



Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitatea



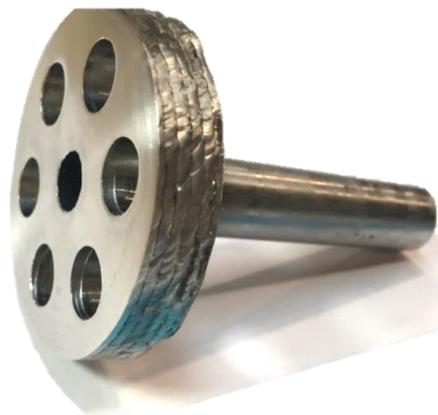
Ingeniaritza Goi Eskola Teknikoa
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Bilbao

Estudio experimental del aporte de material en forma de hilo por Laser Cladding

Trabajo de Fin de Máster en Ingeniería Industrial

Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

Curso 2015/2016



Alumna: Laura Huarte-Mendicoa Hallett

Director: Aitzol Lamikiz Mentxaka

AGRADECIMIENTOS

A mis padres y hermano, que han sabido darme el apoyo necesario durante los seis años de carrera y durante la realización de este proyecto, y me han sabido guiar tanto en los buenos como en malos momentos.

Al equipo láser del Taller de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco, donde he realizado el proyecto. En especial a Iñaki, por su constante ayuda, paciencia y dedicación.

A mi tutor Aitzol, que me ha guiado y ayudado en todo momento y me ha dado esta oportunidad de realizar mi Trabajo de Fin de Máster con ellos.

Al Aula Tecnalia, en especial a Amaia Alberdi y Alfredo Suárez.

A mis amigos, abuelos y tíos.

Contenido

RESUMEN TRILÍNGÜE.....	6
LISTA DE FIGURAS Y TABLAS.....	9
MEMORIA	14
Objetivos y alcance del trabajo	15
Beneficios que aporta el trabajo	16
Estado del arte.....	17
Análisis de alternativas.....	22
<i>Plasma vs. Láser.....</i>	<i>22</i>
<i>Polvo vs. Hilo.....</i>	<i>23</i>
Análisis de riesgos	27
METODOLOGÍA.....	30
Equipo y material empleado	31
Diseño del sistema de alimentación.....	34
Determinación de parámetros para el aporte de hilo	39
<i>Ensayos sin aporte de material.....</i>	<i>39</i>
<i>Ensayos con cordones simples.....</i>	<i>40</i>
<i>Ensayos con cordones solapados.....</i>	<i>44</i>
<i>Ensayos con una geometría circular.....</i>	<i>47</i>
<i>Ensayos sobre una geometría cilíndrica</i>	<i>49</i>
Aporte de la pieza demostradora.....	58
Medición de la dilución y la zona afectada térmicamente	68

Estudio comparativo entre el aporte con hilo y con polvo	71
<i>Comparación de las propiedades mecánicas.....</i>	72
<i>Comparación de la microestructura</i>	75
<i>Comparación de la microdureza.....</i>	76
<i>Comparación de la eficiencia y los costes de los procesos</i>	78
ASPECTOS ECONÓMICOS	81
Presupuesto.....	82
CONCLUSIONES	84
BIBLIOGRAFÍA.....	87
ANEXO	89

RESUMEN TRILÍNGÜE

TÍTULO: Estudio experimental del aporte de material en forma de hilo por Laser Cladding.

RESUMEN: La competencia y la constante evolución del mercado de la Fabricación Aditiva, y en concreto del Laser Cladding, como en cualquier otro mercado industrial, demandan una alta productividad y una buena calidad de los recubrimientos. El objetivo principal de este trabajo, realizado en el Taller de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco, es analizar estos dos factores basándose en el aporte de material en forma de hilo, y hacer una comparación de los resultados que se obtendrían con el aporte de polvo. Como indicador de la productividad se ha utilizado la tasa de aporte, y para analizar la calidad del aporte se han observado los defectos y el crecimiento de los cordones tanto en altura como en anchura. Otros factores como la dilución y la reducción de costes, también se han tenido en cuenta.

PALABRAS CLAVE: Hilo, aporte, Laser Cladding, cordón, polvo, láser.

TITLE: Experimental study of the wire-form filler material by Laser Cladding

ABSTRACT: The competition and the constant evolution of the Additive Manufacturing market, and in particular the Laser Cladding market, as in any other industry, demands that a high productivity and quality of coatings are to be achieved. The main purpose of this work, which was developed in the Mechanical Engineering workshop in the University of the Basque Country, is to analyse these two factors when Laser Cladding is carried out with wire feeding, and to make a comparison of the results obtained from wire feeding and from powder feeding. The material deposition rate was considered as a productivity indicator and, so as to analyse de quality of the coatings, defects have been observed, as well as the clads' width-to-height ratio. Other factors such as dilution and cost reduction were also taken into account.

KEY WORDS: Wire, feeding, Laser Cladding, clad, powder, laser.

IZENBURUA: Laser Cladding bitartez hari formako materiala gehitzearen ikerlan esperimentalak.

LABURPENA: Fabrikazio gehigarrien merkatuaren konpetentzi eta eboluzio jarraituak, eta zehazki Laser Cladding-ak, produktibitate altu bat eta estalduraren kalitate on bat eskatzen dute. Hori dela medio, lan honen helburu nagusia hari formako materiala gehitzean oinarrituz, aldagai horien analisi bat gauzatzea izan da eta lorturiko emaitzak hauts formako materiala gehitzearekin alderatu dira. Produktibitatearen adierazle bezala gehitze indizea erabili da eta gehituriko materialen kalitatea aztertzeko, alde batetik, kordioaren altuera zein zabalera neurtu dira eta bestetik, agertu diren akatsak aztertu dira. Diluzioa eta kostuen murrizketa bezalako faktoreak ere kontutan hartu dira. Proiektua Euskal Herriko Unibertsitateko Ingeniaritza Mekanikoko Tailerlean garatua izan da bere osotasunean.

HITZ GAKOAK: Haria, gehitzea, Laser Cladding, kordioa, hautsa, laserra.

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

Lista de figuras

Figura 1. Comparación del Laser Cladding con otras técnicas de prototipado (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005).....	18
Figura 2. Esquema de aporte de polvo en Laser Cladding	19
Figura 3. Recubrimiento de una pieza cilíndrica por Laser Cladding	20
Figura 4. Esquema de boquilla de Laser Cladding con polvo (izquierda) y con hilo (derecha) ...	24
Figura 5. Dilución de polvo e hilo en distintos materiales	25
Figura 6. Configuraciones de boquilla para aporte de polvo	26
Figura 7. Matriz impacto-probabilidad de riesgos	27
Figura 8. Señalizaciones de peligro de los láseres de Clase 4	28
Figura 9. Máquina de láser Rofin-Sinar FL 010 y sus propiedades.....	31
Figura 10. Máquina para procesamiento láser Kondia Aktinos-500	32
Figura 11. Sistema de refrigeración de láser KKT Kraus.....	33
Figura 12. Alimentador de hilo Tig-Fil y bobina de hilo dentro del alimentador	34
Figura 13. Control del alimentador de hilo	35
Figura 14. Salida de 3 polos del alimentador	35
Figura 15. Conjunto del diseño de la alimentación.....	37
Figura 16. Sistema de alimentación	38
Figura 17. Montaje del sistema de alimentación.....	40
Figura 18. Programación de la línea 3	41
Figura 19. Aporte de las líneas 1-5.....	42
Figura 20. Programación de la línea 6.....	42
Figura 21. Programación de la línea 10.....	43
Figura 22. Aporte de las líneas 1-13	44
Figura 23. Programación de las líneas 17.....	45

Figura 24. Aporte de las líneas 14-18.....	46
Figura 25. Cascarilla formada sobre los cordones	46
Figura 26. Programación empleada en el aporte de un círculo de diámetro 45 mm	47
Figura 27. 3 capas de aporte de un círculo de diámetro 45 mm	48
Figura 28. 6 capas de aporte de un círculo de diámetro 45 mm	48
Figura 29. Error debido a un mal posicionamiento del hilo	50
Figura 30. Sistema de alimentación con un correcto posicionamiento del hilo	50
Figura 31. 1ª capa de aporte de la pieza	51
Figura 32. 3ª capa de aporte de la pieza	51
Figura 33. 4ª capa de aporte de la pieza	52
Figura 34. 6ª capa de aporte de la pieza	52
Figura 35. 8ª capa de aporte de la pieza	53
Figura 36. 14ª capa de aporte de la pieza	54
Figura 37. Resultados de la pieza	54
Figura 38. Detalle de los cordones de la pieza	55
Figura 39. Pieza torneada y refrentada.....	57
Figura 40. Vista frontal y parte inferior de la pieza torneada y refrentada	57
Figura 41. Brida industrial	58
Figura 42. Pieza test con 3 capas y 10 cordones por capa	59
Figura 43. Calor acumulado en la pieza test	60
Figura 44. Pieza test con 13 capas y 10 cordones por capa en la máquina láser	60
Figura 45. Pieza test con 13 capas y 10 cordones por capa	61
Figura 46. Pieza test con 20 capas y 7 cordones y medio por capa	61
Figura 47. Pieza demostradora	62

Figura 48. Pieza test refrentada	63
Figura 49. Detalle de la superficie refrentada de la pieza test	63
Figura 50. Pieza test	64
Figura 51. Detalle de la superficie refrentada de la pieza test	64
Figura 52. Sistema de alimentación afectado por el calor	66
Figura 53. Sección transversal de un cordón	68
Figura 54. Ángulo de mojado	69
Figura 55. Sección transversal de 5 cordones solapados.....	70
Figura 56. Estrategia ZIG-ZAG aplicada en el caso del polvo	71
Figura 57. Forma final de la pieza de polvo (izquierda) y de hilo (derecha)	71
Figura 58. Pieza test para el ensayo de tracción.....	72
Figura 59. Piezas test de polvo (izquierda) y de hilo (derecha) preparadas para el ensayo.....	72
Figura 60. Montaje de una probeta en la máquina de ensayo a tracción y su rotura	73
Figura 61. Resultados de los ensayos de tracción para las probetas de hilo y polvo	74
Figura 62. Detalle de las secciones de rotura.....	75
Figura 63. Secciones transversales pulidas y atacadas	76
Figura 64. Detalles de la sección transversal sin defectos en el caso del polvo y de los defectos encontrados en el caso del hilo.....	76
Figura 65. Dureza en acero inoxidable 316 (izquierda) y en acero de herramientas H13 (derecha) con polvo e hilo.....	77
Figura 66. Dureza en acero de herramientas AISI P20 con polvo e hilo	77

Lista de tablas

Tabla 1. Propiedades de Kondia Aktinos-500.....	32
Tabla 2. Composición en % en peso del material de aporte FG-316S.....	33
Tabla 3. Disposiciones máximas y mínimas del alimentador de hilo	38
Tabla 4. Resumen del crecimiento de cada capa de la pieza cilíndrica	56
Tabla 5. Resumen del crecimiento de cada capa de la pieza test.....	65
Tabla 6. Resultados de los ensayos a tracción	74
Tabla 7. Comparación de los gastos de los procesos de Laser Cladding con polvo e hilo	79
Tabla 8. Horas internas del proyecto	82
Tabla 9. Amortizaciones del proyecto.....	82
Tabla 10. Gastos del proyecto	83
Tabla 11. Resumen del descargo de gastos	83

MEMORIA

Objetivos y alcance del trabajo

Este estudio consiste en la experimentación del aporte de material en forma de hilo con la técnica de fabricación aditiva Laser Cladding. Esta técnica consiste en la fusión directa por aporte láser de material metálico, ya sea éste polvo o hilo, depositado en la superficie de un sustrato, con el fin de obtener recubrimientos y estructuras con propiedades idénticas o mejoradas respecto a las del material base. En este punto se proyectan los principales objetivos que se plantean en este proyecto.

Dentro del aula Tecnalia y a demanda de este centro tecnológico, los experimentos se han desarrollado en la célula de Laser Cladding del Taller de Ingeniería Mecánica de la Universidad del País Vasco UPV/EHU, con acero inoxidable como material de aporte y material base asegurando una buena compatibilidad entre ambos. El trabajo se divide en tres partes. El primer punto presenta la memoria, la motivación y los objetivos del proyecto, así como el estado del arte y las alternativas existentes al aporte de material en forma de hilo por Laser Cladding. En este punto también se lleva a cabo un análisis de los riesgos que conlleva realizar el proyecto y en un futuro aplicar el proceso de Laser Cladding con aporte de hilo.

En el segundo capítulo se desarrolla el procedimiento experimental seguido para realizar el trabajo, el cual comienza por la descripción de los equipos y el material empleado, continúa con el diseño y la fabricación del sistema de alimentación de hilo para seguidamente realizar los ensayos necesarios que determinarán los parámetros óptimos de aporte. En este mismo punto se realiza un estudio comparativo entre los resultados obtenidos con aporte de polvo y con aporte de hilo. Finalmente se termina con el descargo de gastos del estudio y las conclusiones generales.

Beneficios que aporta el trabajo

El Laser Cladding mediante el aporte de polvo metálico está siendo poco a poco más aceptado en la industria como una técnica de fabricación aditiva por las grandes ventajas que presenta. Sin embargo, hay otros muchos aspectos a tratar y mejorar. Estos aspectos son los que han animado a la realización de este estudio y se presentan a continuación.

En primer lugar, se plantea aumentar la productividad del proceso. En este sentido, el aporte de material en forma de hilo presenta una mayor productividad que el aporte en forma de polvo. Se trata de una técnica con una tasa de aporte de material mayor, una característica fundamental en el aporte de recubrimientos de piezas de gran tamaño, en el que el tiempo y velocidad del aporte son aspectos vitales. En segundo lugar, el aporte en forma de hilo permite tener un 0% de desperdicio de material ya que su eficiencia másica es prácticamente del 100%. Esto se traduce en una tecnología más limpia y respetuosa con el medio ambiente que, además, implica una reducción de costes. Además, cabe destacar que el precio unitario del material en forma de hilo es mucho menor que el del material en polvo, en torno al 15%.

Por otro lado, existen muchas otras características del proceso de fusión metálica con aporte de polvo que es conveniente conservar en la aplicación de material en forma de hilo. Primeramente es importante mantener una buena unión del recubrimiento y el sustrato, manteniendo a su vez una baja dilución, es decir, que apenas se produzca aleación entre material base y material de aporte. Si esto sucediese, las propiedades de los materiales originales no podrían ser aseguradas. Además, es conveniente que la zona afectada térmicamente sea lo más pequeña posible, lo cual se traduce en una pequeña distorsión térmica. Tratando de mantener una buena calidad de las piezas fabricadas con esta técnica se requiere que no se formen grietas y que no haya porosidades.

Si todos estos aspectos mencionados se cumplen, esta técnica puede llegar a presentar grandes beneficios en cuanto a ahorro y propiedades mecánicas en los procesos de reparación de piezas, refuerzo de componentes y fabricación aditiva de piezas.

Estado del arte

Una de las tecnologías más novedosas tanto en la industria como en los centros de investigación son los procesos de Fabricación Aditiva. La Fabricación Aditiva, prácticamente desconocida hasta hace relativamente poco tiempo, está viviendo un auge sin precedentes debido a que se pueden fabricar componentes de alta complejidad en tiempos cortos y a un coste muy competitivo. (Ukar & Lamikiz, 2015)

La fabricación aditiva de metales consiste en manipular material en forma de polvo o hilo, fundirlo mediante un haz de alta potencia y depositarlo de forma precisa construyendo así un sólido. Esta etapa de deposición de material permite obtener una pieza de geometría casi igual que la final, que posteriormente es sometida a una etapa de mecanizado, en la cual se mejora la precisión geométrica y el acabado superficial del material aportado.

Los procesos de fabricación aditiva en la industria difieren tanto en capacidades como en aplicaciones. Los principales son: Fused Deposition Modelling (FDM), el cual se basa en un cabezal que se mueve en un plano y va fundiendo un filamento capa a capa; la estereolitografía (SLA) y PolyJet, con los cuales se obtienen piezas a partir de resinas líquidas que se curan con uno o múltiples haces de luz, garantizando así una excelente calidad tanto en precisión como en acabado superficial; fusión selectiva de lecho de polvo (SLM, SLS), un proceso que se basa en la fusión de una capa de polvo previamente depositado; y finalmente, la inyección directa de material (LMD, Laser Cladding), el cual permite, a través de la fusión de un material de aporte, generalmente en forma de polvo metálico sobre la superficie de un material, y mediante la acción de un haz láser, generar un recubrimiento de propiedades similares o mejoradas a las del sustrato base. Las ventajas del método incluyen una mínima dilución, baja y controlable entrada de calor en el sustrato, gran flexibilidad de procesado y reducida distorsión.

De esta manera, la principal diferencia del Laser Cladding respecto a otros procesos de fabricación aditiva es que se parte de una pieza fabricada por métodos convencionales como

fundición, forja o mecanizado y sobre ella se aporta material para generar una estructura o un detalle. También es posible aplicar material en una zona desgastada para su recuperación o directamente generar un recubrimiento de otro material.

Feature	Laser cladding (e.g., DMD, ALPD, etc.)	SLA	FDM	SLS	3D Printing
Dimensional accuracy	Moderate	Moderate	Moderate to high	Low	Low to Moderate
Prototype's material	Metals and ceramics	Polymers and photopolymers	Filament ABS plastic	Polymers, metals and ceramics	Hard plastic, runner
Prototype's quality	High	Low to moderate (e.g., fragile)	High	Low (e.g., Porosity and cracks)	Low (e.g., fragile)
Support structure	Not required	Required	Required	Not Required	Required
Cost of machine	High (still under R&D)	Relatively Moderate	Moderate	Moderate	Low

Figura 1. Comparación del Laser Cladding con otras técnicas de prototipado (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005)

Esta última tabla compara varios aspectos de estas técnicas de recubrimiento para mostrar las ventajas y desventajas de estos procesos en las aplicaciones de recubrimiento de piezas metálicas y no-metálicas.

La técnica de Laser Cladding crea una unión muy fuerte con poca dilución, además de generar una zona muy poco afectada por el calor en el sustrato. Sin embargo, el coste de inversión y el coste de mantenimiento de una máquina de Laser Cladding son altos, aunque, gracias al rápido crecimiento de una nueva generación de láseres, estos costes son cada vez menores. Por tanto, la tecnología LMD juega cada vez un papel más importante en el mercado de recubrimientos de piezas metálicas, reparación de piezas y fabricación de piezas 3D.

Para autores como Toyserkani, la aplicación de Laser Cladding debería competir con varias técnicas de recubrimiento importantes como la proyección térmica (arco eléctrico y arco de plasma), la soldadura, la deposición química de vapor (CVD) y la deposición física de vapor (PVD).

