

Optimización de las condiciones del proceso de taladrado láser

S. Martínez, I. Arrizubieta, A. Lamikiz, I. Tabernero, E. Ukar

Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco UPV/EHU
aitzol.lamikiz@ehu.es

El taladrado láser es uno de los procesos láser que se está aplicando con más éxito en diversos sectores como alternativa a otros procesos de taladrado. La aplicación más importante del taladrado láser se centra en la realización de miles de taladros muy próximos entre sí y con una relación de aspecto muy elevada. El rango de diámetros que se realizan con este proceso varía desde varias micras hasta decenas de milímetros, y lo mismo sucede con la relación de aspecto (Diámetro/profundidad del agujero) las cuales pueden llegar hasta 1:200.

Para realizar esta operación es muy común el empleo de láseres específicos, ya que se busca generar pulsos muy cortos (del orden de picosegundos) con potencias de pico muy elevadas. Este tipo de pulsos ayuda a vaporizar el material de forma cuasi instantánea reduciendo al máximo la zona afectada térmicamente. Sin embargo obliga a disponer un equipo específico y de alto coste para esta operación.

Un caso muy común en la industria es la necesidad de obtener agujeros de diámetros del orden de $100\mu\text{m}$ - 1mm y relaciones de aspecto del orden de 1:20. Dado que cada vez es más común disponer de láseres convencionales para corte o soldadura, capaces de trabajar en regímenes pulsados con pulsos del orden de milisegundos y potencias superiores al 1KW, el presente trabajo pretende analizar los límites y el campo de trabajo de este tipo de láser para su uso en el proceso de taladrado láser en el rango indicado. Para ello se han realizado una serie de pruebas de taladrado láser en acero inoxidable AISI 304, con el objeto de cuantificar el mínimo diámetro perforado, máxima relación de aspecto de los agujeros, velocidades de proceso y precisión de los taladros.

1. INTRODUCCIÓN

El taladrado láser es un proceso industrial que se ha consolidado en algunas aplicaciones debido a las ventajas que plantea. En concreto, su uso está extendido en algunos componentes del sector aeronáutico y en automoción, fundamentalmente por la capacidad de realizar agujeros de alta calidad, alta relación de aspecto (relación entre longitud y diámetro) y alta velocidad de proceso [1]. Por otro lado, en otros sectores como en el de alimentación se están evaluando las posibles ventajas que podría plantear para su implantación.

El taladrado láser en general se trata en realidad de un grupo de procesos, ya que dependiendo de la estrategia utilizada y la forma en la que se aplica el láser para realizar el taladro se puede tratar de un proceso de corte láser o de un proceso de vaporización directa de material. Se trata por tanto de una operación que puede ser muy compleja, ya que dependiendo del método que se emplee para la realización de los taladros, es necesario considerar fenómenos físicos diferentes entre los que se encuentran la fusión y vaporización de material, fenómenos relacionados con la dinámica del metal fundido, la aparición de plasma, evacuación del material fundido/vaporizado fuera del agujero,...

Una de las principales aplicaciones del taladrado láser es la realización de agujeros en componentes de la cámara de combustión y turbinas de los motores de aviación, para obtener difusores que favorezcan el ahorro y la optimización del combustible y mejorar las propiedades de refrigeración de los mismos respectivamente [1, 2]. En la Figura 1 se muestran dos ejemplos de taladrado láser utilizados en la industria.

En cuanto a los materiales donde se aplica esta técnica, puede utilizarse sobre polímeros, diferentes metales y materiales cerámicos [3]. Es habitual su empleo sobre materiales termorresistentes como aleaciones base níquel o diferentes tipos de aceros inoxidable. La aplicación de técnicas convencionales de taladrado sobre este tipo de materiales es siempre compleja debido a su baja maquinabilidad. Así, se considera la necesidad de realizar gran cantidad de agujeros de pequeño diámetro y alta relación de aspecto, el proceso de taladrado convencional con broca es inviable tanto económicamente como por la dificultad que conlleva este proceso.

