Taladrado láser mediante un láser convencional

LASER PERCUSSION DRILLING USING A CONVENTIONAL LASER

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/5877 | Recibido: 25/06/2013 • Aceptado: 11/12/2013

Jon Iñaki Arrizubieta-Arrate, Silvia Martínez-Rodríguez, Aitzol Lamikiz-Mentxaka, Eneko Ukar-Arrien, Iván Tabernero-Campos, Aitor Zugazaga

ETSI Bilbao. Dpto. de Ingeniería Mecánica. Universidad del País Vasco UPV-EHU. c/ Alameda Urquijo, s/n - 48013 Bilbao.
Tfno: +34 946 017347. joninaki.arrizubieta@ehu.es

ABSTRACT

- Nowadays, laser drilling is increasing its relevance among the industrial applications, especially in the aeronautical sector for the manufacture of small holes in the blades of a turbine for their internal cooling. There are more applications in other sectors like automotive or energy, where high aspect ratio drills are demanded. Currently there are robust industrial solutions to perform these type of drills, but these system are specific for this application and present high costs. On the other hand, conventional solid state lasers are relatively widespread in the industry for laser cutting or welding. Thus, the present article presents a double objective: On the one hand, a laser percussion drilling process for high aspect ratio holes using a conventional laser will be evaluated. On the other hand, in the article is shown the development of a numerical model or estimating the internal geometry of the hole and the temperature field of the workpiece for the different operating conditions.
- **Keywords:** laser, drilling, modelling.

RESUMEN

El taladrado láser es un proceso que está incrementando su relevancia industrial dentro de algunas aplicaciones, empleándose especialmente en el sector aeronáutico en la realización de microagujeros en los álabes de las turbinas para la refrigeración de los mismos. También hay otros ejemplos en sectores como automoción y energía, en los que se requieren agujeros de elevada relación de aspecto (relación longitud/diámetro). Para la realización de este tipo de taladros existe equipamiento específico capaz de realizar estas operaciones de forma rápida y robusta, pero son específicos para esta aplicación y su coste es elevado. Por otro lado, el empleo de fuentes láser de estado sólido convencionales, como pueden ser láser de fibra o disco, es cada vez más habitual para operaciones de corte de chapa o soldadura.

Así, el presente artículo plantea un doble objetivo: por un lado, se analiza la capacidad de un láser convencional para la realización de agujeros de alta relación de aspecto y la calidad de los mismos, tanto en lo que respecta a la geometría externa, como a la geometría interna. Por otro, se ha desarrollado un modelo numérico capaz de simular la geometría el agujero y el campo de temperaturas de la pieza para las distintas condiciones de funcionamiento.

Palabras clave: láser, taladrado, modelización.

1. INTRODUCCIÓN

El taladrado láser es un proceso de arranque de material térmico, donde gracias a las características de la fuente láser se logra concentrar grandes cantidades de energía en un área

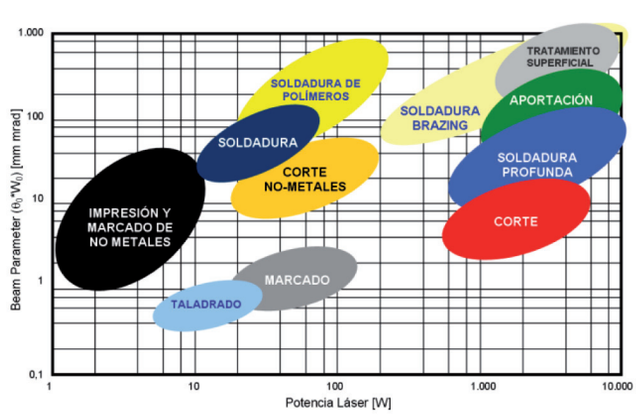


Figura 1: Procesos industriales donde se utiliza el láser

de pequeñas dimensiones. De esta forma, se consiguen densidades de potencia del orden de 10^9-10^{10} W/cm^2 con equipos convencionales. Como puede verse en la Fig. 1, en función de la densidad de energía del haz, puede obtenerse desde un calentamiento superficial con baja penetración (para procesos como el temple o pulido), hasta una fusión con penetraciones altas como es el caso del corte o la vaporización del material (en el taladrado láser).

Debido a los requisitos de funcionalidad o diseño de la pieza, en ocasiones es necesario disponer de decenas o cientos de orificios de diámetros inferiores al milímetro en espesores relativamente grandes (superiores a 2-3 mm). De esta forma, es fácil demandar una gran cantidad de taladros con profundidades superiores a 15 veces el valor del diámetro. Para estos casos, el taladrado mediante láser es una alternativa muy utilizada, ya que permite la realización de agujeros de muy buena calidad en tiempos muy reducidos, del orden de milisegundos. Sin embargo, es difícil encontrar proveedores con equipos específicos para la realización de dichos taladros, siendo estos equipos muy caros y específicos para esta operación.

Si se realiza un análisis de los trabajos realizados hasta el momento sobre el taladrado láser, se puede observar que se han realizado diversas investigaciones, con el objetivo de mejorar el proceso de taladrado [1], [2] y adquirir un mejor conocimiento de los procesos físicos involucrados en este proceso de taladrado [3]. Así mismo, las investigaciones realizadas en torno al microtaladrado láser se pueden separar en dos grupos. Por un lado se encuentran los estudios experimentales, mientras que por el otro lado se encuentran aquellos donde el objetivo es la modelización del proceso.

Dentro de los estudios experimentales, se ha analizado la influencia de las distintas variables sobre la geometría final de los taladros [4], [5]; se ha examinado también la repetitividad del proceso, tanto en lo que respecta a la geometría de los agujeros [4], [6], como a la zona afectada que se genera alrededor de los mismos [7]. En todos ellos, se consideraban como variables, los diámetros de entrada y salida y la conicidad de los agujeros, variables que se pueden medir externamente.