Dentro de la fabricación aditiva, la tecnología de Laser Cladding, por un lado, permite fabricar piezas de alto valor añadido en materiales de peor maquinabilidad con detalles y elementos geométricos imposibles para las técnicas convencionales de mecanizado por arranque de viruta. Además, estas últimas requieren un consumo energético y de fungibles muy elevado, y suponen unos costes energéticos y económicos del reciclado posterior de las virutas producidas durante su mecanizado. Los diseños con detalles complejos aportan unas funcionalidades mejoradas durante su empleo, por lo que optimizan el funcionamiento de los dispositivos que las integran, reducen las pérdidas energéticas y aumentan la vida útil de los mismos. Por otro lado, permite la cada vez más demandada recuperación de piezas de coste muy elevado, tales como las piezas del sector energético, eólico, ferroviario o aeronáutico, que han sufrido desgastes locales.

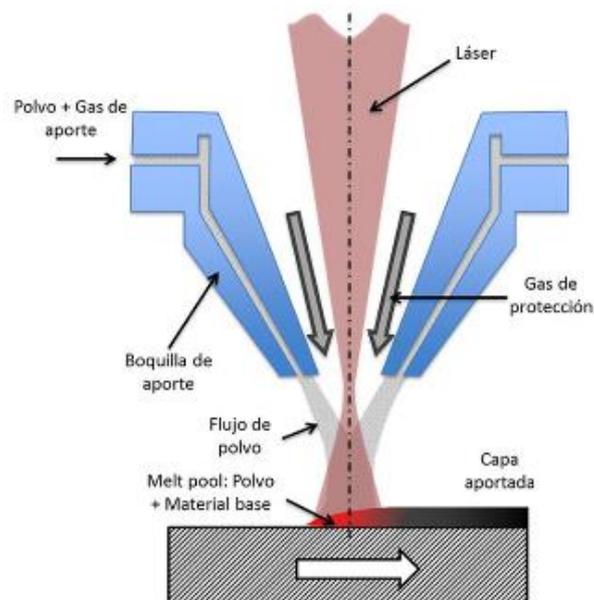


Figura 2. Esquema de aporte de polvo en Laser Cladding

Entre las principales ventajas del proceso de Laser Cladding destacan una mínima dilución, una baja y controlable entrada de calor en el sustrato, una alta velocidad de enfriamiento, una gran flexibilidad de procesado y una 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 reemplazar la pieza completa. Comparado con otras técnicas convencionales de deposición, la técnica permite obtener cordones de soldadura o recubrimientos libres de poros, grietas y deformaciones, con una buena unión metalúrgica con el sustrato. (IK4 TEKNIKER)



Figura 3. Recubrimiento de una pieza cilíndrica por Laser Cladding

Las aplicaciones industriales más comunes se pueden englobar en tres grandes áreas:

- Refuerzo de componentes mediante el recubrimiento con materiales de altas prestaciones. Se consigue así una protección frente al desgaste y la corrosión, e incluso que el material de aporte actúe de barrera térmica en moldes, matrices, herramientas, y alojamiento interior de componentes y conductos.

- Recuperación y reparación de herramientas, moldes, matrices, troqueles y engranajes, así como de piezas de alto valor añadido con errores en cotas de fabricación, grietas superficiales, desperfectos producidos en servicio o cambios de plano en prototipos.
- Fabricación aditiva de piezas y estructuras metálicas 3D.

La Fabricación Aditiva está incluida en la lista de las diez tecnologías disruptivas y con mayor capacidad de transformación del tejido productivo en el siglo XXI, según la investigación en negocios y economía realizada por McKinsey Global Institute. Los sectores en los que esta técnica está suscitando más interés son el de la aeronáutica y espacio, el de la automoción, el de las energías renovables, el de las infraestructuras y el de la máquina-herramienta y la fabricación.

En definitiva el Laser Cladding permite obtener recubrimientos con una calidad superior a otros procesos, se consigue una buena unión metalúrgica entre el sustrato y el aporte y se minimizan los efectos negativos como la dilución y el aporte energético a la pieza.

El desarrollo de la tecnología Laser Cladding depende del enriquecimiento de las tecnologías involucradas. Llegar a comprender las conexiones entre estas tecnologías y la calidad del proceso es un paso muy grande en su evolución. Además, un mayor número de interacciones entre las tecnologías implicadas no sólo supone un incremento de la complejidad del proceso, sino también un incremento del número de parámetros de los que depende.

Uno de los grandes retos de la fabricación aditiva en general, es aumentar la productividad del proceso. En este sentido, el aporte de material en forma de hilo presenta una mayor productividad que el aporte en forma de polvo así como un 0% de desperdicio de material.

Análisis de alternativas

En este apartado se trata de analizar algunas alternativas al proceso de aporte de material en forma de hilo por Laser Cladding. Una de estas alternativas es función del tipo de calor con el que se consigue la fusión de material y la otra de la forma del material de aporte sobre el baño fundido.

Plasma vs. Láser

Una de las alternativas a considerar en la aplicación de Laser Cladding es función del tipo de fuente de calor que se emplea para fundir el material base y el material de aporte en el recubrimiento y reparación de piezas. Sobre todo, interesa centrarse en la reparación de piezas de alto valor añadido que tanto interés está suscitando en la industria y en centros de investigación. Esta alternativa es el arco de plasma.

La técnica del arco tiene mayores productividades que el láser (Taberero, Arrizubieta, & Renderos). Esto se puede deber, principalmente a que la cantidad de material que permite es mayor debido a la mayor energía aportada. En cambio, el láser, admite menos material y por tanto menores productividades. Es por ello que el uso del láser como fuente de calor va enfocado al recubrimiento y reparación de geometrías sencillas pero de alto valor añadido.

A pesar de la alta productividad que presenta el arco, el uso de esta técnica puede generar un daño térmico y grandes distorsiones ocasionando fracturas en la zona aportada. En el caso del láser, al tener la energía más concentrada, las deformaciones térmicas son despreciables. Asimismo, con el láser como fuente de calor se consigue reducir las demasías para el posterior mecanizado. Esto se traduce en una gran precisión del proceso, tanto en espesor como en la geometría del recubrimiento.

Uno de los objetivos clave que se busca en la reparación de piezas es una baja dilución, es decir, intentar que se produzca la mínima aleación posible entre material base y material de aporte disminuyendo así el riesgo de que cambian propiedades importantes del material base.

Con una fuente láser se puede hacer un estricto control de este parámetro, permitiendo ajustar la composición del recubrimiento. Además, la fuente es más focalizada, dando una buena resolución del proceso.

Además de conseguir una baja dilución con el láser, la calidad de la unión entre material aportado y material base es buena, así como la calidad del material aportado. Se consiguen pocas imperfecciones y una baja porosidad. Cabe destacar la capacidad de automatización de una máquina láser y la alta velocidad de enfriamiento de material aportado por láser frente al aportado por plasma, consiguiendo así un mejor refinamiento de grano.

Finalmente, una desventaja del láser frente a la técnica de aporte por arco de plasma, es el coste de los equipos, siendo más económicos los de plasma. Además, el empleo del láser se puede complicar con la necesidad de personal altamente cualificado y de una elección adecuada del material de recubrimiento. También es necesario optimizar los parámetros del proceso mediante experimentación, controlando parámetros como la altura y la anchura del cordón aportado y la zona afectada térmicamente.

Polvo vs. Hilo

Otra alternativa a analizar es el empleo de polvo en lugar de hilo. Ambas tecnologías son empleadas para la reparación de zonas dañadas o el recubrimiento de piezas. El aporte de material metálico en forma de polvo por Laser Cladding es el más extendido en los sistemas de producción (Taberner, Arrizubieta, & Renderos). Esto se puede deber a las ventajas que presenta en cuanto a versatilidad de la aplicación y puesta a punto.

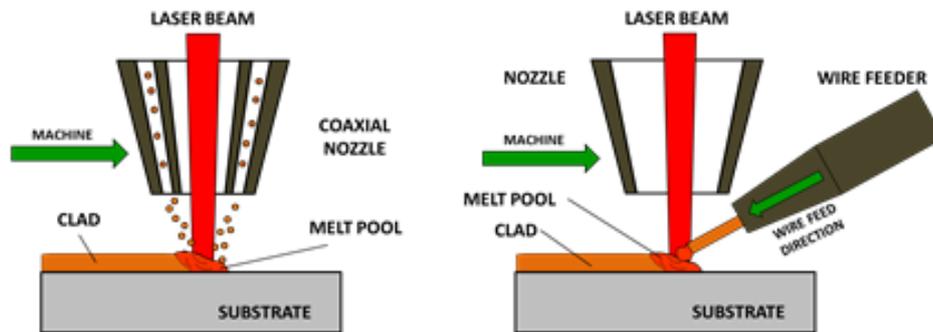


Figura 4. Esquema de boquilla de Laser Cladding con polvo (izquierda) y con hilo (derecha)

El aporte de polvo en el proceso de Laser Cladding resulta ser más versátil en cuanto a, por un lado el aporte, ya que se puede realizar en cualquier dirección, y en segundo lugar la geometría a aportar. En cambio, el hilo metálico sufre la desventaja de necesitar ser aportado de forma unidireccional. En cuanto a la geometría a aportar el hilo se considera generalmente aplicable a piezas rotativas o a recubrimientos en superficies de piezas de tamaño medio-grande.

Como se ha mencionado, la puesta a punto en el aporte de hilo resulta ser más complicada. Esto se debe a la precisión con la que el hilo se debe depositar sobre el baño fundido. Además, el hilo tiene una mayor tendencia a la desestabilización y es más vulnerable a errores que obliguen a parar el proceso, como puede ser la formación de gotas y poros. Otra desventaja del proceso de alimentación de hilo es un mayor valor de dilución respecto al del polvo, manteniéndose en los límites de dilución baja (5-10%). Este parámetro es un valor importante a controlar como se mencionaba en el apartado anterior, ya que no sólo supone una baja aleación entre el material base y el material de aporte, sino que además supone un mayor crecimiento de la primera capa de aporte y por tanto mejores tasas de aporte.

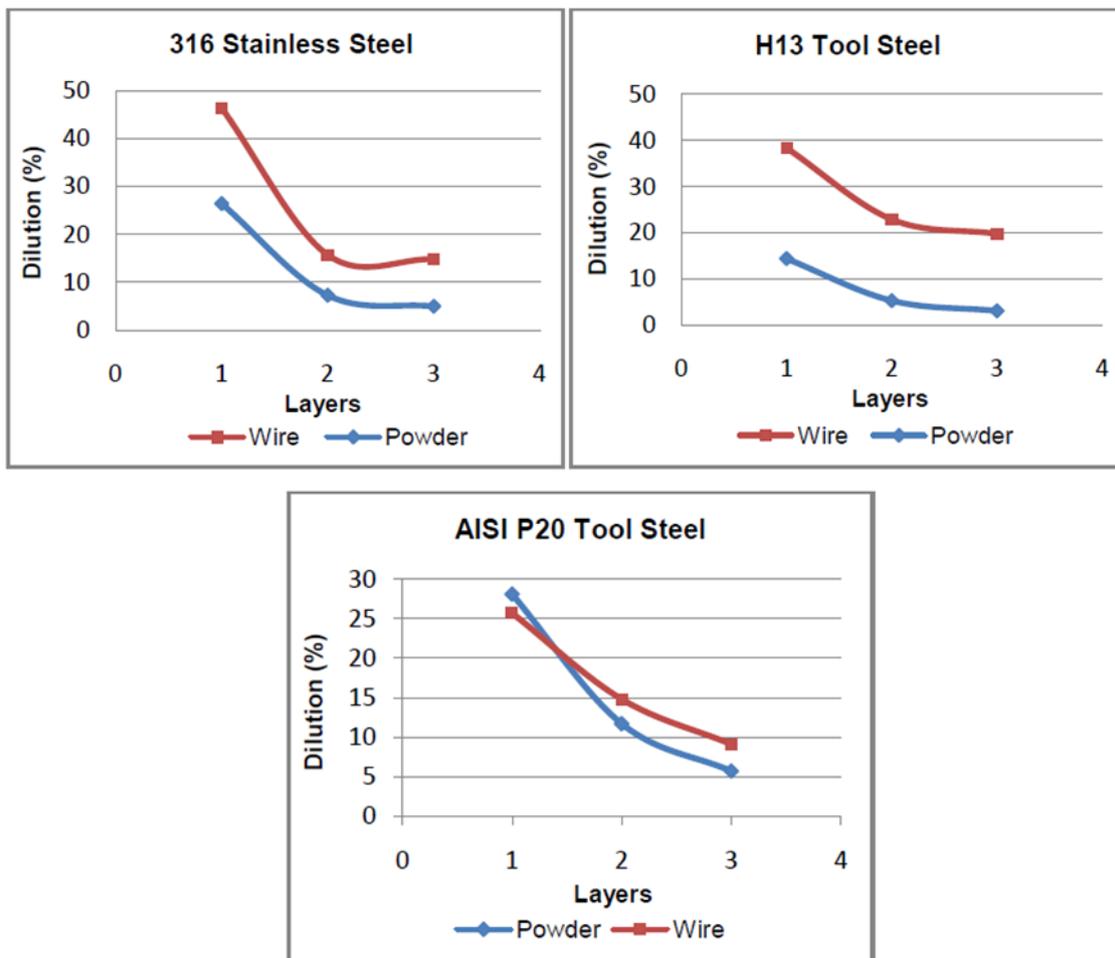


Figura 5. Dilución de polvo e hilo en distintos materiales

Debido a la evolución de la dilución en cada material base, es posible afirmar que el valor de la dilución en recubrimientos de polvo es siempre menor que en el caso de recubrimientos de hilo, excepto en el caso de acero de herramientas AISI P20 con un capa de aporte, en donde la dilución es aproximadamente igual. La razón por la que esto ocurre podría darse por el efecto de dos factores muy importantes: la velocidad y la potencia. Se conoce que la dilución decrece con el aumento de la velocidad de avance del láser y aumenta proporcionalmente con la potencia. Por esta razón, la dilución en Laser Cladding empleando polvo como material de aporte es menor que empleando hilo, porque el aporte de polvo se consigue con una mayor velocidad y una menor potencia como variables de entrada (Miguel Fonseca, Septiembre 2008).

Autores como Toyserkani (Toyserkani, Khajepour, & Corbin, 2005), afirman que el Laser Cladding con aporte de polvo ha demostrado ser más eficiente y flexible y que además, la inyección de polvo es un método mucho más robusto que la inyección de hilo, ya que no hay contacto directo entre el baño fundido y el haz láser. Por otro lado, es mencionado que las piezas fabricadas mediante el aporte de hilo tienen una calidad superficial más baja y que podrían aparecer problemas como porosidades, grietas y formación de gotas.

A pesar de que con el aporte de polvo se han llegado a conseguir calidades de aporte muy buenas, existen ciertas cualidades que hacen que el Laser Cladding por aporte de hilo sea una técnica a considerar. Una es la eficiencia másica, es decir, el cociente del material aportado y del material total inyectado. Con polvo se han llegado a conseguir eficiencias del 40%, mientras que con hilo ésta sería del 100%, puesto que el hilo es directamente llevado al baño fundido y no hay forma de que parte del material no sea fundido por el láser y transformado en parte de la pieza final.

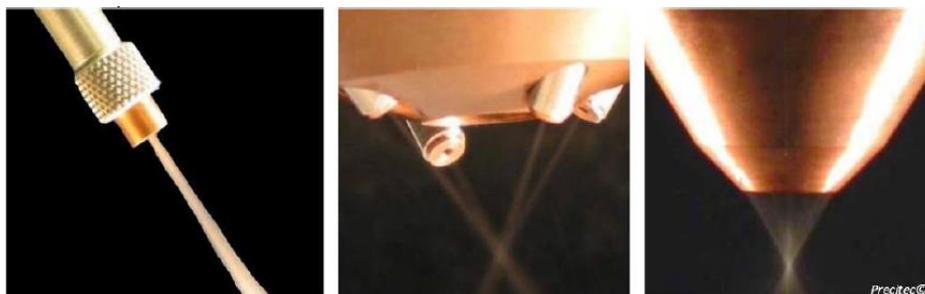


Figura 6. Configuraciones de boquilla para aporte de polvo

Las tasas de aporte pretenden ser mayores en el aporte de hilo que en el de polvo. Por otro lado, el material en forma de hilo resulta ser más barato que en polvo habiendo una diferencia de casi el 85%. Además, la oferta que hay de ciertos materiales en forma de hilo para procesos de soldadura reduce su precio unitario considerablemente.

Finalmente, cabe destacar que durante el proceso de LMD por aporte de polvo, el centro de procesado láser tiende a mantenerse sucio. Esto complica la puesta a punto y además puede provocar problemas de salud. Con el aporte de hilo, en cambio, este problema se soluciona gracias a la eficiencia másica que se ha mencionado previamente.

Análisis de riesgos

A lo largo de la realización del estudio contemplado en este trabajo pueden existir problemas que necesiten ser solucionados eficazmente. Para ello, es necesaria una correcta gestión de los riesgos para mantener un buen control sobre el trabajo. Esto se lleva a cabo evaluando la probabilidad y el impacto de cada factor de riesgo mediante la siguiente matriz de probabilidad-impacto.

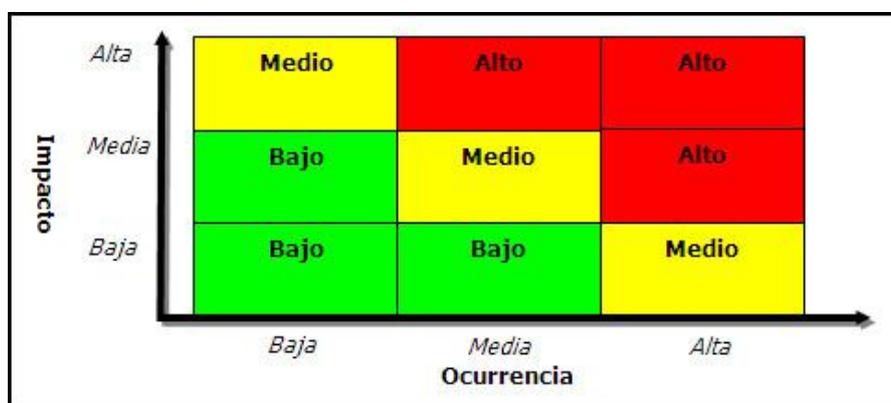


Figura 7. Matriz impacto-probabilidad de riesgos

Cabe mencionar que si un riesgo es alto, es necesario planificar una respuesta; si el riesgo es medio, se necesita considerarlo; y finalmente, si el riesgo resulta ser bajo, se podría desatender el proceso pero con una correcta monitorización. A continuación se exponen uno a uno los riesgos que se han tenido en cuenta durante el presente estudio determinando si el riesgo es alto, medio o bajo, dependiendo de su posición en la matriz anterior.