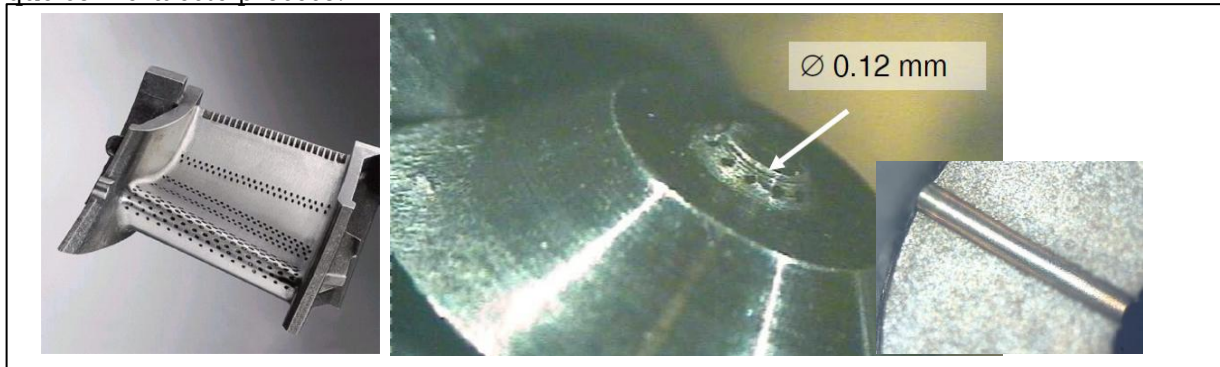


Figura 1: Ejemplos de taladrado láser en la industria: Airfoil de turbina aeronáutica (Izq.)
Inyector de motor diesel (Dcha.)

El taladrado láser se puede realizar siguiendo dos estrategias diferentes: Taladrado láser por percusión y taladrado láser por trepanado. En la Figura 2 se muestra un esquema de ambas estrategias de taladrado. A su vez hay variantes de ambos tipo de proceso. Así por ejemplo, está el taladrado por percusión de un único pulso o empleando varios pulsos láser. Por otro lado, el taladrado por trepanado se puede realizar mediante trepanado circular o helicoidal.

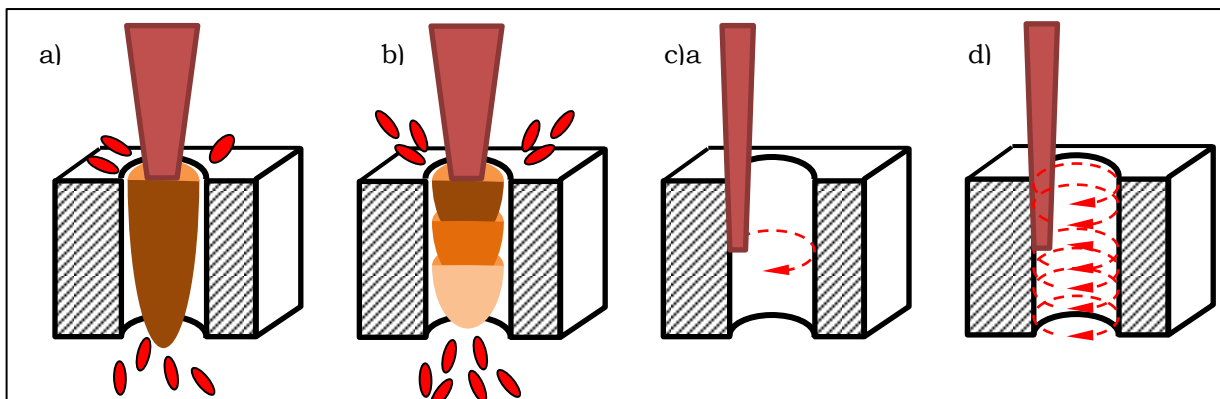


Figura 2: Estrategias de taladrado láser: a) Percusión con pulso simple. b) Percusión multipulso. c) Taladrado por trepanado circular. d) trepanado helicoidal

