



## ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL USO DE FLUIDO DE CORTE EN PROCESOS HÍBRIDOS DE MECANIZADO Y APORTE POR LÁSER

MAGDALENA CORTINA, JON IÑAKI ARRIZUBIETA, JOSE EXEQUIEL RUIZ, ENEKO UKAR, AITZOL LAMIKIZ

Universidad del País Vasco (UPV/EHU)  
Departamento Ingeniería Mecánica  
Plaza Torres Quevedo, 1 - 48013 Bilbao, Bizkaia, España

(Recibido 30 de marzo de 2018, para publicación 15 de julio de 2018)

**Resumen** – A medida que la presión a nivel global en el ámbito de la producción aumenta, hay una mayor tendencia a procesos que proporcionan flexibilidad y eficiencia, a la vez que mantienen la calidad del producto final. Una de las tendencias actuales es la integración de distintos procesos en una misma máquina, dando lugar a las denominadas máquinas híbridas. Un ejemplo de máquina híbrida es la integrada por fabricación aditiva y mecanizado. Una de las limitaciones existentes en la combinación de procesos de mecanizado y aporte láser se deriva de la presencia de fluido de corte en la pieza como consecuencia del mecanizado, contaminando la superficie de aporte. En consecuencia, el presente trabajo analiza la influencia del empleo de fluido de corte y sus posibles efectos adversos en procesos híbridos de mecanizado y aporte láser. Para ello, se realizan diversos aportes sobre una pieza previamente mecanizada, tanto directos en presencia de fluido de corte, como tras la limpieza de la superficie de la misma mediante diferentes métodos. Por último, se lleva a cabo un análisis de la integridad metalúrgica de cada aporte y se evalúan los defectos que aparecen en ellos. De este modo, puede establecerse una relación entre el uso de fluidos de corte durante el mecanizado y la calidad del aporte posteriormente realizado.

**Palabras clave** – Fabricación aditiva, aporte láser, máquinas híbridas, fluido de corte, taladrina, porosidad, calidad del aporte.

### 1. INTRODUCCIÓN

La industria de la fabricación ha experimentado un importante crecimiento en las últimas décadas, incorporando nuevos avances a los procesos de producción y apoyándose en nuevos conceptos, como por ejemplo la emergente “fabricación híbrida” [1]. Para la fabricación de piezas complejas, la secuencia de operaciones puede incluir numerosas etapas, implicando el uso de distintos procesos y máquinas. En estos casos, se generan tiempos no productivos y una reducción de la precisión de la pieza resultante como consecuencia de las distintas atadas en las sucesivas máquinas [2]. Una de las tendencias actuales es la integración de distintos procesos en una misma máquina, dando lugar a las denominadas máquinas híbridas y aunando las ventajas de cada técnica por separado. En el caso de combinar procesos aditivos y sustractivos, esto se traduce en la posibilidad de generar geometrías complejas propias de la fabricación aditiva, y la producción de componentes de precisión característica del mecanizado [3]. Además, el empleo de máquinas híbridas crea nuevas oportunidades en el diseño y fabricación de piezas, así como en la reparación de componentes de alto valor añadido. Grandes fabricantes de máquina herramienta como DMG Mori, Okuma, Mazak o Ibarria ya han reparado en las oportunidades que brindan estas máquinas y han lanzado al mercado las primeras propuestas, adoptando el proceso denominado como *Laser Metal Deposition* (LMD) y el fresado como procesos aditivo y sustractivo, respectivamente.

El *Laser Metal Deposition* (LMD) o aporte por láser es un proceso basado en la fusión de material suministrado en forma de polvo o hilo metálico sobre la superficie de un sustrato, mediante el cual se obtienen recubrimientos o se generan nuevas estructuras capa a capa [4]. Este proceso se caracteriza por su capacidad de generación de piezas con propiedades semejantes a las del sustrato base, al cual se encuentra unido metalúrgicamente, con gran flexibilidad en cuanto a generación de geometrías y aplicable a una

amplia variedad de materiales [5]. Los campos de aplicación de esta tipología de aporte por láser se centran principalmente en la fabricación y reparación de componentes de alto valor añadido, enfocados a sectores industriales como el aeronáutico, aeroespacial, automoción o petrolero [6]. No obstante, la principal limitación del aporte por láser reside en el acabado de los componentes fabricados mediante esta técnica. Por consiguiente, su combinación con el mecanizado constituye una solución que solventaría dicha limitación.

