

PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL

—  
APLICACIONES  
INDUSTRIALES  
DE LA  
TECNOLOGÍA  
LÁSER

CUADERNO TECNOLÓGICO N° 28

Autor:

**Prof. Dr. Giampaolo Campana**

Universidad de Bologna

Con la colaboración de:

**Prof. Ing. Daniel Martínez Krahmer**

INTI-Mecánica, Buenos Aires, Argentina

Julio de 2016



**INTI**



**Unión Europea**



PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL



Unión Europea

Delegación de la Comisión Europea en Argentina  
Ayacucho 1537  
Ciudad de Buenos Aires  
Teléfono (54-11) 4805-3759  
Fax (54-11) 4801-1594



INTI



Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Gerencia de Cooperación Económica e Institucional  
Avenida General Paz 5445 - Edificio 2 oficina 212  
Teléfono (54 11) 4724 6253 | 6490  
Fax (54 11) 4752 5919

[www.ue-inti.gob.ar](http://www.ue-inti.gob.ar)

CONTACTO

Información y Visibilidad: Lic. Gabriela Sánchez  
[gabriela@inti.gob.ar](mailto:gabriela@inti.gob.ar)

—  
APLICACIONES  
INDUSTRIALES  
DE LA  
TECNOLOGÍA  
LÁSER

CUADERNO TECNOLÓGICO N° 28

Autor:

**Prof. Dr. Giampaolo Campana**

Universidad de Bologna

Con la colaboración de:

**Prof. Ing. Daniel Martínez Krahmer**

INTI-Mecánica, Buenos Aires, Argentina

Julio de 2016



INTI



Unión Europea

## INDICE

<b>1. PRESENTACIÓN .....</b>	<b>6</b>
<b>2. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>8</b>
<b>3. LA RADIACIÓN LÁSER: GENERACIÓN DEL HAZ LÁSER, PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN LÁSER .....</b>	<b>10</b>
3.1 La primera condición para conseguir la amplificación de la radiación electromagnética: el bombeo de energía	
3.2 La segunda condición para conseguir la amplificación de la radiación electromagnética: la resonancia	
3.3 Las propiedades de los rayos Láseres	
<b>4. FUENTES LÁSER Y SISTEMAS DE ELABORACIÓN CON FUENTES LÁSER .....</b>	<b>17</b>
4.1 Fuentes Láser a CO <sub>2</sub>	
4.2 Fuentes Láser Nd:YAG	
4.3 Los parámetros de proceso del haz Láser	
4.4 Los parámetros de la calidad del haz Láser después la focalización: el parámetro BPP	
4.5 Diodos Láser	
4.6 Fuentes Yb:YAG disco	
4.7 Fuentes Yb:vidrio en fibra	
4.8 Sumario de los tipos de radiaciones Láser	
4.9 Sistemas de elaboración con fuentes Láser y las dimensiones características del haz focalizado	
4.10 Normas de seguridad en el uso del Láser	
<b>5. LA INTERACCIÓN CON EL MATERIAL .....</b>	<b>47</b>
5.1 Absorción, reflexión y transmisión de energía	
5.2 Los parámetros de proceso y la interacción del Láser con el material	
5.3 La elección de los parámetros de proceso	
5.4 Cometario sobre el plasma y la interacción con el Láser	
<b>6. APLICACIONES LÁSER: EL PROCESO DE CORTE CON LA RADIACIÓN LÁSER .....</b>	<b>54</b>
6.1 Mecanismo de corte con el Láser	
6.2 Sistema Láser para el corte de chapas	
6.3 La calidad del corte Láser	
6.4 Área de factibilidad del proceso de corte Láser	
6.5 Comparación con otros procesos de corte	

<b>7. APLICACIONES LÁSER: LA SOLDADURA CON LA RADIACIÓN LÁSER .....</b>	<b>68</b>
7.1 Comparación con otras tecnología de soldadura	
7.2 Los principales defectos en la soldadura	
7.3 Planear una soldadura con el Láser	
7.4 Los Parámetros de proceso por la soldadura Láser	
7.5 Algunos detalles mas y sumario sobre los mecanismos de soldadura	
7.6 Sumario sobre la soldadura Láser	
7.7 Área de factibilidad del proceso de soldadura	
7.8 <i>Remote Welding</i>	
7.9 Soldadura hibrida Láser-GMA (Gas Metal Arc)	
7.10 Soldadura de materiales disimiles	
7.11 Soldadura con latón (aleaciones de cobre y zinc)	
<b>8. APLICACIONES LÁSER: EL TRATAMIENTO TÉRMICO CON EL LÁSER.....</b>	<b>92</b>
8.1 Cuales tratamientos térmicos son posibles?	
8.2 El área de factibilidad por el tratamiento térmico de temple	
8.3 ¿Cuales son las fuentes Láser para los tratamientos térmicos?	
8.4 Como trabajar con superficies anchas	
8.5 Comparación con tratamientos térmicos tradicionales: ventajas y desventajas de los procesos con Láser	
8.6 Modificación por fusión del material superficial	
8.7 Tratamiento térmico de revenido (aceros y fundiciones) para plegado	
<b>9. APLICACIONES LÁSER: MICRO ELABORACIONES LÁSER Y OTROS TRATAMIENTOS LÁSER ....</b>	<b>103</b>
9.1 Marcado o micro fresado Láser (Laser milling)	
9.2 Micro perforación Laser (Laser Trepanning)	
9.3 Granallado Láser (Láser shock peening)	
9.4 Recubrimiento Láser (Laser cladding) y reparación de piezas	
9.5 Arranque de viruta asistido por el Láser	
<b>10. CONCLUSIÓN .....</b>	<b>120</b>
<b>11. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>121</b>
<b>12. ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>122</b>
<b>13. ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>123</b>
<b>14. ABREVIATURAS UTILIZADAS.....</b>	<b>129</b>
<b>15. DICCIONARIO DE PALABRAS TÉCNICAS.....</b>	<b>130</b>

### **Agradecimiento**

*Quiero agradecer a todos los investigadores y administradores involucrados en el proyecto por la ayuda concreta y apoyo durante toda la misión*

*Hay hombres que de su ciencia  
Tienen la cabeza llena;  
Hay sabios de todas menas,  
Mas digo sin ser muy ducho –  
Es mejor que aprender mucho  
El aprender cosas buenas.*

José Hernández

## 1. PRESENTACIÓN

La Unión Europea y el INTI firmaron un convenio de financiación destinado a mejorar la competitividad de las miPyMEs del norte argentino acercando respuestas tecnológicas apropiadas al nuevo entorno productivo industrial. Los responsables de la ejecución del Proyecto "Mejora de las Economías Regionales y Desarrollo Local" son el Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), en representación del gobierno nacional, y la Delegación de la Unión Europea en Argentina.

Durante más de medio siglo, el INTI ha construido capacidades profesionales e infraestructura tecnológica de relevancia que lo posicionan hoy como actor importante para aportar innovación tecnológica aplicada a los procesos productivos de toda la economía y para el desarrollo de soluciones industriales que incrementen la productividad y la competitividad de la industria nacional.

Con la ejecución de este proyecto se buscó acercar la tecnología y las capacidades técnicas a las regiones de menor desarrollo relativo del país, poniendo a disposición de las miPyMEs y Pymes los medios para satisfacer las demandas de mejora de eficiencia y calidad de sus productos y/o servicios para dar un salto cualitativo en cada una de las provincias del NOA y NEA.

Por tanto, a través de un diagnóstico y evaluación de necesidades tecnológicas hecho en articulación con los gobiernos provinciales, se diseñó un plan de acción sectorial que se implementó hasta el 2016, en cinco sectores industriales determinados como prioritarios: industrialización de alimentos, curtiembre, textil, y metalmecánica junto a la gestión medioambiental como eje transversal a los sectores industriales anteriores.

El proyecto Mejora de las Economías Regionales y Desarrollo Local surgió como parte de las acciones de vinculación internacional del INTI, en donde la cooperación técnica con organismos públicos y privados del mundo -presentes en el campo tecnológico- favorecen el intercambio de conocimientos como elemento fundamental para el desarrollo industrial local.

En esa dirección, uno de los componentes de este proyecto fue la convocatoria de especialistas en diversas temáticas, para cumplir con misiones de trabajo en nuestro país. El objetivo de cada misión fue brindar capacitaciones específicas a técnicos de las provincias norteñas, de acuerdo a la especialidad de cada experto, a grupos de trabajo de Centros Regionales de Investigación y Desarrollo así como a Unidades Operativas que conforman la red INTI, y brindar asistencia técnica a las miPyMEs que acompañen el desarrollo de las actividades del proyecto. Además, mantienen entrevistas con actores locales quienes constituyen un recurso esencial y estratégico para alcanzar los objetivos planteados.

La publicación que se dispone a conocer ha sido concebida como resultado de una misión técnica de uno de los expertos intervinientes en este proyecto. Cada experto al finalizar su trabajo en el país, elabora un informe técnico con recomendaciones para el fortalecimiento del sector para el cual fue convocado y que da lugar a la presente producción, editada con el propósito de divulgar los conocimientos a partir de las necesidades

detectadas y los resultados del intercambio efectivo hecho en territorio, conjugando los basamentos teóricos con la realidad local.