En el taladrado por percusión, el material es eliminado en cada pulso mediante fusión y vaporización. En este caso, alrededor del 90% del material es expulsado por los efectos de la vaporización y posterior salida del gas. En caso de que sea posible, el uso de un gas reactivo que genere oxidación del material, acelera el proceso. El taladrado láser por percusión presenta dos variantes: taladrado láser por pulso simple, donde se utiliza un único pulso por agujero y suele utilizarse en el procesado de componentes de poco espesor (microtaladros) o el empleo de una secuencia de pulsos o taladrado multipulso, que constituye el método de percusión propiamente dicho y que se suele emplear en componentes de mayor espesor. En ambos casos, mientras se realiza el taladrado, tanto el láser como la pieza permanecen estáticos. En ambos casos, el tamaño del agujero está directamente relacionado con el diámetro del haz láser focalizado en la pieza por lo que la calidad de los láser utilizados en este proceso es un parámetro crítico para controlar el diámetro de los agujeros. Por otro lado, la energía y duración de los pulsos es otro parámetro crítico del proceso. En general, a medida que se emplean pulsos de mayor

energía y más cortos, se favorece el mecanismo de vaporización del material, por lo que el proceso es más efectivo. El proceso de taladrado láser por percusión es el utilizado en agujeros de pequeño diámetro y alta relación de aspecto, pero si se precisa un diámetro de agujero mayor no se aconseja desenfocar el láser ni utilizar láser de peor calidad para realizar los taladros, sino que se recomienda utilizar la estrategia de trepanado.

El trepanado láser se trata en realidad de una operación de corte láser, en el que el perímetro de corte es circular. Al igual que en cualquier operación de corte por láser, la evacuación de material se consigue mediante la inyección de un gas de asistencia que arrastra el material por la parte inferior de la pieza procesada. Esta estrategia se emplea industrialmente en agujeros por encima de las 500 μ m de diámetro y dependiendo de la relación de aspecto del taladro hay dos variantes. Si la relación de aspecto es pequeña (inferior a 1:5) es posible utilizar un único corte circular, enfocando el láser en un plano focal situado en el centro de la pieza. Para el caso donde la relación de aspecto sea mayor y sea necesario corregir la focalización del láser, se suele realizar un corte helicoidal para realizar simultáneamente un corte circular mientras se corrige la posición focal del sistema de corte. En este caso, es necesario conseguir un movimiento relativo entre la pieza y el haz láser. Para ello existen diferentes soluciones industriales, aunque la más convencional es utilizar una cinemática de 3 ejes que guía un cabezal de corte láser trepanando la pieza.

Una posibilidad es mover el láser con un escáner, también denominados cabezales galvanométricos o galvanómetros. Estos sistemas se basan en el movimiento de unos espejos de pequeño tamaño y mínima inercia, lo que resulta en un accionamiento de extrema agilidad y muy alta velocidad (pudiéndose superar velocidades de 10 m/s). El control del movimiento de los espejos se realiza mediante un programa y es similar al que se realizaría en cualquier eje de una máquina CNC, con la diferencia de que la agilidad y el tiempo de respuesta de estos sistemas es mucho más rápido. De hecho, este tipo de sistemas ya se utilizan en diversos procesos láser industriales, donde destaca el marcado por láser, pero se pueden citar otros ejemplos como la soldadura remota, muchos procesos de Rapid Manufacturing, texturizado láser, etc. En la Figura 3 se muestra el escáner utilizado en este trabajo y el esquema de funcionamiento de este tipo de sistemas.