En lo que respecta a la caracterización de la geometría interna y de la profundidad de los agujeros, se han realizado diversos trabajos, empleándose técnicas de medición diferentes. Algunos autores, como Verhoeven [8] han realizado cortes longitudinales de los agujeros, mostrando imágenes de las secciones, donde puede verse tanto la profundidad del mismo como la geometría interna. Otros autores como Petkovsek [3] han recurrido a técnicas basadas en la medición del tiempo que tardan las ondas de impacto que se generan durante el proceso de taladrado láser en llegar a un sensor, determinando de esta manera la profundidad taladrada. También se han realizado trabajos relacionados con la medición de la geometría interna de los agujeros utilizando rayos X y métodos DODO (*Direct Observation of Drilled Hole*) [9].

En cuanto a los trabajos orientados hacia la modelización del proceso, a medida que se han ido desarrollando modelos numéricos más complejos y precisos, se han resuelto modelos más complejos, partiendo del primer modelo unidimensional hasta modelos tridimensionales [10], [11]. En cualquier caso, todos los modelos desarrollados incluyen una serie de hipótesis para simplificar los cálculos a realizar y disminuir el coste computacional de los mismos. Las hipótesis simplificativas más habituales son no tener en cuenta aspectos del proceso como la posible generación de plasma, suposición de la no existencia de corrientes convectivas que se generan dentro del material fundido, mantener constantes determinadas características del material, etc.

Algunos de estos estudios incluyen modelizaciones de la respuesta del material frente a un pulso láser [12]. También se han desarrollado modelos bidimensionales axisimétricos que tienen en cuenta el efecto de las reflexiones del haz láser en las paredes del agujero durante el proceso de taladrado [13], [14].

Por último, se han realizado diversos estudios en relación con el mecanismo de expulsión del material de la zona de trabajo, determinando cual es el mecanismo predominante, vaporización o expulsión directa del material fundido [8], analizando cuales son las ventajas de cada uno de ellos.

De este análisis, puede concluirse que no se han realizado estudios relacionados con el empleo de equipos convencionales en operaciones de taladrado láser, lo cual puede ser de gran interés para empresas y talleres que ya dispongan de un equipo láser y deseen emplearlo en operaciones de taladrado láser. Es por ello, que en el presente proyecto se ha analizado la calidad de los microagujeros realizados mediante un láser de fibra convencional, que tiene una potencia máxima de funcionamiento de 1kW. Las pruebas se han realizado sobre una lámina de acero inoxidable AISI 304, de 1mm de espesor, analizando los diámetros de salida y entrada, conicidad del agujero, repetitividad del proceso y la geometría interna de los mismos. Asimismo, se presenta un enfoque a un modelo capaz de predecir la geometría interna de los agujeros realizados.

2. EL PROCESO DE TALADRADO LÁSER

El proceso de taladrado láser se basa en la fusión/vaporización del material mediante una sucesión de pulsos láser.

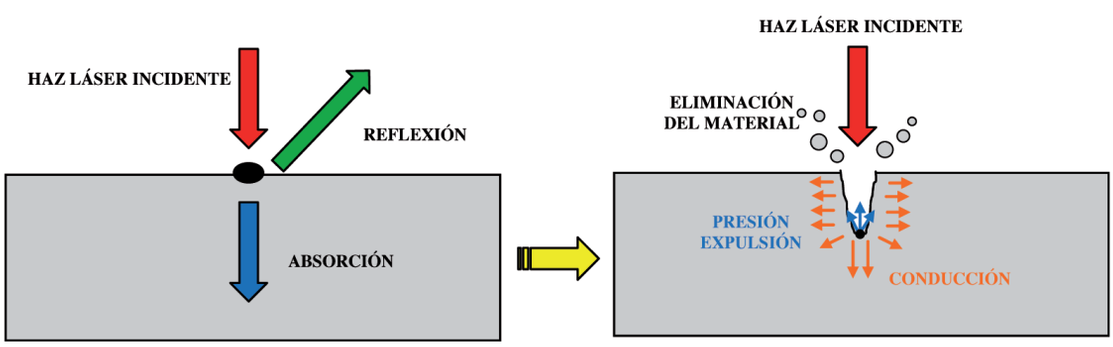


Figura 2: Proceso de taladrado láser

En la Fig. 2 se describe de forma esquemática el proceso y los diferentes aspectos que influyen en el mismo, como son la expulsión del material fundido, la absortividad y la reflectividad del material y la disipación de la radiación láser debido al vapor de plasma generado durante el proceso.

El proceso comienza en el instante en el que el haz láser incide sobre la superficie del material [1]. Parte de la energía del haz es absorbida y parte reflejada. La fracción de energía absorbida, que depende de las características del material y de la longitud de onda del láser, genera un aumento de la temperatura del material, por encima de la temperatura de fusión y después de un cambio de fase, puede llegar hasta la temperatura de vaporización. En piezas de pequeño espesor, es posible realizar agujeros pasantes en un único pulso, pero lo habitual es que se necesite una secuencia o tren de pulsos para realizar un agujero completo [8]. A la operación que emplea de un tren de pulsos para realizar un taladro se le denomina Taladrado Láser por Percusión o *Laser Percussion Drilling*.

El taladrado láser es un proceso de extracción del material, el cual tiene dos mecanismos principales para eliminar el material de la zona de interación con el haz [15]:

1.- Vaporización del material fundido: mecanismo dominante para el caso de pulsos láser de alta energía y duraciones muy cortas.
2.- Expulsión del fundido mediante presión de expulsión (*recoil pressure*): mecanismo dominante para condiciones de pulsos más largos y de menor densidad de energía.

El mecanismo de expulsión, mediante la presión de extracción (*recoil pressure)* para la eliminación del material fundido, es el mecanismo dominante para láseres de baja potencia, y consecuentemente para menores temperaturas en la superficie fundida. Lo cual, como consecuencia de la viscosidad del material fundido, conlleva a que no pueda ser expulsado completamente de la zona taladrada antes de su solidificación, creando una capa de material resolidificado alrededor del agujero.

Para mayores temperaturas de la superficie del material fundido, ya sea por el uso de pulsos de mayor densidad de energía y duraciones más cortas, la vaporización se convierte en el principal mecanismo de eliminación del material de la zona de interacción.