- ✓ Riesgo nº1: Peligros con el láser

Los equipos láser pueden ser peligrosos, especialmente para los ojos, si se utilizan de manera inadecuada o sin protección. En función de la densidad de energía, los daños que produce un láser pueden variar. En este caso, al ser necesario un láser de alta potencia para el proceso de Cladding, los daños se pueden generar, además de mediante visión

directa, a través de reflexiones y visión indirecta. Por esta razón, es importante mantener la zona de trabajo muy bien iluminada. De esta manera la pupila se cierra y se reduce la probabilidad de entrada de reflexiones. Además de daños oculares permanentes, pueden provocar quemaduras en la piel.



Figura 8. Señalizaciones de peligro de los láseres de Clase 4

Generalmente las máquinas de procesamiento láser tienen un sistema de seguridad gracias al cual es imposible activar el láser con la puerta abierta. Sin embargo, este sistema podría fallar con una probabilidad baja y en ese caso el impacto sería alto. Este hecho sitúa en la matriz con un riesgo medio.

- ✓ Riesgo nº2: Inhalación de metal vaporizado

En el proceso de Laser Cladding no sólo peligra el empleo del láser, sino que también hay que tener en cuenta los materiales con los que se está trabajando. Algunos polvos metálicos son altamente cancerígenos y con el hilo ocurre que, al ser éste vaporizado, también puede causar enfermedades. Es por eso que una máscara de protección, una bata y guantes son siempre necesarios cerca de la máquina.

Puesto que con la protección requerida la probabilidad de riesgo alguno es baja, y su impacto en caso de ocurrir es alto, el riesgo nº3 es de categoría media.

- ✓ Riesgo nº3: Inestabilidad del proceso.

Como se demostrará más adelante, la susceptibilidad a cometer errores es considerable en el proceso de Laser Cladding por aporte de hilo. Con una pequeña variación en la

preparación de los factores que intervienen, el resultado puede ser muy diferente. Es por eso que no se puede dejar la máquina desatendida y es necesario colocar el hilo correctamente antes de lanzar cualquier programa en el control.

En la matriz impacto-probabilidad este riesgo sería alto ya que, el impacto se consideraría medio y la probabilidad de ocurrencia alta.

✓ Riesgo nº4: Problemas derivados de malas conexiones eléctricas.

Con el debido cuidado la probabilidad de fallo eléctrico es baja y su impacto en caso de ocurrir alto, por lo que el riesgo se considera de gravedad media.

Para evitar daños, incluso con el láser apagado, es importante no tocar ningún conector eléctrico durante un tiempo prolongado, ya que podrían almacenarse grandes cantidades de energía en los condensadores.

✓ Riesgo nº5: Fugas de gases y líquidos.

Este riesgo requiere la presencia de extractores de humos y la comprobación de que toda la sala está limpia de elementos tóxicos antes de entrar. Con la activación de estos sistemas de extracción, el riesgo en cuestión es de nivel medio.

✓ Riesgo nº6: Posibilidad de fuego por la presencia de líquidos y gases inflamables.

El riesgo de aparición de fuego está siempre presente en las operaciones de Laser Cladding. Sin embargo, el riesgo se considera medio debido a la baja probabilidad de que esto ocurra.

METODOLOGÍA

Equipo y material empleado

Los ensayos realizados en este estudio experimental se han llevado a cabo mediante un equipo láser de fibra de Yb-YAG, modelo Rofin-Sinar FL 010 de 1KW de potencia máxima y funcionamiento en continuo (Fig. 9). Al ser un láser de estado sólido, puede propagarse a través de una fibra óptica, lo que facilita su transporte desde el generador hasta la máquina de control numérico donde se encuentra la óptica de focalización. La óptica utilizada para este proyecto presenta una distancia focal de 200 mm.



Potencia	1000W
Longitud de onda	1,07 μ m \pm 10nm
Tamaño del haz de láser	600 μ m
Cinemática	Kondia Aktinos-500

Figura 9. Máquina de láser Rofin-Sinar FL 010 y sus propiedades

El generador láser se encuentra acoplado a una máquina de CNC de 5 ejes para procesamiento láser de la marca Kondia, modelo Aktinos-500 (Fig. 10). Para evitar la oxidación del material aportado y proteger la lente del láser del humo o suciedad generada durante el proceso, se ha utilizado Argón como gas de protección.



Figura 10. Máquina para procesamiento láser Kondia Aktinos-500

Control CNC	Fagor 8070
Superficie de trabajo	700 x 360 mm
Máxima velocidad de trabajo	15.000 mm/min
Precisión de posicionamiento	±0,01
Repetitividad	±0,005
Resolución	0,001

Tabla 1. Propiedades de Kondia Aktinos-500

Otro elemento a tener en cuenta es la máquina refrigeradora de láser. En este caso se ha empleado un equipo KKT Kraus (Fig. 11).



Figura 11. Sistema de refrigeración de láser KKT Kraus

Hay una gran variedad de materiales que se pueden aportar mediante Laser Cladding, dependiendo de las propiedades que se deseen mejorar. Estas propiedades pueden ser la resistencia a la abrasión, la corrosión, la dureza o la conductividad. Además, hay que tener especial cuidado a la hora de elegir el material para que el sustrato y el material de aporte sean compatibles. De no ser así pueden aparecer problemas de falta de fusión y una gran pérdida de propiedades mecánicas. (GNCLáser - Recargue superficial por láser)

En este proyecto se ha empleado como material de aporte una bobina de 15 kg de hilo de acero inoxidable FG-316S de la marca PRAXAIR de 1,2mm de diámetro. La composición de este acero se muestra en la siguiente tabla.

%C	%Mn	%Si	%Cr	%Ni	%Mo
0,08	2	1	16-18	12-14	2,5-3

Tabla 2. Composición en % en peso del material de aporte FG-316S

El material base que se ha empleado para los aportes es un acero inoxidable AISI 316. Dicha elección se basa en dos razones. Por un lado, para asegurar la compatibilidad entre el material aportado (hilo) y el material base, y por otro lado, para evitar el agrietamiento del conjunto sustrato-aporte debido a las tensiones internas generadas al contraerse el material durante el enfriamiento.

Diseño del sistema de alimentación

El siguiente paso a realizar para llevar a cabo este estudio es el diseño y fabricación de los componentes necesarios de un sistema de alimentación de hilo. Para ello se cuenta con un alimentador de hilo comercial, modelo Tig-Fil de Praxair (Fig. 12), adquirido previamente para operaciones de soldadura TIG con un equipo de plasma. Este arrastrador cuenta con dos modos de funcionamiento. Por un lado, consta de un sistema de avance y retroceso manual del hilo, que permite acercarse y posicionar correctamente el hilo antes de activar el láser. Por otro lado, consta de un modo de funcionamiento automático, el cual permite controlar su funcionamiento mediante señales eléctricas.



Figura 12. Alimentador de hilo Tig-Fil y bobina de hilo dentro del alimentador

Además de las opciones de avance y retroceso mencionadas previamente para el modo de funcionamiento manual, para el caso de funcionamiento automático, el arrastrador tiene 4 potenciómetros para controlar el tiempo de trabajo, el tiempo de reposo, el tiempo de espera al inicio y la velocidad de avance del hilo en la salida. Este sistema también cuenta con indicadores de luz que permiten conocer el estado de trabajo



Figura 13. Control del alimentador de hilo

Para llevar a cabo los ensayos que permitirán validar el material en forma de hilo por la técnica de Laser Cladding, se ha visto necesario implementar un sistema automático de alimentación de hilo a través de la máquina láser. El arrastrador cuenta con una entrada en la que es posible conectar un adaptador de 3 polos. Se ha aprovechado esta entrada para abrir o cerrar el circuito a través de un relé en la máquina de CNC Kondia Aktinos 500. De esta manera, desde el control de la máquina, con las funciones M21 y M20 se puede activar y desactivar la salida del hilo, respectivamente.



Figura 14. Salida de 3 polos del alimentador

Tras observar que el material en forma de hilo sale de manera adecuada y automática del alimentador, es necesario desarrollar un sistema para direccionar el hilo de la forma más

precisa posible al punto óptimo del baño fundido para que el aporte se realice correctamente y en las condiciones más estables posibles.

Para ello, se ha pensado en una boquilla formada por tres piezas: la primera será la responsable de acercar el hilo del alimentador al baño fundido; la segunda, una boquilla por donde pasará el haz láser hasta el sustrato; y por último, un sistema de amarre entre ambas piezas.

Para el diseño de la primera de las piezas, con el objetivo de minimizar el peso del conjunto y facilitar el mecanizado, se ha optado por un tubo de aluminio, cuyo diámetro en la salida sea ligeramente superior al del diámetro del hilo a aportar para que el hilo no se bloquee y salga fluidamente. La entrada de esta pieza irá conectada mediante una serie de tubos de PVC a la salida del alimentador. Es importante que el hilo siga una trayectoria lo más recta posible, evitando curvas cerradas, ya que una curvatura excesiva introduciría tensiones internas en el hilo y desestabilizaría el proceso de aporte.

El sistema de amarre al cabezal de la máquina láser también se ha fabricado en aluminio, y en él, se introducirá una boquilla por la que saldrá el haz láser. Asimismo, esta boquilla requiere una entrada para la introducción del gas de protección.

En resumen, se han diseñado tres piezas que en conjunto formarán el sistema de alimentación. Estas tres piezas han sido diseñadas en NX 10.0 y son una boquilla, una horquilla para posicionar el alimentador de hilo (tanto en ángulo como en altura), y el alimentador de hilo. A continuación se muestran imágenes del diseño de estas piezas.

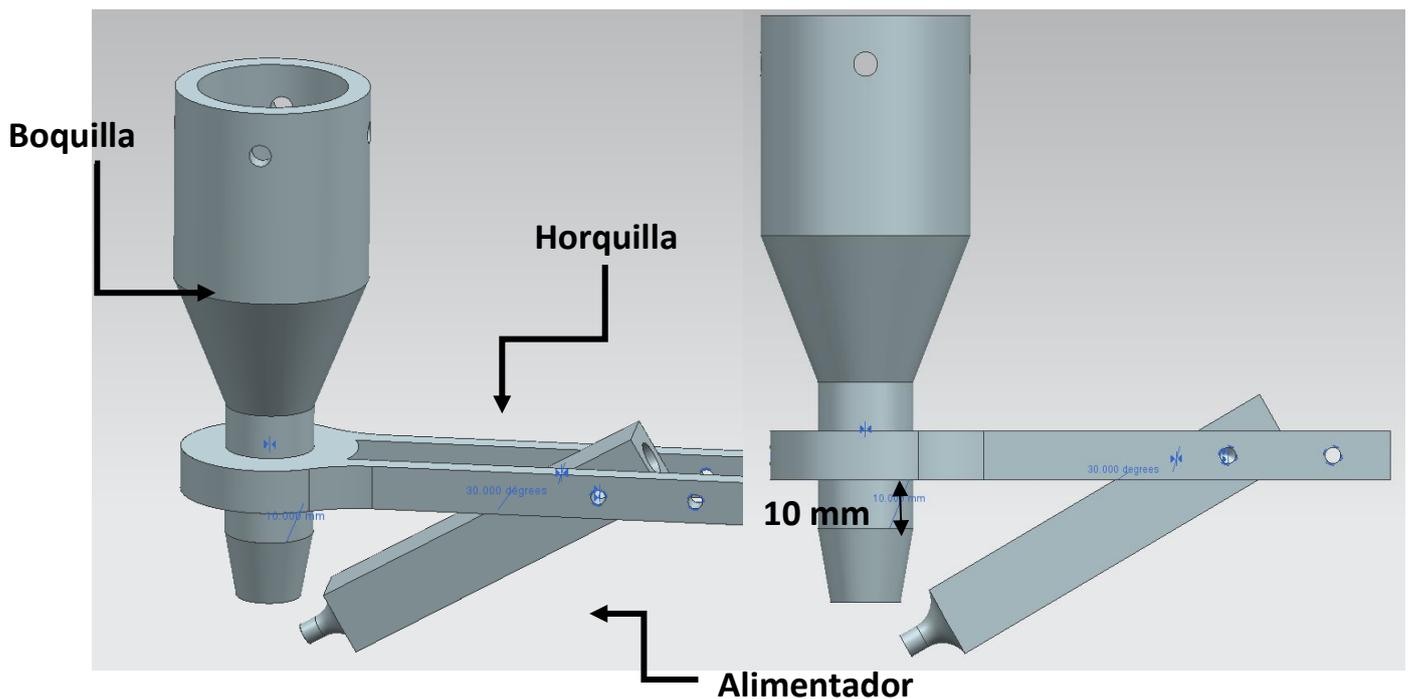


Figura 15. Conjunto del diseño de la alimentación

En la figura superior se observa una disposición en la que el alimentador tiene un ángulo de 30° con el eje horizontal. En la figura siguiente se muestra el alzado del conjunto.

Los agujeros de la horquilla que se observan en la imagen anterior están destinados a tornillos prisioneros que permiten posicionar el conjunto con el ángulo deseado y rigidizarlo, lo que le transfiere una gran flexibilidad al diseño desarrollado.

Los planos de las piezas diseñadas se encuentran en el Anexo.

Para la realización correcta de los ensayos es fundamental que el haz del láser y el hilo proveniente del arrastrador converjan en el mismo punto. Este punto, en donde el haz está focalizado gracias a una lente, se pretende situarlo a 14 mm de la salida de la boquilla. Conocido este dato y la geometría de las piezas, se puede calcular para diferentes ángulos del alimentador, la altura a la que se necesita colocar la horquilla respecto a la boquilla. Por ejemplo, para 30° se ha calculado una altura de 10 mm respecto al punto que se observa en la figura anterior.

Ángulo con la horizontal	Altura
24,1°	0 mm
30°	10 mm
35,4°	20 mm

Tabla 3. Disposiciones máximas y mínimas del alimentador de hilo

Una vez diseñadas las piezas, éstas han sido fabricadas en aluminio (Fig. 16) en el taller mecánico de la Universidad del País Vasco. Para ello se ha utilizado un centro de mecanizado de 3 ejes KONDIA A6, y un torno manual Pinacho S90 VS para la pieza cilíndrica. Además, se han empleado otras herramientas del taller, como puede ser una taladradora manual de columna y machos de roscar.



Figura 16. Sistema de alimentación

Finalizadas las piezas que formarán el sistema de alimentación de hilo proveniente del arrastrador, es posible comenzar con los ensayos que permitirán dar con los parámetros óptimos de aporte del material.

Determinación de parámetros para el aporte de hilo

Una vez se ha fabricado e instalado el sistema de alimentación para el aporte de hilo mediante láser, el siguiente paso es la determinación de los parámetros óptimos del proceso, que harán que el hilo se deposite correctamente y que se adhiera al sustrato sin dañarlo térmicamente. Los parámetros a tener en cuenta en el aporte por hilo se resumen a continuación:

- La potencia del láser
- La velocidad de avance de la máquina
- La velocidad de alimentación del hilo
- El ángulo de alimentación
- La distancia de trabajo

Ensayos sin aporte de material

En primer lugar, ha sido necesaria la realización de unas pruebas preliminares sin aporte alguno de material para observar el tamaño del baño fundido. Para garantizar la correcta fusión del hilo y su posterior unión al sustrato, el tamaño del baño fundido tiene que ser mayor que el diámetro del hilo. Estas primeras pruebas se han realizado variando la distancia de la punta de la boquilla a la lente y la duración del pulso, y manteniendo la máxima potencia de 1000 W.

1. Distancia de 167 mm, 100 ms
2. Distancia de 162 mm, 100 ms
3. Distancia de 164 mm, 100 ms
4. Distancia de 164 mm, 300 ms

Se ha decidido trabajar a partir de este momento con una distancia de 164 mm, que permitirá trabajar con un tamaño de spot lo suficientemente grande, manteniendo una densidad de energía suficiente para fundir el material.

A pesar de que la potencia se ha considerado una variable fundamental del proceso, cabe mencionar que durante la realización del estudio se ha empleado una potencia de 1000 W, ya que se ha asumido que una potencia menor no sería capaz de fundir el hilo.

Se ha utilizado argón como gas de protección y un ángulo de alimentación de hilo de 35° con respecto a la horizontal. En la siguiente figura se muestra el montaje de la alimentación con un goniómetro simple para la medición in-situ del ángulo.

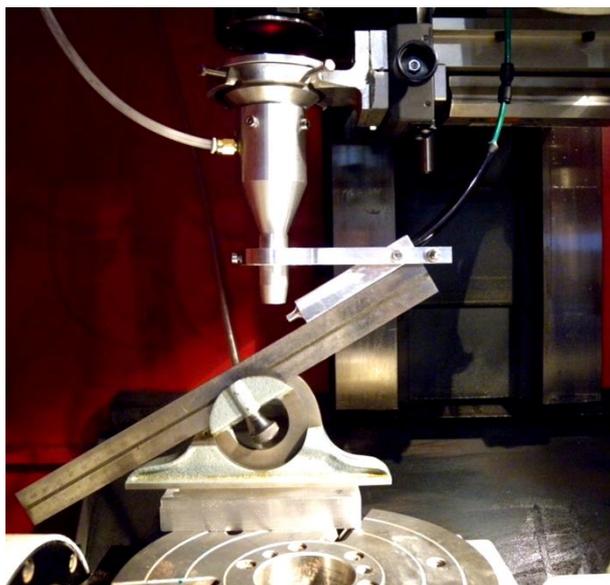


Figura 17. Montaje del sistema de alimentación

Ensayos con cordones simples

Una vez observado el tamaño del baño fundido se ha dispuesto a realizar unos ensayos con el hilo jugando con el avance de alimentación de hilo, con el avance de la pieza y con estrategias en el control. Además, hay que tener en cuenta que se ha comenzado con una distancia de 14mm entre la punta de la boquilla y el sustrato, es decir, una distancia de trabajo de 178 mm (164mm de la punta de la boquilla a la lente y 14mm de la punta de la boquilla al sustrato).

En las primeras líneas de aporte, los resultados han sido gotas de hilo fundido, unas más separadas que otras dependiendo de la velocidad de alimentación de hilo, que se ha fijado en

960mm/min desde la línea 5. Desde el principio, el avance de la máquina se ha fijado en 500mm/min.

El siguiente paso ha sido jugar con los tiempos de espera. Éstos se programan con una función G04 en el control y en estos ensayos han tenido un papel importante en el proceso de aporte. Los tiempos empleados son:

1. Tiempo de espera antes de empezar a sacar hilo una vez se ha encendido el láser
2. Tiempo de espera antes de empezar a mover la pieza
3. Tiempo de espera antes de apagar el láser una vez deja de salir el hilo.