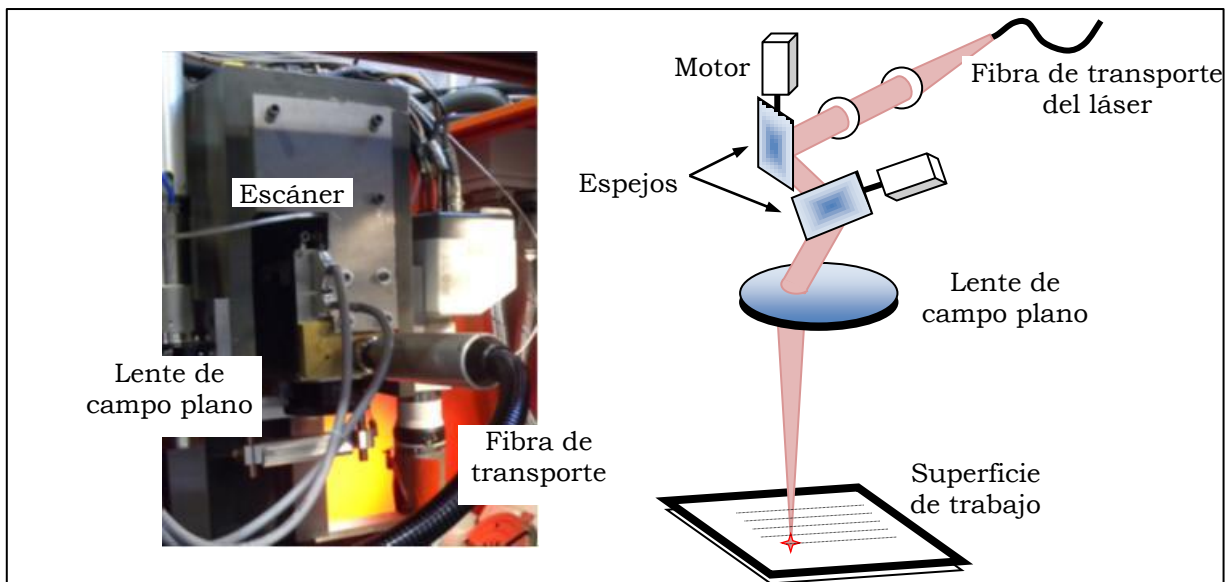


Figura 3: Escáner utilizado para la parte experimental (Izq.) y esquema de los componentes de un escáner (Dcha.).

Por otro lado, el taladrado láser (independientemente de la estrategia utilizada para realizarlo) se suele ejecutar con láseres de estado sólido de barras de Nd:YAG, los cuales tienen una capacidad de generar pulsos muy cortos y potencias de pico muy elevadas [4, 5]. Sin embargo, no son sistemas adecuados para realizar otro tipo de operaciones donde se

requiera utilizar el láser en modo continuo o con potencias medias elevadas, como por ejemplo el caso de soldaduras y cortes en piezas de espesores por encima de 0,5 mm.

Así, el objetivo del presente trabajo es probar la eficacia de un láser industrial convencional para la realización de taladros de mínimo diámetro y máxima relación de aspecto. Para ello, se ha utilizado un láser de fibra de 1KW. El láser puede funcionar en régimen pulsado con pulsos de 0,5 ms y una potencia de pico igual a la media de 1KW. A pesar de que este valor es muy inferior a los equipos utilizados para taladrado láser (con pulsos de decenas de KW y duraciones que oscilan entre cientos de femtosegundos hasta nanosegundos) es posible plantearse taladros de relaciones de aspecto entre 1:1 hasta 1:20, cubriendo muchas aplicaciones industriales. Por otro lado, el láser se transmite a través de una fibra de 50 μ m, por lo que el diámetro de los agujeros puede ser de este orden de magnitud. El guiado del haz para los agujeros con estrategia de trepanado se ha realizado mediante el escáner descrito en la Figura 3. De esta forma, se pretende probar la viabilidad del empleo de un sistema láser industrial orientado a operaciones de corte, soldadura, aporte por láser, etc. en operaciones de taladrado por láser. Obviamente, con este tipo de equipos no se pueden conseguir los diámetros ni las relaciones de aspecto que se alcanzan con equipos específicos para microtaladrado, pero a la vista de los resultados obtenidos en las pruebas que se muestran a continuación se pueden realizar taladros en determinados rangos alcanzando resultados satisfactorios.

2. EQUIPAMIENTO EXPERIMENTAL Y PLANTEAMIENTO DE LOS ENSAYOS

Para la realización de los ensayos se ha utilizado un centro de procesamiento láser de materiales especialmente diseñado para la experimentación por el Grupo de Fabricación de Alto Rendimiento del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la UPV/EHU denominado *Aktinos 500*. Se trata de un centro de mecanizado Kondia B500 reconvertido en el que se han eliminado elementos como el cabezal, el cambiador de herramientas, el filtro del fluido de corte, etc. y se han añadido dos láser industriales: un láser de diodos de alta potencia de 1,5KW con un cabezal de aporte por láser y un láser de fibra de 1KW con dos fibras de salida. Una de ellas de 600 μ m a la que se ha acoplado otro cabezal de *laser cladding* y una fibra de 50 μ m acoplada a un escáner 2D. El escáner es un Scanlab™ Hurriscan 25 de dos ejes, con el que se puede barrer un área de 120x120mm. En la Figura 4 se muestra el centro de procesamiento láser *Aktinos 500*. En todos los casos se ha colocado una boquilla de aire sobre la probeta para conseguir evacuar el material y gases generados.

