

17
2ej



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**

**“LASER DE CO₂ Y SU APLICACION
AL CORTE DE MATERIALES”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A:
ISAAC FRANCISCO DUEÑAS HERRERA

Asesor: I.M.E. Juan Manuel Torres Merino

2011-11-10

Cuautitlán Izcalli, Edo. de Méx.

1999

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

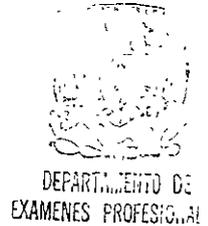
El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



REPUBLICA FEDERAL DE MEXICO
UNIDAD NACIONAL
AVANZADA DE
MEXICO

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES
ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA F.E.S.-CUAUTITLAN
P R E S E N T E .

AT'N: Q. María del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la F.E.S.-C

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el :

trabajo de tesis: "LASER de CO2 y su Aplicación al Corte de
Materiales".

que presenta el pasante: Isaac Francisco Dueñas Herrera ,
con número de cuenta: 8831056-1 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista .

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

A T E N T A M E N T E .
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautilán Izcalli, Edo. de México, a 10 de Marzo de 199 8

PRESIDENTE	Ing. <u>José Juan Contreras Espinosa</u>	
VOCAL	Ing. <u>Ramón Osorio Galicia</u>	
SECRETARIO	Ing. <u>Juan Manuel Torres Merino</u>	
PRIMER SUPLENTE	Ing. <u>Felipe Díaz del Castillo Rodríguez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	Ing. <u>Emilio Juárez Martínez</u>	

Agradezco...

• *¿ Mi mamá, donde quiera que se encuentre, por haberse esforzado más allá de sus medios para alentarme siempre, con amor incondicional.*

• *¿ Mi papá, por ayudarme más lejos de su deber y ser esa roca firme de apoyo cuando más lo necesito.*

• *¿ Coco, por su cariño de hermana y ayudarme a encontrar con su optimismo el lado bueno de las cosas.*

• *¿ Pablo, por ser un ejemplo de hermano y enseñarme con hechos que todo se consigue si se lucha por ello.*

• *¿ Leticia, por mostrarme como vencer las peores dificultades, por su gran amor y apoyo constante, y por la seguridad de un futuro feliz.*

• *¿ Siloia y a Nacho, por ser los mejores cuñados que pude haber tenido; ejemplos de fidelidad y entrega.*

• *¿ Ceci, Diana, Isaïd y Omar, por todos los buenos momentos que hemos pasado; contrastantes y plenos, como ellos son.*

• *¿ Glispa, porque en su ingenuidad e inocencia me enseña cómo se es feliz.*

Mi agradecimiento además:

A mis amigos Silvia, Rafael, Raymundo, Rodolfo, Hugo, Gabriela y Lucía, por su paciencia y apoyo.

A Juan Manuel Torres Merino, mi asesor de Tesis, porque sin su consejo no habría podido realizar este trabajo.

A todos los profesores de la Facultad que, dentro o fuera de las aulas, nos ayudan a ser mejores personas.

ÍNDICE

Contenido	Página
INTRODUCCIÓN	iv
CAPÍTULO 1. NATURALEZA DEL LASER DE CO ₂ .	
1.1. Introducción	1
1.2. Constitución Física del LASER de CO ₂	1
1.3. Principios y Fundamentos del Efecto LASER	4
1.4. Funcionamiento del LASER de CO ₂	12
CAPÍTULO 2. EQUIPOS INDUSTRIALES DE LASER DE CO ₂ .	
2.1. Introducción	26
2.2. Características de los Equipos Industriales de LASER de CO ₂	26
2.3. Sistemas LASER	43
2.4. Consideraciones de Seguridad para el Manejo de los LASER's de CO ₂	52
CAPÍTULO 3. GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA.	
3.1. Introducción	57
3.2. Aspectos de los Procesos de Maquinado.....	57

CAPÍTULO 4. INTRODUCCIÓN AL MAQUINADO LASER.

4.1. Introducción.	70
4.2. Maquinado LASER como un Proceso Uni, Bi y Tridimensional.	70

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DEL MAQUINADO LASER.

5.1. Introducción.	80
5.2. Modelado del Proceso LASER.	82

CAPÍTULO 6. APLICACIONES DEL MAQUINADO CON LASER DE CO₂.

6.1. Introducción.	100
6.2. Metales.	101
6.3. Cerámicos.	115
6.4. Plásticos.	122
6.5. Materiales Compuestos.	126
6.6. Otros Materiales.	133

CONCLUSIONES.	137
--------------------	-----

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.	138
------------------------------	-----

INTRODUCCIÓN.

La palabra "LASER" es un acrónimo formado con las iniciales de la definición inglesa a que este concepto remite: **amplificación de luz por emisión estimulada de radiación**. La amplificación lumínica genera una cascada de fotones (cuantos de radiación electromagnética en un haz estrecho). Desde los días de su invención en la década de los 50's, se pensó ya en aprovechar los intensos haces de LASER para aportar grandes cantidades de energía a los materiales en procesos industriales. La idea se ha convertido en una técnica desarrollada. A lo largo de los últimos quince años, los LASER's de alta potencia se han venido aplicando a múltiples procesos de fabricación y conformado: soldadura de componentes de automóviles, sistemas electrónicos e instrumentos utilizados en medicina y cirugía, tratamiento térmico de partes de automóviles y aviones para mejorar sus propiedades de superficie, corte de chapas de metal en la industria del estampado y matricería, y taladrado de pequeños orificios de refrigeración. En todas esas operaciones los LASER's han mejorado el rendimiento de las líneas de producción y han reducido los costos.

¿Qué misión cumple el LASER en la fabricación? Sirve, sobre todo, como herramienta adoptada para aplicar un flujo de energía sumamente elevado a la superficie de la pieza a trabajar. En este sentido, aventaja con distancia a otras fuentes de energía. Se puede concretar esta ganancia: se obtienen productos de gran calidad (mejores características y menor número de piezas rechazadas o que precisen reparación), se reducen medios para materiales y servicios, se consigue una elevada productividad (mengua el espacio necesario en la planta y bajan los costos de amortización) y se alcanza un mejor ambiente de trabajo, sin olvidar la flexibilidad y versatilidad del LASER y de los sistemas de producción que se fundan en él.

Desde las primeras observaciones de la acción del LASER de CO_2 , realizadas por Patel en 1964, se ha producido un gran avance en la investigación y desarrollo de dispositivos LASER basados en las transiciones de las moléculas de este gas. En la actualidad, los LASER's de CO_2 pueden considerarse dentro de los dos o tres grupos de LASER's con mayor número de aplicaciones y con más incidencia y ventas en el mercado. Las razones de esta evolución tan positiva son, por un lado, su alto rendimiento energético, que en muchas ocasiones supera el 20% de la energía de bombeo; y por otro lado su característica longitud de onda de emisión, entre 9.4 y 10.6 μm , es decir, en el infrarrojo medio donde gran cantidad de materiales absorben fuertemente la radiación. Además se da el caso de que la atmosfera se comporta de forma transparente y apenas debilita la radiación. El LASER de CO_2 es

sin ninguna duda el más utilizado en procesos industriales.

El haz emitido por un LASER de gas tiene una colimación casi total, lo que significa que presenta escasa divergencia, en contraste con la que caracteriza, por ejemplo, al haz luminoso de un flash. El haz puede concentrarse, pues, en un punto (cuyo tamaño varía entre unos cuantos micrómetros y una fracción de milímetro) y suministrarle una energía de gran intensidad.

En favor del LASER opera que la energía calorífica se mantiene y realiza su función en la zona donde hay que trabajar, por cuya razón se consigue un elevado rendimiento energético, cifrado en 10 a 1000 veces superior al de los sistemas convencionales que calientan volúmenes de pieza a trabajar mucho mayores en comparación. Los sistemas LASER, resumiendo, aceleran el ritmo del proceso en una proporción notable y aportan a la fabricación propiedades únicas.

Otra cualidad del LASER es la de no dañar el resto de la pieza: aporta el calor en un tiempo más breve que cualquier fuente convencional, merced a la elevada densidad de potencia del haz, y, por tanto, el calor no tiene tiempo de transmitirse hacia el interior de la pieza en cuestión. Las fuentes de calor convencionales calientan ésta más allá de la zona necesaria, lo que redundará en una distorsión, agrietamiento y tensión inducidos que pueden alterar la pieza hasta el punto de hacer obligada su reparación o exponerse a su funcionamiento defectuoso. Las implicaciones económicas son obvias en piezas costosas semielaboradas.

¿De donde nacen todas estas ventajas? De la elevadísima densidad de potencia que posee el haz LASER. A través del desarrollo de este trabajo se verán otras posibilidades suyas que lo convierten en una herramienta de suma flexibilidad. Al carecer de masa, puede ser fácilmente desplazarlo y controlarlo con breves intervalos de respuesta. Se acopla sin dificultad a procesos automáticos. Actúa a distancia, salvando o reduciendo los problemas que plantea la interferencia mecánica. Por la misma razón, no genera respuestas mecánicas, razón por la cual la pieza ni vibra ni necesita ser sujeta. Por último, la tecnología LASER actúa con suma pulcritud y rapidez compatible con los puestos de trabajo en las líneas de fabricación. A modo de compendio de lo dicho: la tecnología LASER incide en la logística y conjunción del sistema de producción industrial.

En el corte (o maquinado, en un mayor sentido de la palabra) con una herramienta LASER requiere relativamente poca energía, ya que todo lo que se precisa es llevar al material al estado de fusión. Se elimina luego el líquido por un chorro de gas de cobertura. El gas puede ser oxígeno o nitrógeno, si el efecto oxidante o nitrurante (que pueden tornar la superficie del material frágil o más dura de lo deseada, disminuyendo su resistencia a la corrosión) no actúa de una forma condicionante. El oxígeno aumenta en varias veces la velocidad de corte por su reacción exotérmica con la mayoría de los metales a elevada temperatura. De este modo, pueden

cortarse los aceros altos en carbono y las aleaciones de titanio, ya que los productos de la reacción son sólidos y los elimina fácilmente el chorro de gas.

El haz LASER aplicado al proceso de corte o maquinado puede seguir pautas muy complejas, comenzando, según se exija, por el borde o por el interior de la chapa de material. Cortes de este tipo son muy difíciles, si no imposibles, a las herramientas mecánicas, como los discos abrasivos de diamante que suelen ser los únicos capaces de atacar los materiales duros. Parece acertado, pues, pensar en los LASER's.

Guiada por un programa automatizado, la herramienta LASER de corte puede mejorar gradualmente la precisión, repetibilidad, flexibilidad y productividad. Y el efecto combinado de esos avances en los esquemas de producción elevará el rendimiento de la fabricación de ocho a veinte veces más, según afirman los cálculos realizados al respecto. Los sistemas LASER suman más ventajas: ausencia de vibración, ruido y polvo, reducción de humos; y hacen innecesaria la compra, almacenamiento y mantenimiento de cabezales de corte varios y con frecuencia caros.

Tomadas en conjunto, estas razones abonan viabilidad del costo de las herramientas LASER, a pesar de la cara inversión inicial, cifrada en dos a cinco veces de lo que valen los sistemas de corte convencionales. En un año, poco más o menos, se amortiza el costo de las herramientas LASER, lo que explica su rápida generalización a un gran número de aplicaciones de corte. Se calcula que cada año se instalan más de cien sistemas de corte LASER en todo el mundo, que trabajan en un rango de potencia entre los 400 y 2000 watt.

Los plásticos constituyen uno de los campos con mayor aplicación del maquinado de materiales no metálicos por LASER. Absorben la radiación procedente de un LASER de CO_2 en un porcentaje muy elevado, cercano al 100%.

A modo de cierre de esta introducción se resumen las ventajas que representa el uso de una herramienta de corte o maquinado con la tecnología del LASER de CO_2 .

- No requiere electrodo.
- No existe contacto directo entre pieza y herramienta.
- Pueden maquinarse y soldarse materiales transparentes.
- Es aplicable al maquinado de áreas con escaso acceso.
- Funde y evapora cualquier material conocido.
- Suelda fácilmente materiales disímiles.
- Facilita el maquinado de materiales refractarios.

- Pueden maquinarse materiales no metálicos muy duros.
- Suelta y maquina en cualquier condición atmosférica.
- Las zonas afectadas por el calor son despreciables.
- Pueden maquinarse agujeros extremadamente pequeños y soldarse con precisión longitudes muy cortas.
- Fácil control de la configuración del haz y medidas del área expuesta al mismo.
- Existe mínimo desperdicio de material.
- Poco tiempo en la preparación.
- No hay desgaste o necesidad de reemplazar herramientas de corte. Esta ventaja es muy importante en el caso de materiales duros.

En el trabajo que se desarrolla a continuación se hace un estudio de la física del LASER de CO_2 , los tipos de LASER´s de esta clase que se encuentran en el mercado, el corte de materiales por los medios tradicionales y por medio del LASER de CO_2 , y ejemplos de aplicación; además se presentan algunas técnicas novedosas de corte con LASER. Por corte de materiales debe entenderse su maquinado; es hasta el capítulo 4 donde se estudia como corte exclusivamente el maquinado LASER bidimensional.

NATURALEZA DEL LASER DE CO₂.

De la diversidad de los LASER´s existentes hoy en día, se ha seleccionado el LASER de bióxido de carbono para el desarrollo de este estudio.

1.1. Introducción.

El LASER de CO₂ es uno de los más versátiles tipos de este dispositivo en el mercado. Emite radiación dentro del espectro infrarrojo de 10.6μm (en parte benéfica e inconveniente para el corte, dependiendo del tipo de material), y el rango de potencias va desde 1W hasta cientos de KW. Esta versatilidad proviene del hecho de que existen varias clases distintas de LASER´s de CO₂, que si bien, comparten el mismo medio activo, presentan importantes diferencias, tanto en su estructura interna como en su funcionamiento.

LASER molecular, tiene un medio activo no sólo conteniendo CO₂, sino también porciones de nitrógeno (N₂) y helio (He), componentes importantes para llevar a cabo la excitación y desexcitación respectivamente de la molécula de bióxido de carbono.

Es de capital importancia además el tratamiento del haz "en bruto" producido en la cavidad, con el fin de adecuarlo como herramienta para el corte de materiales. Las transformaciones más comunes son aquellas que ocurren cuando el haz se propaga a través del espacio o a través de un sistema óptico, el cambio se produce en la distribución de potencia o forma del haz, así como sobre su comportamiento temporal.

1.2. Constitución física del LASER de CO₂.

Para la generación de un haz LASER se requiere de ciertos elementos básicos, mismos que se muestran en la figura 1.1.

- Un medio que contenga átomos o moléculas que puedan ser excitados y llevar a cabo la acción LASER.
- Una fuente de energía para llevar a los átomos o moléculas al nivel elevado de excitación

- Dos espejos, formando una celda óptica que confina al medio, uno de los cuales es una ventana parcialmente reflejante, a través de la cuál se colima el rayo hacia el exterior.

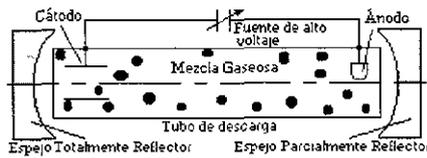


Figura 1.1 Esquema de los elementos básicos de un LASER de CO₂.

- Un sistema óptico de enfoque para lograr transformaciones específicas del rayo.
- Equipo para proporcionar desplazamiento relativo entre pieza de trabajo y rayo.

Estos elementos son comunes a todos los tipos de LASER's, pero en cada uno presentan características muy diferentes. Tal es el caso del LASER de CO₂.

1.2.a. El medio.

El medio activo en el LASER de CO₂ es una mezcla de tres gases, los cuales requiere para operar con una potencia elevada: bióxido de carbono, nitrógeno y helio. El gas básico, ya que provee la acción molecular necesaria para llevar a cabo las transiciones LASER en los niveles energéticos, es el bióxido de carbono. El nitrógeno, gas inerte, mantiene la fuerza y la acción molecular. A causa del calor generado al actuar el rayo, la temperatura se eleva tanto que podría fundir la estructura que confina el medio, por eso, se agrega helio a la mezcla como agente de enfriamiento. La proporción más utilizada de estos gases entre los LASER's comerciales está compuesta por 5% de CO₂, 15% de N₂ y 80% de He [3]. Esta mezcla es bombeada continuamente a través del medio para mantener la acción del haz. Así, se consigue aumentar la eficacia de la acción LASER al evitar la degradación progresiva de la mezcla; sin embargo, el consumo de gas es un factor de cambios frecuentes en el costo.

1.2.b. La fuente de energía.

Para lograr las condiciones aptas de funcionamiento de un LASER, es necesario algún dispositivo que proporcione la energía al sistema de generación. Este dispositivo recibe el nombre de sistema de bombeo, y puede ser de varios tipos, aunque los más usuales son el de tipo óptico y el de tipo eléctrico. En el primer caso el bombeo se realiza mediante lámparas de flash muy intensas para excitar las moléculas del medio activo: un sólido. En el

caso de los LASER's de gas, dentro de los cuales cae el de CO₂, el bombeo es eléctrico; el segundo tipo. Dentro de este sistema se produce una intensa descarga eléctrica a través de los átomos que se encuentran en la cavidad amplificadora. De este modo, los energéticos electrones de las descarga transfieren por colisiones electrón-átomo parte de su energía a los átomos contenidos en la cavidad, logrando que éstos pasen de su estado base a un estado excitado. La figura 1.2 muestra la sección transversal de un amplificador óptico bombeado eléctricamente usando un cañón de electrones.

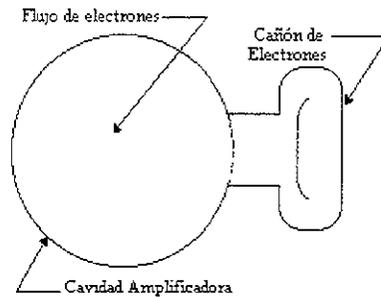


Figura 1.2. Sección transversal de un amplificador óptico bombardeado eléctricamente con un cañón de electrones.

1.2.c. La cavidad.

La cavidad mencionada en el párrafo anterior está compuesta por varios elementos: un tubo, que puede estar sellado o no, el cual contiene la mezcla de gases necesarios para la operación del LASER; y dos espejos planos o esféricos coaxiales, de un alto coeficiente de reflexión, colocados uno frente al otro y denominados en conjunto resonador. Uno de estos espejos es 100% reflector para 10.6 micrómetros, mientras que el otro refleja sólo una porción determinada de la luz, por ejemplo, 85%. Una fracción de energía radiante (15% en el ejemplo), se transmite a través del espejo parcialmente transparente, siendo este el haz LASER que se emite [6]. Los fotones que oscilan de un extremo a otro del resonador son energía electromagnética que forma un campo electromagnético intenso. La forma de este campo depende de factores como la magnitud de onda de los fotones, la alineación, la curvatura y distancia entre los espejos y el diámetro interior del tubo LASER, denominado generalmente como "tubo de descarga" en un LASER a gas. Transversalmente este campo puede tener formas diferentes, que se denominan modos electromagnéticos transversales (TEM), pero únicamente ciertos modos o combinaciones de ellos son útiles para trabajar materiales. Este tema se tratará ampliamente más adelante.

1.2.d. El sistema óptico de enfoque.

Antes de poder ser usado, un haz LASER sufre generalmente alguna transformación. Una de las propiedades más

importantes del LASER desde el punto de vista de su aplicación al tratamiento de materiales es la coherencia del haz (emisión de rayos paralelos). Gracias a ésta puede enfocarse toda su potencia emitida y concentrarla en un área minúscula, consiguiéndose así densidades de potencia muy elevadas. Para aprovechar a fondo las posibilidades que ofrece este haz, su dirigibilidad y enfoque, se utilizan diversos componentes ópticos. Entre los más utilizados encontramos lentes, espejos y láminas semitransparentes. También suelen utilizarse otros elementos tales como redes de difracción, polarizadores y dispositivos no lineales. Es de mencionarse también la importancia que para la industria del LASER tiene la óptica de multicapas. La base de la misma consiste en la deposición de sucesivas capas delgadas, del orden de la longitud de onda, sobre los substratos adecuados, mediante la tecnología del alto vacío.

1.2.e. El equipo de posicionamiento.

Para llevar a cabo el maquinado de materiales, un elemento imprescindible en el sistema LASER es el equipo para proporcionar desplazamiento relativo entre la pieza y el haz. Los diferentes sistemas, basados en el desarrollo de la robótica, incorporan una fuente de haz LASER y una mesa de coordenadas gobernadas por control numérico o bien un robot, para conseguir ese movimiento relativo entre la pieza y el haz. Esto puede lograrse de dos formas:

- Moviendo la pieza manteniendo el haz fijo.
- Moviendo el haz manteniendo la pieza fija.

Esta última opción presenta a su vez dos posibilidades: La primera consiste en mover todo el cabezal LASER por encima de la superficie a procesar, lo que requiere un sistema sólido de soporte para el LASER y se va convirtiendo paulatinamente en inviable a medida que aumenta su potencia y por consiguiente el peso del cabezal. La segunda opción consiste en mover un sistema óptico de entrega del haz hasta el punto de trabajo. Consiste en un conjunto de espejos deflectores colocados a 45°, de modo que el haz reflejado por cada espejo forma un ángulo de 90° con el haz incidente. Con un sistema de tan sólo dos espejos puede cubrirse cualquier zona sobre un plano.

1.3. Principios y fundamentos del efecto LASER.

Ahora se estudiara el trabajo que realiza internamente un dispositivo LASER de CO₂. La emisión del haz se logra gracias a ciertos fenómenos que ocurren dentro de los niveles energéticos que componen los átomos de la

molécula de dióxido de carbono. Estos fenómenos se tratan a continuación.

El LASER es una luz. Una luz a la que se le ha dado un tratamiento especial para crear sus características particulares, pero después de todo, no es posible estudiar a fondo el fenómeno LASER pasando por alto el comportamiento y la naturaleza de la luz, la cual no constituye el fenómeno natural más fácil de describir. Durante muchos siglos los científicos han debatido y demostrado la naturaleza de la luz. De hecho, para explicar por completo las propiedades del LASER se requiere la adopción de dos modelos de comportamiento diferentes: el modelo ondulatorio o de onda electromagnética y el modelo corpuscular o cuántico [14].

1.3.a. Teoría electromagnética y ecuaciones de Maxwell.

El suceso más importante relacionado con la teoría de la luz fue el trabajo realizado por James Clerk Maxwell, quien en 1873 demostró que la luz era una forma de ondas electromagnéticas de alta frecuencia. En 1887 Heinrich Hertz demostró que estas ondas exhibían todos los efectos característicos de las ondas de luz, como refracción, reflexión, polarización, etc.

Las leyes fundamentales que rigen el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos son las ecuaciones de Maxwell. En esta teoría unificada del electromagnetismo, Maxwell demostró que las ondas electromagnéticas son una consecuencia natural de estas leyes fundamentales. Por simplicidad, las ecuaciones de Maxwell se presentan aplicadas en el espacio libre. Las cuatro ecuaciones son:

$$\oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{A} = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (1.1)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = 0 \quad (1.2)$$

$$\oint \mathbf{I} \cdot d\mathbf{s} = \frac{d\phi_m}{dt} \quad (1.3)$$

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = \mu_0 \mathbf{I} + \epsilon_0 \mu_0 \frac{d\phi_e}{dt} \quad (1.4)$$

La ecuación 1.1 es la ley de Gauss, la cual establece que el flujo eléctrico total a través de cualquier superficie cerrada es igual a la carga neta de esa superficie dividida por la constante ϵ_0 , permitividad del espacio. Esta ley relaciona el campo eléctrico con la distribución de carga, donde las líneas del campo eléctrico se originan en las cargas positivas y terminan en las negativas.

La ecuación 1.2 puede considerarse como la ley de Gauss del magnetismo, establece que el flujo

magnético total a través de una superficie cerrada es cero. Es decir, el número de líneas del campo magnético que entran a un volumen cerrado debe ser igual al número de líneas que abandonen este volumen. Esto implica que las líneas del campo magnético son cerradas.

La ecuación 1.3 es la ley de Faraday de la inducción, la cual describe la interrelación entre un campo eléctrico y un flujo magnético variable. Esta ley enuncia que la integral de línea del campo eléctrico alrededor de cualquier trayectoria cerrada (la cual es igual a la FEM) es igual a la razón de variación del flujo magnético a través de cualquier área superficial limitada por esa trayectoria.

La ecuación 1.4 es la forma generalizada de la ley de Ampere, la cual describe la relación entre los campos eléctrico y magnético y las corrientes eléctricas. Es decir, la integral de línea del campo magnético alrededor de cualquier trayectoria cerrada se determina mediante la suma de la corriente de conducción neta a través de esa trayectoria, y la razón de la variación del flujo eléctrico a través de cualquier superficie limitada por esa trayectoria.

La onda electromagnética es una onda plana, viaja en una sola dirección, la dirección x (de propagación), el campo eléctrico E está en dirección y , y el campo magnético B en la dirección z , como se muestra en la figura 1.3

Las ondas de los campos eléctrico y magnético son ondas polarizadas linealmente. Además se supondrá que E y B en cualquier punto P dependen de x y t y no de las coordenadas y , z .

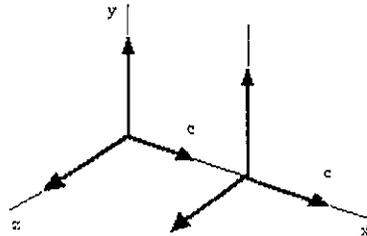


Fig 1.3. Onda electromagnética mostrando el campo eléctrico E y el magnético B .

Relación entre los campos eléctrico y magnético. Se puede establecer una relación entre E y B utilizando, la tercera y cuarta ecuaciones de Maxwell [13]. Así,

$$\frac{\partial B}{\partial x} = -\mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial E}{\partial t} \tag{1.5}$$

Velocidad de las ondas electromagnéticas. Campos eléctricos y magnéticos

senoidales. La solución más simple de una onda plana es una onda senoidal, para la cual las amplitudes de los campos E y B varían con x y t conforme a las expresiones

$$E = E_m \cos(kx - \omega t) \quad (1.6)$$

$$B = B_m \cos(kx - \omega t) \quad (1.7)$$

donde:

E_m, B_m = valores máximos de los campos.

$$k = 2\pi / \lambda$$

λ = longitud de onda.

$$\omega = 2\pi f$$

f = número de ciclos por segundo.

La relación ω / k es igual a la velocidad c , puesto que

$$\frac{\omega}{k} = \frac{2\pi f}{\frac{2\pi}{\lambda}} = \lambda f = c \quad (1.8)$$

La figura 1.4 es una representación gráfica en algún instante de una onda plana senoidal, polarizada linealmente, que se propaga en la dirección positiva x .

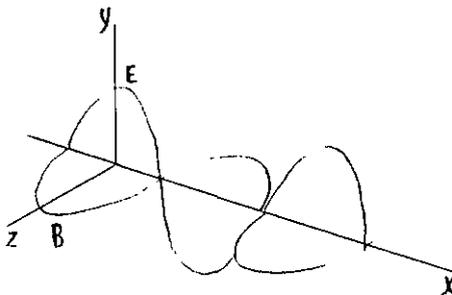


Figura 1.4. Onda plana senoidal polarizada linealmente propagándose en la dirección x

Si se toman las derivadas parciales de las ecuaciones (1.6) y (1.7) se encuentra que

$$\frac{\partial E}{\partial x} = -k E_m \sin(kx - \omega t) \quad (1.9)$$

$$-\frac{\partial B}{\partial t} = \omega B_m \sin(kx - \omega t) \quad (1.10)$$

Puesto que deben ser iguales [17], se encuentra que en cualquier instante

$$kE_m = \omega B_m, \quad \frac{E_m}{B_m} = \frac{\omega}{k} = c \quad (1.11)$$

Se omite el signo menos, ya que el interés está dirigido hacia la comparación de los valores absolutos de las amplitudes. Se utilizan estos resultados junto con las ecuaciones (1.6) y (1.7) y se observa que

$$\frac{E_m}{B_m} = \frac{E}{B} = c \quad (1.12)$$

Es decir, en cualquier instante, la relación del campo eléctrico al campo magnético, de una onda electromagnética, es igual a la velocidad de la luz.

1.4.b. El proceso de la emisión estimulada.

El efecto fotoeléctrico. Aunque la teoría clásica del electromagnetismo fue capaz de explicar la mayoría de las propiedades conocidas de la luz, descubrimientos posteriores demostraron ciertas lagunas. El suceso experimental más contundente que no concuerda con esta teoría es el efecto fotoeléctrico, también descubierto por Hertz. El efecto fotoeléctrico es la expulsión de electrones de un metal cuya superficie se expone a la luz. El efecto fotoeléctrico ocurre entre la luz y la materia cuando se encuentran un electrón y un fotón: el electrón absorbe al fotón adquiriendo su energía. Si la energía $h\nu$ del fotón es mayor a la función de trabajo del material, el electrón, después de absorber al fotón, posee suficiente energía para escapar de la superficie. Hertz demostró que una chispa saltaba más fácilmente en el espacio interelectrónico de dos cuerpos conductores cuando una de estas superficies recibía iluminación, siendo la luz ultravioleta más efectiva en este aspecto que la luz de mayor longitud de onda [13].

Una explicación más satisfactoria del efecto fotoeléctrico la dio Einstein en 1905, el mismo año en que publicó su teoría especial de la relatividad. En esta disertación, por la cual recibió el premio Nobel en 1921, Einstein extendió el concepto de Max Plank de la cuantización del campo electromagnético. Supuso que la energía de una onda de luz existe en la forma de paquetes discretos de energía, denominados corpúsculos o fotones; en consecuencia, se dice que la energía está cuantizada. Cada fotón posee una energía E , dada por

$$E = hf$$

donde h es la constante de Plank, $h = 6.63 \cdot 10^{-34}$ J·s. Por consiguiente, Einstein visualizó la luz como una corriente de partículas viajando por el espacio (en vez de ser una onda), donde cada partícula podía ser absorbida como una unidad por un electrón. Así nació el importante concepto de fotón, por medio del cual de

ahora en adelante se estudiarán los fenómenos que dan origen al LASER [14].

El átomo de Bohr y los fotones. El primer cambio en la concepción del átomo estuvo relacionado con la distribución de la carga positiva y fue desarrollado por Ernest Rutherford, el cual propuso un modelo nuclear para el átomo en el que la carga positiva y la mayor parte de la masa de éste se encuentra confinada en un núcleo pequeño, alrededor del cual, y a distancias grandes, giran los electrones con carga negativa. Sin embargo, este modelo presentaba ciertas dificultades: los electrones giran al rededor del núcleo, y como sus trayectorias son curvas están acelerados. Por lo tanto deben producir luz, como cualquier otra carga eléctrica acelerada. Así, puesto que la energía se conserva, la propia energía del electrón debe disminuir para compensar la que emite. En consecuencia, se esperaría que los electrones describieran una espiral hacia el núcleo, colapsándose al poco tiempo. De acuerdo con esto, el universo, tal como lo conocemos no podría existir [17].

En 1913, el científico Niels Bohr (1885-1963) propuso la primera explicación exitosa respecto los procesos atómicos. El modelo de Bohr del átomo tiene éxito en la descripción de los procesos atómicos. Una de las suposiciones fundamentales de este modelo es que el electrón sólo puede existir en órbitas discretas tales que el momento angular mvr sea un múltiplo entero de $h / 2\pi = \hbar$, donde h es la constante de Plank, es decir,

$$mvr = nh / 2\pi$$

Suponiendo órbitas circulares y una simple atracción coulombiana entre el electrón y el fotón, las energías de los estados cuánticos del hidrógeno están dadas por

$$E_n = -\frac{mk^2e^4}{2h^2} \left(\frac{1}{n^2} \right)$$

donde:

m = masa del electrón

k = constante de Coulomb

e = carga del electrón

n = entero denominado número cuántico

Si el electrón del átomo de hidrógeno realiza una transición de una órbita cuyo número cuántico sea n_1 , a otra con número cuántico n_2 , donde $n_1 < n_2$, el átomo emite un fotón cuya frecuencia es, para el hidrógeno,

$$\nu = \frac{mk^2e^4}{4\pi h^3} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

Utilizando $E = hf = hc / \lambda$ se pueden calcular las longitudes de onda de los fotones para varias transiciones, en las cuales haya un cambio en el número cuántico, $n - n_f$ [17]. Generalizando los principios hasta aquí expuestos, se llega al proceso de emisión LASER.

¿Cómo se produce la luz? Si un material tiene la propiedad de absorber energía, quienes realmente lo hacen son los átomos y moléculas de las cuales está formado. Éstos pueden existir en diversos niveles energéticos discretos. El estado fundamental o de energía inferior es donde más comúnmente se encuentran. Pasan a un *estado excitado* cuando absorben energía (luz, calor, reacción química, energía eléctrica, etc.), y entonces se encuentran en un nivel energético superior. Al hallarse así, el átomo o la molécula en forma espontánea tienden a retornar a su estado fundamental liberando la diferencia de energía. Este retorno puede o no ser directo, pasando por estados de desexcitación intermedios [3]. Para desexcitarse puede hacerlo de diversas maneras: transfiriendo la energía a otros átomos en una colisión o emitiéndola en forma de luz. Cada vez que se produce una desexcitación por emisión de luz se dice que se ha emitido un fotón [3].

Absorción. Se considera un átomo con muchos estados permitidos, representados por $E_1, E_2, E_3, \dots, E_n$. El estado E_1 se considera fundamental. Cuando incide la luz sobre un átomo, únicamente ciertos fotones interaccionan con el átomo y sólo aquellos fotones cuya energía hf es igual a la separación de energía ΔE entre los dos niveles pueden ser absorbidos. A este proceso se le denomina *emisión estimulada*. A temperaturas ordinarias, la mayoría de los átomos se encuentran en el estado fundamental. Si un medio que contiene muchas moléculas y átomos se ilumina con un haz de luz, caracterizado por un espectro continuo de frecuencias fotónicas, sólo aquellos fotones de energías $(E_2 - E_1), (E_3 - E_1), (E_4 - E_1)$, y así sucesivamente, podrán ser absorbidos. Como resultado de este proceso de absorción algunos átomos son promovidos a varios niveles de energía superiores, llamados *estados excitados* [17].

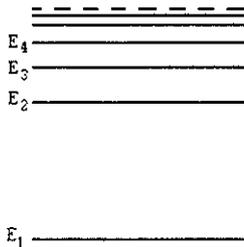


Figura 1.5. Diagrama de niveles de energía de un átomo con varios estados permitidos. El estado de menor energía, E_1 , es el estado base. Todos los otros son estados excitados

Emisión espontánea. Una vez que los átomos o moléculas se encuentran en un estado excitado, existe una cierta probabilidad por unidad de tiempo de que el electrón regresará a un nivel de energía inferior mediante la emisión de un fotón. En este caso el lapso de excitación es muy breve (de 10^{-7} a 10^{-10} seg.). Este fenómeno es responsable de la luz que emiten todas las fuentes "clásicas o convencionales", trátase de una flama, de una lámpara incandescente o del sol [6].

Emisión estimulada. Finalmente, hay un tercer proceso que tiene la mayor importancia para el LASER: el fenómeno de la *emisión inducida o estimulada*, y que fue descubierto por Albert Einstein en 1917. Si se encuentra un átomo en un estado excitado E_2 , e incide sobre él un fotón de energía $h_f = E_2 - E_1$, el electrón regresará a su estado fundamental emitiendo un segundo fotón de energía h_f , es decir, con las mismas características de dirección y de fase que el fotón inicial [1]. Estos fotones pueden a su vez estimular a otros átomos o moléculas para emitir fotones en una cadena de procesos similares. La multitud de fotones que se producen en esta forma constituyen la fuente para la intensa y coherente luz del LASER.

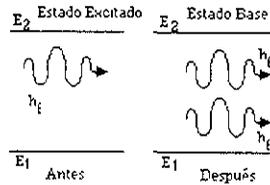


Figura 1.6. Diagrama representativo de la emisión estimulada de un fotón por un fotón incidente de energía hf . Inicialmente, el átomo se halla en estado excitado. El fotón incidente estimula al átomo a emitir un segundo fotón cuya energía es $hf = E_2 - E_1$.

Inversión de población. La absorción y la emisión estimulada son procesos igualmente probables. Normalmente la mayoría de los átomos de un medio están en su estado fundamental. Consecuentemente un fotón incidente con la energía adecuada interaccionará más probablemente con un átomo en el estado fundamental que con uno en el estado excitado, por tanto, es más probable que sea absorbido a que estimule una emisión. Es más, los posibles fotones estimulados por el fotón incidente serán reabsorbidos eficientemente por los átomos del medio que se encuentran en el mismo estado fundamental, por lo que la emisión estimulada compite con la absorción.

Para que la emisión estimulada domine y el medio presente amplificación LASER, se necesita que haya más átomos en el estado excitado que en el fundamental. Cuando se consigue esta situación se dice que se ha

realizado la *inversión de población* del medio [14]. Para lograr dicha inversión de población es necesario algún dispositivo que suministre la energía necesaria a los átomos o moléculas y los lleve al estado de excitación. Esto se lleva a cabo con el sistema de bombeo que, como anteriormente se explicó, puede ser óptico o eléctrico.

Esquemas de niveles energéticos. Muchos LASER's se ajustan de manera más o menos aproximada a los esquemas de tres o cuatro niveles.

En el esquema de tres niveles el bombeo se efectúa desde el fundamental E_0 hasta el nivel E_2 , de allí pasa al nivel de E_1 que actuará como nivel superior de la transición LASER.

La transición radiativa que origina la emisión de luz es la que hace descender al átomo desde el nivel E_1 al fundamental que actúa como nivel inferior LASER [3], como se ve en la figura 1.7.

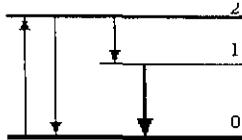


Figura 1 7. Esquema de niveles típicos de un LASER de 3 niveles.

En el esquema LASER de cuatro niveles, el nivel inferior LASER no es el fundamental, sino un nivel excitado que a continuación debe efectuar una transición hacia el fundamental [3], como en la figura 1.8.

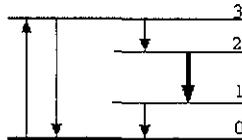


Figura 1 8 Esquema de niveles típicos de un LASER de 4 niveles.

El LASER de CO₂ presenta un funcionamiento de excitación y desexcitación de cuatro niveles, como se estudiará más adelante.

1.4. Funcionamiento del LASER de CO₂.

El LASER de CO₂ tiene un alto rendimiento energético, en ocasiones superior al 20% de la energía de bombeo, y

su longitud de onda en el infrarrojo intermedio donde gran cantidad de materiales absorben fácilmente la radiación, lo hacen ser el LASER mas utilizado en procesos industriales.

1.4.a. El bombeo del medio activo.

Al ser un LASER de gas, el bombeo energético se realiza mediante una descarga eléctrica sobre la mezcla gaseosa. Hay varias formas de efectuar la descarga eléctrica. Atendiendo a la dirección de la misma puede ser:

- Longitudinal, en la dirección del eje que une los dos espejos. Este tipo de bombeo asegura un buen acoplamiento entre la excitación y el eje óptico, además de una descarga homogénea. Su principal desventaja es la de requerir tensiones muy elevadas, del orden de los 10 a 20 KV.
- Transversal, si es perpendicular al eje. Tiene la ventaja de reducir el nivel de tensión entre electrodos para permitir una mayor homogeneidad en la descarga [3].

Asimismo, la descarga puede efectuarse de distintos modos:

- En forma continua (CW, Continuous Wave).
- A pulsos discretos e intensos, como en el caso de los LASER's atmosféricos excitados transversalmente (TEA, Transversal Excitation Atmospheric).

1.4.b. Principios de operación.

Los niveles energéticos asociados al efecto LASER en la molécula de CO₂ son los niveles rotacional-vibracionales de menor energía correspondientes al estado electrónico fundamental [3].

Realizando una aproximación clásica, se considera la molécula de CO₂ lineal, con el átomo de carbono en el centro y los dos átomos de oxígeno colocados uno a cada lado. Así constituida la molécula tiene tres modos vibracionales posibles, el simétrico, figura 1.9a, el de flexión, figura 1.9b, que puede doblarse en las direcciones x y y, por lo cual se dice que es degenerado, y el antisimétrico, figura 1.9c.

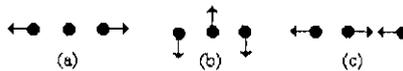


Figura 1.9 Modos vibracionales de la molécula de CO₂.

Estos modos vibracionales pueden ser mas o menos intensos y estar relacionados entre si. A cada nivel energético correspondiente a un estado vibracional, se le asigna un terna de números dados a la intensidad de cada uno de los tres modos fundamentales (n_1, n_2^m, n_3). El superíndice m se utiliza para diferenciar los distintos

estados debidos a la degeneración del segundo modo fundamental de vibración.

Como se dijo anteriormente, el LASER de CO₂ es de cuatro niveles energéticos, los cuales están asociados a los niveles rotacional-vibracionales de la molécula de CO₂.

