y versatilidad, esta tecnología de fabricación aun no puede alcanzar los acabados superficiales conseguidos mediante el mecanizado y, que a veces, pueden ser necesarios para la funcionalidad de las piezas.

Entre los diferentes procesos de fabricación aditiva se pueden fabricar un tipo de materiales conocidos como, Functionally Graded Materials (FGM).

Estos han sido objeto de investigación desde hace tiempo debido a su capacidad para ofrecer una solución a los problemas de ingeniería sobre los materiales convencionales y los materiales compuestos tradicionales. Su principal ventaja es la capacidad de controlar la composición y las propiedades dentro de una estructura fabricada ya sea mezclando previamente o combinando diferentes polvos de materiales utilizando sistemas de alimentación de polvo en la zona focal del láser.

La técnica para fabricar este tipo de materiales es la de “Laser Metal Deposition”, una novedosa técnica de aporte de material que consiste en la deposición de material con el objetivo de crear capas funcionales, mejorar las características de la pieza tratada o restaurarla. Mediante la interacción de la energía del haz láser en la superficie del sustrato, se produce la fusión de polvo arrastrado por una corriente de gas, obteniendo una dilución mínima. Se funde solamente una pequeña capa del sustrato, y se consiguen deposiciones de entre 50µm y 2mm de altura, conservando las propiedades originales del material de aporte.

La necesidad del LMD surge de aplicaciones que requieren superficies duras y resistentes al desgaste o a la corrosión en unas zonas concretas, pero con unas características de mayor ductilidad en el resto de la pieza. Ello se obtiene aportando una capa de material a un sustrato, que le confiere al material base sobre el que se deposita las características requeridas.

El proceso de “Laser Metal Deposition” cuenta con varias ventajas, como podría ser la reducción de tiempo de producción, ya que en muchas ocasiones simplifican la fabricación de piezas, o reducen tiempos de mecanizado. A su vez presenta una oportunidad única para la fabricación de piezas cuya geometría es imposible de conseguir por métodos más convencionales de arranque de viruta. Alguna desventaja de esta tecnología puede enmarcarse en el aspecto económico, ya que es un proceso caro en el que intervienen muchos elementos y un gran gasto de energía.

Otra de las principales ventajas del proceso destaca: mínima dilución, baja y controlable entrada de calor en el sustrato, alta velocidad de enfriamiento, gran flexibilidad de procesado y reducida

distorsión, dada la baja carga térmica generada en la pieza. Otra característica importante consiste en la posibilidad de llevar a cabo aportes selectivos en áreas pequeñas, lo que también favorece la opción de reparación de piezas (restauración de formas y recubrimientos dañados) sin necesidad de remplazar la pieza completa. Comparado con otras técnicas convencionales de deposición, la técnica nos puede permitir obtener cordones de soldadura o recubrimientos libres de poros, grietas y deformaciones, con una buena unión metalúrgica con el sustrato.

3. Objetivos

El objetivo de este proyecto es conseguir mediante la combinación de dos materiales en polvo metálicos y la tecnología de aporte por láser, obtener un recubrimiento que vaya mezclando en capas los dos materiales de diferentes propiedades mecánicas con diferentes proporciones en volumen cambiando gradualmente de una capa a otra, de modo que la primera capa tenga solo unas pocas partículas de un material y la última tenga la máxima relación en volumen del otro material. Por otra parte, otro de los objetivos es ver como varia la difusividad térmica de una pieza formada por únicamente uno de los polvos que se van a utilizar a lo largo del aporte.

Para el estudio se emplearán polvos de un acero de herramientas y un acero inoxidable. Dichos polvos han sido previamente seleccionados en base al estudio bibliográfico sobre los efectos y compatibilidad que puedan tener los mismos en el conformado de la pieza por láser.

Con esta investigación se pretenden buscar posibles mejoras o cambios como puedan ser los cambios en la estrategia del aporte, en los parámetros para que estos den estabilidad al proceso, mejoras en propiedades físicas y mecánicas como la difusividad y dureza, reducción de gastos o mejora técnica.

En el estudio se realizará una geometría sencilla de aporte de material, utilizando unos parámetros y caudales previamente seleccionados para conseguir las dimensiones de aporte de material más adecuadas. Para analizar todo ello:

Se realizarán cortes a dichos aportes y se analizarán cambios en la microestructura, dureza y posibles defectos como poros y grietas.

Como ya se ha mencionado, la difusividad va a ser objeto de estudio ya que es un parámetro importante para ver cómo se comporta térmicamente el material aportado.

Los objetivos secundarios de este proyecto a su vez son divulgativos, es decir, los que pretenden dar a conocer esta tecnología de una forma más amplia. No se puede ignorar el impacto tremendo que esta tecnología está empezando a tener y tendrá en los demás sectores industriales y en la fabricación, sino en la sociedad como tal, revolucionando y llegando a cambiar el modelo productivo global hasta cierto punto.

4. Alcance

Se va a emplear un láser de fibra Rofin FL010 con una potencia máxima de 1000 W, una longitud de onda de $\lambda=1080\pm 10\text{nm}$, una distancia focal de 200 mm y un diámetro de 1.2 mm en el spot. Este generador láser estará instalado en un centro de procesamiento láser, una Kondia Aktinos 500. Esta máquina es un antiguo centro de fresado modificado, contiene una mesa de posicionamiento de dos ejes con posibilidad de añadir dos grados de libertad angulares mediante un plato giratorio y un eje vertical en la boquilla. Dispone de un espacio de trabajo de 700x360x380 mm.

Como alimentador de polvo, se empleará un Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder, un alimentador por gravedad con dos tolvas para distintos polvos.

El sustrato para el aporte será acero AISI 1045 y los polvos que se emplearán AISI H13 Y AISI 316L cuyas composiciones vienen detalladas en las tablas Tabla 1, Tabla 2 y Tabla 3.

Tabla 1. Composición química (%) del sustrato AISI 1045

C	Fe	Mn	P	S
0.46	Restante	0.75	0.04	0.05

Tabla 2. Composición química (%) del polvo AISI 316L

C	Cr	Fe	Mn	Mo
0.023	18.15	Restante	0.079	2.33
Ni	P	Si		
11.75	<0.001	0.34		

Tabla 3. Composición química (%) del polvo AISI H13

C	Cr	Fe	Mn	Mo
0.41	5.12	Restante	0.25	1.33
V	P	Si	S	Otros
1.13	0.01	0.8	<0.01	0.27

Los cortes metalográficos se realizarán con una sierra metalográfica con un disco de corte corindón con unión de caucho, para lijar se emplearán lijas metálicas de carburo de silicio P80, P220, P600 y P1200 y para pulir paños de pulido con base metálica de 9 μm , 3 μm y 1 μm .

El ataque químico y electrolítico se efectuará con los reactivos Marble y ácido oxálico y el análisis de la geometría y microestructura con el microscopio confocal Leica DCM 3D. El ensayo de microdurezas se realizará con el microdurómetro Vickers Future Tech FM 800 donde se realizarán dos series de indentaciones a lo largo del aporte para corroborar resultados.

5. Contexto

El concepto de Functionally Graded Materials (FGM) fue propuesto en 1984 por científicos de materiales en la zona de Sendai en Japón como medio para preparar materiales de barrera térmica. Son una clase de materiales avanzados de los cuales la composición y la microestructura cambian gradualmente de una zona a otra, de modo que trae consigo una correspondiente variación en las propiedades. Estos materiales se pueden diseñar para funciones y aplicaciones específicas. Además, un cambio gradual en el material permite una reducción de la concentración de tensiones.

Los FGM presentan ventajas frente a los materiales comunes, es por eso que su utilización, aunque aún no está muy extendida, se está desarrollando cada vez más y supone un interesante objeto de estudio, ya que un mayor conocimiento de su comportamiento permitirá una mayor evolución y amplitud en sus aplicaciones.

En las últimas décadas y hasta la fecha, los FGM han tenido una gran relevancia en aplicaciones industriales y están ampliamente extendidos, entre otras, en la fabricación aditiva por láser.

Hoy en día, el concepto FGM se extiende a lo largo de una variedad de sectores en todo el mundo. Los FGM han encontrado su lugar en campos como el biomédico, automoción, aeroespacial, electrónica, óptica y aplicaciones nucleares.

El porqué del uso de este tipo de materiales es sencillo ya que nos permite seleccionar las mejores propiedades de cada material y al combinar estas, elegir que zonas se quiere que se comporten con las propiedades seleccionadas. Se trata de fabricar piezas en base a lo que se desea y esto resuelve una cantidad de problemas que con los materiales comunes no se es posible.



Ilustración 1. Laser Metal Deposition (LMD)

6. Descripción de equipos y materias primas necesarias

El proceso LMD consta de un conjunto de equipos para su funcionamiento, ya sean equipos integrados como la boquilla de LMD o equipos no integrados como el equipo de refrigeración. Los elementos necesarios para realizar los ensayos son los siguientes:

Alimentador de polvo

Suministra el polvo al dispositivo laser para fundirlo junto con la pieza. El alimentador “Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder” está formado por dos tolvas, dos discos, un caudalímetro y el panel de control. Cada tolva almacena el polvo, y esta se calienta previamente para eliminar la humedad y se le inyecta gas para aumentar la presión tanto en la tolva como en el disco. El polvo cae a los discos por gravedad y la presión ejercida por el gas, teniendo en cuenta que en la salida del disco la presión será menor, lo cual facilita la salida del polvo. El abastecimiento de polvo a la maquina laser se controla gracias al caudal de gas de arrastre y a las revoluciones a las que gira el disco mediante el panel de control (véase ilustración 2).