### **Dra. Graciela Muset**

DIRECTORA DEL PROYECTO MEJORA DE LAS ECONOMÍAS REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL

El contenido de esta publicación es responsabilidad exclusiva del autor y en ningún caso debe considerarse que refleja los puntos de vista de la Unión Europea.

## 2. INTRODUCCIÓN

En los próximos párrafos, después de una muy breve introducción a la historia de las aplicaciones Láser, los siguientes temas serán descriptos:

- "La radiación Láser: generación del haz Láser, propiedades y características de la radiación Láser".
- "Aplicaciones Láser: la interacción con el material y el proceso de corte con la radiación Láser".
- "Fuentes Láser y sistemas de elaboración con fuentes Láser".
- "Aplicaciones Láser: la interacción con el material y el proceso de corte con la radiación Láser".
- "Aplicaciones Láser: la soldadura con la radiación Láser".
- "Aplicaciones Láser: el tratamiento térmicos con el Láser".
- "Aplicaciones Láser: micro elaboraciones Láser y otros tratamientos Láser".

La tecnología Láser está en los últimos diez años cambiando muy rápidamente: nuevas fuentes, nuevos sistemas, nuevos medios para transportar el rayo electromagnético, muchas nuevas patentes. Todas estas novedades están y van a determinar un incremento en el número de los procesos que se pueden realizar y, por lo tanto, en el número de las aplicaciones industriales de los Láseres.

Aunque el Láser fue teorizado en los años veinte del siglo pasado, solo después de cincuenta años fue posible realizar el primer dispositivo capaz de generar un rayo Láser. En el principio, parecía un objeto muy interesante pero sin utilidad.

En los años noventa del siglo pasado, el corte por Láser en el estado gaseoso (CO<sub>2</sub>) representaba el proceso más difundido y constituía la referencia para el proceso de corte. Aunque fuese un proceso con una baja eficiencia energética, la calidad del corte resultaba tan alta que no existían procesos similares.

El proceso de soldadura con Láser requiere de un conocimiento muy alto y fue necesario un tiempo más largo para que pudiese ser aplicado en la industria. Además, fue fundamental el desarrollo de los Láseres en los estados sólidos que ayudaron en la realización de la soldadura Láser de las aleaciones ligeras.

Hoy en día, el corte y la soldadura Láser representan los procesos más difundidos, aunque también hay otros muy utilizados, como por ejemplo: los tratamientos térmicos de las superficies, el microfresado por ablación, el marcado, el granallado Láser, el mecanizado asistido por Láser. Además, desde el desarrollo de los procesos de recubrimiento por polvo con Láser, nacieron los procesos aditivos que en estos años están revolucionando el mercado de los procesos productivos.

El presente cuaderno tecnológico presenta un sumario de los seminarios que fueron brindados para los técnicos del INTI en el las sedes del PTM y de San Miguel de Tucumán en el marco del programa del proyecto Europeo EuropeAid/130594/C/SER/AR que se intitula "MEJORA DE LAS ECONOMÍAS REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL EN LA REPÚBLICA ARGENTINA".

Dado el gran número de fuentes hoy en día disponibles, la elección de la fuente más adecuada para un proceso puede ser complicada y requiere de un conocimiento relevante de los procesos y de los sistemas de producción.

El objetivo del presente cuaderno es hacer un sumario de los temas tratados en los seminarios técnicos durante la misión, de modo tal que pueda servir para empezar y mejorar el conocimiento de la tecnología Láser.

### 3. LA RADIACIÓN LÁSER: GENERACIÓN DEL HAZ LÁSER, PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS DE LA RADIACIÓN LÁSER

La radiación electromagnética es un tipo de campo electromagnético (una combinación de campo eléctrico y magnético) oscilantes, que se propaga transportando energía en el medio a través del campo eléctrico y del campo magnético que son perpendiculares entre ellos y también a la dirección de propagación a través del espacio.

En la figura 3.1 se observa como la dirección de propagación es perpendicular al campo eléctrico y al campo magnético.

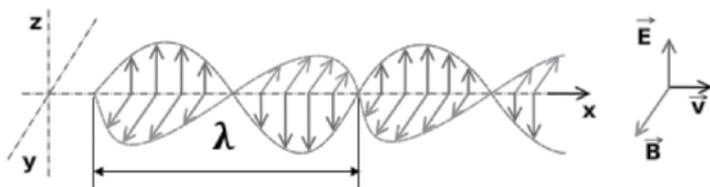


Fig. 3.1: El campo electromagnético y su dirección de propagación.

Típicamente, se puede describir matemáticamente la radiación electromagnética con las siguientes ecuaciones:

$$\mathbf{E} \times \mathbf{B} = 0 \quad (3.1)$$

$$\mathbf{E} \wedge \mathbf{B} = \mathbf{V} \quad (3.2)$$

La ecuación (3.1), multiplicación escalar, explica como el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  y el campo magnético  $\mathbf{B}$  son perpendiculares.

La ecuación (3.2), multiplicación vectorial, explica como el campo eléctrico  $\mathbf{E}$  y el campo magnético  $\mathbf{B}$  son ambos perpendiculares a la dirección de propagación del rayo electromagnético,  $\mathbf{V}$ .

Hay, además, algunas relaciones importantes entre los parámetros característicos de las ondas, que son la longitud de onda  $\lambda$  [m], la frecuencia  $f$  [1/s], y el periodo característico de la onda  $T$  [s]. La velocidad de la onda puede ser escrita como el ratio entre la longitud de onda  $\lambda$  y el tiempo necesario para su recorrido  $T$  (ver ecuación (3.3)).

La frecuencia es el recíproco del periodo característico de la onda  $T$ , como es representado en la ecuación (3.4).

$$V = \frac{\lambda}{T} \quad (3.3)$$

$$T = 1/f \quad (3.4)$$

La energía transmitida por la radiación es en relación a la intensidad del campo eléctrico (o magnético). Esta relación está escrita en la ecuación (3.5) en el caso de la transmisión en el vacío, donde  $c$  es la velocidad de la luz y  $\epsilon_0$  es la permisividad (llamada también constante dieléctrica).

$$I_0 = c * \epsilon_0 * E_0^2 \quad (3.5)$$

**El Láser es una radiación electromagnética muy particular que se caracteriza por una longitud de onda específica. Vamos a explicar que significa esto.**

El Láser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – Amplificación de luz por emisión estimulada de radiación*) se genera a través del fenómeno de la emisión estimulada de radiación electromagnética.

La emisión espontánea de energía electromagnética es un fenómeno que se genera espontáneamente en el material (Fig. 3.2). La materia puede estar en equilibrio estable o puede estar excitada en equilibrio meta estable. En el segundo caso, va a emitir energía y tendería a volver al estado de equilibrio estable (**emisión espontánea**). La energía es cuantificada y, por lo tanto, el material puede absorber y después emitir un fotón.

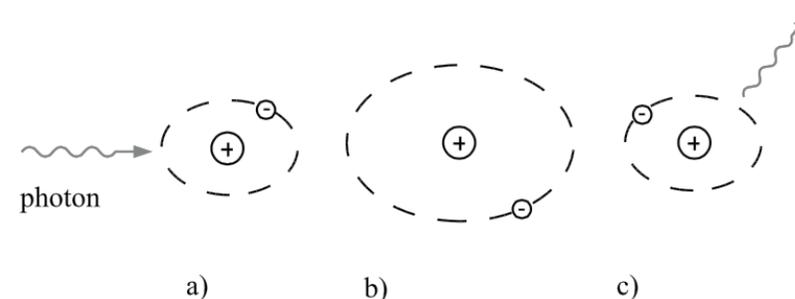


Fig. 3.2: a) Absorción de un fotón. b) El átomo excitado. c) El átomo estable y la emisión de un fotón.

La emisión estimulada es el mismo fenómeno de emisión de energía pero cuando la materia es estimulada a través de una transmisión de energía externa. En este caso, al ser la estimulación externa, se puede controlar. El control de la energía de estimulación permite la generación controlada de la energía emitida.

La **emisión estimulada** (Fig. 3.3) es una forma particular de emisión de energía porque el fotón emitido tiene la misma dirección y longitud de onda del fotón que ha estimulado la emisión. Este fenómeno es muy importante porque significa que se puede, en algunas condiciones, amplificar la energía emitida!