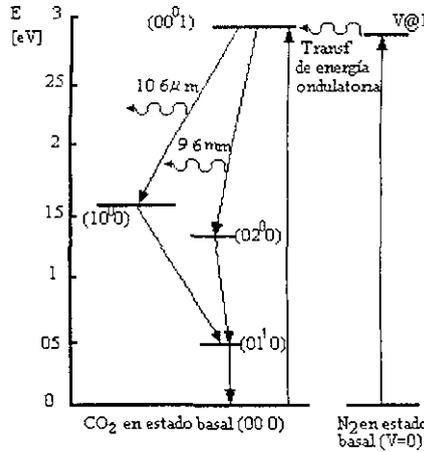


Figura 1.10 Estructura de niveles energéticos del LASER de CO₂

En la figura 1.10 se representa el diagrama de niveles energéticos implicados de la emisión LASER de CO₂. La molécula de N₂ posee una sección eficaz mucho mayor que la de CO₂ y es más fácil de excitar por electrones producidos en la descarga. Uno de los niveles de alta energía de la molécula de N₂ tiene una magnitud aproximadamente igual al nivel (00⁰1) de la molécula de CO₂. En consecuencia, algunas moléculas de N₂ pueden aumentar la cantidad de moléculas de CO₂ que se encuentran en el estado fundamental, excitándolas hasta el estado (00⁰1) por un proceso colisional resonante. Y ya que no hay niveles inferiores de energía similares para los dos gases, la población del nivel alto (00⁰1) aumenta más que la de los niveles inferiores, obteniéndose así la inversión de población.

La molécula de CO₂ puede ocupar temporalmente varios niveles de energía arriba del estado fundamental. Cuando dicha molécula baja desde el nivel (00⁰1) cae a un estado intermedio, mostrado como (10⁰0) o (02⁰0). La energía radiante liberada por la transición tiene una longitud de onda de 10.6 o de 9.6 μm dependiendo del nivel al que haya descendido. El salto entre los niveles (00⁰1) y (10⁰0) es más corto y la longitud de onda es mayor. Por otra parte, es la transición más común entre las moléculas de CO₂, razón por la cual el haz producido por el LASER de CO₂ tiene una longitud de onda de entre 10.6 μm y se caracteriza por ello [14]. En

seguida entra en juego el helio con su importante rol de "refrigerador", tomando la energía de las moléculas de CO₂ y llevándolas a su nivel fundamental. A continuación la molécula desciende hacia el nivel (01¹0), principalmente por colisión con otras moléculas de CO₂ que se encuentran en el nivel fundamental [3].

1.4.c. Resonadores.

La oscilación LASER es la acumulación de ondas coherentes entre los espejos de la cavidad. Esta cavidad tiene un eje de mucho mayor longitud que los otros dos. Al aplicar un bombeo y obtener una inversión de población, el átomo que se encuentre en nivel energético superior emitirá un fotón e influirá en otros átomos que se encuentren en el mismo nivel; éstos emitirán fotones en la misma dirección y sentido del primer átomo. Por la característica mencionada de la cavidad se consigue una amplificación mayor en un eje que en los otros dos. Gracias a los espejos en los extremos de la cavidad la luz se intensifica en recorridos sucesivos.

Varias configuraciones son posibles para resonadores LASER, como se muestra en la figura 1.11.

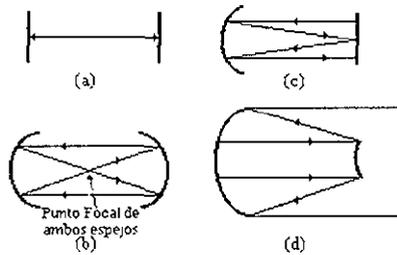


Figura 1.11. Una ejemplo de diseños de cavidades LASER, mostrando como es reflejada la luz en tre los espejos. Nótese cómo el diseño de (d), el resonador confocal positivo inestable permite la producción de un haz con una sección ransversal semejante a una dona. (a) Resonador plano-paralelo (estabilidad marginal); (b) resonador confocal (estable), (c) resonador hemifocal (estable); (d) resonador confocal positivo inestable.

Conceptualmente, el modelo mas simple es el resonador plano paralelo de Fabry-Perot, mas contrariamente es equivalente a la dificultad práctica de la alineación de los espejos, colocados paralelamente uno con respecto del otro y perpendiculares al eje de la cavidad. La resonancia ocurre cuando la longitud de la cavidad D iguala a un numero entero n por la mitad de las longitudes de onda [14] ($\lambda / 2$)

$$D = n\lambda / 2$$

Resolviendo para la longitud de onda:

$$\lambda = 2D / n$$

Como ya se ha explicado, uno de los espejos es semitransparente, así un porcentaje de luz que llega a él se refleja y el resto lo atraviesa.

La onda que recorre el medio activo va despoblando el nivel superior de la transición y hace que disminuya la inversión de población. Al mismo tiempo la potencia de onda que sale por el espejo delantero va aumentando hasta llegar a una situación de equilibrio en la cual la energía que gana la onda en un recorrido completo, ida y vuelta por el medio activo, se iguala a la energía que pierde debido a la transmisión por el espejo delantero. La ganancia del medio se ha saturado en un valor en el que las pérdidas se igualan a las ganancias en un recorrido, y de este modo se obtiene una potencia constante de salida [14].

Resonadores estables e inestables. Por cuestiones de estabilidad y reducción de pérdidas los espejos del resonador son generalmente esféricos, la curvatura del espejo no es cualquiera, pudiendo tener las siguientes configuraciones:

- Resonador concéntrico o esférico. Dos espejos esféricos idénticamente curvados separados por una distancia equivalente al doble de sus radios de curvatura; de esta manera coinciden sus radios de curvatura.
- Resonador confocal. Dos espejos esféricos idénticos separados por el doble de su longitud focal; así sus puntos focales coinciden (porque la longitud focal de los espejos es $\frac{1}{2}$ del radio de curvatura, así el centro de curvatura de un espejo es como el centro del otro).
- Resonador hemifocal. Un espejo esférico separado de un espejo plano por su longitud focal.
- Resonador hemisférico. Un espejo esférico separado de un espejo plano por su radio de curvatura [14].

Estos resonadores y algunos diseños similares con otros arreglos de espejos son llamados frecuentemente resonadores estables. En estos, la onda que se propaga por su interior se encuentra en el mismo estado después de haber realizado un recorrido completo dentro del resonador, es decir, el rayo de luz inicialmente paralelo al eje de la cavidad es reflejado entre los dos espejos sin escape entre ellos [14].

El resonador inestable no autorreproduce la onda después de un recorrido completo de la onda en él. El haz tiende a salirse del eje del resonador y se producen pérdidas por difracción al encontrarse con los límites físicos de uno de los espejos.

Ejemplos de resonadores inestables son: un espejo esférico convexo opuesto a un espejo plano; espejos cóncavos de diferentes diámetros (la luz reflejada por el espejo mayor escapa alrededor de los bordes del pequeño), y pares de espejos convexos [14].

Para el proceso que nos ocupa, el maquinado de materiales con LASER de CO₂, el resonador a utilizar puede ser estable o inestable, dependiendo del tipo de aplicación, como se verá más adelante. El haz producido

tiene una intensidad pico en el centro con una pendiente Gaussiana hacia los extremos del eje.

El resonador inestable en la mayoría de los casos presenta un haz de contorno anular, con una intensidad pico en un anillo alrededor del eje pero nulo en éste.

Modos del resonador. Dentro del resonador se forma una onda electromagnética estacionaria fruto de las reflexiones producidas entre los espejos. La forma de distribución en la densidad de potencia del haz que emerge del sistema depende de la forma geométrica del resonador y del medio activo. Las configuraciones que puede adoptar una onda estacionaria en la cavidad resonante se denominan modos.

Podemos distinguir entre modos longitudinales y transversales. Los modos longitudinales son aquellos que pueden resonar en la dirección del eje. Cada modo longitudinal corresponde a una longitud de onda. Un resonador puede encontrarse operando en varios modos longitudinales simultáneamente, tal es el caso del LASER de CO₂, en el cual varias líneas quedan solapadas formando una sola. Sin embargo controlar los modos longitudinales de manera que la oscilación esté en una sola frecuencia es menos importante que controlar los modos transversales, los cuales reflejan la calidad del rayo.

Los modos transversales son los que determinan la distribución de potencia del haz. Para visualizarlos se hace un corte perpendicular imaginario en el haz a la salida del resonador, se ve entonces que la distribución de potencia no es uniforme, sino que presenta configuraciones preestablecidas por la onda estacionaria generada dentro del resonador, de la cual es fiel reflejo [14].

Una terminología especial se ha desarrollado para los modos transversales, basada en el trabajo teórico hecho en los primeros días del desarrollo del LASER (Fox y Li, 1961).

Los modos transversales se designan mediante la notación TEM_{uv}, donde las siglas TEM indican que los campos eléctrico y magnético son transversales respecto al eje óptico, y los subíndices u y v son números naturales que indican la cantidad y la distribución de nodos de la onda estacionaria.

El arreglo o modo fundamental es conocido como TEM₀₀, y tiene su máxima intensidad coincidente con el eje LASER, es decir, en el centro. Posee una distribución Gaussiana de intensidad y presenta menos pérdidas por difracción en su confinamiento dentro del resonador [3]. Industrialmente posee mayor interés, pues puede focalizarse en áreas mucho más reducidas que los restantes modos, consiguiéndose densidades de potencia en regiones muy pequeñas, lo cual es ideal en el caso del corte de materiales. Sin embargo las distribuciones de potencia de los otros modos pueden también encontrar campos de aplicación especiales; por ejemplo el modo TEM₂₂ tendría un campo de aplicación en los tratamientos térmicos. Inclusive el haz en forma de dona de un resonador inestable es útil en casos particulares. Diferentes ejemplos de modos transversales se ilustran en la figura 1.12.

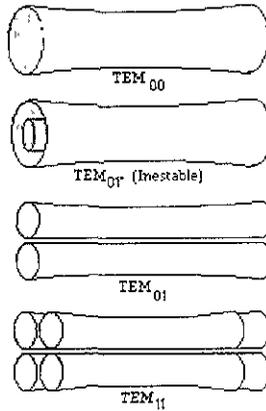


Figura 1.12 Modos transversales de bajo orden que pueden producirse en un resonador.

1.4.d. Propagación del haz.

Este estudio se ocupará del modo TEM₀₀ por ser el de mayor interés para el caso del corte de materiales.

Elementos ópticos.

Lentes y sistemas de lentes. Las lentes son los elementos cuya función es concentrar o dispersar un haz aprovechando la refracción que sufre la luz al pasar de un medio a otro con distintos índices de refracción. Las lentes se clasifican en divergentes y convergentes (fig 1.13).

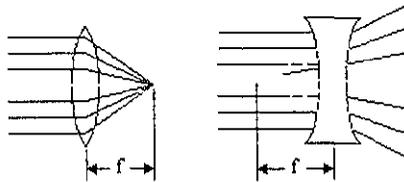


Figura 1.13. Lentes divergente y convergente.

En la primera, un haz que llega paralelo a la lente es focalizado al otro lado de la misma, la distancia comprendida entre la lente y el punto de enfoque se denomina distancia focal de la lente. La segunda es una lente divergente. La distancia focal es el espacio comprendido entre la lente y el punto de intersección de las prolongaciones de los rayos que emergen de la misma. Este parámetro define su comportamiento. En el primer

caso tiene signo positivo y en el segundo, negativo [3].

A fin de obtener los mejores resultados es aconsejable la utilización de sistemas ópticos libres de aberraciones. A causa de estas, los rayos que llegan paralelamente a la lente no convergen en un único punto, sino que sufren una dispersión alrededor del mismo. Los tipos de aberración son *esférica*, *coma* y *astigmatismo*. Las dos últimas no entran en el campo de interés del LASER, pues son propias de haces luminosos que no inciden de forma perpendicular a la lente.

La aberración esférica es la de mayor importancia considerando la focalización del haz, coaxial al eje óptico, por una lente o un sistema de lentes convergentes, operación realizada en la mayoría de las aplicaciones industriales. Esta aberración se debe a la variación de la distancia focal a medida que el observador se aleja del eje de la lente, formándose un cono de focalización en lugar de un único punto focal, como puede verse en la figura 1.14.

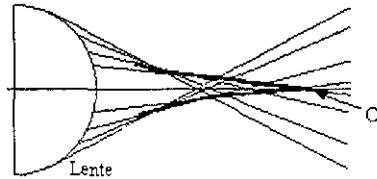


Figura 1.14 Trayectoria de los rayos en aberración esférica

La consecuencia inmediata de este hecho es una disminución de la densidad de potencia obtenida en el punto focal, al aumentar la zona irradiada. Una forma de evitar esta aberración es la utilización de un sistema óptico, compuesto por varias lentes [3].

Si se desea evitar la aberración esférica con una sola lente, atendiendo a la curvatura de sus caras se encuentran tres tipos de lentes: *biconvexa*, *planoconvexa* y *concaconvexa* o *menisco* (fig. 1.15). Esta última es la que ofrece menor aberración, seguida por la planoconvexa y la biconvexa. Además de estas lentes existen otras de tipo cilíndrico, en las que el haz es focalizado en un segmento rectilíneo de la misma longitud que el diámetro del haz incidente.

Existen otros sistemas ampliamente utilizados: *los expansores de haz*. Éstos consisten esencialmente en una de las dos configuraciones de telescopio (de Galileo de Kepler). Su función es aumentar el diámetro del haz para disminuir su divergencia. Sus ventajas son poder recorrer una distancia relativamente grande casi sin aumentar su diámetro, y la producción de un diámetro que puede ser focalizado posteriormente [3].

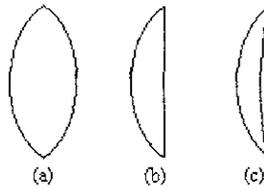


Figura 1.15. Lentes convergentes: a) biconvexa, b) planoconvexa y c) menisco.

Espejos. Los dos tipos de espejos externos más utilizados son los planos y los convergentes o cóncavos. Los primeros se utilizan para deflectar el haz y llevarlo hasta la lente de focalización. Los segundos sirven a la vez para deflectar y focalizar. Estos últimos realizan una función similar pero inversa a las lentes convergentes, por lo tanto su focal tiene signo contrario. Los materiales para la fabricación de los espejos utilizados con el LASER de CO₂ se estudiarán en el capítulo 2.

Transformaciones del haz. Contrariamente a la creencia común, un haz LASER tiende a abrirse a medida que avanza, no conserva su tamaño, si bien, lo hace en mucho menor grado comparándolo con cualquier otra fuente luminosa [3]. En la figura 1.16 se muestra en forma exagerada este efecto. En ella se representan los dos espejos del resonador y cómo varía el haz al avanzar en el espacio.

El punto más estrecho del haz se denomina cintura o *wais*, representado en la figura por $2w_0$, y 2θ es el ángulo de divergencia del haz.

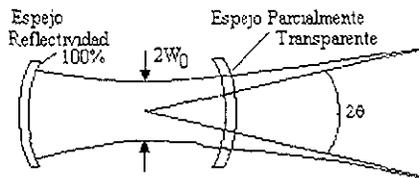


Figura 1.16. Corte del haz saliendo del resonador.

Dos fórmulas importantes para este estudio son las siguientes: la primera relaciona el tamaño del haz con la distancia recorrida

$$w^2 = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right] \tag{1.13}$$

donde:

w = radio del haz

w_0 = radio mínimo del haz

z = distancia recorrida desde el *waist*

Otra fórmula importante relaciona el radio de curvatura del frente de onda del haz en función de la distancia recorrida, donde R es el radio del frente de onda

$$R = z \left[1 + \left(\frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (1.14)$$

En la figura 1.17 puede verse que tanto el tamaño como el radio de curvatura del haz dependen únicamente de la longitud de onda y del tamaño del *waist* [3].

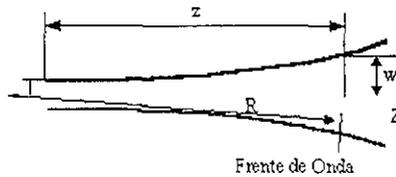


Figura 1.17. Evolución del haz por el espacio.

Al atravesar el haz por una lente focal f , como se ve en la figura 1.18, llega a la lente con un tamaño $2w_1$ y un radio de curvatura R_1 , obtenidos al aplicar las fórmulas 1.13 y 1.14, sustituyendo z por L_1 . El tamaño del haz a la salida de la lente, $2w_2$, es el mismo que antes de entrar a ella, $2w_1$.

Según la aproximación de la óptica paraxial, una onda luminosa esférica con radio de curvatura R_1 que atraviesa una lente emergerá por la cara opuesta con un radio de curvatura R_2 , según la figura 1.19a.

Si se interpreta el comportamiento de la lente como un dispositivo que varía el radio del frente de onda que llega hasta él, se podrá aplicar la misma transformación para el caso de un haz Gaussiano llegando a la lente con un radio R_1 , y emerge por la otra cara como un nuevo haz Gaussiano con un radio de curvatura R_2 [3].

El mínimo tamaño del haz saliendo de la lente, $2w_{02}$ y la distancia que alcanzará este valor se calculan aplicando las ecuaciones 1.13 y 1.14, y se llega así al sistema de ecuaciones siguiente, donde $f_0 = \pi w_{01} w_{02} / \lambda$

$$L_1 = f \pm \left(\frac{w_{01}}{w_{02}} \right) (f^2 - f_0^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.15)$$

$$L_2 = f \pm \left(\frac{w_{02}}{w_{01}} \right) (f^2 - f_0^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1.16)$$

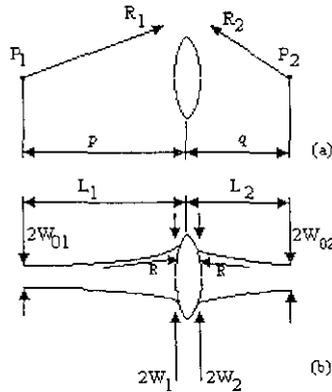


Figura 1.18 Transformación de (a) una onda esférica y (b) un haz Gaussiano al atravesar una lente de focal f .

Una solución aproximada es la que da como tamaño de un haz focalizado

$$2W_{02} \approx 2f\lambda / \pi W_{01}$$

Por lo tanto, según se deduce de esta expresión, *un haz Gaussiano no puede enfocarse infinitamente, sino que el tamaño del mismo es función de la focal de la lente, de la longitud de onda y del waist del haz incidente* [3].

De la misma manera, la divergencia del haz y el tamaño del mismo están unívocamente relacionados y no dependen de ningún otro factor que se pueda alterar. Como 2Θ es inversamente proporcional al waist, $\Theta = \lambda / \pi w_0$, cuanto más pequeño sea el tamaño del haz al ser enfocado, más rápidamente se abrirá a continuación y, por tanto, el margen de espacio en que el haz está enfocado es más pequeño. Por el contrario, si se desea proyectar un haz con mínima divergencia (colimar el haz) para recorrer una gran distancia, se expande con un sistema de lentes en configuración telescopio, lo cual lo coloca en condiciones de llevar a cabo esta acción [3].

El enfoque del haz. La coherencia del haz LASER es la principal característica para su aplicación al maquinado, ya que gracias a ella puede enfocarse en su totalidad la potencia emitida en una zona de

dimensiones de la longitud de onda y, por consiguiente, de gran densidad de potencia.

La focalización del haz se realiza con lentes y espejos. Una relación para calcular el diámetro del haz focalizado es:

$$D_f = 4f\lambda / \pi D_i$$

donde D_f es el diámetro del haz enfocado, D_i el diámetro del haz incidente, f la distancia focal de la lente y λ la longitud de onda. Otra ecuación que permite calcular fácilmente el diámetro del haz focalizado es

$$D_f = 2\Theta f$$

donde 2Θ es la divergencia del haz incidente.

Otra importante característica del haz focalizado es la profundidad de foco, la cual representa la distancia en la que se puede considerar focalizado el haz. La definición concreta de este parámetro es dependiente de la variación del tamaño del haz que será tolerada. Si se define δ como el cociente entre el tamaño tolerado del haz y su mínimo tamaño ($\delta = 1 +$ tanto por uno considerado), la profundidad de foco d se expresa:

$$d = (8f^2 / \pi D_i^2) \cdot \lambda \sqrt{\delta^2 - 1}$$

Como se puede observar, para un valor doble de focal se obtiene un valor doble de diámetro del haz focalizado, mientras que la profundidad de foco aumenta en cuatro veces su valor [3].

1.4.e. Generación de pulsos.

Para algunos procesos industriales es más adecuado trabajar con una salida pulsada de potencia en vez de hacerlo en forma continua.

Existen dos formas de generar pulsos:

- Actuando sobre el bombeo.
- Actuando sobre el factor de calidad Q de la cavidad resonante (pulsado por conmutación del factor Q del resonador)

Pulsado por bombeo. En este caso, en el resonador se llega a una inversión de población muy superior a la de un funcionamiento estacionario, rebasando el umbral en el cual ya es posible la emisión de luz LASER, pero esto no se da porque la ganancia del medio es inferior a las pérdidas totales del mismo y no existe radiación en el interior del resonador que despueble el nivel superior. De esta forma se origina un pulso LASER de gran potencia que causa una disminución rápida de la inversión de población con lo cual el resonador deja de emitir

luz; a continuación vuelve a repetirse el proceso.

En la figura 1.20 se puede ver que la intensidad de los sucesivos pulsos va disminuyendo hasta que la potencia de salida del resonador es estable.

Cuando el bombeo es interrumpido en la zona transitoria y vuelve a iniciarse poco después, repitiéndose el proceso la frecuencia adecuada, se obtiene una salida LASER consistente en un tren de pulsos de potencia superior a la que tendría el mismo LASER trabajando en continuo.

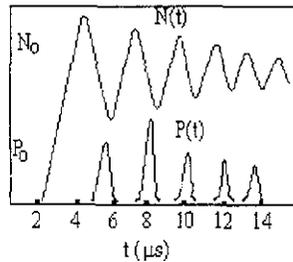


Figura 1.20 Transitorio al iniciar el bombeo del medio activo. $N(t)$ es la evolución temporal de la inversión de población. N_0 es el valor en situación estacionaria. $P(t)$ es la evolución temporal de la potencia de emisión del LASER y P_0 su valor en condiciones estacionarias

Conmutación Q. Mejor conocida como Q-switch, la técnica consiste básicamente en la introducción de un obturador de conmutación rápida dentro del resonador.

Con el obturador cerrado se bombea el medio activo, y toda la radiación que se genera se pierde al absorberla el obturador. Así se obtienen valores muy elevados de inversión de población, ya que esta aumenta por el bombeo pero no disminuye por emisión estimulada, pues no existe radiación electromagnética en el interior del resonador. Cuando el obturador se abre existe una situación de alta ganancia lo cual favorece la generación de un pulso de gran potencia y corta duración. En la figura 1.21 se muestra gráficamente este fenómeno.

El valor N_0 de inversión de población se alcanza bombeando el medio activo con el obturador cerrado. En el instante t_0 se abre el obturador, entonces se observa un crecimiento de la radiación, en un principio lento, que termina con la emisión de un pulso corto e intenso y provocando una disminución rápida de la inversión de población [3].

Cuando se utiliza esta técnica el bombeo se produce en forma continua y la pulsación se obtiene abriendo y cerrando el obturador a una frecuencia óptima. Asimismo puede bombarse también de forma pulsada, la frecuencia se ha de acoplar al tiempo necesarios para generar el pulso [3].

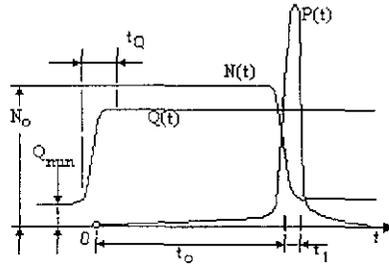


Figura 1.21. Evolución temporal de los parámetros que intervienen en la emisión de un pulso por el método de conmutación Q. $N(t)$ representa la inversión de población. $Q(t)$ es el factor de calidad del resonador y $P(t)$ la potencia de emisión.

EQUIPOS INDUSTRIALES DE LASER DE CO₂.

Hay una gran variedad de equipos industriales de LASER de CO₂, y el número aumenta si se consideran sus características internas, pues aún dentro de un sólo tipo de LASER se encuentran varios regímenes de funcionamiento.

2.1. Introducción.

Existen un poco más de 8 clases diferentes de LASER's de CO₂, pudiendo tener cada una sus variantes. Además, se pueden manejar diferentes características de salida, como potencia y modo continuo o pulsado.

Para poder utilizar un LASER industrial de CO₂ a todo su potencial es imprescindible el apoyo de un componente mecánico, controlado numéricamente. Es entonces cuando se habla de un sistema LASER. Los sistemas pueden tener hasta cinco ejes de movimiento (x, y, z y dos ejes de giro) e incluso auxiliarse de un brazo robot. Esta es una de las características que hace tan flexible el proceso de maquinado con LASER de CO₂.

El LASER es una fuente intensa de calor y además, al utilizarse para maquinado, pueden desprenderse vapores tóxicos al ambiente. Por esta razón existe toda una normatividad para el manejo seguro de estos equipos. Dentro de ésta, al LASER de CO₂ se le coloca dentro de la Clase IV, la más alta, a causa de la gran densidad de potencia que puede alcanzar.

2.2. Características de los equipos industriales de LASER de CO₂.

2.2.a. Tipos de LASER's de CO₂.

LASER de tubo sellado. Está formado por un tubo de vidrio que contiene CO₂, He y N₂ formando la cavidad resonante con los espejos, como se muestra en la figura 2.1.a. Los electrodos se colocan cerca de las

extremidades del tubo. Mas el funcionamiento no es tan simple, pues la descarga eléctrica rompe la molécula de CO₂ liberando el oxígeno, muy corrosivo para los componentes internos. Por si mismo un LASER de CO₂ con la mezcla típica de componentes podría tener una vida de solo pocos minutos.

Una solución al problema es añadir hidrógeno o agua a la mezcla gaseosa y de esta manera se regenera el CO₂ con el monóxido de carbono producido por la descarga. No obstante, demasiado gas reduciría la eficiencia del dispositivo. Una alternativa es la utilización de un cátodo de níquel a 300 °C como catalizador de la reacción. Con estas modificaciones los LASER's de CO₂ de tubo sellado son capaces funcionar por varios cientos de horas antes de degradarse seriamente. Los tubos deben ser rellenados y limpiados, o reemplazados si es necesario.

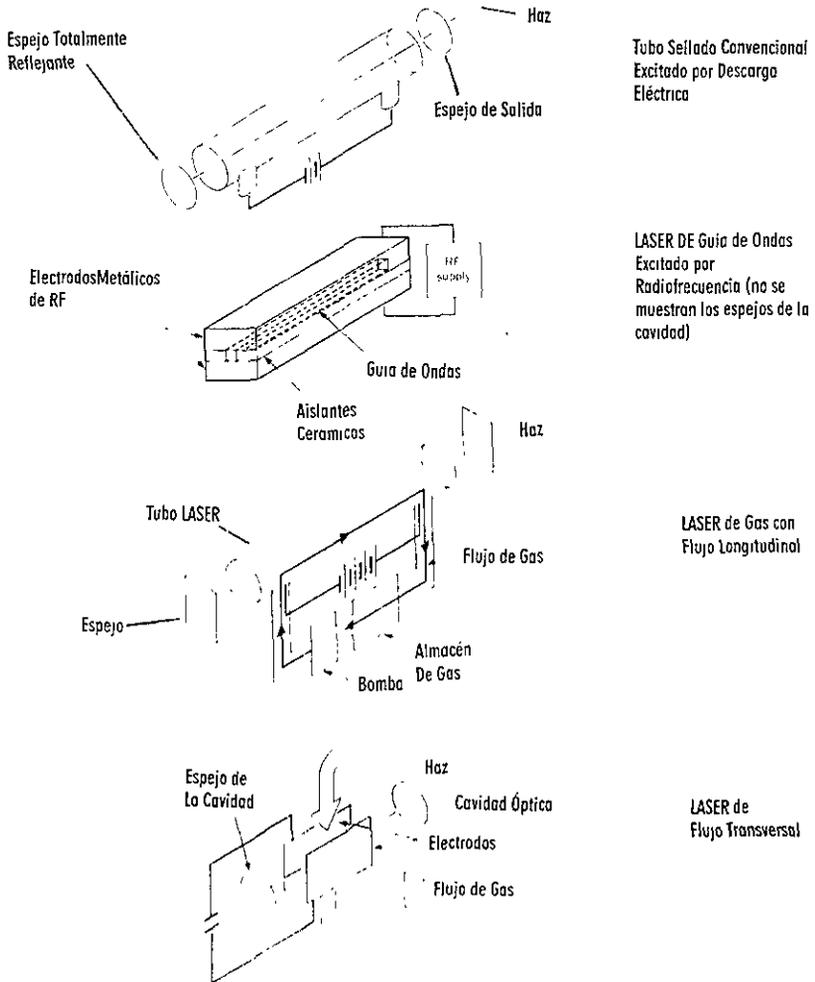


Figura 2.1 LASER's de tubo sellado, de guía de ondas, de flujo longitudinal y de flujo transversal

Tradicionalmente, la excitación en este tipo de LASER es por medio de una descarga longitudinal de CD. La máxima potencia neta posible es de alrededor de 50 W por metro de longitud de cavidad y la máxima potencia en onda continua es de alrededor de 100 W. Generalmente este LASER genera de 25 a 100 W en modo continuo, con un promedio comparable en el modo pulsado.

Recientemente se ha ensayado alimentar al medio con una descarga de radiofrecuencia transversal al eje óptico. Con esto no se requieren electrodos estándar de alto voltaje y el diseño ofrece ciertas ventajas, como la disposición de una salida controlada electrónicamente a frecuencias de 10 kHz, bajo voltaje de operación, y costo del tubo potencialmente bajo. No obstante, el suministro de potencia en forma de radiofrecuencia es más complejo y la eficiencia es menor. Sin embargo esta tecnología ha ido ganando aceptación sobre el método convencional pues puede generar algo más de potencia al tener un área de excitación mayor que con la descarga de CD, y también trabaja bien a bajas potencias.

Todos los LASER's de tubo sellado, incluyendo los de guía de ondas que se describirán enseguida, presentan sobrecalentamiento al no circular el gas, lo cual limita las potencias de salida [14].

LASER's de guía de ondas. Si el diámetro interno de un LASER sellado es reducido a pocos milímetros y el tubo es construido de modo que guíe la luz, el resultado es un LASER de "guía de ondas" similar al mostrado en la figura 2.1.b. El diseño busca reducir las pérdidas por difracción que de otra manera perjudicarían la operación al ser la cavidad de dimensiones reducidas. El diseño consta de un tubo sellado, con un depósito de gas separado de la guía de ondas. El LASER de guía de ondas puede ser excitado con una descarga de CD o con campos intensos de radiofrecuencia.

La guía de ondas puede ser construida con metales, dieléctricos o una combinación de ambos. Por ejemplo, con bloques de metal pueden formarse las crestas y valles de la guía, mientras que con el dieléctrico se forman las paredes verticales. En tales LASER's, el campo de radiofrecuencias es aplicado entre dos paredes metálicas, mientras la cerámica sirve como aislante.

El LASER de guía de ondas es muy apropiado para bajas potencias en el rango del CO₂: 50 W o menos. Genera un haz de buena calidad, puede operar en modo continuo o pulsado y se puede sintonizar fácilmente para muchas líneas discretas dentro del espectro del CO₂. Sus reducidas dimensiones, comparables a las de un LASER de helio-neón, son una ventaja. Además produce mayor potencia. Sin embargo los materiales para su construcción son costosos. Requiere agua o aire forzado como refrigerante [14].

LASER longitudinal (o axial) de flujo lento de gas. Haciendo fluir la mezcla gaseosa a lo

largo del eje óptico del tubo se resuelven los problemas de los LASER's de tubo sellado. Generalmente la descarga eléctrica se aplica a lo largo del eje óptico; se manejan bajas presiones del gas, éste fluye lentamente y puede ser reciclado [14].

Los LASER's axiales de flujo lento trabajan en modo continuo con una potencia neta de 80W/m. El haz puede ser reflejado por medio de espejos a través de múltiples segmentos de tubo, evitando diseños demasiado voluminosos, y llegan a ser lo bastante simples que incluso son los más comunes en los LASER's de CO₂ con emisiones promedio de menos de 500 W. Para aparatos con potencias de salida de 1 kW o 2 los tubos podrían ser imprácticamente largos.

El enfriamiento es por conducción de la energía térmica a través de las paredes del tubo y puede ser realizado aplicando agua u otro refrigerante alrededor del mismo (esta transferencia es atribuible a la gran concentración de helio en la mezcla gaseosa). Una propuesta para mejorar la confiabilidad del sistema es la utilización de tubos cilíndricos, lo que produce haces de mayor calidad, punto importante para aplicaciones industriales. Sin embargo una desventaja es que el gas se calienta mucho más en el centro de la región activa.

Un avance reciente en este aspecto es utilizar varios tubos paralelos delgados, colocados en un arreglo plano o anular, como se muestra en la figura 2.2.

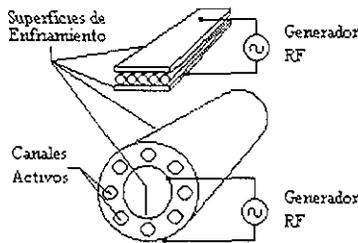


Figura 2.2. Los LASER's de flujo axial pueden generar altas potencias si varios tubos se arreglan en paralelo, alrededor de un eje o en una superficie plana; son refrigerados por ambos lados.

Generalmente la excitación es por radiofrecuencia. La superficie, de un tipo u otro, es enfriada buscando mantener la temperatura del gas lo suficientemente baja para que opere eficientemente. La potencia máxima por canal es de 50 W/m, y ésta puede multiplicarse aumentando el número de canales paralelos, no obstante con algún sacrificio en la calidad del haz [6].

LASER's de flujo axial rápido. Una manera de incrementar dramáticamente la eficiencia de un LASER

de flujo axial lento es colocando una bomba o turbina que acelere el flujo de gas a través del área de descarga. Este diseño permite resonadores cortos para producir potencias relativamente elevadas, del orden de 800 W/m. Usualmente la excitación se lleva a cabo con una descarga eléctrica longitudinal, y algunas veces por medio de descargas de radiofrecuencia.

La gran ventaja del flujo rápido de gas es una mejor refrigeración, pues el movimiento es tan rápido que el área de descarga no logra calentarse lo suficiente para disminuir su eficiencia. Dejando la región de descarga, el gas se enfría en un intercambiador de calor. La mayor parte de la mezcla gaseosa recircula a través del LASER, pero una pequeña cantidad es reemplazada por gas nuevo para mantener un desempeño alto.

Un diseño típico de alta potencia incluye de cuatro a ocho tubos de flujo paralelos. ópticamente en serie, por cada kilowatt de potencia de salida. Con este resonador corto y la pequeña huella que requiere de espacio en el piso, el LASER de flujo axial rápido es capaz de generar potencias de 500 W a 5 kW, lo cual lo convierte en el LASER industrial de CO₂ más utilizado para el corte de materiales [1,16]. El LASER de flujo axial puede verse en la figura 1.2.c.

LASER de flujo transversal. También en altas potencias, del orden de 10kW por metro de longitud del medio activo, es posible que se de el caso de que la mezcla gaseosa fluya en la dirección perpendicular al eje de la cavidad LASER, como se muestra al fondo de la figura 2.2. La descarga eléctrica que excita el medio es aplicada también en forma transversal al eje de la cavidad. El gas fluye a través de una región mucho más ancha y no viaja tanto como en los LASER's de flujo axial, por eso no es movido tan rápidamente. Esto facilita los requerimientos del sistema de bombeo. Usualmente se recicla el gas a través de un sistema que regenera el CO₂ y agrega un poco de gas fresco a la mezcla. No obstante que este diseño es considerablemente pobre en cuanto a la simetría y a la estructura de los modos del haz, es uno de los más comunes para potencias de 5 kW, y hasta de 25 kW disponibles para aplicaciones comerciales. Algunos de estos LASER's de altas potencias han sido construidos para investigación militar [3,6].

LASER de gas dinámico. El principio del flujo transversal es aplicado en otro tipo de LASER de alta potencia: el LASER de gas dinámico, cuyo esquema se muestra en la figura 2.3. En éste, la energía de excitación viene dada por el calor aplicado a la mezcla gaseosa, la cual se encuentra inicialmente a una presión de varias atmósferas. El calor del gas es producto de la combustión de hidrocarburos. Este gas caliente es expandido a través de una boquilla dentro de una cámara de baja presión. El rápido enfriamiento de la mezcla gaseosa moviéndose rápidamente produce una inversión de población. Un haz LASER es extraído del gas colocando una

pareja de espejos en lados opuestos de la cámara de expansión [1,16].

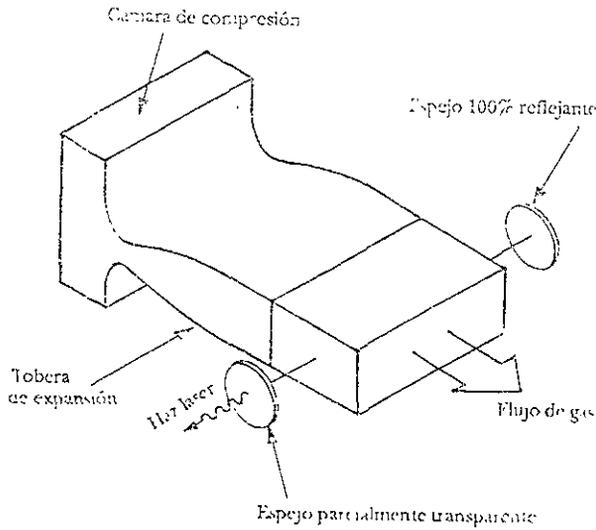


Figura 2.3. Estructura básica de un LASER de gas dinámico.

LASER atmosférico excitado transversalmente (TEA). En éste el medio gaseoso emisor se mantiene a presión atmosférica y la excitación viene dada por una descarga eléctrica de los electrodos situados paralelamente respecto al eje de la cavidad óptica, como se muestra en la figura 2.4. Es capaz de producir haces pulsantes con potencias muy altas. Puesto que los electrodos en el LASER TEA son paralelos al eje mayor del resonador, se requiere un potencial relativamente bajo para mantener una elevada intensidad de campo.

Los cortos intervalos entre descargas permiten que la descarga eléctrica sea uniforme a altas presiones

del gas (una atmósfera o más). A estas presiones, la densidad molecular del CO₂ es mucho mayor que en el tubo largo de descarga convencional.

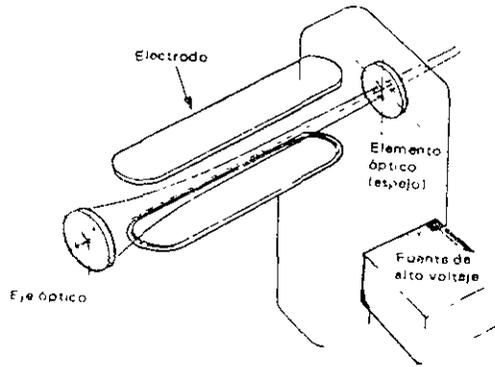


Figura 2.4. LASER atmosférico excitado transversalmente (TEA).

Este LASER puede por consiguiente generar 10 MW o más en un sólo pulso de menos de un microsegundo de duración. Estos equipos se hacen funcionar a bajas velocidades de repetición, de pocos pulsos por minuto. El haz del LASER TEA es extremadamente uniforme con respecto a su frente de onda [6].

2.2.b. Óptica.

Los LASER's de dióxido de carbono de potencias baja y moderada tienen típicamente un par de espejos en los extremos de la cavidad, uno totalmente reflejante y otro parcialmente transparente. En el caso de que la cavidad sea demasiado larga, su tamaño puede reducirse colocando dentro de ella una combinación de espejos totalmente reflejantes alineados con precisión a manera de que el haz interno se desvie y multirrefleje, como puede verse en la figura 2.5. A esta cavidad se le suele llamar "doblada" [3,14].

Aún en los LASER's pequeños de CO₂ la potencia es tan elevada que el manejo de color es un parámetro importante en el material de los espejos. Las alternativas comunes incluyen silicón con revestimientos altamente reflectivos, y metales como molibdeno y cobre. La fracción del haz transmitido es comparativamente más alta que

en los LASER's de baja ganancia, como el de He-Ne; el de CO₂ es de alta ganancia.



Figura. 2 5. Configuraciones de espejos de la cavidad resonante

Una variante común en este diseño es cortar un par de espejos metálicos para permitir que algo de luz escape de la cavidad para formar el haz LASER. Otra variación es usar el ángulo de Brewster mediante ventanas en el extremo de descarga del tubo, las cuales polarizan el rayo y permiten la utilización de elementos ópticos externos para seleccionar la longitud de onda. En ciertos casos, estos elementos permiten al tubo LASER amplificar la señal de un LASER externo [14].

Los materiales transmisivos a la radiación de 10 μ m son bastante diferentes a los cristales ópticos ordinarios. Dos alternativas comunes, arseniuro de galio y germanio, no son transparentes a la luz visible. El seleniuro de zinc sí lo es, pero tiene un fuerte color anaranjado. Algunos materiales de los más transparentes para 10 μ m son sales alcalinas higroscópicas como el cloruro de sodio, el cual absorbe la humedad atmosférica a menos que sea protegido. Algunos otros materiales adecuados son tóxicos.