Ilustración 2. Alimentador de polvo “Sulzer Metco Twin 10-C Powder Feeder”

Generador láser

Los parámetros más importantes del láser son el tipo de onda (continua o pulsada), la potencia, la distancia focal y el diámetro del spot o haz láser. Dependiendo del tipo de onda podrían variar los demás parámetros del láser. La potencia nos permitirá poder fundir la superficie del sustrato para añadir el polvo o si se deseara hasta cortar el propio metal, la potencia es la fuente de energía. La distancia focal es el haz del láser, donde la luz posee el menor diámetro, donde se concentra la luz. El diámetro del spot es el diámetro que presenta la luz del láser sobre el sustrato, este diámetro no siempre será el diámetro de su distancia focal puesto que se puede utilizar de manera desenfocada para la obtención de un mayor diámetro en el sustrato.



Ilustración 3. Generador laser de fibra "Rofin FL010"

La máquina láser del taller mecánico del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU es un láser de fibra "Rofin FL010" (véase ilustración 3), este tipo de láser produce pulsos muy cortos de forma resonante y los concentra mediante una lente para introducirlo en la fibra óptica. El láser va rebotando por la óptica y saldrá al colimador en todas direcciones. El colimador lanza todo el láser en paralelo hacia las lentes, una serie de lentes que enfocan el láser hacia un único punto. La potencia máxima de este láser de fibra es de 1000W y la longitud de onda es $\lambda=1080\pm 10\text{nm}$, esta longitud de onda hay que tenerla muy en cuenta puesto que

afecta de distinta manera al cambiarla, ya que de esta propiedad depende la absorción del material.

El haz laser se descompone de tres maneras al llegar a la superficie del material: lo que refleja, lo que absorbe mediante conducción y lo que consigue traspasar el material. Lo más habitual en los metales es que λ se descomponga mayormente en R y conducción.

Sistema de refrigeración

Debido a las altas temperaturas que puede alcanzar el generador de láser es necesario tener un equipo de refrigeración, hasta tal punto que el láser no se activará si el equipo de refrigeración no está en marcha. Este equipo “KKT Kraus OLB-5” (véase ilustración 4) bombea agua con el refrigerante “R134 a” por un circuito interno y mediante el sistema de ventilación se consigue expulsar el calor.



Ilustración 4. Sistema de refrigeración “KKT Kraus OLB-5”

Centro de procesamiento láser

Todos los ensayos son llevados a cabo en el centro de procesamiento láser del taller del Departamento de Ingeniería Mecánica, se trata de una “Kondia Aktinos 500” (véase ilustración 5). Esta máquina es un antiguo centro de mecanización modificado, más concretamente, un antiguo centro de fresado. En lo que a cinemática se refiere esta máquina consta de la mesa de posicionamiento de dos ejes, del eje vertical proporcionado por la boquilla y dos movimientos

angulares supletorios si se desease, añadiendo el plato giratorio a la mesa. El espacio para trabajar del que dispone es de 700 mm de ancho, 360 mm de largo y 380 mm de altura.



Ilustración 5. Centro de procesamiento laser "Kondia Aktinos 500"

Boquilla

La boquilla consta de distintas salidas para poder hacer llegar el haz láser, los gases de protección, el gas de arrastre y el polvo a la superficie del material al que deseamos aportar (véase ilustración 6). El orificio central se utiliza para que salga el haz láser y el gas de protección central. El gas de protección es primordial para evitar que nada entre por el orificio central, porque si una mota de polvo lograra entrar e hiciese contacto con la lente que hace enfocar al laser hacia un único punto, se podría quemar la lente y quedar inservible. En la zona perimétrica se sitúa el gas de protección perimétrica el cual actúa como campana protectora. Por otra parte, entre el orificio central y la zona perimétrica se encuentra el lugar por donde sale el polvo junto con el gas de arrastre, la boquilla de aporte. La boquilla trabaja de forma continua y uniforme, es decir, no consta de un número determinado de orificios los cuales expulsan el polvo junto con el gas de arrastre, estos podrían generar un problema de direccionalidad dependiendo de cómo se hagan los aportes. La interacción del gas de arrastre con el gas de protección central

determina la calidad del aporte, es decir, la combinación de ambas decidirá la distribución del polvo en el punto focal de la boquilla. Desde el punto de vista cinemático, la boquilla de este proyecto está colocada en el eje Z del sistema, el eje vertical, y el centro de procesamiento láser lo desplaza en el eje X dependiendo de las necesidades.

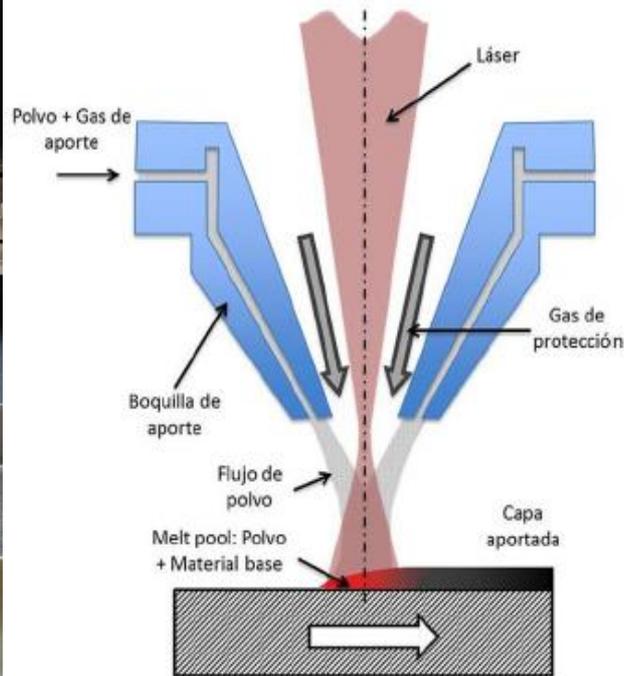


Ilustración 6. Boquilla

Gas

El gas suministrado, en botellas de gas comprimido, tendrá dos funciones principales durante el proceso. En un principio el gas sale de la bombona hacia el alimentador de polvo para mezclarse con el mismo y dirigirlo a la boquilla de la máquina láser para poder realizar el aporte, en este caso al gas se le denominará como gas de arrastre.

Por otra parte, el gas se utiliza como gas de protección, pero hay dos tipos de gas de protección. El primero, el gas de protección central, el cual protege la lente del láser de cualquier partícula que trate de introducirse en la boquilla y además también protegerá el sustrato en la mayoría de los casos para que no reaccione con el oxígeno, pero también tiene su contrapartida, porque este gas es el que más impacto tiene sobre la superficie y si fuese demasiado rápido podría generar porosidad en el aporte. El segundo, el gas de protección perimetral no es necesario excepto en los casos de que el sustrato se oxide fácilmente con un porcentaje mínimo de oxígeno, como pueda ser el titanio. Este gas actuará como una campana protectora con el fin de

evitar de que el oxígeno del aire penetre. El gas de protección se suministra directamente desde la bombona, con lo que se podría usar otro gas inerte distinto al de arrastre para la protección del sustrato, helio para el gas de arrastre y argón para el de protección, teniendo este segundo mayor densidad. Este tipo de combinaciones evitan en parte las turbulencias originadas entre el gas de arrastre y el gas de protección central gracias a la diferencia de densidades de los gases.

El gas utilizado es el argón puro 2X es el más habitual en este tipo de procesos por su carácter inerte y tiene una pureza de un 99,998% de argón.

Sustrato

El sustrato que se usará es el AISI 1045, es un acero utilizado cuando la resistencia y dureza son necesarios en condición de suministro. Este es uno de los aceros conocidos como de medio-carbón. En su producción se pone especial cuidado en su composición química, tratamiento, laminado y acabado superficial, etc. Como resultado de este cuidadoso procedimiento, se obtiene un acero sumamente útil para cualquier tipo de aplicación y tratamiento que se le quiera dar.

Este acero particularmente cuando se temple, puede ser usado donde se requiera de una extraordinaria dureza que sólo puede ser obtenida por aceros de medio-carbón. Algunas de sus aplicaciones, las podemos mencionar en: ejes para rueda, partes para máquina que tengan un desgaste excesivo, pernos, mordazas, piñones, engranes, trituradores, etc.

Polvos

Es la materia prima necesaria para cualquier proceso aditivo. Cada polvo metálico se deposita en cada una de las tolvas del alimentador donde se mezclan al llegar a la boquilla, dentro de la tolva se precalienta para eliminar la posible humedad y se aumenta la presión con el gas de arrastre, es conducido por el gas de arrastre por el disco del alimentador hasta el tubo y de ahí hasta la boquilla. Tras salir de la boquilla junto con el gas de arrastre se termina fundiendo sobre el sustrato al que se trata de aportar gracias al haz láser.

Los polvos utilizados en los ensayos son los siguientes, AISI H13 Y AISI 316L. Para el ensayo FGM, con esta combinación de polvos se intenta combinar las propiedades de un acero inoxidable con las de un acero de herramientas, característico por su gran dureza.

7. Desarrollo

En este punto se explica la manera en la que se ha llevado a cabo este proyecto. Se explican las tareas realizadas y el desarrollo del proyecto, así como la fabricación de este.