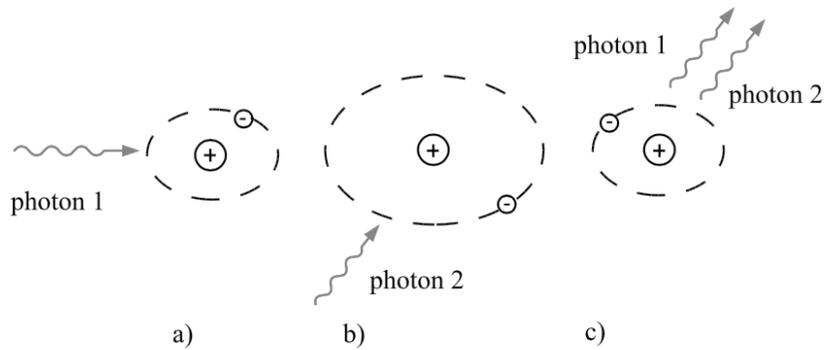


Fig. 3.3: a) Absorción de un fotón. b) El átomo excitado es golpeado por un segundo fotón. c) El átomo estable y la emisión de un fotón.

Los medios activos o los medios que pueden generar radiaciones Láser son materiales que pueden emitir radiación electromagnética cuando están excitados a través de medios energéticos industriales, usualmente pueden tener diferentes niveles de excitación:  $e_1, e_2, e_3, \dots$ . La mayoría de los medios activos tienen cuatro niveles.

La energía que se genera ( $J$ ) por la emisión estimulada se puede cuantificar por la constante de Planck "h" ( $6.63 \cdot 10^{-34}$  J/s) cuando se conoce la frecuencia de la radiación electromagnética " $f_{10}$ " de la emisión, por ejemplo entre los niveles de excitación "1" y "0", o se puede obtener la longitud de onda cuando se conoce la energía emitida (ley de Planck).

$$e_1 - e_0 = h f_{10} \quad (3.6)$$

Entonces, el fenómeno de la emisión estimulada se puede utilizar para amplificar la energía emitida desde la materia excitada: es una transformación de energía. Este mecanismo solo, no es suficiente para producir los rayos Láseres. Son necesarias dos condiciones más, que se deben obtener por la arquitectura del sistema Láser: (1) **La inversión de población** por el bombeo y (2) la **resonancia**.

### 3.1 LA PRIMERA CONDICIÓN PARA CONSEGUIR LA AMPLIFICACIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA: EL BOMBEO DE ENERGÍA

Para extraer energía con continuidad de los medios activos es necesario que el flujo de fotones en la salida sea mayor que el flujo de entrada. Esto significa que es necesaria una **inversión de población**: el número de átomos o moléculas excitadas debe ser mayor que aquellos estables.

Los materiales son generalmente amortiguadores. Esto significa que, si  $F_{out}$  es la

energía emitida y  $F_{in}$  es la energía introducida:  $F_{out} - F_{in} = \Delta F$  y típicamente  $\Delta F < 0$ , o una porción de la energía introducida está dispersada (ecuación 3.7).

Por primero, para conseguir la amplificación de la emisión de radiación electromagnética, es necesario facilitar una fuente de energía externa, es decir un **bombeo de energía** (Fig. 3.4).

$$F_{out} = F_{in} + \frac{\Delta F}{\Delta x} dx \quad (3.7)$$

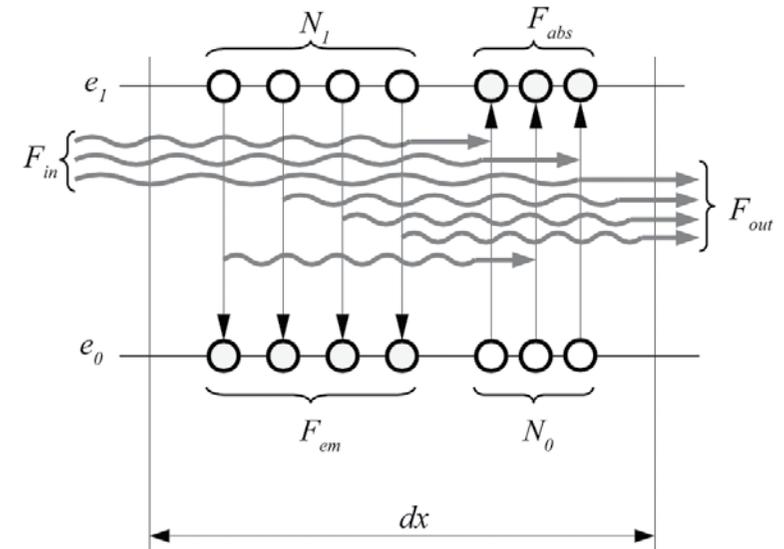


Fig. 3.4.: Esquema de la emisión estimulada a través de la inversión de población.

El **bombeo** se actúa con diferentes medios que dependen del medio activo que se va a excitar:

- Bombeo directo por excitación electrónica.
- Bombeo indirecto por excitación electrónica en radiofrecuencia.
- Bombeo directo por excitación óptica.

El bombeo puede ser continuo, como en el caso del bombeo óptico por diodos, o discontinuo como en el caso del bombeo óptico por lámpara a flash.

### 3.2 LA SEGUNDA CONDICIÓN PARA CONSEGUIR LA AMPLIFICACIÓN DE LA RADIACIÓN ELECTROMAGNÉTICA: LA RESONANCIA

La segunda condición para conseguir la amplificación de la radiación electromagnética, la resonancia, se obtiene con la conformación geométrica de la cavidad de resonancia o cavidad Láser. La cavidad de resonancia contiene el medio activo que está entre dos espejos (Fig. 3.5). Los espejos son paralelos y van a definir la dirección de propagación o dirección de resonancia de la cavidad.

Cuando el Láser se enciende, por el bombeo de energía, se produce la inversión de población y la emisión estimulada da energía. La energía del bombeo se transforma, entonces, en energía electromagnética. Todas las radiaciones que se generan y no están en la dirección de resonancia de la cavidad se dispersan a través de las paredes de la cavidad que son transparentes a los rayos. Solo aquellos rayos que están en la dirección de la cavidad de resonancia pueden sobrevivir y formar una onda estable de energía que oscila entre los espejos de la cavidad. Esta situación se produce muy rápido: inmediatamente se consigue una onda de energía electromagnética resonante.

Para hacer un sumario: la energía introducida por el bombeo se transforma en radiaciones emitidas y en la formación de una energía resonante en la cavidad por la presencia de dos espejos que van a definir la **dirección de propagación** de la radiación electromagnética amplificada. Además, la **distribución de la energía** en la misma dirección de propagación depende de la arquitectura de la cavidad de resonancia.

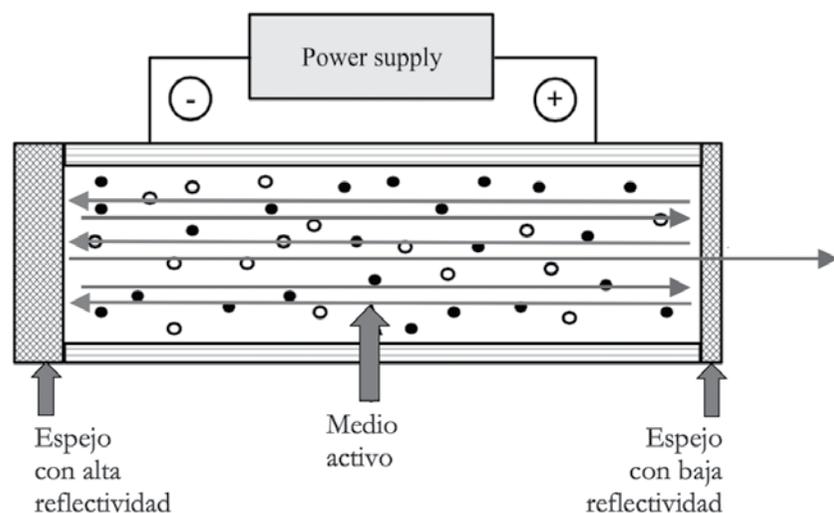


Fig. 3.5: Esquema de la cavidad de resonancia.

### 3.3 LAS PROPIEDADES DE LOS RAYOS LÁSERES

La **emisión estimulada**, a través del bombeo y gracias a la conformación de la cavidad de resonancia, produce una radiación electromagnética que tiene las siguientes propiedades:

1. Los fotones tienen la misma longitud de onda o frecuencia (Fig. 3.6). Esto significa que se consigue un haz **monocromo**.
2. Los fotones tienen la misma dirección de propagación, la misma fase en el tiempo y en el espacio (Fig. 3.7). Esto se traduce en que se consigue **alta coherencia y baja divergencia**.
3. Los fotones generados tienen la misma energía de los fotones que han impactado el material. Por tal motivo, se consigue la amplificación de energía y, en particular, un haz con **alta energía**.

