

## Corte mediante láser de elementos estructurales de mullita-alúmina

F. QUINTERO, J. POU, F. LUSQUIÑOS, M. BOUTINGUIZA, R. SOTO, Y M. PÉREZ-AMOR

Dpto. Física Aplicada, Universidad de Vigo, E.T.S. Ingenieros Industriales  
36200 - Vigo, España.

La aplicación del láser de alta potencia para el corte de cerámicas estructurales es un proceso en desarrollo que ofrece excepcionales ventajas en comparación con las técnicas convencionales de mecanizado. Sin embargo, como paso previo a su implementación industrial se hace necesario realizar un análisis profundo del proceso que permita evitar los eventuales inconvenientes y optimizar los resultados.

En este trabajo se presentan los resultados más relevantes del estudio del corte mediante láser de elementos estructurales compuestos de una matriz de mullita con una fase dispersa de alúmina. Se comparan los resultados obtenidos al emplear un láser de CO<sub>2</sub> operado en modo continuo con los correspondientes a la utilización de un láser de Nd:YAG en modo pulsante. En ambos casos se estudia la influencia de los parámetros de operación que más afectan a la calidad de los cortes y se compara, asimismo, la aplicación de un cabezal de corte convencional con un nuevo cabezal diseñado específicamente para mejorar la calidad de los cortes.

Con el objeto de realizar la comparación sistemática de los resultados que permita la optimización del proceso se emplean parámetros cuantificables para caracterizar la calidad de los cortes. Los resultados obtenidos muestran una notable mejoría al emplear el nuevo cabezal de corte.

*Palabras clave:* cerámicas oxídicas, silicatos, mecanizado, corte láser.

### Laser cutting of mullite-alumina structural elements

The application of high power lasers for cutting of structural ceramics is a process under development exhibiting great advantages in comparison with conventional machining techniques. However, an in depth analysis of the process is necessary before its industrial implementation in order to avoid eventual drawbacks and to optimize the results.

The most relevant results from the study of laser cutting of structural elements composed of a mullite matrix with a dispersed phase of alumina are presented in this work. The results obtained employing a CO<sub>2</sub> laser operated in CW mode are compared with those obtained using a free-running Nd:YAG in pulsed mode. In both cases, the effect of the operation parameters with stronger influence on the cut quality is analyzed. At the same time, the application of a conventional cutting head is compared with a new one specifically designed to optimize the cut quality.

Several quantifiable parameters were employed to characterize the quality of the cuts with the aim of performing a systematic assessment of the results which allows the optimization of the process. The results obtained show a clear improvement of the cut quality as the new cutting head is employed.

*Keywords:* oxide ceramics, silicates, machining, laser cutting.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las cualidades inherentes al proceso de corte con láser son lo suficientemente atractivas y singulares como para explicar el elevado número de aplicaciones de esta técnica en la industria y la creciente implantación como herramienta que sustituye a los métodos tradicionales en virtud de sus ventajas. En efecto, el uso de los láseres como herramienta de corte está sólidamente establecido en la industria para el procesamiento de metales (1). Por otro lado, es evidente que, ante la dificultad asociada a la elevada dureza y fragilidad de la mayoría de las cerámicas, adquieren mayor interés las ventajas específicas del láser como herramienta para el mecanizado de materiales duros. Ventajas tales como la inexistencia de tensiones mecánicas, la capacidad para procesar piezas de elevada dureza, la elevada velocidad de procesamiento o la ausencia de desgaste de la herramienta, se hacen casi imprescindibles. Sin embargo, la implementación del láser como herramienta de mecanizado en la industria cerámica no es tan extensa (con la salvedad del

corte de sustratos para microelectrónica), incluso aún cuando sus ventajas son tan valiosas.

Esta situación se debe a que la aplicación de los láseres al mecanizado de cerámicas está incentivada por la necesidad de mejorar la velocidad y productividad de este proceso, pero está contenida por la ocurrencia de algunos inconvenientes cuando el proceso no está completamente optimizado. Complicaciones tales como la fractura de las piezas, la formación de microgrietas y rebabas o la aparición de una zona afectada térmicamente dificultan esta aplicación. Asimismo, debido a que los diferentes materiales cerámicos pueden presentar un amplio rango de propiedades térmicas, ópticas y mecánicas, cada uno de ellos requiere unas condiciones de operación específicas para acometer el procesamiento mediante láser con una calidad óptima. Por lo cual, es inevitable la realización de un proceso de investigación y desarrollo intensivo, previo a la implementación de la técnica en el proceso de fabricación.

La formación de grietas inducidas por las tensiones térmicas debido al calentamiento local de la pieza procesada durante el corte es un inconveniente habitual que aparece cuando el proceso no está optimizado. Diversos trabajos experimentales han sido realizados para estudiar la influencia de algunos parámetros de proceso en la aparición de grietas (2-5) así como estudios teóricos acerca del desarrollo de las tensiones térmicas (6). Además, se han ensayado diversos métodos para reducir los abruptos gradientes térmicos que inducen el agrietamiento, tales como el precalentamiento de las piezas procesadas en un horno (7-10), la aplicación de un haz láser de precalentamiento frente al haz de corte (11) y corte en pasadas múltiples (12-14).

Otro inconveniente importante que debe tenerse en consideración es la modificación de las propiedades del material debido al exceso de calor aportado a la muestra durante la interacción con el haz láser. Algunos investigadores han ensayado láseres con pulsos muy cortos y elevados picos de potencia para disminuir este daño térmico (15-17). De este modo, la extracción de material es efectuada, fundamentalmente, por sublimación y la reducción del ancho del pulso limita la difusión del calor. Pero estos láseres tienen una potencia promedio muy baja por lo que proporcionan velocidades de extracción muy lentas.

En este trabajo se exponen los resultados del estudio detallado del corte por fusión mediante láser de placas de mullita-alúmina. Se utilizaron dos tipos de láseres: un láser de CO<sub>2</sub> en modo continuo y un láser de Nd:YAG en modo pulsado. Se efectuó, también, una comparación entre la aplicación de un cabezal de corte convencional con otro específicamente diseñado y construido por los autores que incorpora una tobera De Laval en una novedosa configuración no coaxial (18,19) para mejorar el sistema de inyección del gas asistente. Los resultados son presentados y discutidos en términos de la productividad del proceso (velocidad de corte) y de la calidad de los cortes.

La calidad de los cortes se evaluó en diferentes fases: en primer lugar se efectuó una caracterización geométrica de los cortes empleando los parámetros definidos en la norma internacional ISO 9013:2002. Se midió el ancho de los cortes, la tolerancia de perpendicularidad y la rugosidad. En segundo lugar, un examen de la microestructura del perfil del corte de las muestras procesadas permite determinar la extensión de la Zona Afectada Térmicamente (ZAT). La evaluación de la calidad de los cortes se orientó para estudiar la influencia de las diferentes condiciones de operación. Con la finalidad de facilitar la comparación y consistencia de los resultados se han empleado los parámetros cuantitativos recomendados en la norma ISO 9013. Sin embargo, los autores del presente trabajo estimaron que los parámetros geométricos definidos en dicha norma no son suficientes para evaluar todas las características de la calidad de los cortes. Concretamente, en el procesamiento de materiales con láser, la formación de una zona afectada térmicamente es un efecto secundario de importancia esencial, ya que esa parte del material ha sufrido una alteración de su microestructura o de sus propiedades mecánicas y puede perjudicar seriamente a la vida útil y comportamiento de las piezas procesadas. Por tanto, es crucial evaluar la influencia de los distintos parámetros de operación sobre este fenómeno con la finalidad de minimizarlo. Por esta razón, se considera oportuno incluir en la evaluación de la calidad el análisis de la extensión de la ZAT (20).