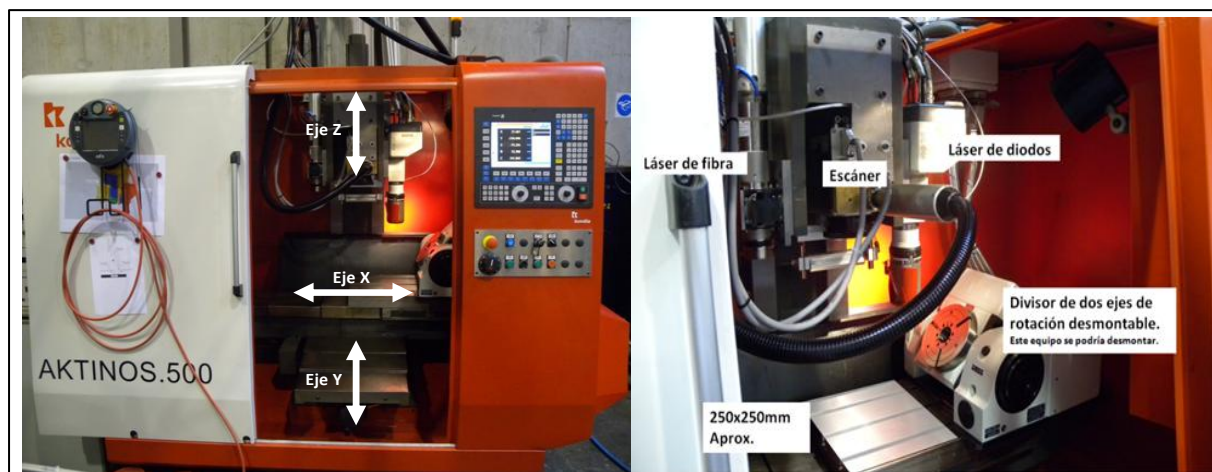


Figura 4: Centro de procesamiento láser Kondia Aktinos 500.

Todos los ensayos se han medido utilizando diferentes equipos de medida. En concreto, se han utilizado un microscopio de 30X aumentos dotado de micrómetros que registran la posición X e Y de la mesa y un proyector de perfiles con dos posiciones de aumentos (10X y 100X) para la medición del diámetro de los agujeros. En la Figura 5 se muestran los equipos

utilizados para la medición de los taladros. Se puede observar en la Figura 5 (Dcha.) la medición de una serie de ensayos.

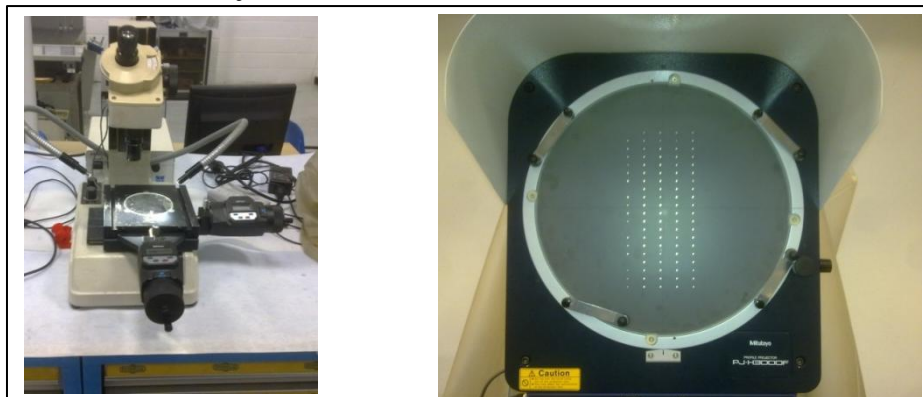


Figura 5: (Izq.) Microscopio. (Dcha.) Medición de una serie de taladros en el proyector de perfiles

El material utilizado en las pruebas ha sido un acero inoxidable austenítico AISI 304. Se trata de un acero inoxidable con mayor resistencia a la corrosión que otras aleaciones de la serie 300 y que presenta una ductilidad alta lo que permite una excelente conformabilidad. Su bajo contenido en carbono resulta en una menor precipitación de carburos en la zona afectada por el calor durante procesos térmicos y una menor susceptibilidad a la corrosión intergranular. Se utiliza en diversos componentes y sectores destacando su uso en recipientes de bebidas de consumo, utensilios de cocina, componentes en intercambiadores de calor y sistemas de refrigeración, tuberías de refrigeración en motores y turbinas, etc.