7.1 Preparación previa

Antes de empezar con cualquier ensayo lo primero es obtener el sustrato por ello gracias al uso de la sierra automática se sacan 3 muestras de 70x70x1.5 mm de una pieza de acero AISI 1045 (véase ilustración 7), dos de los sustratos van dirigidos para el estudio de difusividad y el sobrante para la realización del FGM. Posteriormente, se colocan los sustratos en la maquina rectificadora para que la muela rectifique la superficie de dichos sustratos (véase ilustración 8). Dado que el AISI 1045 es un material magnético se imanta la mesa gracias al electroimán colocado en ella para la sujeción del mismo a la máquina. Para finalizar la preparación, se limpia la superficie con acetona para evitar que queden impurezas sobre la superficie del sustrato y se lubrica con aceite para prevenir su posible oxidación ya que es un material fácilmente oxidable.



Ilustración 7. Sierra automática



Ilustración 8. Rectificadora

7.2 Realización de aportes

Para realizar los aportes, primero se ha programado un recorrido perimetral que luego se rellena, primero en dirección X y luego en la dirección Y. Se sigue esta estrategia ya que el aporte crece mejor dimensionalmente, es decir, crece mejor verticalmente y se consigue una mejor uniformidad de las propiedades.

Antes de dar inicio al programa, la superficie del sustrato se precalienta con el laser a una potencia de 200W para evitar la contracción que pueda tener este al aplicar el aporte (véase ilustración 9). Una vez hecho esto se da inicio al programa y por precaución, cada cierto tiempo se para la maquina debido a que tiene que estar durante mucho tiempo en funcionamiento y sufre un calentamiento excesivo.



Ilustración 9. Precalentamiento sustrato AISI 1045

Primero se ha programado el aporte de AISI H13 sobre dos de los sustratos ya que se necesitaban distintas zonas del aporte para el posterior estudio de difusividad y con un solo ensayo no podría haber sido posible (véase ilustración 10) y luego el de la combinación de AISI H13/316L (véase ilustración 11).

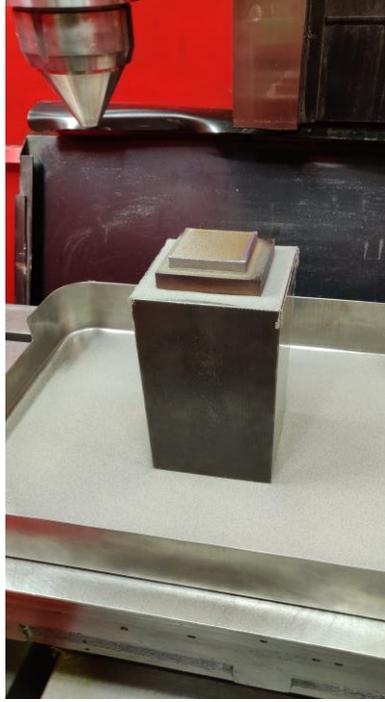


Ilustración 10. Ensayo aporte AISI H13

Para este ensayo se necesita un control del caudal de ambas tolvas puesto que la variación de material de una capa a otra es el adjuntado en la Tabla 4. Por ello, para conseguir el ancho y altura de cordón deseados, 2 y 0.4 mm concretamente, se cronometra durante dos minutos la cantidad de polvo de material que expulsa cada tolva a distintos porcentajes de rpm, se pesa la cantidad de polvo que ha expulsado el alimentador, se divide entre los dos minutos cronometrados y se aproxima el caudal calculado al programado para el ensayo. Estos valores programados para ensayo son resultado de una interpolación en función de ensayos realizados para ambos materiales en solitario, es decir, sin mezclar.

Tabla 4. Composición y parámetros aporte AISI 316L/H13

Capa	AISI 316L	AISI H13	Potencia (W)	Avance (mm/min)	Caudal (g/min)	
1-3	100%	0%	625	550	5	0
4	80%	20%	620	530	4	0.66
5	60%	40%	615	510	3	1.32
6	40%	60%	610	490	2	1.98
7	20%	80%	605	470	1	2.64
8-10	0%	100%	600	450	0	3.3

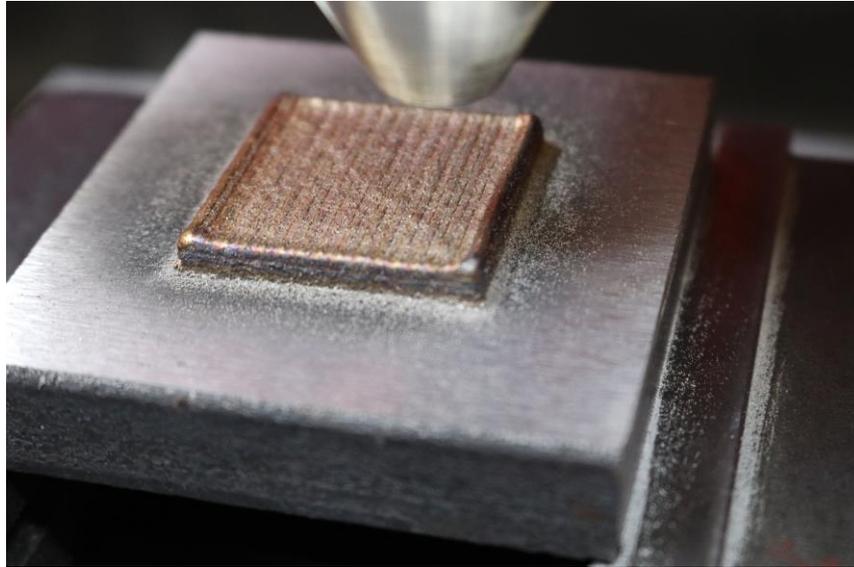


Ilustración 11. Ensayo aporte AISI 316L/H13

Tras los aportes se meten las piezas en un horno para controlar el enfriamiento de la pieza ya que el acero AISI H13 no se comporta muy bien con los gradientes de temperatura y puede traer consigo aparición de grietas.

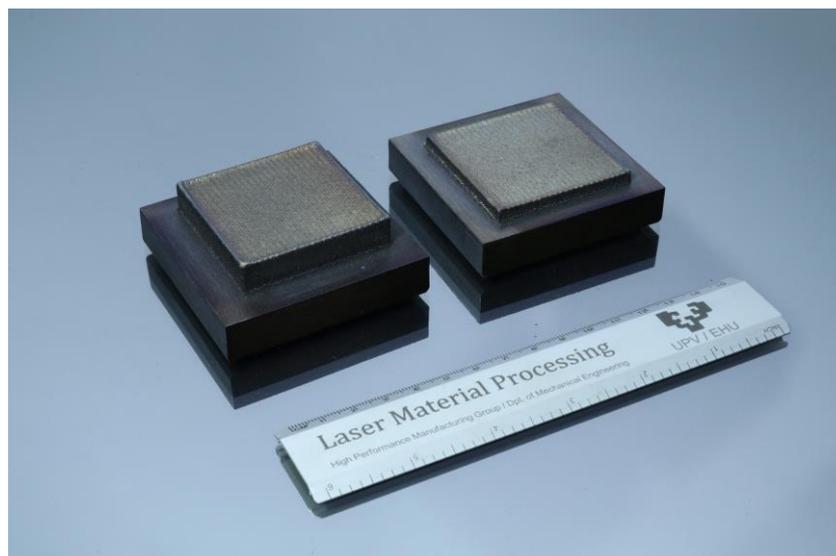


Ilustración 12. Aporte AISI H13

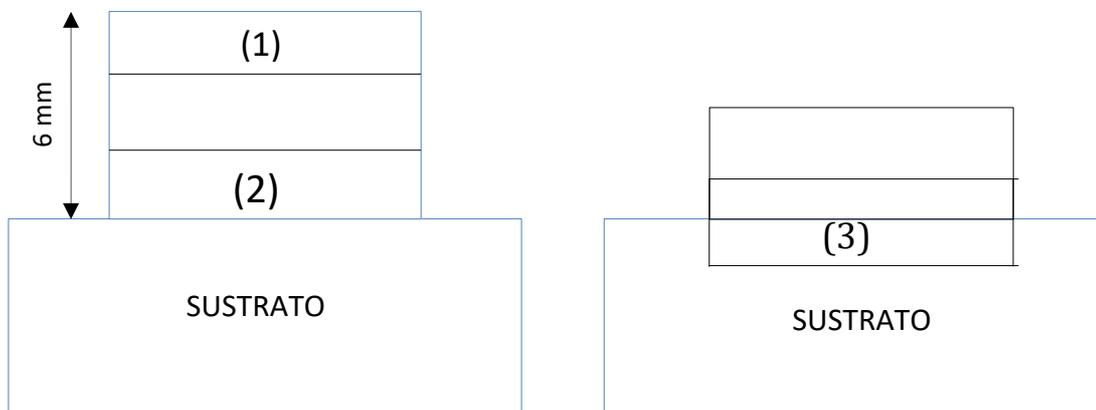
7.3 Estudio difusividad

Una vez hecho el aporte de AISI H13 sobre dos de los sustratos se realizaron cortes de dos milímetros de espesor de distintas zonas del aporte para que luego en la Departamento de Física de la UPV por medio del método Lock-in thermography hiciesen un estudio de los valores de difusividad en dichas zonas. Para realizar estos cortes se hace uso de la máquina de electroerosión ya que se consiguen unos resultados de corte más precisos y certeros (véanse ilustraciones 13, 14 y 15).



Ilustración 13. Máquina de corte por electroerosión

Posteriormente se rectifican todas las placas por ambas caras para dejar la superficie libre de impurezas. Concretamente, se hacen cortes de la última zona de aporte (zona 1), una zona intermedia (zona 2), justo la que está en contacto al sustrato y la zona de unión entre sustrato y aporte (zona 3), todas ellas de 2 milímetros de espesor.