De entre los dos mecanismos para la eliminación del material durante el taladrado láser (vaporización o fusión), y considerando únicamente criterios energéticos, la fusión es un mecanismo más eficiente, ya que no es necesario que el material absorba el calor latente de vaporización. Así, la energía requerida para la eliminación del material fundido mediante la presión de expulsión, es aproximadamente la cuarta parte de la que se necesita para vaporizar la misma cantidad de volumen del mismo.

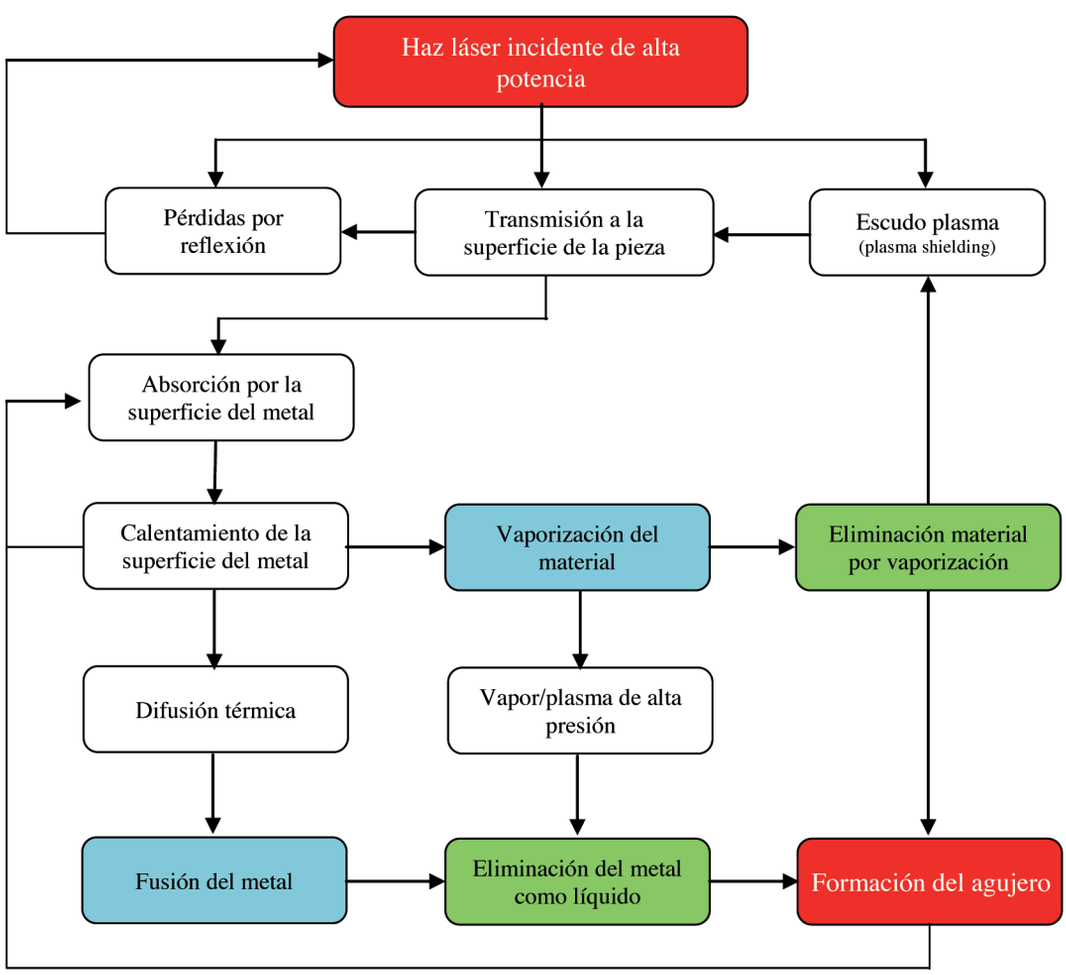


Figura 3: Fenómenos que intervienen en el procesado láser

Sin embargo, el mecanismo de fusión requiere la expulsión del material en estado líquido. Para ello, los gradientes de presión generados por la vaporización de parte de material en la zona donde ha incidido el haz láser, deben de ser lo suficientemente grandes para superar las tensiones superficiales y expulsar el material fundido del agujero [7]. En la Fig. 3 se describen los principales fenómenos físicos que intervienen en el proceso de taladrado láser.

mente, antes de profundizar en el estudio de los taladros sobre acero inoxidable, se realizaron una serie de ensayos sobre diferentes materiales y espesores para evaluar la viabilidad del empleo del equipo en este proceso. Así, en la Figura 7 se observan diferentes ensayos hechos sobre una lámina de tungsteno puro, una aleación γ-Ti-Al y acero inoxidable AISI 304.

Aunque durante la realización del proyecto se han taladrado distintos materiales (*AISI 304, DIN C45,* γ-Ti-Al,

Figura 4: Láser de fibra

Figura 5: Centro de Mecanizado KondíaAktinos 500

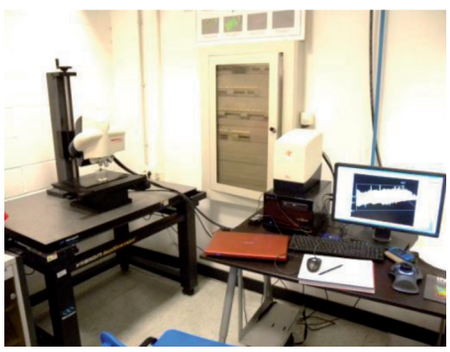
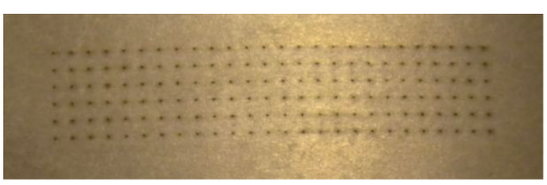