Sin embargo, los restos de fluido de corte producto del mecanizado sobre la pieza son un inconveniente de cara al posterior proceso de aporte láser sobre ella. El empleo de fluidos de corte o taladrinas es necesario para incrementar la eficiencia de los procesos de mecanizado, especialmente para aquellos materiales con baja maquinabilidad [7], pero puede contaminar la superficie sobre la que se aporta material.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la influencia del fluido de corte y sus posibles efectos adversos en procesos híbridos de mecanizado y aporte por láser. En trabajos previos [8] se analizó la influencia del fluido de corte remanente del mecanizado sobre aportes de una única capa. En cambio, el presente trabajo se centra en el estudio de dicha influencia sobre aportes de más de una capa. Para ello, se realizan aportes de paredes verticales sobre un sustrato previamente mecanizado e impregnado con fluido de corte y se evalúan los resultados obtenidos tras el aporte directo, así como tras la limpieza del mismo. De este modo, puede establecerse una relación entre el uso de fluidos de corte durante el mecanizado y la calidad del aporte posteriormente realizado.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Los ensayos experimentales descritos en este trabajo se han realizado en una célula láser de 5 ejes, mientras que el generador láser empleado es un láser de fibra de alta potencia, Rofin FL010, con una potencia máxima de 1 kW y longitud de onda de 1070 nm. El haz láser es conducido a través de una fibra desde el generador hasta la célula láser, generando un *spot* circular de aproximadamente 2 mm de diámetro. Además, el polvo metálico es suministrado por un alimentador Sulzer Metco Twin 10-C hasta una boquilla coaxial, *EHUCoax2015* [9], empleando argón tanto como gas de arrastre, así como de protección.

Los materiales empleados como sustrato y polvo metálico son Inconel 718 y MetcoClad 718, respectivamente. Por un lado, el Inconel 718 es una aleación de níquel-cromo de alta resistencia a la corrosión, elevada tenacidad y excelente soldabilidad, además de presentar una alta resistencia a la rotura por fluencia a altas temperaturas. Es ampliamente usado para turbinas de gas, motores aeronáuticos, reactores nucleares o bombas. Por otro lado, MetcoClad 718 es polvo metálico de superaleación base níquel de composición similar al Inconel 718, con una granulometría de entre 44 y 90  $\mu\text{m}$ . Su uso está recomendado para la fabricación y reparación de componentes de superaleaciones base níquel. Las composiciones en peso de ambos materiales se incluyen en la tabla 1.

Para la realización de los ensayos, se preparan tres planchas de Inconel 718 sobre las que se ejecutarán los aportes. Las superficies de dos de ellas se impregnarán con una emulsión de agua-aceite Houghton HOCUT B-750 con una concentración del 10%. HOCUT B-750 es un aceite de corte soluble en agua, compuesto de aceite mineral y emulgentes con aditivos anticorrosivos, indicado para mecanizado de metales. Además, el rango de concentraciones recomendado por el fabricante es de entre 5% y 10% para operaciones de mecanizado [12].

En el presente trabajo se ejecutan tres experimentos a partir de los cuales se generan tres paredes verticales estrechas. En cuanto a los parámetros empleados, los tres ensayos se realizan con idénticos parámetros de proceso, incluidos en la tabla 2, la única diferencia reside en la aplicación y limpieza del fluido de corte.

Tabla 1. Composición química en porcentaje en peso de los materiales utilizados [10], [11].

Material	Ni	Cr	Nb	Mo	Ti	Si	Mn	C	B	Fe
<b>Inconel 718</b>	52,50	19,00	5,10	3,05	0,90	0,18	0,18	0,04	0,003	Balance
<b>MetcoClad 718</b>	46,50	19,00	5,10	3,05	1,00	0,20	0,08	0,05	0,005	Balance

Tabla 2. Parámetros de proceso empleados.

Parámetros de proceso		
Potencia láser	(W)	580
Velocidad de avance	(mm·min <sup>-1</sup> )	525
Solape entre cordones	(%)	26
Flujo másico de polvo	(g·min <sup>-1</sup> )	8,8
Caudal de gas de protección	(L·min <sup>-1</sup> )	14