En la siguiente figura se muestra la programación realizada para el aporte de la línea 3 en el control 8070 de FAGOR.

```
G90 G01 X0 Y0 Z5 F1000
G01 Z0 F500
M04
G04 K0.4
M21
G04 K0.3
G01 X50
M20
G04 K0.3
G01 Z10 F2000 M05
M30
```

Figura 18. Programación de la línea 3

En la siguiente figura se muestra el aporte de los 5 primeros cordones aportados. En el último se muestra cómo el cordón se ha conseguido adherir a la superficie pero sin los resultados esperados.



Figura 19. Aporte de las líneas 1-5

Como se puede observar, empieza a dar problemas el hecho de que el hilo no se suelta del cordón aportado al final del recorrido. Para conseguir solventar este problema, se ha aumentado la espera antes de apagar el láser a 0,5 segundos. Además, se ha decidido aumentar la distancia entre punta de la boquilla y lente a 167mm (distancia de trabajo de 181 mm) para que el láser funda mejor el hilo, ya que se en el cordón 5 de la figura superior puede verse que no se funde correctamente en las esquinas.

```
G90 G01 X0 Y0 Z5 F1000
G01 Z0 F500
M04
G04 K0.4
M21
G04 K0.3
G01 X45
M20
G04 K0.5
G01 Z10 F2000 M05
M30
```

Figura 20. Programación de la línea 6

El problema de las gotas se ha resuelto, pero el hilo sigue sin soltarse. Por eso, se ha aumentado el último tiempo de espera a 0,75 segundos y se ha reducido el avance de la pieza a 450mm/min. Como esto no es suficiente, en la línea 8 se ha desenfocado el láser 2mm hacia

arriba, siendo ahora la distancia entre el final de la boquilla y el sustrato de 16 mm (183 mm de distancia de trabajo), y el ángulo con la horizontal de 36°.

En la línea 10 (todavía con una alimentación de hilo de 960mm/min) se sigue disminuyendo el avance de la máquina hasta 400mm/min para tratar de quemar un poco más el sustrato y además se cambia la estrategia de subir el hilo tras dejar de alimentar en 0,75 segundos, para finalmente apagar el láser. De esta manera se ha conseguido soltar el hilo al final. Además, se ha observado que el cordón crece muy bien en altura.

```
G90 G01 X0 Y0 Z5 F1000
G01 Z0 F400
M04
G04 K0.4
M21
G04 K0.3
G01 X45
M20
G04 K0.75
G01 Z10 F2000
M05
M30
```

Figura 21. Programación de la línea 10

Sin embargo, se quiere conseguir que el hilo quede mejor adherido a la base, y es por eso que el avance de alimentación de hilo se ha reducido hasta 720mm/min y el de la pieza hasta 350mm/min. En la siguiente figura se observan los 13 cordones aportados hasta el momento, destacando que en la línea 13 se ha conseguido una buena adhesión entre el material aportado y el sustrato, no obstante, el cordón no crece en altura todo lo esperado.

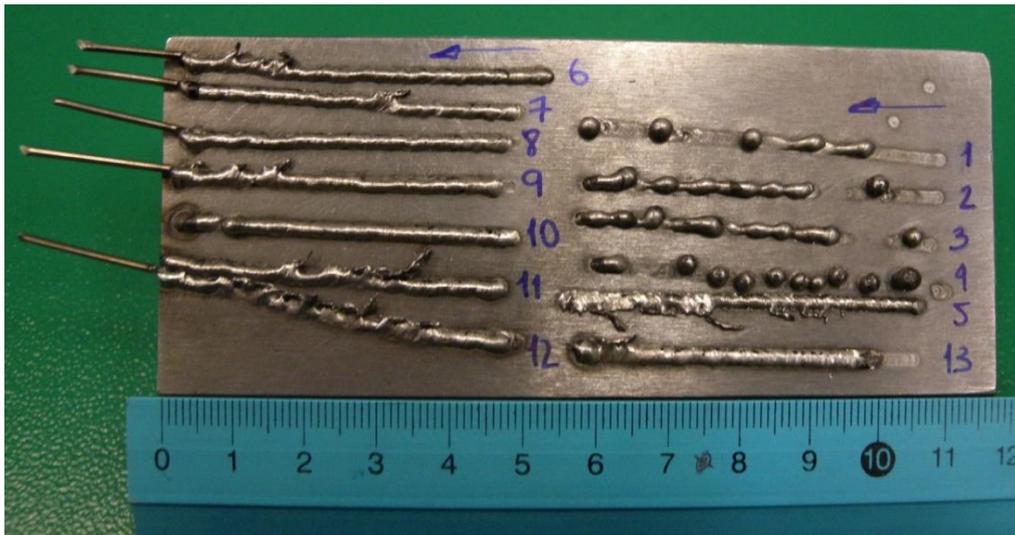


Figura 22. Aporte de las líneas 1-13

Estos parámetros de la última línea aportada se han definido como los óptimos ya que se ha conseguido una buena unión del aporte a la base, aparentemente no aparecen poros y el cordón crece homogéneamente tanto en altura como en anchura.

Ensayos con cordones solapados

Antes de proceder a fabricar una pieza que sirva de demostración del proyecto, se han realizado otros ensayos para asegurar la validez de los parámetros definidos. En primer lugar, se han aportado varios cordones solapándose entre sí, para después aportar una segunda capa sobre ellos. Seguidamente, el aporte de una geometría circular terminará asegurando que dichos parámetros son adecuados.

Para los siguientes ensayos se han mantenido los parámetros establecidos en las primeras líneas aportadas, que se resumen a continuación.

- 1000W de potencia
- 350mm/min de avance de la máquina
- 720mm/min de velocidad de alimentación del hilo
- 36° de ángulo de alimentación
- 183mm de distancia de trabajo

Para asegurar que el hilo se suelta correctamente de la base se ha pensado en hacer una pequeña modificación en el programa subiendo 2mm a 4000mm/min antes de apagar el láser para después terminar de subir el hilo.

```
G90 G01 X0 Y22.5 Z5 F1000
N10:
G90 G01 X0 Z5 F1000
G01 Z0 F350
M04
G04 K0.4
M21
G04 K0.3
G01 X45
M20
G04 K0.5
G01 Z2 F4000
M05
G01 Z20
G01 Y2 F1000
N20:
#RPT [N10, N20, 4]
M30
```

Figura 23. Programación de las líneas 17

En la siguiente figura se observan algunos cordones aportados en los que se ha empezado a realizar solapes entre líneas, comenzando con un solape de 30% en las líneas 16, y concluyendo que un solape de 20%, como en las líneas 17 y 18, da mejores resultados. Para realizar estos solapes es necesario medir previamente la geometría de un cordón. Estas mediciones dan una altura de 0,85mm y una anchura de 2,7mm.

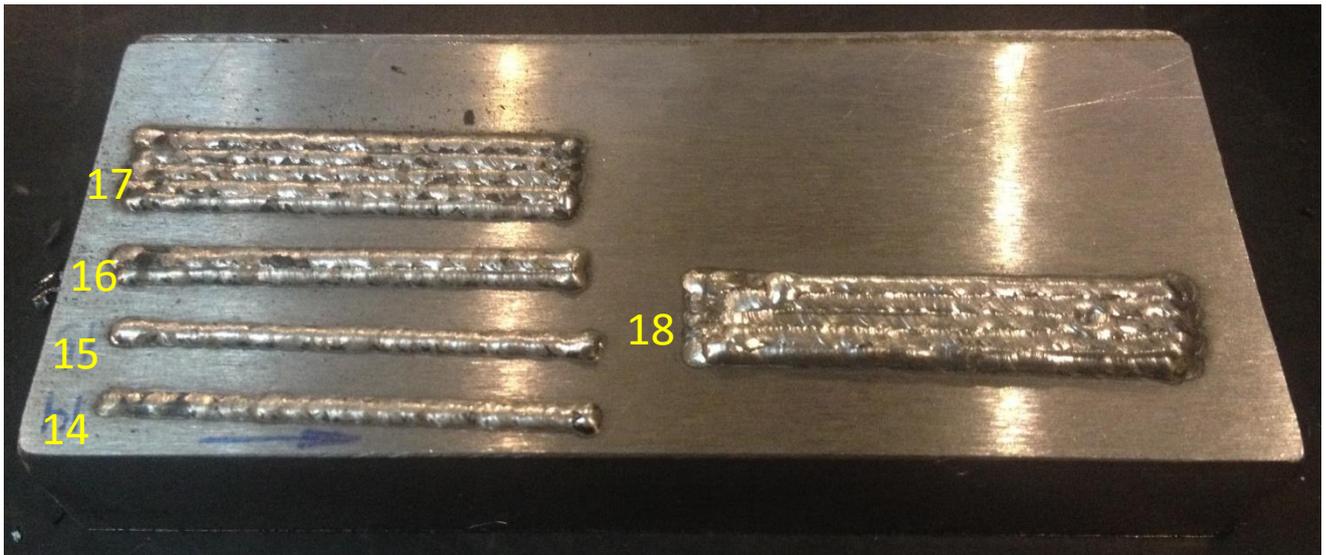


Figura 24. Aporte de las líneas 14-18

Cabe mencionar que, tanto en estos ensayos como en los primeros, al realizar cada aporte se forma una capa de cascarilla que es necesario quitar antes de proceder a aportar nada encima. Esta cascarilla es, probablemente, debida a que el hilo adquirido está pensado para aplicaciones de soldadura. Su limpieza es simple y rápida con un cepillo.



Figura 25. Cascarilla formada sobre los cordones

Ensayos con una geometría circular

Además de estos aportes rectos se han probado los parámetros definidos para aportar una geometría circular sobre una superficie plana. La programación del control (Fig. 26) cuenta con funciones de espera y una función en la que un cuarto eje gira la pieza.

```
G90 G01 X0 Y22.5 Z5 F1000  
G01 ZO F250  
M04  
G04 K0.4  
M21  
G04 K0.3  
G01 Z[0.75*3] C[-360*3] F891.26  
M20  
G04 K0.5  
G91 G01 Z2 F4000  
M05  
G01 Z20  
M30
```

Figura 26. Programación empleada en el aporte de un círculo de diámetro 45 mm

Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes imágenes. En la figura 27 se han aportado 3 capas satisfactoriamente, mientras que en la figura 28 ya se ha logrado aportar 6 capas.

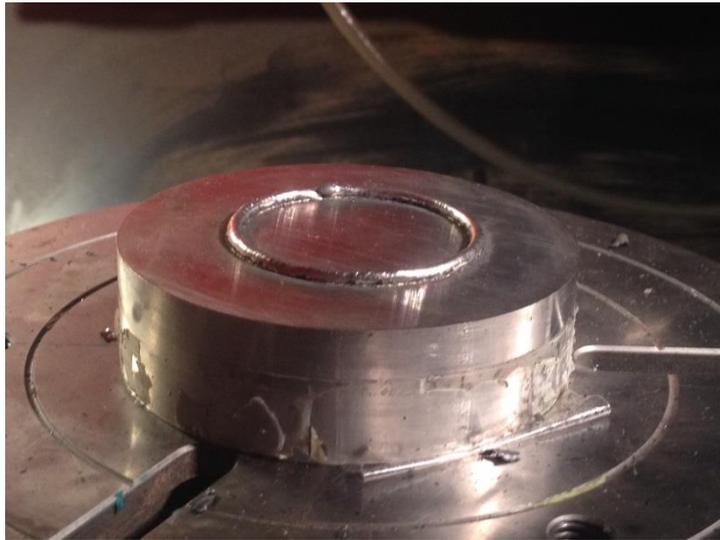


Figura 27. 3 capas de aporte de un círculo de diámetro 45 mm



Figura 28. 6 capas de aporte de un círculo de diámetro 45 mm

Como se puede observar, el resultado no es del todo bueno, ya que el aporte se sale de la base y el hilo queda fuera del círculo. Esto se podría haber corregido disminuyendo ligeramente el diámetro cada 3 capas de aporte.

Ensayos sobre una geometría cilíndrica

Como se ha mencionado anteriormente, debido a la inestabilidad del proceso de aporte de hilo en Laser Cladding y su compleja puesta a punto, las geometrías a aportar no son muy variadas. Hasta ahora se ha trabajado con superficies planas y su recubrimiento. En este punto se trata de intentar realizar un recubrimiento sobre un cilindro.

Se parte de un cilindro de diámetro 60,8mm y se ha intentado llegar hasta un diámetro de brida de 80 mm, es decir, crecer 20mm en diámetro, con una anchura de 10mm. Sabiendo que la altura que alcanza un cordón de hilo aportado es de 1mm, sería necesario aportar 10 capas. Sin embargo, cómo se explica más adelante en este mismo punto esto no ha resultado así debido a complicaciones que han aparecido durante el proceso.

La preparación del proceso de aporte de hilo puede resultar bastante compleja y tediosa, pues es posible que después del aporte de un cordón, el tirón que se produce para separar el hilo del sustrato mueva el alimentador, lo que obliga a parar el proceso y volver a posicionarlo para el siguiente aporte. Es por eso que es necesario un sistema de alimentación que tenga la rigidez suficiente para que aguante este tipo de fuerzas y evitar que se deforme.

Además, cabe mencionar la importancia que tiene el posicionamiento del hilo respecto del haz láser. Si el hilo no está en el punto óptimo del baño fundido, el aporte no tendrá lugar correctamente. En la figura inferior se muestra un caso en el que el hilo no había sido posicionado correctamente en el punto mencionado.

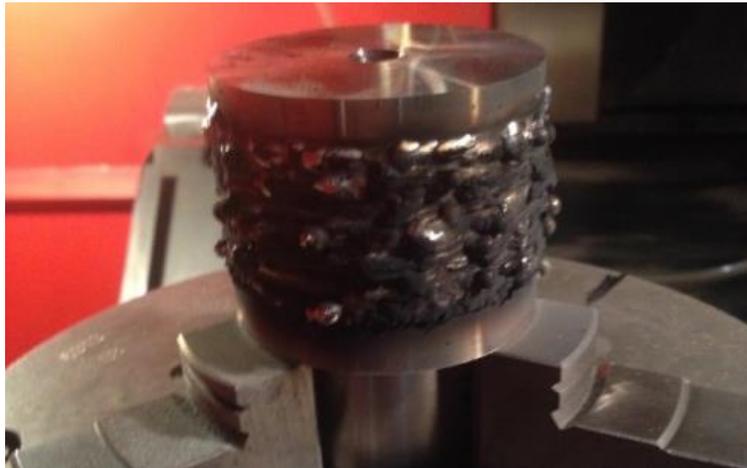


Figura 29. Error debido a un mal posicionamiento del hilo

En las siguientes figuras se muestran imágenes de un adecuado posicionamiento del hilo sobre el puntero láser. En este punto cabe destacar que, la posición del puntero láser no se corresponde exactamente con la posición del haz láser, pero facilita su posicionamiento. Es por eso, que es necesario conocer bien la máquina para colocar correctamente el hilo.



Figura 30. Sistema de alimentación con un correcto posicionamiento del hilo

En la figura de abajo se muestra el aporte de un cordón que da cinco vueltas en espiral. En ella se puede apreciar que el crecimiento ha sido bueno, los cordones se han fundido correctamente y apenas se observan poros. Lo óptimo sería que las siguientes capas se depositasen de manera similar sobre la anterior.

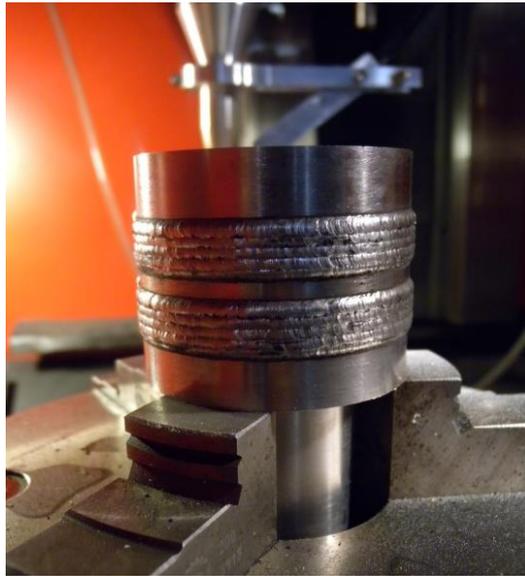


Figura 31. 1ª capa de aporte de la pieza

Sin embargo, es posible que, de manera inesperada aparezcan agujeros en donde el aporte no se ha producido correctamente. Estos agujeros necesitan ser corregidos y es por eso que tras varias capas de aporte surge la necesidad de tornearse y reducir el diámetro hasta que la superficie de aporte es homogénea. En la siguiente figura se muestra una imagen de la tercera capa en la cual se ha generado un agujero.



Figura 32. 3ª capa de aporte de la pieza

La cuarta capa, por ejemplo, tras haber torneado la capa 3, se ha depositado satisfactoriamente. Se demuestra la importancia de tener una superficie de aporte lo más limpia posible.



Figura 33. 4ª capa de aporte de la pieza

Se observa a continuación que la sexta capa se ha depositado correctamente sin necesidad de tornearse. Esto ha ido así hasta la octava capa, donde la superficie ha tenido que ser limpiada nuevamente.



Figura 34. 6ª capa de aporte de la pieza

A medida que la brida va creciendo en altura, el proceso empieza a desestabilizarse y como se observa en la figura de abajo, los cordones empiezan a depositarse fuera de la base ya aportada. Por esta razón va surgiendo la necesidad de ir reduciendo la anchura de la brida poco a poco. A partir de la capa 11, se ha decidido reducir la anchura 0,2 mm cada 2 mm, es decir, cada dos capas de aporte, y también el número de cordones, de 5 a 4.



Figura 35. 8ª capa de aporte de la pieza

En la siguiente figura, correspondiente al aporte de la capa número 14, se observa cómo la anchura de la parte fabricada con esta técnica aditiva, se ha tenido que reducir. Este hecho no va a permitir generar una brida de anchura 10 mm como se esperaba, sino que la anchura que se va a conseguir es de 7,2 mm. Este hecho genera una gran desventaja en el proceso, ya que para llegar a generar la geometría planificada, es necesario comenzar con una anchura mayor de la final, para luego refrentar hasta dejar una pared vertical, sin mencionar los torneados requeridos. Por tanto, la eficiencia másica se verá reducida, ya que no todo el material aportado será el que conforme la pieza final.



Figura 36. 14ª capa de aporte de la pieza

Teniendo en cuenta los torneados que se han tenido que realizar, y la reducción del espesor de la brida, han sido necesarias 17 capas para poder llegar a crecer 10 mm en radio. En las siguientes figuras se observa los resultados obtenidos en este estudio.