Figura 6: Microscopio confocalLeica DCM 3D


a) Microagujeros en Tungsteno Ø=100µm

b) Agujeros γ-Ti-Al Ø=500µm

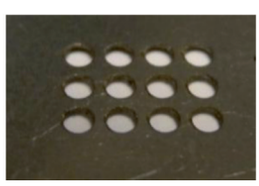

c) Agujeros en AISI 304 Ø=2,15mm

Figura 7: Ejemplos de agujeros realizados

3. MATERIALES Y MAQUINARIA EMPLEADAS

Los ensayos se han llevado a cabo en el Taller Mecánico del Dpto. de Ingeniería Mecánica de la (UPV-EHU), donde además de máquinas de mecanizado como centros de mecanizado o electroerosión, se cuenta con un equipo laser de alta potencia. También se cuenta con el del equipo necesario para la medición de los taladros realizados y el análisis de la calidad de los mismos. El equipo láser empleado para la realización de los taladros y el microscopio confocal empleado para su posterior medición se muestran en las Figuras 4, 5 y 6. El equipo láser, es un láser de fibra *ROFIN FL-010* de alta potencia, con una potencia de hasta 1 kW y una frecuencia máxima de pulsado de 5000Hz.

El láser de fibra empleado es un láser de marcado convencional y capaz de realizar operaciones de corte, soldadura o aporte de material entre otros procesos. Se trata por tanto de un equipo convencional. Previa-

tungsteno, etc.), el análisis de la calidad de los microagujeros y la verificación de la aptitud de un láser de dichas características para la realización de microagujeros se ha realizado sobre una lámina de 1mm de espesor de AISI 304. La metodología empleada puede extrapolarse a cualquier material ensayado.

4. ENSAYOS EXPERIMENTALES REALIZADOS

El taladrado láser es un proceso en el cual intervienen un número elevado de variables. En la Figura 3 ya se habían adelantado una serie de interacciones entre variables del proceso,

Variables de entrada (INPUT)
- Potencia láser (P)
- Ancho del pulso (t)
- Frecuencia del pulso (f)
- Número de pulsos (N)
- Posición plano focal (fpp)

Variables de salida (OUTPUT)
- Diámetro entrada (D)
- Diámetro salida (d)
- Conicidad agujero (α)

Figura 8: Variables de entrada y salida

	C [%]	Mn[%]	Si [%]	Cr [%]	Ni [%]	P [%]	S [%]
AISI 304	<0,08	<2,00	<1,00	18,0 ¸ 20,0	8,0 ¸ 10,5	<0,045	<0,03

Tabla 1: Composición química del acero AISI 304

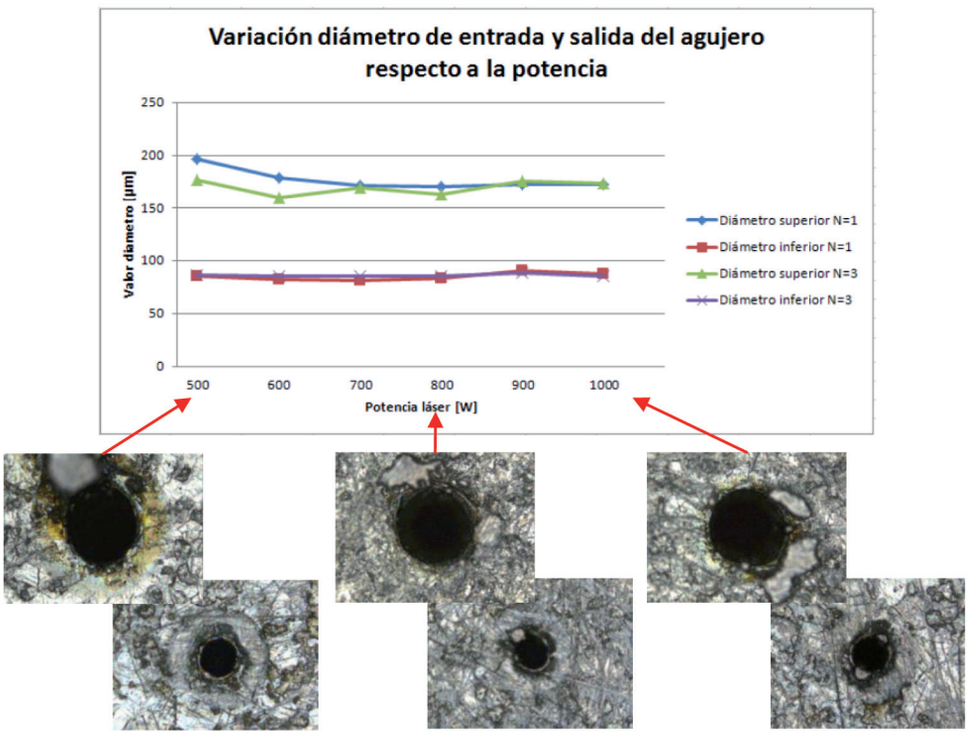


Figura 9: Efecto de la variación de la potencia en el tamaño de los microagujeros taladrados mediante laser en una chapa AISI 304 de 1mm de espesor. fpp=0mm, f=5Hz, t=5ms.

pero recogiendo estos parámetros de una forma más sistemática, se observan en la Fig.8 las diferentes variables de entrada y salida consideradas. Dado que algunas variables están interrelacionadas entre ellas, es muy importante realizar un análisis de estas interrelaciones para poder obtener cuales serían las condiciones óptimas de taladrado para cada material.

Todas las variables de entrada influyen sobre las dimensiones y geometría de los agujeros, pero se ha comprobado que las variables de salida presentan una mayor sensibilidad a las variaciones de potencia y posición del plano focal.

En la Fig. 9, se muestran los resultados obtenidos de los ensayos realizados variando la potencia del láser (manteniendo el resto de las variables constantes). Tal y como puede verse, para altas potencias, debido a las altas densidades de potencia que se consiguen, el mecanismo predominante de eliminación del material es la vaporización. Mientras que para bajas potencias el efecto de la vaporización del material es menor y se necesita más tiempo para la realización del agujero. Lo que se traduce en una mayor conducción del calor, y una mayor zona afectada térmicamente (véase la fotografía de la entrada del agujero de la izquierda de la Fig. 9). Es por ello que se ha determinado como la potencia óptima de taladrado, aquella potencia mínima que permita la obtención de un agujero pasante, con una ZAT mínima. Para los equipos y materiales empleados, esta ha resultado ser de 800W.