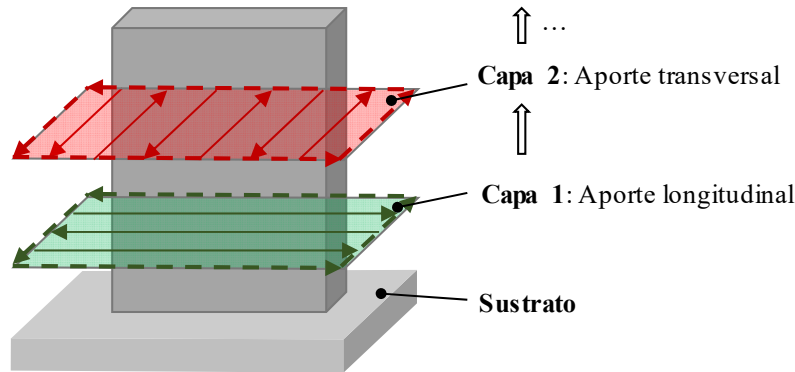
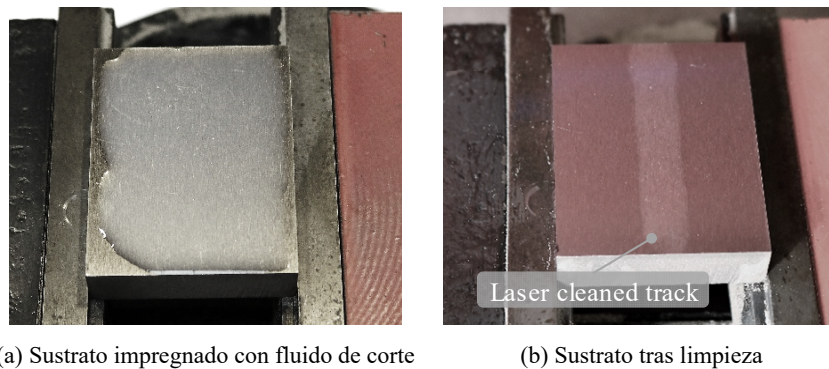


Fig. 1. Estrategia de aporte seguida.



(a) Sustrato impregnado con fluido de corte

(b) Sustrato tras limpieza

Fig. 2. Sustratos sobre los que aportar.

La generación de las paredes se efectúa aportando el perímetro de cada capa y luego rellenando el interior del mismo siguiendo una estrategia en zig-zag. Según se crece en altura, se alterna entre aporte longitudinal y transversal de las capas, tal y como se muestra en la Fig. 1. De este modo se evita la direccionalidad de las propiedades mecánicas, así como las tensiones residuales que pueden desembocar en el agrietamiento del material aportado.

En primer lugar, se realiza un aporte sobre sustrato inalterado y limpio, que es tomado como referencia, mientras que para los dos aportes restantes se impregna la superficie del sustrato con fluido de corte. Por un lado, en uno de ellos se ejecuta un aporte directo, esto es, sin efectuar limpieza ninguna de la superficie de aporte (Fig. 2a), mientras que en el otro se realiza una limpieza previa (Fig. 2b). El método de limpieza empleado consiste en, en un primer momento, soplar aire a presión sobre la pieza con tal de eliminar el exceso de fluido de corte, para luego pasar el láser a menor potencia y desenfocado para acabar de limpiar la superficie sobre la que aportar.

Por último, las probetas deben ser sometidas a inspección en busca de grietas o poros. Para ello, las muestras son cortadas y una de sus caras es rectificadas con tal de garantizar un espesor constante y eliminar irregularidades superficiales en la totalidad de la muestra y así facilitar su posterior inspección por rayos X.