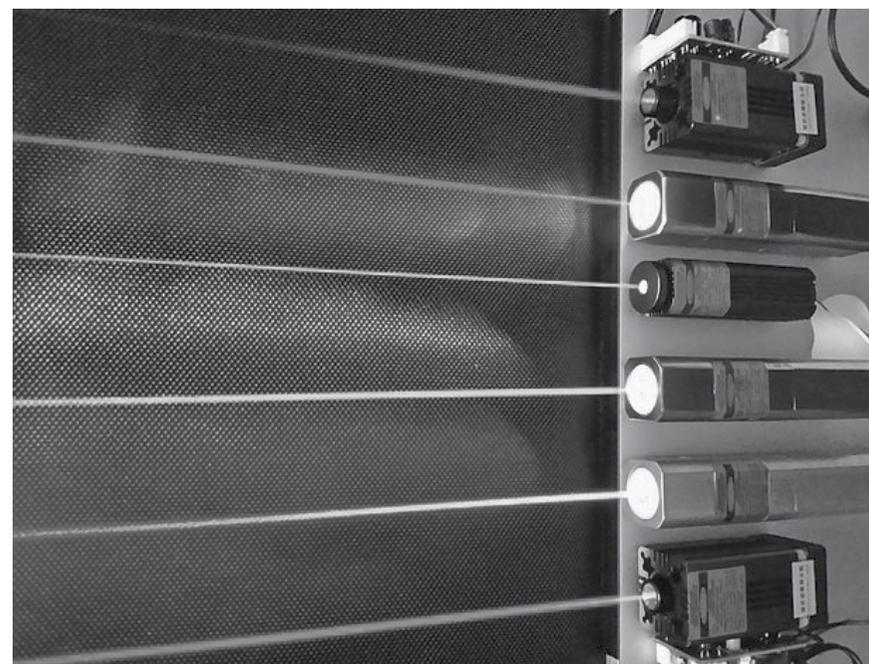


Fig. 3.6: Láseres de estado sólido emitiendo longitud de onda a (de abajo arriba) 405 nm, 445 nm, 520 nm, 532 nm, 635 nm y 660 nm [Wikipedia].

Además de las propiedades mencionadas, otras características son una consecuencia directa:

1. **Elevada focalización:** el rayo Láser puede ser concentrado sobre una pequeña área de superficie (Fig. 3.7). La alta coherencia y la baja divergencia y la misma longitud de

onda por cada recorrido óptico permiten obtener una pequeña región donde la energía está focalizada. En comparación, una lámpara pierde mucha energía alrededor y, por la multitud de longitudes de ondas, la región de focalización es bastante grande. La misma potencia producida por un Láser permite una más alta densidad de energía (Fig. 3.8).

2. El Láser se puede **transportar sin reducción** de la energía transportada. La alta coherencia y la baja divergencia permiten el transporte de energía sin dispersión.
3. **Alta eficiencia de interacción** de la radiación electromagnética con los materiales. Es una consecuencia de los puntos precedentes.

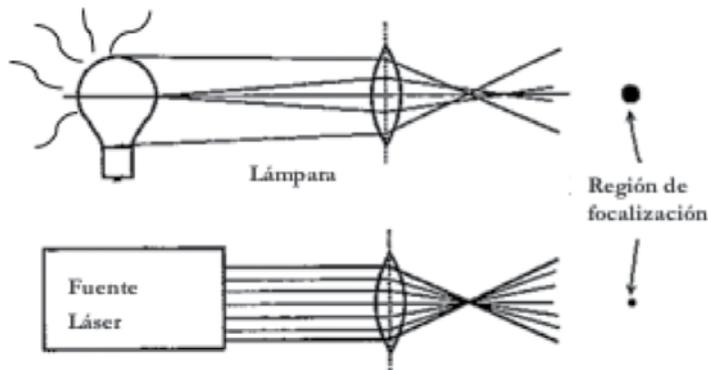


Fig. 3.7: El efecto de la alta focalización.

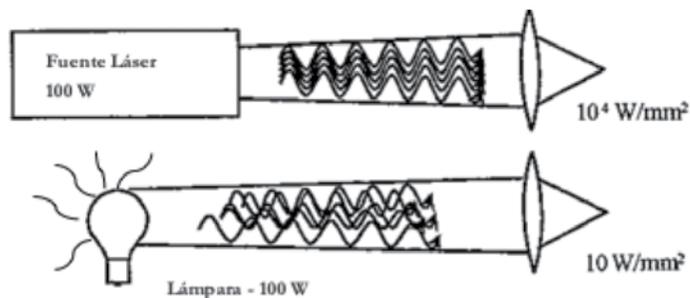


Fig. 3.8: El efecto de la alta coherencia y baja divergencia; comparación entre una fuente Láser y una lámpara con la misma potencia emitida.

## 4. FUENTES LÁSER Y SISTEMAS DE ELABORACIÓN CON FUENTES LÁSER

Si bien, la patente del primer dispositivo Láser fue con medio activo en el estado sólido - el 16 de Mayo 1960 por Theodore H. Maiman en los Laboratorios de Investigación de Hughes en Malibu, California - el desarrollo de esta tecnología en sus inicios fue realizado principalmente con medios activos gaseosos.

En la Fig. 4.1 se ponen en evidencia los Láseres que, hoy en día, están disponibles y son utilizados para aplicaciones industriales.

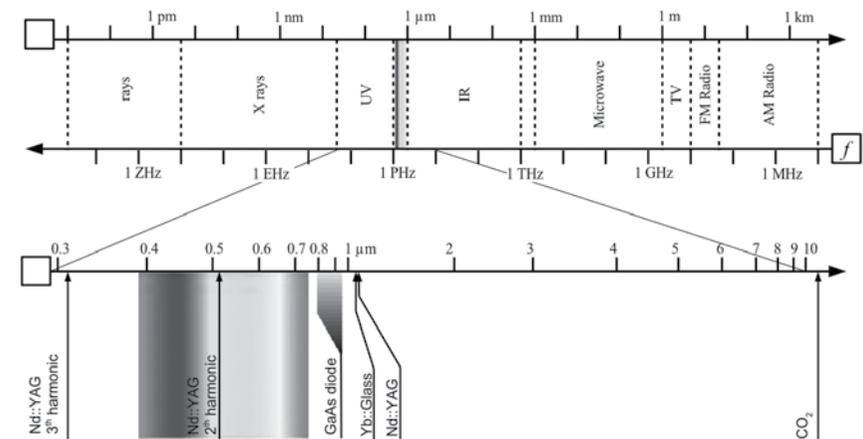


Fig. 4.1: El espectro electromagnético con evidencia de algunas de las fuentes Láser más usadas.

Vamos, en las páginas siguientes, a comentar cada tipología de fuentes con el objetivo de explicar, también, el motivo de su utilización para aplicaciones específicas. Las fuentes aquí descritas son:

- Las Fuentes Láser a  $\text{CO}_2$ .
- Las Fuentes Láser Nd:YAG.
- Las Diodos Láser.
- Las Fuentes Yb:YAG disco.
- Las Fuentes Yb:vidrio en fibra.

### 4.1 Fuentes Láser a $\text{CO}_2$

En el caso de las fuentes a  $\text{CO}_2$ , la **primera condición** para la generación del Láser (la emisión estimulada) está satisfecha por la capacidad del gas anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) de emitir radiación electromagnética en el campo del infrarrojo (Fig. 4.1). Como sabemos, el

Láser es una radiación electromagnética muy particular que se caracteriza por una longitud de onda específica, en el caso de las fuentes en  $\text{CO}_2$  la longitud de onda es  $10.6 \mu\text{m}$ .

El medio activo o el medio que puede generar radiaciones Láser es propiamente una mezcla de gases: anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y helio ( $\text{He}$ ). Cada gas tiene su función: el  $\text{CO}_2$  es el medio activo que produce la radiación electromagnética; el  $\text{N}_2$  es aquel gas que puede ser excitado con un bombeo eléctrico y después va a excitar el anhídrido carbónico que no puede ser excitado por esta forma; el  $\text{He}$  tiene la función de reducir la temperatura del medio y sirve para asegurar una baja temperatura de la mezcla de gas a través de un cambio de calor con ambos gases: el  $\text{CO}_2$  y el  $\text{N}_2$ .

El  $\text{CO}_2$  tiene cuatro niveles de excitación (Fig. 4.2a y Fig. 4.2b) pero solo el último nivel genera radiación electromagnética mientras que los restantes producen calor que se transmite al Helio. La tarea del Helio es muy importante y en particular es la disipación del calor para evitar que la temperatura de la mezcla de gases suba y supere los límites. De esta forma se evita el deterioro de la mezcla por oxidación.

Entonces, la potencia eléctrica externa va a excitar el  $\text{N}_2$  en primer lugar. La energía de excitación pasa del nitrógeno al anhídrido carbónico por colisión (Fig. 4.3).

La composición de la mezcla típica es esta:  $\text{CO}_2:\text{N}_2:\text{He} - 10:45:45$ .

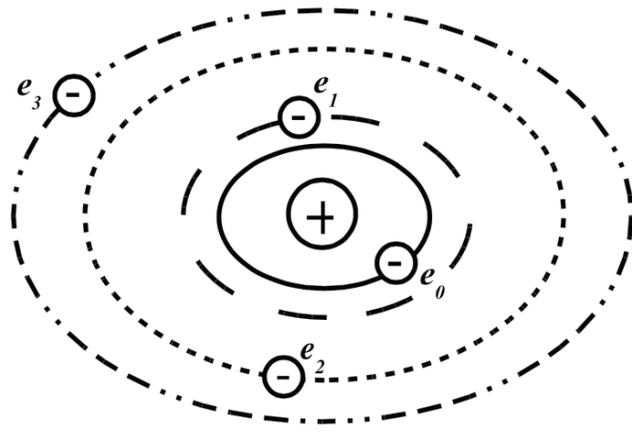


Fig. 4.2a: Esquema de un átomo con cuatro niveles de excitación como en el caso del  $\text{CO}_2$ .