En la Tabla 1 se muestran las principales propiedades mecánicas y composición del acero AISI 304.

Propiedades mecánicas del AISI 304						
Módulo de elasticidad [GPa]	Tensión última [MPa]	Tensión de fluencia [MPa]	Densidad [Kg/m ³]			
200	620	310	7.800			
Composición del AISI 304						
C [%]	Mn [%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	P [%]	S [%]
0,08	2,00	1,00	18,0 ÷ 20,0	8,0 ÷ 10,5	0,045	0,03

Tabla 1. Composición y propiedades del acero inoxidable AISI 304

Se han realizado dos grupos de ensayos de taladrado láser:

- **Trepanado circular:** Se han realizado agujeros de 0,8mm de diámetro sobre una probeta de 0,8 mm, es decir una relación de aspecto de 1:1. El movimiento del láser sobre la pieza se ha conseguido utilizando el escáner 2D mostrado en la Figura 4.
- **Percusión:** Se han realizado ensayos de taladrado por percusión variando el número de pulsos. En este caso el objetivo ha sido realizar taladros de 100µm de diámetro en chapas de 2mm de espesor, lo que supone en una relación de aspecto de 1:20.

En todos los casos se han realizado taladros pasantes, ya que se trata del caso industrial más demandado. Por otro lado, se ha dejado una distancia de 5mm entre agujeros para evitar solapamientos entre zonas afectadas en ensayos anteriores. En todos los ensayos donde se ha conseguido taladrar la probeta por completo se han medido los diámetros en el orificio de entrada y de salida, obteniendo así la conicidad del agujero.

3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES

3.1 Ensayos de taladrado láser con estrategia de trepanado

Para la realización de los ensayos de trepanado se ha partido de una probeta de acero inoxidable AISI 304 de 0,8mm de espesor. Se ha programado el movimiento circular utilizando un software de programación propio del escáner. En todos los casos se han repetido circunferencias de 800 μ m de diámetro con el láser enfocado en el mismo plano, situado a 0,4mm por debajo de la superficie de la probeta.

Inicialmente se han realizado una serie de pruebas variando la potencia máxima del pulso, la duración de los pulsos y la velocidad de desplazamiento del haz sobre la pieza. En la Tabla 2 se muestran una serie de condiciones ensayadas y valores obtenidos de los diámetros de entrada de los agujeros realizados. Se observa que a medida que los pulsos se acortan se obtienen mejores resultados. En el caso del equipo empleado, se han obtenido los mejores resultados con la duración mínima de pulso que es de 0,5 ms. En caso de que se hubiera podido trabajar con pulsos más cortos, se podrían haber obtenido resultados mejores, siendo esta una limitación del equipo común en este tipo de láser. Por otro lado, se ha fijado la potencia en el valor máximo de 1KW. El motivo es que, al contrario de los equipos láser específicos para microtaladrado que almacenan energía y la liberan en un pulso muy corto, los láser industriales como el empleado en este trabajo mantienen una potencia tanto en régimen continuo como pulsado, sin producirse el efecto de almacenamiento y posterior liberación de la energía. El resultado es que los valores óptimos para operaciones de taladrado se encontrarían en potencias de pico muy superiores y pulsos mucho más cortos que los obtenidos en estos equipos. Ante la imposibilidad de llegar a estos valores se ha utilizado la potencia máxima. En cuanto a los resultados se puede observar que para unas determinadas condiciones se obtienen agujeros entre 767 μ m hasta 925 μ m. En los casos donde se ha conseguido realizar el taladro pasante se ha observado que la conicidad del agujero es mínima. En la Figura 6 se muestran algunos resultados de los taladros obtenidos por trepanado láser.