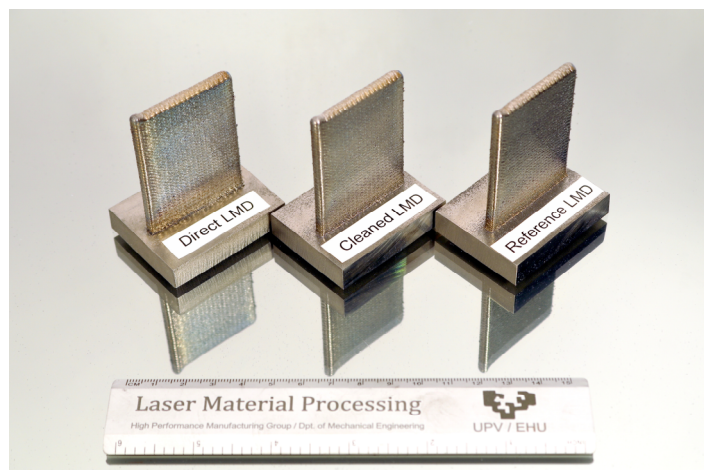
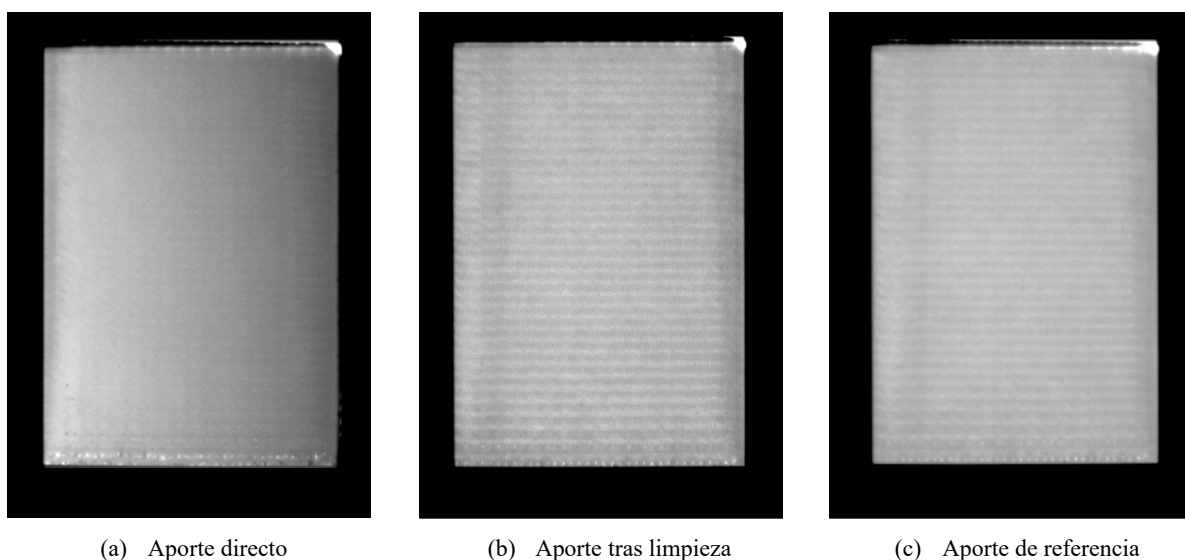


Fig. 3. Aspecto de los ensayos realizados.



(a) Aporte directo

(b) Aporte tras limpieza

(c) Aporte de referencia

Fig. 4. Radiografías digitales de las paredes aportadas.

### 3. RESULTADOS

En el presente apartado se detallan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados, a partir de los cuales se han generado paredes verticales de unas dimensiones de 40 mm de largo, 53 mm de alto y 4,5 mm de ancho. En primer lugar y tras una inspección visual, las paredes aportadas no parecen presentar diferencias apreciables entre sí, tal y como puede comprobarse en la Fig. 3.

A continuación, en la Fig. 4 se muestran las radiografías digitales de las tres paredes aportadas. Por un lado, el material aportado se visualiza en escala de grises, mientras que los huecos y poros en su interior se muestran en color blanco.

Al comparar las radiografías tomadas, a simple vista se aprecia una mayor densidad de poros en la base del aporte directo. No obstante, el aporte tras limpieza presenta un aspecto similar al del aporte de referencia. Con tal de valorar cuantitativamente la porosidad, las radiografías han sido procesadas y analizadas mediante el software Leica Application Suite v4.8, obteniendo las imágenes mostradas en la Fig. 5. En ellas, los poros presentes en la base aparecen resaltados en rojo, mientras que las zonas en verde corresponden a zonas saturadas al tomar la radiografía, y son consecuentemente despreciadas. Los porcentajes de porosidad obtenidos a partir del análisis son del 0,55%, 0,15% y 0,14% para los aportes directo,