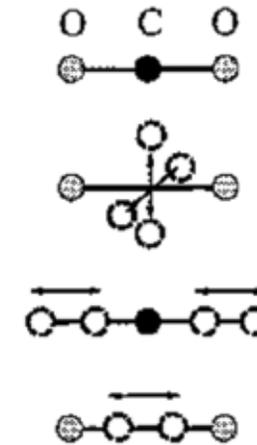


Fig. 4.2b: Niveles de excitación del  $\text{CO}_2$ .

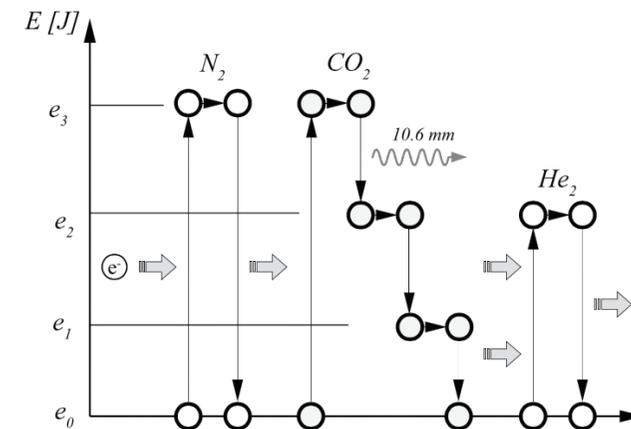


Fig. 4.3: Esquema del funcionamiento de una fuente Láser a  $\text{CO}_2$ .

La **eficiencia cuántica** se mide por las energías que corresponden a los niveles energéticos de los átomos del medio activo. Generalmente, los medios activos tienen cuatro niveles de excitación pero solo uno va a emitir los rayos Láser mientras que los otros niveles van a emitir energía en forma de calor. Para calcular esta eficiencia es necesario conocer cuál es el nivel de excitación que genera la emisión de radiación electromagnética.

El cálculo de la **eficiencia cuántica** o la eficiencia de la emisión estimulada por el anhídrido carbónico alcanza un valor igual a 0.38 (ver ecuaciones 4.1, 4.2, 4.3, 4.4) porque es necesario excitar el material al tercer nivel, aunque la emisión Láser ocurre solo cuando la molécula baja al nivel de energía  $e_2$  desde el nivel  $e_3$ :

$$\eta = \frac{e_3 - e_2}{e_3 - e_0} = \frac{4.96 - 3.08}{4.96} \approx \mathbf{0.38} \quad (4.1)$$

$$e_1 - e_0 = 1.41 \cdot 10^{-20} \text{J} \quad (4.2)$$

$$e_2 - e_0 = 3.08 \cdot 10^{-20} \text{J} \quad (4.3)$$

$$e_3 - e_0 = 4.96 \cdot 10^{-20} \text{J} \quad (4.4)$$

Esta es una eficiencia muy baja y también se debería considerar que es solo una porción de la eficiencia de la generación del rayo Láser porque es necesario tener además en consideración la eficiencia de la transferencia de energía al nitrógeno y después la disipación de calor por el helio.

La eficiencia del sistema Láser tiene, además de la eficiencia del **medio activo**, otras eficiencias que deben ser consideradas (ecuación 4.5):

- la **eficiencia cuántica** del proceso de emisión estimulada:  $\eta_L$ ;
- la **eficiencia del proceso de absorción** de la energía externa para obtener la inversión de población:  $\eta_A$ ;
- la **eficiencia del medio** que genera el bombeo de energía:  $\eta_B$ .

$$\eta = \eta_B * \eta_A * \eta_L = \frac{\text{energía Láser}}{\text{energía de la red}} \quad (4.5)$$

El cálculo de la longitud de onda (ecuación 4.6) que se va a producir se puede conseguir por medio de la ley de Planck (ecuación 4.7, donde  $f_{10}$  es la frecuencia de emisión desde el nivel de excitación) y por la relación entre la longitud de onda, la velocidad de la luz y la frecuencia (ecuación 4.8):

$$\lambda = \frac{h * c}{e_3 - e_2} = \frac{6.63 * 10^{-34} - 3 * 10^8}{(4.96 - 3.08) * 10^{-20}} \approx \quad (4.6)$$

$$e_1 - e_0 = h f_{10} \quad (4.7)$$

$$c = \lambda * f \quad (4.8)$$

Como ya fue dicho, es una longitud de onda en el campo infrarrojo.

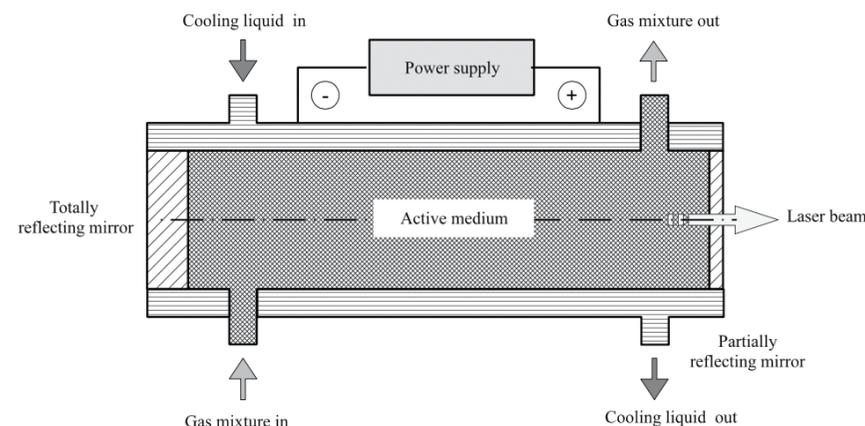
**La segunda condición** para conseguir la generación del Láser es la arquitectura de la cavidad de resonancia. En el caso del Láser a  $\text{CO}_2$  hay diferentes posibles arquitecturas:

- fuentes de Flujo Axial (Lento o Rápido).
- fuentes de Flujo Trasversal.
- fuentes de Flujo Capilar.
- fuentes Selladas.

### Láser $\text{CO}_2$ de Flujo Axial

Algunas de las arquitecturas más usadas son aquellas que utilizan el **Flujo Axial**, es decir que la mezcla de gases tiene la misma dirección de las radiaciones Láser en la cavidad de resonancia. Son necesarias bombas para poner la mezcla en movimiento y un eficaz intercambiador de calor porque es necesario evitar un excesivo calentamiento del medio activo que se puede degenerar (por oxidación). **Por esta razón, se debe agregar nueva mezcla periódicamente.** Es necesario un sistema de enfriamiento también para los líquidos de enfriamiento de la mezcla de gases. La **eficiencia total del sistema, como se puede entender, es muy baja y menor que el 10%!**

Las arquitecturas de Flujo Axial pueden ser: Lento (Fig. 4.4) o Rápido (Fig. 4.5).



SAF (SLOW AXIAL FLOW)		
Velocidad de flujo	m/s	<b>1.0</b>
Potencia	W/m	<b>60-80</b>
Potencia Máx.	kW	<b>1.5</b>
M <sup>2</sup>	-	1.0

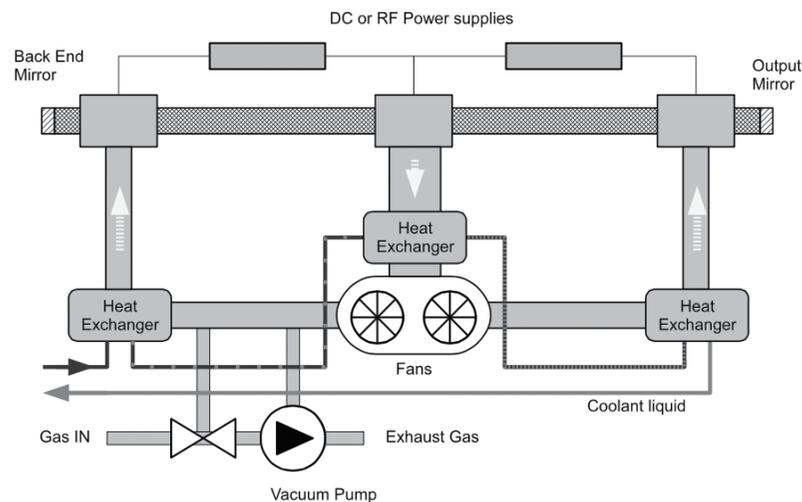
Fig. 4.4: Esquema de fuente Láser a  $\text{CO}_2$  de Flujo Axial Lento.

Tabla 4.1: Velocidad de flujo, Potencia y M<sup>2</sup> para fuentes Láser a  $\text{CO}_2$  de Flujo Axial Lento.