Ilustraciones 14 y 15. Placas zona 1 y 2 AISI H13

7.4 Creación probetas

Una vez finalizado los aportes, se procede al corte de los mismos. Los cortes se hacen en la dirección perpendicular del sentido en el que se haya aportado la primera capa para ver la unión del sustrato con el aporte, con la sierra metalográfica para poder ver posteriormente la geometría del mismo (véanse ilustraciones 16 y 17).



Ilustración 16. Sierra metalográfica

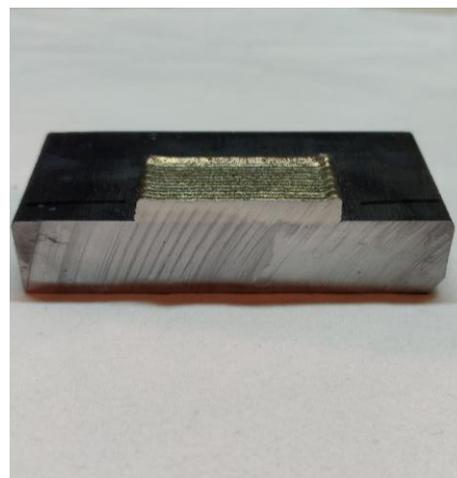


Ilustración 17. Corte aporte AISI 316L/H13

Tras haber cortado los sustratos, se procede a encapsularlos mediante una máquina que comprime y calienta la pieza junto con cuarenta mililitros de resina para enfriarlos posteriormente y dejar la probeta lista para lijar y pulir. Para lijar estas probetas se usa una

pulidora manual con cuatro lijas metálicas de carburo de silicio, lijas con granos FEPA de 80, 220, 600 y 1200. Para pulir en cambio, se utilizan paños de 9 μm , 3 μm y 1 μm con sus respectivos aerosoles de diamantes en la misma pulidora.

Después de dejar la superficie de las probetas como un espejo y antes de que el AISI 1045 se oxide, se atacan químicamente con el reactivo Marble para que en su posterior análisis en el microscopio sea más sencilla la distinción entre el aporte y el sustrato y la geometría de los cordones. Dado que este reactivo no ataca al acero inoxidable de la probeta FGM y no se consiguen ver con claridad los cordones con combinación de inoxidable y herramientas, tras este ataque se vuelven a pasar los paños para conseguir el acabado espejo y se ataca electrolíticamente con ácido oxálico. Este ataque consiste en meter en un recipiente este reactivo y con él una pieza de aluminio al cual se le ha adherido el borne negativo de la carga (véase ilustración 18). Simultáneamente se adhiere el borne positivo a la probeta que se desea atacar, de modo que hay que realizar un pequeño taladrado por detrás de la probeta para que pueda introducirse este borne y estar en contacto con el material. Una vez hecho esto se conecta la pila con un voltaje de 11 V y una corriente de 0.16 A, empezaran a salir pequeñas burbujas que indican que la probeta se está atacando. Pasado 1 minuto la probeta ya está lista para ser analizada en el microscopio (véase ilustración 19).



Ilustración 18. Ataque ácido oxálico

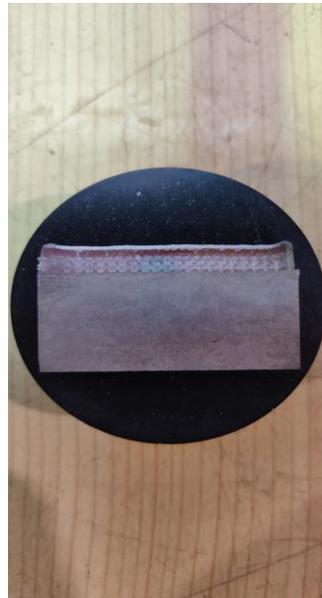


Ilustración 19. Probeta FGM tras ataque ácido oxálico

7.5 Realización ensayo de microdureza

Este ensayo se va a realizar con el microdurómetro Vickers Future Tech FM 800 sobre la probeta FGM (véase ilustración 20) para ver la variación de dureza a lo largo de la zona aportada ya que es una mezcla de acero inoxidable y de herramientas. Este se realizará dos veces en distintas zonas del aporte para ver que las propiedades de dureza son constantes a lo largo de la pieza. Para ello, se parte desde un punto a 0.2 mm de la última capa de aporte y se realizan indentaciones en dirección vertical cada 0.25 mm hasta sobrepasar el sustrato unos pocos milímetros. Estas indentaciones se miden en escala de dureza Vickers, se miden las longitudes de las aristas diagonales de la huella que ha dejado el indentador en el material y la máquina hace su conversión a escala de dureza Rockwell C (véase ilustración 21). Estos valores se recogen en tablas y se realiza su correspondiente gráfico de dureza respecto de la profundidad que más adelante se analizará.

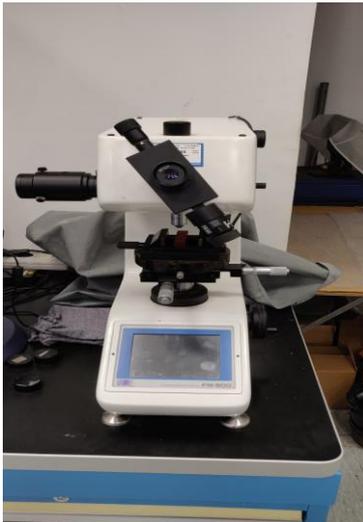


Ilustración 20. Microdurómetro Vickers Future Tech FM 800

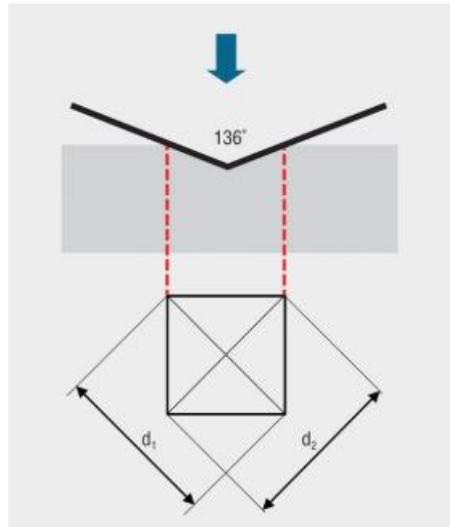


Ilustración 21. Ensayo de dureza Vickers

7.6 Microscopia

Para finalizar con la recopilación de datos para el proyecto, se sacan fotos con el “Microscopio confocal Leica DCM 3D” a la zona de unión aporte-sustrato, posibles defectos en la pieza como poros y grietas, microestructura y geometría de los cordones.

8. Resultados

8.1 Análisis estudio difusividad

Estos son los valores proporcionados por el Departamento de Física de la UPV/EHU de la difusividad térmica de las distintas zonas que se han seleccionado para el estudio, luego se ha hecho su conversión a conductividad térmica, multiplicando la difusividad térmica por el calor específico y densidad del material.

Tabla 5. Difusividad térmica aporte AISI H13

Profundidad (mm)	Difusividad térmica (mm ² /s)	Error difusividad térmica (mm ² /s)	Conductividad térmica (W/m*K)
AISI H13 (metal puro)	5.86	0.09	20.7
6	5.43	0.09	19.18
4	5.52	0.09	19.49
2	5.26	0.09	18.58
1	5.16	0.09	18.22
0	5.03	0.08	17.76
-1 (AISI 1045)	11.18	0.25	40.37

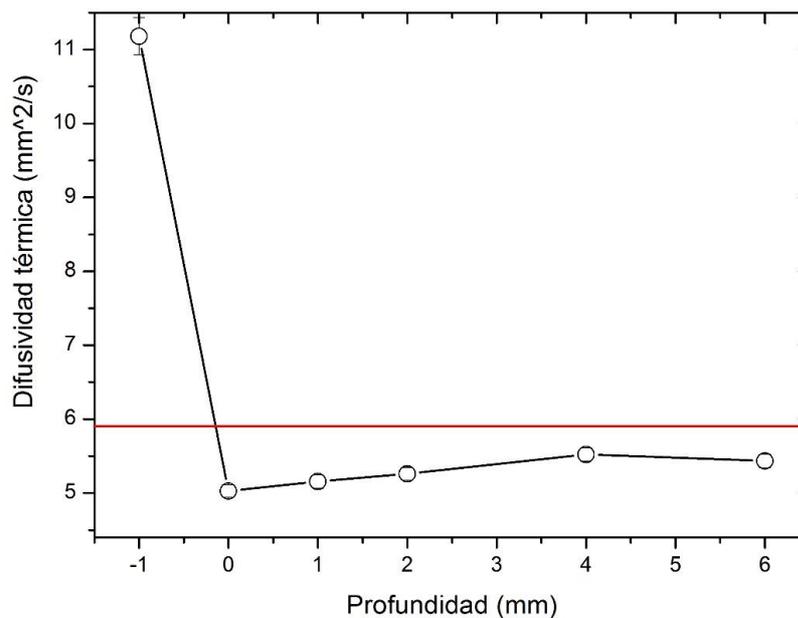


Grafico 1. Difusividad térmica aporte AISI H13

Como se puede ver en el gráfico la difusividad térmica aumenta levemente a medida que crece el aporte, pero está un poco por debajo de la difusividad del material puro, es decir, sin aportarlo por láser.

8.2 Análisis ensayo microdureza

Estos son los resultados de dureza obtenidos de la influencia del acero AISI H13 en el acero inoxidable AISI 316L, las durezas se adjuntan en escala de dureza Vickers y Rockwell C según la profundidad respecto de la última capa de material aportado (100 % AISI H13). El aporte es de alrededor de unos 4 mm, así que los siguientes valores a esa profundidad corresponden a la del sustrato AISI 1045.