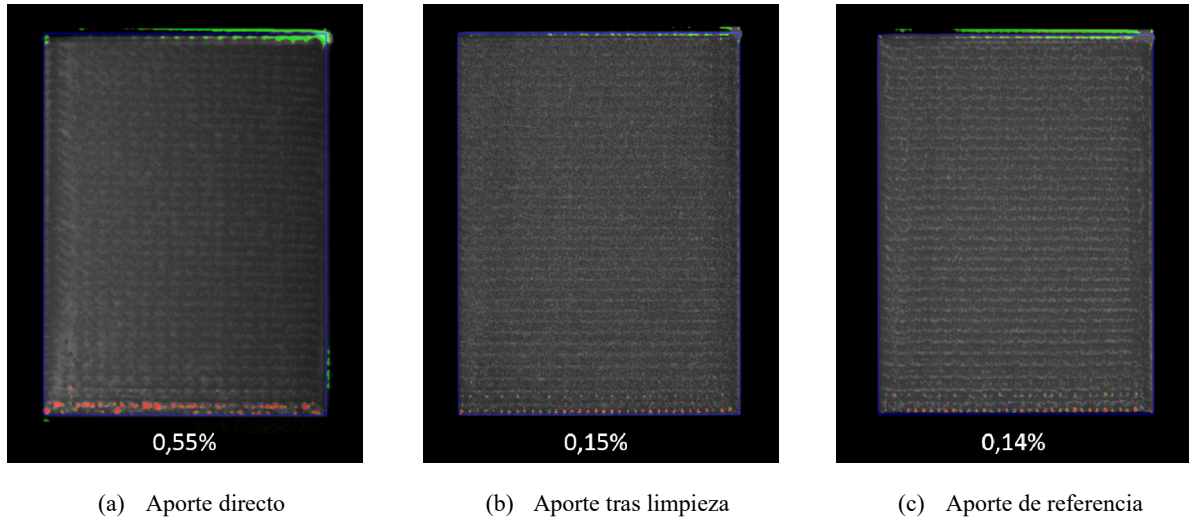


Fig. 5. Radiografías analizadas.

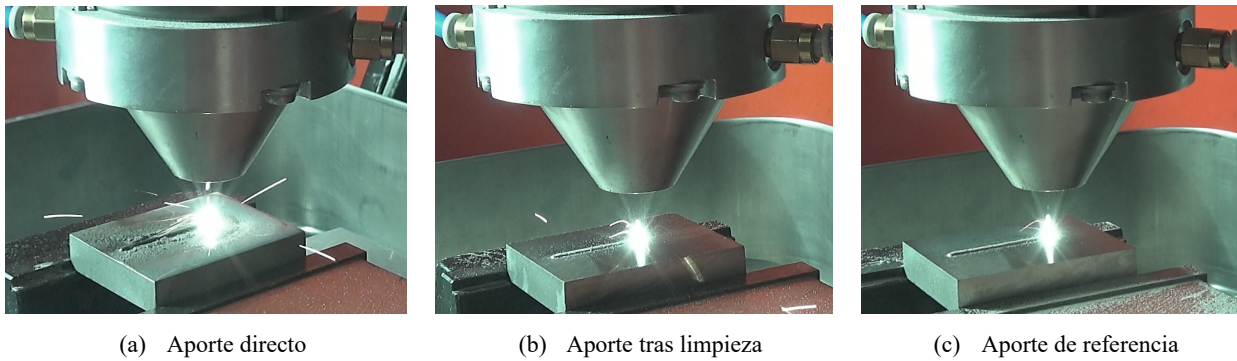


Fig. 6. Imágenes de los procesos de aporte.

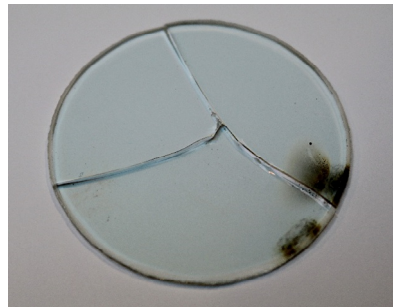


Fig. 7. Lente de protección de la boquilla tras el aporte directo.

tras limpieza y de referencia, respectivamente, encontrándose en todos los casos los poros concentrados en la base de los aportes.

Por tanto, se concluye que a pesar de que el aporte directo en presencia de fluido de corte da lugar a la generación de poros en la unión aporte-sustrato, la ejecución de una etapa intermedia de limpieza de la superficie da unos resultados de porosidad semejantes al de un aporte libre de fluidos de corte.

Durante la realización de los ensayos (Fig. 6), se observa que en el caso del aporte directo se genera una mezcla de fluido de corte y polvo al comenzar a suministrar el polvo a aportar, además de originarse humos y vapores al inicio del proceso de aporte. Como consecuencia de dichos humos, la lente de protección de la boquilla resultó dañada, tal y como se muestra en la Fig. 7, y fue necesario sustituirla por una

nueva. En cambio, al aplicar la limpieza combinada de aire a presión y láser, no se generan vapores apreciables durante el proceso de aporte.