## 2. TÉCNICAS EXPERIMENTALES

El material procesado en todos los experimentos fue un compuesto comercial de mullita-alúmina consistente en una matriz de mullita con una fase dispersa de alúmina en una proporción que da una composición en peso aproximada >79% de alúmina y <19% de sílice, además de otros óxidos metálicos en proporciones inferiores al 0.5% (TiO<sub>2</sub> <0.3%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> <0.5%, CaO <0.2%, K<sub>2</sub>O <0.5%, Na<sub>2</sub>O <0.2%). Se procesaron placas planas de este compuesto con espesor de 5 mm, porosidad entre 22 y 25% y densidad de 2.5 g/cm<sup>3</sup>.

El láser de CO<sub>2</sub> empleado (Rofin-Sinar RS 5000) se operó en modo continuo seleccionándose la potencia incidente con valores entre 500 y 2000 W en las series correspondientes. El haz láser fue focalizado en todos los ensayos a una distancia de 0.5 mm bajo la superficie superior de la pieza por medio de un espejo parabólico con longitud focal de 200 mm.

Para los ensayos con láser de Nd:YAG se utilizó un equipo de 500 W de máxima potencia media nominal (Rofin-Sinar RSY-500P). Todos los experimentos fueron realizados con el láser funcionando en su armónico fundamental (1.064 nm) en modo pulsado normal con una fibra óptica para realizar el guiado del haz, empleándose una lente convergente con longitud focal de 80 mm para focalizar el haz. En la Tabla I se presentan los parámetros de operación de este láser para las distintas frecuencias de pulsado. En los ensayos realizados con el cabezal convencional se posicionó el foco a 0.6 mm bajo la cara superior de la placa cerámica, mientras que en los ensayos realizados con el cabezal no coaxial se situó a 1.0 mm.

TABLA I. PARÁMETROS DE OPERACIÓN EMPLEADOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS CON EL LÁSER DE Nd:YAG.

Frecuencia (Hz)	Potencia media sobre la pieza (W) / Ancho de pulso (ms)		
10	410 / 10	375 / 10	340 / 10
20	420 / 5	395 / 5	355 / 5
40	415 / 2.5	395 / 2.5	355 / 2.5
50	420 / 2	380 / 2	340 / 2
100	410 / 1	385 / 1	340 / 1
200	395 / 0.5	380 / 0.5	340 / 0.5

Los cortes se efectuaron por medio de la técnica de corte por fusión, en la cual se aplica un gas asistente a alta presión para expulsar el material fundido. Para realizar esta función se emplearon tanto un cabezal convencional (suministrándose el gas asistente a presiones de 3, 5 y 8 bares), como un cabezal no coaxial (operado con presión invariable de 8 bares) con el objeto de comparar los resultados producidos por ambos cabezales. En todos los ensayos efectuados con el láser de CO<sub>2</sub> se utilizó aire comprimido como gas asistente, mientras que en los realizados con el láser de Nd:YAG se utilizó argón.

Para medir el ancho de los cortes se utilizó un microscopio óptico estereoscópico (Nikon SMZ-10A) con una plataforma micrométrica de dos ejes de traslación. La rugosidad se evaluó mediante el parámetro recomendado en la norma ISO 9013, la altura media del perfil R<sub>z</sub>. Para realizar estas medidas se ha empleado un rugosímetro de la firma Taylor-Hobson modelo Form Talysurf Plus con filtro Gaussiano corregido en fase procediendo de acuerdo con las especificaciones de la norma ISO 4288:1996.

Para el análisis de la ZAT fueron seleccionadas algunas muestras representativas e incluidas en resina epoxy,

seguidamente se seccionaron transversalmente a la dirección de corte del láser con una máquina de corte de precisión (Struers Minitom) y, posteriormente, fueron desbastadas y pulidas hasta  $1 \mu\text{m}$ . La inspección de las muestras en sección transversal se efectuó con un microscopio óptico invertido metalográfico (Nikon Epiphot TME), el cual incorpora una cámara digital para adquirir y archivar imágenes de los perfiles de los cortes. De este modo, se pudo efectuar un análisis cualitativo de estas imágenes para determinar la posible presencia de microgrietas, así como su análisis cuantitativo para evaluar la extensión de la ZAT y la tolerancia de perpendicularidad. El análisis dimensional de las imágenes para determinar estas magnitudes cuantitativas se efectuó por medio del software libre UTHSCSA ImageTool.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Velocidad máxima de corte

Con el objeto de determinar los límites efectivos de la productividad del proceso se realizaron distintas series experimentales en las que se determinó la velocidad máxima de corte. Para ello se efectuaron sucesivos cortes de alrededor de 50 mm de longitud incrementándose la velocidad de corte en  $1 \text{ mm/s}$  en cada ensayo hasta la aparición de algún fallo de penetración del láser en todo el espesor de la pieza. Una vez que se determinó este valor se realizaron nuevos ensayos reduciendo los incrementos de la velocidad de avance a valores entre  $0.1$  y  $0.5 \text{ mm/s}$  para alcanzar una mayor precisión. El valor determinado por este método se ha denominado velocidad máxima de corte.

Los resultados de la velocidad máxima de corte en función de la potencia del haz incidente en las series realizadas con el láser de  $\text{CO}_2$  en modo continuo se representan en la gráfica de la Figura 1. En esta gráfica se presentan dos series realizadas con el cabezal de corte convencional operado con presiones del gas asistente de 3 y 5 bar y una serie con el nuevo cabezal no coaxial. Los resultados muestran una relación lineal entre la potencia incidente y la máxima velocidad de corte hasta  $1250 \text{ W}$ , además, en este rango no existe diferencia entre la utilización de los distintos cabezales o presión de inyección del gas asistente. Sin embargo, el comportamiento lineal se rompe

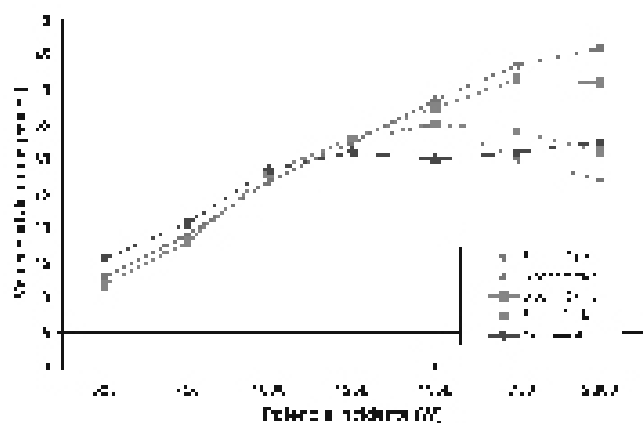


Fig. 1.- Velocidad máxima de corte obtenida con el láser de  $\text{CO}_2$  en función de la potencia incidente para las distintas series realizadas con el cabezal convencional (presiones de 3 y 5 bar) y con el cabezal no coaxial.