Tabla 6. Ensayo 1 microdurezas

Profundidad (mm)	D1 (μm)	D2 (μm)	HV (Vickers)	HRC (Rockwell C)
0.2	28.01	27.68	717.5	60.9
0.45	26.73	26.74	778.3	63.2
0.7	28.82	29.88	645.8	57.6
0.95	28.44	29.58	661	58.4
1.2	48.59	48.3	237	19.8
1.45	46.57	45.25	263.9	24.7
1.7	49.91	50.1	22.5	16.1
1.95	48.92	47.446	239.6	20.3
2.2	49.67	50.02	223.9	16.5
2.45	50.11	50.04	221.9	16
2.7	50.44	50.46	218.6	15.2
2.95	49.63	50.3	228.8	16.2
3.2	50.56	48.38	227.3	17.3
3.45	59.8	60.09	154.8	0
3.7	49.16	48.47	233.5	18.9
3.95	48.32	48.3	238.4	20.1
4.2	51.75	57.75	207.7	12.8
4.45	52.16	51.6	206.7	12.6
4.7	53.76	53.76	192.5	9.1
4.95	53.88	54.15	188.7	8.2
5.2	55.01	54.83	184.2	7

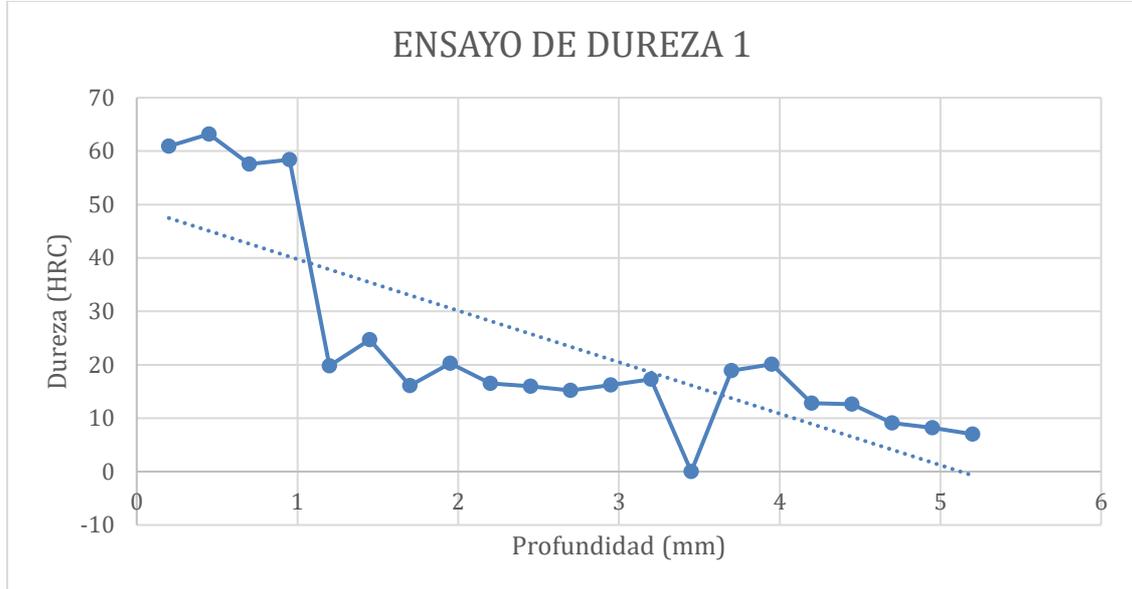


Grafico 2. Ensayo 1 microdurezas

Tabla 7. Ensayo 2 microdurezas

Profundidad (mm)	D1 (µm)	D2 (µm)	HV (Vickers)	HRC (Rockwell C)
0.2	27.14	26.81	764.5	62.7
0.45	26.92	27.01	765.1	62.7
0.7	27.03	27.39	751.4	62.2
0.95	29.19	29.2	652.7	58
1.2	40.34	40.4	341.4	34.6
1.45	51.65	53.03	203.1	11.8
1.7	51.3	50.92	213.2	14
1.95	49.85	50.34	221.7	15.9
2.2	50.44	50.94	216.5	14.8
2.45	51.76	51.75	207.7	12.8
2.7	50.44	50.46	218.6	15.2
2.95	50.11	50.04	221.9	16
3.2	50.14	51.61	218.6	15.8
3.45	48.31	48.3	238.4	20.1
3.7	43.46	43.21	297.2	29.4
3.95	49.16	48.47	233.5	18.9
4.2	52.16	51.6	206.7	12.6
4.45	51.75	51.75	207.7	12.8
4.7	53.88	54.15	188.7	8.2
4.95	53.88	53.76	192.5	9.1
5.2	55.01	54.83	184.2	7

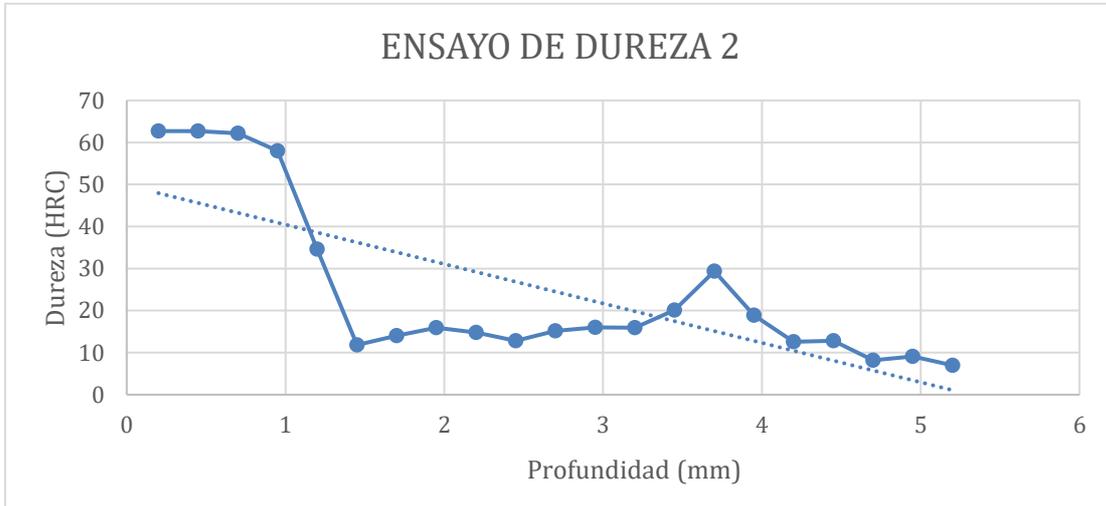


Gráfico 3. Ensayo 2 microdurezas

Como se puede observar ambas graficas son muy parecidas, los valores de dureza son muy aproximados en ambos ensayos y se ve una misma tendencia en la graficas. En las últimas capas donde solo hay acero AISI H13 se ve que la dureza es muy elevada mayor que la del propio material, que está en torno a 45-55 HRC, pero a medida que se combina con AISI 316L la dureza cae drásticamente, no se consigue la dureza gradual esperada, la gráfica es claramente no lineal.

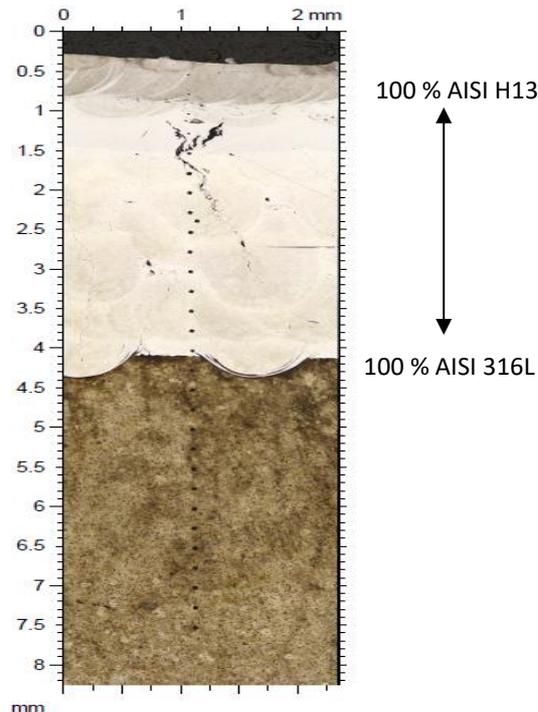


Ilustración 22. Indentaciones ensayo 2 microdurezas

8.3 Análisis microscopia

Aquí se adjuntan distintas imágenes realizadas con el microscopio Leica y óptico de defectos que se han generado en los dos ensayos, como poros y grietas, la unión sustrato-aporte y microestructuras.