#### 4. CONCLUSIONES

El presente trabajo permite analizar cómo influye la presencia de fluido de corte residual proveniente del mecanizado sobre sustrato objeto de aporte por láser en aplicaciones híbridas de mecanizado y LMD. La calidad de los aportes realizados se evalúa por medio de radiografías digitales, prestando especial atención a la zona de unión con el material base. A partir de los resultados recopilados, se concluye que el aporte de material tras el mecanizado no es recomendable si antes no se ha ejecutado la correspondiente limpieza de la superficie de aporte.

Queda demostrado que el aporte por láser tras operaciones de mecanizado es un proceso sensible desde el punto de vista de generación de poros en la zona de unión aporte-material base. Por consiguiente, resulta necesario incluir una etapa intermedia de limpieza de la superficie de aporte de modo que se pueda garantizar una pieza final de calidad y libre de defectos. El método de limpieza objeto de estudio en el presente trabajo ofrece resultados satisfactorios y similares a los del aporte tomado como referencia (0,14% de porosidad), además de no añadir complejidad al proceso. Por último, desde un punto de vista industrial, dicho método de limpieza puede resultar interesante a fabricantes de máquina herramienta de cara a la integración del mismo en máquinas híbridas de mecanizado y aporte láser.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación se ha llevado a cabo dentro del marco del proyecto Transfron3D POCTEFA 90/15 y gracias al proyecto ADDICLEAN (RTC-2015-4194-5) del Ministerio de Economía y Competitividad de España y la Universidad del País Vasco.

#### REFERENCIAS

- [1] Lauwers, B., Klocke, F., Klink, A., Tekkaya, A.E., Neugebauer, R., McIntosh, D., “Hybrid processes in manufacturing”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **63**, 561-583 (2014)
- [2] Flynn, J.M., Shokrani, A., Newman, S.T., Dhokia, V., “Hybrid additive and subtractive machine tools - Research and industrial developments”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, **101**, 79-101 (2016)
- [3] Newman, S.T., Zhu, Z., Dhokia, V., Shokrani, A. “Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, **64**, 467-470 (2015)
- [4] Montero, J.N., “Fabricación de materiales con gradiente funcional mediante LMD”, Tesis Doctoral, Universidade da Coruña, A Coruña (2017)
- [5] Toyserkani, E., Khajepour, A., Corbin, S., *Laser Cladding*, CRC Press (2004)
- [6] Gasser, A., *Laser Metal Deposition*, Tailored light 2, Springer (2011)
- [7] Dixit, U.D., Sarma, D.K., Davim, J.P., *Environmentally Friendly Machining*, Springer (2012)
- [8] Cortina, M., Arrizubieta, J.I., Ukar, E., Lamikiz, A. “Analysis of the Influence of the Use of Cutting Fluid in Hybrid Processes of Machining and Laser Metal Deposition (LMD)”, *Coatings*, **8**, 61 (2018)
- [9] Arrizubieta, J.I., Tabernero, I., Ruiz, J.E., Lamikiz, A., Martínez, S., Ukar, E., “Continuous coaxial nozzle design for LMD based on numerical simulation”, *Phys. Procedia*, **56**, 429-438 (2014)
- [10] Alloy Wire International. Ficha de datos técnicos Inconel 718. Disponible online: <https://www.alloywire.es/products/inconel-718/> (último acceso: 13/03/2018)
- [11] Oerlikon Metco. MetcoClad 718 Material Product Data Sheet.
- [12] Houghton Ibérica, S.A. Ficha Técnica HOCUT B-750

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE USE OF CUTTING FLUIDS IN HYBRID PROCESSES OF MACHINING AND LASER METAL DEPOSITION (LMD)

**Abstract** – As global pressure in the field of production increases, there is a greater tendency towards processes that provide flexibility and efficiency, while maintaining the quality of the final product. One of the current trends is the integration of different processes in the same machine, leading to the so-called hybrid machines. An example of hybrid machine is that integrated by additive manufacturing and machining processes. One of the limitations when combining machining and Laser Metal Deposition (LMD) is the presence of cutting fluid remnants on the part after machining stages, what may degrade the quality of the deposited material. Consequently, the present work aims to analyze the influence of the use of cutting fluid and its possible adverse effects in hybrid processes of machining and LMD. For this purpose, various LMD tests have been performed on a previously machined part, both direct (with no cleaning) and after cleaning its surface by different methods. Finally, the metallurgical integrity of each test is analyzed and the defects that appear in them are evaluated. This way, a relationship between the use of cutting fluid in the machining stage and the quality of the subsequently deposited material can be established.

**Keywords** – Additive manufacturing, Laser metal deposition, Hybrid machines, Cutting fluid, Lubricant, Porosity, Clad quality.