Figura 37. Resultados de la pieza

A continuación se muestra el detalle de los cordones formados con esta técnica. Se puede observar cómo, éstos están perfectamente unidos entre sí tanto en anchura como en altura y que con la correspondiente limpieza de la superficie cada ciertas capas de aporte, el crecimiento es estable.

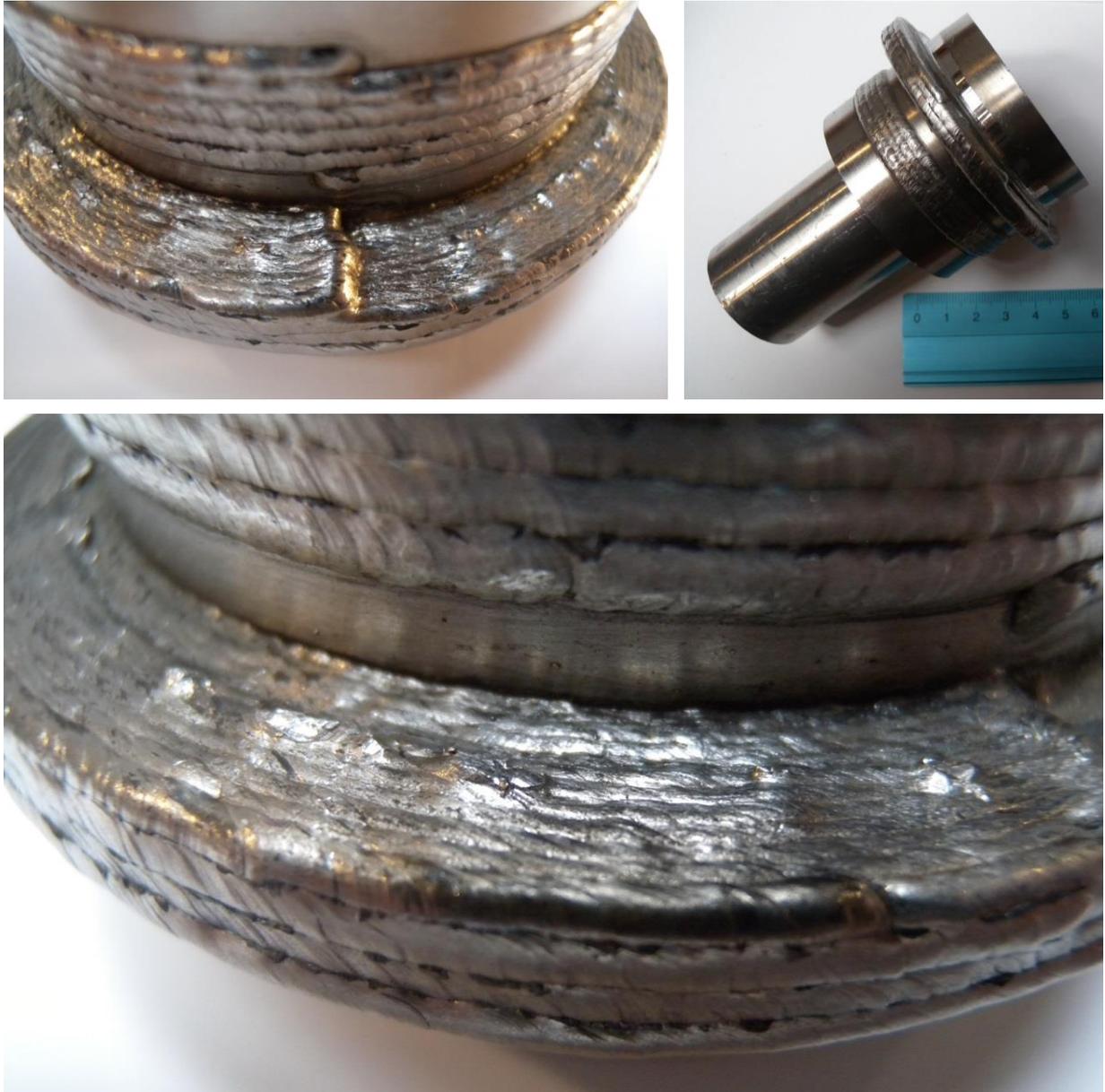


Figura 38. Detalle de los cordones de la pieza

En la siguiente tabla se resumen los crecimientos en radio obtenidos por capa y los instantes en los que se ha requerido tornear para poder seguir con el proceso de aporte.

Nº de capa	Radio (mm)
Al inicio	30.4
1	31.25 (5 cordones)
2	32.25 (5 cordones)
3	33.25 (5 cordones)
Tornear hasta	31.75
4	32.75 (5 cordones)
5	33.75 (5 cordones)
6	34.75 (5 cordones)
7	35.4 (5 cordones)
8	36.4 (5 cordones)
Tornear hasta	34.25
9	35.25 (5 cordones)
10	36.25 (5 cordones)
Tornear hasta	34
11	35 (4 cordones menos 0.2mm en y)
12	36 (4 cordones menos 0.2mm en y)
13	36.75 (4 cordones menos 0.4mm en y)
14	37.5 (4 cordones menos 0.4mm en y)
15	38.5 (4 cordones menos 0.6mm en y)
16	39.25 (4 cordones menos 0.6mm en y)
17	40.25 (4 cordones menos 0.8mm en y)

Tabla 4. Resumen del crecimiento de cada capa de la pieza cilíndrica

La pieza final ha sido refrentada con el torno manual para observar la calidad del aporte, así como torneada hasta aproximadamente la mitad del espesor. A continuación se observa cómo se ha conseguido un crecimiento de la brida homogéneo, en el que tanto los cordones como

las capas entre sí, se han unido bien ya que no se observan poros y la superficie es perfectamente lisa.

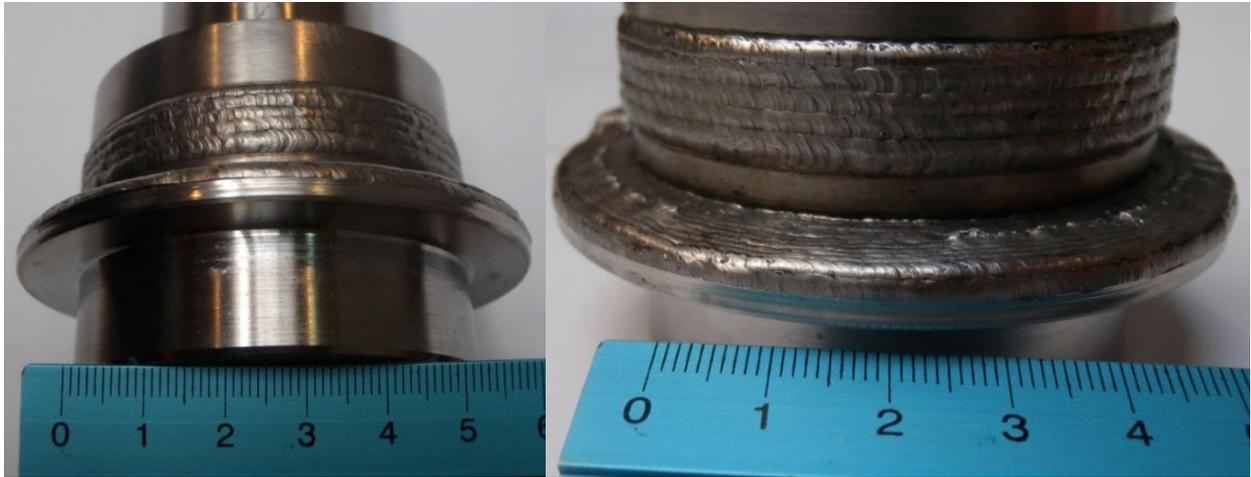


Figura 39. Pieza torneada y refrentada



Figura 40. Vista frontal y parte inferior de la pieza torneada y refrentada

Aporte de la pieza demostradora

Para el aporte de una pieza demostradora se ha pensado en el recrecimiento de un cilindro en forma de brida. Una brida es un elemento que une dos componentes de un sistema de tuberías, ya sean tuberías, válvulas, bombas u otros equipos.



Figura 41. Brida industrial

Los parámetros empleados en el aporte son los definidos previamente, y éstos son:

- Potencia de 1000W
- Avance de 350mm/min
- Alimentación de hilo de 720mm/min (posición del alimentador $1 \frac{3}{4}$)
- Ángulo de alimentación de 36°
- 183mm de distancia de trabajo (167mm entre lente y punta de la boquilla y 16mm entre punta de la boquilla y superficie de aporte)

Como sustrato se ha empleado un tubo hueco de acero inoxidable AISI 314 de 14mm de diámetro, espesor del tubo de 2mm y una longitud de 105mm. El objetivo es crecer aproximadamente 20mm en radio y 10mm en anchura. Para cumplir con estas dimensiones es

necesario comenzar con una anchura mayor que, como ya se ha explicado en ensayos anteriores, se irá reduciendo 0,2mm cada 2 capas para no perder sustrato a medida que se lleva a cabo el proceso. Por ello se empezarán con 10 cordones por capa que equivalen a una anchura de 20mm.

En la siguiente figura se muestra una imagen de la tercera capa de aporte.



Figura 42. Pieza test con 3 capas y 10 cordones por capa

En este proceso el haz láser genera un gran calor y, debido a la poca masa que tiene la pieza al ser hueca, ésta llega a unas temperaturas muy altas durante el proceso de aporte y queda incandescente. Una vez aportada una capa, la pieza va disminuyendo su temperatura y rápidamente recupera su color natural.

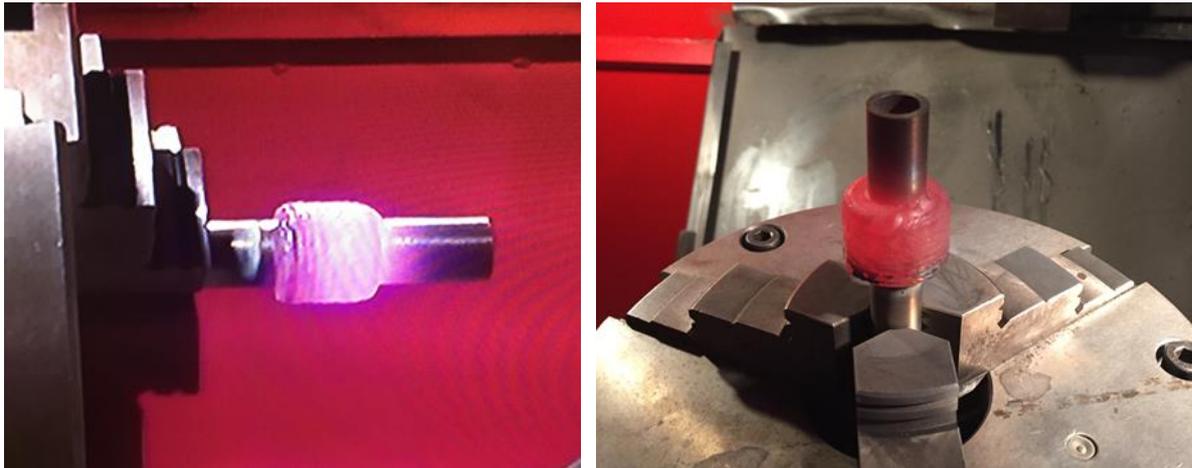


Figura 43. Calor acumulado en la pieza test

En la siguiente figura se muestra la misma pieza 20 segundos más tarde en donde se puede ver que la pieza se está enfriando.



Figura 44. Pieza test con 13 capas y 10 cordones por capa en la máquina láser

La superficie de esta última capa no es uniforme y por la inestabilidad del proceso han aparecido poros y gotas depositadas sobre el sustrato que han hecho necesaria una inmediata limpieza de la pieza en el torno.



Figura 45. Pieza test con 13 capas y 10 cordones por capa

Una vez torneada la superficie donde se va a seguir aportando, se ha hecho necesario reducir considerablemente el número de cordones de aporte. Así, se ha pasado de aportar 10 cordones a aportar 7 y medio, creciendo 15mm en anchura.



Figura 46. Pieza test con 20 capas y 7 cordones y medio por capa

A continuación se muestran imágenes de la pieza finalizada nada más sacarla de la máquina láser. Tras 29 capas de aporte, finalizando con 6 cordones y medio, se ha conseguido un crecimiento en radio de 20mm (diámetro de la pieza desde 14mm a 54mm).



Figura 47. Pieza demostradora

Para una mejor observación de los aportes conseguidos se ha refrentado la pieza por ambos lados, dejando una anchura de la brida de 10mm.



Figura 48. Pieza test refrentada

Se puede observar la ausencia de poros en las superficies refrentadas. Únicamente se hacen presentes pequeños restos de cascarilla atrapada entre las capas de aporte.

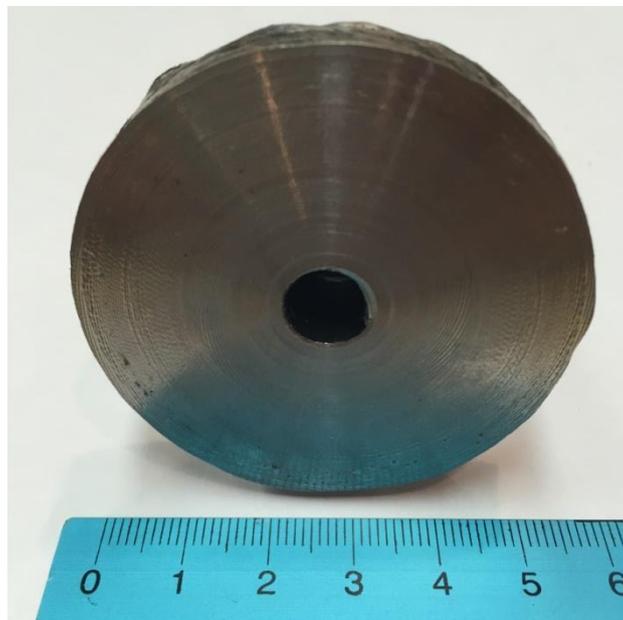


Figura 49. Detalle de la superficie refrentada de la pieza test

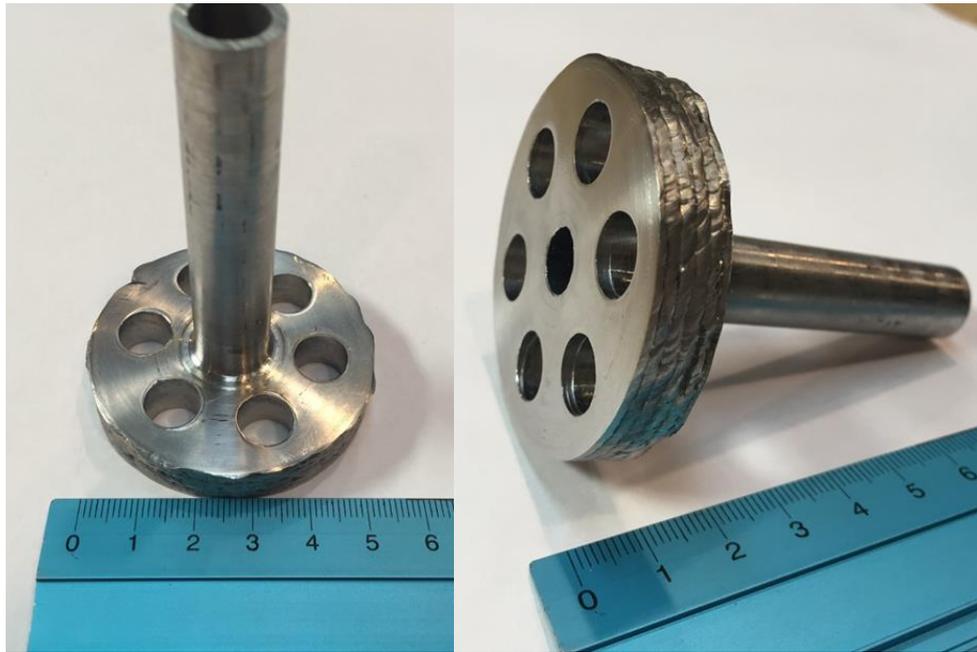


Figura 50. Pieza test



Figura 51. Detalle de la superficie refrentada de la pieza test

Al igual que en el caso del aporte de la pieza cilíndrica se muestra a continuación el procedimiento empleado para fabricar la pieza test del proyecto.

Nº de capa	Radio (mm)
Al inicio	7
1	8 (10 cordones)
2	8.75 (10 cordones)
3	9.75 (10 cordones menos 0.2mm en y)
4	10.5 (10 cordones menos 0.2mm en y)
5	11.25 (10 cordones menos 0.4mm en y)
6	12.1 (10 cordones menos 0.4mm en y)
7	13 (10 cordones menos 0.6mm en y)
8	13.8 (10 cordones menos 0.6mm en y)
9	14.75 (10 cordones menos 1 mm en y)
10	15.5 (10 cordones menos 1mm en y)
11	16.5 (10 cordones menos 1.4mm en y)
12	17.2 (10 cordones menos 1.4mm en y)
13	18.1 (10 cordones menos 1.6mm en y)
Tornear hasta	17.5
14	18.4 (7.5 cordones)
15	19.3 (7.5 cordones)
16	20.2 (7.5 cordones menos 0.2mm en y)
17	21.1 (7.5 cordones menos 0.2mm en y)
18	22 (7.5 cordones menos 0.4mm en y)
19	23 (7.5 cordones menos 0.4mm en y)
20	24 (7.5 cordones menos 1mm en y)
21	25 (7.5 cordones menos 1mm en y)
Tornear hasta	23.2
22	24.2 (6.5 cordones)
23	25.2 (6.5 cordones)
24	26.2 (6.5 cordones menos 0.2mm en y)

Tabla 5. Resumen del crecimiento de cada capa de la pieza test

Cabe mencionar que, en cuanto al sistema de alimentación, el aluminio no es un material resistente al calor que se puede llegar a alcanzar en un proceso de fabricación trabajando en continuo, pero sí es capaz de aguantar el calor generado en los ensayos de este proyecto. En este trabajo, una vez finalizados las pruebas, la boquilla quedó como se muestra en la siguiente imagen.



Figura 52. Sistema de alimentación afectado por el calor

La zona negra tiene ese color, probablemente, por la evaporación del metal al ser fundido por el láser.

En este punto se ha calculado la tasa de aporte del proceso de aporte de la pieza test de este proyecto. Como se ha mencionado anteriormente, esta técnica se caracteriza por sus altas productividades y el valor de la tasa de aporte es un indicador demostrador de dicha característica.