para potencias por encima de  $1250 \text{ W}$  y altas velocidades. En estas condiciones, al utilizar el cabezal convencional se forma un cordón continuo de material resolidificado adherido a la parte inferior de la ranura del corte que lo cierra por completo, consecuentemente, aunque el haz láser ha penetrado todo el espesor de la pieza fundiendo todo el material, no se puede afirmar que se haya producido un corte totalmente abierto. No obstante, si se reduce la velocidad de avance hasta un cierto valor por debajo de la velocidad máxima de corte es posible obtener nuevamente un corte totalmente abierto. Por este motivo se ha definido una nueva velocidad límite, denominada velocidad de corte efectiva, equivalente a la máxima velocidad de avance que produce cortes totalmente abiertos. En la Figura 1 se han representado ambas magnitudes, la velocidad máxima de corte y la velocidad de corte efectiva para los resultados obtenidos con la configuración del cabezal convencional y con el cabezal no coaxial.

Por el contrario, el comportamiento observado al emplear el cabezal con la tobera de inyección del gas asistente en la configuración no coaxial difiere claramente de los resultados explicados en el párrafo anterior. En este caso, no sucede el fenómeno anterior de formación de un cordón continuo de material resolidificado para ninguna de las condiciones de operación ensayadas, por tanto, únicamente se ha representado la velocidad máxima de corte. Sin embargo, se determinó que la falta de penetración total se produce a una velocidad de avance inferior a la detectada en el caso anterior, concretamente, a una velocidad similar a la velocidad de corte efectiva resultante de la utilización del cabezal convencional. La máxima velocidad de avance que genera cortes totalmente abiertos es similar en ambos casos, por lo que, en lo que se refiere a los límites de la velocidad de procesamiento, se puede afirmar que la eficiencia de ambas configuraciones es equivalente.

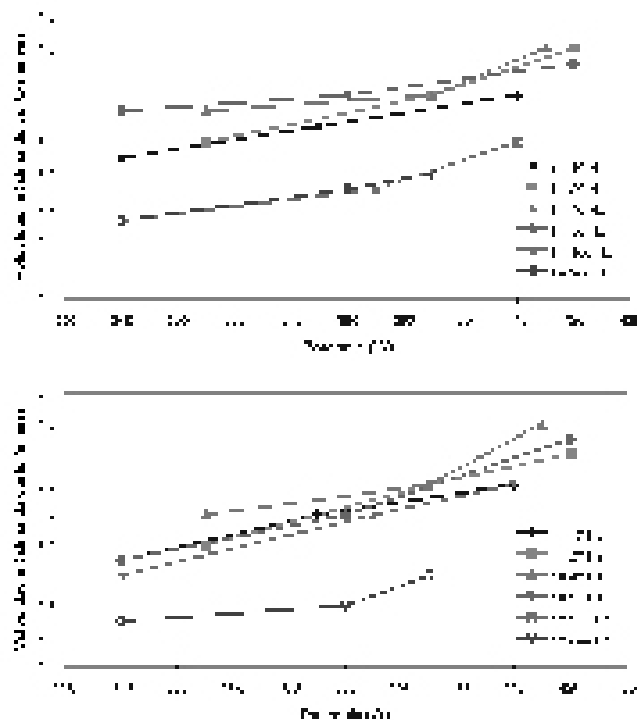


Fig. 2.- Velocidad máxima de corte en función de la potencia promedio incidente sobre la pieza para distintas frecuencias de pulsado del láser de Nd:YAG: a) ensayos realizados con el cabezal convencional y presión de 5 bar, b) resultados con el cabezal no coaxial.

Con el objeto de determinar la velocidad máxima de corte obtenida con el láser de Nd:YAG se llevaron a cabo unas nuevas series experimentales en las que se exploró la velocidad máxima de corte en función de la frecuencia de pulsado y de la potencia promedio sobre la pieza. Como consecuencia de los resultados de ensayos preliminares (21), se seleccionó la presión de 5 bar como la única presión de trabajo empleada con el cabezal convencional en esta experiencia, ya que se demostró que no influye en la velocidad de corte. Se realizaron las mismas series pero ahora con el cabezal no coaxial para comparar ambos resultados. Las Figuras 2.a y 2.b presentan los resultados de las velocidades máximas de corte para las series realizadas con el cabezal convencional y con el no coaxial respectivamente. En estas gráficas, la velocidad máxima de corte se representa en función de la potencia promedio medida sobre la pieza para las distintas frecuencias de pulsado. Como puede apreciarse en ambas series, las velocidades máximas de corte más elevadas se alcanzan al procesar con frecuencias de pulsado entre 20 y 50 Hz, mientras que a la frecuencia de 200 Hz se obtienen los resultados más bajos. Este resultado, que es un reflejo de la eficiencia del proceso, puede deberse a una variedad de factores tales como las diferencias en la temperatura máxima alcanzada en el frente de corte que puede inducir distintos regímenes de evaporación e índices de absorbancia, así como a las diferencias en las pérdidas de energía por conducción al variar el modo temporal de aporte de energía a la pieza procesada. Por otro lado, no se aprecia una influencia importante del tipo de cabezal empleado.

### 3.2. Evaluación de la calidad de los cortes.

Para analizar la calidad de los cortes se efectuaron distintas series seleccionándose en cada caso la velocidad de avance equivalente a un 90% de las velocidades máximas determinadas en el apartado anterior, pues se ha demostrado que estos valores proporcionan la mejor calidad de los cortes (20) y evitan fallos de penetración debidos a eventuales fluctuaciones al operar cerca de las condiciones límites.

Los parámetros de operación empleados en cada uno de los ensayos de las series realizadas con el láser de CO<sub>2</sub> se presentan en la Tabla II, en este caso, la duplicidad de algunos valores de la velocidad de corte indica que se realizaron sendos ensayos relativos a las velocidades máxima y efectiva definidas previamente. La Tabla III muestra los parámetros de operación correspondientes a los ensayos realizados con el láser de Nd:YAG. En estos ensayos se emplearon los parámetros de pulsado del láser indicados en la Tabla I correspondientes a las condiciones de mayor potencia promedio.

### 3.2.1. Especificaciones geométricas.

Los resultados obtenidos de la evaluación de las muestras correspondientes a las series realizadas con el láser de CO<sub>2</sub> operado en modo continuo se presentan en las gráficas de la Figura 3 en las que las magnitudes geométricas medidas se trazan en función de la potencia del haz láser empleada y para las distintas configuraciones del gas asistente.