Los elementos ópticos se tornan problemáticos a altas temperaturas, donde la baja absorción y el alto rendimiento térmico son críticos. Los espejos de cobre son mejores conductores térmicos y por eso pueden soportar potencias más altas que el molibdeno, pero el cobre es un metal más blando, difícil de pulir y más costoso. A densidades de potencia muy altas, los espejos pueden ser enfriados por agua u otro refrigerante fluyendo a través de la capa interior.

Buscando solucionar el problema, los ingenieros han desarrollado "ventanas aerodinámicas". El método consiste en practicar agujeros en la cavidad; a través de ellos fluye gas tan rápidamente que el aire no puede entrar y contaminar el medio. La ventanas aerodinámicas son usadas en algunos LASER's comerciales que emiten más de 5 kW continuamente [14].

2.2.c. Longitud y estructura de la cavidad.

Los tipos básicos de cavidades han sido descritas anteriormente. Las cavidades de LASER's de flujo axial lento pueden ser muy largas, pero su tamaño puede reducirse como se explicó al principio de la sección anterior.

La longitud de otros tipos de cavidad puede medir entre 0.3 y 2 metros. Una cavidad doblada para LASER's de guía de ondas está en desarrollo. Los resonadores estables están estandarizados para la mayoría de los LASER's comerciales de CO₂. Sin embargo, resonadores inestables son usados en los modelos de altas potencias que operan en modo continuo, con flujo transversal.

2.2.d. Características del haz.

Longitud de onda y potencia de salida. La longitud de onda nominal de operación del LASER de CO₂ es 10 μm, 10.6 μm o 9 a 11 μm. El espectro de emisión es complejo. Este LASER tiene dos transiciones vibracionales principales, 9.6 y 10.6 μm. Muchas transiciones rotacionales están superpuestas en las transiciones vibracionales, produciendo un total de aproximadamente 100 posibles líneas de emisión distintas, como se muestra en la figura 2.6.

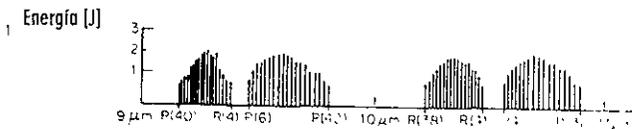


Figura 2.6. Espectro de longitudes de onda producidas por un LASER TEA, mostrando pulsos energéticos emitidos en la operación de una sola línea. R y P denotan niveles subrotacionales para cada una de las dos transiciones vibracionales de la molécula de CO₂.

Una rejilla de difracción o algún otro elemento de sintonización puede ser colocado dentro de la cavidad para seleccionar una sola línea del espectro del CO₂, o el LASER puede operar desintonizado, emitiendo el total de las líneas y una mayor potencia. En la línea de emisión más fuerte la amplificación del LASER vigoriza la potencia, por eso los LASER's multilinea son frecuentemente puestos a operar a 10.6 μm, la transición más fuerte, aún cuando están presentes otras longitudes de onda.

La salida en una sola línea de emisión no se utiliza en los LASER's diseñados para proveer altas potencias para el maquinado de materiales, pero sí lo es en los de baja potencia y onda continua y en muchos modelos de LASER TEA. La longitud de onda de salida de la línea de emisión más fuerte del CO₂ está generalmente a la mitad de la multitud de líneas de salida. Hay algunas pérdidas adicionales de potencia en la sintonización de otras líneas, pero no son tan grandes como para considerarse. Dependiendo del modelo de LASER, de 60 a 80 líneas pueden emitir en promedio al menos tanta potencia como cuando opera en una sola línea y en la longitud de onda más fuerte. Incrementando la presión del gas a unas 10 atmósferas las líneas individuales se ensanchan lo suficiente para permitir sintonizar un LASER TEA continuamente alrededor de un

abundante rango de emisión del CO₂. Como las transiciones del LASER son vibracionales, su longitud de onda puede ser cambiada sustituyendo diferentes isótopos dentro de la molécula de CO₂.

El máximo rendimiento (medido normalmente durante la operación multilinea), depende del tipo de LASER de CO₂. Los LASER's comerciales de guía de ondas producen alrededor de 30 W en modo continuo, sus más altas potencias se obtienen en el laboratorio con cavidades dobladas, pero los efectos de la alta densidad de potencia dentro de la cavidad puede limitar la propia potencia de una sola onda guiada. Los LASER's convencionales de tubo sellado están disponibles con potencias de más de 200 W, si bien para potencias de 100 W o menos son más típicos. Los LASER's de flujo axial lento comúnmente generan de 50 a 500 W, con unos cuantos modelos que generan potencias más altas o más bajas. Los LASER's comerciales de flujo axial rápido generan de 500 W a 5k W. Los de flujo transversal están disponibles para rangos de potencia de 3 a 25 kW; potencias más altas pueden ser producidas, pero no hay mucha demanda para estos rangos. Los LASER's de gas dinámico también operan dentro de los multikilowatts, pero no hay modelos comerciales. Los LASER's TEA pueden generar de 1 a más de 100 W lo cual depende de la velocidad de repetición y la energía pulsada, como se describe más adelante [14].

Características temporales de salida. Exceptuando los del tipo TEA, muchos LASER's de CO₂ producen normalmente haces continuos. No obstante, a los LASER's que funcionan en modo continuo se les pueden enviar pulsos eléctricos que producen "puntas" de 0.1 a 1 ms de duración generando potencias pico con valores de 5 a 10 veces el nivel normal. Dichos pulsos son provechosos para muchas aplicaciones de trabajo de materiales porque con ellos se puede debilitar la superficie y comenzar el proceso de corte. Los LASER's de guía de ondas excitados por radiofrecuencia pueden modularse a valores de 10 kHz. Los LASER's de CO₂ también pueden ser operados usando conmutadores Q o descargadores de la cavidad para producir una salida pulsada.

Los LASER's TEA comerciales pueden liberar pulsos en forma multilinea del rango de milijoules a 500 J en valores de una sola emisión a 300 Hz. Los más cortos pulsos duran alrededor de 40 ns, pueden alcanzarse valores de microsegundos ajustando la mezcla gaseosa con la descarga eléctrica. El pulso consta de dos elementos: un corto pico originado por la excitación eléctrica directa al gas, y una caída de larga duración (de baja potencia) como resultado de la transferencia de energía de las moléculas excitadas de N₂ a las de CO₂, que entonces emiten luz.

Por las altas presiones del gas en los LASER's TEA, el ancho de banda de ganancia es de alrededor de 4 GHz, bastante para permitir el uso de técnicas de modelado mediante las cuales pueden lograrse pulsos del orden de los subnanosegundos (Teóricamente en el modelado, el límite de duración de los pulsos debería ser

inversamente proporcional al ancho de banda de ganancia). Cierta fluctuación en la regulación del tiempo (alrededor de 20 a 30 ns) y un pequeño valor de desajuste (generalmente menor de 1%) son inherentes en la electrónica de los LASER's TEA. Los pulsos pueden ser disparados remotamente o internamente en la mayoría de los modelos [6,14].

Eficiencia. La eficiencia total de los LASER's de dióxido de carbono se extiende típicamente entre 5 y 20%, nada buena si se compara con otros tipos de equipo eléctrico, pero es más alta que en la mayoría de los otros LASER's. Las eficiencias son más bajas si la operación es en una sola línea, si el suministro de potencia eléctrica es ineficiente, o si los elementos ópticos son particularmente ineficaces para extraer la energía de la cavidad.

Ancho de banda espectral y estabilidad de frecuencia. Con la salida de tipo multilinea, el ancho de banda es más amplio -si bien limitado entre 9 y 11 μm - e inespecificado en la literatura de quienes manufacturan equipos LASER. El ancho de banda natural de una sola línea de emisión es en el orden de 100 Mhz a bajas presiones de la mezcla gaseosa, pero se amplía al incrementarse la presión hasta que eventualmente las líneas se traslapan. A altas presiones el LASER trabaja sólo en modo de pulsos. Las cavidades ópticas sofisticadas pueden reducir el ancho de banda espectral muy abajo del ancho de línea natural de una sola línea de emisión.

Los LASER's sintonizables para transiciones individuales dentro de la banda de emisión del CO₂, normalmente pueden operar en forma estable en esa transición a bajas presiones. Los accesorios para estos equipos pueden ayudar a estabilizar la frecuencia entre una parte por millón a una parte por billón para LASER's de salida continua. Estabilidades similares pueden alcanzarse para los de salida pulsada operando a altas presiones, si se usan los elementos ópticos apropiados.

Amplitud de ruido y variaciones entre pulsos. Los niveles de potencia de los LASER's de CO₂ tanto de salida pulsada como continua están sujetos a fluctuaciones que se pueden reducir mediante técnicas de estabilización. Generalmente los LASER's para trabajo de materiales tienen fluctuaciones de salida en el modo continuo limitadas a un pequeño porcentaje, con algunos modelos se incluye un estabilizador activo para mantener un control estrecho. Los LASER's de guía de onda no estabilizados pueden tener variaciones en la amplitud de $\pm 10\%$ durante una pocas horas y $\pm 4\%$ en una escala de minutos, pero mejores resultados logran obtenerse al estabilizar. Las variaciones entre pulsos para LASER's TEA repetitivamente pulsados están a menudo especificadas también dentro de un pequeño porcentaje, pero estas variaciones podrían disminuir produciendo pulsos de alta energía a bajas velocidades de repetición. Los LASER's con rejilla de sintonización son más estables

que los multilínea; por ejemplo, las especificaciones de un modelo señalan que la potencia puede estar constantemente a $\pm 0.25\%$ por varias horas [14].

Polarización del haz, calidad y modos. El diseño de la cavidad y la óptica del resonador determinan el modo en el que el LASER puede oscilar, y esos modos, a su vez, juegan un mayor rol en la determinación de la calidad del haz. Hay cuatro modos transversales básicos de emisión, comunes en los LASER's de CO₂:

- *Emisión multimodal*, en la cual la cavidad funciona simultáneamente en varios modos de oscilación. En ésta se extrae la mayor potencia de salida de la cavidad, pero el diámetro del haz tiende a ser grande y diverge rápidamente, con algunas desigualdades en la calidad.
- *Emisión en el modo TEM₀₀*, en la cual la cavidad permite la oscilación sólo en este modo fundamental produciendo un patrón de intensidad pico en el centro y declinante en las orillas. En éstas, la baja intensidad limita la cantidad de energía que puede ser extraída de la cavidad, pero el haz resultante es de mejor calidad que el de emisión multimodal. No obstante la potencia en este modo es de un cuarto a un medio del anterior, y el diámetro y la divergencia del haz se reducen proporcionalmente.
- *Emisión de resonador inestable*, en el cual la cavidad óptica produce un haz con una sección transversal semejante a una dona. A despecho del nombre, los LASER's con tales cavidades pueden operar establemente. Esta cavidad es muy atractiva para los LASER's de CO₂ pues brinda una buena calidad del haz mientras extrae más energía del medio activo de la que es posible en la emisión del modo TEM₀₀, particularmente por el mayor diámetro. La potencia de salida de un resonador inestable es de un medio a dos tercios del haz multimodal. El diseño del resonador inestable también permite usar espejos metálicos totalmente reflejantes que pueden manejar altos niveles de potencia óptica.
- *LASER's de guía de ondas*, los cuales tienen una estructura modal determinada por la naturaleza de la guía de ondas más bien que por los espejos del resonador. El orden más bajo del modo de la guía de ondas, EH₁₁, es funcionalmente el mismo que el TEM₀₀. La cavidad es pequeña, lo cual permite una extracción eficiente de la energía del medio.

Si un LASER de CO₂ de onda continua es sintonizado para emitir en una sola longitud de onda, normalmente emitirá en un solo modo longitudinal. Un resonador estable convencional de CO₂ emitiendo una sola línea produce un haz en el modo TEM₀₀; los resonadores inestables y de guía de ondas de CO₂ también

pueden ser sintonizados para una sola línea.

Los LASER's de emisión multilinea normalmente emiten luz polarizada a no ser que el diseño de sus tubos incluya ventanas con ángulo de Brewster. Los elementos ópticos usados como rejillas de sintonización obligan a la polarización lineal del haz (no obstante el ángulo de polarización puede cambiarse como la longitud de onda es cambiada), por eso los LASER's de una sola línea emiten haces linealmente polarizados.

Longitud de coherencia. La longitud de coherencia generalmente no es muy importante para la mayoría de las aplicaciones del LASER de CO₂. La amplitud de ancho de banda de los LASER's de emisión multilinea gobierna una muy corta longitud de coherencia. Los LASER's de CO₂ de una sola línea tienen longitudes de coherencia del orden de un metro, o mayores, si se usan accesorios que estrechen la línea.

Diámetro del haz y divergencia. La forma y longitud de la cavidad y la naturaleza del resonador determinan el diámetro del haz y su divergencia. Siendo así, esas cantidades difieren entre los diferentes tipos de LASER's de CO₂. Los rangos típicos se muestran a continuación.

Tabla 2.1. Diámetro del haz y divergencia.

Tipo de LASER	Diámetro del haz (mm)	Divergencia (mrad)
Tubo sellado convencional	1 a 7	2 a 6
Guía de ondas	1 a 2	3 a 10
Flujo axial lento	3 a 15	1 a 4
Flujo axial rápido	8 a 25	1.5 a 5
Flujo transversal	13 a 50	1 a 3
TEA	4 a 200	0.5 a 10

En general, el diámetro y la divergencia del haz son más pequeños para haces unimodales que para los de salida multimodal, excepto para los LASER's de guía de ondas. Algunos tubos LASER de diámetro grande producen haces de sección transversal ovalada.

Estabilidad en la dirección del haz. En la mayoría de las placas de especificaciones no se menciona la estabilidad en la "puntería" del haz, pero una compañía especifica una estabilidad de ± 0.15 mrad para su LASER de flujo axial de 150 a 200 W, el cual está diseñado para aplicaciones de procesamiento de materiales

Adaptabilidad para el uso de accesorios. Los LASER's de CO₂ son bastante versátiles para ser usados con algunos accesorios, si bien pocas aplicaciones los requieren. Los accesorios más importantes incluyen:

- *Conmutadores Q* para producir pulsos de microsegundos o nanosegundos de haces de onda continua.
- *Cerradores o cortadores de pulso* para producir pulsos más largos de haces de onda continua.
- *Modelos de cámaras presurizadas* para producir pulsos de nanosegundos en LASER's que operan a presiones bastante altas (próximas a la presión atmosférica) para producir en ensanchamiento requerido de las líneas.
- *Los generadores armónicos* pueden producir múltiplos integrales de la frecuencia del LASER (o equivalentemente reducir la longitud de onda por un factor integral) pero solamente se han encontrado pocas aplicaciones.
- *Un bombeo óptico* en los LASER's que emiten en la región del infrarrojo lejano, produce una emisión con mayor longitud de onda. [3,6,14].

2.2.e. Requerimientos de operación.

Potencia de alimentación. En los LASER's de CO₂ la potencia de alimentación, como la potencia de salida, abarca un rango grande de magnitudes. Los LASER's de CO₂ mas pequeños pueden conectarse a una toma de pared ordinario, los más grandes consumen cantidades prodigiosas de potencia. La descarga impelida de CD requiere grandes voltajes continuos o pulsados, así como en la excitación por radiofrecuencia. Las necesidades típicas dependen del tamaño de aparato.

Los LASER's de guía de ondas accionados por una descarga de CD generalmente requieren de 1 a 3 A de una fuente de 110V de CA, o niveles comparables de potencia al requerir otros voltajes. Esa energía va a producir una corriente de pocos miliamperes y alrededor de 15kV para la descarga a lo largo de la guía de ondas.

Los LASER's de CO₂ de tubo sellado accionados por descarga necesitan algo más de alimentación para producir una salida comparable. La mayoría requiere de 3 a 5 amperes de una fuente de 110 V de CA. Un voltaje del orden de 10 kV puede impulsar varios miliamperes de corriente a través del gas.

La excitación en los LASER's de CO₂ de tubo sellado convencional o de guía de ondas requiere generalmente el doble de potencia de la que se tiene en la descarga. La potencia extra se pierde en el suministro, el cual genera fuertes señales de radio. La mayoría opera a frecuencias de 27 a 40 MHz o cercanas, reservadas por la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC, por sus siglas en inglés) para uso de instrumentación. Al utilizar otras frecuencias se requiere protección para evitar excedentes de los niveles de radiación permitidos por la FCC.

Los LASER's de onda continua y flujo de gas requieren capacidad eléctrica de entrada pico en el rango de 10 a 20 veces su salida óptica, y pueden necesitar potencia extra para el arranque. Esta energía sirve para alimentar las bombas de vacío, equipo de enfriamiento, y otros accesorios como el mismo tubo de la cavidad. Algunos modelos pueden operar con una entrada monofásica de 110V de CA, pero las versiones más grandes necesitan fuentes trifásicas de 440 V. Un LASER de 1.2 kW, por ejemplo, requiere 22 kVA de potencia de un suministro de 440 V, lo cual se reduce a 15 kVA después del arranque.

Los LASER's TEA tienen requerimientos de potencia bastante complejos por la naturaleza de su operación pulsada. Comunmente algo de energía en forma de electrones o fotones ultravioleta es descargada dentro de la mezcla gaseosa un poco antes del pulso principal para obtener una gran potencia de salida. La energía del pulso principal comunmente viene de un capacitor de almacenaje que acumula una carga de decenas de kilovolts y centenas de miliamperes, suministrada por una fuente de CD. Algunos de los más grandes LASER's TEA usan generadores electrónicos de pulsos, más complejos (y más caros), que manejan todos los voltajes de 0 a 100 kV.

Refrigeración. El enfriamiento por aire forzado se usa en los LASER's de CO₂ más pequeños. Los de potencias más altas requieren enfriamiento por agua, y los aparatos enormes tienen sistemas multiciclo sofisticados para refrigeración. Los requerimientos típicos de flujo de agua son de 2 l/min para LASER's de flujo axial lento y de 20 a 40 l/min para LASER's de flujo axial rápido de 1 kW.

Combustibles. El principal material combustible de los LASER's de CO₂ es el gas, porque la descarga descompone las moléculas del mismo. Aún los modelos de tubo sellado y bajas potencias requieren reemplazos periódicos de gas cada cien o varios cientos de horas de operación. Los LASER's de altas potencias necesitan reprovionamientos continuos de la mezcla gaseosa. El consumo de gas es aproximadamente proporcional al nivel de potencia para LASER's del mismo diseño. Por ejemplo, un dispositivo de salida continua de 150 W necesita cada hora 40 l de helio, 4 l de CO₂ y 7 l de N₂, contra un consumo por hora de 425 l de helio, 54 l de CO₂ y 127.5 l de N₂ para un LASER de 1.2 kW. No obstante la regeneración por catálisis del gas puede reducir su consumo hasta en un 90%. Algunos LASER's TEA necesitan aire seco para la generación de destellos. También el agua de enfriamiento se considera dentro de esta clasificación.

Accesorios requeridos. Los LASER's de CO₂ son ofrecidos en variadas configuraciones, desde sistemas completos para el procesamiento de materiales, hasta equipos que incluyen muy poco más de la cavidad en sí misma. Mientras que los sistemas completos están casi listos para funcionar una vez conectados al enchufe, al

agua y al suministro de gas, los no tan completos pueden necesitar también fuentes de alto voltaje, cavidades ópticas, bombas de vacío, entre otros equipos.

Temperatura y condiciones de funcionamiento. Los LASER's de CO₂ están diseñados para operar a temperatura ambiental y pueden funcionar bien en un medio ambiente normalmente limpio. Muchos modelos están destinados a uso industrial. El polvo y las vibraciones extremos en algunas fábricas han causado problemas en algunos casos, y pueden ser necesarios medios de protección como filtros en ambientes especialmente severos.

Consideraciones mecánicas. Los LASER's de CO₂ de guía de ondas tienen diseños extremadamente compactos, con cabezales ligeros de pocos kilogramos y suministros de potencia no muy elevados. Los cabezales más pequeños miden 40 cm, con secciones transversales rectangulares de 5 cm de anchura.

Algunos LASER's TEA y la mayoría de los de tubo sellado de onda continua son lo bastante compactos como para caber en un banco de laboratorio. Los LASER's de flujo de gas y los más grandes del tipo TEA son aparatos masivos que llegan a pesar de unos cuantos cientos de kilogramos a varias toneladas y requieren varios metros cuadrados de espacio en el piso. El más grande LASER comercial de CO₂, un sistema para el procesamiento de materiales de 25 kW, ocupa 27 m² de espacio en el piso y pesa alrededor de 13,600 kilogramos.

Condiciones especiales de operación. Los elementos ópticos para los LASER's de CO₂ son hechos de materiales completamente diferentes de los vidrios normales. Muchos materiales transparentes para 10.6 μm no transmiten la luz visible. A diferencia de los cristales ópticos normales, los transmisivos a 10.6 μm son químicamente reactivos, higroscópicos (o absorbentes de agua) y/o tóxicos, aunque revestimientos adecuados reducen su sensibilidad. Los vidrios ordinarios absorben la radiación de 10.6 μm y pueden ser cortados con LASER de CO₂.

La descarga de los capacitores en los LASER's TEA puede producir "pops" audibles en su operación normal. Esos LASER's pulsados pueden ocasionar también interferencia electromagnética y llegan a requerir protecciones especiales para no interferir con otros equipos. Las descargas de radiofrecuencia están normalmente dentro de lo establecido por la FCC para instrumentación, pero pudiesen causar interferencia en equipos muy sensibles.

Algunos LASER's, particularmente los TEA, están diseñados para operar con diferentes tipos de mezclas gaseosas. De esta manera, una misma cavidad funcionaría como un LASER de dióxido de carbono cuando sea

llenado con la mezcla de gas del CO₂, pero podría también funcionar como otro tipo de LASER (típicamente fluoruro de hidrógeno, excímero o monóxido de carbono) cuando se use con diferentes mezclas gaseosas y elementos ópticos diferentes. Cuando la mezcla gaseosa se cambie, el sistema debería purgarse antes de la operación con la nueva mezcla, y los elementos ópticos deben cambiarse cuando así se requiera. [14].

2.2.f. Confiabilidad y mantenimiento.

Tiempo de vida de los equipos LASER. Diferentes factores limitan la operación de los diferentes tipos de LASER's de CO₂. Incluyendo el tiempo de vida del gas en los LASER's sellados y la degradación de los elementos ópticos y el suministro de potencia en todos los otros tipos. Los LASER's sellados de salida en modo continuo son diseñados para operar desde una a varios cientos de horas sin cambio de gas. Los LASER's TEA pueden liberar millones de disparos de un solo relleno de gas. La potencia de salida desciende gradualmente si el gas no es cambiado, pero rellenando (y en algunos casos limpiando) el tubo puede regresarse a los niveles originales de salida.

Los tiempos de vida de los LASER's de CO₂ de flujo de gas normalmente no están especificados, y en la práctica dependen de factores ambientales duros, que como contaminan los elementos ópticos, pueden requerir reemplazos periódicos en el caso de aplicaciones de procesamiento de materiales. Algunos LASER's pueden durar un tiempo muy largo: una compañía reporta que dos LASER's de 3 kW han sobrevivido por 14 años de uso continuo.

Mantenimiento y ajustes. Algunos tipos básicos de mantenimiento son comunes para los LASER's de CO₂:

- Reemplazo de elementos ópticos sujetos a degradación.
- Reemplazo de la mezcla de gas en los LASER's de tubo sellado después de 1000 horas o más de operación.
- Reemplazo de los componentes internos que manejan alto voltaje.
- Lubricación y algún otro mantenimiento de accesorios esenciales, como bombas de vacío.

Muchos LASER's de CO₂ diseñados para aplicaciones industriales tienen catálogos de mantenimiento preventivo y vienen con contadores de tiempo transcurrido, que indican cuando es conveniente revisarlos.

Durabilidad mecánica. Los LASER's de CO₂ están generalmente diseñados para usarse en una localidad estable, no soportan golpes ni vibraciones excesivas; a excepción de algunos diseños especiales para uso militar.

Fallas y reparaciones. La degradación de los elementos ópticos, el suministro de altas potencias, o (en los LASER's de tubo sellado) la mezcla gaseosa pueden todos causar fallas en los LASER's de CO₂. La reparación es generalmente por reemplazo de el componente afectado. [14].

2.3. Sistemas LASER.

2.3.a. Introducción.

Un sistema LASER está compuesto por una fuente de haz LASER y un mecanismo que mueve ya sea la pieza de trabajo o la fuente emisora, e incluso ambas. El control del sistema se lleva a cabo numéricamente por computadora (CNC) y todos estos componentes hacen un sistema versátil, preciso y rápido.

2.3.b. Movimiento de la pieza de trabajo.

Dentro de esta opción caben varias posibilidades, unas sencillas y otras aumentan en grado de complejidad, y dependen de la función que se desee desempeñar.

Línea transportadora. Este es un sistema sencillo con un haz estacionario y las piezas de trabajo en movimiento. Consiste en un solo haz apuntando hacia una banda transportadora. Cuando la pieza está en su sitio, se dispara el LASER controlado por un interruptor y durante un tiempo determinado. Este sistema puede tener una variante que consiste en una mesa giratoria, la cual transporta las piezas a tratar [6]. Un arreglo más complejo se explica a continuación.

Mesas de coordenadas. Estas mesas son livianas, rápidas, precisas, permiten seguir perfiles y ofrecen velocidades lineales de hasta 10 plg/seg. Las velocidades para seguir contornos pueden ser de 2.5 plg/seg, con un control de posición muy preciso [6]. En ellas se sujeta la pieza a mecanizar. Las más sencillas permiten desplazamientos en sentido positivo y negativo de los ejes X y Y, con lo cual se puede describir cualquier movimiento en el plano y por consiguiente pueden ser mecanizadas piezas planas.

A los movimientos en X y Y se les puede añadir uno en el eje Z, que permite la aproximación del plano de trabajo durante el funcionamiento de la máquina y su separación al efectuar un cambio de la pieza que se trabaja. Asimismo este eje vertical se aprovecha para seguir superficies no planas, manteniendo en todo momento la distancia focal adecuada.

Otros dos ejes pueden ser incorporados para ampliar las capacidades de la mesa de coordenadas: son los ejes de giro A y B; con ellos se consigue que el haz se conserve siempre perpendicular a la mesa de trabajo. El eje

A (fig. 2.7) permite una rotación en cualquiera de los tres ejes. El eje B (fig. 2.8.) permite un giro continuo sobre el plano. Así, en cualquier punto puede programarse la inclinación relativa de la pieza respecto al haz asegurando su ortogonalidad [3].

2.3.c. Movimientos del cabezal y del sistema óptico.

Movimiento del haz. Cuando el tamaño o el peso del cuerpo a maquinar aumentan, es más práctico mover el haz manteniendo quieta la pieza. Esta opción presenta dos posibilidades: la primera consiste en mover todo el cabezal del LASER sobre la superficie a procesar. Esto requiere un soporte sólido para el LASER, mas únicamente es viable cuando éste es de baja potencia. En el caso de los LASER's de alta potencia (y cabezales más pesados), se tiene la segunda posibilidad en la forma de un sistema óptico de entrega del haz hasta el punto de mecanización.



Figura 2.7. Eje de giro A.

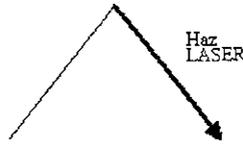


Figura 2.8. Eje de giro B

De esta manera el cabezal se mantiene en reposo y puede estar colocado fuera de la zona de trabajo. El sistema óptico consiste en un conjunto de espejos deflectores colocados a 45°, de modo que el haz reflejado por cada espejo forma un ángulo de 90° con el haz incidente.

Haz de tiempo compartido. Para efectuar ciertas operaciones en puntos diferentes, un haz puede ser compartido en el tiempo mediante el movimiento de espejos que lo desvían en distintas direcciones y a intervalos previstos. Ésto se muestra en la figura 2.9. El haz LASER es desviado hacia dos estaciones de trabajo, en las que se utiliza para una operación de perforación.

Divisores del haz. Cuando se requiere que varios haces se dirijan a puntos diferentes o se desea atacar a una pieza de trabajo desde más de una dirección, puede dividirse el haz por medio de un espejo parcialmente transparente y parcialmente reflector, colocado a 45° con respecto al haz. Una parte de éste se desvía 90°

respecto al haz primario; la otra pasa a través del espejo paralela al haz recibido, si bien desviada ligeramente por efecto de la refracción. El sistema se muestra en la figura 2.10.

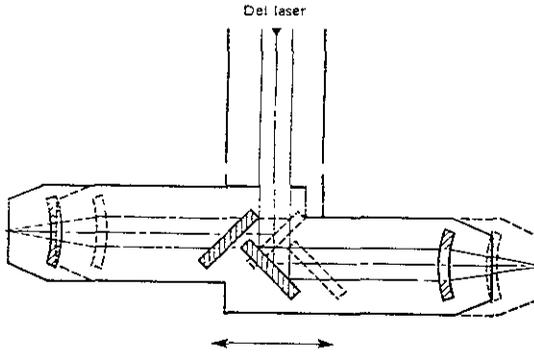


Figura 2.9. Haz de tiempo compartido

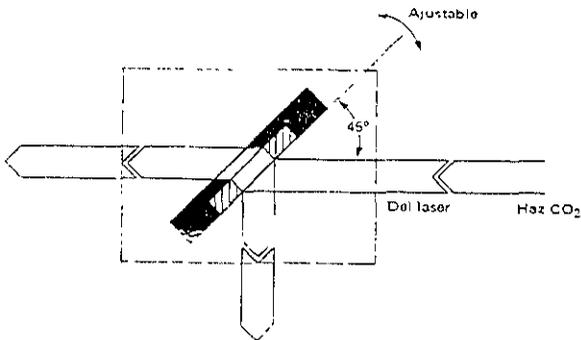


Figura 2.10. Sistema divisor del haz.

El grado de división depende de las características ópticas de la capa receptora del espejo. La relación de reflexión o transmisión más común es de 50/50; pero a menudo se emplean relaciones de 30/70, 85/15 y 90/10. Puede ser necesario refrigerar el divisor de haz debido a las pérdidas internas. A más de 200 Watts, los elementos de transmisión pueden experimentar un cambio en las relaciones de división como causa de la absorción de energía. El enfriamiento del elemento óptico ayuda, pero generalmente se debe evitar la división de un haz de potencia elevada [3,6].

Haces múltiples. Para obtener varios haces a niveles de potencia elevados, el uso de un LASER de haces múltiples es la opción más económica y confiable; esto es, un LASER con un resonador construido para emitir dos o más haces. En la figura 2.11 se muestra un equipo que emite 4 haces de 150 watts cada uno, dirigidos a distintas líneas transportadoras. Éste dispone de cuatro equipos de emisión dentro del gabinete, los cuales utilizan una fuente de energía común [6].

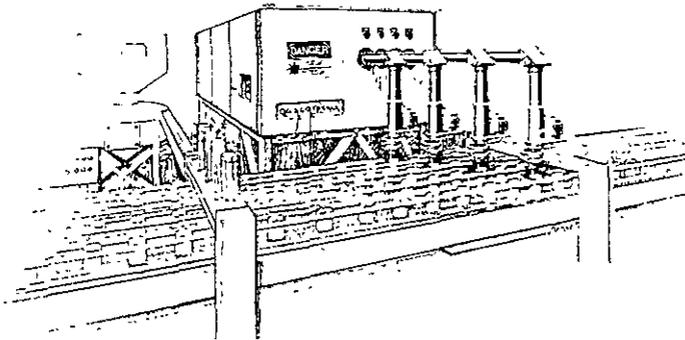


Figura 2.11 Sistema de haces múltiples

Intermisión o conmutación. Esta técnica se emplea cuando se necesita una rapidez de pulsación mayor de la que tiene el LASER, y se ilustra en la figura 2.12.

Un haz continuo se bloquea intermitentemente por un disco dentado, que puede girar a más de 10,000 rpm, lográndose hacer una gran cantidad de agujeros en una cinta, por ejemplo. Una modificación a esta técnica consiste en colocar una superficie reflectora a 45° sobre el disco interruptor para cambiar la dirección o "conmutar" el haz LASER hacia otra parte de la superficie de trabajo. Con ello se han podido hacer en la práctica hasta 3 millones de perforaciones por minuto [6].

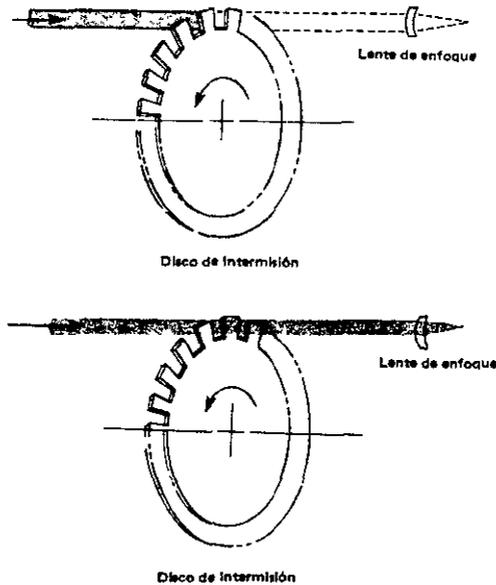


Fig. 2.12. Disco dentado para conmutación.

Escaners. Los escaners son los elementos óptico-mecánicos que permiten a un haz LASER efectuar el barrido de una superficie con gran rapidez, pues están formados por elementos ligeros y pequeños. Estos sistemas presentan varias configuraciones, encontrándose entre las más utilizadas las siguientes:

- Sistema de espejos oscilantes. En éste el haz LASER se hace incidir sucesivamente en dos espejos que oscilan entre ejes perpendiculares entre sí. A la salida del cabezal el haz es dirigido por medio de un espejo deflector a 45° hacia un espejo focalizador, que a su vez lo refleja al primer espejo móvil, el cual al oscilar moverá el haz a lo largo de una dirección. De modo análogo, con la oscilación del segundo espejo se regulará la posición del haz en la otra dirección del plano, perpendicular a la primera, como se ve en la figura 2.13.

Cada posición del haz sobre la superficie de trabajo viene fijada por una posición concreta de los dos espejos oscilantes.

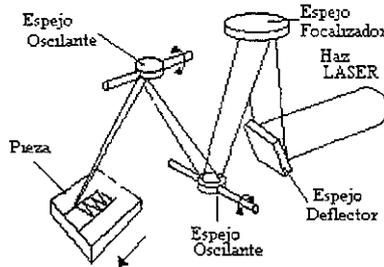


Fig. 2.13. Escaner con dos espejos deflectores.

- Un sistema diferente emplea un conjunto poligonal de espejos deflectores en rotación. El haz LASER, al incidir sobre una cara de espejo en movimiento, describirá un tramo de línea recta sobre la superficie cuya longitud vendrá delimitada por las condiciones de dicho espejo. Al continuar la rotación, el haz incide sobre el espejo contiguo, con lo que volverá a la posición inicial describiendo nuevamente el segmento recto. El sistema se muestra en la figura 2.14. Al combinar este movimiento con uno perpendicular de la pieza puede abarcarse también un área de trabajo de dos dimensiones.

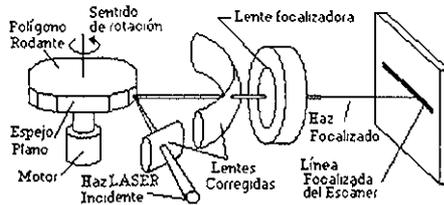


Fig. 2.14. Sistema poligonal de espejos deflectores.

- El sistema hologón (fig. 2.15) es un diseño en el cual se busca que todas las caras de los espejos presenten idénticas propiedades de reflexión y a la vez eliminar errores de posición debidos a la mala alineación de los espejos. Este dispositivo consiste en un disco giratorio que incorpora cuatro fragmentos holográficos de

propiedades ópticas idénticas. Estos fragmentos actúan simultáneamente como lentes focalizadoras y como deflectores, de modo que el haz al pasar por el disco en movimiento describe un arco de circunferencia sobre la superficie que repetirá cada vez que atraviere la porción de lente. El barrido de dos dimensiones se consigue con la ayuda del movimiento de la superficie de trabajo a lo largo de un eje.

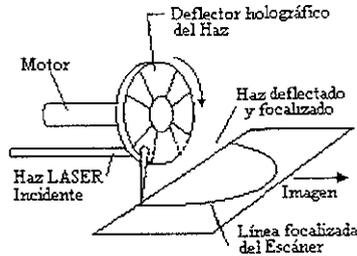


Fig. 2.15. Sistema hologón.

2.3.d. Mesas de pórtico.

Las mesas de pórtico son utilizadas cuando se requiere mover el sistema LASER manteniendo fija la pieza, ya sea que transporten un cabezal o un sistema óptico. En este tipo de sistemas, los ejes móviles están situados formando un puente sobre la mesa donde se encuentra el material a mecanizar. El desplazamiento de los ejes sigue las coordenadas X, Y y Z, reservando éste último para el posicionamiento del focalizador hasta la distancia de trabajo o la retirada del mismo hasta la posición de reposo. Además es común que se presenten los dos ejes adicionales de giro. Sin embargo pueden combinarse los movimientos de los ejes de la mesa y del pórtico, junto con los espejos; no siempre es uno solo de los elementos quien tiene toda la movilidad. Por ejemplo, el pórtico puede moverse en los ejes X y Z y la mesa en el Y. En la 2.16 se representa un pórtico con 4 ejes, dos de ellos de giro y dos de desplazamiento lineal; el conjunto se acopla a una línea de avance de piezas que proporciona el tercer movimiento lineal.

2.3.e. Revisión elemental a la aplicación de robots.

Existen tres distintos modos para acoplar un LASER a un robot industrial:

- El primer sistema consiste en sujetar con el robot las piezas a mecanizar moviéndolas bajo el haz para describir trayectorias programadas. Al mismo tiempo pueden asignársele las funciones de carga y descarga de material, clasificación de piezas terminadas, selección y clasificación de piezas defectuosas o cualquier

otra operación necesaria dentro de la cadena de producción. Para ello el robot debe estar dotado de un brazo articulado que le permita adoptar cualquier posición en el espacio, con una pinza en su extremo para sujetar las piezas y colocarlas frente al haz. El empleo de este tipo de robot resulta útil cuando las piezas son poco voluminosas.

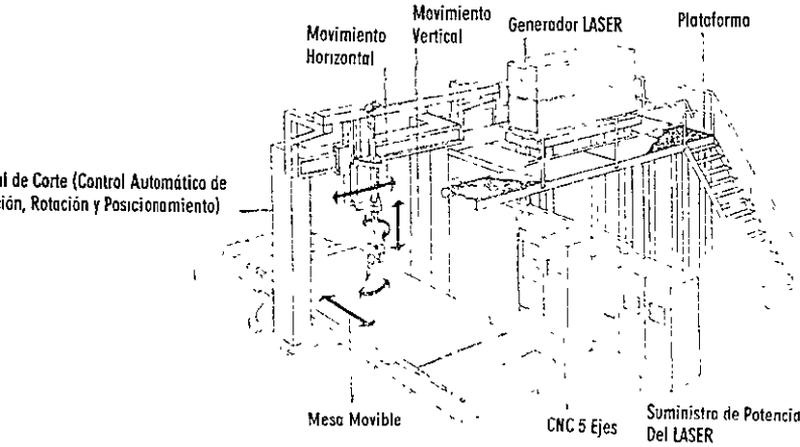


Fig. 2.16. Sistema de 4 ejes con línea de avance que añade el quinto eje.

- El segundo sistema está basado en el uso de un robot con brazo articulado cuyo extremo disponga de una pinza para mover un sistema óptico o el cabezal de un LASER. De esta manera el robot aproxima la boquilla hasta focalizar el haz sobre la superficie. En algunos casos se limita a realizar un acercamiento del sistema óptico, siendo este último el que por medio de un motor de avance lento alcanza la posición focal correcta. En este caso debe prestarse atención a la adecuada alineación de los espejos del sistema de suministro del haz, mientras que el robot puede ser del mismo tipo que los empleados en el caso anterior. Será el sistema ideal cuando el tamaño de las piezas no permita su manipulación o en el caso de que se requieran estructuras excesivamente sólidas para ser manejadas. El sistema óptico presentará mayor o menor

complejidad según el tipo de aplicación necesaria y la dificultad que entrañe el posicionamiento hasta la zona de trabajo. Un sistema complejo presentará varias articulaciones, permitiendo de uno a seis grados de libertad para su manejo, que permite siete tipos de movimiento generados por las articulaciones, transportando el haz por seis espejos deflectores.

- El tercer sistema es más complejo porque implica la utilización de un robot especialmente diseñado para esta aplicación. En éste, el sistema óptico está integrado al brazo móvil con los espejos deflectores coincidiendo con las articulaciones del robot, como se ve en la figura 2.17. Presenta la dificultad adicional de alinear un número superior de espejos, frente a la ventaja de poder operar con un sólo sistema flexible. Este método es el más aconsejable cuando la complejidad de la pieza a trabajar dificulta el acceso a las zonas de trabajo.

La utilización de un brazo articulado con espejos puede a veces sustituirse con un conjunto de piezas telescópicas extensibles, que reducen el número de espejos en función de la cantidad de posiciones que debe adquirir el focalizador.

Para programar un robot, el método más sencillo consiste en enseñarle directamente las configuraciones que deberá adoptar, moviéndolo manualmente. También se utiliza el método de descripción numérica en trayectorias, introduciendo los datos de forma directa, o una variante del control numérico, como si se tratara de una máquina-herramienta. Sistemas de control asistido por computadora (CAD) han generado programas de trabajo por simulación gráfica sobre pantalla, que se transmiten a la unidad de control del robot sin necesidad de interrumpir el curso de su ejecución [3].