Este indicador se ha calculado de forma aproximada empleando una báscula para conocer el peso de la pieza antes y después del aporte. En este caso, aprovechando la parada tras el aporte de la capa nº 13 para el torneado de la superficie, se ha pesado la pieza. Así, en ese momento la pieza ha crecido 144,79g en 1053s. Con estos valores, la tasa de aporte es de 8,33g/min.

El valor de la tasa obtenida con los equipos disponibles, en referencia a valores típicos de tasas de aportes de polvo, es alto. Sin embargo, por las irregularidades del proceso y su consecuente necesidad de corregir la superficie frecuentemente, es importante tener en cuenta que no todo el material aportado es material final de la pieza y que por tanto la eficiencia másica no es del 100%, pero sí sigue siendo mayor que eficiencia del proceso de aporte de polvo.

Medición de la dilución y la zona afectada térmicamente

Una característica fundamental del proceso de aporte por Laser Cladding es una mínima dilución y una zona afectada térmicamente lo más pequeña posible debido a la focalización del láser. Por eso, en este punto se han analizado estos aspectos en un microscopio preparando previamente dos probetas mediante pulido y ataque: la sección trasversal de un cordón aportado con los parámetros óptimos definitivos, y la sección trasversal de 5 cordones aportados con un solape de un 20%.

Es posible medir gran cantidad de características geométricas de los cordones y todas ellas están relacionadas con los parámetros de proceso. Desde el punto de vista práctico, ciertas dimensiones son más importantes para conseguir recubrimientos con buenas propiedades. La altura (0,85mm) y la anchura (2,7mm) del cordón son dimensiones básicas que son necesarias para realizar solapes de los cordones y el crecimiento de cada capa. También es interesante realizar estas medidas en la zona afectada por el calor ya que estarán relacionadas con el tamaño de grano final. (BOU., 2011)

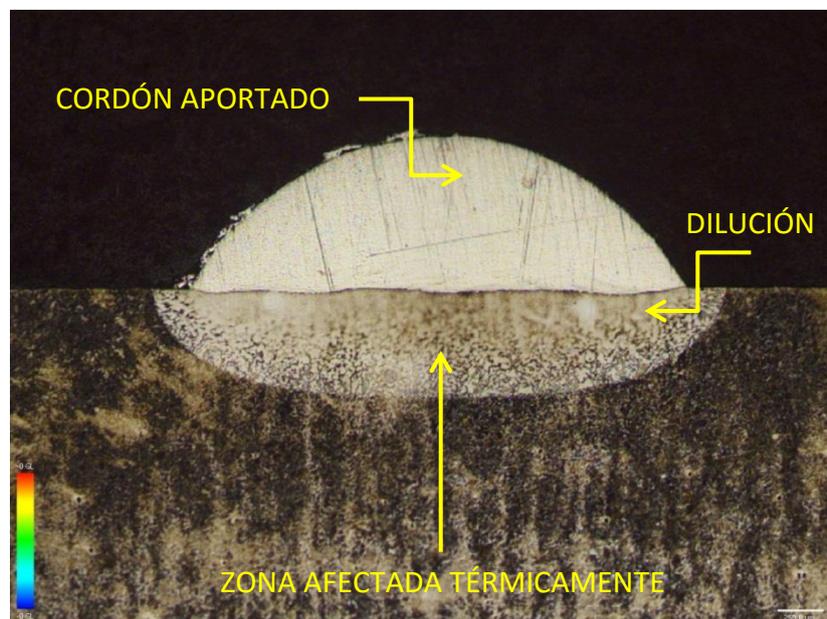


Figura 53. Sección transversal de un cordón

Lo que se observa en la imagen anterior es que apenas hay dilución alguna del material de aporte en el sustrato y que por tanto, el crecimiento del cordón es máximo. La dilución se puede analizar siguiendo la línea del sustrato que lo separa del aporte. Esto podría llevar a pensar que la unión metalúrgica es pobre, sin embargo el aporte queda perfectamente adherido a la superficie. Además, se puede observar que la superficie del cordón es limpia, facilitando los futuros aportes sobre él.

Por otro lado, la zona afectada térmicamente profundiza 0,6mm en el sustrato y supera al cordón en anchura en 0,43mm. Teniendo en cuenta el tamaño del aporte, la zona afectada por el calor es pequeña gracias a la focalización del haz láser, sobre todo si se compara con la zona afectada con aportes mediante otras fuentes de calor como el arco de plasma.

En cuanto al ángulo de mojado, éste tiene un valor de 56° aproximadamente. Estudios afirman que el valor óptimo de mojabilidad es de 40° , siendo 80° el límite de rango para que el valor no se considere defectuoso (I. Tabernero, 2013). Ángulos cercanos a 90° dificultan el solapamiento entre cordones consecutivos.

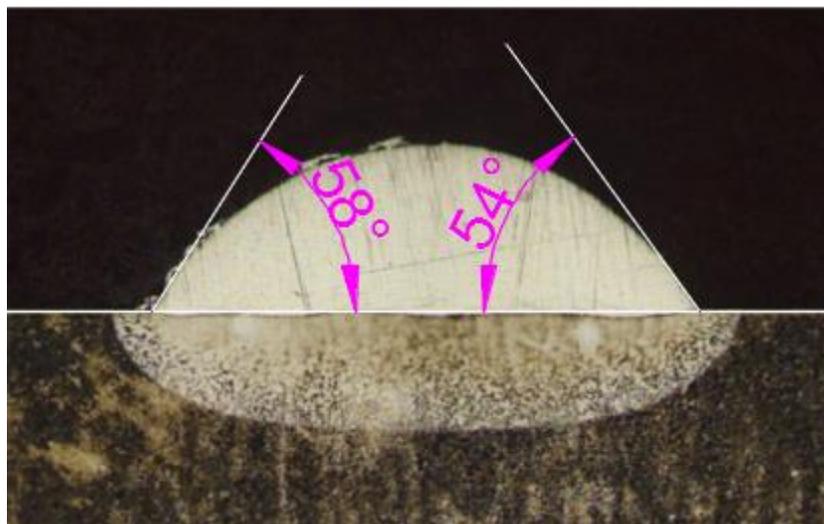


Figura 54. Ángulo de mojado



Figura 55. Sección trasversal de 5 cordones solapados

Lo que se puede observar en el microscopio en cuanto a solapes se refiere, es que los cordones no se depositan homogéneamente. Sin embargo, la superficie que dejan es lo bastante plana como para que el aporte de la capa superior lo haga correctamente, sin dar lugar a poros u otra clase de defectos. Las zonas negras observables en la parte de la izquierda de la zona aportada son restos de cascarilla que, como se ha mencionado anteriormente, son debidos al hilo empleado para la experimentación del estudio.

Las medidas obtenidas en el microscopio confocal Leica se pueden encontrar en el Anexo.

Estudio comparativo entre el aporte con hilo y con polvo

Una vez vistas las dos configuraciones con las que se puede trabajar en Laser Cladding, polvo e hilo, es necesario comparar ambas para analizar los procesos. Esta tarea fue realizada en cooperación con el Fraunhofer Institute for Production Technology IPT (Arrizubieta). Para ello se prepararon varias probetas de Inconel 718 con la misma geometría y el mismo equipo con una estrategia longitudinal que probó dar los mejores resultados.

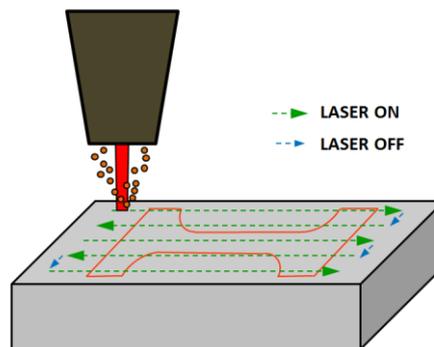


Figura 56. Estrategia ZIG-ZAG aplicada en el caso del polvo

A continuación se muestran imágenes de las probetas fabricadas tanto con polvo como con hilo.

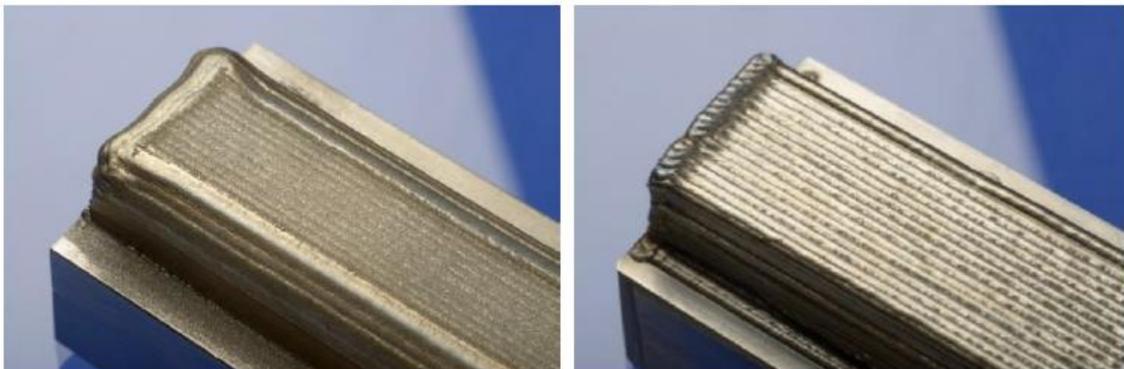


Figura 57. Forma final de la pieza de polvo (izquierda) y de hilo (derecha)

Como la tasa de deposición de material es mayor en el caso del hilo, el número de capas necesarias para generar la geometría deseada fue reducido sustancialmente. Por otro lado, en ambos casos se obtuvo un crecimiento en altura constante.

Comparación de las propiedades mecánicas

Para comparar las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas con polvo e hilo, se llevaron a cabo una serie de ensayos a tracción estandarizados siguiendo la norma DIN EN ISO 6892-1. A continuación se observan las dimensiones de las piezas a ensayar, siendo éstas cortadas mediante WEDM a partir de los tochos fabricados anteriormente.

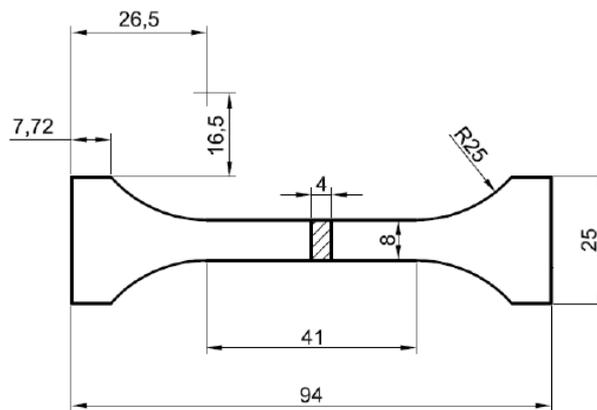


Figura 58. Pieza test para el ensayo de tracción

Se obtuvieron dos bloques de tres piezas para así obtener un valor medio de los resultados y evitar posibles dispersiones por la existencia de posibles defectos internos.



Figura 59. Piezas test de polvo (izquierda) y de hilo (derecha) preparadas para el ensayo

La figura 60 muestra el ensayo a tracción de una de las probetas. Se empleó una velocidad de 10mm/min y las piezas fueron ensayadas hasta su rotura.



Figura 60. Montaje de una probeta en la máquina de ensayo a tracción y su rotura

Como se puede ver en la figura 61 que muestra una gráfica fuerza-desplazamiento de la mordaza obtenida durante los ensayos, las piezas fabricadas con hilo llegan a una tensión de rotura (UTS) ligeramente mayor que las fabricadas con polvo, en torno al 5%. Por esta razón, se puede asumir que, en cuanto a la tensión última, no hay diferencia entre fabricar las piezas mediante LMD con hilo y con polvo.

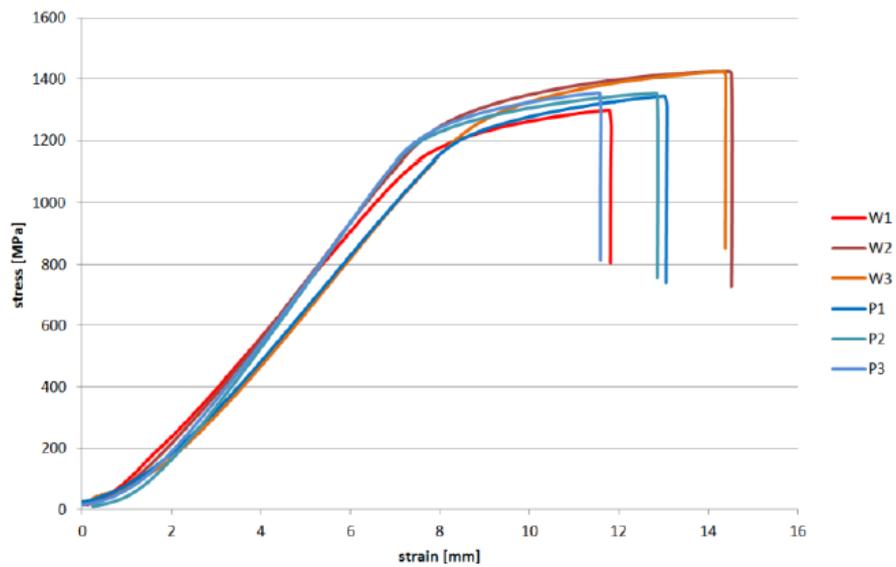


Figura 61. Resultados de los ensayos de tracción para las probetas de hilo y polvo

En la siguiente tabla se muestran los resultados de las 6 probetas ensayadas llamando W1, W2 y W3 a las fabricadas mediante el aporte de hilo, y P1, P2 y P3 a aquellas aportadas con polvo. Estos resultados son las variaciones de las secciones transversales (ΔS) y de las distancias entre puntos (Δl), y la tensión última en MPa. Las piezas fabricadas con hilo presentan una deformación y estrechamiento mayor en la rotura. Por tanto, puede concluirse que las piezas de polvo tienen una naturaleza ligeramente más frágil que las aportadas con material en forma de hilo.

	W1	W2	W3	P1	P2	P3
ΔS (%)	-11.66	-10.06	-12.71	-8.97	-9.56	-6.05
Δl (%)	8.22	13.10	12.35	9.95	10.64	8.07
UTS (MPa)	1298.735	1424.781	1424.364	1344.546	1354.652	1355.397

Tabla 6. Resultados de los ensayos a tracción

Un mayor análisis de la sección de rotura de las probetas muestra que, en el caso del hilo, en la unión entre capas aparecen pequeñas grietas. En cambio, en las piezas de polvo no se encuentran ni grietas ni defectos internos.

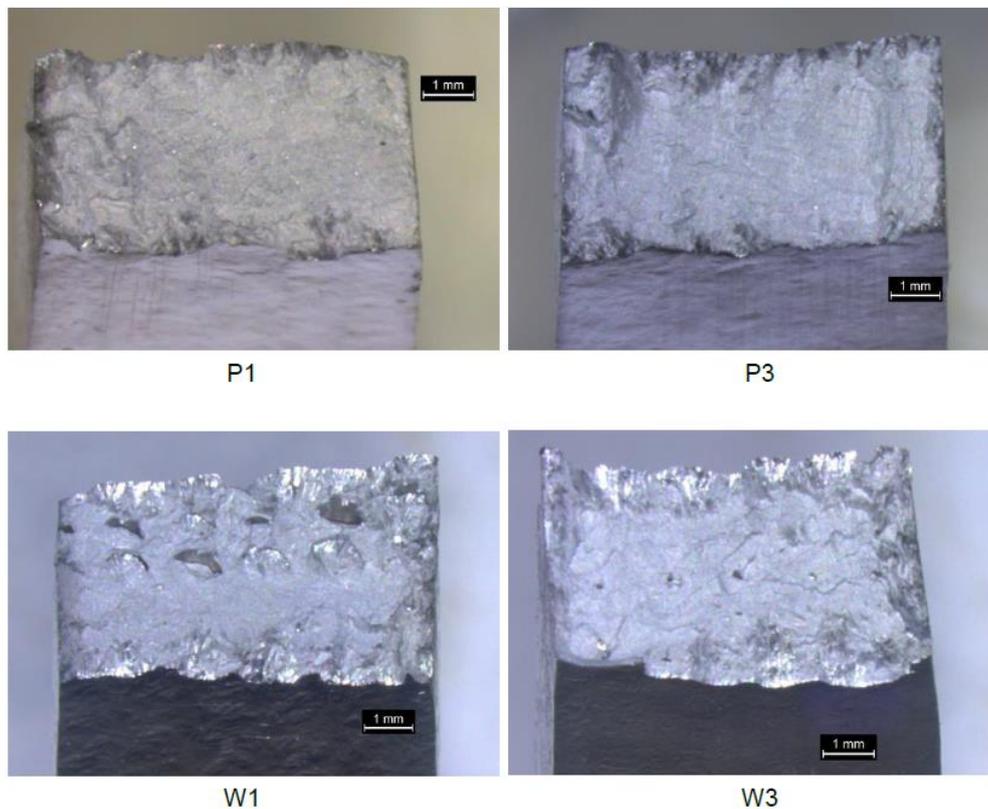


Figura 62. Detalle de las secciones de rotura

Comparación de la microestructura

Una vez analizadas las propiedades mecánicas, se dispuso a comparar la microestructura de las secciones transversales de las piezas, tras ser éstas pulidas y atacadas, para ver los posibles defectos internos que se hubiese podido generar durante los procesos.

Los resultados que se obtuvieron permiten ver, en el caso del polvo, que no hay grietas ni porosidades. En el caso del hilo, se encontraron defectos debidos en primer lugar a la incorrecta fundición del material, formándose así pequeños huecos entre cordones, como se puede observar en la siguiente figura. Además, aparecieron marcas de las diferentes capas de

aporte que, sin embargo, resultaron ser irrelevantes en la medida de las propiedades mecánicas.