En la gráfica de la Fig. 3.a puede observarse un incremento del ancho de corte al aumentar la potencia del haz incidente, salvo para los valores relativos a la velocidad efectiva, para los que se produce una reducción de esta magnitud. El incremento del ancho de corte con la potencia podría relacionarse intuitivamente con el aumento de la densidad de energía por unidad de longitud suministrada a la pieza, obtenida al dividir la potencia incidente por la velocidad de avance. Según esta hipótesis, el incremento del ancho de corte estaría provocado por un aumento del aporte de energía lo que produciría la fusión de un mayor volumen de material, dando lugar a un corte más ancho. Sin embargo, esta hipótesis, que parece muy plausible desde un punto de vista intuitivo, es inconsistente con los resultados relativos a la velocidad de corte efectiva para los que al disminuir la velocidad de corte se incrementa la densidad de energía pero se reduce el ancho de corte en contra de lo que cabría esperar según esta explicación. No obstante, el aumento del ancho de corte sí mantiene una relación monótona respecto de la velocidad, este comportamiento puede explicarse como consecuencia del incremento del espesor de la película de material fundido producida en el corte por fusión al aumentar la velocidad de corte, como se ha demostrado mediante el análisis teórico para el corte de metales (22) y hemos verificado, posteriormente, para nuestro caso concreto (21). Por el contrario, los resultados de la tolerancia de perpendicularidad y de la rugosidad no muestran ninguna pauta evidente que permita extraer alguna conclusión clara.

Por otro lado, cabe destacar como la conclusión más relevante de esta serie que la utilización del cabezal con la configuración no coaxial consigue mejorar los resultados en todos los casos respecto a los obtenidos con el cabezal convencional. Como puede comprobarse fácilmente, los valores de los anchos de corte, de las rugosidades y de la perpendicularidad son siempre mejores en los casos en los que se utilizó el nuevo cabezal.

La Figura 4 muestra la representación gráfica de los parámetros descriptivos de las especificaciones geométricas en función de la frecuencia para los ensayos realizados con el láser de Nd:YAG agrupados en series trazadas según las

TABLA II. VELOCIDADES DE CORTE (mm/s) CORRESPONDIENTES A LOS PUNTOS DE TRABAJO SELECCIONADOS EN LAS SERIES EFECTUADAS CON EL LÁSER DE CO<sub>2</sub>.

Tipo de cabezal / Presión gas asistente (bar)	Potencia (W)						
	500	750	1000	1250	1500	1750	2000
Coaxial / 3	12	17	24	30	35	39/30	42/27
Coaxial / 5	10.5	16.5	25	31	35	38/34	38/31
No coaxial / 8	14	18	26	28	27	28	29

TABLA III. VELOCIDADES DE CORTE (mm/s) EMPLEADAS EN CADA PUNTO DE TRABAJO DE LAS SERIES EXPERIMENTALES REALIZADAS CON EL LÁSER DE Nd:YAG.

Tipo de cabezal / Presión gas asistente (bar)	Frecuencia (Hz)					
	10	20	40	50	100	200
Coaxial / 3	3.5	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0
Coaxial / 5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0
Coaxial / 8	3.5	3.5	3.5	3.5	3.0	3.0
No coaxial / 8	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0

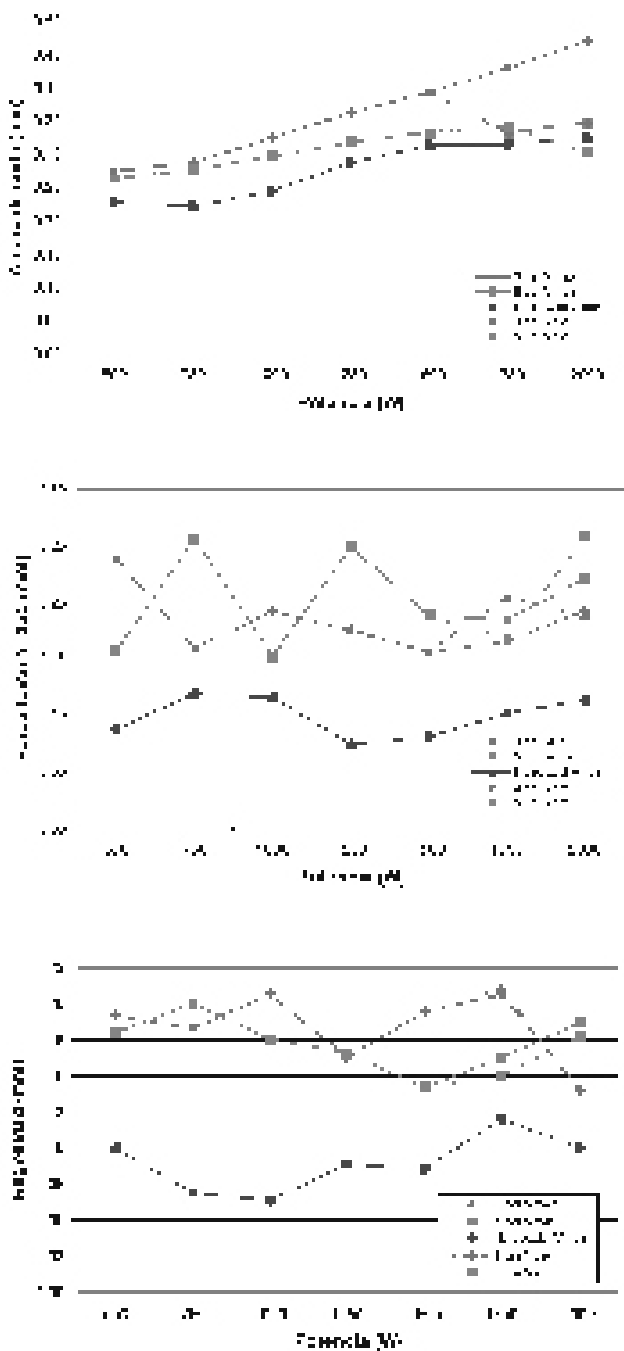


Fig. 3.- Especificaciones geométricas de los ensayos realizados con el láser de CO<sub>2</sub> en función de la potencia del haz incidente para las distintas series realizadas con el cabezal convencional (presiones de 3 y 5 bar) y con el cabezal no coaxial: a) ancho de corte, b) tolerancia de perpendicularidad, c) rugosidad.

condiciones de operación del gas asistente. El examen de los resultados mostrados en la gráfica 4.a permite observar, en primer lugar, que los anchos de corte presentan una ligera tendencia a disminuir al aumentar la frecuencia del pulsado en todas las series analizadas. En segundo lugar, no se distingue una pauta clara que revele la influencia de la presión del gas asistente o del tipo de cabezal empleado sobre el ancho de corte.