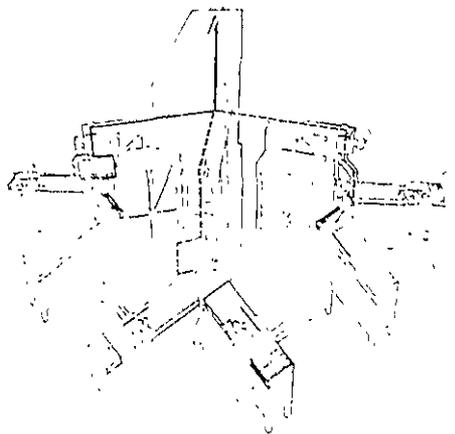


Fig 2 17 Sistema robotizado para el maquinado con LASER de CO₂, de tubos de escape de automovil

2.4. Consideraciones de seguridad para el manejo de LASER's de CO₂.*

2.4.a. Riesgo de los LASER's.

Los riesgos básicos de los equipos LASER pueden clasificarse como sigue:

Radiación LASER.

Ojos. La exposición aguda puede causar quemaduras en las córneas o retinas (o en ambas) dependiendo de la longitud de las ondas LASER; y la exposición crónica a niveles excesivos puede ocasionar opacidad corneal o lenticular (cataratas), y daños a la retina.

Piel. Son posibles quemaduras en la piel por exposiciones agudas a altos niveles de radiación óptica. En algunas longitudes de ondas ultravioleta específicas, puede ocurrir carcinogénesis de la piel.

Riesgos químicos Algunos materiales LASER (por ejemplo exímeros, tintes y LASER's químicos, pueden ser peligrosos o tóxicos. Además las reacciones de LASER's inducidas pueden liberar partículas y productos gaseosos peligrosos.

Riesgos eléctricos. Riesgos letales eléctricos pueden estar presentes, particularmente en sistemas LASER de alta potencia.

Otros riesgos. Estos riesgos incluyen: riesgos de refrigerantes criogénicos que son originados por algunos LASER's para investigación; ruido excesivo producido por LASER's de alta energía; radiaciones X derivadas de suministros defectuosos de fuerza de alto voltaje (15 kV); explosiones de bombas ópticas y riesgos de incendio.

2.4.b. Normas de seguridad para el uso de LASER's y clasificación de riesgos.

El propósito básico de casi todas las normas de seguridad para el uso de LASER's, ha sido clasificarlos según sus riesgos potenciales con base en sus emisiones ópticas, y especificar después las medidas de control proporcionadas al riesgo relativo de la clasificación. De esta forma, no se implantan restricciones innecesarias para el uso de muchos de los LASER's.

Esta filosofía ha dado origen a un número de sistemas de clasificación específica, como el establecido en la Norma Z-236.1, "El Uso Seguro de los LASER's" (1986), del Instituto Nacional Americano de Normas (ANSI-American National Standards Institute), adoptada también por la "Guía para el Control de Riesgos de los LASER's", publicada el 19081 por la Conferencia Americana de Higienistas Industriales del Gobierno (ACGIH-American Conference of Governmental Industrial Hygienists). El sistema ANSI tiene cuatro clasificaciones de riesgos, que se basan en la intensidad del haz luminoso emitido por el LASER (límite de emisión) si se usa como tal, o por un sistema completo, si el LASER es un componente de un sistema LASER en donde el haz luminoso puro no sale de su caja; sino que un rayo modificado es el que sale del sistema. Básicamente, el sistema de clasificación se utiliza para describir la capacidad de un LASER o sistema LASER como productor de lesiones al personal. El número más alto en la clasificación representa el riesgo potencial mayor. A continuación se presenta a manera de explicación introductoria una breve descripción de cada una de las clases mencionadas.

Clase 1. LASER's o sistemas LASER que pueden operar bajo condiciones normales de trabajo y que no representan riesgo alguno.

Clase 2a. LASER's o sistemas LASER visibles de baja intensidad que no han sido proyectados para verse prolongadamente y que en condiciones normales de operación, no constituyen un riesgo si se fija la vista directamente por períodos que no excedan de 1,000 segundos.

Clase 2b. LASER's o sistemas LASER visibles de baja intensidad que, debido a la respuesta normal humana de aversión a la luz brillante, por lo general no representan riesgo alguno; pero que sí pueden constituir un riesgo si se fija la vista directamente durante largos periodos de tiempo (como en muchas fuentes de luz convencionales).

Clase 3a. LASER's o sistemas LASER que normalmente no representarían riesgo si se fijara la vista sólo por periodos momentáneos sin protección para los ojos, pero que sí pueden constituir un riesgo si se fija la vista usando colectores ópticos.

Clase 3b. LASER's o sistemas LASER que pueden representar un riesgo si se fija la vista directamente, incluyendo mirar el haz luminoso en reflejos especulares. Exceptuando los LASER clase 3b de alta potencia, esta clase de LASER no produce reflejos difusos peligrosos. (Un reflejo difuso es aquel en que la energía radiante reflejada sigue la Ley de Lambert según la cual, en esencia, la radiación se refleja sobre un amplio rango angular).

Clase 4. LASER's o sistemas LASER que pueden constituir un riesgo, no sólo por fijar la vista directamente o en reflejos especulares, sino también en reflejos difusos. Además, estos LASER's representan riesgos de incendio y para la piel.

El término "apertura de limitación" se utiliza frecuentemente al referirse a la clasificación de los LASER's. La apertura de limitación se define como el diámetro del área máxima circular sobre la que pueden promediarse la radiación y la exposición radiante. Es una función de regiones de longitud de ondas y uso.

Aún cuando el proceso de evaluación de los riesgos originados por los LASER's no se basa completamente en su clasificación, ésta debe ser conocida. Si el fabricante no ha proporcionado información sobre la clase del LASER (según lo requiere la Ley Federal desde agosto de 1986), dicha clase puede ser determinada por medición y/o cálculo.

En el sistema de clasificación ANSI, el jefe de seguridad en el uso de los LASER's utiliza su propio juicio para establecer el tiempo de exposición más prolongado que sea razonablemente posible para un CW o LASER de impulso repetitivo. Esto se denomina la duración de la clasificación (max) que no puede exceder en un día de 8 horas (3×10^4 segundos).

Riesgos por fijar la vista en radiaciones LASER. Desde el punto de vista de la seguridad, el LASER puede ser considerado como una fuente altamente colimada de intensa radiación monocromática electromagnética. Debido a estas propiedades únicas del haz luminoso, la mayoría de los aparatos pueden ser considerados como puntos con luz de brillo intenso. Las fuentes de luz convencionales o el reflejo difuso de los rayos LASER clase 2 o clase 3, son fuentes extendidas de muy bajo poder luminoso porque irradian en todas las direcciones. Esto es de considerable importancia en lo que se refiere a los riesgos, ya que el ojo enfoca los rayos que salen de un punto hacia una pequeñísima área de la retina, en tanto que los rayos de una fuente extendida serán reflejados, en general, sobre un área más amplia. Sólo cuando uno se encuentra relativamente lejos de un reflejo difuso (suficientemente lejos para que el ojo ya no pueda resolver la reflexión), se aproximará el reflejo difuso a un "punto de luz". Los reflejos difusos son importantes sólo cuando se trata de aparatos LASER clase 4, de potencia extremadamente alta.

Procedimientos de seguridad para el uso de los LASER's de CO₂, de clase 4. El control necesario de los riesgos de radiaciones LASER varía según:

1. La clasificación del LASER.
2. El medio ambiente en el que se utiliza el LASER.

3. Los operadores o personas que se encuentren próximos al LASER.

Los procedimientos de seguridad pueden ennumerarse con más facilidad agrupándolos según la clase de LASER's. En esta forma el usuario puede determinar cuáles reglas son aplicables a su medio ambiente particular, tomando en consideración las personas que potencialmente estén expuestas a las radiaciones ópticas del LASER que se utiliza. En todos los casos, el usuario más seguro es el más informado, y se recomienda algún programa educacional sobre la seguridad en el uso de los LASER's.

Siendo el de CO₂ un LASER de clase 4, se presenta a continuación la ennumeración de los procedimientos de seguridad para la misma.

Reglas de seguridad para LASER's clase 4. Los LASER's de "alta potencia" constituyen el más grave de todos los riesgos originados por LASER's. Además de ser un riesgo para los ojos y la piel, estos LASER's pueden incendiar objetivos inflamables y crear contaminantes peligrosos en el aire. Por lo general, tienen un suministro potencialmente letal de energía de alta potencia y alto voltaje. La mayoría de los "riesgos asociados" anteriormente mencionados se limitan a operaciones LASER de alta potencia. Las siguientes reglas deben ser cumplidas en todos los casos de LASER's de alta potencia:

- Procúrese que toda la trayectoria del rayo LASER quede cubierta, si es posible. En este caso, el aparato LASER puede revertir a una clasificación menos riesgosa.
- Limitense las operaciones LASER en el interior de un cuarto a prueba de filtraciones de luz y con entradas de cierre de combinación para asegurar que el LASER no tendrá emisiones cuando se abra la puerta.
- Asegúrese de que todo el personal use la protección adecuada para los ojos y si la irradiación del rayo LASER representa un riesgo grave para la piel o riesgo de incendio, que un escudo adecuado esté colocado entre el (los) rayo (s) LASER y el personal.
- Utilícese encendido a control remoto y monitoreo de video u observación a distancia a través de un escudo para LASER's, donde sea posible.
- Utilídense dispositivos de bloqueo transversales, de elevación o cierres de protección en aparatos LASER usados en el exterior, tales como LIDAR, para asegurar que el haz luminoso no vaya a interceptar áreas ocupadas o aviones.
- Utilídense obturadores y filtros para emisiones LASER, con el fin de reducir a niveles menos peligrosos para la irradiación cuando no se requiera la potencia total del rayo.
- Asegúrese que el aparato cuenta con un interruptor de llave maestra y cierre combinado, con el objeto de que

sólo el personal autorizado pueda operar el LASER.

- Colóquense los avisos y etiquetas adecuados.
- Recuérdese: los sistemas de bombas ópticas pueden ser peligrosos para la vista; una vez que los sistemas ópticos de bombeo para LASER's impulsados se cargan, pueden descargarse espontáneamente provocando que el LASER se dispare inesperadamente (como un rayo cósmico que dispare un interruptor de tiratrón).
- Utilice objetivos negros, absorbentes, difusos, a prueba de radiación y, cuando sea posible, con protección posterior.
- Diseñense equipos seguros de microsoldadura y corte, así como dispositivos similares para trabajos en miniatura. Debido al uso creciente del LASER en microcirugía y en el ensamblaje de circuitos integrados o ajuste de resistencia, el uso de microscopios u otros dispositivos de enfoque óptico integrados a los sistemas LASER se está volviendo cada vez más común. Estas aplicaciones de los LASER's requieren que se preste atención especial a los riesgos asociados con las mismas. De ser posible, estos trabajos deben llevarse a cabo en cámaras a prueba de luz o con cierres combinados, para eliminar los requerimientos de protección para los ojos y otras reglas de seguridad aplicables a la clase IV. Los microscopios que se utilicen para ver la pieza que se trabaja deben contar con algún método a prueba de fallas para asegurar contra niveles peligrosos de radiaciones LASER que se reflejen a través de los elementos ópticos, ya sea usando filtros integrados o trayectorias ópticas separadas para la vista intermitente del LASER y encendido del mismo.

*Extraído de la "Guía de Seguridad para el Uso de los LASER's", Revista de la Asociación Mexicana de Higiene y Seguridad, A.C. Julio de 1991.

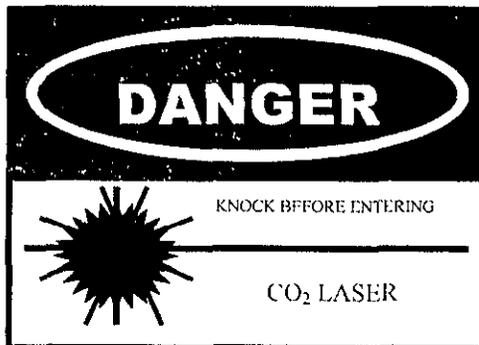


Figura 2.18. Etiqueta de advertencia para LASER de CO₂

GENERALIDADES SOBRE LOS PROCESOS DE MANUFACTURA

En este capítulo se examinarán algunos de las más comunes formas de manufactura con miras a la comparación con el maquinado LASER y su potencial.

3.1. Introducción.

La manufactura es *la transformación de materiales para satisfacer las necesidades humanas*. Se logra siguiendo una serie de procesos que *alteran la forma o las propiedades físicas de los materiales*. Para eficientar estos procesos con sus numerosas variables, deben tomarse varios criterios que cambian según la situación; ellos son *costo, velocidad de producción, flexibilidad y calidad*. Considerar lo anterior ayudará a identificar la óptima solución para la mayoría de los problemas de manufactura [2,9].

3.2. Aspectos de los procesos de maquinado.

A continuación se estudiarán los mecanismos físicos involucrados en los tipos distintos de maquinado, pues los alcances de cada proceso considerando los criterios anteriores dependen de este punto.

1. *El proceso primario de formado* crea una forma original desde un estado fundido o gaseoso, o desde partículas sólidas. Durante este proceso generalmente existe cohesión entre las partículas.
2. *El proceso de deformación* convierte la forma sólida dada a otra sin cambio de masa ni de composición. Entre las partículas se mantiene la cohesión.
3. *El proceso de remoción* en el que se retira material, destruyendo la cohesión entre partículas.
4. *El proceso de unión* unifica piezas individuales haciendo un conjunto o producto final. Esta clase de proceso

incrementa la cohesión entre partículas.

5. *Procesos de cambio de las propiedades del material*, cuyo propósito es adecuar las propiedades de la pieza para alcanzar las características deseadas [2,9,18].

Los materiales comúnmente usados en procesos industriales pueden ser clasificados en cuatro grandes categorías: *metales, cerámicos, polímeros y compuestos*. La selección del proceso que se le aplicará a un material en particular está influenciada por varios factores que influyen en el costo y a los criterios mencionados. Generalmente los dos más importantes factores son:

- *La configuración de las partes a elaborar*. Partes de pequeñas dimensiones requieren procesos flexibles, como de remoción, adecuados para adaptarse a diferentes contornos geométricos, etc. En cuanto a las de dimensiones mayúsculas, permiten usar procesos primarios de formado o deformado, y como los costos de herramientas son altos en estas condiciones, se necesitan compensaciones de algún modo.
- *Las propiedades físicas del material (por ejemplo, punto de fusión)*. Los metales tienen un punto de fusión relativamente alto, por consiguiente se procesan usualmente en forma sólida utilizando procedimientos de remoción y deformación. Los polímeros y compuestos con base epóxica tienen un punto de fusión mucho más bajo, así que se utilizan a menudo procesos primarios de formado donde el material se licúa, de esta forma frecuentemente se requieren operaciones secundarias, comúnmente maquinado, para darle la precisión dimensional y calidad superficial requeridas. Debido a que estos materiales con frecuencia contienen fibras abrasivas, exhiben un comportamiento esmerilador al maquinarse convencionalmente. Los cerámicos usualmente son frágiles, característica que los hace difíciles de maquinar en forma sólida con métodos convencionales. Con ellos se utiliza un proceso primario de formado para crear la configuración básica de la pieza, y operaciones secundarias (usualmente maquinado) para darles la forma final y calidad superficial [9,11,19].

Tabla 3.1. Aplicación de procesos en diferentes materiales. (xx: muy utilizados, x: raramente utilizados, --: no utilizados [2,7,11,13,25].

Material	Formado	Deformado	Remoción	Ensamblaje	Alteración
Metales	xx	xx	xx	xx	xx
Cerámicos	xx	--	x	x	--
Polímeros	xx	x	x	x	--
Compuestos	xx	--	x	x	--

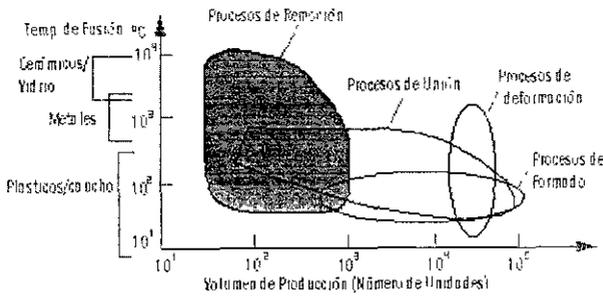


Figura 3.1. Volumen de producción contra punto de fusión en aplicaciones de procesos de manufactura [7].

Por su flexibilidad, los procesos de remoción de material son en especial adecuados en casos de lotes pequeños. Los procesos convencionales de maquinado encuentran gran aplicación en materiales dúctiles como los metales, pero son mucho menos apropiados para materiales frágiles como metales endurecidos, cerámicos y compuestos. El maquinado con LASER amplía el campo de aplicación de la remoción a los materiales difíciles.

El factor más importante en los procesos de remoción es precisamente el mecanismo por el cual ésta se realiza. Existen cuatro formas básicas de hacerlo:

Maquinado tradicional

- **Mecánico:** Esfuerzos mecánicos inducidos por una herramienta que vencen la resistencia del material.

Maquinado no tradicional

- **Térmico:** Energía térmica proveniente de una fuente de calor funde y/o vaporiza el volumen de material a remover.
- **Electroquímico:** Reacciones electroquímicas inducidas por un campo eléctrico dentro de un electrolito destruyen los enlaces atómicos del material a remover.
- **Químico:** Reacciones químicas destruyen los enlaces atómicos del material a remover. [2,9].

La elección del mecanismo de remoción requiere considerar varios factores, siendo los más importantes la dureza y/o abrasividad del material y los valores factibles de remoción de material (figura 1.12). Las técnicas tradicionales de maquinado abarcan una amplia variedad de valores de remoción, no obstante éstos descienden significativamente cuando el material es muy duro y/o altamente abrasivo. En este caso es más adecuado el

maquinado no tradicional.

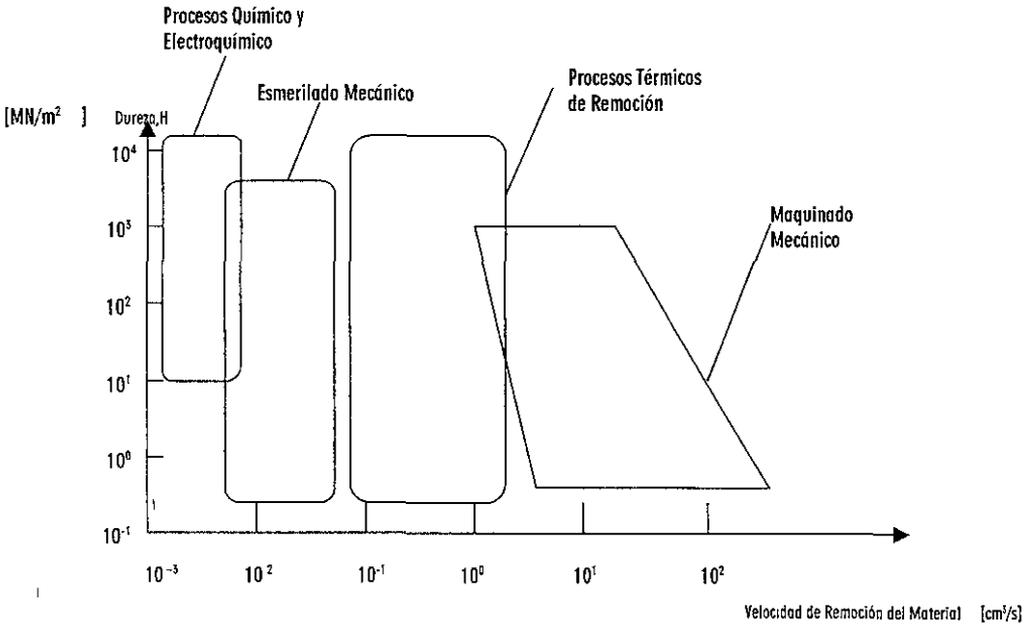


Figura 3.2. Efecto de la dureza del material en la velocidad de remoción [7,25].

Los procesos de remoción se caracterizan por su flexibilidad en términos de forma y geometría de la pieza, y calidad factible. Particularmente en el maquinado tradicional, puede recurrirse a un movimiento multiejes entre la herramienta y la pieza, logrando una gran variedad en tamaño de partes y en formas. Asimismo el acabado superficial varía significativamente; a velocidades bajas usualmente se logra un buen acabado superficial, pero con valores bajos de remoción. A causa de su flexibilidad, los procesos mecánicos de remoción son los mayormente usados en la industria manufacturera [2,9,11]. Los más comunes son:

- El *torneado* (figura 3.3), en el que se pueden incluir torneado longitudinal, refrentado y torneado de contorno (dependiendo del movimiento de avance), es el proceso de manufactura más frecuentemente usado.
- En el *barrenado*, la acción de corte no es inducida por la rotación de la pieza, sino de la herramienta cortante (figura 3.4). Este método incluye barrenado de torsión, horadado, abocardado, escariado y roscado. Como consecuencia de la naturaleza del proceso, la formación de escoria ocurre en un espacio cerrado. El barrenado es, en general, un proceso lento con una velocidad de producción relativamente baja [9]. En el

barrenado de orificios profundos, con una relación radio-profundidad de aproximadamente 1:200, se dan consideraciones especiales a la herramienta, la cual debe tener un acanalado que facilite la eyección de la escoria. Es de tenerse en cuenta que la herramienta es muy delgada, lo que crea problemas de estabilidad.

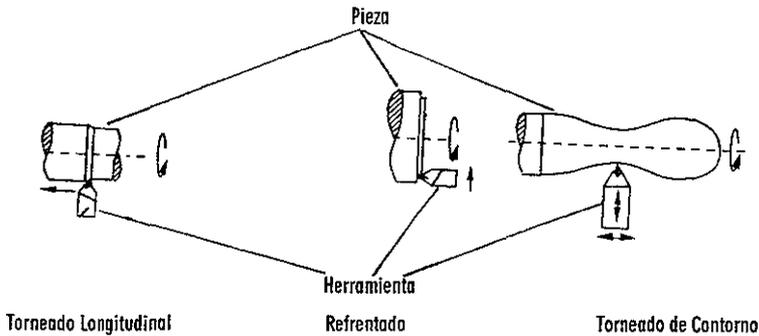


Figura 3.3. Formas comunes de torneado

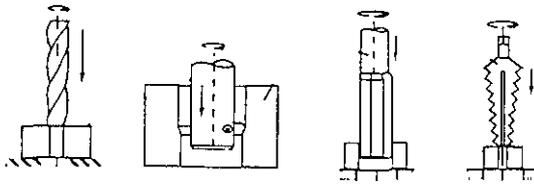


Figura 3.4. Formas comunes de barrenado.

- El fresado es similar al barrenado en el sentido que el corte es realizado por un movimiento rotatorio de la herramienta, pero en este caso el avance no es en la dirección axial de la herramienta, sino perpendicular al eje principal de ésta. En el fresado plano y de caras frecuentemente el propósito es producir superficies planas sin ningún tipo de configuración. El fresado de ranuras es común en la hechura de engranes (figura 3.5). Otras variedades incluyen el fresado de forma, el grabado de hueco y el fresado de conjunto, donde una variedad de herramientas se montan en el mismo eje rotatorio para lograr formas complejas [7, 11].

Una gran variedad de formas, desde simétricamente rotacionales hasta partes prismáticas, pueden producirse cortando con máquinas-herramientas de uno o varios bordes cortantes. Sin embargo las piezas producidas no son siempre satisfactorias en términos de calidad superficial o precisión dimensional. Para mejorar esta situación, se requiere otra clase de procesos de remoción. En éstos, que encuentran aplicación

hasta en piezas de gran dureza, la actividad se concentra en mejorar la calidad superficial y precisión dimensional más que en remover material. El esmerilado es el proceso primario en esta categoría (Figura 3.6). Otros procesos, de alta precisión son el lijado y el pulido. Éstos le proporcionan a la superficie un muy buen acabado, mas no una buena precisión dimensional (figura 3.7). [2,7,11].

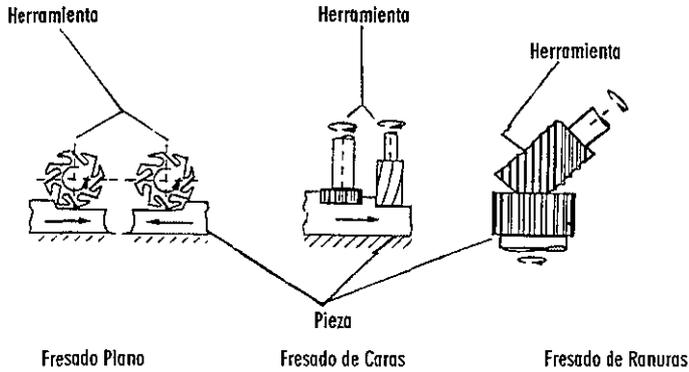
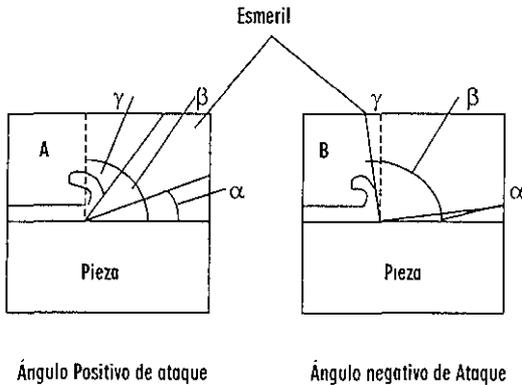


Figura 3.5. Formas comunes de fresado



α = ángulo de espacio libre
 β = ángulo de cuña
 γ = ángulo de ataque

Figura 3.6. Mecanismo básico del proceso de esmerilado

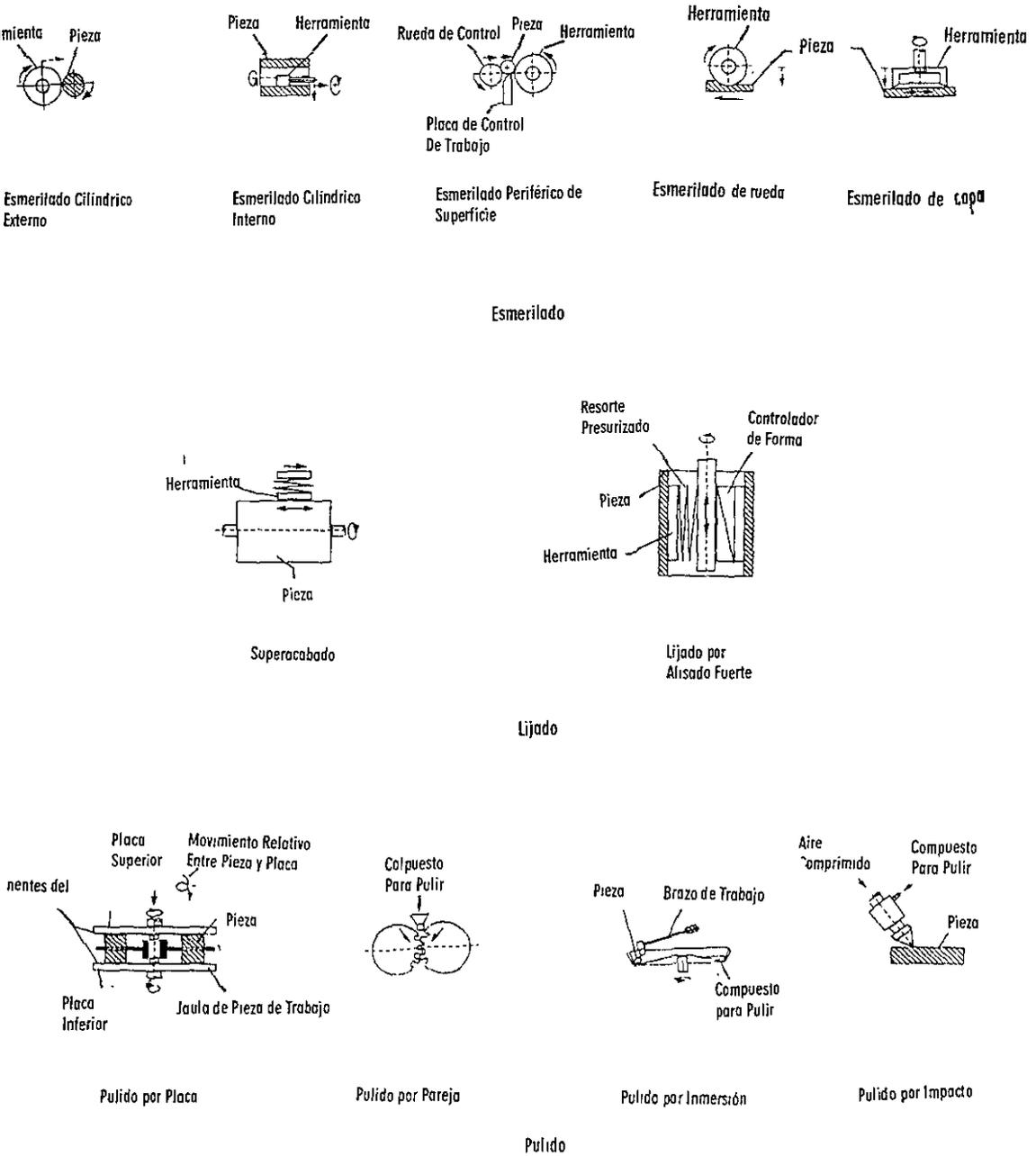


Figura 3.7. Procesos basicos de esmerilado, lijado y pulido

El costo de las operaciones de maquinado se ha investigado ampliamente, pues son extensamente utilizadas en la industria (tablas 3.2 y 3.3). Valores típicos de remoción en el maquinado LASER son entre 0.1 a 1 cm^3/min . Estos son menores que los que se logran en operaciones de torneado y fresado (1 a 50 cm^3/min), pero se comparan favorablemente con el barrenado mecánico (0.001 a 0.01 cm^3/min) y esmerilado (10-4 cm^3/min o menos). En general, hay un intercambio entre la rapidez de producción (velocidad de maquinado) y el costo para cualquier proceso (figura 3.8).

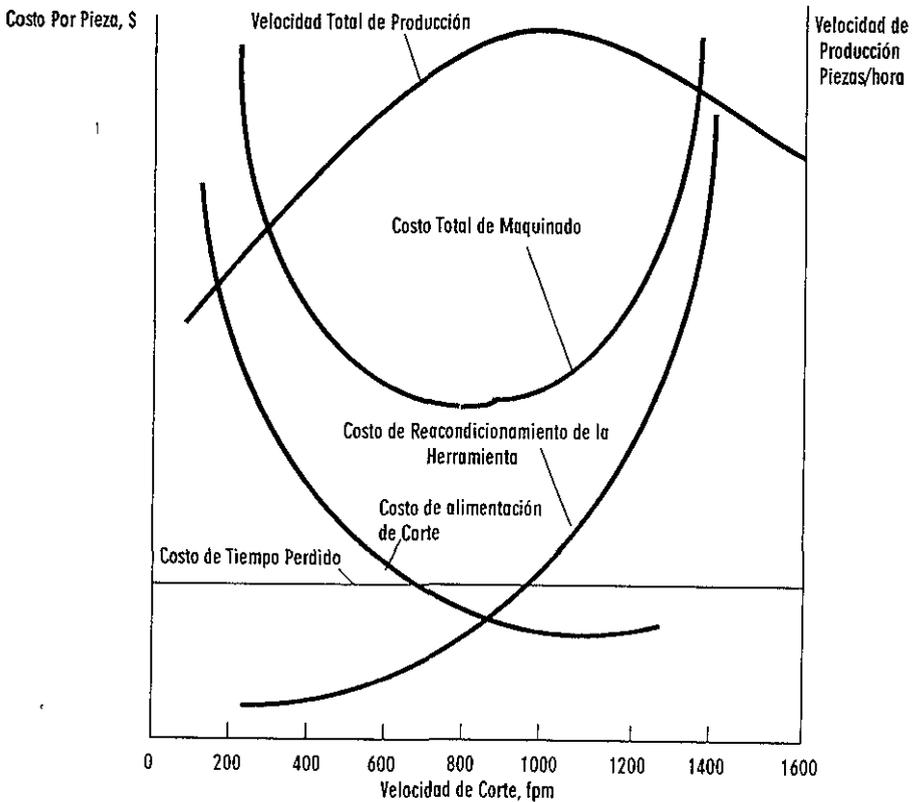


Figura 3.8 Costo de maquinado y velocidad de producción.

Tabla 3.2. relaciones de los costos de maquinado [7]

Torneado

$$C = M \left[\frac{D(L+e)}{3.82Zf_v} + \frac{R}{f} + t_1 + \frac{DL_t}{3.82Zf_v T} \right] + \frac{DL_t}{3.82Zf_v T} \left[\frac{C_p}{(K_1+1)} + \alpha_1 + \frac{C_{h_1}}{k_2} + \frac{C_e}{k_1} + C_w + \alpha_p \right]$$

Fresado

$$C = M \left[\frac{D(L+e)}{3.82Zf_v} + \frac{R}{f} + t_1 + \frac{L_t k_1}{Z f_1} \right] + \frac{1}{Z f_1} \left[\frac{C_p}{(K_1+1)} + \alpha_1 + \frac{C_{h_1}}{k_2} + \frac{Z C_e}{k_3} + C_w + \alpha_p \right]$$

Barrenado o Escariado

$$C = M \left[\frac{D(L+e)}{3.82Zf_v} + \frac{R}{f} + t_1 + \frac{L_t k_1}{Z f_1} \right] + \frac{1}{f_1} \left[\frac{C_p}{(K_1+1)} + \alpha_1 + C_{h_1} \right]$$

Atarrajado

$$C = M \left[\frac{mD(L+e)}{1.91V} + \frac{R}{f} + t_1 + \frac{L_t k_1}{Z f_1} \right] + \frac{L_t}{f_1} \left[\frac{C_p}{(K_1+1)} + \alpha_1 + C_{h_1} \right]$$

Esmerilado Centrado

$$C = M \left[\frac{D(L+e)}{3.82Zf_v} + \frac{R}{f} + t_1 + \frac{U_c L_t}{T_1} \right] + \frac{U_c}{T_1} \left[\frac{C_p}{(K_1+1)} + \alpha_1 + C_{h_1} \right]$$

Manejo y Colocación

$C = M \left[\frac{D(L+e)}{3.82Zf_v} + \frac{R}{f} + t_1 + \frac{L_t}{N} + \frac{U_c L_t}{T_1} \right]$	$\frac{L_t}{N}$	$\frac{U_c L_t}{T_1}$	$\frac{C_p}{(K_1+1)}$	α_1	$\frac{C_{h_1}}{k_2}$	$\frac{C_e}{k_1}$	C_w	α_p
I \$ Min II Tiempo de Alimentación III Tiempo de Rapidez transversal IV Tiempo de Carga y Descarga V Tiempo de Montaje VI Tiempo de Indicación de Corte VII Tiempo de Reemplazo Herramienta Sin filo VIII Coste de Depreciación de La Herramienta IX Coste de Acabado X Costo de en divarado o Reolocado de Hoja XI Costo de Insertado de Hoja XII Costo de Ruber de Esmeril XIII Costo de Remojado de Herramienta	V	VI	VIII	IX	X	XI	XII	XIII

La calidad superficial, y en general la tecnología superficial, son aspectos importantes de los procesos de remoción de material. Varios factores afectan la textura e integridad superficiales (figura 3.9). La textura superficial se refiere a la aspereza de la superficie, macroefectos tales como imperfecciones, y consideraciones geométricas tales como tolerancias. La integridad superficial se ocupa de efectos en la microestructura como lo son las microfracturas y los esfuerzos residuales. Los efectos superficiales son causados por el proceso en sí mismo, y también por las propiedades del material; éstas influyen directamente en las propiedades mecánicas de la pieza y eventualmente en la confiabilidad del componente [2,9,18]. Existen estándares industriales que internacionalmente regulan las calidades superficiales; en la tabla 3.4. se reúnen las asperezas de superficie que pueden lograrse por distintos procesos, convencionales o no. De acuerdo con los resultados, puede notarse que con aquellos procedimientos basados en la remoción térmica, como el corte con flama o el maquinado LASER, se alcanza una calidad superficial inferior que con los procesos mecánicos. Sin embargo, para algunos materiales (vidrio), la remoción con LASER genera una superficie pulida en la cortadura, de mayor perfección a la obtenida por medios tradicionales.

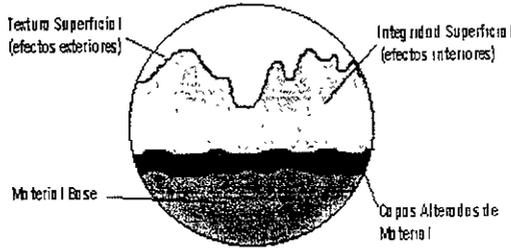
Tabla 3.3. Variables de las relaciones de maquinado [2,7,9,11,19]

Variable	Definición	Aplicaciones para operación				
		Torneado	Fresado	Barrenado	Atarrajado	Esmerilado
C	Costo por maquinar una pieza [\$/pieza]	+	+	+	+	+
C _c	Costo por insertar o desinsertar una hoja [\$/hoja]	+	+	-	-	-
C _h	Costo de adquisición de herramienta cortante [\$/cortador]	+	+	+	+	+
C _w	Costo de rueda de esmeril para reparación de herramienta [\$/cortador]	+	+	-	-	-
d	Profundidad de corte [plg]	+	+	-	-	-
D	Diámetro de trabajo en torneado, de herramienta en fresado, barrenado, abocardado, atarrajado [plg]	+	+	+	+	+
e	Viajes extra a la velocidad de alimentación, incluyendo todos los movimientos de posicionamiento [plg]	+	+	+	+	+
f _r	Alimentación por revolución [plg]	+	-	+	+	+
f _t	Alimentación por diente [plg]	+	+	+	+	+
g	Mano de obra y gastos generales del reacondicionamiento de herramienta [\$]	+	+	+	+	+
k ₁	Número de veces que el buril, o la fresa, o el mandril, o el escariador, o la tarroja se reafilan antes de desecharse.	+	+	+	+	+
k ₂	No. de veces que el buril o la fresa, se reafilan antes de insertarse; o las hojas son resolidadas o recolocadas	+	+	+	-	-
k ₃	No. de veces que las hojas (o insertos) son reafiladas (o corregidos antes de desecharse	+	+	+	+	+
L	Longitud de la pieza de trabajo en torneado y fresado, o suma de longitudes de orificios del mismo diámetro en barrenado, escariado, atarrajado [plg]	+	+	+	+	+
m	Número de cuerdas por pulgada	+	+	+	+	+
M	Trabajo y gastos generales en torno, fresadora y barrenadora [\$/min]	+	+	+	+	+
n	Exponente de vida de la herramienta en la ecuación de Taylor*	+	+	+	+	+
N ₁	No. de piezas de trabajo en el lote	+	+	+	+	+
N ₂	No. de piezas entre afilado	+	+	+	+	+
P	Cantidad de producción por hora [piezas/hora]	+	+	+	+	+
r	Velocidad transversal [plg/min]	+	+	+	+	+
R	Distancia total recorrida por la herramienta o cortador en una pasada [plg]	+	+	+	+	+
S	Velocidad de corte de referencia para una vida de herramienta de T = 1 min utó[pié/min]	+	+	+	+	+
S ₁	Velocidad de corte de referencia para una vida de herramienta de T ₁ = 1 minuto [pié/min]	+	+	+	+	+
t _b	Tiempo de resolidado de diente de herramienta, o corte de dientes, o repuesto de hojas [min]	+	+	+	+	+
t _d	Tiempo de reemplazo de cortador como en cambio de herramienta en la unidad de almacenaje [min]	+	+	+	+	+
t _f	Tiempo de corrección de un tipo a otro de cortador entre operaciones (automático o manual) [min]	+	+	+	+	+
t _l	Tiempo de carga y descarga de la pieza [min]	+	+	+	+	+
t _m	Tiempo (promedio) para completar una operación [min]	+	+	+	+	+
t _o	Tiempo para alistar para operaciones la máquina-herramienta	+	+	+	+	+
t _p	Tiempo para alistar las herramientas fuera de una máquina (en cuarto de herramientas) [min]	+	+	+	+	+
t _r	Tiempo para reafilan buril, fresa, broca, escariador o atarrajador [min]	+	+	+	+	+
T	Vida de herramienta medida en minutos para desafilan un buril [min]	+	+	+	+	+

Continúa

Tabla 3.3. Variables de las relaciones de maquinado (continuación)

Variable	Definición	Aplicaciones para operación				
		Torneado	Fresado	Barrenado	Atornillado	Esmaltado
T_n	Número de orificios por reafilado	+	+	+	+	+
T_f	Vida de herramienta medida en pulgadas del recorrido para desafilarse una broca, escariador, tarraja o un diente de fresa [plg]	+	+	+	+	+
u_c	No. de orificios de barrenado o acanalados en la pieza de trabajo	+	+	+	+	+
v	Velocidad de corte [pie/min]	+	+	+	+	+
w	Ancho de corte [plg]	+	+	+	+	+
Z	No. de dientes en fresa, cortantes o no, o canales en una tarraja	+	+	+	+	+



Textura Superficial (efectos exteriores)

Textura Superficial

- Estándares B46, 1 – 1978
- Rugosidad
- Trama

Macro efectos

- Rebabas, gotas
- Agujeros

Geometría

- Tolerancias

Integridad Superficial (efectos interiores)

- Transformaciones microestructurales
- Recristalización
- Ataque intergranular
- Zona de afectación térmica
- Microfracturas
- Alteraciones de dureza
- Deformación plástica
- Esfuerzos residuales
- Inhomogeneidades del material
- Agotamiento por impurezas

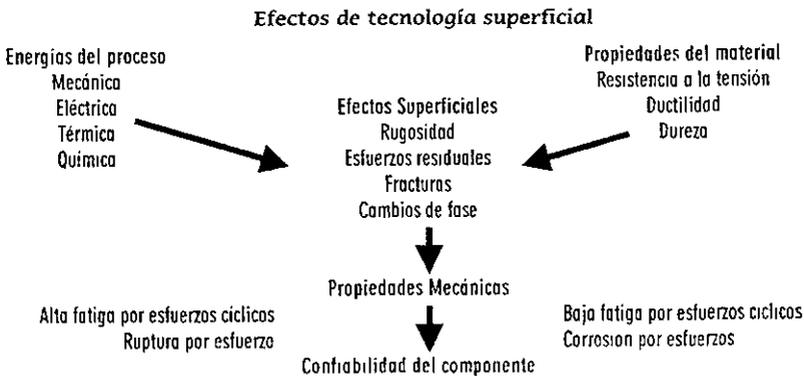


Figura 3.9. Características de la superficie maquinada [7,11]

La tabla también muestra que los procesos de fresado, torneado y barrenado abarcan un amplio rango de calidades superficiales, correspondientes a las variables usadas en la operación, lo que explica su popularidad en la industria.