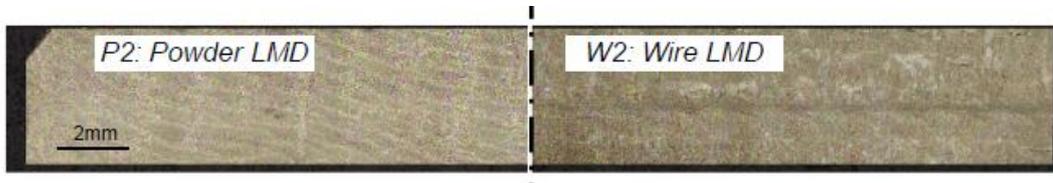


Figura 63. Secciones transversales pulidas y atacadas

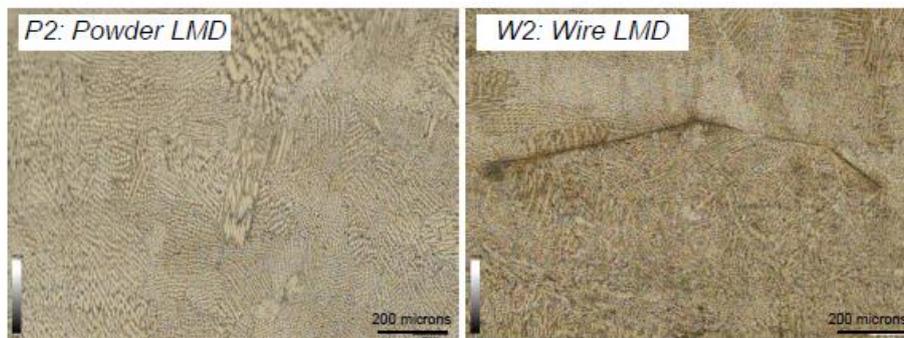


Figura 64. Detalles de la sección transversal sin defectos en el caso del polvo y de los defectos encontrados en el caso del hilo

Comparación de la microdureza

Finalmente se procedió a comparar la microdureza de las piezas y tras ver que los resultados apenas difieren, se pudo concluir que no hay diferencia entre el aporte de hilo y de polvo en lo que a dureza se refiere.

Otros estudios afirman que la dureza de las piezas aportadas está fuertemente unida a la naturaleza del material y para ello se presenta a continuación unas gráficas de dureza (Vickers) en función de la distancia de la superficie para diferentes materiales (Miguel Fonseca, Septiembre 2008).

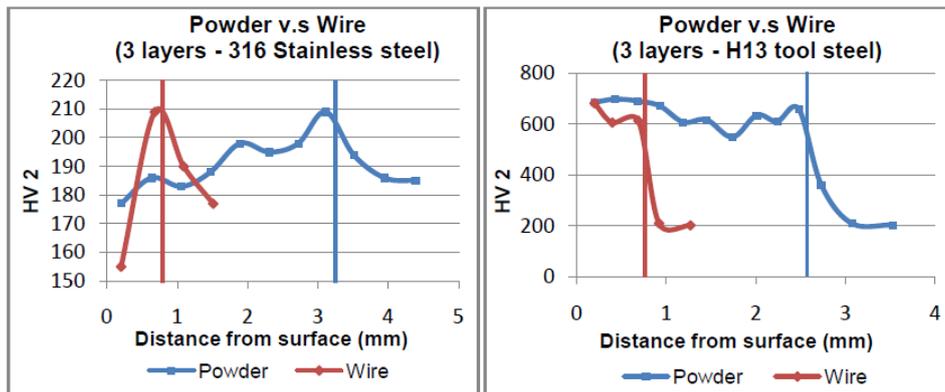


Figura 65. Dureza en acero inoxidable 316 (izquierda) y en acero de herramientas H13 (derecha) con polvo e hilo

En la figura 65 se puede observar un incremento de la dureza del recubrimiento en el caso del acero de herramientas H13 para ambos procesos de aporte de hilo y polvo metálico. Esto prueba que ambos materiales de aporte son excelentes opciones en aplicaciones en las que se necesite una mejora de la resistencia al desgaste. No ocurre lo mismo con el acero inoxidable 316, ya que, como se puede observar en la misma figura, la dureza en la superficie es menor que la del material base.

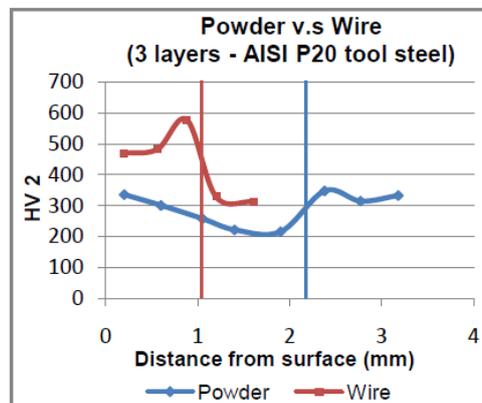


Figura 66. Dureza en acero de herramientas AISI P20 con polvo e hilo

En el caso de recubrimientos de polvo de acero de herramientas AISI P20, éstos tienen una dureza cerca de la superficie aproximadamente igual que la del material base. Este hecho podría ser el resultado del bajo contenido en carbono del material de aporte. Por esta razón,

este material de aporte en forma de polvo no debe usarse cuando el objetivo del recubrimiento es aumentar la resistencia al desgaste. Observando el perfil de durezas del aporte de hilo de este material, se puede afirmar que el material en forma de hilo en este caso sí que puede usarse para mejorar la resistencia al desgaste, ya que la dureza del recubrimiento es mayor que la del sustrato.

Comparación de la eficiencia y los costes de los procesos

Para evaluar el coste de material, la eficiencia del proceso y el tiempo requerido, se ha llevado a cabo un análisis completo de los datos experimentales. Como ya se ha mencionado, las propiedades mecánicas, la microdureza y la microestructura de las piezas fabricadas tanto con aporte de hilo como con aporte de polvo presentan resultados similares que han llevado a pensar que no se puede afirmar a ciencia cierta que un proceso es mejor que el otro. Por tanto, la decisión acerca de cuál de los dos procesos es el más apropiado se va a guiar con estos factores.

Cabe mencionar que el término apropiado va dirigido a aquellos procesos de recubrimientos y de fabricación de piezas simples de tamaño medio-grande que el aporte de hilo es capaz de realizar.

Ensayos experimentales llevados a cabo en otros trabajos afirman que la eficiencia másica del polvo se sitúa entre el 20 y el 30%, aunque recientemente se han logrado eficiencias del 40% con boquillas continuas. En esta eficiencia másica está incluido, no sólo el polvo no atrapado por el láser, sino también el polvo que se pierde cuando se apaga el láser, el polvo perdido antes de encender el láser para asegurar un constante flujo de polvo, o la cantidad de polvo acumulado en los tubos cuando se para el proceso.

Sin embargo, aunque las pérdidas de material en polvo es un aspecto relevante asociado al coste del proceso, únicamente representa un factor parcial de la eficiencia de todo el proceso. Por eso, se ha realizado un análisis más profundo de la eficiencia de los procesos. La tasa de aporte de material, el coste de la materia prima, la cantidad de material a mecanizar posteriormente y los posibles defectos debido a la sensibilidad de los procesos, son los factores que se han de tener en cuenta antes de elegir entre ambos procesos.

Con el fin de comparar los gastos que generan ambos procesos, así como los factores que influyen en la eficiencia anteriormente citados, se han utilizado los ensayos empleados para comparar las propiedades mecánicas, la microdureza y la microestructura. En la siguiente tabla se detallan los gastos de materiales, el tiempo total empleado y otros gastos, como la necesidad de mecanizado tras el aporte de material en polvo y en hilo.

	Polvo	Hilo	Unidades
Peso del material base	0,83	0,87	kg
Peso del material aportado	0,39	0,36	kg
Total del material usado	1,85	0,39*	kg
Eficiencia másica	21,00	92,00	%
Coste unitario de material	60,00	18,00	€/kg
Coste total de material	111,00	7,02	€
Tiempo del proceso	161,00**	79,05**	min
Tiempo de espera	350,00	170,00	min
Total time	511,00	249,05	min
Gastos de gas y fungibles	25,50	12,52	€
Coste de uso de la máquina	851,67***	415,08***	€
Coste de mecanizado	0	75	€
Coste total	987,72	509,62	€

Tabla 7. Comparación de los gastos de los procesos de Laser Cladding con polvo e hilo

* Se perdieron 1,2m de hilo durante el proceso y con el post-mecanizado

** El avance de la máquina entre cordones consecutivos es de 5000mm/min para reducir los tiempos no productivos.

*** El coste horario de la máquina empleada para los ensayos de ambos procesos es de 100 €/h

Con el equipo y las condiciones empleadas para estos ensayos, la tasa de aporte para el caso del hilo resultó ser el doble que para el caso del polvo. Así, el tiempo total de aporte para la misma geometría se ha visto reducido. Además, se puede observar que el coste total de la

técnica con el uso de hilo es inferior que con polvo. En este coste se incluyen los gastos de material, teniendo en cuenta la eficiencia másica, el uso de la máquina láser, los gastos de gas y fungibles, y los costes de mecanizado teniendo en cuenta que la pieza que se obtiene en el caso del polvo es muy similar a la pieza final y por tanto no es necesario arranque alguno de material.

Por otro lado, hay muchos otros factores que pueden influenciar en la elección de uno u otro proceso y que no pueden ser cuantificados. Éstos pueden ser la suciedad de la máquina tras los procesos, la toxicidad de los materiales, la flexibilidad de los procesos y la susceptibilidad a la aparición de defectos.

Como ya se ha mencionado anteriormente, por un lado, el proceso de Laser Cladding con aporte de hilo es considerado un proceso limpio en comparación con el polvo, ya que con este último la máquina se ensucia muy fácilmente exigiendo una frecuente limpieza.

Por otro lado, el proceso de Laser Cladding con aporte de polvo es mucho más flexible y permite generar unas geometrías más complejas y con una buena calidad. Además, tiene una naturaleza más robusta y su programación y puesta a punta resulta ser más fácil. Asimismo, como el proceso de aporte de hilo es más sensible, la experiencia y los conocimientos del operador son críticos.

Para finalizar, se recalca que estos ensayos se han realizado con una geometría simple y que por tanto, el hilo es más adecuado para su fabricación, teniendo en cuenta el tiempo requerido, la eficiencia y los gastos totales. Sin embargo, los resultados podrían variar cuando se pretenden fabricar geometrías complejas.

ASPECTOS ECONÓMICOS

Presupuesto

En el descargo de gastos de este trabajo se ha detallado la inversión necesaria para llevar a cabo este estudio experimental. En primer lugar se detallan las horas internas del proyecto. En él han participado un ingeniero junior, un maestro de taller y un ingeniero superior. En la segunda tabla se encuentran las amortizaciones del proyecto. Éstas son todos aquellos recursos de los que se ha hecho uso en el Taller de Ingeniería Mecánica de la Universidad de País Vasco UPV/EHU. Finalmente se tendrán en cuenta los gastos para, en la última tabla obtener un resumen del descargo de gastos total del estudio. En las siguientes tablas se refleja los subtotales mencionados.

Horas internas	Coste horario	Tiempo	Total
Ingeniero Junior	30 €/hora	300 horas	9.000 €
Maestro de taller	40 €/hora	20 horas	800 €
Ingeniero Senior	55 €/hora	100 horas	5.500 €
Subtotal de horas internas			15.300 €

Tabla 8. Horas internas del proyecto

Amortizaciones	Coste	Vida útil	Uso	Total
Ordenador	1.000 €	5 años	200 horas	20,00 €
Centro de Laser Cladding	45.000 €	10 años	100 horas	225,00 €
Argón	180 €	2 meses	100 horas	46,88 €
Generador láser	160.000 €	10 años	100 horas	800,00 €
Centro de fresado CNC Kondia A6	160.000 €	10 años	8 horas	64,00 €
Torno Pinacho S90 VS	50.000 €	10 años	5 horas	12,50 €
Herramientas de taller	800 €	2 años	100 horas	20,00 €
Microsoft office	108 €	3 años	50 horas	0,90 €
Licencia NX	120 €	1 años	3 horas	0,18 €
Subtotal amortizaciones				1.189,46 €

Tabla 9. Amortizaciones del proyecto

Gastos	Coste unitario
Bobina hilo tubular	308,55 €
Probetas acero inoxidable	200 €
Material de oficina	50 €
Material bibliográfico	100 €
Material aluminio	30 €
Material de unión	10 €
Subtotal gastos	698,55 €

Tabla 10. Gastos del proyecto

Costes directos	
Horas internas	15.300 €
Amortizaciones	1.189,46 €
Gastos	698,55 €
Subtotal costes directos	17.188,01 €
Costes indirectos (7%)	1.203,17 €
Total descargo de gastos	18.391,17 €

Tabla 11. Resumen del descargo de gastos

Por tanto, la inversión necesaria para llevar a cabo este proyecto de investigación asciende a una suma de 18.391,17 €.

CONCLUSIONES

El objetivo principal de este proyecto era asegurar unas altas productividades y una buena calidad del proceso de Laser Cladding utilizando hilo como material de aporte. Para ello, en el otro lado de la balanza se encuentra el polvo.

Por un lado, como indicador de la productividad que cada uno de las dos configuraciones es capaz de conseguir se encuentra la tasa de aporte. Este valor varía considerablemente con los parámetros de aporte y los materiales empleados, y es por eso que no se puede adjudicar un valor a cada proceso. Sin embargo, muchos estudios sitúan la tasa de aporte de polvo en valores de 5g/min. En este proyecto el valor de la tasa de aporte de material en forma de hilo es de casi 0.5kg/h, es decir, 8,33g/min.

Por otro lado, con la realización de diversos experimentos se ha podido observar la calidad del aporte de material en forma de hilo y comparar con piezas de aporte de polvo realizadas en otros estudios. Como se ha mencionado, en cuanto a las propiedades mecánicas la tensión última que se alcanza para ambos casos es prácticamente la misma. El análisis de la microestructura, a pesar de la aparición de unas pequeñas marcas de las capas de aporte en el caso del hilo, permite concluir que ambos procesos, con hilo y polvo, tienen una buena fusión en la línea de contacto entre material de aporte y material base. Además, los valores de microdureza de piezas fabricadas con ambas técnicas no muestran diferencias aparentes. Este parámetro depende del material de aporte empleado, independientemente de si está en forma de polvo o de hilo.

Como ya se ha descrito en el análisis de alternativas de este proyecto, en teoría los valores de dilución en aporte de polvo son mejores que en aporte de hilo, siendo uno de los retos de los procesos de Laser Cladding tener un mínimo riesgo de cambiar las propiedades iniciales del material base y el material aportado. Sin embargo, en este estudio experimental, el valor de la dilución del proceso de LMD con hilo es mínimo, pudiendo llevar a pensar que la unión entre material de aporte y base es pobre. Si hubiese que mejorar los valores de dilución una forma sería reducir la potencia del láser para reducir así lo que profundiza el material de aporte en el sustrato.

El aporte de polvo da una mayor flexibilidad y es menos susceptible a la interrupción del proceso debido a algún fallo. Con el hilo, en cambio, se logran mayores tasas de aporte y la eficiencia másica es mayor. Por esta razón no se puede asegurar que la técnica de LMD con polvo es mejor que con hilo o viceversa.

A modo de conclusión, teniendo en cuenta todos los factores mencionados, sin olvidar el bajo precio del proceso de aporte de hilo con respecto al aporte de polvo, así como su dificultad de puesta a punto y la incapacidad del hilo de formar geometrías complicadas, se puede afirmar que, cuando se trata de aportar geometrías complejas y que además no sean necesarias altas productividades, el proceso de aporte de polvo es el más ventajoso. Y por otro lado, cuando se necesite depositar grandes cantidades de material con geometrías sencillas, el aporte de material en forma de hilo por Laser Cladding resulta ser más eficiente y por tanto, más adecuado.

BIBLIOGRAFÍA

Arrizubieta, J. (s.f.). *COMPARISON BETWEEN WIRE AND POWDER LASER MATERIAL DEPOSITION PROCESSES FOR INCONEL 718.*

BOU., J. J. (2011). *ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LOS PARÁMETROS DEL PROCESO DE LASER CLADDING COAXIAL DE RECUBRIMIENTOS DE TI6AL4V SOBRE TI6AL4V.* Valencia.

GNCLáser - *Recargue superficial por láser.* (s.f.). Recuperado el Mayo de 2016, de <http://www.gnclaser.es/files/galeria/VIP%20CLADDING.pdf>

I. Tabernero, A. C. (2013). *Optimal Parameters for 5-axis Laser Cladding.*

IK4 *TEKNIKER.* (s.f.). Recuperado el Marzo de 2016, de <http://www.tekniker.es/es/laser-cladding-o-laser-metal-deposition-lmd>

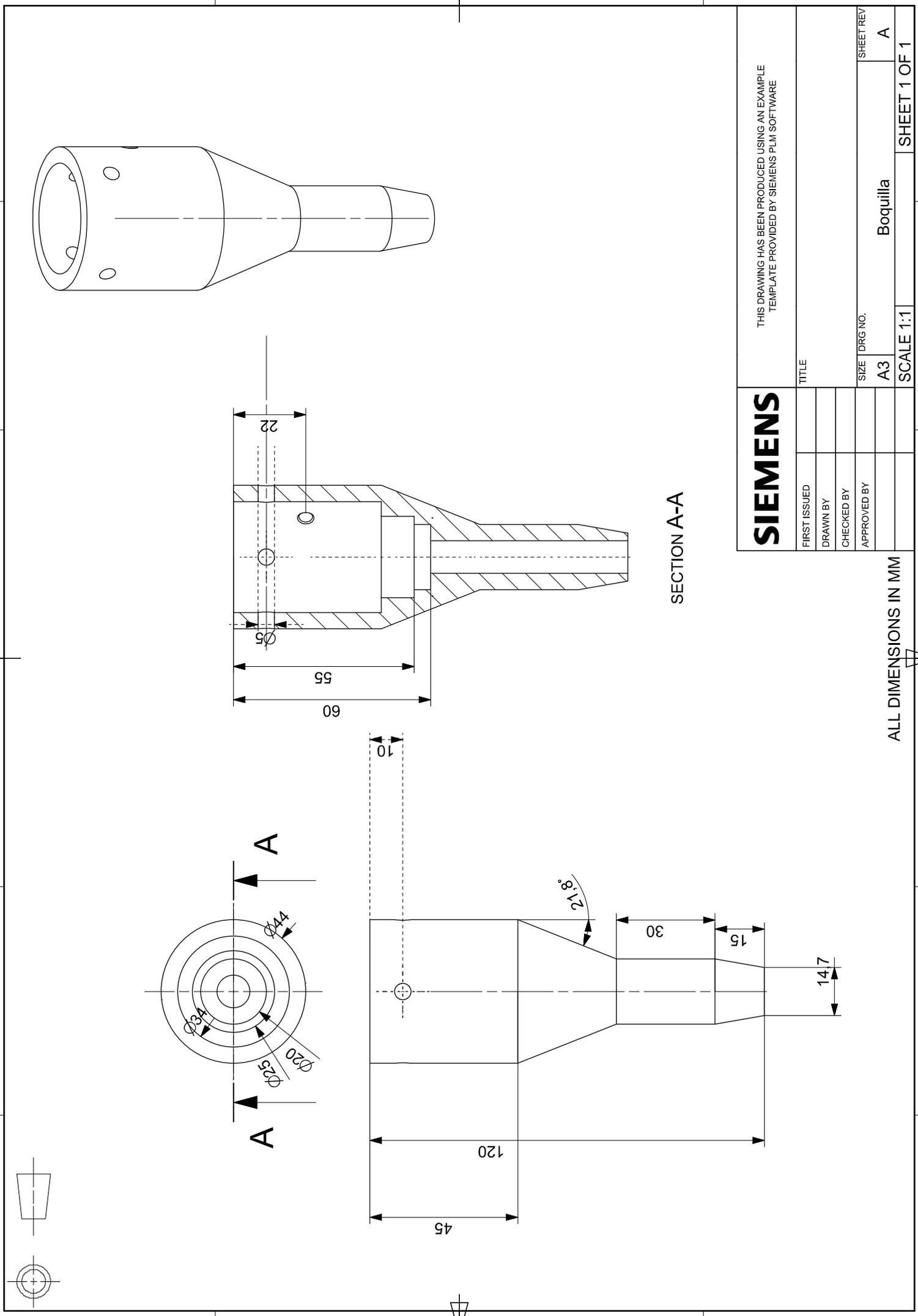
Miguel Fonseca, B. (Septiembre 2008). *Laser cladding using filler powder and wire; Productivity and quality.*

Tabernero, I., Arrizubieta, J. I., & Renderos, M. (s.f.). *FABRICACIÓN ADITIVA DE PIEZAS METÁLICAS: DE LA IDEA A LA REALIDAD SIN PARADAS POR EL CAMINO.*

Toyserkani, E., Khajepour, A., & Corbin, S. (2005). *Laser Cladding.* CRC Press LLC.