Nº Test	Nº de trepanados	Potencia [W]	Duración pulso [ms]	Vel. Trepanado [mm/s]	Ø de entrada [mm]	Error [%]
T10	5	1000	0,2	200	0,794	0,75
T11	4	1000	0,2	200	0,773	3,375
T12	3	1000	0,2	200	0,874	9,25
T13	2	1000	0,2	200	0,779	2,625
T19	2	1000	0,2	600	0,767	4,125
T20	4	1000	0,2	200	0,925	15,625
T21	3	1000	0,2	200	0,887	10,875
T23	4	1000	0,2	600	0,889	11,125
T24	3	1000	0,2	600	0,877	9,625
T25	2	1000	0,2	600	0,856	7

Tabla 2. Ensayos de trepanado sobre AISI 304 de 0,8 mm de espesor

3.2 Ensayos de taladrado láser por percusión

En este caso, se han realizado una serie de ensayos en una probeta de 2 mm de espesor mediante el disparo de un número variable de pulsos por agujero. En este caso, se han realizado ensayos a diferentes potencias y variando el número de pulsos entre 1 y 5 pulsos/taladro. En la Tabla 3 se muestran los valores de los parámetros utilizados en los diferentes ensayos empleando esta estrategia. Se puede observar que en este caso el diámetro de entrada del agujero presenta una dispersión mucho más elevada que en el caso anterior, ya que depende del tamaño de haz y del material evacuado en cada pulso entre

otros factores. En este caso, los agujeros también presentan una conicidad muy superior a la del caso anterior. De todas formas, se han obtenido agujeros dentro de los límites de acabado y tolerancias exigibles en muchos casos industriales.

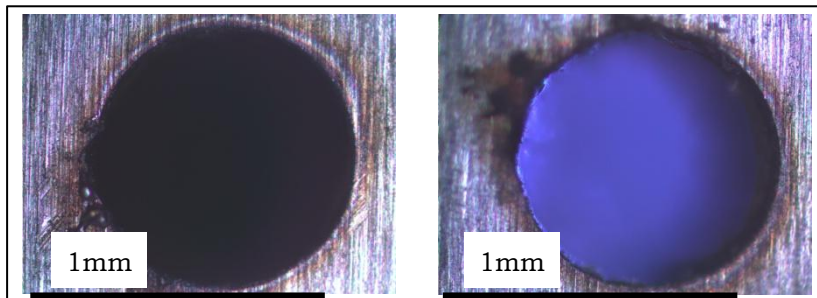


Figura 6: Taladrado láser por trepanado. Izq.) Test T11 Dcha.) Test T25

En la Figura 7 se muestran gráficamente los resultados obtenidos en las pruebas. Se observa que a medida que se incrementa la potencia, el diámetro de entrada de los agujeros disminuye ligeramente, mientras que los valores del diámetro de salida se mantienen prácticamente constantes. Los diámetros de entrada oscilan entre los 150 y 200 μm , mientras que los diámetros de salida presentan valores cercanos a las 100 μm . Se ha observado también que la calidad de los agujeros es alta, y no presentan rebabas ni proyecciones de material resolidificado.

Nº Test	Potencia [W]	Nº de pulsos	D _{Entrada} [μm]	D _{Salida} [μm]	Conicidad $2 \cdot \alpha$ [°]
P1	500	1	173,25	79,25	2,69
P2	500	2	182,5	84	2,82
P3	500	3	205,75	90,25	3,31
P4	500	4	207,25	90,25	3,35
P5	500	5	210	84,75	3,58
P6	750	1	153,25	88,5	1,85
P7	750	2	160,5	88,25	2,07
P8	750	3	165	84,25	2,31
P9	750	4	178	88,75	2,56
P10	750	5	195	80,5	3,28
P11	1.000	1	162	85,75	2,18
P12	1.000	2	168,75	80,5	2,53
P13	1.000	3	175,25	83	2,64
P14	1.000	4	173,75	85,75	2,52
P15	1.000	5	181,75	91,75	2,58

Tabla 3. Ensayos de taladrado por percusión sobre AISI 304 de 2 mm de espesor

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se han presentado una serie de resultados experimentales de taladrado láser sobre acero inoxidable austenítico AISI 304. La particularidad de estos ensayos es que han sido realizados con un láser de fibra de 1KW de potencia similar al que se puede encontrar en diferentes estaciones de corte y soldadura industrial. Dado que este tipo de equipos difiere mucho de los sistemas específicos de microtaladrado, el objetivo del trabajo ha sido analizar la viabilidad de emplear un equipo láser convencional para

operaciones de taladrado en rangos de diámetros entre 100 μ m-1mm y relaciones de aspecto de 1:1 hasta 1:20.