Tabla 3.4. Calidad superficial para diferentes procesos de maquinado [2,7,9,11,18,19]

Proceso	Rugosidad promedio, Ra — micropulgadas (in/in), micrometros (µm)												
	2000	1000	500	250	125	63	32	16	8	4	2	1	0.5
	(59)	(25)	(12.5)	(6.3)	(5.2)	(1.6)	(0.80)	(0.40)	(0.20)	(0.10)	(0.05)	(0.025)	(0.012)
Corte con flama	☐	■	■	☐									
Rasgado	☐	■	■	■	☐								
Costura	☐	■	■	■	■	■	☐						
Cepillado, formado	☐	■	■	■	■	■	☐	☐					
Barrenado			☐	■	■	■	☐						
Fresado químico			☐	■	■	■	☐						
Maq por electrodescarga			☐	☐	■	■	☐						
Fresado	☐	☐	■	■	■	■	☐	☐					
Escariado				☐	■	■	■	☐					
Abocardado				☐	■	■	■	☐					
Haz de electrones				■	■	■	■	☐	☐				
LASER				■	■	■	■	☐	☐				
Electroquímico			☐	☐	■	■	■	■	■	☐	☐		
Taladrado, torneado	☐	☐	■	■	■	■	■	☐	☐	☐	☐	☐	
Acabado por rodillo					☐	☐	■	■	■	☐	☐		
Esmerilado electrolítico							☐	■	■	☐			
Pulido en rodillo							☐	■	■	☐			
Esmerilado				☐	☐	■	■	■	■	■	☐	☐	
Lijado							☐	☐	■	■	■	☐	☐
Electropulido							☐	■	■	■	■	☐	☐
Pulido								☐	■	■	■	☐	☐
Lustrado								☐	■	■	■	■	☐
Superacabado								☐	☐	■	■	■	☐
Vaciado en arena	☐	■	■	☐									
Laminado en caliente	☐	■	■	☐									
Forjado		☐	■	■	■	☐							
Vaciado molde permanente				☐	■	■	☐						

Continúa

Tabla 3.4. Calidad superficial para diferentes procesos de maquinado (continuación)

Proceso	Rugosidad promedio: Ra – micropulgadas (mil) / micrometros (µm)												
	2000 (59)	1000 (25)	500 (12.5)	250 (6.3)	125 (3.2)	63 (1.6)	32 (0.80)	16 (0.40)	8 (0.20)	4 (0.10)	2 (0.05)	1 (0.025)	0.5 (0.012)
Fundición en matriz				☐	■	■	☐	☐					
Estirado por presión			☐	☐	■	■	■	☐					
Laminado en frío				☐	■	■	■	☐	☐				
Troquelado					☐	■	■	☐					

■ Aplicación frecuente
 ☐ Aplicación poco frecuente

Los rangos son típicos de los procesos enlistados, pero pueden obtenerse valores más bajos o más altos bajo condiciones especiales.

* La relación entre la duración de la herramienta y la velocidad de corte es la siguiente, enunciada en 1906 por Fred W. Taylor:

$$VT^n = C$$

donde:

- V = velocidad de corte [m/min]
- T = duración de la herramienta [min]
- n = exponente dependiente de las condiciones del corte.
- C = constante = la velocidad de corte para una duración de la herramienta de un minuto [9]

El exponente n depende de las características de la pieza de trabajo, pero generalmente cae dentro de los rangos mostrados en la tabla 3.a.

Tabla 3.a Rango aproximado de valores de n para la ecuación de Taylor [2,9].

Tipo de herramienta cortante	n
Acero alta velocidad	0.08-0.12
Carburo	0.13-0.25
Cerámica	0.40-0.55

INTRODUCCIÓN AL MAQUINADO LASER.

En este capítulo se introducen los mecanismos físicos básicos en los procesos de maquinado con LASER.

4.1. Introducción.

El maquinado con LASER puede ser dividido en procesos uni, bi y tridimensionales por diferenciación de la cinemática de la erosión en el frente de corte durante la interacción haz/material. Todos los procesos de maquinado con LASER exhiben características comunes tales como formación de capa fundida, posible formación de plasma, y reflexión del haz en el frente de corte.

4.2. Maquinado LASER como un proceso uni, bi y tridimensional.

El maquinado LASER puede reemplazar métodos de remoción de material en muchas aplicaciones industriales, particularmente en el procesamiento de materiales difíciles de maquinar tales como metales endurecidos, cerámicas y compuestos. Afortunadamente, los haces LASER en sí mismos hacen posibles nuevos métodos de remoción, debido a sus únicas características.

- *El maquinado con LASER es un proceso térmico.* La efectividad del maquinado LASER depende de las propiedades térmicas y, a una cierta extensión, de las propiedades ópticas a la vez que de las propiedades mecánicas del material a maquinar. Así, los materiales con un alto grado de fragilidad o dureza y que tengan propiedades térmicas favorables tales como difusividad termal y conductividad son particularmente buenos candidatos para maquinarse con LASER.
- *El maquinado con LASER es un proceso sin contacto.* Como la transferencia de energía entre el LASER y el material ocurre a través de irradiación, no se generan fuerzas de corte, principalmente por la ausencia de

daño al material mecánicamente inducido, contacto de la herramienta y vibración de la máquina. Aún más, el material removido no está limitado por esfuerzos tales como fuerza máxima de la herramienta, formación de esfuerzos en el borde y en la herramienta.

- *El maquinado con LASER es un proceso flexible.* Al combinarse con un sistema de posicionamiento multiejes de la pieza de trabajo o un robot, el haz LASER puede ser usado para barrenado, corte, acanalado, soldadura, y tratamiento térmico en una sola máquina. Esta flexibilidad elimina la transportación necesaria para el procesado con un conjunto de máquinas especializadas. Además se logra una alta precisión en agujeros pequeños, de diámetros no conseguibles por otras técnicas.

Por consiguiente, al ser principalmente un proceso térmico tiene pocas desventajas:

- *Baja eficiencia energética.* En la mayoría de las técnicas de remoción con LASER, ésta ocurre por derretimiento o fundición del material. Este cambio de fase del material ocurre a nivel de átomo con átomo, así que el maquinado LASER requiere una significativamente alta energía de entrada y tiempos de procesamiento equivalentes al procesado mecánico. El desarrollo de nuevas tecnologías de LASER's industriales puede incrementar la eficiencia de conversión de energía eléctrica a energía del haz. Además, el desarrollo de técnicas LASER de maquinado tridimensionales provee un método de eficiencia energética de material removido con un alto grado de flexibilidad.
- *Daño al material.* Durante el maquinado con LASER, altas densidades de potencia son introducidas en la superficie de la pieza de trabajo para elevar la temperatura del volumen a ser removido al punto de fusión o vaporización. En los metales, la conducción del calor resultante de la alta densidad de energía en la pieza de trabajo crea una zona de afectación térmica en la vecindad del frente de erosión. En compuestos plásticos y matrices de polímeros, la descomposición del material puede ocurrir como resultado de las elevadas temperaturas, lo cual causa el rompimientos del polímero dentro de los residuos de carbón y productos gaseosos. [7,18]

En general, el maquinado con LASER puede ser dividido en procesos uni, bi, y tridimensionales, como se ve en la figura 4.1. La diferencia entre ellos puede ser examinada desde la configuración y la cinemática del frente de erosión, siendo esta la región en la pieza de trabajo donde tiene lugar la remoción del material. Como el haz LASER es una fuente direccional de calor, puede ser vista como una fuente lineal unidimensional con un ancho de línea igual al diámetro del haz [7,8].

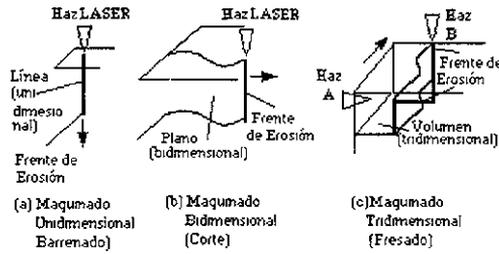


Figura 4.1. Maquinado LASER uni, bi y tridimensional.

En el caso de un proceso unidimensional (barrenado), el haz LASER es relativamente estacionario a la pieza de trabajo. El frente de erosión, localizado al final del agujero barrenado, se propaga en la dirección de la fuente lineal. En el caso de un proceso bidimensional (corte), el haz LASER está en movimiento relativo con respecto a la pieza de trabajo. La remoción del material ocurre al mover la fuente lineal en una dirección perpendicular a la de la línea de transporte, en consecuencia se forma una superficie bidimensional. El frente de erosión está localizado en el eje principal de la fuente lineal. Para un maquinado tridimensional, son usados dos o más haces LASER, y cada haz forma una superficie por el movimiento relativo de la pieza de trabajo. El frente de erosión de cada superficie se encuentra en el eje principal de cada haz LASER. Cuando las superficies se intersectan, el volumen tridimensional abarcado por las superficies es removido [7, 10, 19].

Los tres principales resultados en cualquier proceso de maquinado con LASER son:

- Velocidad de remoción del material.
- Precisión dimensional.
- Calidad superficial.

La velocidad de remoción está sujeta en cada caso a la velocidad de propagación en el frente de erosión. En el barrenado (unidimensional), la velocidad de remoción está determinada por la velocidad a la que se mueve el frente de erosión en la dirección del haz. En el corte (bidimensional), la velocidad de barrido determina la velocidad a la cual la superficie bidimensional se incrementa en la pieza de trabajo. En el maquinado tridimensional, superficies bidimensionales producidas por dos haces definen un volumen tridimensional a ser removido. La velocidad a la cual esas dos superficies se propagan determina el tiempo requerido para remover un

volumen dado de material [8,10,15].

La precisión dimensional viene determinada principalmente por el agujero a perforar con barrenado LASER, la geometría del surco, y la forma de la muesca por maquinado tridimensional. La calidad superficial para todos estos procesos de maquinado está relacionada con factores como rugosidad superficial, formación de escoria y zona de afectación térmica [7].

4.2.a. Barrenado (maquinado unidimensional).

El barrenado LASER involucra un haz estacionario con una alta densidad de potencia para derretir o vaporizar material de la pieza de trabajo. Este método es llamado muchas veces *percusión* o *barrenado centrado*. Al principio, el barrenado LASER está gobernado por un balance de energía entre la que irradia del haz y la conducción de calor en el interior de la pieza de trabajo, las pérdidas energéticas al ambiente y la energía requerida para el cambio de fase en la pieza de trabajo [16], como puede verse en la figura 4.2.

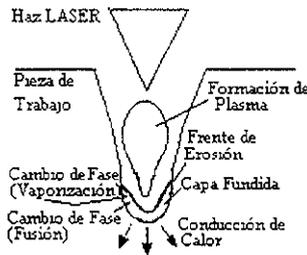


Figura 4.2. Barrenado con LASER

El haz de energía incidente tiene una distribución espacial, la cual en el barrenado con LASER usualmente es una distribución Gaussiana producida al operar en el modo TEM_{00} .

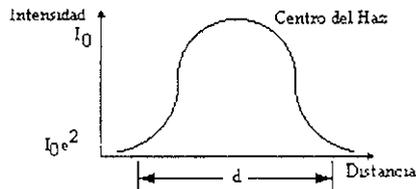


Figura 4.3. Distribución espacial de intensidad para un haz LASER en el modo TEM_{00} .

El radio del haz enfocado usualmente está especificado por la distancia entre el centro del haz y un

punto donde la intensidad se reduce del valor máximo del centro por un factor de e^2 , como se ve en la figura 4.3; el diámetro promedio del agujero barrenado puede ser menor que el diámetro del haz debido a los efectos de las pérdidas de calor. Esas pérdidas, principalmente por conducción al interior de la pieza de trabajo y al ambiente, desvían la energía del haz fuera del agujero en proceso de ser barrenado.

La conducción de calor, que ocurre como resultado de la diferencia de temperaturas entre la superficie del agujero y el interior de la pieza de trabajo, depende de la difusividad térmica del material, α , y el tiempo de interacción, t_i , y ambos definen la profundidad de penetración térmica:

$$\delta = \sqrt{\alpha t_i} \quad (4.1)$$

Las pérdidas energéticas ocurren debido a varios fenómenos físicos durante el maquinado:

- Si el proceso de remoción de material involucra fundición, el material fundido puede acumularse en los lados y fondo del agujero, causando que la energía del LASER se pierda de dos maneras. Primero, ésta puede gastarse al supercalentar el material fundido acumulado en el agujero alrededor del punto de fusión. Segundo, en el barrenado a percusión, en el que se barrena con una secuencia de pulsos, el material fundido puede resolidificarse entre pulsos sucesivos; siendo así, una porción de la energía del haz es gastada para refundirlo.
- La formación de plasma puede ocurrir cuando el material es vaporizado. Una nube opaca se forma frecuentemente alrededor de la zona de interacción. Esta nube absorbe parcialmente la energía del haz e incrementa su temperatura hasta que se forma un plasma. En algunos casos, el plasma calentado actúa como una segunda fuente de calor que mejora el proceso de barrenado. No obstante, la direccionalidad del plasma es difícil de controlar, y causa problemas de precisión dimensional. El uso de un gas inerte de apoyo puede ayudar a reducir la formación de plasma por remoción de los desechos vaporizados en el trayecto del haz.
- La absorción de la energía del haz depende tanto de la longitud de onda de la radiación LASER como de las características de la absorptividad espectral del material procesado. Algunos metales como el aluminio y el cobre exhiben una alta reflectividad para la radiación de $10.6 \mu\text{m}$ del LASER de CO_2 . También, para metales y cerámicos, la presencia de capas de material fundido cambia el valor de la absorptividad. Además, la absorptividad de una superficie depende de su orientación con respecto a la dirección del haz. El valor máximo de la absorción de la energía de éste se alcanza a ángulos de incidencia de alrededor de los 80° . La pieza de trabajo no absorbe la energía si es reflejada en una dirección diferente de la energía de ingreso. Para

orificios profundos, pueden ocurrir múltiples reflexiones del haz a lo largo de las paredes, dando por consecuencia el decremento de la disponibilidad de energía para remover material.

- El uso del chorro de gas durante el barrenado con LASER puede ayudar a enfriar el frente de erosión por transferencia convectiva de calor. En situaciones en las que se utiliza gas a alta presión en el proceso "en tándem" con un haz LASER, un flujo supersónico de gas se forma y la disipación térmica del chorro puede volverse significativa. Con un incremento de la disipación térmica, se requiere más energía del haz para mantener la temperatura de fusión/vaporización en el frente de erosión. [4,7,16].

El barrenado con LASER presenta varias ventajas sobre los métodos mecánicos:

- Debido a la naturaleza térmica del proceso, los orificios pueden ser hechos en materiales difíciles de maquinar por los métodos convencionales, tales como cerámicas, metales endurecidos y compuestos.
- Mayores precisiones y menores dimensiones pueden ser alcanzadas con barrenado LASER que con métodos convencionales. Dependiendo de los lentes usados para el enfoque, pueden lograrse orificios de entre 0.018 y 1.3 mm de diámetro. Con una apropiada selección de valores de la potencia del haz, características de pulsado, lentes de enfoque y tiempo de interacción, puede obtenerse la geometría deseada del orificio.
- Grandes volúmenes de barrenado pueden lograrse usando una fuente de LASER pulsado. Coordinando los movimientos de la pieza de trabajo con el periodo de pulso, valores de barrenado de alrededor de 100 orificios por segundo pueden lograrse. El control de las variables del proceso permite rápidos cambios en la forma y el tamaño de los orificios, eliminando de esta manera el cambio de herramientas.
- El LASER permite el barrenado de orificios a grandes ángulos de incidencia con la superficie (más de 80 °). El barrenado a ángulos pequeños se dificulta pues se producen deflexiones de la herramienta.

El barrenado con LASER tiene en algunos casos limitaciones, por ejemplo:

- No pueden barrenarse con LASER orificios escalonados.
- Debido a inestabilidades en el proceso, el control de profundidad en orificios sin salida es difícil. No obstante, el monitoreo continuo del modo del haz y su regulación de potencia pueden proveer beneficios substanciales cuando se incorporan en forma de controles en el sistema LASER.
- En orificios profundos, los efectos de la divergencia del haz pueden volverse inaceptables. Esto puede compensarse usando un lente con una longitud focal larga o por un movimiento continuo del punto focal de

la superficie de la pieza de trabajo a un punto en el interior de la misma. [16].

Hay distintas variaciones en el proceso de barrenado. Los valores de remoción de material barrenado en metales pueden incrementarse substancialmente introduciendo un gas reactivo para mejorar el proceso de corte. En este caso, las reacciones químicas entre el material de la pieza de trabajo y el gas se convierten en un importante mecanismo secundario de remoción. Un inconveniente de este proceso es que mientras que el haz LASER es una fuente direccional de calor, las reacciones químicas tienden a propagarse en todas direcciones y el control dimensional de las reacciones del proceso es pobre. Los orificios de diámetro grande (de más de 1.3 mm) pueden producirse con un método de trepanado o taladrado en el que el haz escanea o barre una trayectoria circular para obtener la geometría final. Esta es actualmente una técnica de corte circular continuo, con la velocidad de maquinado determinada por la velocidad de barrido del haz. [7]

4.2.b. Corte (maquinado bidimensional).

En el proceso de corte con LASER, éste se produce por el movimiento relativo entre el haz y la superficie de la pieza. Este proceso permite cortar la pieza de trabajo en intrincadas formas bidimensionales. Los mecanismos físicos de remoción del material y las pérdidas de energía son similares a aquellas del barrenado, donde la energía de entrada del haz está balanceada por la conducción de calor, la energía para fundir o vaporizar el material y las pérdidas al medio ambiente, como se muestra en la figura 4.4. No obstante, debido al movimiento relativo haz/pieza de trabajo, el frente de erosión formado al frente del haz y el campo de temperatura en la pieza de trabajo son estacionarios con respecto al sistema coordinado de movimiento con el haz LASER, en consecuencia, puede considerarse como un proceso térmico de estado estable [7,8].

Puesto que el espesor de la pieza es igual a la profundidad de corte, la conducción del calor ocurre en el plano de ésta. La temperatura en su interior depende de la distancia del frente de erosión y es independiente del tiempo. Cuando el material es removido por derretimiento, una capa fundida forma el frente de erosión. El material fundido acumulado puede expelerse del fondo de la cortadura con la ayuda de un chorro coaxial de gas.

A consecuencia de la característica única del haz LASER, el corte por este medio tiene varias ventajas:

- Para la mayoría de los materiales industriales de espesores superiores a 10 mm, el corte con LASER produce un significativamente mayor volumen de material removido que con los métodos convencionales.

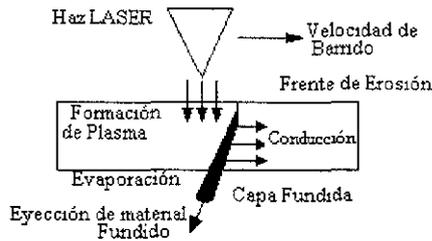


Figura 4 4. LASER de corte continuo.

- El LASER produce cortes de espesores más angostos que los alcanzados con corte mecánico. Esto da como resultado una menor cantidad de material desperdiciado durante la operación.
- Al acoplar el haz o la pieza de trabajo con un sistema de posicionamiento multiaxial, pueden cortarse piezas de forma curva. Los métodos convencionales de maquinado pueden lograr efectivamente sólo cortes rectos. Los LASER's pueden aplicarse a operaciones de alisado para remover quemaduras o rebabas de partes curvas.
- Para cortes de materiales fibrosos como la madera, papel o compuestos, El haz LASER vaporiza el material removido, eliminando así residuos que quedan después de un corte mecánico. Esto reduce la cantidad de desechos sólidos contribuyendo así a evitar riesgos a la salud en el ambiente de trabajo.

Los inconvenientes del corte con LASER en comparación con los métodos convencionales son:

- La efectividad del corte se reduce al incrementarse el espesor de la pieza de trabajo. Las piezas de espesores mayores de 15 mm generalmente no pueden cortarse efectivamente con los LASER's industriales modernos.
- El corte con LASER produce una forma ahusada de la cortadura, comparada con las paredes verticales rectas logradas por métodos convencionales. La cortadura ahusada es el resultado de la divergencia del haz y se torna más pronunciado al incrementarse el espesor de la pieza de trabajo. Este fenómeno puede reducirse ajustando el punto focal del haz en el interior de la pieza de trabajo en lugar de hacerlo en la superficie. [4,7,19]

4.2.c. Torneado/fresado (maquinado tridimensional).

Se ha desarrollado un concepto de remoción tridimensional para hacer el maquinado con LASER más aplicable a remover mayores volúmenes de material. En este método se utilizan dos haces intersectados. Cortando continuamente por lados distintos, cada haz crea un surco cerrado en la pieza con una o múltiples pasadas. Un volumen de material se remueve cuando los dos surcos de intersectan. La operación de torneado puede

completarse con remoción anular o remoción helicoidal (fig. 4.5). El método de remoción anular utiliza dos haces perpendiculares para remover anillos concéntricos de la pieza. El método de remoción helicoidal usa dos haces con una cierta inclinación para crear un filete continuo. La energía solamente se gasta al fundir y/o vaporizar el material en dos surcos, y el volumen removido o viruta no requiere gasto de energía.

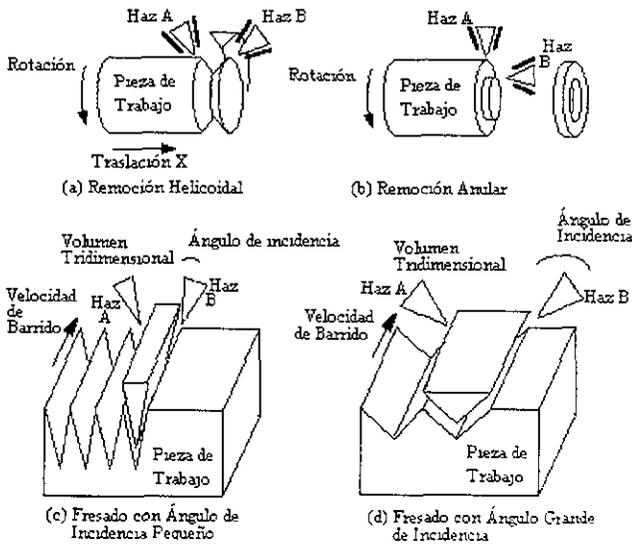


Figura 4.5. Maquinado tridimensional con LASER.

En consecuencia, la cantidad de material removido por unidad de energía consumida en este proceso tridimensional es significativamente mayor que en el proceso de un solo haz.

En el caso del fresado con LASER, dos haces se posicionan en ángulos oblicuos de la superficie de trabajo para producir surcos convergentes en la pieza. El volumen de material removido es de forma prismática con una sección transversal triangular. Usando ángulos de incidencia pequeños entre la dirección del haz y en dirección perpendicular a la superficie, pueden removerse grandes volúmenes de material pero la parte resultante tendrá un acabado superficial áspero. Para ángulos de incidencia grandes, la cantidad de material removido se reduce, pero la calidad de la superficie mejora.

La cantidad de material removido por los procesos tridimensionales está relacionada con la profundidad de cada surco. La profundidad de surco define el límite del volumen de material removido y la velocidad de barrido define la rapidez a la cual este volumen se forma en la pieza de trabajo. La calidad superficial está

relacionada con la zona de afectación térmica y la rugosidad superficial a la superficie del surco durante la interacción haz/material. La precisión dimensional se relaciona particularmente al ángulo ahusado para cada uno de los dos surcos.

En el proceso de surcado LASER, el surco es producido por barrido de un haz sobre la superficie de trabajo. A diferencia del corte continuo, el haz no penetra a todo el espesor de la pieza. Los mecanismos físicos de este proceso son similares a los de barrenado y corte.

Al igual que con el surcado LASER, con el marcaje al LASER se crea un surco cerrado en la superficie de la pieza de trabajo. Sin embargo, en el segundo proceso la relación entre la profundidad del surco y el ancho es cercana a la unidad, y las profundidades del surco son típicamente muy pequeñas.

El maquinado tridimensional, surcado y marcado, con LASER, presenta las ventajas siguientes con respecto a las técnicas convencionales:

- El maquinado tridimensional con LASER permite desarrollar operaciones de torneado, roscado y fresado en materiales difíciles de maquinar debido a la alta dureza, fragilidad y abrasividad.
- Los LASER's pueden usarse para marcar patrones permanentes de identificación en partes metálicas o cerámicas. Las identificaciones marcadas con LASER pueden soportar mayor cantidad de desgaste de las marcadas con otros métodos.
- Como los LASER's pueden enfocarse en un punto muy pequeño, son ideales para aplicaciones de micromaquinado como reparar componentes defectuosos de circuitos integrados que de otra manera serían desechados.

Por otro lado, estos métodos tienen las siguientes desventajas:

- Cuando se aplican a metales y cerámicos, el resultado de estos procesos es una acumulación de material fundido en el frente de erosión. Sin embargo, a diferencia del proceso de corte LASER, un chorro coaxial de gas no es efectivo para eyectar el material fundido debido a su presencia del fondo del surco. La utilización en cambio de un chorro no axial puede minimizar la capa fundida.
- La profundidad del surco puede fluctuar a causa de disturbios producidos por cambios en el haz, vibraciones mecánicas, impurezas del material y fluctuaciones en el chorro de gas. En el maquinado tridimensional, las desigualdades en el fondo del surco pueden reducir la calidad superficial y la resistencia mecánica de partes delicadas. La consistencia en dicha profundidad se puede mantener usando un arreglo de control cerrado.

[7.19].

ANÁLISIS DEL MAQUINADO LASER.

En este capítulo se presentan los resultados de los más importantes trabajos teóricos de calentamiento superficial, barrenado, corte, surcado y maquinado tridimensional encontrados en la literatura reciente, los cuales se basan en un entendimiento de la física de la interacción LASER/material.

5.1. Introducción.

Los modelados de procesos son necesarios para elegir los parámetros de operación correctos e implementar un control cerrado. Estos trabajos vinculan el modelado analítico y numérico para encontrar relaciones entre los parámetros de operación, distribución de temperatura y geometría del frente de erosión. Los fenómenos que ocurren durante el proceso del maquinado LASER tales como formación de plasma, creación de estrías y cambios en la absorción superficial de la energía del haz son explicados también en un contexto teórico.

El modelado en un proceso de manufactura, o la descripción matemática de un fenómeno físico ocurriendo durante el proceso, son elementos importantes para su operación exitosa. De este modo, los modelos del proceso pueden contribuir a engrandecer la optimización y el control del proceso de manufactura. La creación de descripciones matemáticas para procesos de manufactura es una tarea compleja puesto que usualmente estos procesos involucran varios de mecanismos físicos, algunos más importantes que otros.

Un esquema controlado para maquinado LASER (Fig. 5.1) requiere sensores de modelo, o enlaces entre las variables medidas tales como emisión acústica, temperatura y mediciones ópticas, con variables de estado tales como la profundidad del corte o fondo del orificio. También se requiere una estrategia de control que involucre un modelo del proceso de maquinado con LASER para que relacione las variables de estado y sus fluctuaciones para modificar las variables establecidas.

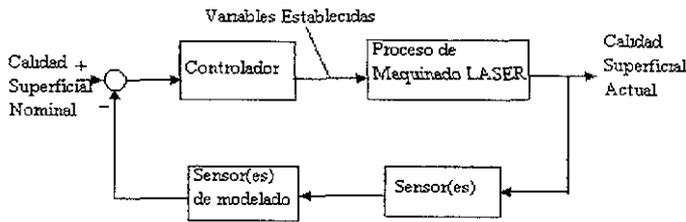


Figura 5.1. Esquema del proceso de control para maquinado LASER.

Cualquier proceso de maquinado LASER involucra la formación de un frente de erosión (Fig. 5.2), donde la interacción del haz LASER con el material de la pieza de trabajo resulta en la remoción de dicho material.

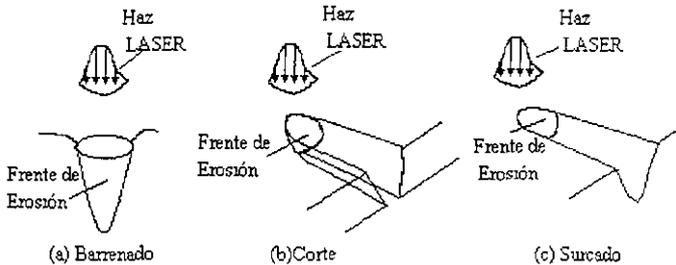


Figura 5.2. Esquemas de los procesos de barrenado, corte y surcado

La potencia del haz LASER, el material de la pieza de trabajo y un buen número de otros factores tienen influencia sobre la forma y la velocidad de propagación del frente de erosión (Fig. 5.3).

Cuando el haz radia la superficie de la pieza de trabajo, el material se calienta debido a la absorción de fotones, y si la densidad de potencia del haz incidente es bastante alta, ocurre un cambio de fase, tornando el material sólido en líquido o vapor. La zona que ha sufrido la transformación de fase y cuya temperatura ha subido actúa como una fuente de calor, y lo transfiere al resto del material y al ambiente por conducción, convección y radiación. En el caso de una alta densidad de potencia, el material puede ser vaporizado y la energía absorbida adicionalmente por el vapor puede contribuir a formar plasma que actúa a la vez como absorbente de energía y como fuente de calor.

Este plasma puede cubrir el frente de erosión, tapándolo parcialmente del incremento de radiación LASER, mientras que bajo la capa superficial aumenta la temperatura y puede fundir o vaporizar, creando una explosión bajo la superficie que remueve el material.

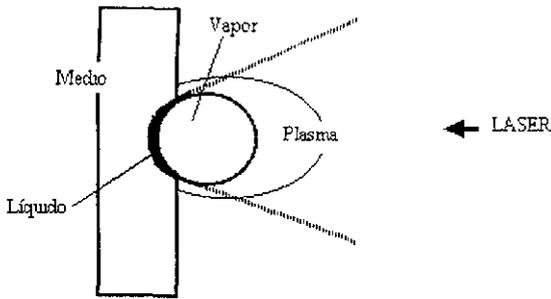


Figura 5.3. Haz LASER interactuando con el medio.

Este fenómeno observado experimentalmente puede ser o no significativo, dependiendo específicamente del proceso o del material; no obstante, todos los procesos de maquinado LASER involucran transferencia de calor.

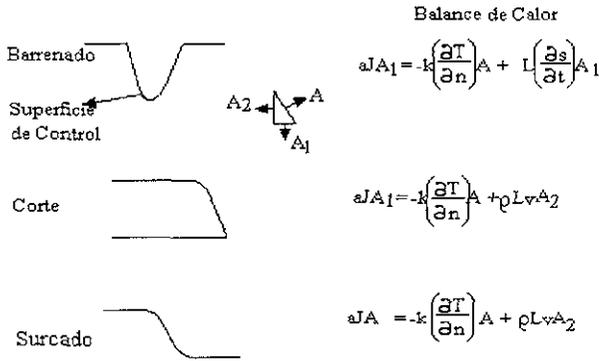
5.2. Modelado del proceso LASER.

Ejemplos de procesos con remoción de material son barrenado, corte y surcado. Estos procesos difieren del de soldadura en que el material se remueve de la pieza en forma de líquido o vapor. El barrenado es por naturaleza un proceso no estacionario. Hasta que la superficie de la pieza de trabajo llega al punto de transición, se remueve el material. Al suceder esta remoción, la temperatura se distribuye dentro de la pieza y la forma del orificio cambia continuamente al incidir en él un haz LASER cuyas coordenadas son fijas. En el corte y el surcado, la forma del corte no cambia respecto a un sistema coordenado fijo al haz; así que el corte y el surcado pueden ser tratados como procesos estacionarios.

Puede establecerse un modelo general para los procesos de maquinado LASER. Este modelo desarrollado en [7] se basa en un balance de calor del frente de erosión y un cálculo de temperatura en el interior de un material, de la ecuación de la conducción de calor.

La figura 5.4 muestra los tres procesos y sus balances de calor en las superficies de los frentes de erosión. El balance del barrenado contiene un término de no estabilidad, $\partial s/\partial t$, puesto que la remoción local de material depende de la intensidad del haz LASER y de la conducción de calor.

Para controlar el proceso, son necesarias relaciones simples entre la profundidad de corte y las variables de este proceso. Se presenta la base de un modelo general para los tres procesos. Ellos involucran características de transferencia tridimensional de calor. Para desarrollar relaciones analíticas simples deben ser hechas simplificaciones.



donde:

K = conductividad térmica del sólido ρ = densidad del material
 T = temperatura v = velocidad de barrido
 L = calor latente de fusión J = intensidad del haz
 s = profundidad de barrenado n = coordenada normal a la superficie de corte

Figura 5.4. Balances de calor y superficies de control para los tres procesos.

Por ejemplo, En el barrenado la dirección de éste es dominante sobre otras direcciones. Debido a la presencia de una superficie al fondo del corte que se comporte como una frontera adiabática, la conducción de calor es bidimensional (la conducción inclinada es insignificante comparada con las de otras direcciones). Así, el barrenado y el corte son tratados como procesos unidimensional y bidimensional, respectivamente. Cuando una capa fundida es de un espesor insignificante, la potencia absorbida del haz se usa tanto para fundir material como para ser conducida dentro del sólido.

5.2.a. Barrenado.

En el barrenado LASER el movimiento del frente de erosión y la distribución de temperatura con respecto al tiempo tienen un efecto significativo en la absorción superficial de energía del haz. Se ha encontrado que la absorptividad, junto con la intensidad del haz, son los factores más importantes el proceso de barrenado.

Para densidades de potencia del LASER bajo el valor de umbral (300 J/cm^2 para el cobre), la superficie de la mayoría de los metales muestra una alta reflectividad al haz y no ocurre la remoción. Durante los estados iniciales de la interacción haz/material, la reflectividad superficial es dependiente del tiempo, puesto que la inclinación de la pared del orificio cambia rápidamente con el tiempo. Durante este estado, una porción significativa de la energía del haz incidente es reflejada del frente de erosión. Al transcurrir el tiempo, la

absorsibilidad se incrementa y alcanza el valor final, porque la inclinación del contorno del agujero no cambia significativamente con el tiempo.

Para densidades de energía arriba del umbral, el barrenado ocurre pero puede ser dificultado por la formación de plasma u ondas de detonación LASER sustentada (DLS). Las ondas DLS se producen cuando el plasma formado en el orificio se acopla con una onda de choque. La onda de choque provee de un número suficiente de electrones para iniciar una descomposición del gas por detrás de ella, lo cual causa la absorción de toda la radiación LASER por un mecanismo de descomposición de las ondas coherentes. De este modo, la efectividad del barrenado LASER depende de la rápida disipación de las ondas DLS para minimizar sus efectos. Un modelo que relaciona la fracción de energía LASER requerida para crear un cráter de dimensiones dadas se establece por:

$$\alpha = y[xQ_v + (1 - x)Q_f] \tag{5.1}$$

donde α es la fracción de la energía del haz necesaria para crear un cráter un cráter de un volumen dado, Q_v y Q_f son las energías de vaporización y derretimiento por unidad de volumen de material, y y es la proporción requerida de energía para fundir o vaporizar el volumen del cráter por pulso de energía y x es una estimación de la fracción de material vaporizado vs. fundido. Un factor de utilización para energía LASER puede ser expresado como:

$$\eta = \int_{t_0}^{\infty} (1 / E_p) P(t) dt \tag{5.2}$$

donde η es el factor de utilización, E_p es el pulso de energía, $P(t)$ es la potencia del haz y t_0 es el tiempo de disipación de la onda DLS. El factor de utilización muestra la fracción de energía del haz que es ocupada realmente en el frente de erosión. La eficiencia del barrenado LASER está relacionada con la minimización de t_0 . Un método para reducir el tiempo de propagación de las ondas DLS es usar lentes de enfoque con una longitud focal pequeña. Esto permite un punto enfocado más pequeño y se alcanza una mayor intensidad del haz. Otro método es usar un gas de baja densidad en lugar de aire para el chorro coaxial.

Usualmente se barrena con un LASER pulsado, el cual produce una mayor intensidad de potencia y evapora fácilmente el material. El LASER pulsado produce un gradiente de temperatura amplio en el interior del material a causa de su alta densidad y corto tiempo de interacción. Esto causa un gran esfuerzo térmico que produce a fracturas en el material. Más aún, en el barrenado el material está inicialmente a una temperatura constante.

Para obtener un modelo utilizable y que resuelva el problema, se necesita asumir lo siguiente:

1. La intensidad del haz LASER es suficiente para causar vaporización en la superficie del material.
2. El gas creado por la vaporización del material es transparente a la energía incidente del LASER.
3. Las pérdidas de calor por radiación son insignificantes.
4. Las constantes térmicas y el coeficiente de absorción óptica b son independientes de la intensidad del haz y de la temperatura del sólido.
5. Los efectos de la conducción radial de calor y la fase líquida pueden ignorarse. Esto es cierto generalmente para materiales en los cuales la profundidad de penetración térmica es menor que el diámetro del haz.

El barrenado puede dividirse en dos estados: estado de calentamiento y estado de barrenado. (fig. 5.5) En el estado de calentamiento, la temperatura de la pieza de trabajo se incrementa más allá de la temperatura de transición de fase por la interacción del haz. Este estado es usualmente muy corto porque la intensidad del haz es muy alta. En el estado de barrenado, la profundidad del orificio se incrementa por la remoción de material.

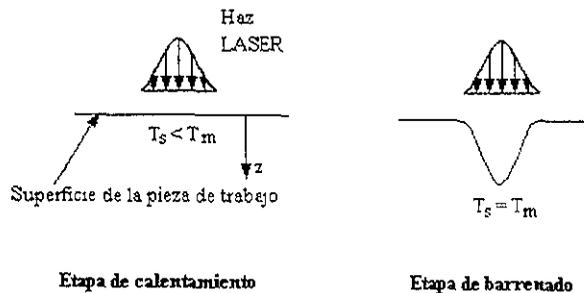


Figura 5.5. Estados de calentamiento y barrenado.

Durante el estado de calentamiento, la superficie de la pieza no es corroída térmicamente. Es difícil obtener una solución analítica simple para barrenado como un proceso no estacionario con características de transferencia tridimensional de calor. De este modo, se asume que es un proceso unidimensional y que la intensidad del haz es uniforme. Las condiciones de frontera son:

en $z = 0$,

$$-k \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=0} = J_0 \quad (5.3)$$

en $z \rightarrow \infty$,

$$T = T_0 \quad (5.4)$$

donde T es la temperatura, k la conductividad térmica del sólido y z la profundidad a la que el material es removido. Dadas esas dos condiciones de frontera, la distribución de temperatura en el interior de la pieza puede desarrollarse de la ecuación (5.4) como:

$$T - T_0 = \frac{2J_0}{k} \left(\frac{\alpha t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} e^{-z^2/4\alpha t} - \frac{J_0 z}{k} \left(1 - \operatorname{erf} \frac{z}{2(\alpha t)^{\frac{1}{2}}} \right) \quad (5.5)$$

donde α es la difusividad térmica, J_0 es la intensidad del haz y erf es el error funcionl. Esta distribución de temperatura es válida bajo la condición $(\alpha t)^{1/2} < R$ (siendo R la reflectividad superficial del frente de erosión), la cual puede alcanzarse por bajas difusividades o pequeños tiempos de barrenado. El tiempo para que la superficie de la pieza de trabajo alcance la temperatura de transición de fase T_s puede determinarse de la ec. (5.5). Aplicando $T = T_s$ en $z = 0$, puede obtenerse la siguiente relación:

$$T_s - T_0 = \frac{2J_0}{k} \left(\frac{\alpha t}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.6)$$

La duración del estado de calentamiento puede calcularse como:

$$t_h = \frac{\pi}{\alpha} \left(\frac{k(T_s - T_0)}{2J_0} \right)^2 \quad (5.7)$$

donde t_h es el tiempo de calentamiento. Durante este estado, no es hecho el orificio porque no ocurre la transición de fase. Después de que la temperatura superficial alcanza el punto de derretimiento, el barrenado comienza.