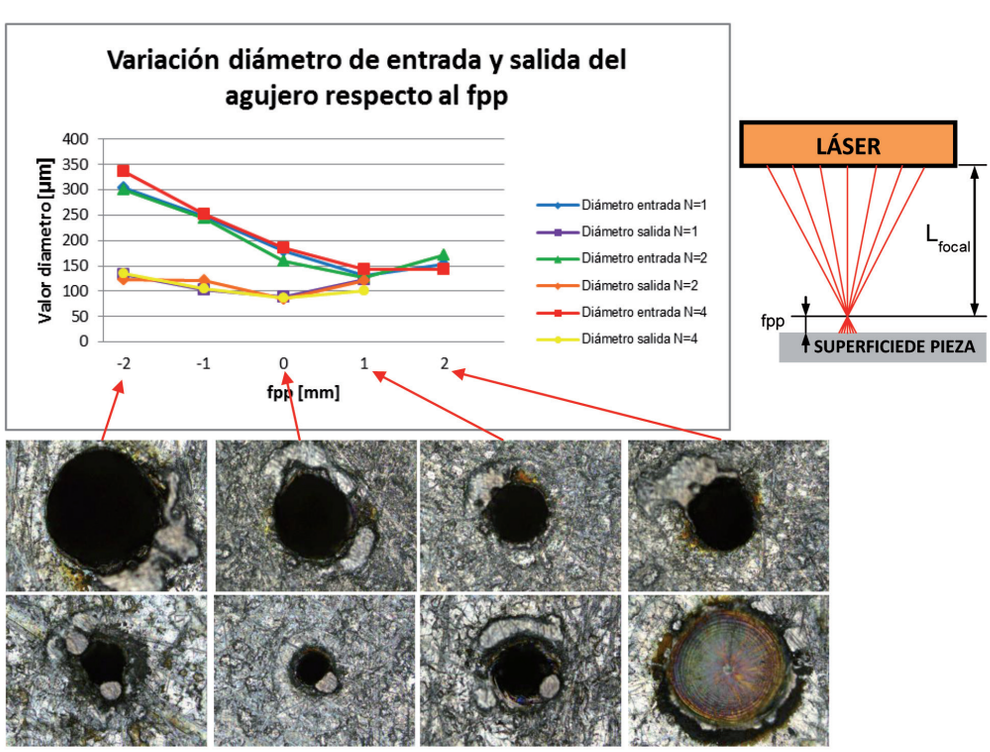


Figura 10: Efecto de la variación del fpp en el tamaño de los microagujeros taladrados mediante laser en una chapa AISI 304 de 1mm de espesor. P=800W, f=5Hz, t=5ms.

Por otro lado, en la Fig.10 se muestra la influencia del plano focal (fpp) del láser en los diámetros de entrada y salida de los taladros. Para su obtención se han realizado diversos ensayos variando la posición relativa entre el láser y la pieza, que debido a la divergencia del haz láser, resulta en una variación del diámetro del spot láser y de su densidad de potencia. Como puede observarse, una variación del foco del láser de ±2mm tiene una gran influencia en ellos, lo que quiere decir que el control de la distancia pieza-láser es uno de los aspectos clave a considerar en esta operación para garantizar la buena calidad de los taladros.

De esta manera, analizando la influencia de todas las variables de entrada sobre las

variables de salida, se han desarrollado gráficas y tablas dinámicas, que permiten obtener el valor óptimo de los parámetros para conseguir unos agujeros de calidad adecuada.

5. ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE LOS TALADROS

Puesto que el taladrado láser es un proceso térmico, la aparición de defectos de origen térmico asociados a la fusión del material es algo inherente al propio proceso. Los defectos más habituales son la generación de una capa de material refundido, material adherido en forma de rebaba, zona afectada térmicamente, o defectos geométricos asociados a la fusión de material no controlada.

Es por ello que deben ajustarse correctamente los parámetros del proceso para garantizar una buena calidad de los taladros y evitar, en la medida de lo posible, estos defectos. Para ello, además de analizar la redondez de los orificios de entrada y salida, se ha analizado la geometría interna de los mismos.

Debido a las pequeñas dimensiones de los taladros, se ha empleado un microscopio óptico confocal para su medición, que además de permitir obtener imágenes de alta calidad y precisión, permite realizar un barrido en la dirección del eje Z y extraer la topografía de la superficie analizada. En la siguiente imagen se muestra la topografía del orificio de entrada de uno de los ensayos, donde puede comprobarse que el material refundido adherido a su periferia es mínimo en este caso.

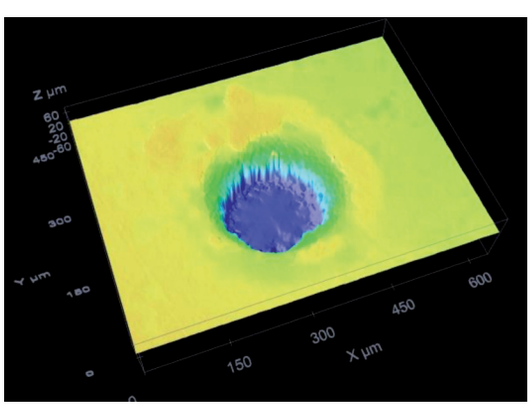
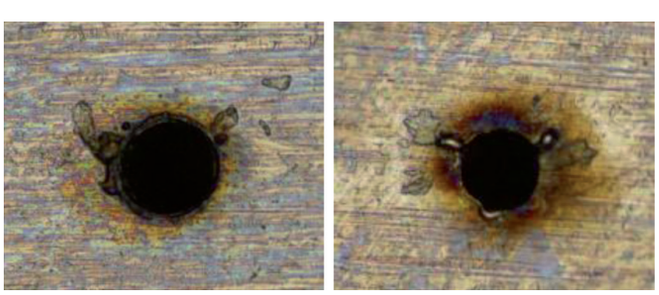