El Flujo Lento produce una calidad del haz mejor pero tiene una limitación en la potencia máxima que se puede obtener, por ello no es posible realizar una cavidad demasiado larga porque: a) es necesario una elevada precisión en la construcción para asegurar el paralelismo de los espejos, b) porque una fuente demasiado larga no puede ser transportada, c) porque ocupa demasiado espacio.

El Flujo Rápido puede generar una potencia muy alta (alrededor de 20 kW!) pero tiene una complicación en la arquitectura: necesita de una bomba para mover la mezcla de gases y de un eficaz sistema de enfriamiento del medio activo.

Ambas funcionan con una cavidad donde hay un vacío para reducir la resistencia eléctrica del medio activo y facilitar la absorción de la energía eléctrica por el nitrógeno.



FAF (FAST AXIAL FLOW)		
Velocidad de flujo	m/s	200.0
Potencia	W/m	600-800
Potencia Máx.	kW	20
M <sup>2</sup>	-	>1.0

Fig. 4.5: Esquema de fuente Láser a CO<sub>2</sub> de Flujo Axial Rápido.

Tabla 4.2: Velocidad de flujo, Potencia y M<sup>2</sup> para fuentes Láser a CO<sub>2</sub> de Flujo Axial Rápido.

En la Fig. 4.6 las fuentes a CO<sub>2</sub> cuadrada de Trumpf que es muy compacta y puede ser realizada con diferentes potencias máximas por pequeñas diferencias en los componentes de la arquitectura.

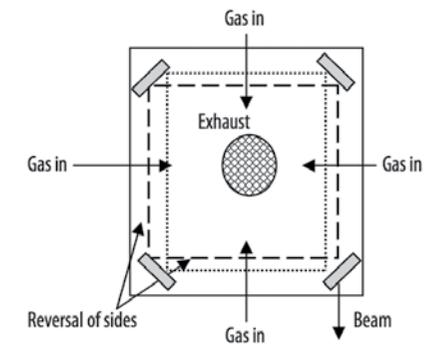
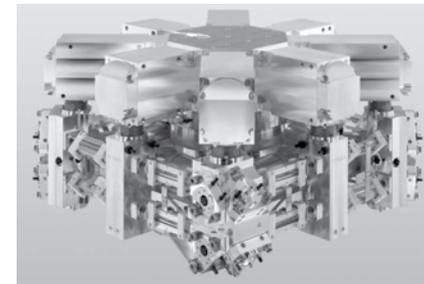


Fig. 4.6: Cavidad de resonancia TruFlow de Trumpf (izquierda). Esquema de la cavidad de resonancia cuadrada con cuatro espejos de los cuales tres son completamente reflectantes (derecha).

### Láser CO<sub>2</sub> de Flujo Transversal

Cuando el flujo de la mezcla de gases es transversal con respecto a la dirección de la radiación Láser, el bombeo se consigue con dos **electrodos** y una alimentación a **corriente eléctrica alterna en radiofrecuencia**. En este caso, también es necesario un eficaz intercambiador de calor y bombas para poner la mezcla en movimiento.

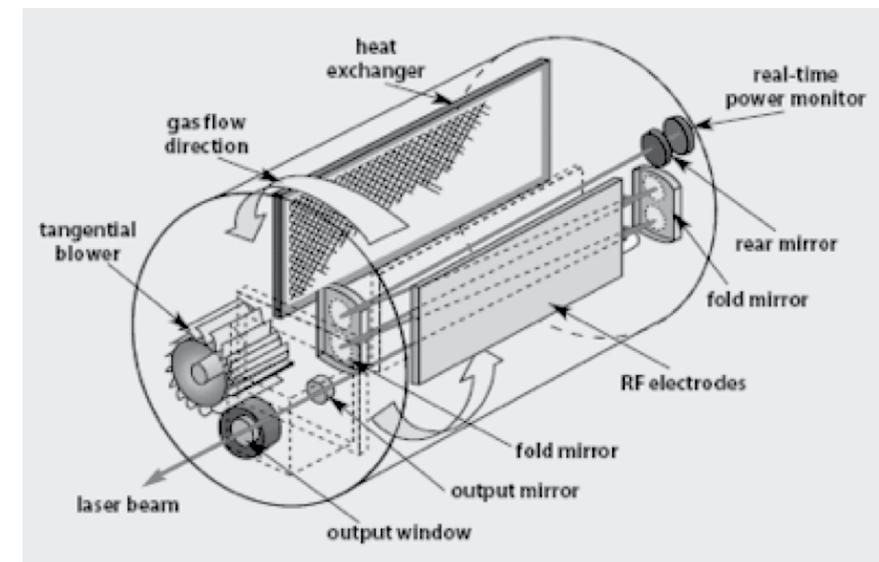


Fig. 4.7: Esquema de fuentes Láser a CO<sub>2</sub> de Flujo Axial Transversal.

La potencia máxima que se puede producir es alta como en el caso del flujo axial rápido.

La calidad de los rayos Láser es peor ( $5 < M^2 < 15$ ) con respecto a las fuentes con flujo axial.

### Láser a CO<sub>2</sub> de flujo capilar

Esta arquitectura es más sencilla que la anterior porque los electrodos son superficies planas enfriadas con agua y constituyen las paredes de la cavidad de resonancia (Fig. 4.8). Esta solución permite intercambiar mucho calor con la mezcla de gases y, por lo tanto, no es necesario el intercambiador de calor externo fuera del resonador.

Con esta arquitectura se pueden obtener potencias hasta 6-8 kW pero la calidad del haz Láser es baja y la forma es típicamente elíptica.

A la salida del láser, se usan algunos sistemas ópticos para mejorar la distribución de potencia transversal con una pequeña reducción de energía emitida y de la eficiencia de la fuente Láser. Se obtiene TEM<sub>00</sub> o TEM<sub>01</sub>\*.

Al final, estas arquitecturas son sencillas y baratas al igual que su manutención.

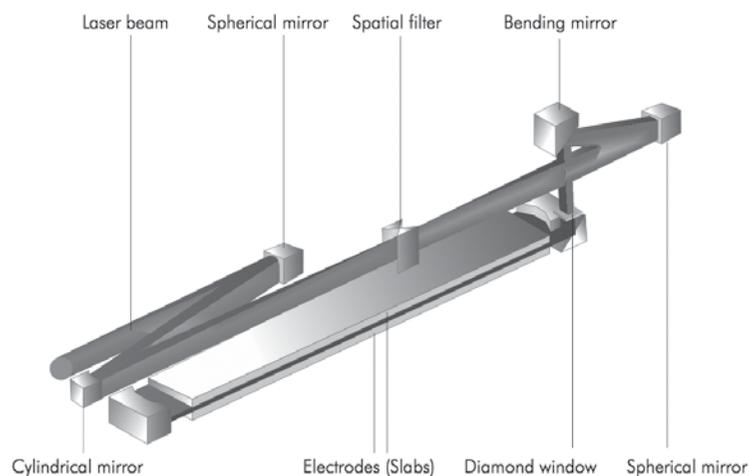


Fig. 4.8: Rofin DC series Láser. DC significa diffusion cooled o refrigerados por difusión.

Muchos productores de fuentes Láser tienen en catálogo unas fuentes a capilares que se llaman Láseres refrigerados por difusión (DC, diffusion cooled).

El láser TruCoax (Fig. 4.9) es un Láser a capilares muy compacto y la excitación es obtenida mediante transistor. El resonador no requiere mantenimiento y funciona sin interrupciones.



Fig. 4.9: Trumf TruCoax Láser.

### Fuente Láser a CO<sub>2</sub> Selladas

Cuando necesitamos fuentes de baja potencia y alta calidad de la radiación Láser, que se consigue con sistemas ópticos, existe la posibilidad de una arquitectura muy sencilla donde la mezcla de gases no necesita un agregado de una nueva mezcla en forma periódica. La cavidad de resonancia está sellada y puede funcionar sin interrupción por 5000 horas (Fig. 4.10).

El bombeo es en corriente alterna y radio frecuencia. Los electrodos son enfriados con agua y la radiación Láser que sale de la cavidad de resonancia tiene una forma elíptica. Por lo tanto, es necesario un sistema óptico para mejorar la calidad del haz Láser.

Son máquinas que pueden producir desde 15 hasta 500-600 W con un M<sup>2</sup> bastante bueno.

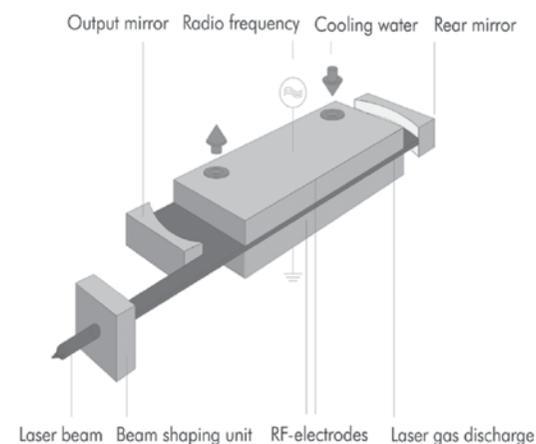


Fig. 4.10: Rofin Sealed-Off series Láser.