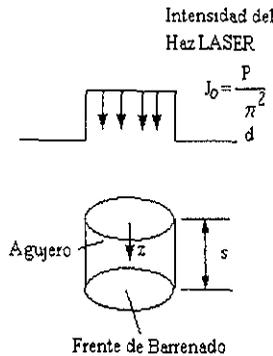
Para determinar la profundidad del orificio en función del tiempo y las variables del proceso, se considera un análisis unidimensional. La figura 5.6 muestra el barrenado unidimensional. Se asume una intensidad uniforme del haz de distribución $J_0 (=P/\pi d^2)$.

El balance de calor en el frente de erosión puede expresarse como

$$aJ_0 = \rho L \frac{\partial s}{\partial t} - k \left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=0} \quad (5.8)$$

donde a es la absorbilidad del material, ρ es la densidad, L es el calor latente de fusión, k es la conductividad térmica, T es la temperatura y s es la profundidad de barrenado. Para determinar la velocidad de barrenado ($\partial s / \partial t$), el gradiente de temperaturas en el frente de barrenado debería conocerse. La distribución de temperatura dentro del sólido está regida por la siguiente ecuación de conducción, donde α es la difusividad térmica.

$$\frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (5.9)$$



P = potencia de alimentación

Figura 5.6 Barrenado unidimensional.

La ecuación de la conducción de calor puede simplificarse:

$$-\frac{1}{\alpha} \left(\frac{\partial s}{\partial t} \right) \frac{dT}{dz} = \frac{d^2 T}{dz^2} \quad (5.10)$$

Las condiciones de frontera son:

$$T = T_s \text{ cuando } z = 0 \quad (5.11)$$

$$T = T_s \text{ cuando } z \rightarrow \infty \quad (5.12)$$

Aplicando estas condiciones, la ecuación (5.10) puede resolverse para la distribución de temperatura dentro del sólido.

$$\frac{T - T_0}{T_s - T_0} = e^{-\frac{1}{\alpha} \left(\frac{ds}{dt} \right) z} \quad (5.13)$$

El gradiente de temperatura en el frente de barrenado puede calcularse por

$$\left(\frac{dT}{dz} \right)_{z=0} = -\frac{1}{\alpha} \left(\frac{ds}{dt} \right) (T_s - T_0) \quad (5.14)$$

Substituyendo este gradiente en el balance de energía se tiene

$$aJ_0 = \rho L \left(\frac{ds}{dt} \right) + \rho c_p \left(\frac{ds}{dt} \right) (T_s - T_0) \quad (5.15)$$

La velocidad de barrenado puede expresarse como

$$\frac{ds}{dt} = \frac{aJ_0}{\rho(L + c_p(T_s - T_0))} \quad (5.16)$$

La profundidad del orificio puede determinarse integrando la ecuación anterior:

$$t \leq t_h \quad s = 0$$

$$t > t_h \quad (5.17)$$

$$s = \frac{aJ_0(t - t_h)}{\rho(L + c_p(T_s - T_0))} = \frac{4aP(t - t_h)}{\pi\rho d^2(L - c_p(T_s - T_0))} \quad (5.18)$$

Finalmente, se demuestra que la profundidad del orificio es proporcional a la potencia del haz LASER y a su tiempo de interacción.

5.2.b. Corte.

El corte es el proceso de maquinado LASER más ampliamente usado. En este proceso el LASER penetra en todo el espesor de la pieza y avanza paralelo a su superficie. Dependiendo de la fase del material removido, el corte con LASER puede dividirse en dos tipos: sublimación y corte por fusión. En el caso del corte por sublimación, el material es vaporizado; la sublimación usualmente es alcanzada en materiales con bajas temperaturas y calores de vaporización (tales como plásticos) y/o aplicando altas densidades de energía generada por LASER's pulsados de estado sólido. Para el corte por fusión, el material es derretido en el frente de erosión y eyectado de la cavidad con la ayuda de un chorro de gas inerte. Si es usado un chorro de gas reactivo como el oxígeno, el proceso es llamado corte asistido por gas reactivo. En este caso, las reacciones químicas entre el chorro de gas y el material sirven como un significativo mecanismo secundario para remoción del material. En algunos casos en los que el chorro de oxígeno es aplicado al corte de acero, las reacciones de oxidación pueden volverse el primer modo de remoción; el proceso se torna similar al corte con arco de plasma.

Un objetivo del corte con LASER es lograr el valor más alto de material removido a la mayor velocidad posible para un espesor dado de la pieza. En vez de sustentarse en la corrección experimental de relaciones entre la profundidad de corte para los parámetros LASER y las propiedades del material, los modelos pueden ser usados para describir la física del proceso de corte con LASER. En trabajos experimentales, se ha desarrollado un modelo de corte basándose en la absorción calculada sobre la cavidad de corte. También una relación entre la densidad de potencia incidente en un material y la velocidad resultante de corte es desarrollada en términos de las propiedades térmicas del material. La teoría en ese trabajo indica que para maximizar la velocidad de corte y la utilización de energía, el diámetro del chorro debería ser tan pequeño como su consistencia sea posible con una densidad de potencia alcanzable. Un modelo del frente de erosión por LASER se formuló basado en un balance entre la potencia absorbida del haz, la potencia para fundir el material y las pérdidas de calor por conducción. En este modelo se asumen varios puntos. Primero, el ancho de la cavidad se toma como una constante del diámetro del haz. Segundo, las líneas de contorno del frente de erosión pueden describirse como semicírculos de radio igual al radio del haz. Tercero, el ángulo de inclinación del frente de erosión es constante y

determinado experimentalmente. Finalmente, se asume que el frente de erosión tiene una inclinación lineal. El modelo determina el efecto causado en la forma del frente de erosión por la potencia del haz, su polarización, el modo del LASER, la longitud focal, del diámetro del haz y la posición focal.

Un chorro coaxial de gas usualmente se utiliza en apoyo al haz para proteger las lentes de enfoque y remover el material fundido y el plasma durante el corte. Las fuerzas ejercidas por el chorro de gas en la capa fundida fueron investigadas teóricamente resolviendo las ecuaciones de movimiento del flujo de gas. Se reportó que el momento se transfiere del chorro de gas al frente de erosión por un gradiente de presión y fricción, y ambos efectos son del mismo tipo. Se asumió que el flujo de gas es laminar dentro de la cavidad de corte siendo que es subsónico. Esta asunción no es propia, puesto que para la mayoría de las presiones de operación del chorro de gas el flujo es supersónico.

Para investigar las relaciones apropiadas entre la velocidad de corte, la potencia del LASER y el espesor de la pieza de trabajo, se propone un modelo basado en que la remoción del material ocurre en una primera superficie vertical de la momentánea superficie de corte (frente de erosión) [7]. El frente de erosión se cubre con una capa líquida y se asocia con una capa fundida (fig. 5.7). Ésta última se calienta por la radiación absorbida del LASER con una reacción entre las partículas colisionantes del gas y el material fundido, y enfriada por vaporización y por la eyección del material líquido bajo la superficie la pieza, por la conducción de calor y por fundición de material sólido a causa del movimiento del fin de corte en la dirección de la velocidad de corte. La remoción de material tiene lugar vía eyección de material fundido y por evaporación de la superficie fundida.

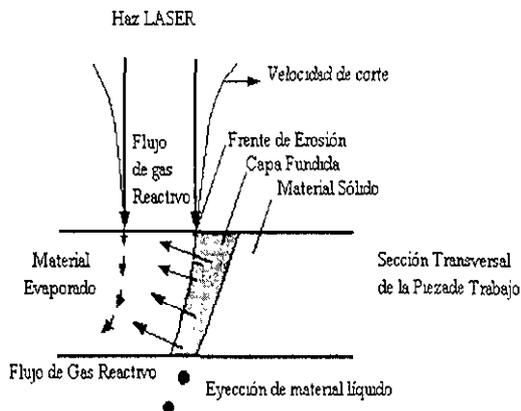


Figura 5.7. Mecanismo físico de corte LASER asistido por gas reactivo.

Un análisis matemático del corte con gas reactivo requiere una colección de relaciones constitutivas de

transferencia de calor y mecánica de fluidos. Tales relaciones incluyen balances para el gas y partículas de material en la capa fundida, la ecuación de la conducción de calor, la energía, momento y balance de masa de la capa líquida.

Para lograr un entendimiento cuantitativo de el efecto de los diferentes parámetros del proceso en el corte, puede estudiarse la superficie de control infinitesimal del frente de erosión mostrada en la figura 5.8.

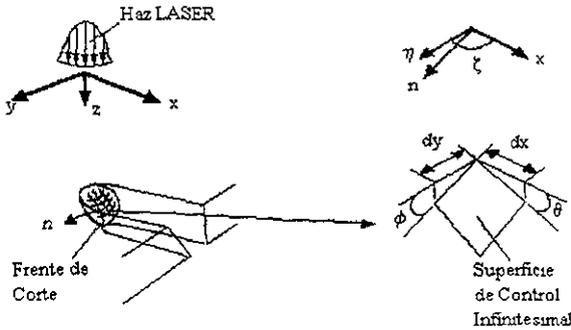


Figura 5.8. Superficie de control en el frente de corte, en el proceso de corte.

La superficie de control está inclinada un ángulo θ con respecto al eje x y un ángulo ϕ con respecto al eje y, y está sujeta a la intensidad $J(x,y)$ del haz. El sistema de coordenadas cartesianas (x,y,z) se mueve con el haz, el cual proyecta un perfil de intensidad $J(x,y)$ sobre la superficie del surco. El balance de calor en la superficie de control es

$$\alpha J_0 e^{-kz} dx dy = \rho L v dx dy \tan \theta - k \left(\frac{dT}{dn} \right)_{n=0} dx dy (1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \phi)^{1/2} \quad (5.19)$$

donde v es la velocidad de barrido, L es el calor latente de fusión y n es una coordenada normal a la superficie de corte. Aún cuando la conducción de calor es tridimensional cerca del frente de erosión, como consecuencia del espesor de la pieza de trabajo (la superficie del fondo es una frontera adiabática) el calor se conduce paralelamente a la superficie del fondo. Por eso se asume una conducción bidimensional dentro del sólido. El término de conducción de la ecuación anterior puede simplificarse como

$$\left(\frac{dT}{dn} \right)_{n=0} (1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \phi)^{1/2} = \left(\frac{dT}{dn} \right)_{n=0} \tan \theta \quad (5.20)$$

donde η es una coordenada paralela a la superficie del fondo. Así, el balance de calor de la ecuación (5.19) puede reescribirse como

$$aJ_0 e^{-\frac{x+y^2}{R^2}} = \rho L_v \tan\theta - k \left(\frac{dT}{d\eta} \right)_{h=0} \tan\theta \quad (5.21)$$

El gradiente de temperaturas en el frente de erosión puede determinarse resolviendo la siguiente ecuación de conducción de calor.

$$\frac{v}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} = \nabla^2 T \quad (5.22)$$

Se asume que el área de conducción y la dirección no cambian. De esta manera los términos de la ecuación anterior se simplifican:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\partial T}{\partial \eta} \cos\zeta \quad (5.23)$$

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} \quad (5.24)$$

La ec. (5.22) puede ser transformada en una ecuación diferencial unidimensional:

$$-\frac{v}{\alpha} \cos\zeta \frac{dT}{d\eta} = \frac{d^2 T}{d\eta^2} \quad (5.25)$$

Las condiciones de frontera para el proceso de corte son:

$$\text{En } h = 0 \quad T = T_s \quad (5.26)$$

$$\text{En } h \rightarrow \infty \quad T = T_0 \quad (5.27)$$

La distribución de temperatura en el interior del sólido puede determinarse como

$$\frac{T - T_0}{T_s - T_0} = e^{-\frac{v \cos\zeta \eta}{\alpha}} \quad (5.28)$$

La diferenciación en la distribución de temperatura produce el siguiente gradiente de temperaturas en el frente de erosión:

$$\left(\frac{dT}{d\eta}\right)_{\eta=0} = -\frac{v}{\alpha} \cos\zeta (T_s - T_0) \quad (5.29)$$

Substituyendo este gradiente en el balance de calor, la ec. (5.21) puede ser reescrita como:

$$aJ_0 e^{-\frac{x^2+y^2}{R^2}} = \rho L_v \tan\theta + \rho c_p \cos\zeta (T_s - T_0) \tan\theta \quad (5.30)$$

La profundidad de corte máxima puede ser alcanzada a lo largo de la línea central, donde $y = 0$ y $\zeta = 0$. La inclinación del frente de erosión en la dirección del corte puede expresarse como

$$\tan\theta = \frac{aJ_0 e^{-\frac{x^2}{R^2}}}{\rho v (L + c_p (T_s - T_0))} \quad (5.31)$$

La profundidad infinitesimal es

$$ds = dx \tan \theta \quad (5.32)$$

La profundidad de corte puede determinarse como una función de x integrando de $-\infty$ a $+\infty$.

$$s = \int_{-\infty}^{+\infty} ds = \int_{-\infty}^{+\infty} \tan\theta dx \quad (5.33)$$

Substituyendo la expresión de $\tan\theta$ de (5.31) en (5.33), puede obtenerse la siguiente expresión para la profundidad s :

$$s = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{aP e^{-x^2/R^2}}{\rho R^2 (L + c_p (T_s - T_0))} ds \quad (5.34)$$

La temperatura en la superficie superior T_s a lo largo de la línea central del surco es asumida como la temperatura de derretimiento, T_m . No obstante T_s varía de T_m en el frente de erosión a T_0 muy lejos de éste, el error resultante en la profundidad del surco podría ser despreciable porque el término exponencial en la ecuación (5.34) se torna a la vez insignificante para la parte de la superficie donde la temperatura no es T_m . En consecuencia, s puede obtenerse como:

$$s = \frac{aP\pi^{1/2}R}{\pi R^2 \rho v (c_p (T_s - T_0) + L)} = \frac{2aP}{\pi^{1/2} \rho v d (c_p (T_s - T_0) + L)} \quad (5.35)$$

donde d es el diámetro del punto del haz, $d \equiv 2R$. La profundidad de corte es proporcional a P/vd , la cual es la energía de entrada por unidad de área en la pieza de trabajo. Asimismo la profundidad es pequeña para materiales con un alto punto de derretimiento y un calor latente de vaporización elevado.

5.2.c. Surcado.

En el surcado, el haz LASER no corta atravesando la pieza de trabajo. Este proceso exhibe características complicadas, tales como transferencia de calor tridimensional, material en dos fases, un límite de movimiento, una fuente de calor distribuida espacialmente, etc. (fig. 5.9). Poco trabajo se ha hecho del proceso de surcado. Un análisis numérico de este proceso fue desarrollado asumiendo inmediata evaporación del material sólido debido a irradiación LASER. La ecuación regidora en este estudio fue una ecuación de formación de surco, y la distribución de temperatura dentro del medio fue asumida. Un modelo que separa el proceso en dos diferentes regiones fue sugerido en un estudio. Resultados experimentales en surcado LASER fueron reportados; surcos en materiales metálicos y cerámicos fueron producidos usando un solo haz LASER. Como un elemento de maquinado LASER tridimensional, el surcado fue investigado en [7].

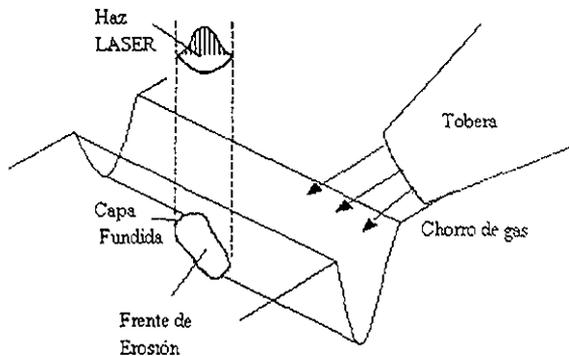


Figura 5.9 Esquema del surcado LASER

Una ecuación de transferencia tridimensional de calor regula el problema de la transferencia de calor con una

fuente en movimiento:

$$k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = v \rho c_p \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.36)$$

ó

$$\nabla^2 T = \frac{v}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.37)$$

sujeta a:

$$x = \pm \infty, y = \pm \infty, z = \infty : T = T_0 \quad (5.38)$$

donde k es la conductividad, T es la temperatura, v es la velocidad de barrido, ρ es la densidad, c_p es el calor específico y α es la difusividad térmica.

La figura 5.10 muestra esquemáticamente el proceso del surcado LASER. Puesto que el surcado es un proceso similar al corte excepto por el espesor de la pieza de trabajo, se utiliza una similar aproximación para deducir la relación entre la profundidad del surco y las variables del proceso.

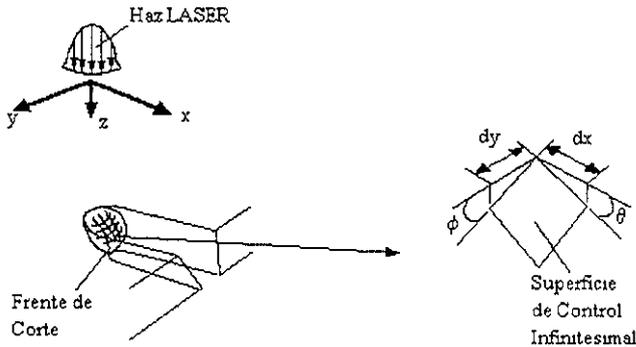


Figura 5.10. Modelo analítico para el proceso de surcado LASER.

El balance de calor en la superficie de control mostrada está dado por:

$$a J_0 e^{-\frac{c^2 + 1}{R}} dx dy = \rho L v dx dy \tan \theta - k \left(\frac{dT}{dn} \right)_{n=0} dx dy (1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \phi) \quad (5.39)$$

donde J_0 es la intensidad del haz, L es el calor latente de fusión y n es una coordenada normal a la superficie de

corte. Para determinar el gradiente de temperaturas, debe resolverse la siguiente ecuación de conducción de calor.

$$\nabla^2 T = \frac{v}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (5.40)$$

sujeta a:

$$\text{En la superficie del frente de erosión: } T = T_s \quad (5.41)$$

$$\text{para } x \rightarrow \pm\infty, y \rightarrow \pm\infty, z \rightarrow \infty : T = T_0 \quad (5.42)$$

Para simplificar la ec. (5.39), se asume que el calor se conduce en la dirección normal a la superficie del frente de erosión. De acuerdo a esto pueden desarrollarse las siguientes relaciones:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\partial T}{\partial z} \tan\theta \quad (5.63)$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{\partial T}{\partial z} \tan\phi \quad (5.64)$$

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \left(\left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5.45)$$

Donde n es una coordenada normal a la superficie del frente de erosión. Adicionalmente, se asume la siguiente simplificación:

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial n^2} \quad (5.46)$$

De las ecuaciones anteriores, $\partial T / \partial x$ puede relacionarse a $\partial T / \partial n$.

$$\frac{\partial T}{\partial x} = -\frac{\partial T}{\partial n} \frac{\tan\theta}{\left(1 + \tan^2\theta + \tan^2\phi\right)^{\frac{1}{2}}} = -\beta \frac{\partial T}{\partial n} \quad (5.47)$$

donde...

$$\beta = \frac{\tan\theta}{\left(1 + \tan^2\theta + \tan^2\phi\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (5.48)$$

La ecuación (5.46) puede simplificarse como

$$-\frac{\beta}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\partial^2 T}{\partial n^2} \quad (5.49)$$

sujeta a las siguientes condiciones de frontera:

$$\text{Para } n = 0: \quad T = T_s \quad (5.50)$$

$$\text{Para } n \rightarrow \infty: \quad T = T_0 \quad (5.51)$$

La distribución de temperatura dentro del medio puede ser encontrada como:

$$\frac{T - T_s}{T_s - T_0} = e^{-\frac{\beta v}{\alpha} n} - 1 \quad (5.52)$$

El gradiente de temperatura en el frente de erosión puede determinarse como:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial n} \right)_{n=0} = -\frac{\beta v}{\alpha} (T_s - T_0) \quad (5.53)$$

La substitución del gradiente de temperatura en el balance de calor produce

$$aJ = \frac{kv}{\alpha} (T_s - T_0) \tan\theta + \rho l v \tan\theta = \rho v \tan\theta [C_p(T_s - T_0) + l] \quad (5.54)$$

La inclinación del surco puede determinarse como:

$$\tan\theta = \frac{aP}{\pi R^2} \frac{c \frac{v}{k}}{\rho v (c_p (T_s - T_0) + l)} \quad (5.55)$$

donde R es el radio del haz. Puesto que el método para estimar la temperatura en el surcado y el corte es el mismo, la inclinación del surcado es la misma que la encontrada en el corte. Siendo así la profundidad del surco es la misma que la máxima profundidad de corte para un grupo dado de condiciones de operación.

$$s = \frac{aP\pi^{1/2}R}{\pi R^2 \rho v (c_p (T_c - T_0) + L)} = \frac{2aP}{\pi^{1/2} \rho v d (c_p (T_c - T_0) + L)} \quad (5.56)$$

5.2.d. Maquinado tridimensional.

Comúnmente, los métodos convencionales de maquinado con LASER tales como barrenado, corte y marcado están obstaculizados por bajas eficiencia energética y flexibilidad en función de la parte geométrica. Para enderezar estas desventajas, se ha desarrollado un concepto de maquinado LASER en el cual dos haces producen surcos en la superficie. Cuando los dos surcos convergen, un volumen de material es removido (fig. 5.11). Acorde a este concepto, el proceso de maquinado tridimensional incrementa la flexibilidad al extender la aplicación del LASER al formado de partes tridimensionales. Este concepto tiene también substancialmente más eficiencia energética que la de la ablación, con un solo haz, de un volumen entero de material, puesto que la energía es únicamente consumida en hacer surcos y no por remover un volumen entero de material.

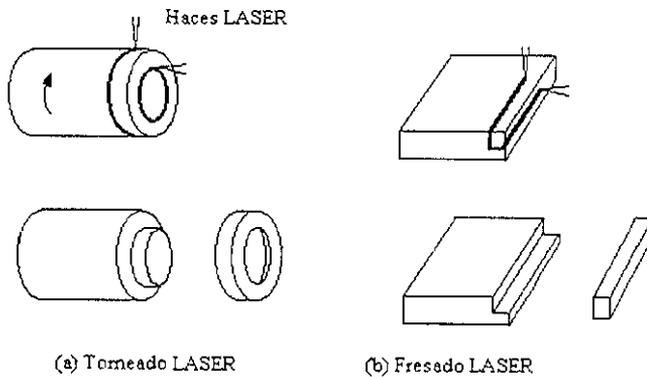


Figura 5.11. Concepto de maquinado LASER tridimensional.

El proceso tridimensional puede ser descompuesto en dos procesos de surcado con interacciones. Cada surco está regido por una ecuación de conducción similar a la del caso de un solo haz surcando.

APLICACIONES DEL MAQUINADO CON LASER DE CO₂.

En este capítulo se presentan los resultados del maquinado con LASER de CO₂ en aplicaciones industriales y experimentos de laboratorio.

6.1. Introducción.

En general, esta forma de maquinado produce partes con mayor precisión dimensional y acabado superficial de los logrados en procesos convencionales, y con mayores valores de remoción. Los materiales que pueden ser maquinados con LASER de CO₂ incluyen metales, cerámicos, plásticos, materiales compuestos, madera, vidrio, caucho, cuero, etc. El *barrenado* puede producir orificios tan pequeños como 0.05 mm de diámetro a velocidades superiores de 1ms/orificio. Es usado en la industria para la producción de orificios en alabes, cámaras de combustión y boquillas de aerosoles, entre otras aplicaciones. El *corte* se usa para maquinar formas bidimensionales intrincadas en piezas de materiales como lámina o papel de espesores mayores a los 15 mm y a elevadas velocidades de corte. El *marcaje* ha sido usado para crear canales para enfriamiento en substratos cerámicos y etiquetas de identificación en partes terminadas. Finalmente en el caso del maquinado tridimensional se ha hecho un esfuerzo de investigación con el fin de implementarlo en operaciones de torneado, fresado y roscado. También se discuten en este capítulo las desventajas del proceso de maquinado, tales como la formación de escoria en los metales, formación de microfracturas en los cerámicos y descomposición de la matriz en los materiales compuestos.

La mayoría de los materiales de ingeniería más frecuentemente usados en la industria pueden dividirse en cuatro categorías: metales, cerámicos, polímeros y compuestos. Madera, papel, caucho y vidrio también son

usados en manufactura. La selección de cuál proceso de manufactura va a aplicarse a un material en particular está influenciada por varios factores:

- *La geometría de la región* dictará las consideraciones iniciales del proceso de manufactura; los procesos de manufactura pueden estar caracterizados por sus grados dimensionales de libertad tales como el barrenado unidimensional, el corte bidimensional o el torneado tridimensional. La complejidad de la forma geométrica limitará el número de procesos capaces de producir la forma final de la parte.
- *El volumen de producción* para una parte en particular determina la flexibilidad del equipamiento necesario y la velocidad requerida. Para los procesos de maquinado, la flexibilidad está determinada por la variedad de geometrías en la pieza de trabajo que la máquina puede maniobrar, tales como el número de ejes y el rango de medidas de las partes en que se puede acomodar. La velocidad de producción es una función de la velocidad de remoción de material (VRM) del proceso.
- *Las propiedades físicas* del material, tales como dureza, esfuerzos de tensión y compresión, temperatura de fusión/vaporización, calor latente de fusión/vaporización y conductividad térmica, darán lugar a limitaciones en el tipo de proceso utilizado.
- *La calidad de la región* se expresa usualmente en términos de calidad superficial y precisión dimensional. La calidad superficial está relacionada con la rugosidad de superficie, la carbonización en el caso de materiales plásticos o compuestos, formación de microfracturas y zonas de afectación térmica. La precisión dimensional se relaciona a las tolerancias de la región terminada en términos de rectitud, grado de conicidad y precisiones longitudinal y angular.

En muchos casos, el LASER de CO₂ es un camino para desarrollar operaciones de barrenado, corte o formado que no pueden ser hechas mediante procesos convencionales de maquinado. En otras ocasiones, maquinado LASER ofrece una alternativa para la remoción de material que mejora la velocidad de maquinado, la calidad superficial y/o la precisión dimensional de los procesos tradicionales.

6.2. Metales.

6.2.a. Maquinado unidimensional: barrenado.

Los LASERs de CO₂ son extensamente utilizados en aplicaciones de barrenado de metales debido a las altas velocidades de procesado, alta tolerancia, repetibilidad y diminutas dimensiones alcanzables. En la mayoría de las aplicaciones industriales tanto la velocidad de penetración del haz como la velocidad de posicionamiento de

orificio a orificio son importantes; por esta razón los valores de velocidad para barrenado son dados como orificios por segundo y representan el ciclo total de tiempo por orificio. Usualmente las perforaciones tienen valores de excentricidad inferiores al 5% y rugosidad superficial menor de 5 μm [19]. El control del proceso para una pieza de un material dado se lleva a cabo por la selección de la potencia del haz, las dimensiones del punto enfocado y el tiempo de barrenado. El proceso puede ser continuo, usando un haz de onda continua, o barrenado percusivo, con el uso de un haz pulsado. En el barrenado continuo, la remoción de material se realiza a través de fusión con algo de vaporización, como se ve en la figura 6.1. El material derretido es eyectado del fondo del agujero con la ayuda de un chorro de gas. En el barrenado por percusión, el haz pulsado remueve el material por fusión y detonación o explosión local. En este caso, aproximadamente el 90% del material se retira por los efectos de la detonación [15]. Adicionalmente un chorro de gas reactivo (O₂) puede usarse para remover por oxidación, reacciones químicas, etc. [12,15].

Los efectos del cambio de las variables del proceso, tales como presión del chorro de gas y distancia lentes/pieza tienen distintos efectos. Los primeros son causantes de un vacío en el lado de salida del orificio. Los segundos tienen efecto en la formación de plasma dentro del hueco lo que a su vez afecta la geometría y dimensiones del frente derretido. La formación de plasma es afectada también por los cambios de presión en el gas asistente, el cual regula la cantidad de oxidación por alta temperatura ocurriendo en el orificio. Como decrece el espesor del material, la distancia lente/pieza debe alcanzar la mejor condición superficial, o la cantidad de escoria aumentará. Para espesores menores a 0.3 mm, la distancia mencionada es mayor que la longitud focal de los lentes. Estas observaciones son verificadas en estudios experimentales de los efectos del cambio de los parámetros en los desechos superficiales, formación de escoria y ahusamiento del hueco [10].

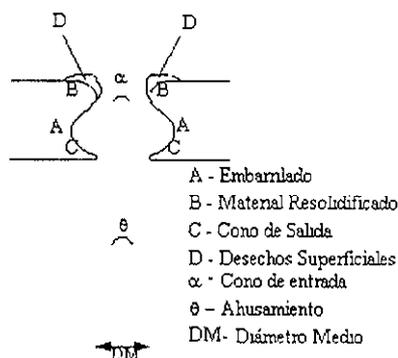


Figura 6.1. Lineamientos de los orificios barrenados con LASER.

Para el LASER de CO₂ percusivo, la eficiencia del proceso depende fuertemente del fenómeno de ondas de detonación de sustentación-LASER [16]. La formación de plasma en la superficie de la pieza, debida a la interacción LASER/material, decrece severamente la efectividad del barrenado porque absorbe una significativa porción de la energía entrante del haz escudando así dicha superficie. Una onda de detonación LASER sustentada (DLS) ocurre cuando la capa absorbida de plasma se acopla a una onda de choque al detonar el material en el frente de erosión. Este fenómeno transitorio propaga el volumen de plasma y escuda efectivamente la superficie de la pieza del haz LASER. Los efectos de la ondas DLS pueden minimizarse usando un lente de longitud focal corta, incrementando la intensidad del haz y usando un chorro de gas de baja densidad tal como He en vez de aire. Para minimizar los efectos de las ondas DLS, orificios de profundidades mayores a los 65 mm pueden barrenarse en piezas de cobre usando densidades de energía entre 300 y 6000 J/cm².

Una mayor aplicación del barrenado con LASER de CO₂ es la hechura de orificios para motores de combustión interna y turbinas de aviones. Los orificios se usan con propósitos de enfriamiento; una corriente de aire frío se mezcla con los gases calientes de combustión o directamente para mantener las superficies del tubo de flama y los álabes de la turbina a la temperatura deseada.

Un combustor típico tiene aproximadamente 30,000 orificios de menores de 1.5 mm de diámetro (fig. 6.2). Puesto que el combustor y la turbina se fabrican usualmente de aleaciones resistentes al calor, los métodos mecánicos de barrenado son caros y lentos. Por esta razón los fabricantes de la industria aeroespacial han recurrido a los métodos no tradicionales, tales como el maquinado LASER, maquinado electroquímico, maquinado por descarga eléctrica y maquinado por haz de electrones.

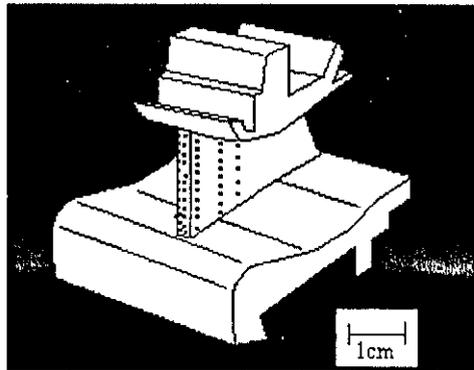


Figura 6.2. Alabe guía para turbina de avión barrenado con LASER de CO₂, [8].

Los resultados del maquinado LASER muestran un grado de asimetría en el perfil del orificio, una capa significativa de material resolidificado, y formación de microfracturas cercanas al hueco [7]. Un método de trepanación, donde el haz es movido circularmente el plano de la pieza para producir un agujero, puede también usarse en conjunción con un haz pulsado. Este método produce orificios con una reducción significativa de capa refundida, menos microfracturas y menor conicidad. Adicionalmente, controlando el movimiento relativo entre la pieza y el haz durante el trepanado, pueden producirse geometrías no circulares.

6.2.b. Maquinado bidimensional: corte.

El corte de metales con LASER de CO₂ ha sido ampliamente usado en la industria para maquinar formas bidimensionales en piezas con espesores superiores a 10 mm. (tabla 6.1). También se aplicó este proceso para cortar contornos tridimensionales intrincados en piezas curvas [7]. Han sido usados dos tipos de corte: con gas reactivo y por fusión. En el corte de metales con gas reactivo es usado un chorro de O₂, y la remoción de material se alcanza a través de reacciones de oxidación a alta temperatura. El haz LASER sirve en este caso como una fuente intensa de calor para propagar las reacciones químicas. En el caso del corte por fusión de metales (fig. 6.3), se usa un chorro de gas inerte mientras el haz sirve como una fuente de calor para fundir el material [7]. En general se alcanzan valores grandes de remoción por el método del gas reactivo; no obstante, el corte por fusión logra mayor calidad superficial y precisión dimensional en la cavidad cortada. Algunos tipos de metales tales como cobre o tungsteno son altamente reflejantes a la longitud de onda de la radiación del LASER de CO₂, siendo difíciles de cortar [7]. Para evitar este problema, puede aplicarse a la superficie de la pieza un revestimiento absorbente.

En [19], el corte por gas reactivo fue llevado a cabo con un chorro de oxígeno. Durante el proceso de corte oxi-LASER, la zona de la cavidad subió su temperatura hasta la ignición por la acción del haz mientras el chorro de oxígeno consumía el material y soplabá fuera la escoria. Esos experimentos fueron desarrollados en piezas de acero bajo en carbono y austenítico al Cr-Ni usando un LASER de CO₂ de 5 kW operando en el modo TEM₀₀. El haz se propagó a través de un sistema telescópico que fue instalado alcanzando condiciones de enfoque óptimas sobre espejos móviles para una tobera móvil. Se usó una tobera triple para alcanzar un arreglo de chorro coaxial supersónico. Este diseño especial de la tobera es necesario para lograr calidades superficiales altas en piezas de espesores grandes. En los experimentos de corte, la velocidad y potencia óptimas se encontraron para producir la mínima rugosidad superficial en acero bajo en carbono de 4 a 35 mm de espesor y en aceros austeníticos de alta aleación de 4 a 15 mm de espesor. Al disminuir la anchura de la placa, la velocidad de corte aumenta y el ancho de la cavidad disminuye. Por otra parte, se encontró que la combinación de mayores

velocidades de corte y puntos focales menores da por resultado baja influencia térmica y menos distorsión cerca de la cavidad. El corte asistido por oxígeno no es tan efectivo en aleaciones de acero altas en níquel como en otros tipos de aceros. Una causa probable de esta falta de efectividad es el gran incremento de temperatura en el frente de erosión durante el proceso, lo que produce la formación de óxidos de cromo y níquel. La acumulación de éstos en el frente de erosión, especialmente en lo profundo de la cavidad, reduce la efectividad del LASER para espesores de más de 15 mm.

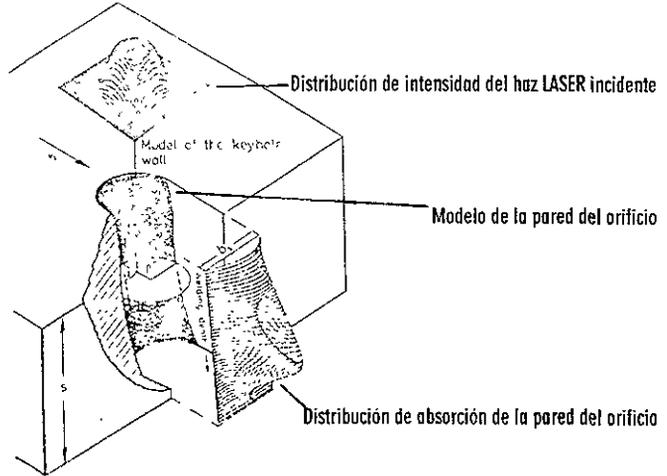


Figura 6.3. Esquema del frente de corte por fusión LASER en metales

Un análisis del frente de erosión (fig. 6.3) muestra el cambio de fase como la primera forma de remoción [19]. La absorción de la energía del haz en esta zona depende de la inclinación del frente de erosión relativa a la dirección del haz.

Una investigación del corte por fusión LASER en piezas delgadas de acero y aluminio (espesores menores de 10 mm) fue desarrollada en [19] con un LASER de CO₂ de 1 kW. En general, el corte de materiales delgados alcanza las mejores calidad y velocidad cuando se vaporiza el material. El haz de 1 kW fácilmente provee de la densidad energía necesaria para la vaporización. De acuerdo con los resultados de este estudio, se encontró que para el corte de materiales metálicos y no metálicos delgados:

- La velocidad de corte es inversamente proporcional al espesor del material
- La velocidad de corte es proporcional al nivel de potencia suministrada más allá de un cierto valor de umbral.

En piezas de menos de 10 mm de espesor la divergencia del haz es mínima y la energía puede concentrarse en un punto enfocado. Los resultados de las altas densidades energéticas y los altos valores de material removido son mejores que en piezas de espesores mayores de 10 mm. Además el material removido puede expelerse mejor de piezas delgadas. Como resultado, los cambios en la profundidad de corte son generalmente proporcionales a los cambios en la densidad de energía.

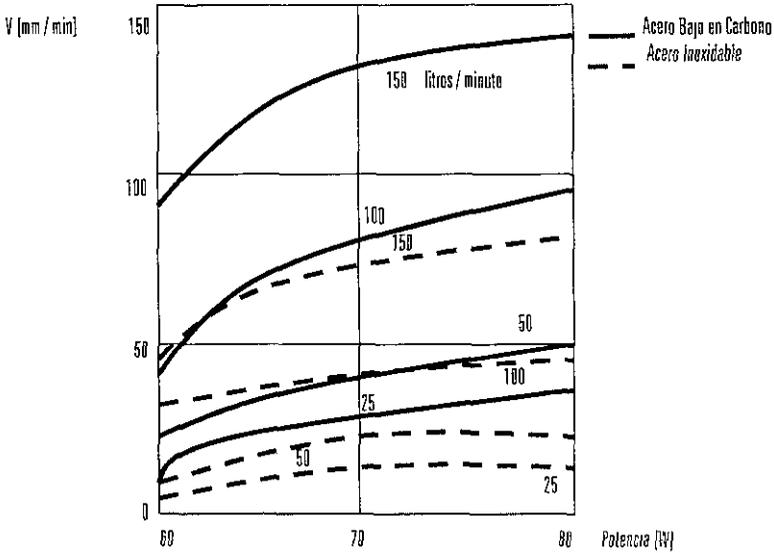


Figura 6.4 Velocidades de corte vs. potencia para acero inoxidable y acero de bajo carbono de 1 mm de espesor con diferentes valores de flujo de oxígeno [4].

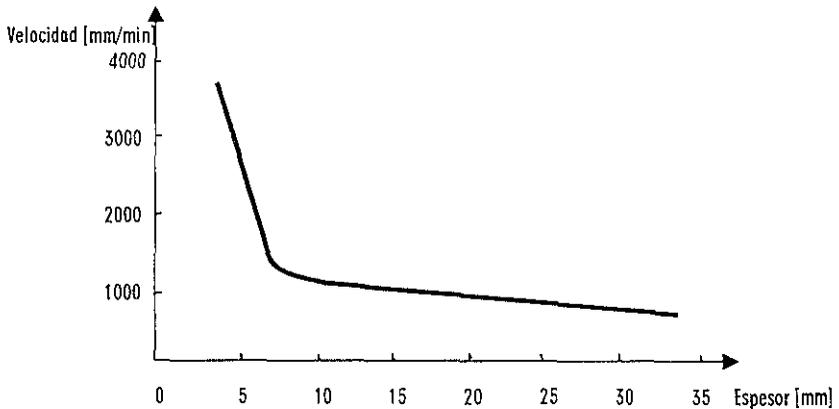


Figura 6.5. Velocidad de corte vs. prof. para acero de bajo carbono con un LASER de potencia de 4 kW

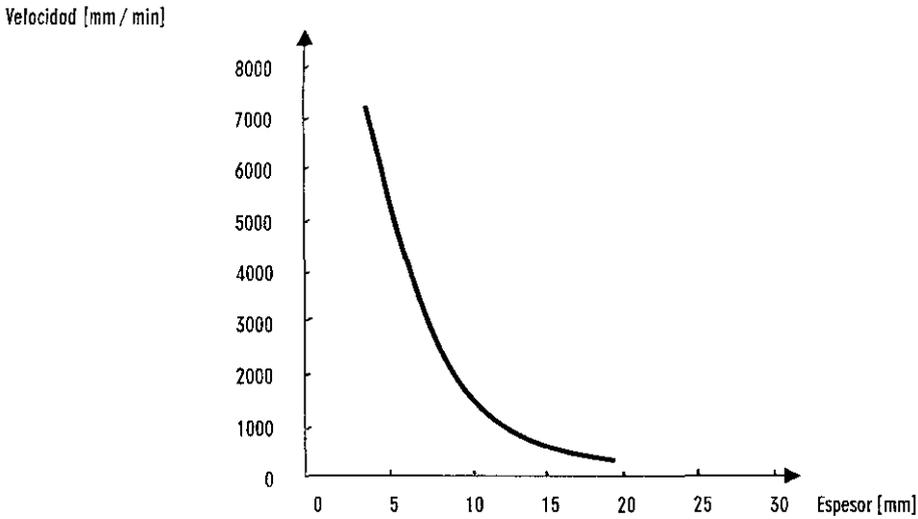


Figura 6.6 Velocidad de corte vs. profundidad para acero austenítico con una potencia LASER de 4 kW [34].