Figura 11: Topografía tridimensional del orificio de entrada de un microagujero

Para el análisis de la geometría interna de los microagujeros, se ha realizado el corte de la pieza mediante electroerosión por hilo, de esta manera se puede comprobar que la conicidad de los agujeros es mínima. Además de ello, atacando las probetas con Nital, se observa en la sección del agujero la zona afectada térmicamente (ZAT). Como puede verse en la Figura 13, la zona afectada térmicamente es mínima, siendo su espesor de unas pocas micras.



a) *b)*

Figura 12: Entrada (a) y salida (b) de un microagujero de d=100micras en AISI 304

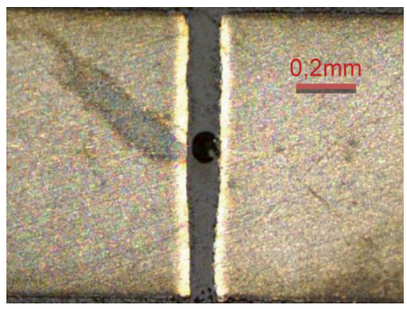


Figura 13: Sección del taladro pulida y atacada con Nital

6. MODELO NUMÉRICO

Otro aspecto desarrollado en este trabajo, además de analizar la calidad de los microagujeros realizados mediante un láser convencional, ha sido la obtención de un modelo numérico que permite la simulación del proceso de taladrado. De tal manera que puede obtenerse una estimación de la geometría final de los taladros obtenidos, lo que permite la minimización del número de ensayos a realizar en la máquina, con el consiguiente ahorro económico que ello conlleva.

Al desarrollar el modelo numérico, se han realizado una serie de hipótesis simplificativas, de tal manera que aunque introduzcan un error relativo en los resultados finales, agilizan los cálculos a realizar y facilitan el desarrollo y programación del modelo. Así, las hipótesis introducidas son las siguientes:

- El material de la pieza se considera un cuerpo continuo, homogéneo e isótropo.
- La eliminación del material se da mediante vaporización, dado que los pulsos que se alcanzan con el láser son del orden de$1{,}27.10^7$ W/cm^2 [8].
- Se desprecian los fenómenos viscoso-dinámicos del material fundido, ya que el material fundido está confinado en un taladro de pequeño diámetro.
- No se tienen en cuenta ni la convección ni la radiación, incluyendo ambos fenómenos, junto con la generación de plasma y las reacciones exotérmicas que se producen debido a la oxidación del material dentro de un coeficiente de pérdidas global "A".
- Se consideran variaciones lineales de las propiedades físicas en función de la variación de la temperatura.

Aunque no se va a profundizar en las bases del modelo numérico, debe mencionarse que se basa en el balance energético en cada uno de los elementos que conforman el cuerpo mediante la aplicación del primer principio de la termodinámica:

$$dE_{entrada} - dE_{salida} + dE_{generada} = dE_{acumulada}$$

Desarrollando esta ecuación, se obtiene la ecuación general del campo de temperaturas por conducción:

$$a.\nabla^2\theta \pm \frac{q_v}{\rho.c_p} = \frac{\partial\theta}{\partial t}$$

donde:

c_p: Calor específico [KJ/Kg.K]
q_v: Potencia calorífica por unidad de volumen [W/m^3]
ρ: Densidad del cuerpo [Kg/m^3]
a: Difusividad térmica [m^2/s] donde a= λ/ ($\rho.c_p$)
$\frac{\partial\theta}{\partial t}$: Variación de la temperatura respecto al tiempo

Se trata de una ecuación diferencial de segundo orden, el cual debe derivarse para obtener la ecuación del campo térmico. En ella aparecerán dos constantes de integración que deberán fijarse mediante condiciones de contorno y condiciones iniciales, los cuales se definen de la siguiente manera:

- Condiciones iniciales (CI): se ha establecido que la pieza en el instante t=0s se encuentra a temperatura ambiental: $\theta_0 = \theta(x, y, z, 0)$; donde$\theta_0$ es la temperatura ambiente.
- Condiciones de contorno (CC): estas condiciones hacen referencia a la interacción entre el material y el medio en el que se encuentra. Se han introducido dos tipos de condiciones de contorno: las CC de primera especie (tipo Dirichlet) se han introducido en aquellas caras donde no incide el haz láser e imponen que la temperatura del nodo adyacente a la pieza, pero que no pertenece a ella, sea igual a la del nodo de la pieza. Esto es equivalente a poner una condición de segunda especie donde el flujo de calor sea cero (q_s=0). Por otro lado, las CC de segunda especio (tipo Newmann) introducen un flujo de calor en la cara donde incide el haz láser.

Para el desarrollo de la ecuación anterior, se han empleado las diferencias finitas centrales. La energía que el haz láser a la pieza se ha introducido como condición de contorno y no existen fuentes ni sumideros de calor internos en la pieza, el valor de q_v es nulo. Por lo que, la ecuación general del campo de temperaturas queda definido de la siguiente manera:

$$a.\nabla^2\theta = \frac{\partial\theta}{\partial t} \Rightarrow \theta_{x,y,z}^{t+1} = \theta_{x,y,z}^{t} + a.r_1.\left(\theta_{x+1,y,z}^{t} - 2\theta_{x,y,z}^{t} + \theta_{x-1,y,z}^{t}\right) + a.r_2.\left(\theta_{x,y+1,z}^{t} - 2\theta_{x,y,z}^{t} + \theta_{x,y-1,z}^{t}\right) + a.r_3.\left(\theta_{x,y,z+1}^{t} - 2\theta_{x,y,z}^{t} + \theta_{x,y,z-1}^{t}\right)$$

Donde,

$$r_1 = \frac{\Delta t}{\Delta x^2}; \quad r_2 = \frac{\Delta t}{\Delta y^2}; \quad r_3 = \frac{\Delta t}{\Delta z^2}$$