En cuanto a la tolerancia de perpendicularidad, en la gráfica 4.b es posible observar que cada una de las series

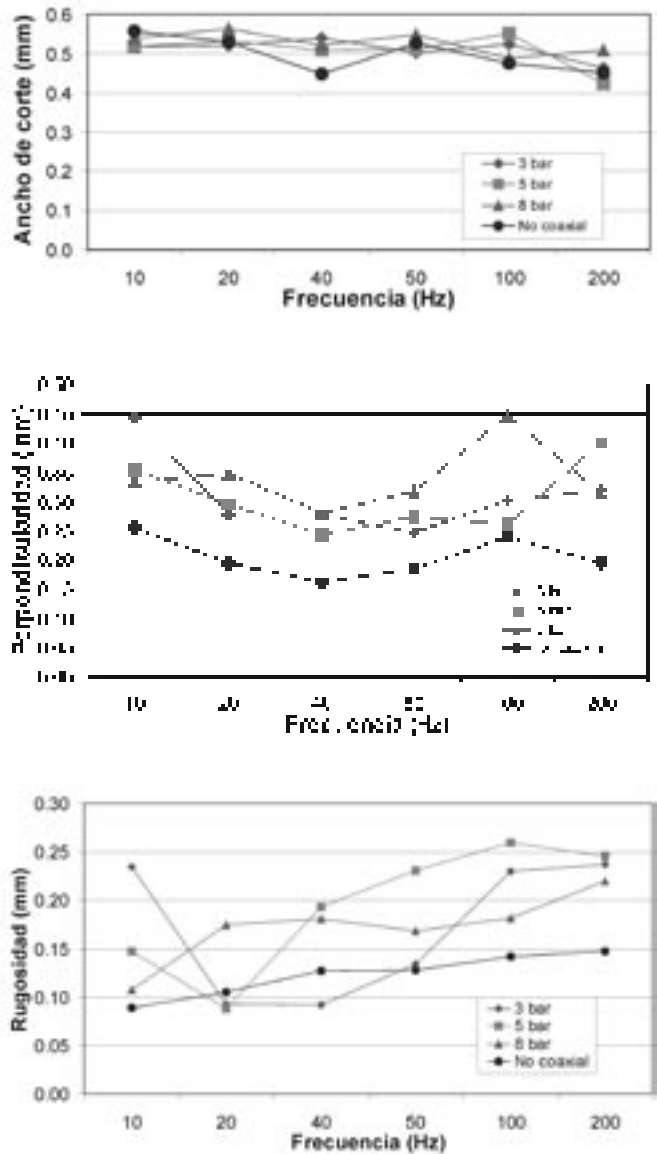


Fig. 4.- Especificaciones geométricas de los ensayos realizados con el láser de Nd:YAG expresadas en función de la frecuencia de pulsado para las distintas series realizadas con el cabezal convencional (presiones de 3, 5 y 8 bar) y con el cabezal no coaxial: a) ancho de corte, b) tolerancia de perpendicularidad, c) rugosidad.

alcanza un valor mínimo en torno a las frecuencias de 40 o 50 Hz. Además los resultados obtenidos al emplear el cabezal no coaxial mejoran los correspondientes al cabezal convencional en todos los casos, independientemente de la presión del gas asistente o de la frecuencia de pulsado.

Respecto a la rugosidad, en la gráfica 4.c se percibe, en general, una tendencia a su aumento al incrementar la frecuencia de pulsado, con la salvedad de los valores correspondientes a la frecuencia de 10 Hz. La razón de esta singularidad está relacionada con los mecanismos de expulsión del material que predominan al operar con esta frecuencia, pues en estas condiciones se produce una elevada evaporación de material en el frente de corte que arrastra el material fundido modificando la dirección de expulsión del material, como hemos demostrado en un análisis teórico recientemente publicado (23). Al mismo tiempo, se verifica,

nuevamente, que los mejores resultados se obtienen al emplear el nuevo cabezal.

La Figura 5 muestra dos fotografías de sendos cortes realizados con el láser de Nd:YAG, utilizando en uno de ellos el cabezal convencional y en el otro el cabezal no coaxial. Estas imágenes son representativas de la típica apariencia del filo de corte en ambos casos, en ellas se puede apreciar fácilmente la diferencia fundamental entre ambos cortes: en el corte realizado con el cabezal convencional (Fig. 5.a) se percibe claramente una capa de material resolidificado adherida al filo del corte; mientras que en el corte realizado con el cabezal no coaxial (Fig. 5.b) esta capa desaparece. La eliminación de esta capa de material resolidificado contribuye a mejorar la calidad de los cortes de forma significativa como se puede apreciar en el análisis de la rugosidad y perpendicularidad de los cortes, así como en los resultados de la extensión de la ZAT presentados en el siguiente apartado.

correspondientes a cada uno de esos grupos. En ellas puede apreciarse fácilmente una zona más clara en el borde del perfil del corte que se destaca contra el material sin tratar. Esta zona diferenciada es la ZAT producida como consecuencia de la modificación de la microestructura del material original, la cual está formada por dos áreas distintas, como se detalló en un trabajo previo (19): la zona más exterior constituye el material que fue completamente fundido y recristalizó en forma de granos de alúmina; el área adyacente al material original únicamente ha sufrido una densificación de la matriz de mullita. A primera vista puede apreciarse la reducción de la ZAT que se obtiene al emplear el cabezal de corte en la configuración no coaxial, lo cual denota una notable mejora de la calidad del corte. Por otro lado, la diferencia en la forma de los perfiles, cuantificada en el análisis de la perpendicularidad, puede atribuirse principalmente a la diferencia de las ópticas empleadas, como se detallará más adelante.

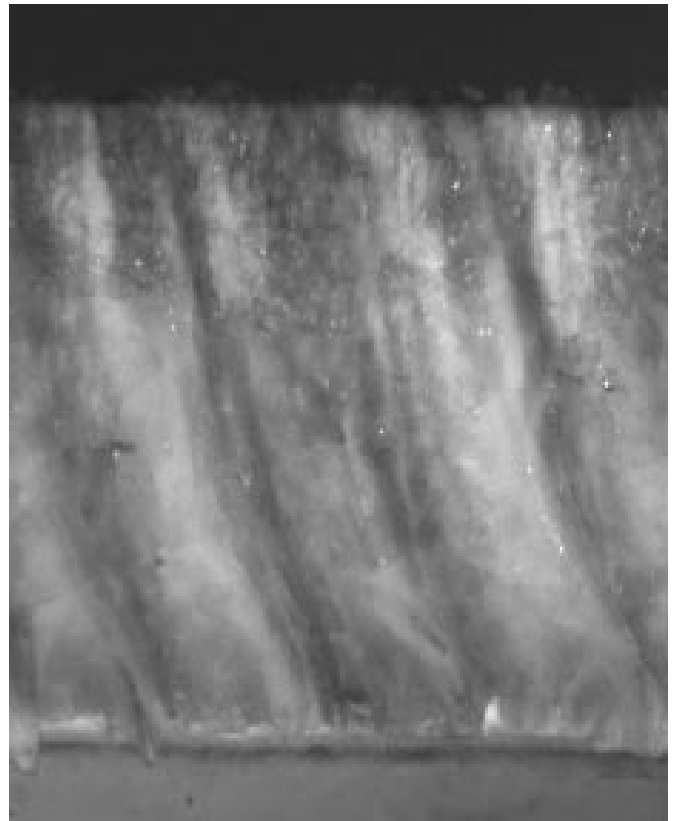
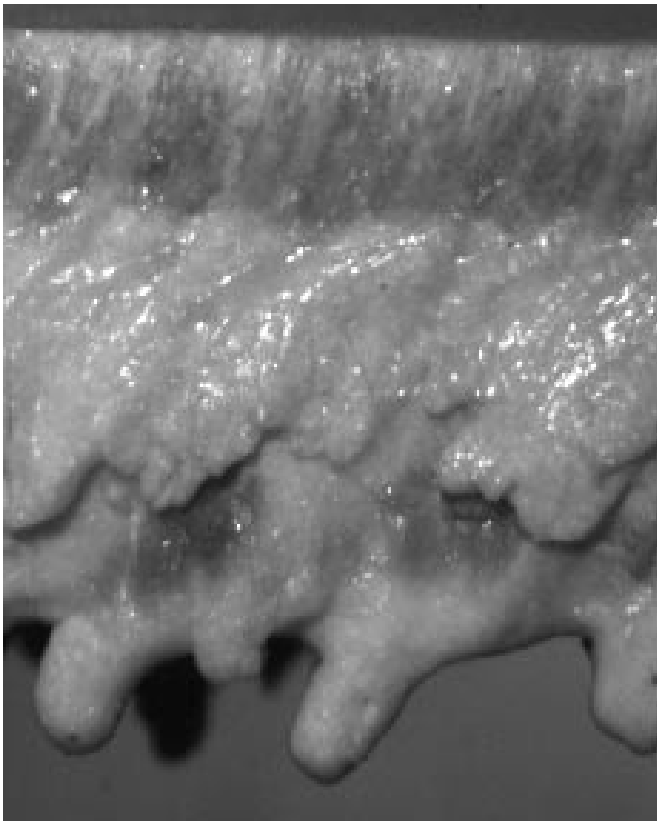