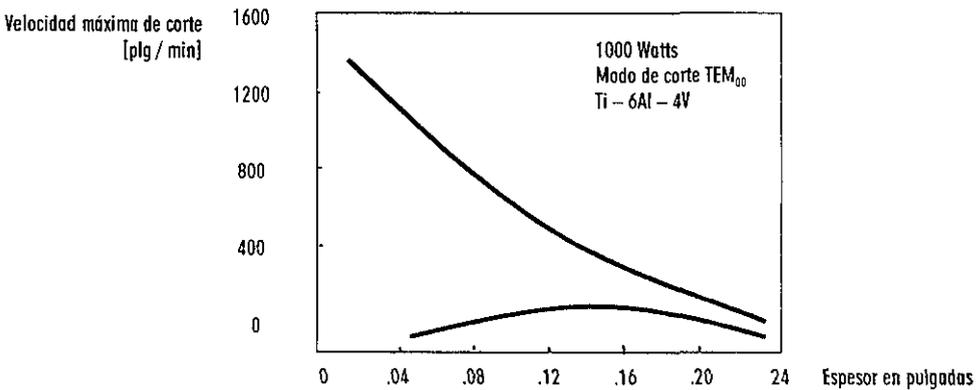


Figura 6.7. Velocidad de corte vs. profundidad para aleación de titanio [38]

En piezas gruesas, la profundidad de corte puede exceder la distancia de trabajo de los lentes de enfoque, mientras que el material derretido es difícil de expeler; consecuentemente, una fracción de la energía del haz puede ser disipada o absorbida por la capa fundida, reduciendo la eficiencia del corte.

La utilización de gases reactivos incrementa la velocidad de corte en procesos donde predominan las reacciones químicas; no obstante, el utilizar gases no reactivos produce cavidades de calidad superficial superior. La calcinación del material puede por sí misma conducir a problemas en la calidad de la cavidad y eventualmente

define los límites más bajos de las velocidades de corte.

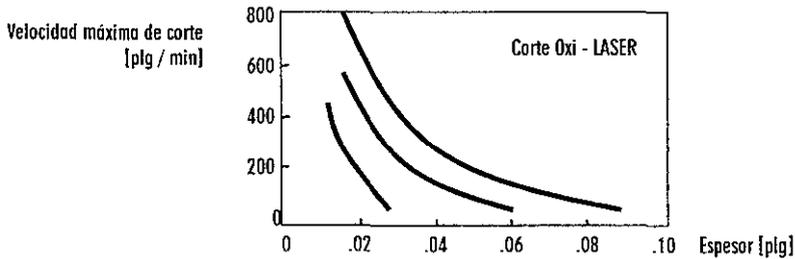


Figura 6.8. Velocidad de corte vs. profundidad para aluminio [38]

En [15] se analizó el corte en piezas metálicas tales como acero inoxidable (fig. 6.4), acero para herramientas (fig. 6.5 y 6.6), plancha de blindaje, aleación de titanio (fig. 6.7) y aluminio (fig. 6.8) de espesores entre 10 y 15 mm.

En el corte de metales con LASER de CO₂, son varios los factores que afectan la calidad superficial. En [19] se investigaron las relaciones entre la calidad de cavidad y los parámetros de corte en aceros inoxidables. Usando un arreglo de un chorro coaxial de oxígeno con un haz enfocado en acero inoxidable, la calidad superficial resultante fue relativamente baja como consecuencia de la formación de una "escoria" de óxido colgando del fondo. Para mejorar esta condición, dos métodos, *corte en pila* y *corte con tobera en tándem*, fueron usados.

El corte en pila vincula la colocación de una hoja delgada de acero bajo en carbono en la parte superior de una pieza de acero inoxidable. El corte con tobera en tándem usa un chorro no axial de gas posterior y junto a la tobera coaxial. Ambas técnicas mejoran el efecto de rugosidad superficial y alisado de la cavidad. El corte en pila puede producir una cavidad libre de escoria, puesto que el óxido derretido reduce la viscosidad del flujo de materia fundida en el frente de corte y estimula la separación de la escoria de óxido derretido. El corte con tobera en tándem se sirve del chorro de dos toberas, resultando en un acrecentamiento en la fuerza del soplido de gas e incrementando la remoción del metal derretido y sus óxidos.

En [15] se usaron diferentes gases de asistencia para analizar los efectos en la formación de escoria.

Cuando se corta acero inoxidable con apoyo de oxígeno, la escoria se compone principalmente de óxidos de acero y cromo.

A causa de su alto punto de fusión, la escoria se resolidifica antes de que el gas pueda expelerla completamente de la cavidad. La formación de escoria puede reducirse usando una mezcla de gas (60% CO₂, 40% O₂), lo que reduce la formación de óxidos y ayuda a la eyección del material fundido. Además, un gas mezclado también mejora la soldabilidad superficial de la cavidad cortada.

Otro punto de disputa de la calidad superficial es la formación de estriaciones a lo largo de las paredes de ésta. En un estudio de estriaciones [7], se encontraron dos zonas distintas en la orilla de la cavidad. La Zona I, la región de estriaciones regulares cerca del principio de la cavidad, es el resultado del calentamiento por el haz asistido por oxígeno. La Zona II, la región de estriaciones indistintas cerca del fondo de la cavidad, se cree es causada por una reacción termoquímica difusiva en ausencia de contacto directo con el haz. Se demostró que un incremento de la Zona I corresponde al incremento de la anchura del haz pulsado. La rugosidad superficial se encontró dependiente del ancho de pulso en la vecindad de la parte superior del borde aproximadamente de 0.2 a 0.8 mm de la entrada de la cavidad.

En [7], la microestructura de las cavidades cortadas con LASER en piezas de aceros de bajo carbono e inoxidables, y de espesores superiores a los 10 mm fue estudiada. A causa de las altas temperaturas alcanzadas en el frente de erosión, el material cercano sufre una transformación de fase que resulta en una zona de afectación térmica. Mientras que la energía del haz no es suficiente para fundir el material en esta zona afectada, es lo suficientemente alta para hacerle un tratamiento térmico y endurecerlo. Los resultados del estudio muestran que la zona de afectación térmica se incrementa al aumentar el espesor de la pieza. También se encontró que la zona afectada es mayor en la entrada del haz que en el lugar de su salida. El cambio de la microdureza en el borde de la cavidad fue encontrado también mayor que en el lado de salida, pero se encontró normal a una distancia menor a 0.1 mm desde la orilla del corte. Como la energía del haz se concentra en un punto minúsculo, los efectos del cambio de fase son altamente localizados y la zona de afectación térmica es pequeña.

La eficiencia del corte con LASER de CO₂ en otros metales como aluminio, y cobre depende tanto del acabado superficial como del espesor de la pieza que se trabaja. Puesto que esos materiales son altamente reflejantes a la longitud de onda de 10.6 μm, las láminas con superficies pulidas y no tratadas no pueden cortarse fácilmente. Puede mejorarse la eficiencia del corte creando una superficie áspera que absorba las energías incidente y reflejada del haz, o utilizando un revestimiento absorbente que se ajuste a la longitud de onda del CO₂.

Tabla 6.1. Datos representativos para el corte de metales con LASER de CO₂

Material	Energía / Densidad de potencia	Velocidad de Corte [m/min]	Profundidad de Cavidad [mm]	Ancho de Cavidad [mm]	Gas de aporte
Acero Bajo en Carbono ⁰	100W	1.6	1		
	250W	0.635	0.5		
	850 W	1.8	2.2		
	1000 W	0.8	10.0	0.9	
	2.5 kW	0.85	10.0	0.9	
	4 kW	0.95	10.0	0.9	
Acero Inox. ⁰	100 W	0.94	1.0		
	850 W	2.6	9.0		
Aluminio ¹	500 W	1.5	0.7		
	1kW	1.2	2.0		
	1.5 kW	1.0	3.2		
	1.25 kW	2.3	12.7		
	12 kW	5.5	0.9		
Aleación Al ¹	1.2 kW	1.0	12.7		Oxígeno
Al 6061 ¹	10 kW	3.0	1.6		Helio
Al HS30TF ¹	1.2 kW	3.0	1.6		Oxígeno
Al NS3H3 ¹	1.2 kW	2.2	2.0		Oxígeno
Al 99 ¹	1.2 kW	3.5	1.5		Oxígeno
	1.2 kW	6.1	1.0		Oxígeno
Al 99.5 ¹	3 kW	2.5	3.1		Oxígeno
	3 kW	1.0	6.2		Oxígeno
	3 kW	0.7	12.3		Oxígeno
Al 2219 ¹	3.8 kW	0.3	6.4		CO ₂
Alúmina ¹	500 W	6.0	1.0		
Plomo ¹	500 W	3.6	3.0		
	500 W	2.0	1.0		
	200 W	4.0	1.1		
	300 W	7.5	1.1		
	400 W	10.0	1.1		
Bronce ¹	300 W	4.0	0.1		
Zinc ¹	500 W	2.0	1.0		

Continúa

Tabla 6.1. Datos representativos para el corte de materiales con LASER de CO₂ (continuación)

Material	Energía / Densidad de potencia	Velocidad de Corte [m/min]	Profundidad de Cavidad [mm]	Ancho de Cavidad [mm]	Gas de aporte
Inconel 718 ¹	11 kW	1.3	12.7		
Cobre ¹	500 W	0.5	0.6		Oxígeno
Níquel ¹	300 W	4.0	0.13		
Monel ¹	500 W	0.1	5.0		
NiCr 20 ¹	4 kW	2.9	3.1		Oxígeno
NiCr 20 CO ¹	6 kW	16.5	0.8		CO ₂
	6 kW	3.6	3.2		CO ₂
	3 kW	5.1	1.6		CO ₂
NiCr 20 CO14 ¹	3 kW	12.7	0.8		CO ₂
	1.5 kW	7.2	0.8		CO ₂
	750 W	3.6	0.8		CO ₂
MnNi ¹	500 W	1.7	0.08		
Nimonic 75 ¹	200W	0.4	0.8		Oxígeno
	500W	0.8	2.0		
Nimonic 90 ¹	900W	0.2	1.5		Oxígeno
Niobio ¹	500 W	0.2	3.2		
Titanio ¹	200 W	6.1	0.2		Oxígeno
	6 kW	4.6	6.4		Oxígeno
	3 kW	3.6	6.4		Oxígeno
	1.5 kW	2.5	6.4		Oxígeno
	750 W	1.5	6.4		Oxígeno
	6kW	1.4	6.4		CO ₂
	250 W	0.2	0.5		
Titanio ^o	850 W	3.24	0.6		
	500W	3.81	15.24		
	1kW	7.62	31.75		
	375 W	25.4-91.44	15.24-31.75	0.762	
	200 W	4.8	0.9		Oxígeno
Aleación Ti ¹	11 kW	2.5	12.7		

Fuente: ¹ [3]

^o [7]

6.2.c. Maquinado bidimensional: rayado y marcado.

El rayado y marcado LASER en metales ha mostrado ser económicamente viable para algunas aplicaciones de ingeniería así como en la industria de la identificación (tabla 6.2). Los sistemas de marcaje LASER comúnmente se emplean en electrónica, cosméticos, alimentos y bebidas, y óptica entre otros. Las aplicaciones de ingeniería incluyen el microacanalado para sistemas de enfriamiento y la creación de ranuras para ensamblajes. El grabado de productos con códigos alfanuméricos o de barras, logos, símbolos y gráficas son también aplicaciones usuales para LASER's de CO₂. El marcaje LASER (fig. 6.9) se compara favorablemente con otros sistemas de marcado, cuando la comparación se basa en rendimiento y flexibilidad.

Los requerimientos básicos para un sistema de marcaje con LASER de CO₂ incluyen un LASER transversal de excitación atmosférica (TEA), suministro de potencia, modulador, choro de gas, motor electrónico de control, dos haces incluyendo espejos duplicadores y lentes, y un sistema de detección para guiar el haz. El LASER genera un gran pico energético que vaporiza la superficie de la mayoría de los metales y produce cavidades y marca líneas limpias para formar patrones en una superficie metálica.

Un típico LASER industrial de CO₂ para aplicaciones de marcaje puede encontrarse en la industria farmacéutica, donde se usa para marcar información como fechas de manufactura o caducidad. Las ventajas del LASER en esta aplicación anulan las dificultades asociadas a la preimpresión. Este proceso es utilizado también en la industria destilera, donde se marcan códigos permanentes de seguridad en algún lado de la botella.

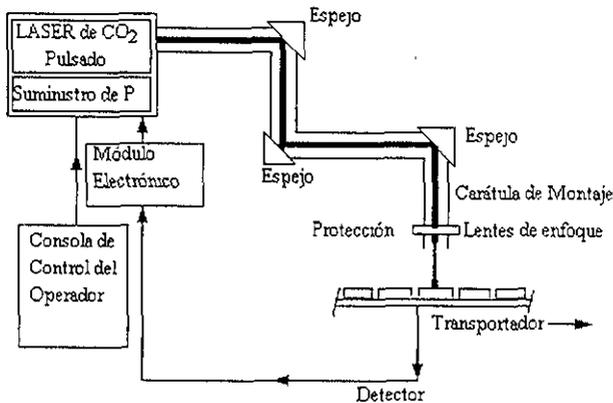


Figura 6.9. Arreglo para equipo de marcaje LASER.

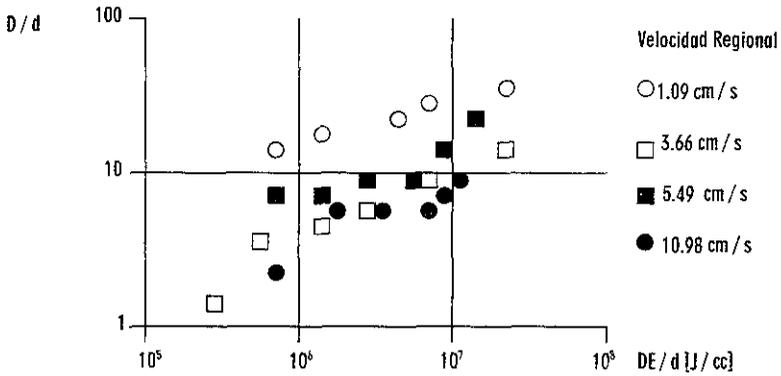


Figura 6.10. Profundidad de surco vs. densidad de energía para acerobajo en carbono.

6.2.d. Maquinado tridimensional.

Una técnica para producir formas tridimensionales particularmente aplicable a los aceros combina el corte LASER bidimensional con la soldadura LASER para construir una parte tridimensional de formas bidimensionales. En esta técnica, formas bidimensionales son cortadas primeramente por un haz, y son entonces soldadas a tope juntas para formar una parte. En [10,15], un sistema compuesto por dos LASER's de CO₂ de 500 W se usaron en conjunción con un sistema de posicionamiento de control numérico con 5 ejes. Helio y nitrógeno fueron usados como gases de apoyo para el corte y la soldadura. Los resultados muestran que se alcanzan velocidades de corte superiores a 10.5 m/min para espesores de más de 0.8 mm.

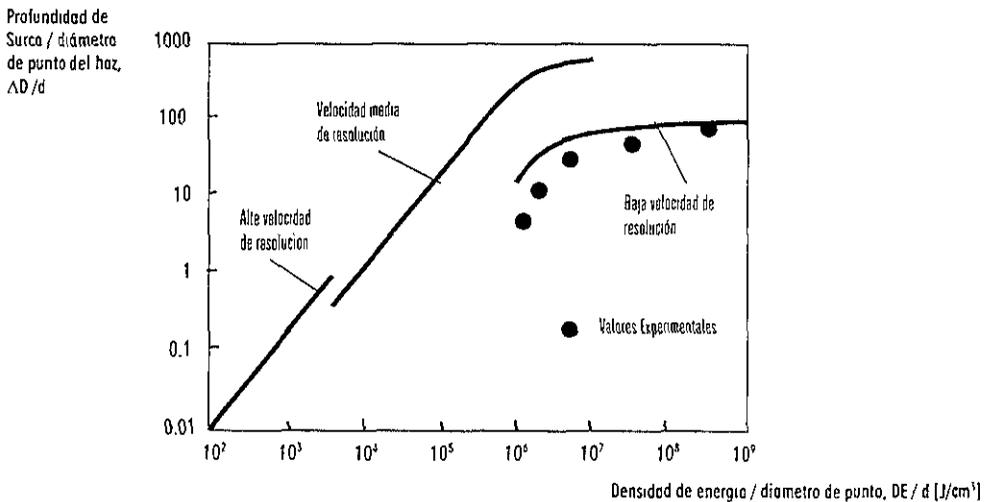


Figura 6.11 Profundidad de surco vs. densidad energetica para acero inoxidable

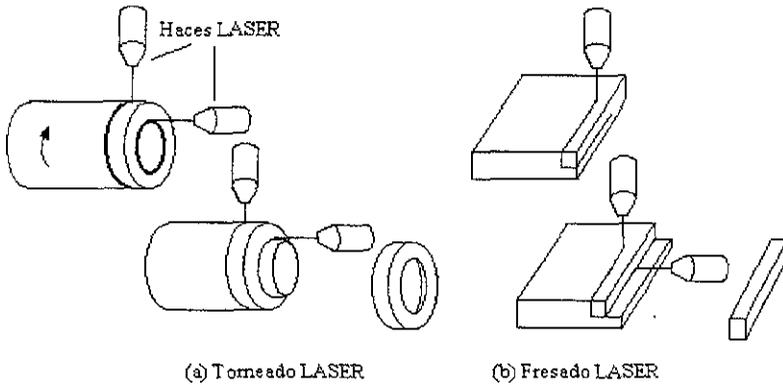


Figura 6.12. Esquemas de (a) torneado LASER y (b) fresado LASER en acero [7].

Para el torneado, fresado y roscado LASER (fig. 6.12), dos haces fueron usados para producir surcos convergentes en una pieza [7]. Al intersectarse los dos surcos se remueve un volumen de material. Esta técnica ofrece alta eficiencia energética, valores grandes de remoción de material y mayor flexibilidad que otros procesos no convencionales de maquinado. Puesto que la mayor parte del material es removido en forma de viruta, la energía que requiere la remoción es significativamente menor que cuando se trabaja con un solo haz. También, como la separación es trozo por trozo, en lugar de molécula por molécula, el tiempo que requiere la operación se reduce mucho. Finalmente, el uso de un par de haces resulta en una enorme flexibilidad en términos de formas que pueden producirse.

En experimentos de torneado con LASER realizados en piezas cilíndricas de acero de 5 cm de diámetro [7], se requirieron densidades de energía superiores a 10 MJ/cm² para formar virutas con un área transversal de 1 cm². Con un haz de 500 W, se necesitaron más de 30 pasadas a través de la pieza para remover material. En algunos casos, la viruta al quitarse se incorporó en la superficie por resolidificación; este problema se minimizó con la asistencia de un chorro de gas que soplo la materia derretida de cada surco. Este método mejora también la calidad superficial de las partes terminadas minimizando la formación de escoria. En general, el uso de un gas reactivo conlleva a grandes valores de viruta removida pero es pobre la calidad superficial resultante y la profundidad del corte no puede regularse fácilmente. Asistido con un gas inerte los volúmenes de virutas son menores, pero se mejora la calidad superficial y las variaciones en la profundidad de cada surco se minimizan. Para que la aplicación del LASER en el torneado, fresado y roscado de metales sea efectiva, particularmente en aceros, podrían requerirse potencias altas (alrededor de 2-3 kW en modo continuo) [7].

Tabla 6.2. Valores representativos para marcado LASER en metales.

Material	LASER	Potencia	Profundidad de surco	Referencia
Acero bajo en carbono	CO ₂	1-10 MJ/cm ²	0.3-2 mm	7
Acero inoxidable	CO ₂	1-10 MJ/cm ²	1.6-4.5 mm	7

6.3. Cerámicos.

6.3.a. Maquinado unidimensional: barrenado.

El LASER de CO₂ puede usarse con buenos resultados en el maquinado de materiales cerámicos. A causa de su alta dureza y fragilidad, el maquinado de cerámicos por métodos convencionales, mecánicos o ultrasónicos, es costoso y muy lento. Por ejemplo, el barrenado ultrasónico de óxido de aluminio requiere aproximadamente 30 segundos por orificio [10]; además el costo de este método es aproximadamente el triple del barrenado LASER. El barrenado mecánico necesita operaciones adicionales como fijado con adhesivos a un sostén previamente al maquinado y operaciones de limpieza posteriores. El maquinado LASER puede aplicarse antes o después de la "cocción" del material cerámico. Los resultados y datos presentados en esta sección se refieren principalmente al maquinado de piezas cerámicas después de la cocción del sustrato o sinterizado (tabla 6.3). Sin embargo, algunas operaciones han sido desarrolladas "en verde" (piezas cerámicas no cocidas) [8]. Existen dos grandes problemas al aplicar el LASER en sustratos verdes. Primero, como el haz produce un calentamiento local, el material cercano a la orilla se torna frágil y quebradizo. Segundo, durante el proceso de cocción, puede ocurrir una contracción anisotrópica superior al 20%, causando grandes desviaciones en la precisión dimensional de la parte maquinada. Como los metales, los cerámicos pueden barrenarse por percusión (fig. 6.13) o trepanación (6.14).

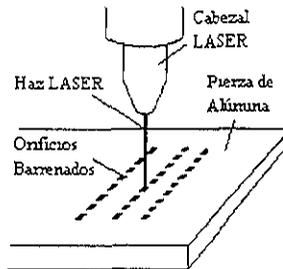


Figura 6.13. Barrenado LASER en alúmina.

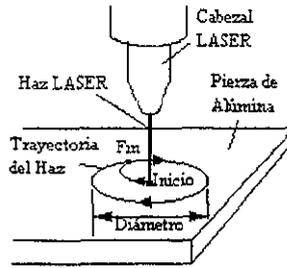


Figura 6.14. Barrenado LASER por trepanación en alúmina.

Una consideración del proceso es la energía requerida para iniciar el barrenado. Un valor de umbral de densidad energética se define como el nivel bajo el cual no es posible la remoción. Para óxido de aluminio descubierto [15], los rangos de densidad de energía de umbral van de 750 a 1000 J/cm². Este valor puede disminuir a aproximadamente 400 J/cm² cubriendo la pieza con una capa de oro, que es un material relativamente buen conductor térmico. En [10], se encontró un valor de 2000 J/cm² para óxido de aluminio no poroso.

En [7] se barrenaron orificios de 0.25 mm de diámetro y 0.1 mm de espesor de pieza de trabajo con un LASER pulsado de CO₂. La frecuencia del pulso fue de 500 Hz y su duración de 200 ms. Una velocidad de maquinado de 0.1 segundos por agujero se alcanzó, y se obtuvo una precisión dimensional de ± 0.02 mm para el posicionamiento y ± 0.05 mm de variación en el diámetro. Un LASER de CO₂ de 1.2 kW en modo CW se utilizó para barrenar orificios sin salida en óxido de aluminio [10] con rangos de profundidad de 0.02 a 1 cm. Los rangos de densidad de energía estuvieron entre 2 kJ/cm² y 500 kJ/cm². En [7], se obtuvieron orificios de más de 0.25 mm de diámetro barrenando óxido de aluminio con densidades de potencia entre 10⁶ W/cm² y 10⁸ W/cm² usando un LASER de CO₂. El tiempo de barrenado fue menor a 0.2 s/agujero. Se lograron fondos de agujero de notable acabado, pero por el efecto de divergencia del haz, que para lograr el diámetro deseado se aumentó alejando el cabezal, los orificios fueron cónicos.

Un problema encontrado en el barrenado de cerámicos es el material resolidificado que se forma en el orificio. Como las temperaturas de fusión de estos materiales son altas y la remoción es principalmente por fusión, una capa fundida se forma en el frente de erosión. Como consecuencia del espacio limitado del agujero se dificulta la expulsión del material con un chorro de gas. La restante capa vuelta a fundir reduce la profundidad del orificio absorbiendo la energía del haz y degrada la calidad superficial al incrementar la rugosidad. En [19] el problema disminuyó cubriendo previamente el sustrato con alcohol polivinílico. El recubrimiento minimizó la adhesión del material refundido alrededor de la entrada del orificio. Dentro la capa se removió con un proceso

secundario de abocardado con una esfera de vidrio.

La formación de microfrazuras en las cercanías del orificio es otro problema del proceso tratado (fig. 6.15). La causa de las fracturas es el calentamiento rápido que causa grandes gradientes de temperatura cerca de la superficie del orificio. Este fenómeno puede minimizarse precalentando la pieza a una temperatura elevada antes del maquinado. De esta manera los gradientes de temperatura alcanzados durante el proceso son significativamente menores que cuando la pieza está fría.

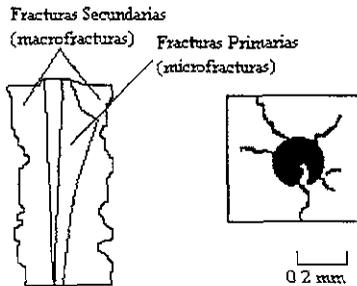


Figura 6.15. Formación de fracturas en orificios barrenados con LASER de CO₂.

Una aplicación industrial del barrenado de cerámicos con LASER de CO₂ es la manufactura de placas de distribución para lechos fluidificados en intercambiadores de calor .

Tabla 6.3. Valores representativos para el barrenado de cerámicos con LASER de CO₂.

Material	Potencia (W)	Velocidad de barrenado	Profundidad de orificio	Diámetro de orificio	Aplicación
Óxido de aluminio	150	0.1seg/orif.	0.025 plg.	0.01 plg.	Barrenado Percusivo
Óxido de aluminio	1200		0.02-1cm	0.03 cm	Barrenado Percusivo
Óxido de aluminio	1000	44ms/orif.	0.027 plg.		Barrenado Percusivo
Nitruro de silicon	1500		4.5 mm	0.03 cm	

Fuente [7].

La placa distribuidora se utiliza para sostener el material del lecho y asegurar la distribución uniforme del gas sobre la placa. En muchas aplicaciones, el gas se encuentra a muy altas temperaturas (1100-1700 °C) y es corrosivo, por eso los cerámicos tales como carburo y nitruro de silicón y óxido de aluminio son los únicos materiales aplicables. Cada placa distribuidora debe tener del 3 al 10 % del área superficial abierta para permitir el paso del gas, así que debe barrenarse un arreglo de orificios de diámetros inferiores a 1.5 mm en densidades de aproximadamente 1500 por pié cuadrado [7]. Realizar este proceso es muy difícil por métodos convencionales, pero está bien situado en el campo de aplicaciones del maquinado LASER.

6.3.b. Maquinado bidimensional: corte.

El corte convencional de cerámicos se realiza usualmente con una sierra de diamante. No obstante que esto da una alta calidad superficial, la velocidad de corte es baja, comúnmente de 20 mm/min. El corte con LASER de CO₂ permite velocidades superiores a 1200 mm/min [7], un incremento significativo sobre el maquinado convencional sin sacrificar la calidad de superficie (tabla 6.4).

En [15] se cortó cerámica de espesores de 0.6 a 4 mm, con LASER de CO₂ de potencias de 150 a 500 W, y las velocidades de corte se registraron de 0.1 a 1.2 m/min. El material fue removido principalmente por vaporización local. En [19] se cortó alúmina con un LASER de CO₂; las densidades de potencia fueron de 106 a 108 W/cm². Se alcanzaron velocidades de corte de 3 a 5 mm/s. El material en la cavidad se fundió y eyectó con un chorro de gas, o se evaporó parcialmente.

Para minimizar la formación de microfracturas se precalienta la pieza del mismo modo que en el proceso de barrenado. El corte de piezas de carburo y nitruro de silicón y circonia magnesia estabilizada se investigó usando un LASER de CO₂ con un diámetro mínimo de punto enfocado de 2.7 mm. Para disminuir las fracturas, los especímenes fueron calentados primero en un horno a 1400 °C. Se usó un chorro de gas para reducir la oxidación y prevenir la formación de plasma. El nitruro de silicón requirió para evitar la fractura una secuencia de calentamiento y enfriamiento; las probetas se calentaron a 1000 °C en etapas de 200 °C, entonces se maquinaron y se les permitió enfriarse a temperatura ambiente. El rango de potencias del haz fue de 1 a 4 kW con velocidades de corte de 15 a 150 mm/min. El ancho del surco fue de 0.66 a 4 mm en la cima y de 0 a 2.3 mm en el fondo. El rango de profundidades fue de 6.35 a 740 μm. El área de la que se removió material estuvo entre 5.8 y 1500 mm² y los valores de remoción estuvieron entre 33 y 2300 mm³/min; un incremento en la velocidad de corte resultó en una disminución de material removido. El carburo de silicón se comportó en forma similar al nitruro de silicón. La circonia se maquinó a 1225 °F y 1825 °F con uno y múltiples pasadas. Los rangos de potencia estuvieron entre 2 y 6 kW y la velocidad de corte varió de 9100 a 16000 mm/min. La profundidad de corte

resultante tuvo un rango de 0.13 a 0.9 mm. En general, altas densidades de potencia y precalentamiento tienen por resultado altos valores de remoción.

Tabla 6.4. Valores representativos para el corte de cerámicos con LASER de CO₂.

Materiales	Potencia/densidad de potencia	Velocidad de corte	Profundidad de corte	Ancho de cavidad
Óxido de Aluminio	150 W	0.5 m/min	0.635 mm	
Óxido de Aluminio	10 MW/cm ²	5 mm/min	0.63mm	
Circonia	2-6 kW	360-463 plg/min	0.004-0.01 plg	0.036-0.1 plg
Cuarzo	500 W	1.2 m/min	2 mm	
Sílice	450 W	0.6 m/min	1 mm	
Nitruro de silicón	1-2 kW	60-123 plg/min	0.02 plg	0.084 plg

6.3.3. Maquinado bidimensional: rayado y marcado.

El marcado LASER se ha usado para imprimir a alta velocidad etiquetas cerámicas de identificación. También ha tenido aplicación en el campo de la electrónica para la producción de líneas de cierre en láminas de óxido de aluminio durante la fabricación de tabletas de circuitos [7]. Líneas de 0.08 a 0.2 mm de profundidad fueron formadas usando LASER 's pulsados de CO₂ de 50 y 125 W con diámetro de haz enfocado de 140 μm. La frecuencia del pulso fue de 250 Hz, su duración varió de 0.28 a 0.8 ms y la velocidad de barrido fue de 80 mm/s. El análisis microscópico de la superficie de la pieza mostró la presencia de microfracturas a lo largo del surco. También se encontró una delgada capa de material fundido. La solidificación de este material condujo a un encogimiento del material, lo que resultó en esfuerzos residuales en las cercanías de la línea de cierre. En [3], una línea marcada de 40 μm de profundidad se produjo con un LASER pulsado de CO₂ de 80 W y una velocidad de barrido de 5 m/min. La formación de microfracturas en la pieza se minimizó disminuyendo la duración del pulso a 50 ms. En estas condiciones, el límite entre la capa refundida y el material de la pieza sirvió como una efectiva barrera contra la propagación de las fracturas. En [6], líneas de cierre de 0.63 mm de profundidad se produjeron usando un LASER de CO₂ con un rango de velocidades de barrido de 15 mm/s a 75 mm/s.

En [10] se hicieron surcos en óxido de aluminio usando un LASER de CO₂ de 1.2 kW operando en modo continuo. El diámetro del haz enfocado fue de 0.1 cm y 0.013 cm. Se alcanzaron profundidades de surco de entre 0.1 y 20 mm usando densidades de energía de 10⁵ J/cm² y 5x10⁵ J/cm². La eficiencia energética, calculada como

el calor de fusión del material entre la energía suministrada por el haz, fue relativa a la profundidad del surco. La mayor eficiencia se alcanzó a una profundidad de surco igual a cuatro veces el diámetro del punto del haz. Al aumentar la profundidad la eficiencia decrece y y a valores mayores de 30 veces el diámetro del punto se reduce considerablemente.

En surcos profundos, la formación de material resolidificado en las paredes reduce la eficiencia energética absorbiendo energía del haz que podría usarse para remover material adicional. La capa refundida que, dicho sea de paso, degrada la calidad de la superficie, puede minimizarse usando un chorro no axial de gas para expeler el material fundido (figs. 6.16 y 6.17).

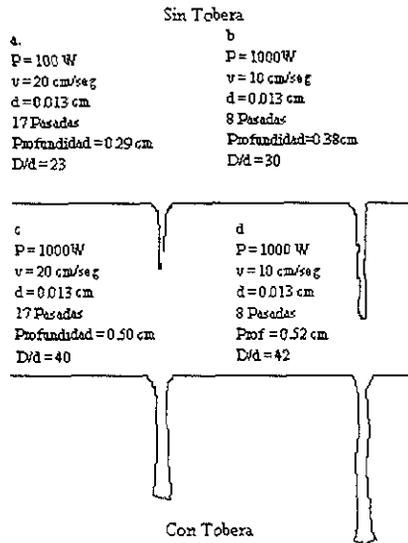


Figura 6.16. Sección transversal de formas de surcos para varias condiciones de chorro de gas en aluminio

El mercado LASER en piezas de nitruro de silicón se desarrolló usando un LASER de 1.2 kW de CO₂ en CW. La velocidad de barrido fue de 5 a 125 cm/seg. Se maquinaron profundidades de surco superiores a 1 mm. A consecuencia del uso de un haz linealmente polarizado, la forma y la profundidad del surco se vieron afectadas por la dirección de barrido del haz [7]. Los surcos más profundos se maquinaron cuando la dirección de barrido era paralela a la dirección de polarización. La profundidad mínima para una condición de operación dada ocurrió cuando la dirección de barrido era perpendicular a la dirección de polarización del haz. Para otras direcciones de barrido, la forma del surco fue oblicua.

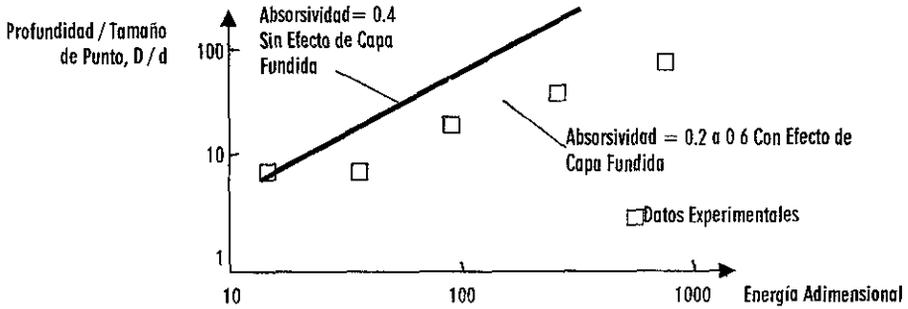


Figura 6.17. Profundidad de surco vs. densidad de energía en alúmina.

Un método alternativo para marcado LASER en la producción de líneas de cierres se propone en [10]. Usando un LASER de CO₂ en modo CW, con el haz se calentó ó fundió una línea en la superficie de la pieza. El rápido calentamiento produce microfracturas en todo lo largo de la línea, y la pieza puede ser separada aplicando una torsión. Una desventaja de este proceso es que las impurezas del material causan fracturas fuera de la línea afectando su rectitud. La ventaja es que pueden usarse altas velocidades de barrido. En substratos de alúmina, se alcanzaron velocidades superiores a 5 mm/seg con densidades de potencia entre 10⁴ W/cm² y 10⁵ W/cm².

Tabla 6.5 Valores representativos para surcado con LASER de CO₂ en cerámicos.

Material	Potencia [W]	Velocidad de Barrido	Profundidad de Cavidad	Aplicación
Óxido de Aluminio	50 - 125	80-100 mm/seg	0.04-0.2 mm	Líneas de Cierre
Óxido de Aluminio	1,000	0.5 cm/seg	5 mm	17 Pasadas
Óxido de Aluminio	1,200	0.05-5 cm/seg	0.1-20 mm	
Nitruro de Silicón	340 - 560	5-38 cm/seg	0.01-0.5 mm	

6.3.d. Maquinado tridimensional.

Una nueva propuesta ha sido recientemente desarrollada por el maquinado LASER tridimensional, como se describe en la sección 6.2.d. El concepto de maquinado con dos haces puede usarse para desarrollar operaciones de torneado y fresado en materiales difíciles de maquinar, tales como óxido de aluminio y nitruro de silicón [7]. Con este método, solo una pequeña porción de material se remueve por fusión; la mayor parte es en forma de virutas. No obstante, la eficiencia energética del proceso en términos de material removido por unidad de gasto de energía es significativamente mayor que por otros métodos no convencionales de maquinado. También, este

proceso produce geometrías tridimensionales tales como roscado o superficies curvas difíciles de producir con procesos mecánicos. A causa de la dureza y fragilidad de la mayoría de los cerámicos, el resultado de maquinar mecánicamente es un deterioro significativo en la herramienta que incrementa el costo de manufactura de la parte. Puesto que el maquinado LASER no involucra contacto entre la herramienta y la pieza de trabajo, no hay desgaste en la primera. Durante el procesado, el material fundido se eyecta de los surcos con la asistencia de un chorro no axial supersónico de gas [7]. Como en el maquinado tridimensional de metales, se requieren altas densidades energéticas y múltiples pasos del haz para remover las virutas en los cerámicos.

Una técnica con un haz individual puede usarse para remover material a través de fusión o vaporización selectivas. En [19], un hueco de 0.7 mm de profundidad se maquinó en nitruro de silicón traslapando surcos con el haz LASER perpendicular a la superficie de la pieza de trabajo. Se usó una densidad de potencia de 6×10^6 W/cm², resultando valores de remoción de 30 mm³/min.; Se alcanzó un acabado superficial de 7 μm RMS.

En [15], se presenta una técnica similar, se utiliza un LASER de CO₂ de 450 W en CW para maquinar surcos superpuestos. Carburo de silicón, nitruro de silicón, alúmina y SiAlON fueron examinados. El haz se hizo incidir en forma tangencial a la superficie de la pieza para crear un surco. En el estudio, la rugosidad superficial de la parte terminada se controló con sucesivas pasadas a traslape del haz. Esta técnica se utilizó para producir canales o roscas en la pieza. Los valores de remoción pueden incrementarse usando un chorro de O₂ o N₂ para el corte reactivo.

6.4. Plásticos

6.4.a. Maquinado unidimensional: barrenado

Los LASER 's pueden ser utilizados en aplicaciones que requieren barrenados profundos y de alta precisión en plásticos, tales como orificios en boquillas de aerosol y catéteres. Como la mayoría de los plásticos tienen altos valores de absorbilidad para la longitud de onda del CO₂, las pérdidas de energía debidas a reflexión superficial son bajas. Puesto que el material se remueve principalmente por vaporización, los problemas de acumulación de material fundido y resolidificación asociados al barrenado de metales y cerámicos no están presentes en los plásticos. Asimismo, la densidad de energía de umbral para remoción de plástico es varios órdenes de magnitud más baja que en los cerámicos. Las desventajas principales en el barrenado LASER de plásticos son la conicidad del orificio y el daño térmico en el caso de los plásticos termoendurecidos. Puesto que pueden barrenarse fácilmente orificios profundos, la conicidad asociada con la divergencia del haz es un problema. En las aplicaciones donde la rectitud de las paredes es esencial, puede minimizarse el problema si la estabilidad del haz es controlada manteniendo un modo TEM₀₀ firme y cambiando constantemente el punto focal de lo más hondo

del orificio a la superficie. La degradación térmica ocurre cuando la temperatura de la pieza se eleva por encima del punto de carbonización, en donde el material polímero se descompone a causa de interacciones químicas como oxidación, o pirólisis (descomposición química por calor) en sus componentes gaseosos y químicos.

Para boquillas de aerosol, se requieren orificios con diámetros de 0.15 a 1 mm de diámetro. Las técnicas convencionales de formado no tienen la flexibilidad para cambiar el tamaño del orificio durante el proceso. El barrenado LASER combina esta flexibilidad con altas velocidades de producción. Usando un LASER de CO₂ con un rango de potencias entre 50 y 185 W, se barrenó a velocidades de 20 a 1000 agujeros por segundo. Las variaciones del diámetro fueron menores de ± 0.025 mm. El diámetro pudo cambiarse mientras se maquinaba modificando la distancia focal entre el haz y la pieza o variando la potencia del haz.

Tabla 6.8. Valores representativos para barrenado con LASER de CO₂ en plásticos.

Material	Potencia [W]	Velocidad de Barrenado	Profundidad del Orificio [µg]	Diámetro del Orificio [µg]	Aplicación
Mylar	185	0.15 ms/orif.	0.01	0.01	
Nylon	185	0.5 s/orif.	0.3	0.008	
Polietileno	50-185	0.05-8 ms/orif.	0.015	0.006-0.1	Medidor de flujo, taberas de aerosol
Poliuretano	185	0.6 s/orif.		0.1	Barrenado de catéteres

Fuente [7]

6.4.b. Maquinado bidimensional: corte.