En este caso, vamos a mostrar una fuente Láser sellada producida en Italia por EIEen (Fig. 4.11).

La cavidad de resonancia es muy compacta. La potencia puede estar entre 30 hasta 180 W. La forma del haz es elíptica. La calidad es buena ( $M^2 < 1.2$ ).

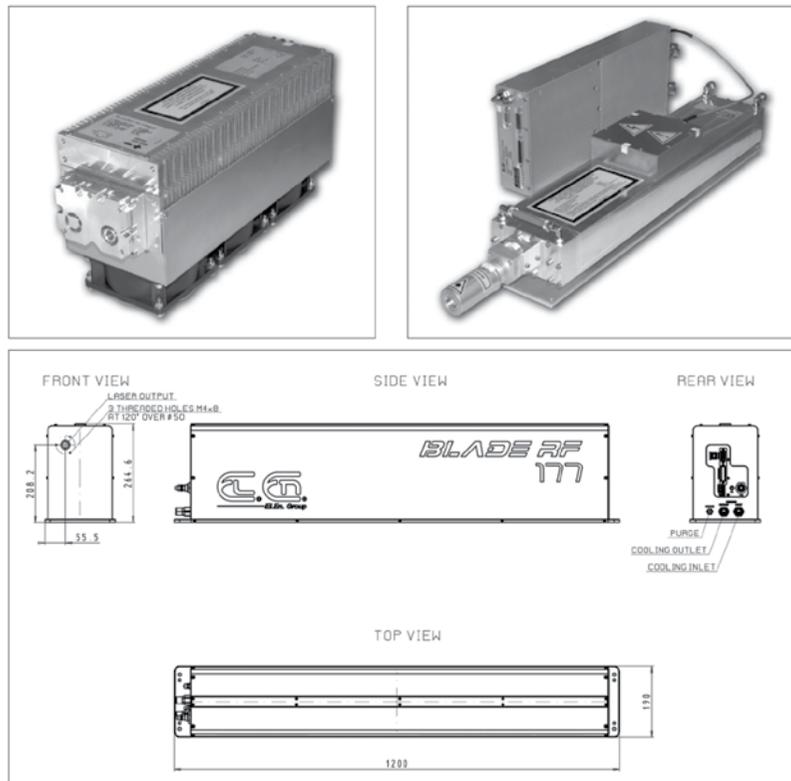


Fig. 4.11: Blade RF Series – Sealed-Off CO<sub>2</sub> Láser EIEen.

## 4.2 FUENTES LÁSER ND:YAG

Son fuentes que utilizan un medio activo sólido (se llaman fuentes en el estado sólido) y, en este caso, se trata de un cristal de YAG (granate de Ytrio y Aluminio con fórmula Y<sub>3</sub>A-L<sub>15</sub>O<sub>12</sub>) dopado con un pequeño porcentaje de Neodimio, en la forma Nd<sup>3+</sup>, que es el material capaz de generar el rayo Láser. El cristal dopado, cuando es excitado, puede emitir una radiación electromagnética en el campo del infrarrojo. El Nd<sup>3+</sup> tiene cuatro niveles de exci-

tación y emite radiación electromagnética cuando baja desde el tercer nivel de excitación hasta el segundo nivel; la emisión de energía para otros niveles de excitación consiste en energía térmica (Fig. 4.12). Como en el caso de las fuentes en estado gaseoso, es necesario enfriar el cristal para conservar la funcionalidad.

El cálculo de la eficiencia cuántica (ecuación 4.12) y de la longitud de onda (ecuación 4.13) en el caso del Láser en estado sólido Nd:YAG resulta de aplicar las siguientes ecuaciones (4.9, 4.10 y 4.11), que representan las energías asociadas a cada excitación.

$$e_1 - e_0 = 3.98 * 10^{-20} \text{J} \quad (4.9)$$

$$e_2 - e_0 = 22.69 * 10^{-20} \text{J} \quad (4.10)$$

$$e_3 - e_0 = 36.00 * 10^{-20} \text{J} \quad (4.11)$$

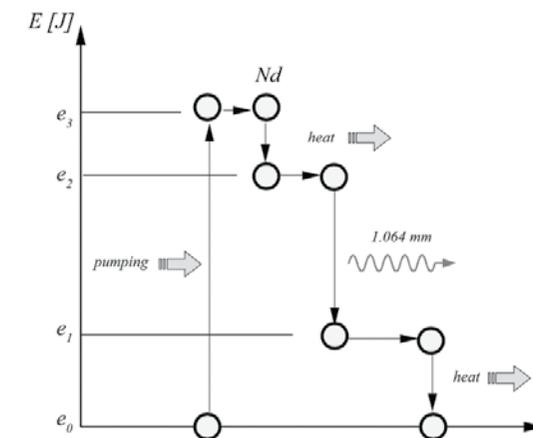


Fig. 4.12: Esquema del funcionamiento de una fuente Láser a Nd:YAG.

$$\eta = \frac{e_2 - e_1}{e_3 - e_0} = \frac{22.69 - 3.98}{36} \approx 0.49 \quad (4.12)$$

Es una eficiencia más alta que en el caso del Láser a CO<sub>2</sub> pero en este caso la eficiencia global es baja porque el bombeo se va a realizar con medios ópticos que no son muy eficientes.

La longitud de onda es en el campo infrarrojo:

$$\lambda = \frac{h * c}{e_2 - e_1} = \frac{6.63 * 10^{-34} - 3 * 10^8}{(22.69 - 3.98) * 10^{-20}} \approx 1.064 * 10^{-6} \text{ m} \quad (4.13)$$

Las fuentes Láser a Nd:YAG en estado sólido (Fig. 4.12) pueden emitir energía en el continuo (CW) o pulsadas (PW).

Se pueden transportar a través de fibra óptica.

El bombeo óptico por lámpara de flash al Tungsteno genera un Láser continuo. El bombeo óptico por lámpara de flash al Xenón o Kriptón genera un Láser pulsado. Actualmente, el bombeo a través de un sistema Láser a diodos es muy usado.

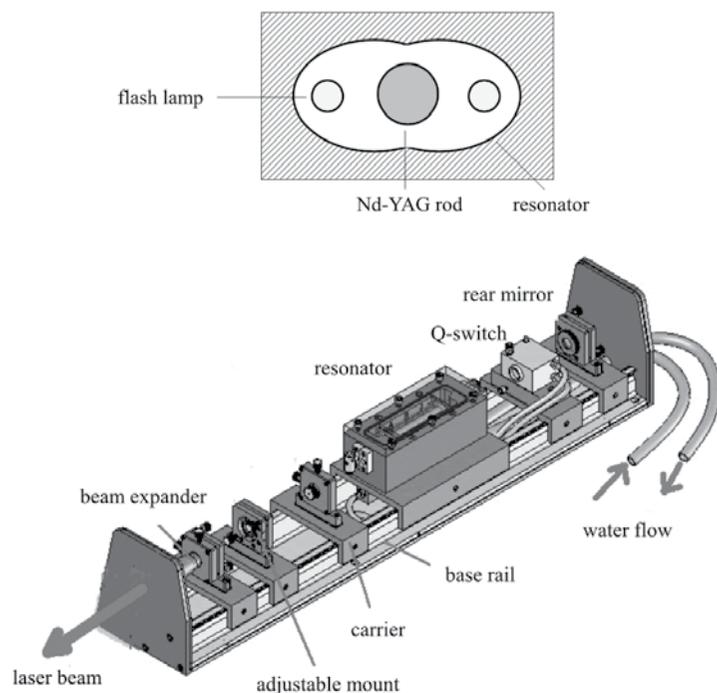


Fig. 4.13: Láser Nd:YAG donde se puede ver la porción donde se pone la cavidad de resonancia entre dos lámparas de flash (Sintec Optronics).

### 4.3 PARÁMETROS DE PROCESO DEL LÁSER

Hay un número alto de parámetros de proceso que son en relación con el funcionamiento de la fuente Láser y otros que están en relación con el recorrido óptico necesario para transportar el rayo electromagnético al área de trabajo. En las siguientes paginas, vamos a comentar los primeros que son:

- La distribución de energía en el haz Láser.
- La polarización del haz Láser.

- La calidad del haz Láser: la divergencia.
- La calidad del haz Láser: el factor  $M^2$ .
- El funcionamiento continuo o pulsado. Irradiación, flujo, tiempo de interacción, y factor de recubrimiento

### La distribución de energía en el haz Láser

La distribución de energía en la sección transversal de los rayos Láser es una variable muy importante para la utilización y la aplicación de la fuente a los procesos industriales; la distribución de energía en la sección transversal se codifica con la sigla TEM (*Transverse Electromagnetic Mode*) y después con dos subíndices:

TEM<sub>nm</sub> coordenadas Cartesianas / TEM<sub>n0</sub> coordenadas Polares

Los subíndices **n** y **m** (coordenadas Cartesianas) o **r** y **θ** (coordenadas Polares) van a contar el número de veces que el campo eléctrico y el campo magnético se anulan en la distribución transversal. Significa que la energía y la potencia Láser son anuladas en estas regiones de las superficies.