/

Δx: Distancia entre nodos en la dirección del eje X
Δy:Distancia entre nodos en la dirección del eje Y
Δz: Distancia entre nodos en la dirección del eje Z
Δt: Incremento de tiempo en cada paso

Representando matricialmente la ecuación anterior para todos los nodos e introduciendo las condiciones de contorno, se llega a la siguiente ecuación, que debe resolverse iterativamente para la obtención del campo de temperaturas de la pieza.

$$\{\theta^{t+1}\} = [M].\{\theta^t\} + \left\{\frac{I.(1-A).\Delta x}{\lambda}.a.r_1\right\} = [M].\{\theta^t\} + \left\{\frac{I.(1-A).\Delta t}{\Delta x.\rho.c_p}\right\}$$

$$\{\theta^{t+1}\} = [M].\{\theta^t\} + \{F\}$$

Donde, {M}= Matriz de transferencia, {F}= Vector fuente, y $\{\theta^t\}$ y $\{\theta^{t+1}\}$ son los vectores de las temperaturas de los distintos nodos para los instantes de tiempo "t" y" t+1" respectivamente.

Tras la realización de todos los cálculos, el programa desarrollado permite la representación gráfica de la geometría tridimensional del taladro. A modo de ejemplo, en la Fig. 14 se muestran las representaciones 3D del agujero formado, como si fuera un cuerpo sólido (donde se muestra el campo térmico alcanzado durante la operación de taladrado) y una vista en alámbrico del mismo (que permite una mejor visión del agujero internamente).

Además de ello, el programa permite realizar secciones de la geometría 3D, lo que ha permitido validar del modelo numérico en comparación con las secciones obtenidas de los microagujeros reales.

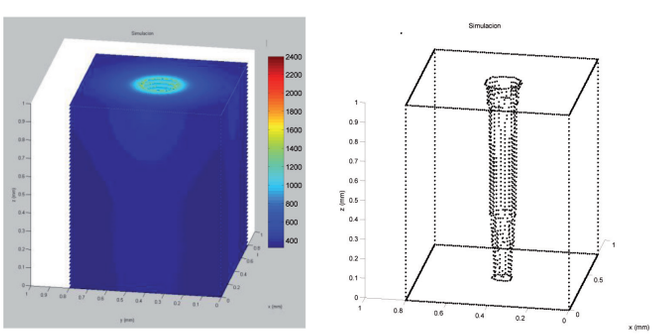


Figura 14: Representación 3D y vista en alámbricodel microagujero simulado

Realizando una comparación entre los resultados del modelo experimental y del modelo numérico, puede concluirse que la diferencia entre ambos es inferior al 10% en todos los casos estudiados, lo que indica que los resultados del modelo desarrollado se aproximan razonablemente a la realidad y que

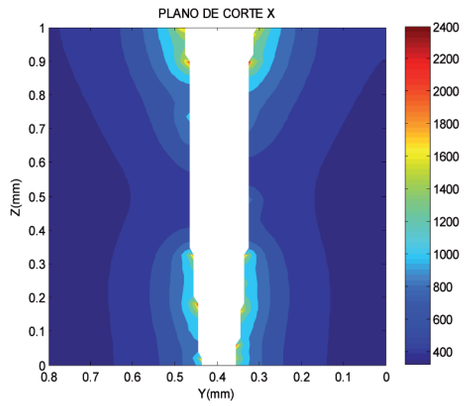


Figura 15: Sección de un microagujero simulado

$$D_{sup} = \frac{D_x + D_y}{2}$$

$$d_{inf} = \frac{d_x + d_y}{2}$$

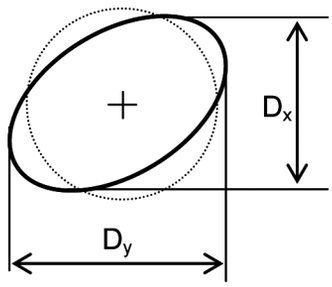


Figura 16: Medición de los diámetros en X e Y

puede ser una herramienta útil en el proceso de puesta a punto de este proceso.

A continuación se muestran los resultados para una serie de ensayos. Las condiciones utilizadas se indican en la Tabla 2.

Valores óptimos de las variables			
Potencia	=	800	W
frecuencia	=	5	Hz
numero de pulsos	=	1	
fpp	=	0	

Tabla 2: Parámetros de proceso empleados

$$\alpha = \arctan\left(\frac{D_{sup} - d_{inf}}{2.e}\right)$$

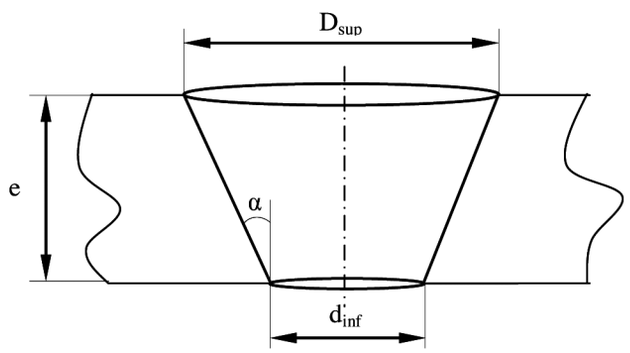


Figura 17: Esquema para el cálculo de la conicidad

Donde:

- D_x, D_y: Diámetros en las direcciones X e Y del orificio de entrada.
- D_{sup}: Diámetro medio de cada agujero $D_{sup}=(D_x+D_y)/2$.
- $D_{sup\ medio}$: Diámetro medio del orificio de entrada de los agujeros realizados en las mismas condiciones.
- Las letras de los orificios de salida se han indicado en minúscula.