8.3.1 Aporte AISI H13

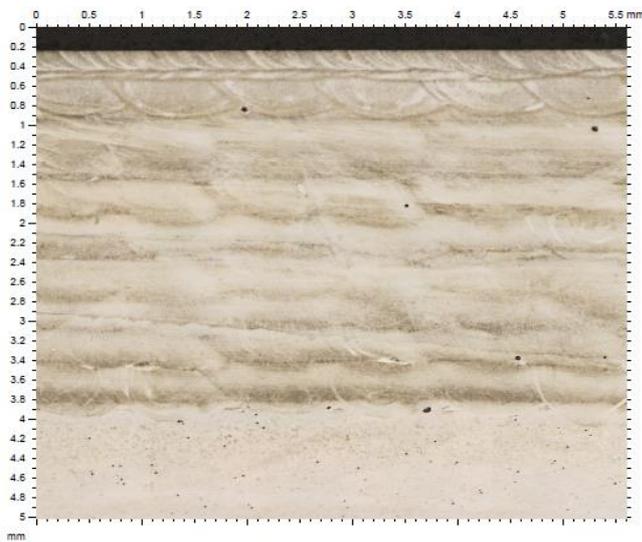


Ilustración 23. Cordones aporte AISI H13

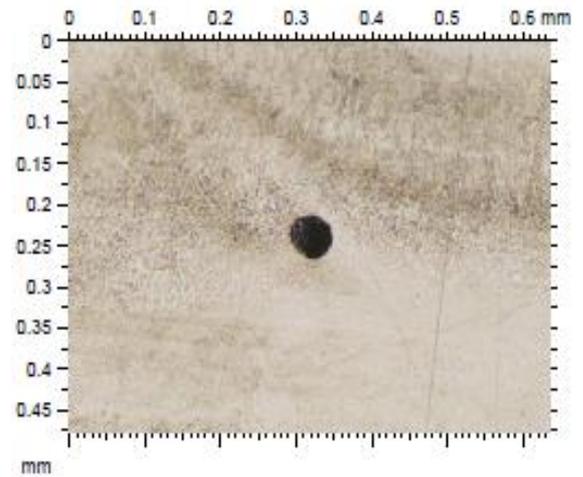


Ilustración 24. Poro aporte AISI H13

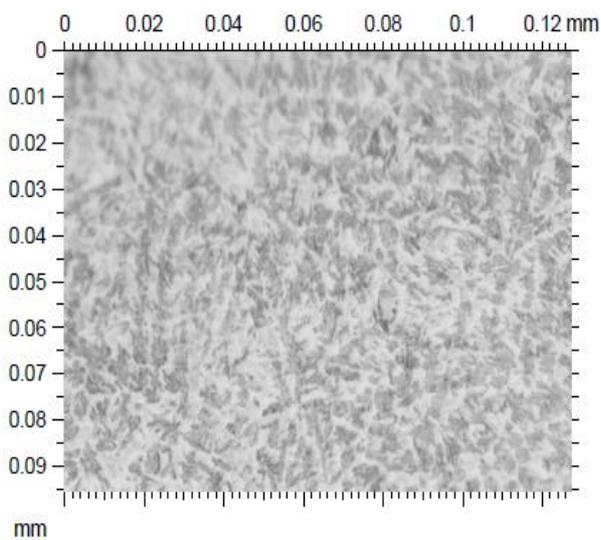


Ilustración 25. Microestructura primeras capas

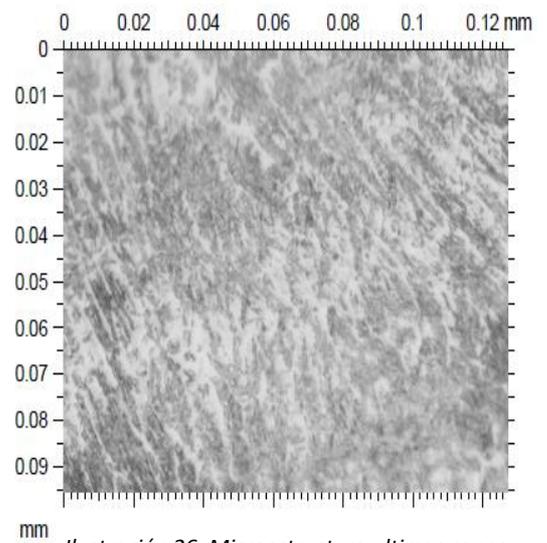


Ilustración 26. Microestructura ultimas capas

8.3.2 Aporte AISI H13/316L

Tras ataque con Marble:

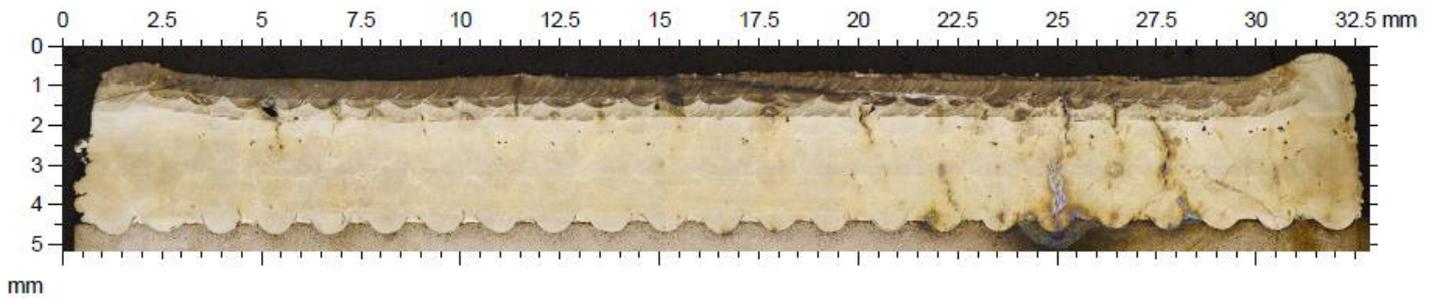


Ilustración 27. Aporte AISI 316L/H13

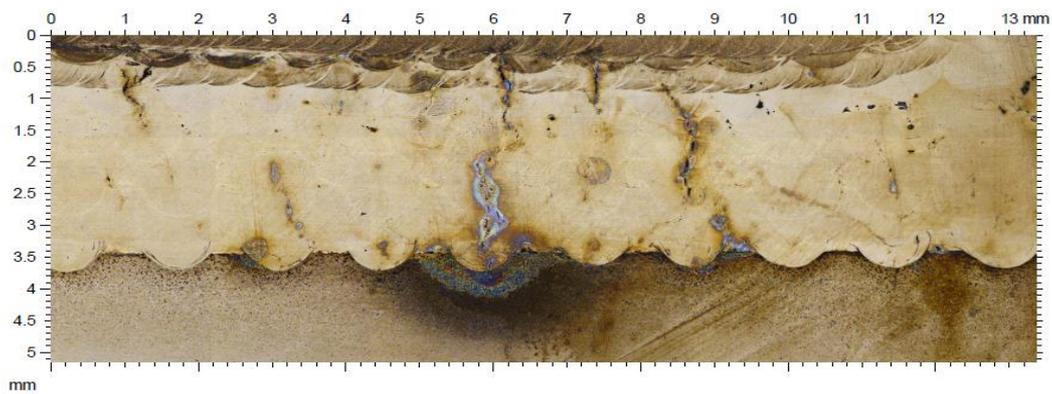


Ilustración 28. Concentración de grietas

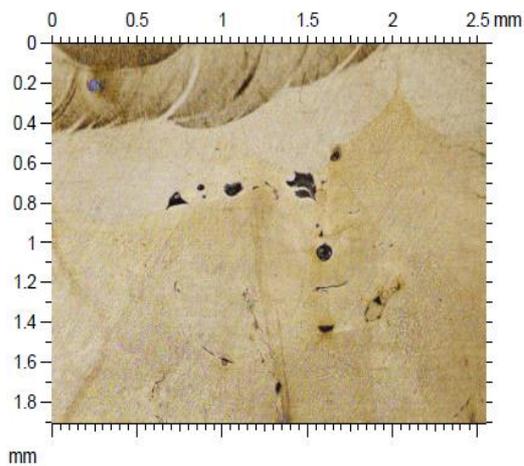


Ilustración 29. Poros aporte AISI 316L/H13

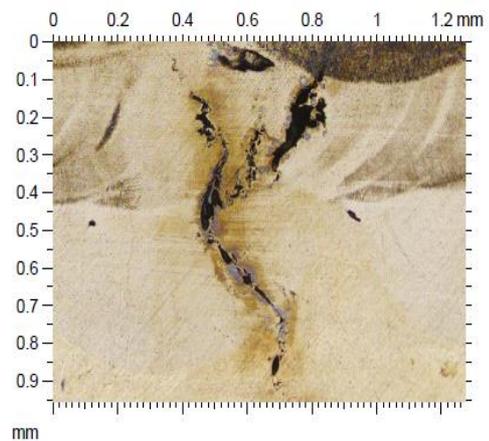


Ilustración 30. Grieta aporte AISI 316L/H13

Tras ataque con ácido oxálico:

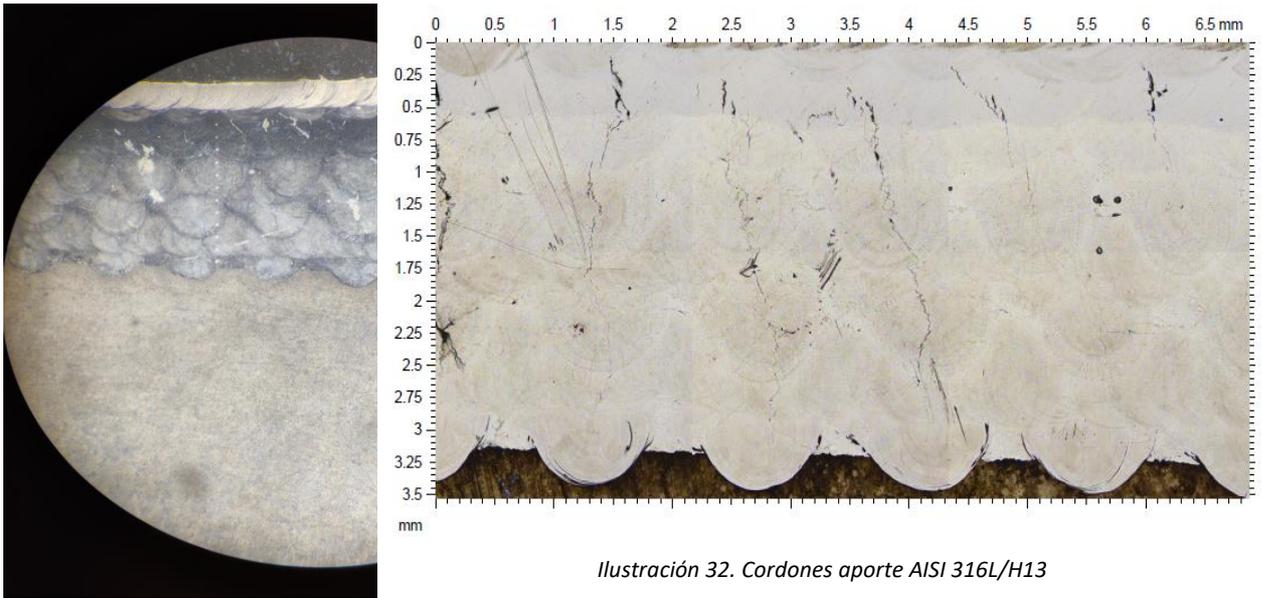


Ilustración 31. Aporte AISI 316L/H13

Ilustración 32. Cordones aporte AISI 316L/H13

En el aporte de AISI 316L/H13 se puede observar que hay una cantidad considerable de defectos como grietas y faltas de llenado de gran tamaño, que se concentran sobre todo en la parte derecha de la probeta. Las grietas se han generado a largo de todo el aporte tanto en las primeras capas como en las últimas. En cambio, en el aporte de AISI H13 no se han encontrado demasiados defectos, algún poro que otro, pero son normales debido a la interacción del gas con el polvo.

Como se puede apreciar tras el ataque con Marble no se visualizan muy bien los cordones de las primeras capas de material aportado ya que están formadas en su mayoría por AISI 316L pero tras el ataque con ácido oxálico se pueden ver con mayor claridad (véanse ilustraciones 31 y 32). No obstante, con este ataque, al ser electrolítico, se ha llegado a quemar las zonas con mayor proporción de AISI H13 ya que se ha necesitado bastante tiempo de reacción con el ácido para conseguir visualizar las de AISI 316L (véase ilustración 31).

9. Descripción de tareas. Diagrama Gantt

9.1 Descripción de tareas

Durante el desarrollo de este proyecto se llevan a cabo una serie de tareas para la ejecución del mismo. En el período que ha durado este trabajo, se han anotado las fechas importantes como se puede observar en el diagrama Gantt, disponible al final de este apartado.

La evolución del proyecto es la siguiente:

Documentación sobre el tema

Antes de comenzar con el trabajo, el primer paso a dar es informarse del proceso LMD y los materiales FGM, de los materiales sobre los que se va a aportar y los materiales que se van a aportar. Para ello, se necesita documentación referente al estudio (documentos científicos sacados de Internet, libros sobre el tema... etc.).

Planificación del proyecto

Se toman las decisiones sobre que materiales se van a emplear para la investigación en base a la documentación previa. Además, se decide que estudios realizar en los experimentos.

Preparación de los experimentos

Antes de comenzar con los ensayos, es necesaria una preparación previa del material a utilizar; ya sea la limpieza y relleno de las tolvas del alimentador, como, cortar y rectificar el sustrato para obtener la superficie deseada en los experimentos.

Ensayos experimentales

Se ejecutan los aportes y finalmente, se cortan, encapsulan, lijan y pulen las probetas para poder analizarlas mediante el microscopio confocal Leica y realizar su correspondiente ensayo de durezas.

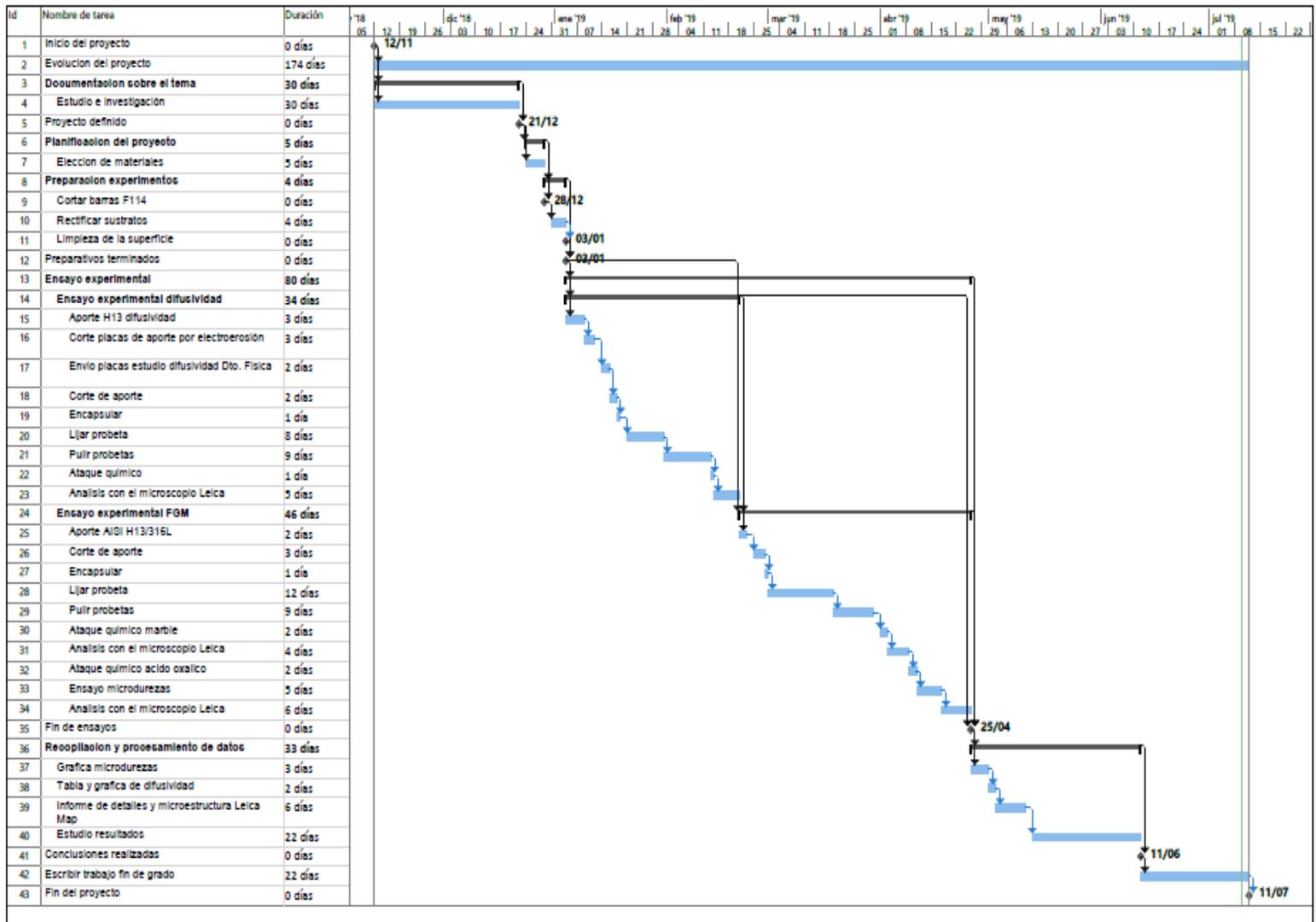
Recopilación de datos

Se recoge toda la información de durezas y valores de difusividad y se pasan a tablas y gráficas para poder estudiarlas. Se recopilan todos los datos y fotos sobre la geometría, poros, grietas y microestructura para su posterior evaluación. Para terminar, se procesan los datos y redactan conclusiones en base a los conocimientos adquiridos.

Escribir el trabajo fin de grado

En este paso, se documenta todo el trabajo realizado durante la investigación dejando de forma clara las conclusiones.

9.2 Diagrama de Gantt



10. Presupuesto

En este apartado se hace una variación económica de todos los elementos necesarios para llevar a cabo este proyecto. A continuación, se desglosa el presupuesto en tres partidas: horas internas, amortizaciones y gastos. Dado que no es el objetivo de este proyecto, el presupuesto que se adjunta a continuación será un presupuesto aproximado del proyecto.

Recursos humanos

Tabla 8. Costes recursos humanos

Horas internas	Salario	Tiempo	Total
Ingeniero senior	50 €/h	50 h	2500 €
Ingeniero en practicas	20 €/h	350 h	7000 €
Técnico de taller	30 €/h	85 h	2550 €
			12050 €

Total Recursos humanos	12050 €
-------------------------------	----------------

Recursos materiales

- Amortizaciones

Tabla 9. Costes de amortizaciones

Máquina herramienta	Coste	Tiempo	Vida útil	Total
Centro Laser	315.000 €	20 h	8 años	89.9 €
Corte, pulido y encapsulamiento	-	85 h	-	8.71 €
Rectificadora	50.000 €	40 h	9 años	25.36 €
Microscopio Leica	280.000 €	25 h	6 años	133.18 €
Microdurómetro	100.000 €	10 h	5 años	22.83 €
				280 €

Equipo informático	Coste	Tiempo	Vida útil	Total
Portátil HP	600 €	350 h	4 años	6 €
Torre de ordenador HP	1.000 €	250 h	4 años	7.13 €
Licencia Microsoft Office	200 €	200 h	1 año	4.56 €
Licencia Leica	2.000 €	25 h	1 año	2.56 €
				21 €

- **Gastos**

Tabla 10. Costes de gastos

Material de oficina	Coste	Total
Papelería	40 €	40 €
Fotocopias	50 €	50 €
		90 €

Materiales	Coste	Total
Barra F114	50 €	50 €
Polvo AISI H13	300 €	300 €
Polvo AISI 316L	500 €	500 €
Lijas de carburo de silicio	300 €	300 €
Paños de base metálica	200 €	200 €
Spray de diamante	100 €	100 €
Resina para encapsular	50 €	50 €
Argón	100 €	100 €
Reactivo Marble	50 €	50 €
Ácido oxálico	70 €	70 €
		1720 €

Total recursos materiales	2.111 €
----------------------------------	----------------

Tabla 11. Presupuesto final

Subtotal	14.161 €
-----------------	-----------------

Costes indirectos (15%)	2.124 €
--------------------------------	----------------

Costes directos e indirectos	16.285 €
-------------------------------------	-----------------

Imprevistos (5%)	814 €
-------------------------	--------------

IVA (21 %)	3.590 €
-------------------	----------------

Total	19.875 €
--------------	-----------------

Para este proyecto se tiene en cuenta el trabajo de dos ingenieros y un técnico para el cálculo de horas internas, cuyo coste total es de 12050 € (véase Tabla 8).