Fig. 5.- Fotografías de los fillos de dos cortes realizados con el láser de Nd:YAG representativos de la apariencia típica resultante de utilizar los distintos cabezales: a) corte realizado con el cabezal convencional, b) corte con el cabezal no coaxial.

### 3.2.2. Análisis microscópico de la ZAT.

El análisis microscópico de las muestras preparadas en sección transversal al perfil del corte permite explorar minuciosamente la aparición de microgrietas y la extensión de la ZAT. En esta etapa de la evaluación de la calidad de los cortes la clasificación de los ensayos más representativa respecto de las características analizadas se establece en función de dos diferencias fundamentales: según el tipo de cabezal empleado sea el convencional o el no coaxial, y, según el tipo de láser empleado.

La Figura 6 exhibe cuatro micrografías en sección transversal que ilustran la apariencia usual de las muestras

La exploración de la existencia de microgrietas revela que la mayoría de ellas únicamente aparecen en la ZAT, donde se prevé que las tensiones térmicas sean más intensas, pues en ella se intensifica el gradiente térmico y es posible que pueda provocar el fallo del material con mayor facilidad debido a las transformaciones microestructurales que ha sufrido. Puesto que, al formarse una fase mayoritaria distinta, constituida fundamentalmente por alúmina recristalizada, existe una diferencia substancial en los coeficientes de dilatación térmica, módulos de elasticidad, etc. Estas microgrietas no penetran más allá de la ZAT y tienen una longitud típica de entre 200 y

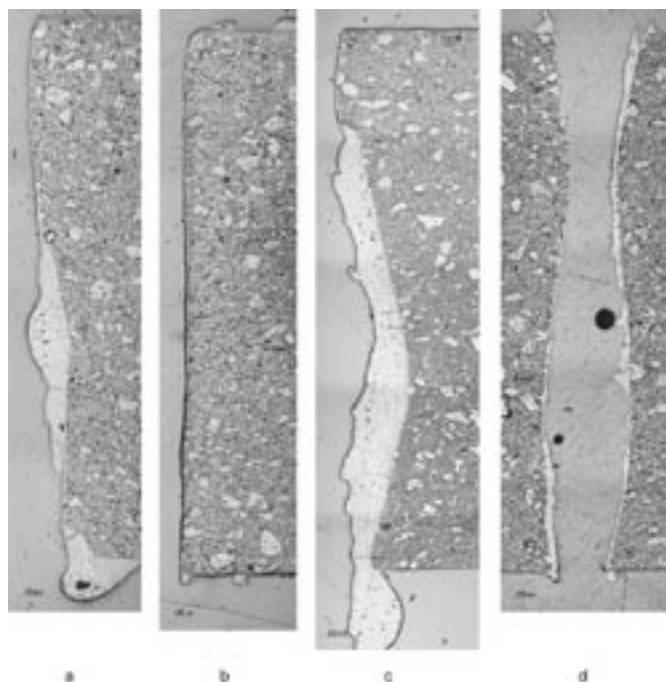


Fig. 6.- Micrográficas en sección transversal de cuatro muestras representativas de la apariencia típica de la ZAT para las distintas condiciones de operación: a) corte con láser de CO<sub>2</sub> empleando el cabezal convencional; b) corte con láser de CO<sub>2</sub> empleando el cabezal no coaxial; c) corte con láser de Nd:YAG empleando el cabezal convencional; d) corte con láser de Nd:YAG empleando el cabezal no coaxial.

500 μm. Sin embargo, al procesar con las velocidades de corte más bajas existe una probabilidad mayor de que se generen microgrietas más largas. Una particularidad interesante de estas microgrietas reside en su aparición en torno a la esquina inferior del perfil del corte, rodeando la rebaba que suele aparecer en este punto, lo cual es debido a que esta zona está sometida a una concentración de tensiones que la convierte en una zona especialmente propicia a la fractura.

Los resultados de la medición de la extensión de la ZAT se presentan en la Figura 7 para los ensayos efectuados con el láser de CO<sub>2</sub> y en la Figura 8 para los correspondientes al láser de Nd:YAG. Del examen de estas gráficas se pueden inferir diversas conclusiones: En primer lugar, no existe una

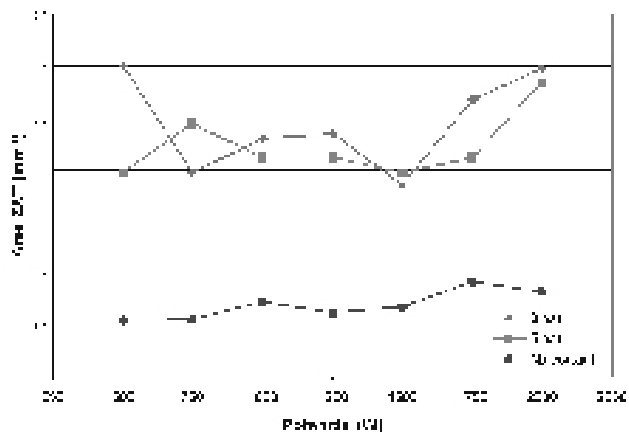


Fig. 7.- Extensión de la ZAT en función de la potencia del haz incidente para las series efectuadas con el láser de CO<sub>2</sub> con las distintas configuraciones del gas asistente.