Ukar, E., & Lamikiz, A. (08 de 06 de 2015). *Interempresas.* Recuperado el 26 de 04 de 2016

ANEXO



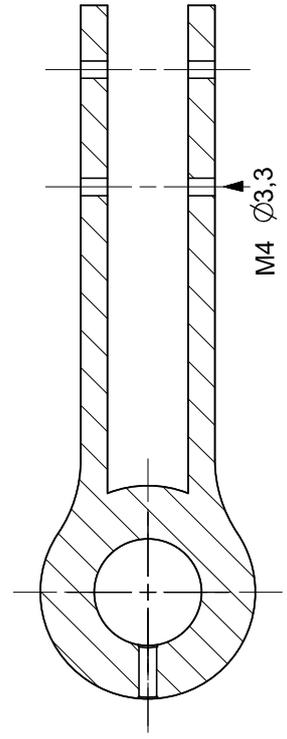
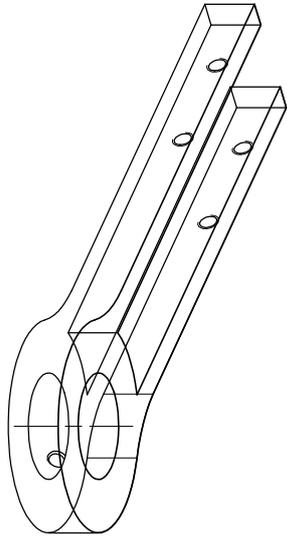
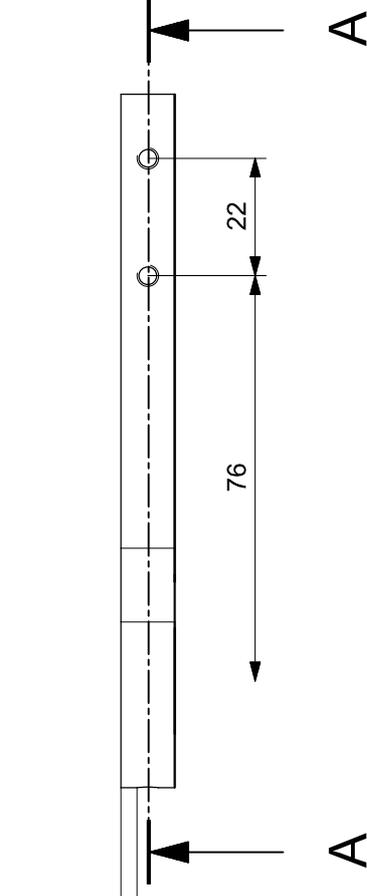
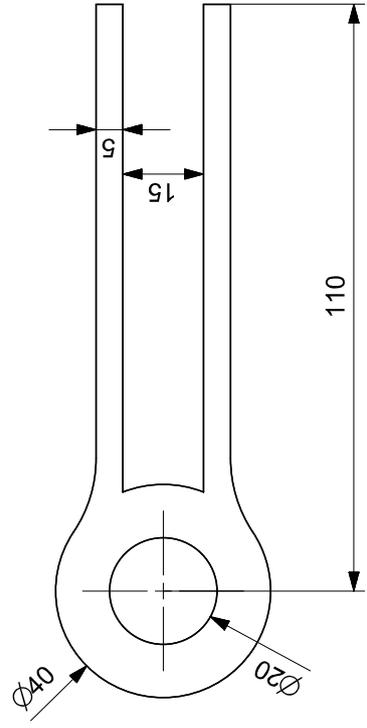
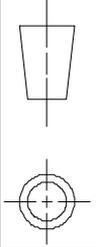
SECTION A-A

SIEMENS		THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE	
FIRST ISSUED	TITLE	SIZE	DRG NO.
DRAWN BY		A3	
CHECKED BY		Boquilla	
APPROVED BY		SCALE	1:1
		SHEET 1 OF 1	

ALL DIMENSIONS IN MM

6 5 4 3 2 1

A B C D



SECTION A-A

SIEMENS

THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE
TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE

FIRST ISSUED	TITLE
DRAWN BY	
CHECKED BY	
APPROVED BY	
SIZE	DRG NO.
A3	Positionador
SCALE 1:1	SHEET 1 OF 1

ALL DIMENSIONS IN MM

SHEET REV
A

1 2 3 4 5 6

A

B

C

D

1

2

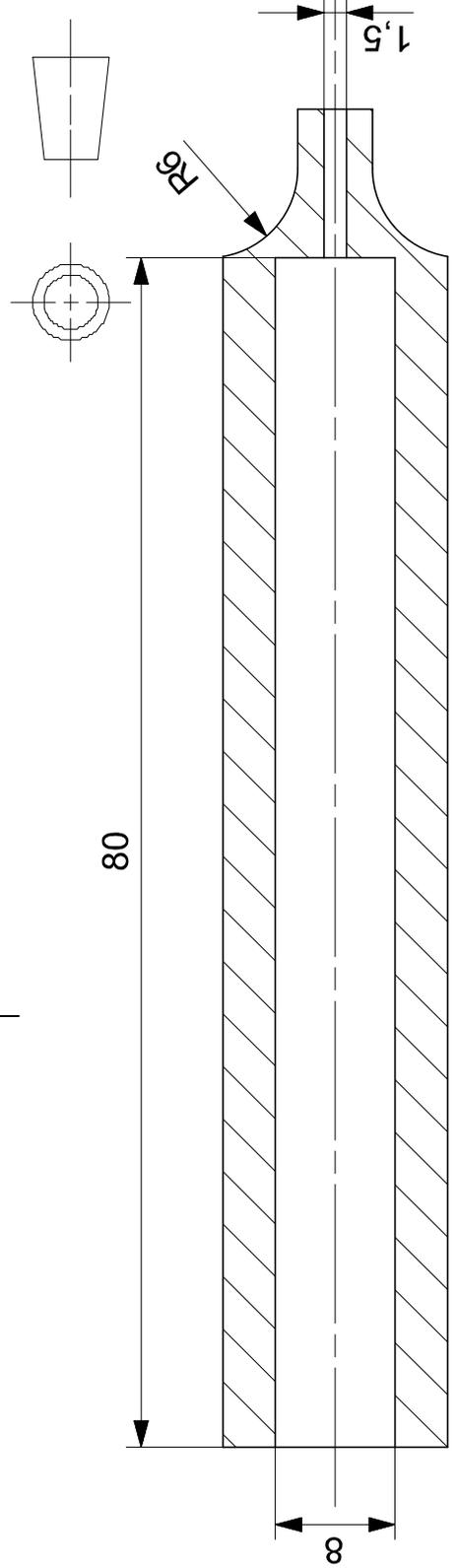
3

4

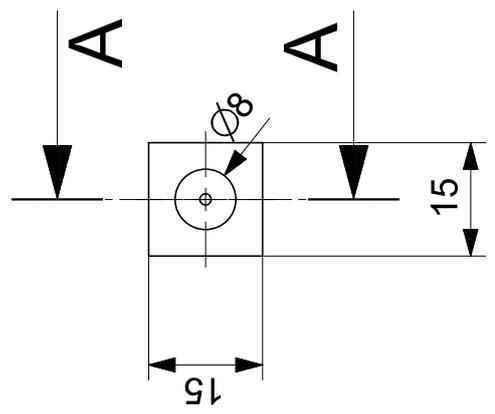
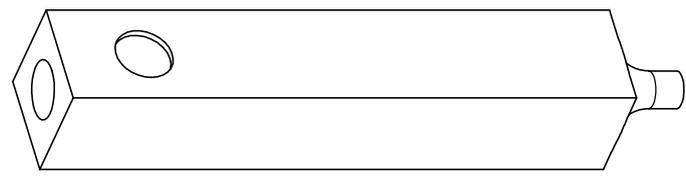
5

6

1 2 3 4



SECTION A-A
SCALE 2:1



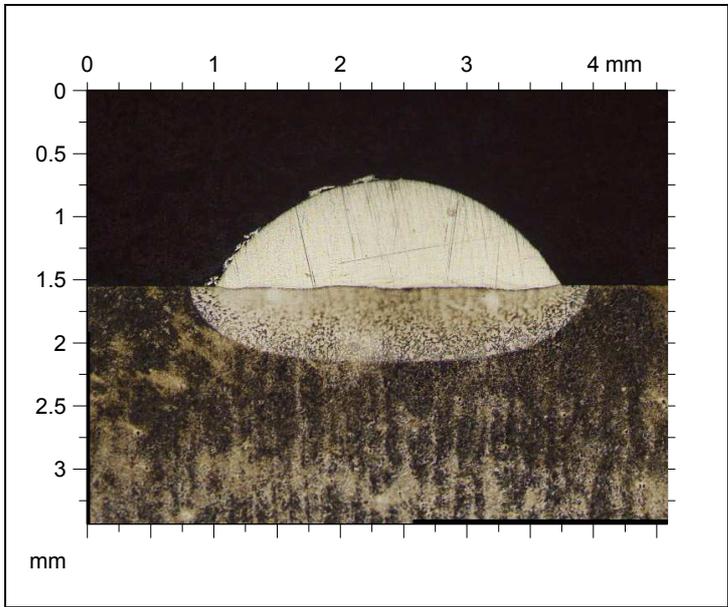
SIEMENS

THIS DRAWING HAS BEEN PRODUCED USING AN EXAMPLE
TEMPLATE PROVIDED BY SIEMENS PLM SOFTWARE

FIRST ISSUED	TITLE		
DRAWN BY			
CHECKED BY			
APPROVED BY			
	SIZE	DRG NO.	SHEET REV
	A4	Alimentador_hilo	A
	SCALE 1:1		SHEET 1 OF 1

ALL DIMENSIONS IN MM

1 2 3 4



Identity card

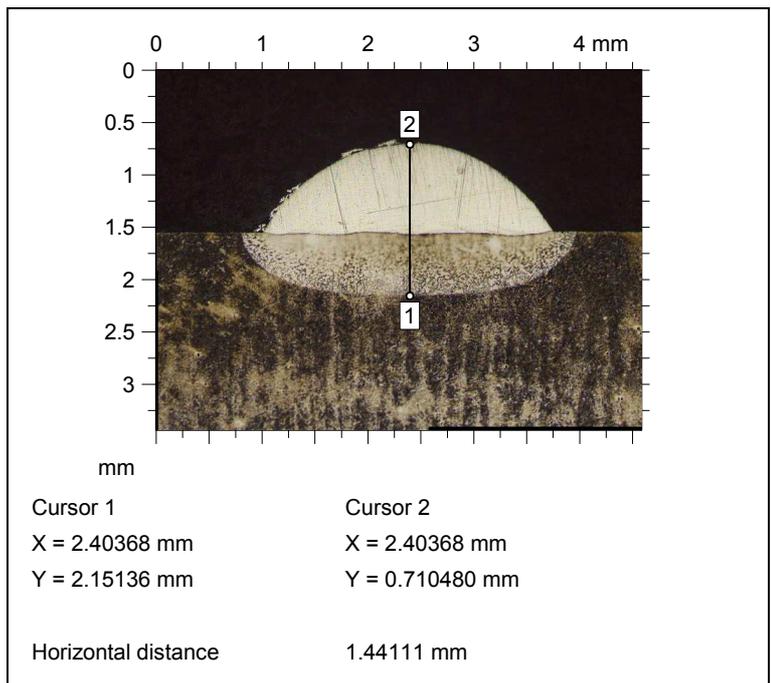
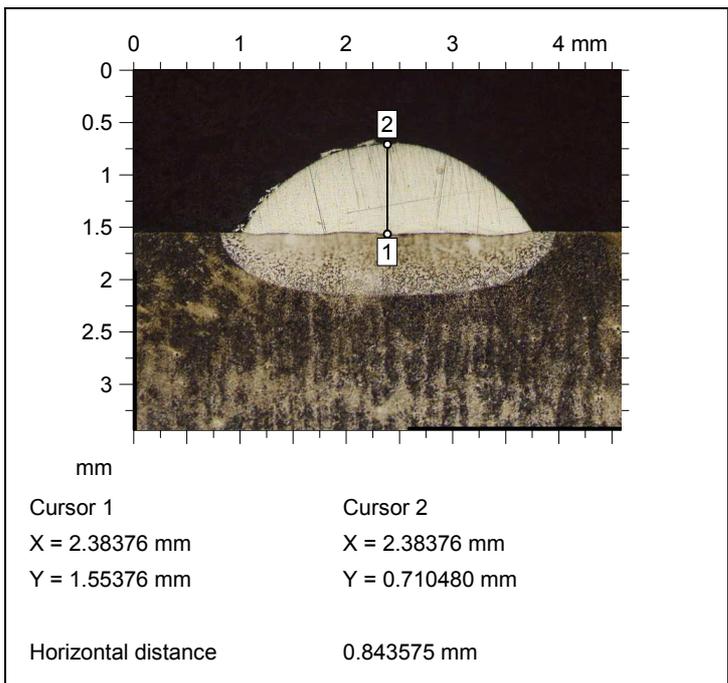
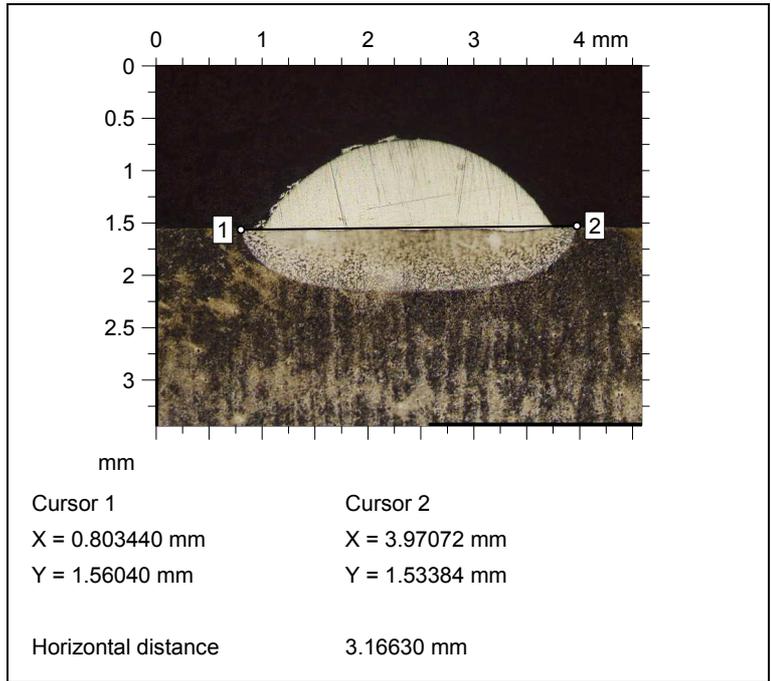
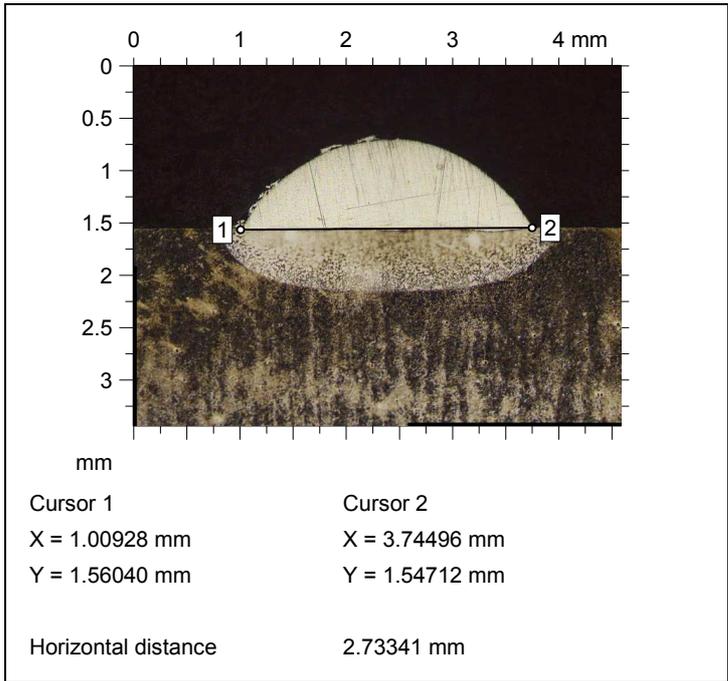
Name: Línea hilo-1
 Filename: C:\Program Files\LeicaSCAN DCM3D 3.3.1\locale
 \Measurements\Laura\Línea hilo.plu
 Created on: 5/19/2016 1:44:04 PM

Axis: X

Length: 4.58160 mm
 Size: 691 points
 Spacing: 0.006640 mm
 Offset: 0.00000 mm

Axis: Y

Length: 3.43288 mm
 Size: 518 lines
 Spacing: 0.006640 mm
 Offset: 0.00000 mm





Identity card

Name: cordones hilo-1
 Filename: C:\Program Files\LeicaSCAN DCM3D 3.3.1\locale
 \Measurements\Laura\cordones hilo.plu
 Created on: 5/19/2016 1:48:19 PM

Axis: X
 Length: 12.7355 mm
 Size: 1919 points
 Spacing: 0.006640 mm
 Offset: 0.00000 mm

Axis: Y
 Length: 3.43288 mm
 Size: 518 lines
 Spacing: 0.006640 mm
 Offset: 0.00000 mm