En cuanto a los recursos materiales se han tenido en cuenta por una parte las máquinas del taller y el equipo informático y por otra parte los gastos de materiales, ya sean para el taller o la oficina. El coste de los recursos materiales es de 2111 € (véanse Tabla 9 y Tabla 10).

Para calcular los costes indirectos como la de la luz general se van a estimar como un 10% de los gastos directos. Para los imprevistos que puedan suceder a lo largo de la evolución de proyecto se ha calculado un 5% de los gastos directos e indirectos (véase Tabla 11).

En el cálculo del IVA se han tomado en cuenta los imprevistos y los costes directos e indirectos. Con lo que finalmente se obtiene el presupuesto final de todo el proyecto, un coste total de 19875 €.

12. Discusión y conclusiones

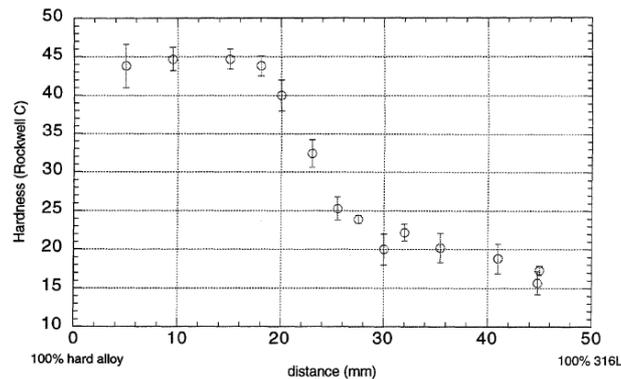
12.1 Discusión

Como se ha podido comprobar en los resultados obtenidos, por una parte, en cuanto al estudio de difusividad, en las primeras capas de aporte, donde se es más propenso a atrapar gas e impurezas, la tasa de enfriamiento es mayor, el calor tarda más en penetrar entonces la solidificación del material es más rápida. En esta zona se ve que la difusividad es menor, el calor se propaga más despacio que en capas posteriores por lo que el grano de material es más fino (véase ilustración 25) pero a medida que el aporte crece la temperatura y el gradiente térmico en él van aumentando debido a la constante interacción con el láser, por lo que la difusividad es mayor, la tasa de enfriamiento es menor y el grano de material tiende a ser más grueso (véase ilustración 26), entonces el calor se propaga más rápido y fácilmente debido a que hay menor cantidad de límites de grano.

Por lo que corresponde al ensayo de aporte AISI 316L/H13, en las gráficas de dureza se ve claramente que en las capas donde se empieza a mezclar el acero AISI H13 con el acero AISI 316L, concretamente a 1.2 mm de profundidad, la dureza cae desde 60 HRC hasta valores de 35-20 HRC. Además, no se consigue ningún aumento gradual de dureza en las capas con combinación de ambos materiales ya que no se consiguen sobrepasar casi los 20 HRC y el AISI 316L normalmente suele tener una dureza menor pero cercana a esta. Como se puede observar las capas con combinación de ambos materiales en las que predomina el AISI H13 las microestructuras deberían tener una matriz martensítica debido a este acero, pero pierden su dureza casi en su totalidad debido a la interacción con el AISI 316L.

En un principio se supuso que las tolvas no alimentaban bien el AISI H13, ya que debido a la baja dureza no había indicios de que en esas capas hubiera de este acero, pero se hizo la prueba de que las dos tolvas alimentaban correctamente los dos polvos. Además, después de realizar los dos ataques para visualizar los cordones de soldadura, el ataque con ácido oxálico y Marble, se pudo comprobar que la pieza está formada por ambos materiales en las proporciones que se habían programado ya que con el ataque con Marble se conseguía visualizar el AISI H13 últimas capas son las que mejor se distinguen ya que hay mayor proporción de AISI H13 y con el ácido oxálico se consiguen visualizar mejor los cordones en los que la proporción de AISI 316L es mayor. Otra de las suposiciones de este fallido ensayo de dureza podría ser la cantidad de defectos y discontinuidades que se encontraban en la muestra, ya que los resultados obtenidos podrían estar ligados a la pérdida de dureza por la formación de grietas.

Se intentó buscar artículos científicos que presentaran el mismo problema y se dio con uno llamado "*Functional Gradient Metallic Prototypes through Shape Deposition Manufacturing*" J. Fessler, A. Nickel, G. Link, F. Prinz, Stanford University (1996) que realizaba el mismo ensayo, pero en vez de acero AISI H13, se utilizaba INVAR, una aleación de hierro, níquel y manganeso de gran dureza. La gráfica de dureza de este ensayo, que a continuación se adjunta, presentaba el mismo problema, no era gradual. La dureza se perdía en porcentajes de 80-70 % de Invar. La única explicación dada posible era que al mezclar estos dos materiales la variación del contenido en carbono disminuía y con esto se perdía dureza.



En referencia al análisis de microscopia, se puede observar la gran cantidad de grietas que se encuentran sobre todo en la parte derecha del aporte. Esto puede ser debido a la sobreacumulación de material que hay en esta zona (véase ilustración 27) por lo que ha estado en mayor tiempo interaccionando con el láser y se podría tratar de un tema térmico, en el que un calentamiento excesivo de esta zona ha originado todas estas grietas. Por otra parte, los poros o faltas de llenado son más comunes en este tipo de ensayos ya que dependen mayormente de la cantidad de material que se aporta en relación con el caudal de gas de protección que se emplee y a poco que estos caudales sean algo bajos y la potencia del láser no sea la adecuada, se generan poros. Todos estos defectos pueden ser debidos también a la mala parametrización del ensayo ya que al haber hecho una interpolación de los valores en función de los materiales utilizados puede no ser una buena idea a la hora de fabricar la pieza.

12.2 Conclusiones

A lo largo del desarrollo del presente trabajo, se ha demostrado que la elección y combinación de materiales, estrategia de aporte y los parámetros a programar en la maquina son de gran importancia para una buena ejecución de aporte por láser.

Como conclusiones de este proyecto, se puede decir que si se pretende buscar un aumento de dureza gradual a lo largo de la pieza a fabricar no es conveniente juntar los aceros AISI H13 Y AISI 316L, ya que la gran dureza del acero de herramientas se pierde casi por completo, no tiene casi influencia en el inoxidable, como se ha podido comprobar son incompatibles. En cambio, para hacer recubrimientos de AISI H13 no habría ningún problema ya que, al no combinarlo se pueden conseguir durezas muy elevadas.

Para líneas futuras, se va intentar buscar una mejor combinación de materiales, así como una mejor parametrización y estrategia en el aporte para conseguir unos resultados más óptimos. Si

que es verdad, que al ser dos materiales muy usados en la industria se pensaba que a primera vista no iba haber ningún inconveniente, pero al parecer son dos material muy dispares e incompatibles.

Por otra parte, el estudio de difusividad nos ha aportado un conocimiento muy interesante ya que al aportar por laser este material las propiedades térmicas, en este caso de difusividad se pierden en un pequeño porcentaje, y esto a la hora de hacer, por ejemplo, simulaciones térmicas hay que tenerlo en cuenta puesto que no se parte del material en bruto, sino de un aporte por laser de este. Con este proceso de fabricación, no se consiguen los valores de difusividad del material en bruto, pero son muy cercanos a este.

13. Referencias

- [1] Toyerskani, E.; Khajepour, A.; Corbin, S. *Laser Cladding*, 1a ed.; CRP Press LLC: Boca Raton, Florida 33431, USA, 2005
- [2] Rofin Laser Macro. *Catálogo Serie FL*; ROFIN-SINAR Laser GmbH; Hamburgo, Alemania, 2011
- [3] J. Fessler, A. Nickel, G. Link, F. Prinz. (1996) "Functional Gradient Metallic Prototypes through Shape Deposition Manufacturing"
- [4] Fessler, J., Merz, R., Nickel, A., Prinz, F., and Weiss, L. (1996) "Laser Deposition of Metals for Shape Deposition Manufacturing," Proceedings of Solid Freeform Fabrication Symposium, The University of Texas at Austin
- [5] D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach and R. Poprawe, "Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms," *International Materials Reviews*, 2012.
- [6] Y. Miyamoto, W.A. Kaysser, B.H. Rabin, A. Kawasaki, R.G. Ford. *Functionally Graded Materials: Design, Processing and Applications*. Kluwer Academic Publishers, Boston, USA, 1999.
- [7] https://www.trumpf.com/es_ES/ (Último acceso Julio 2019)