Los LASER's de CO₂ pueden usarse para cortar láminas de plástico a alta velocidad (tabla 6.9). Los factores principales en el proceso son esquiroleo por fundición (flujo de material fundido fuera de la cavidad bajo la influencia de un chorro de gas), vaporización y degradación química. Para las bajas densidades de energía investigadas en [7], se observó que el esquiroleo por fundición es el principal mecanismo de remoción de material en los polímeros más comunes, incluyendo polipropileno, polistireno, nylon y ABS. Este fenómeno es similar al mecanismo de corte para cerámicos y metales, en donde el haz funde el material en el frente de corte y se eyecta por la acción de un chorro de gas. La vaporización ocurre en materiales con alta absorbilidad como acrílico (fig. 6.18) o cuando se usan altas densidades de energía de alrededor de 10⁵ J/cm². Principalmente, la degradación química les ocurre a las resinas fenólicas y epóxicas cuando se les aplica el LASER. Las posibilidades del corte con LASER de CO₂ para un amplio rango de materiales termoplásticos y termoendurecidos se examinó en [10] con

variaciones en la potencia, velocidad de corte, espesor del material, ancho y fondo de cavidad, conicidad de borde (diferencia de espesores entre el fondo y la cresta) y carbonización. En general, para la mayoría de los plásticos se alcanzaron velocidades de corte superiores a los 3000 mm/min. Las potencias del haz se variaron de 50 a 950 W.

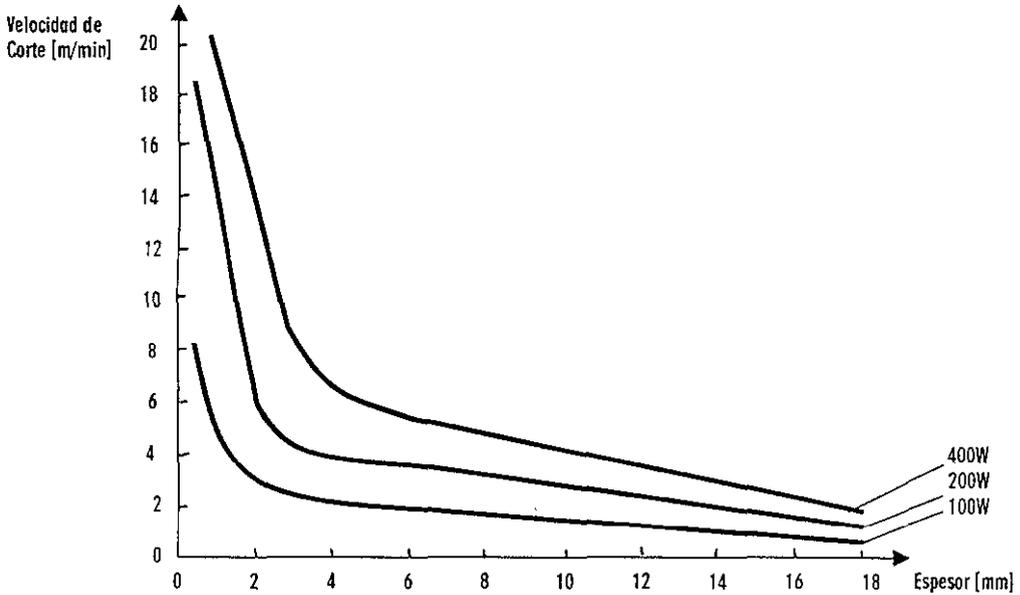


Figura 6.18. Velocidad de corte vs. espesor de pieza en acrílico.

El corte de materiales termoendurecidos con LASER produce una capa carbonizada en todo lo largo de la cavidad, usualmente menor de 0.05 mm de espesor. Esta capa es más evidente en el corte de materiales epóxicos, poliéster, resina fenólica y policarbonato. Puede removerse en una operación secundaria frotando con alcohol o soplando vapor con una canica de vidrio. Los termoplásticos pueden generalmente ser procesados sin que se carbonicen.

Una aplicación industrial particularmente exitosa es el corte de cinturones de asientos [7], que son usualmente manufacturados de nylon tejido, en cual es difícil de cortar mecánicamente. Usando un haz de 500 W, se alcanzan velocidades de corte de 12 m/min. La orilla maquinada se sella sin rebabas ni quemaduras. Otra aplicación industrial es la remoción selectiva de recubrimientos plásticos de películas o alambres metálicos. El material protector puede vaporizarse sin dañar el metal.

Tabla 6.7. Valores representativos de corte de plásticos con LASER de CO₂.

Materia	Potencia [W]	Velocidad de Barrido [m/min]	Profundidad de Cavidad [mm]
ABS	400 - 1200	0.6 - 4.5	3.175 - 12.7
Policarbonato	400	0.82 - 4.8	3.175 - 12.7
Polietileno	400	0.4 - 18	0.635 - 12.7
Polipropileno	400	0.5 - 3.4	3.175 - 12.7
Polistireno	400 - 1300	0.55 - 50	0.635 - 7.5

Fuente [7]

6.4.c. Maquinado bidimensional: rayado y marcado.

El rayado y marcado de plásticos con LASER ha sido usado para la producción de plantillas y marcado de etiquetas de identificación en partes plásticas (tabla 6.8). El proceso de marcado LASER para grabar etiquetas de identificación en paquetes plásticos fue investigado en [15] utilizando un LASER de CO₂ de 1 kW. El plástico era templado y la profundidad de surco fue de 1 mm. Una aplicación industrial exitosa es la producción de plantillas posicionadoras de acrílico. Las líneas curvas de guía en cada plantilla se graban con LASER dentro de una pieza delgada. Este proceso produce limpias líneas guía con alta precisión dimensional y sin desechos.

6.4.d. Maquinado tridimensional.

El concepto de maquinado tridimensional con LASER descrito en 6.2.d puede aplicarse también al formado de partes plásticas. Este proceso representa un método para crear complicadas formas tridimensionales en plásticos con altas velocidades de maquinado.

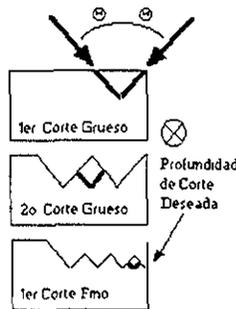


Figura 6.19. Configuración para fresado con dos haces en acrílico

Puesto que la mayoría de estos materiales tienen una alta absorción para la longitud de onda irradiada por el CO₂, pueden producirse surcos profundos y removerse grandes volúmenes de material con un solo pase del haz, comparados con las múltiples pasadas necesarias para hacer lo mismo en metales y cerámicos.

Remoción helicoidal, anular, y técnicas de fresado transicional pueden usarse para procesar partes acrílicas (fig. 6.12). Roscas con ángulos de 60° y paso de 3.2 mm pueden producirse en piezas cilíndricas. En piezas rectangulares, el fresado LASER utiliza dos haces (fig. 6.19). Una comparación entre valores de remoción de material vs. calidad superficial muestra una relación de cambio entre la rugosidad de superficie y la cantidad de material removido.

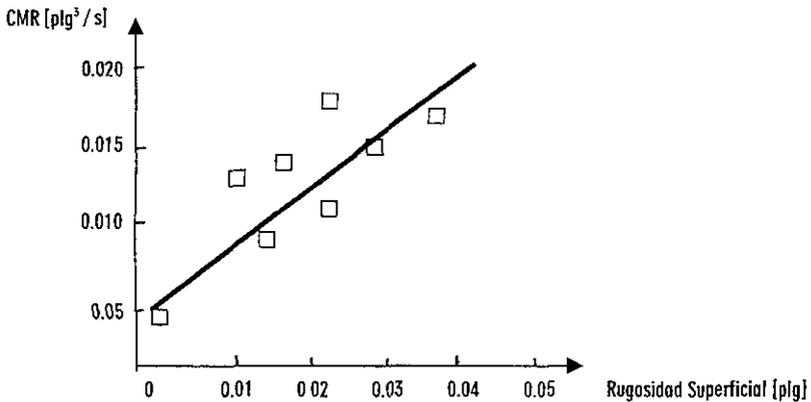


Figura 6.20. Cantidad de material removido vs. rugosidad superficial para fresado LASER en acrílico.

6.5. Materiales compuestos.

6.5.a. Maquinado unidimensional: barrenado.

Los materiales compuestos tienen un gran potencial en aplicaciones de manufactura debido a su peso ligero, alta resistencia y propiedades direccionales. En los compuestos usualmente es necesario un proceso de acabado para alcanzar la calidad superficial final y la precisión dimensional si se requieren altas tolerancias no alcanzables por el procesamiento inicial. Los procesos de acabado incluyen generalmente esmerilado, desbastado, barrenado y taladrado. Para esmerilado y desbastado la precisión comúnmente alcanzada es ± 1 mm, mientras que en el barrenado y taladrado se requieren tolerancias menores de ± 0.1 mm.

Las operaciones convencionales de maquinado son difíciles de desarrollar en los materiales compuestos debido a su anisotropía, inhomogeneidad, dureza y abrasividad. El maquinado LASER ofrece las ventajas de: no desgastar la herramienta, no presentar fuerzas de contacto y tener relativamente alta precisión. Una comparación

entre varias técnicas para operaciones secundarias en materiales compuestos se muestran en la figura 6.21. La efectividad del maquinado con LASER de CO₂ depende principalmente de las propiedades térmicas del material; el tipo y la cantidad de las fibras constituyentes y la matriz determinan la respuesta térmica de éste al haz.

El barrenado LASER se ha aplicado a muchos materiales compuestos de Kevlar y fibra de grafito (tabla 6.9). Para la mayoría de los compuestos las técnicas de maquinado mecánico causan formación de calor y esfuerzos cortantes excesivos en la zona de corte, causando delaminación entre las capas de compuesto y desunión entre las fibras y la matriz. En [7], orificios de 0.125 plg. de diámetro fueron barrenados en Kevlar/epóxico de 0.05 plg de espesor con un LASER de CO₂ de 1.2 kW usando el método de trepanado. El ciclo de tiempo fue aproximadamente de 1.5 seg por orificio. En [19] se usó un método similar con un haz pulsado de 185 W para producir orificios de 0.2 plg. de diámetro en el mismo material, pero de 0.01 plg. de espesor. Se alcanzaron ciclos de tiempo de 0.6 s por orificio. El barrenado LASER también aplicado en varios compuestos de matriz cerámica. Materiales de matriz de nitruro de silicón y alúmina con zirconia se barrenaron con un LASER de CO₂ de 1.2 kW.

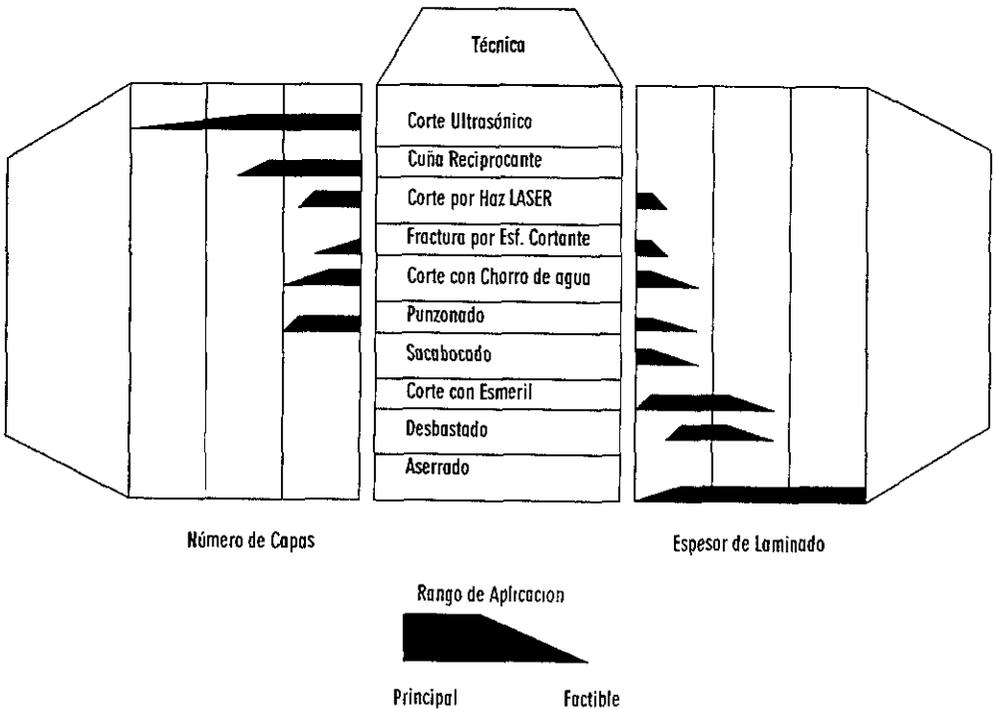


Figura 6.21. Comparación de técnicas de maquinado para materiales compuestos.

Tabla 6.9. Valores representativos para barrenado con LASER de CO₂ en materiales compuestos

Material	Potencia	Velocidad de Barrenado	Profundidad de Orificio	Diámetro de Orificio	Aplicación
Kevlar/Epóxico	185W-1.2kW	0.6-1.5 s/orif.	0.05 plg	0.125-0.2 plg	Trepanado

Fuente [7]

6.5.b. Maquinado bidimensional: corte.

El maquinado LASER compite con el corte por chorro de agua y las técnicas mecánicas en las operaciones de acabado. A pesar de los altos costos capitales de los sistemas LASER, este método aventaja a los demás porque logra cortes estrechos, daño muy localizado y altas velocidades de corte. Para materiales de fibras de aramida, el LASER alcanzó velocidades de corte 2.5 veces mayores que el maquinado mecánico [7].

Una característica del corte LASER es la relación entre la eficiencia del corte y la dirección de incidencia del haz relativa a la orientación de la fibra. Debido a la anisotropía del material, la respuesta térmica de la pieza al haz depende de la dirección del corte. Este efecto es más aparente en compuestos de fibra de grafito en los que las propiedades térmicas entre los materiales constituyentes difieren mucho [7]. En experimentos de corte sobre laminado uniaxial, se encontró que las pérdidas caloríficas fueron máximas y la velocidad de corte mínima cuando las fibras eran ortogonales a la dirección del corte; en esta orientación, el flujo calorífico es a lo largo de la dirección de la fibra. La calidad de corte, en términos de presencia de material carbonizado, extensión de delaminación e inclinación de la superficie de la cavidad, depende de la velocidad de barrido, la potencia del haz y la asistencia de gas. Un chorro coaxial de gas inerte (He y Ar) puede usarse para minimizar la carbonización [7]. En general, la calidad de corte es mayor en los compuestos que exhiben propiedades térmicas similares entre sus materiales constituyentes (tal como Kevlar/poliester). El grafito y la fibra de vidrio dan resultados pobres a causa de la alta temperatura de vaporización de la fibra de vidrio y la alta conductividad térmica del grafito. Los compuestos de grafito reforzado han resultado ser los menos adecuados para cortarse con LASER debido a la conductividad y temperatura de vaporización altas [7]. Dos formas de daño se encontraron en el proceso. Daño superficial a causa de los efectos de la conducción de calor (daños primarios) existen cerca de la región de entrada del haz a la cavidad. Daño superficial debido al gas de asistencia reflejado (daños secundarios) ocurren principalmente cerca de la región de salida del haz. En experimentos desarrollados en grafito epóxico, la zona de afectación térmica resultó ser significativamente mayor en la entrada que en la salida de la cavidad (fig. 6.22) [7]. La misma zona en compuestos de fibra de vidrio y aramida fue solamente del 20 a 30 % de la de fibra de grafito (fig. 6.23); el espesor de daño térmico también mostró un decremento al incrementarse la velocidad de

corte [19].

Algunas características comunes de morfología superficial encontradas en estudios experimentales son retracción matricial, especialmente pérdida irregular de material entre la fibra y la matriz al ser calentadas por el haz, formación de una capa carbonizada en las cercanías de la superficie de la cavidad y longitudes desuniformes de las fibras en la misma. En la mayoría de los casos, la carbonización superficial contribuye a incrementar la conicidad del borde y la rugosidad superficial. En [15] se usó abrasión mecánica post-proceso para reducir la capa carbonizada, la utilización de altas velocidades de barrido se sugiere en [10] para reducir el daño por conducción térmica.

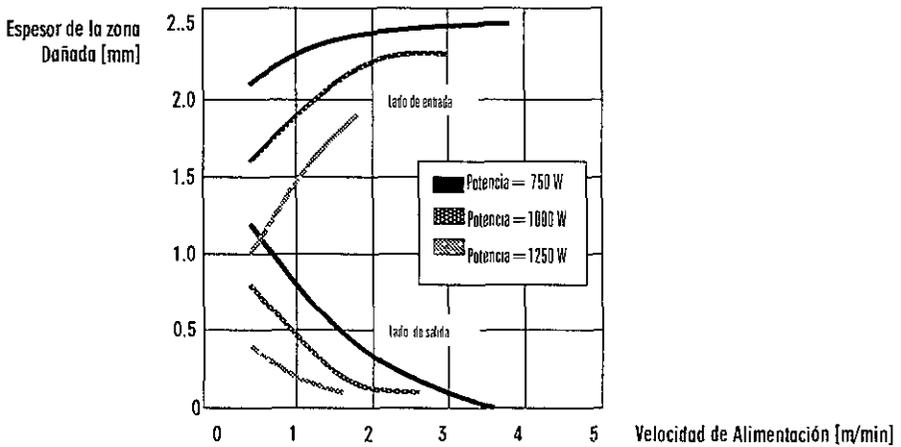


Figura 6.22. Espesor de daño vs. velocidad de avance para corte con LASER de CO₂ en grafito epóxico [64].

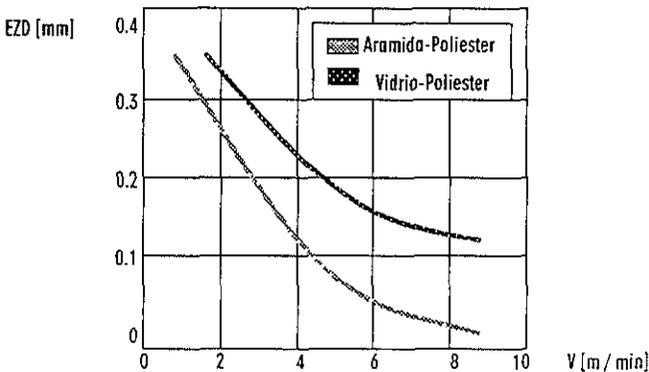


Fig. 6.23 Espesor de daño vs. velocidad de avance para corte con LASER de CO₂ en vidrio/poliéster y aramida/poliéster [15].

La pérdida desuniforme de material está en función del parentesco entre la matriz y las fibras y depende fuertemente de la conductividad térmica de los materiales constituyentes. En el caso de aramida con materiales de vidrio y grafito, las fibras de ésta tienen características similares a los materiales poliméricos de la matriz, por eso el comportamiento del material durante su interacción con el haz es parecido al de los materiales homogéneos. En el caso de aramida epóxica, una micrografía muestra una superficie relativamente uniforme entre las regiones de la matriz y la fibra. Sin embargo, las fibras de grafito tienen valores de conductividad térmica dos veces mayores de los que presentan los materiales de la matriz polimérica. Esto causa una alta direccionalidad en la conducción de calor de la pieza y una zona de afectación térmica mucho mayor que con otros materiales fibrosos. Asimismo esta zona tiende a propagarse a lo largo de la dirección de orientación de las fibras. Las fibras de vidrio pueden removerse por fusión en vez de vaporización, sin embargo, esto causa mayor rugosidad superficial a causa de la resolidificación del material derretido [7].

Tabla 6.10. Valores representativos para el corte con LASER de CO₂ de materiales compuestos.

Material	Potencia [W]	Velocidad de Corte	Profundidad de Cavidad [mm]	Ancho de Cavidad [mm]
Aramida/Poliéster	800	0.5 m/min	2	0.6
Vidrio Epóxico	1000	2 m/min	5	0.5
Vidrio/Poliéster	8000	0.5 m/min	2	
Grafito Epóxico	1000-2000	15-120 mm/s	1-4	
Grafito/Epóxico	300	5 mm/s	1	0.1
Grafito Poliéster	800	0.5 m/min	2	0.5
Kevlar Epóxico	150-900	34 mm/s	3.2-9	0.1

Fuente [7]

Un problema en el maquinado LASER de materiales compuestos es que los productos de la descomposición química causada por las altas temperaturas pueden ser peligrosos. Análisis de espectrometría de masa y cromatografía de gas se aplicaron durante el corte con LASER de grafito epóxico, aramida epóxica y vidrio epóxico [26]. La descomposición de la matriz produce concentraciones de CO, CO₂ y componentes orgánicos pobres en moléculas. Se ha mostrado que el corte de aramida epóxica origina grandes cantidades de cianuro de hidrógeno, el cual causa un severo daño en la salud [7].

6.5.c. Maquinado bidimensional: marcado.

En varias publicaciones, fueron investigados los procesos de surcado o marcado con LASER de CO₂ en carbón/teflón, vidrio/teflón y vidrio/poliester (tabla 6.11) [7]. Los materiales de matriz de teflón se componían de fibras cortas orientadas al azar, mientras los de vidrio/poliester lo estaban en fibras de vidrio largas y unidireccionales. El punto principal en el marcado LASER de compuestos es la naturaleza anisotrópica del material. La forma y profundidad del surco y la zona de afectación térmica dependen de la relación entre la dirección del haz y la orientación de las fibras. En la mayoría de las aplicaciones de surcado, el haz es directamente perpendicular a a la orientación de la fibras puesto que éstas usualmente se alinean en un plano perpendicular a la pieza de trabajo; sin embargo en algunos casos tales como el torneado o roscado, el haz puede estar dirigido en un ángulo arbitrario relativo a la orientación de la fibra. Las pérdidas de calor al ambiente y la descomposición de la matriz tienen los efectos de reducción de la profundidad del surco en altas densidades energéticas [7] (figs. 6.24 y 6.25).

Tabla 6.11. Resultados experimentales para marcado con LASER de CO₂ en compuestos.

Material	Densidad de Potencia [kW/cm ²]	Profundidad de Surco [mm]
Carbón / Teflón	100 - 1000	0.6 - 7
Vidrio / Teflón	100 - 1000	0.9 - 7.1
Vidrio / Poliester	60 - 1000	0.62 - 4.5
Grafito / Vinilister	60 - 1000	0.53 - 6.2

Fuente [7]

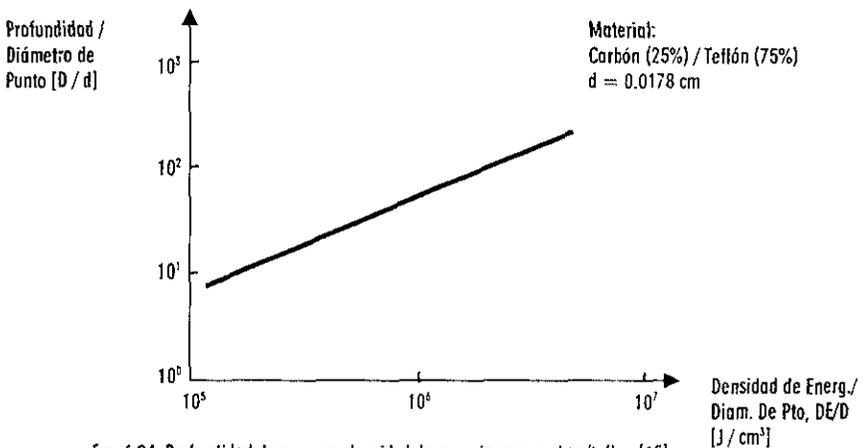


Fig 6.24. Profundidad de surco vs. densidad de energía para carbon/teflon [15]

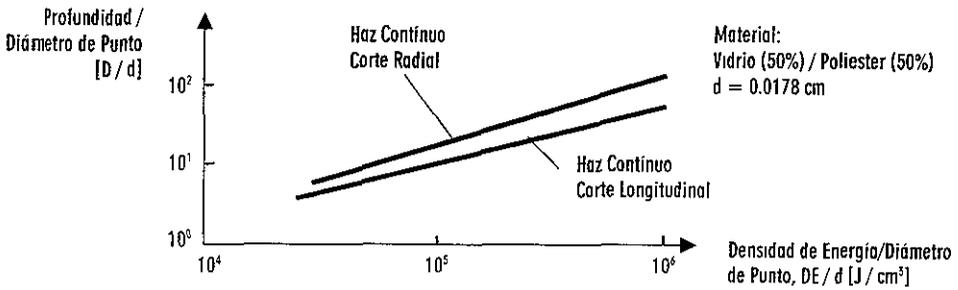


Fig. 6.25. Profundidad de surco vs. densidad de energía para vidrio/poliester [15]

6.5.d. Maquinado tridimensional.

Usando el concepto descrito en [10], pueden tornearse y roscarse piezas de carbón/teflón y vidrio/teflón. Fue utilizado un LASER de CO₂ operando en CW a 300 W con una velocidad de avance de 0.1 cm/seg y en tres pasadas para producir torneados y roscados en piezas sin carbonización ni daño superficial visible.

Un método de corte con un solo haz se introdujo para maquinar Kevlar epóxica en [10]. Aquí se removió un volumen de material maquinando un conjunto de surcos sobrepuestos con un haz. Los surcos se posicionaron a una distancia entre centros de 0.25 mm. Se usó un LASER de CO₂ pulsando a 10 ms y con un rendimiento de ciclo de 67 %. Se cortó un contorno de una profundidad media de 3.3 mm en una lámina de espesor de 6.2 mm; la profundidad de penetración del haz se incrementó al aumentarse la potencia. La tolerancia pudo controlarse a $\pm 0.25 \text{ mm}$. La capa carbonizada fue removida en un proceso secundario con un chorro de vapor arrastrando esferas de vidrio.

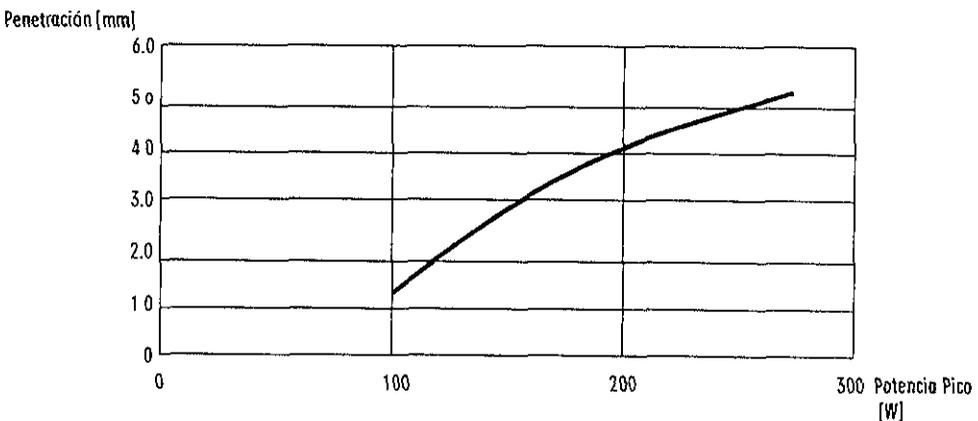


Fig. 6.26. Profundidad de penetración del haz vs potencia.

6.6. Otros materiales.

Además del maquinado de metales, cerámicos, plásticos y materiales compuestos, el LASER de CO₂ ha sido usado para barrenar, cortar, y marcar madera, papel, vidrio y hule. Las ventajas de ese proceso para estos materiales incluyen altas velocidades de maquinado, gran precisión dimensional y no acumulación de desechos. Algunos valores representativos se muestran en la tabla 6.12.

6.6.a. Madera.

El LASER de CO₂ se ha utilizado para el corte a altas velocidades de moldes de partes de mobiliario. En la mayoría de los casos, este proceso involucra vaporización u oxidación a altas temperaturas, ó quemadura del material. También tiene varias ventajas, tales como el poder maquinar surcos muy estrechos, la facilidad para cortar geometrías complicadas y formas esquinadas, el poder para iniciar y detener instantáneamente el corte y tener un mínimo efecto en la dirección del haz a causa de la veta de la madera. Adicionalmente se eliminan el polvo, las fuerzas cortantes y rugosidad por rasgaduras al arrancar granos. Sin embargo, el procesado por este método puede causar una substancial carbonización cerca de la cavidad, lo que empobrece la apariencia de la parte acabada. Este efecto se reduce usualmente usando un chorro de gas inerte junto con el haz. En general, son tres los parámetros que rigen el desempeño del proceso: espesor del material, contenido de humedad y contenido de aire. Como el agua es un gran absorbente para la radiación del CO₂, un gran contenido de la misma reduce la eficiencia del corte. El contenido de aire afecta la densidad y la conductividad térmica del material.

El corte en varios tipos de madera con un LASER de CO₂ de 1 kW se investigó en [7]. Para una potencia de 250 W las velocidades variaron de acuerdo al tipo de madera de 0.06 m/min para roble rojo con un contenido de humedad de 80 %, a 1 m/min para maple blando. Cuando la madera tiene un alto contenido de humedad se requieren bajas velocidades de corte para vaporizar el agua. Los nudos de la madera también necesitan cortarse a baja velocidad debido a su alta densidad, pero la cavidad resultante no muestra cambios geométricos. Las velocidades de corte para tablas de madera terciada (compuesta de hojas superpuestas) muestran una fuerte dependencia al tipo de pegamento usado. Los materiales pegados con urea pueden cortarse tres veces más rápido que los unidos con resina fenólica (fig. 6.27). Una fina capa carbonizada puede formarse a todo lo largo de la pared de la cavidad en estos casos.

6.6.b. Papel.

Las potencias y velocidades de corte requeridas para cortar papel pueden variar ampliamente dependiendo del tipo de éste (tabla 6.13). El corte mecánico del papel trae como común consecuencia la acumulación de grandes

volúmenes de desechos que pueden dañar la salud, además de causar un problema de espacio. Al ser cortado con LASER el papel se vaporiza, no se producen virutas. El corte y la perforación de papel con LASER de CO₂ se han usado en la manufactura del papel de cigarrillos. Aquí se requiere un proceso que pueda perforar orificios precisos de muy pequeño diámetro, porque su tamaño repercute en la dosificación de nicotina y alquitrán que se dejará pasar al filtro. Pueden alcanzarse velocidades de 330 m/min con un LASER de CO₂ de 185 W [4]. El proceso puede desarrollarse usando un haz pulsado o con una plantilla metálica colocada entre un haz continuo y el papel. La perforación con LASER produce orificios mucho más limpios que con medios mecánicos. El corte de otros tipos de papel tales como bond o papel periódico por este medio no es económico, porque los cortadores mecánicos alcanzan muy altas velocidades (por arriba de 2300 m/min por corte con siete cortadores por máquina). Para producir velocidades de corte equivalentes se necesita un haz de más de 70 kW [7].

Tabla 6.12. Velocidades máximas de corte para papel con un LASER de CO₂ de 250 W

Tipo de Papel	Espesor (x10 ⁻³ pulg)	Velocidad (m/min)
Bond	1.5	700
Bond	2	1000
Bond	3.5	200
Bond	4	350
Papel Cuadrulado	2	600
Papel Periódico	3	530
Papel Recubierto	5	200
Forbes	4.5	300
Laminado	10	130
Bond (3 capas)	4.5	130

Fuente [7]

6.6.c. Vidrio.

Los métodos convencionales para el corte de vidrio consisten en rayarlo y quebrarlo o pulverizarlo. Es difícil con esta técnica producir formas complejas y la velocidad de corte es generalmente baja. Para desarrollar figuras complicadas, barrenar y cortar placas de vidrio puede usarse un LASER de CO₂ sincronizado con el movimiento de la pieza. El principal problema asociado al proceso es la fractura térmica o destrucción de la pieza a causa de la alta capacitancia y baja conductividad térmica del material [7]. En algunos casos la resistencia a la flexión de

muestras de vidrio "rayadas" con LASER puede ser reducida a sólo 50 a 67 % de las rayadas por medios mecánicos, como consecuencia de microfracturas [7]. Hay dos métodos para cortar vidrio con LASER: por fracturas controladas y por fusión [4]. El primero puede realizarse con potencias bajas (del orden de 100W), pero la calidad de corte depende fuertemente del estado de esfuerzo de la pieza previo a la interacción con el haz. Los esfuerzos residuales pueden ocasionar fracturas fuera de la cavidad cuando la pieza se calienta con el haz; este efecto reduce lo recto del borde. El corte por fusión comúnmente requiere una potencia de 1000 W, pero produce cavidades limpias con superficies uniformes debido al vidrio resolidificado. Por esta razón no es efectivo un chorro de gas que eyectara el vidrio fundido [7]. Tubos de pared delgada pueden cortarse usando un LASER de CO₂ de baja potencia (250 W) [4]. La sección resultante del tubo tiene los extremos pulidos y alisados. El LASER produce también mínimos esfuerzos residuales. En general, puede alcanzarse una buena calidad superficial usando un haz de alta potencia y alta velocidad de barrido. Para cortar formas intrincadas se requiere baja velocidad; en este caso un haz pulsado minimiza las microfracturas. Esto también puede hacerse precalentando la pieza para reducir esfuerzos térmicos inducidos por el LASER.

El marcaje puede desarrollarse usando un haz pulsado para iniciar una falla por separación del vidrio a través de una fractura por flexión. Esta técnica es similar a los grabados químicos o al aguafuerte. Usando un haz con pulsos cortos (30 ms de duración por pulso), puede formarse un surco compuesto de un número de cavidades superficiales de 0.08 a 0.1 mm de profundidad. En la superficie del surco puede observarse la formación de microfracturas. En algunas aplicaciones, éstas pueden ser deseables porque en las cercanías del surco brillan intensamente al reflejar la luz [7].

6.6.d. Hule.

Debido a la gran elasticidad de los materiales derivados del hule, las fuerzas de corte generadas por una operación mecánica de maquinado pueden causar una significativa distorsión de la parte y dimensiones imprecisas. El corte mecánico con una navaja causa deformaciones elásticas, por eso la geometría final de la parte no es igual a la planeada. El maquinado con LASER no produce fuerzas de corte en la pieza, de esta forma mejoran la precisión dimensional y la duplicidad. Además, la mayoría de los derivados del hule presentan una absorción excelente a la radiación del CO₂, siendo alta la eficiencia energética.

El barrenado con LASER de goma de silicón fue investigado en [10] usando los métodos de haz estacionario y de trepanado. Con el primero, fueron barrenados orificios de 0.43 mm de diámetro en goma silicón de 0.3 mm de espesor con un ciclo de tiempo de 20 ms por orificio usando un LASER de CO₂ de 185 W. En el método de trepanado, un haz de 375 W fue usado para barrenar orificios de 4mm de diámetro en el mismo

material con un ciclo de tiempo de 100 ms por orificio. Caucho espumoso de 1.5 mm de espesor fue perforado con el mismo haz por trepanado, logrando agujeros de entre 1.5 y 12 mm y ciclos de tiempo de 20 a 200 ms por orificio.

Puede perforarse hule a alta velocidad barriendo un haz continuo sobre una plantilla de metal, como en el papel. Por este método se usó un LASER de CO₂ de 375 W para producir agujeros de 0.2 mm de diámetro en goma de silicón de 2 mm de espesor a velocidades de 20 ms por orificio [10].

Las aplicaciones típicas del maquinado LASER en hule incluyen barrenado de orificios en válvulas de medidores de flujo, mamilas y catéteres. Un LASER pulsado de CO₂ puede agujerear mamilas a velocidades de 250 orificios por minuto [4]. El marcado con LASER también se usa para grabar placas de hule para impresión. Un lector óptico puede usarse para capturar la imagen a reproducir y un LASER de CO₂ para grabarla en una película de hule. El resultado del proceso es un rodillo de imprenta sin costuras.

Tabla 6.13 Valores representativos para el maquinado con LASER de CO₂ en madera, papel, vidrio y hule.

Material	Potencia [W]	Vel. de corte o barrenado	Profundidad de cavidad [mm]	Ancho de cavidad [mm]	Aplicación
Madera (Maple Suave)	250	1 m/min	13	0.6	
Madera (Maple Duro)	250	0.28 m/min	22	0.6	
Madera (Roble Rojo)	250	0.6 m/min	29	0.6	
Madera Terciada	400		19		
Papel	185	330 m/min	0.2		Corte de Papel de Cigarro
Vidrio	1200		5		Corte de Placa de Vidrio
Vidrio	250		1		Corte de Tubo de Vidrio
Goma de Silicón	185-375	20-100 ms por orificio	0.3	0.4-4	

Fuente [7]

CONCLUSIONES

El LASER de CO_2 se distingue de los demás por su elevada potencia, característica que lo hace aplicable a algunos procesos industriales. Los equipos son costosos, sin embargo en ciertas condiciones de trabajo se puede recuperar la inversión. Su viabilidad se hace evidente en procesos que requieren altas velocidades de posicionamiento y de penetración, así como el procesado de zonas poco accesibles y de formas intrincadas.

La mínima rugosidad superficial alcanzada es de 0.2 a 6.3 μm , teniendo en cuenta que, a excepción del maquinado de algunos materiales compuestos, no se requieren procesos extra de acabado superficial.

Las características de operación del LASER de CO_2 pueden resumirse de la siguiente manera, en todo tipo de material: la velocidad de corte es inversamente proporcional al espesor a cortar, asimismo es proporcional a la potencia de alimentación. Pero si esta última variable incrementa su valor, puede un mismo espesor maquinarse en menos tiempo.

Los plásticos son los materiales industriales más viables para manufacturarse con LASER de CO_2 , pues bajo las mismas condiciones de operación aventajan en velocidad de corte a los demás; esto se debe a su bajo punto de fusión y su absorción a la radiación de 10.6 μm . Sin embargo este LASER tiene un gran campo de aplicación en la manufactura de metales, pues las condiciones de operación son muy aceptables siempre y cuando la superficie del metal no refleje la radiación del haz. En este orden siguen los cerámicos, pues aunque los resultados no son tan buenos comparados con los anteriores, sí lo son en comparación con otros métodos de maquinado. En los materiales compuestos el éxito del maquinado con LASER de CO_2 depende de que las fibras constituyentes tengan un punto de fusión similar, de que presenten semejante conducción al calor y de que estén orientadas perpendicularmente al haz. Cumpliéndose estas condiciones, la aplicación es muy viable.

Resumiendo, el maquinado con LASER de CO_2 es un método de producción factible en aplicaciones y materiales difíciles de realizar con otros métodos, especialmente convencionales, y hoy sigue vigente lo que dijo Patel en los años 60: "el LASER es una solución en busca de problemas".

FUENTES BIBLIOGRÁFICAS.

1. Aboites, Vicente.
El Láser.
Fondo de Cultura Económica, S.A. de C.V.
México, 1991.
2. Amstead, B.H., Ostvald, Ph.T., Begeman, M.L.
Procesos de Manufactura, versión S. I.
C.E.C.S.A.
México, 1996.
3. Bachs, L. Cuesta, J. Caries, N.
Aplicaciones Industriales del Laser.
Marcombo, S.A.
España, 1988
4. Bunting, K.A.
Toward a General Theory of Cutting: A Relationship Between the Incident Power Density and the Cutting Speed.
Journal of Heat Transfer, Feb. 1975.
E.E.U.U., 1975.
5. Cabrera Agustine, Edgar.
Introducción al LASER.
Revista Ciencia y Desarrollo, marzo – abril de 1975.
México, 1975.
6. Coheret Company, Inc.
LASER's. Operación, Equipo, Uso y Diseño.
LIMUSA.
México, 1985.
7. Chrysolouris, George C.
Laser Machining, Theory and Practice.
Springer Verlag London Limited.
Reino Unido, 1991.
8. Chrysolouris, G., W.C. Choi, S.B. Kyi, P. Sheng.
Investigation of the effects of a Gas Jet on Laser Grooving.
Proceedings of the XVI North American Manufacturing Research Conference / NARMC XVI.
Soc. of Mig. Eng., May 1987.
E.E.U.U., 1987.

9. Doyle, Lawrence E., Keysher, Carl A., Leach, George A.
Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros.
Prentice Hall, S.A.
México, 1985.
10. Eloy, J. F.
Power Lasers.
Halsted Press.
E.E.U.U., 1987.
11. Ellis, W. J.
Ingeniería de Materiales.
Representaciones y Servicios de Ingeniería, S.A.
México, 1971.
12. Gettys, W Eduard. Frederick, J. Keller.
Física Clásica y Moderna.
Mc GRAW – HILL, S.A.
México, 1993.
13. Giancoli, Douglas C.
Física general, Volumen II.
Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.
México, 1988.
14. Hecht, Jeff.
The Laser Guidebook, 2ª. Ed.
Prentice Hall.
E.E.U.U., 1995.
15. Niku-Lari, A. Mordike, B.L.
High Power Lasers.
Pergamon Press plc.
E.E.U.U., 1989.
16. Pack, U.C. y F.P. Gagliano.
Thermal Analysis of Laser Drilling Processes.
Revista IEEE, febrero de 1972
E.E.U.U., 1972.
17. Serway, Raymond A.
Física II.
Mc GRAW – HILL, S.A.
México, 1987.

18. Shärer Säuberli, Ulrich.
Ingeniería de Manufactura.
C.E.C.S.A.
México, 1991.
19. Steen, William M.
Laser Material Processing.
Springer - Verlag London Limited.
Reino unido, 1991