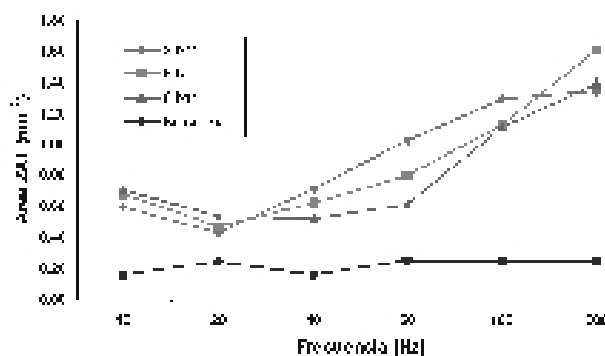


Fig. 8.- Extensión de la ZAT en los ensayos realizados con el láser de Nd:YAG expresados en función de la frecuencia de pulsado para los distintos valores de presión del gas asistente empleando el cabezal de corte convencional y para los resultados obtenidos con el cabezal no coaxial.

dependencia clara de la extensión de la ZAT respecto de la potencia del haz láser incidente en las series efectuadas con el láser de CO<sub>2</sub> utilizando el cabezal convencional. En segundo lugar, la gráfica de la Fig. 8 muestra la existencia de una notable influencia de la frecuencia de pulsado sobre el área de la ZAT al emplear el láser de Nd:YAG con el cabezal de corte convencional. En este caso, se revela un aumento de la extensión de la zona afectada térmicamente al incrementar la frecuencia de pulsado, produciéndose un mínimo a la frecuencia de 20 Hz. Este comportamiento puede estar directamente relacionado con los mecanismos de expulsión del material predominantes en cada caso, de manera que a la frecuencia de 20 Hz se alcanza el régimen de pulsado más eficiente.

Por otro lado, no se aprecia una influencia clara inducida por la presión del gas asistente al utilizar el cabezal convencional. Por el contrario, sí se manifiesta una notable reducción de la ZAT al utilizar el nuevo cabezal de corte. De hecho, la ZAT generada al emplear el nuevo cabezal es casi imperceptible en comparación con los casos restantes. Este valioso resultado es consecuencia de la optimización del sistema de inyección del gas asistente que logra evitar el desprendimiento del flujo en el interior de la ranura del corte, de manera que se consigue expulsar todo el material fundido sin que se forme la capa de material adherido característica de los ensayos efectuados con el cabezal convencional (18-19).

### 3.2.3. Comparación de los resultados con ambos láseres.

La comparación de los resultados experimentales expuestos en los apartados anteriores permite extraer algunas conclusiones generales de gran interés. En primer lugar, al comparar los resultados de las velocidades máximas de corte llama la atención la notable diferencia entre los resultados alcanzados al emplear el láser de CO<sub>2</sub> y el láser de Nd:YAG, puesto que, incluso para la misma potencia promedio, son mucho mayores las velocidades alcanzadas con el primero de los láseres, del orden de 4 veces el valor de las alcanzadas con el láser de Nd:YAG. La razón de este resultado reside en la diferencia entre las absorbancias de la radiación emitida por ambos láseres. Los valores de la potencia del láser indicados en los resultados de las velocidades máximas de corte son potencias incidentes sobre la muestra procesada, de manera que la potencia absorbida es el producto de este

valor por la absorbancia correspondiente, lo cual implica una gran diferencia entre las potencias resultantes. De hecho, las absorbancias de la mullita y de la alúmina para la longitud de onda emitida por el láser de Nd:YAG funcionando en el armónico fundamental son muy bajas en muestras puras y homogéneas, mucho más bajas que para la radiación del láser de CO<sub>2</sub>. No obstante, en las condiciones reales de corte existen diversos mecanismos que incrementan la absorción de esta radiación debido a la naturaleza heterogénea del material procesado y a las altas temperaturas alcanzadas en el volumen de interacción del haz láser con el material. A pesar de todo ello, la absorción de la radiación del láser de Nd:YAG todavía resulta muy inferior a la del láser de CO<sub>2</sub>. En consecuencia, las velocidades máximas de corte también son muy diferentes.

Por otro lado, otro fenómeno que puede incidir sobre esta diferencia es el modo de operación del láser. En efecto, en la comparación de los resultados de las velocidades máximas de corte con el láser de Nd:YAG operando con distintas frecuencias de pulsado, se ha comprobado que se alcanzan velocidades más elevadas al trabajar con frecuencias entre 20 y 50 Hz. La explicación que se ha propuesto para este fenómeno es la ocurrencia de un régimen de evaporación más enérgico al operar en el modo pulsado, lo cual implica una menor eficiencia del proceso, por tanto dicho efecto puede contribuir a la diferencia de velocidades máximas de corte obtenidas con el láser de CO<sub>2</sub> y con el de Nd:YAG.

La evaluación de la calidad de los cortes proporciona otras valiosas conclusiones. Los resultados de los anchos de corte y de las rugosidades presentados en las gráficas 3.a y 3.c, respectivamente, para las muestras procesadas con láser de CO<sub>2</sub>, con los de las gráficas 4.a y 4.c correspondientes al láser de Nd:YAG, permiten su fácil comparación. De este modo, puede apreciarse que los resultados de los anchos de corte obtenidos con el láser de CO<sub>2</sub> en modo continuo son más reducidos, especialmente al emplear bajas potencias, mientras que los resultados de la rugosidad son muy similares en ambos casos. Por otro lado, la utilización del cabezal de corte no coaxial proporciona los mejores valores independientemente del tipo de láser utilizado.

Las diferencias en los resultados determinados de la tolerancia de perpendicularidad son muy acusadas entre las muestras obtenidas con el láser de CO<sub>2</sub> y con el láser de Nd:YAG. Las causas principales de este efecto son, probablemente, las diferencias entre las longitudes de onda emitidas por cada láser y las distancias de focalización del haz láser empleadas en cada caso. De hecho, con el láser de Nd:YAG se empleó una lente de 80 mm de distancia focal, mientras que con el de CO<sub>2</sub> se utilizó un espejo cóncavo de 200 mm de distancia focal. Además, la longitud de onda de la radiación del láser de CO<sub>2</sub> es 10 veces la del de Nd:YAG. Ambas diferencias implican que la profundidad de foco sea mucho menor para el láser de Nd:YAG, al mismo tiempo que la divergencia del haz en el entorno del foco sea mayor en este caso. En consecuencia, es lógico que la desviación de la forma del perfil del corte sea mayor al emplear el láser de Nd:YAG. Por otro lado, al utilizar el cabezal no coaxial se obtienen valores notablemente más reducidos de la tolerancia de perpendicularidad que con el cabezal convencional, independientemente del láser empleado. Ciertamente, los valores mínimos se alcanzan al emplear el láser de CO<sub>2</sub> con el cabezal no coaxial.

Respecto a la extensión de la zona afectada térmicamente, la conclusión más evidente es que los valores obtenidos al utilizar el láser de Nd:YAG con el cabezal convencional son, en general, mayores que los correspondientes al empleo del

láser de CO<sub>2</sub>. Pero, indudablemente, el resultado más valioso es el derivado de la utilización del nuevo cabezal de corte, en este caso la magnitud de la extensión de la ZAT es mucho más reducida que en los anteriores, tanto con el láser de CO<sub>2</sub> en modo continuo como con el láser de Nd:YAG. Finalmente, los resultados óptimos se alcanzan con el nuevo cabezal en combinación con el láser de CO<sub>2</sub> en modo continuo.

#### 4. CONCLUSIONES

Se ha presentado un estudio detallado del corte con láser de placas de mullita-alúmina de 5 mm de espesor empleando parámetros cuantitativos para realizar una evaluación coherente de los resultados y facilitar su comparación. En este trabajo se ensayaron dos tipos de láseres: un láser de CO<sub>2</sub> y otro de Nd:YAG; así como dos tipos de sistemas de inyección del gas asistente: uno con un cabezal de corte convencional y otro con un nuevo cabezal no coaxial.