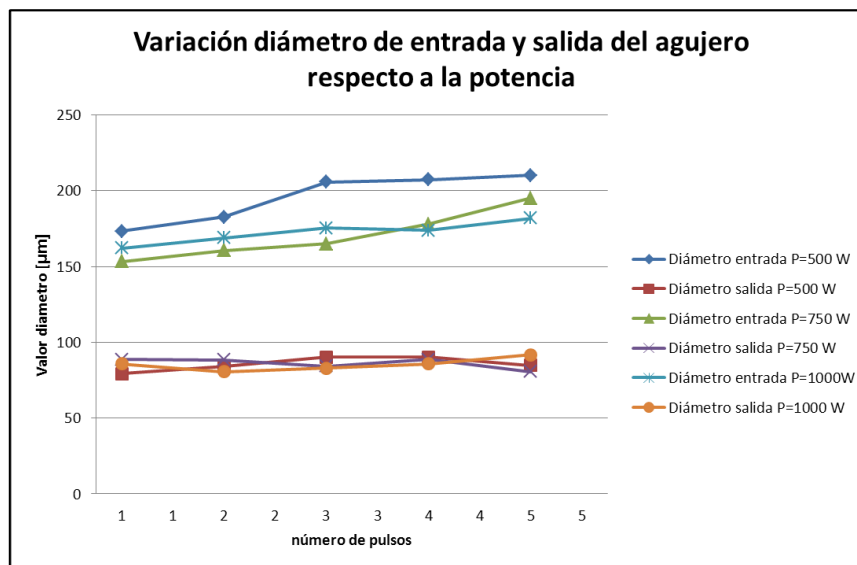


Figura 7: Resultados de los ensayos de taladrado láser por percusión

Se han realizado dos baterías de pruebas con dos estrategias diferentes: trepanado y percusión. En el caso de los taladros por trepanado, nuevamente el láser se ha movido con un escáner convencional, emulando así la posibilidad de disponer de un sistema de corte o soldadura remota y poder aplicarlo al taladrado.

En ambos casos se han obtenido condiciones en las que se realizan taladros de calidad suficiente. Se han obtenido agujeros de 800 μ m de diámetro y relaciones de aspecto de 1:1. Para el caso de las pruebas de taladrado láser por percusión, se han probado diferentes condiciones y número de pulsos. En este caso, el diámetro de los agujeros presentaba una mayor dispersión y oscilaba entre 150 y 200 μ m.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se ha desarrollado dentro del proyecto “*Tratamiento y modificación de superficies funcionales de alto valor añadido mediante radiación láser (SURFACER)*” DPI2010-20317-C02-01, financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad.

6. REFERENCIAS

- [1] C.Y. Yeo, S.C. Tam, S. Jana, Michael W.S. Lau, A technical review of the laser drilling of aerospace materials, *J. of Materials Processing Tech.*, Vol. 42, (1994), pp. 15-49.
- [2] L. Li, C. Diver, J. Atkinson, R. Giedl-Wagner, H.J. Helml, Sequential Laser and EDM Micro-drilling for Next Generation Fuel Injection Nozzle Manufacture, *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55, (2006) 179–182.
- [3] Dipak K. Das, Tresa M. Pollock, Femtosecond laser machining of cooling holes in thermal barrier coated CMSX4 superalloy, *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 209 (2009) Pp. 5661-5668.
- [4] X.D. Wang, A. Michalowski, D. Walter, S. Sommer, M. Kraus, J.S. Liu, F. Dausinger, Laser drilling of stainless steel with nanosecond double-pulse, *Optics & Laser Technology*, Vol. 41 (2009) Pp. 148-153.
- [5] M.J Jackson, W O'Neill, Laser micro-drilling of tool steel using Nd:YAG lasers, *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 142 (2003) Pp. 517-525.