7. CONCLUSIONES

Mediante el presente artículo se ha verificado que es posible realizar taladros con un láser convencional de fibra, obteniendo en la mayoría de los casos agujeros de alta calidad en tiempos razonables. Los resultados muestran que puede taladrarse una pieza de acero inoxidable AISI 304 de 1mm de espesor en un tiempo total de 3ms por taladro, por lo que se

ensayo	t [ms]	DC [%]	D_x	D_y	D_{sup}	$D_{sup\ med}$	d_x	d_y	d_{inf}	$d_{inf\ med}$	conicidad 2.α [º]
2.1	1	100	162	158	160	158,25	0	0	0	0	4,52
			160	153	156,5		0	0	0		
2.2	5	100	145	155	150	158,75	88	86	87	80,25	2,26
			168	167	167,5		66	81	73,5		
2.3	10	100	162	166	164	173	82	82	82	82,5	2,59
			184	180	182		81	85	83		
2.4	20	100	173	182	177,5	177,5	87	82	84,5	88	2,56
			172	183	177,5		91	92	91,5		

Tabla 3: Resultado experimentales

Ensayo	orificio	X_0 [mm]	X_1 [mm]	D_m [µm]	D_r [µm]	error [%]
2.1	Sup	0,47595	0,31392	162,03	158,25	2,39
	inf	0	0	0	0	0,00
2.2	Sup	0,47595	0,31392	162,03	158,75	2,07
	inf	0,43544	0,35443	81,01	80,25	0,95
2.3	Sup	0,47595	0,31392	162,03	173	-6,34
	inf	0,43544	0,35443	81,01	82,5	-1,81
2.4	Sup	0,48608	0,3038	182,28	177,5	2,69
	inf	0,44557	0,35443	91,14	88	3,57

Tabla 4: Comparación entre los resultados experimentales y los resultados del modelo numérico [1]

Donde:

$D_m = (X_1 - X_0)$ es el diámetro obtenido mediante el modelo numérico y el D_r es el valor del diámetro medio real obtenido experimentalmente.

podrían realizar más de 150 taladros por segundo, considerando tiempos de posicionamiento y retirada de la máquina.

El proceso ha resultado ser altamente repetitivo, y los agujeros obtenidos muestran una gran circularidad tanto en el orificio de entrada como en el de salida. Además de ello, al analizar la geometría interna de los taladros, se ha visto que el efecto de abarrilamiento típico de esta operación y la conicidad de los taladros son mínimos, obteniendo unas paredes relativamente lisas y verticales, especialmente una vez que el agujero es pasante. También se ha observado que aunque la calidad de los taladros es buena, aún existe margen de mejora en aspectos como control de distancia láser–pieza, inyección de gas en la superficie, aspiración por el orificio de salida, etc. por lo que se pretende continuar trabajando sobre este proceso.

Por último, se ha desarrollado y validado un modelo relativamente sencillo de poner en funcionamiento y que considera la influencia de las variables más relevantes del proceso. Mediante el empleo del modelo, se puede simular el proceso de una manera bastante precisa y en tiempos de cálculo reducidos, obteniendo una estimación de la geometría de los taladros y de los parámetros del proceso con un error inferior al 10%. De esta manera, antes de comenzar con los ensayos, es posible obtener una ventana de parámetros de las condiciones necesarias para realizar los taladros, minimizando el número de ensayos necesarios y ahorrando tanto en tiempo de máquina, como en costes de material.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Avanish Kumar Dubey, Vinod Yadava "Laser beam machining—A review" International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 48, pp. 609–628, 2008

[2] Avanish Kr. Dubey, Vinod Yadava "Experimental study of Nd:YAG laser beam machining—An overview" Journal of materials processing technology, Vol. 195, pp. 15–26, 2008

[3] Petkovsek P , Panjan I, Babnik A et al. "Optodynamic study of multiple pulses micro drilling" Ultrasonics , Vol 44, pp. e1191–e1194, 2006.

[4] Ghoreishi M, Low DKY, Li L. "Comparative statistical analysis of hole taper and circularity in laser percussion drilling" International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol 42, pp. 985–995, 2002.

[5] Wang AH et. al "YAG laser percussion drilling of a functional multi-layer thin plate" Optics & Laser Technology, Vol 39 pp. 840–845, 2007

[6] Ng GKL, Li L. "Repeatability characteristics of laser percussion drilling of stainless-steel sheets" Optics and Lasers in Engineering, Vol 39, pp. 25–33, 2003

[7] Low DKY, Li L, Byrd PJ. "The effects of process parameters on spatter deposition in laser percussion drilling" Optics & Laser Technology, Vol 32 pp. 347–354, 2000

[8] Verhoeven K (2004) "Modelling Laser Percussion Drilling" Printed by Eindhoven University Press, The Netherlands. A research supported by Eldim B.V. and Rolls Royce plc.

[9] Schneider M, Berthe L, Muller M, et al. "A fast method for morphological analysis of laser drilling holes" Laser Institute of America, 2010

[10] Ng GKL, Crouse PL, Li L. "An analytical model for laser drilling incorporating effects of exothermic reaction, pulse width and hole geometry" International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 49, pp. 1358–1374, 2006

[11] Yan Y, Lingfei Ji, Bao Y, Jiang Y. "An experimental and numerical study on laser percussion drilling of thick section alumina" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 212, pp. 1257– 1270, 2012

[12] Yilbaa S, Sahin AZ, Davies R. "Laser heating mechanism including evaporation process initiating laser drilling" Journal Machining Tools Manufacturing, Vol. 35. No. 7, pp. 1047-1062, 1995

[13] Modest MF. "Effects of Multiple Reflections on Hole Formation During Short-Pulsed Laser Drilling" Journal of Heat Transfer, Vol. 128, pp. 653-661, 2006

[14] Ohmura E, Noguchi S "Laser Drilling Simulation Considering Multiple Reflection of Laser, Evaporation and Melt Flow" A. Öchsner et al. (eds.), Materials with Complex Behaviour, Advanced Structured Materials 6, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010

[15] Ghoreishi M, Nakhjavani OB. "Optimisation of effective factors in geometrical specifications of laser percussion drilled holes" journal of materials processing technology, Vol. 196, pp. 303–310, 2008

[1] *Unidades no indicadas en micras*