Como conclusiones generales de este trabajo se puede afirmar que resulta más recomendable la utilización del láser de CO<sub>2</sub> frente al de Nd:YAG, pues se alcanzan mayores velocidades de procesamiento, mejor rendimiento y mejores calidades de corte. Con la finalidad de evitar los efectos de la sobrecarga de energía que recibe la pieza procesada al emplear altas potencias es más recomendable el uso de potencias no superiores a los 1000 W. El modo de operación del láser preferible es el modo continuo para obtener los anchos de corte más reducidos, siempre y cuando esté acompañado de la selección de una distancia focal alta (200 mm) para reducir al mismo tiempo la tolerancia de perpendicularidad. Pero, indudablemente, el factor que más claramente optimiza la calidad de los cortes es la aplicación del nuevo cabezal con la tobera de Laval en la configuración no coaxial para inyectar el gas asistente, ya que este elemento consigue mejorar todas y cada una de las características de calidad analizadas.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por la Unión Europea y el Gobierno español (FEDER / CICYT, 1FD97-1557). Los autores quieren agradecer el apoyo del Sr. Marcos Lomba de IKF España, S.A. (antes José A. Lomba Camiña, S.A.) quien proporcionó las muestras y aportó una inestimable ayuda en la caracterización de los resultados. Xunta de Galicia (INFRA 94-68 y PR405A2002/11-0).

#### BIBLIOGRAFÍA

1. L. Migliore, "Laser cutting of metals", pp. 437-439 en LIA Handbook of laser materials processing, Ed. J.F. Ready y D.F. Farson, Laser Institute of America, Magnolia Publishing, 2001.
2. R.P. Smith, R. P. Surprenant y D.A. Kaminski, "Fracture characteristics of an aluminum oxide ceramic during continuous wave carbon dioxide laser cutting", Proceeding of ICALEO'91, Laser Materials Processing, SPIE 1722, 337-347, 1991.
3. H.K. Tönshoff y M. Gonschior, "Ceramics processing with laser radiation", Proceeding of ICALEO'93, Laser Materials Processing, SPIE 2306, pp. 507-517, 1993.
4. A.J. Murray y J.R. Tyrer, "New numerical evaluation techniques for laser processed ceramic substrates", J. Laser Appl., 12, 251-260, 2000.
5. I. Black, "Experimental detection of micro-cracks during the CO<sub>2</sub> laser machining of ceramics", Laser Eng., 11, 29-45, 2001.
6. M.F. Modest and T.M. Mallison, "Transient elastic thermal stress development during laser scribing of ceramics" J. Heat Transf.-Trans. ASME, 123, 171-177, 2001.



7. H.K. Tönshoff and M. Gonschior, "Reduction of crack damage in laser cutting of ceramics", Proc. Laser in Advanced Processing, LAMP 92, Nagaoka, Japan, 1992.
8. A. J. Murray and J. R. Tyrer, "Nd:YAG laser cutting and drilling of PSTZ - Influence of substrate heating temperature on recast layer microcracking", J. Laser Appl., vol. 11, n° 3, pp. 128-135, 1999.
9. J. Pascual-Cosp, A.J. Ramírez del Valle, J. García-Forteza, P.J. Sánchez-Soto, "Laser cutting of high-vitrified ceramic materials: development of a method using a Nd:YAG laser to avoid catastrophic breakdown", Mater. Lett., 55, 274-280, 2002.
10. J. Pascual-Cosp, A.J. Ramírez del Valle, J. García-Forteza y P.J. Sánchez-Soto, "Evolución térmica de un material cerámico procesado con un láser de Nd:YAG", Bol. Soc. Esp. Ceram. V.40, [5], pp. 369-376, (2001).
11. M.F. Modest, "Minimization of elastic thermal stresses during laser machining of ceramics using a dual-beam arrangement", J. Laser Appl., vol. 13, n° 3, (2001), pp. 111-117.
12. S.A.J. Livingstone, K.L. Chua, and I. Black, "Experimental Development of a Machining Database for the CO2 Laser Cutting of Ceramic Tile", J. Laser Appl., 9, 233-241, 1997.
13. Lei Hong, Lijun Li y Chunlei Ju, "Investigation of cutting of engineering ceramics with Q-switched pulse CO2 laser", Opt. Lasers Eng., 38, 279-289, 2002.
14. F. Quintero, N. Louzán, J. Pou, F. Lusquiños, M. Boutinguiza, R. Soto y M. Pérez-Amor, "Single-Pass and Multi-Pass Laser Cutting of Silicon-Silicon Carbide (Si-SiC)", Proceedings de ICALEO 2003, Laser Materials Processing, Laser Institute of America vol. 95, Section D, pp. 108-115, 2003.
15. C. Durand, M. Ramulu, R. ST. Pierre y J. Machan, "An experimental analysis of a Nd:YAG laser cutting process for machining silicon nitride", Int. J. Prod. Res., vol. 34, n° 5, pp. 1417-1428, (1996).
16. X. Chen y X. Liu, "Short pulsed laser machining: How short is short enough?", J. Laser Appl., vol. 11, n° 6, pp. 268-272, 1999.
17. P. Moreno, C. Mendez, A. García, I. Arias, E. Conejero y L. Roso, "Micromecanizado de materiales cerámicos mediante láser de femtosegundo", Bol. Soc. Esp. Ceram. V., 44, [1], 9-12, (2005).
18. F. Quintero, J. Pou, F. Lusquiños, M. Boutinguiza, R. Soto, M. Pérez-Amor, "The influence of the gas flow on the Nd:YAG laser cutting of mullite-alumina". Proceedings of ICALEO 2000, Laser Materials Processing, Laser Institute of America vol. 89, Section B, pp. 153-162, 2000.
19. F. Quintero, J. Pou, F. Lusquiños, M. Boutinguiza, R. Soto y M. Pérez-Amor, "Comparative study of the influence of the gas injection system on the Nd:yttrium-aluminum-garnet laser cutting of advanced oxide ceramics", Rev. Sci. Instrum., Vol. 74, 4199-4205, 2003.
20. F. Quintero, J. Pou, F. Lusquiños, M. Boutinguiza, R. Soto y M. Pérez-Amor, "Quantitative evaluation of the quality of cuts performed on mullite-alumina by Nd:YAG laser", Opt. Lasers Eng., 42, 327, 2004.
21. F. Quintero, Procesamiento de cerámicas avanzadas mediante láser. Análisis de los procesos físicos involucrados en el corte por fusión. Tesis doctoral. Universidad de Vigo. 2004.
22. A.F.H. Kaplan, "An analytical model of metal cutting with a laser beam", J. Appl. Phys., vol. 79, pp. 2198-2208, 1996.
23. F. Quintero, F. Varas, J. Pou, F. Lusquiños, M. Boutinguiza, R. Soto y M. Pérez-Amor, "Theoretical analysis of material removal mechanisms in pulsed laser fusion cutting of ceramics", J. Phys. D-Appl. Phys., Vol. 38, 655-666, 2005.

Recibido: 01.04.05

Aceptado: 26.08.05