La distribución de potencia depende de la arquitectura de la fuente Láser distribuida. Una distribución de potencia muy importante es la TEM<sub>00</sub>, donde la energía está distribuida según la distribución de Gauss o gaussiana (Fig. 4.14).

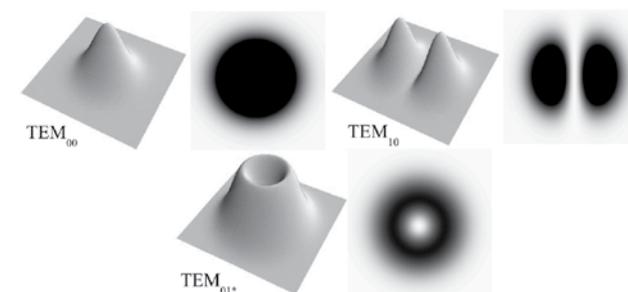


Fig. 4.14: Algunas distribuciones de energía en la sección transversal de los rayos Láser.

Algunos casos típicos para las fuentes Láser son las mostradas abajo (Fig. 4.15). Como vamos a ver en seguida el TEM<sub>00</sub> es la distribución de potencia que tiene la mejor calidad.

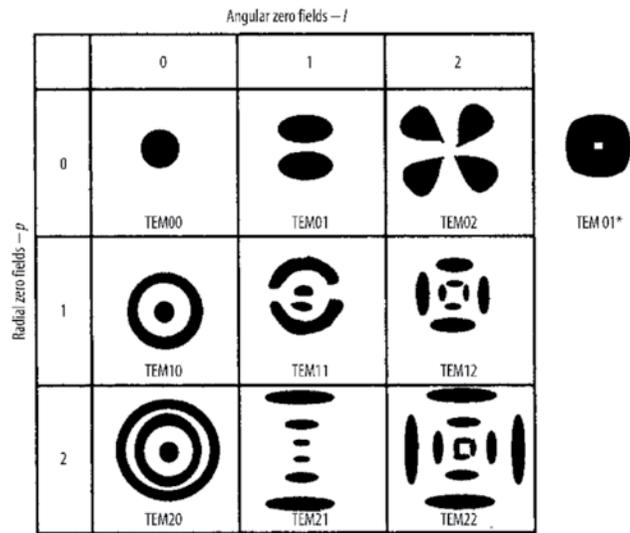


Fig. 4.15: Otras distribuciones de energía en la sección trasversal de los rayos Láser y su clasificación.

### La polarización del haz Láser

La polarización de las radiaciones electromagnéticas puede ser circular, lineal o la polarización puede faltar.

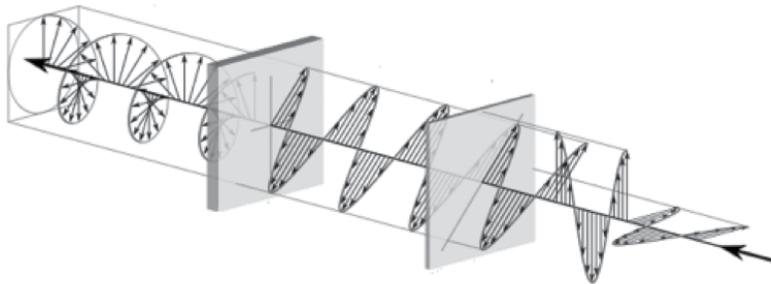


Fig. 4.16: Diferentes polarizaciones de las radiaciones electromagnéticas.

Como en el caso de la distribución de energía en la sección trasversal, la polarización del haz Láser es una variable importante para la calidad de las elaboraciones.

### La calidad del haz Láser: la divergencia

La calidad del haz Láser producido por cada fuente depende de la posibilidad de transportar la energía desde la fuente hasta la mesa de trabajo del sistema de elaboración. Esta posibilidad depende del hecho que hay un ángulo de divergencia del haz Láser a la salida de la fuente, que depende principalmente de la arquitectura y del medio activo.

Una fuente Láser se puede esquematizar como un volumen entre dos espejos (Fig. 4.17): el primero con una alta reflectividad (100% de la energía impactante será reflejada) y el segundo con una baja reflectividad (por ejemplo 90% de la energía impactante será reflejada y la restante transmitida). La energía a la salida tiene un ángulo de divergencia y las fuentes con alta calidad tienen un pequeño ángulo de divergencia. El ángulo de divergencia se puede medir directamente a la salida del espejo con baja reflectividad.

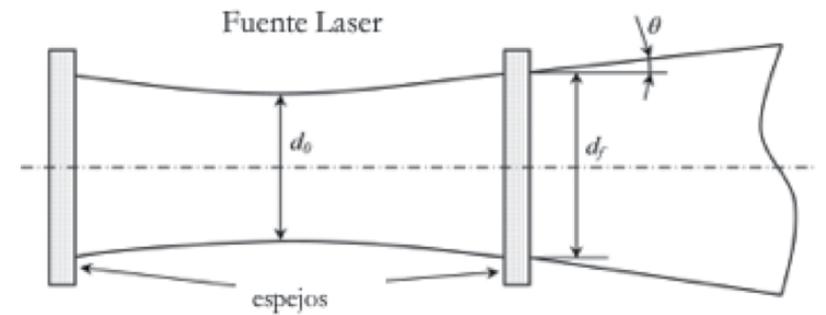


Fig. 4.17: Forma del haz Láser a la salida de la cavidad de resonancia: en evidencia el ángulo de divergencia  $\theta$ .

$k$  es un parámetro característico que se puede medir como se ilustra en la ecuación 4.14. donde:  $d_0$  es el diámetro característico de la fuente Láser;  $d_f$  es el diámetro cuando los rayos salen de la cavidad de resonancia;  $\theta$  se llama ángulo de divergencia y  $\lambda$  es la longitud de onda:

$$k = \frac{\theta * d_0}{\lambda} \approx \frac{\theta * d_f}{\lambda} \quad (4.14)$$

Los rayos Láser cuando la distribución de potencia es igual al TEM<sub>00</sub> consiguen el valor mínimo del parámetro característico  $k_{gauss}$ . (ecuación 4.15).

$$k_{gauss} = \frac{4}{\pi} = 1.27 \quad (4.15)$$

De la misma manera, se puede decir que cuando la distribución de potencia es igual al TEM<sub>00</sub> se puede conseguir el ángulo de divergencia más bajo posible:  $\theta_{gauss}$  (ecuaciones 4.16, 4.17, 4.18).

$$\theta = \frac{\lambda * k}{d_0} \quad (4.16)$$

$$\theta_{gauss} = \frac{\lambda * k_{gauss}}{d_0} = 1.27 * \frac{\lambda}{d_0} \quad (4.17)$$

$$\theta_{gauss} < \theta \quad (4.18)$$

Típicamente la unidad de medida del ángulo de divergencia es: **mrad**.

Tal vez se prefiere utilizar un parámetro diferente para señalar la calidad del haz Láser. Es un parámetro que directamente explica la calidad por comparación con los sistemas ideales que tienen la máxima calidad o sea los Láseres con TEM<sub>00</sub>. Este parámetro se llama "M<sup>2</sup>".

### La calidad del haz Láser: el factor M<sup>2</sup>

Por comparación entre  $k_{gauss}$  con el parámetro característico  $k$  o, también,  $\theta_{gauss}$  con el ángulo de divergencia  $\theta$ , se obtiene el valor  $K$  (ecuación 4.19):

$$K = \frac{k_{gauss}}{k} = \frac{\theta_{gauss}}{\theta} = \frac{4}{\pi k} = \frac{1.27}{k} \quad (4.19)$$

$K$  tiene el máximo valor para los rayos gaussianos (ecuación 4.20):

$$K = 1 \quad (4.20)$$

Al reducir del valor se reduce también la calidad del haz Láser (ecuación 4.21):

$$0 < K < 1 \quad (4.21)$$

Muchos constructores prefieren utilizar el recíproco del parámetro  $K$ , que es muy común en las tablas técnicas: el parámetro  $M^2$  (ecuación 4.22)

$$M^2 = \frac{1}{K} = \frac{\pi k}{4} \quad (4.22)$$

En este caso, el mínimo valor se consigue para rayos gaussianos (ecuación 4.23):

$$M^2 = 1 \quad (4.23)$$

Al revés, en comparación con el parámetro  $K$ , al aumentar el valor  $M^2$  baja la calidad (ecuación 4.24):

$$M^2 > 1 \quad (4.24)$$

### El funcionamiento continuo o pulsado

Los Láseres pueden generar energía en modo continuo (*Continuous Wave, CW*) o pulsado (*Pulsed Wave, PW*). Los pulsos introducen nuevos parámetros de proceso que son:  $\tau$  (en unidad de tiempo) es la duración de cada pulsación;  $T$  es el periodo de la pulsación (en unidad de tiempo);  $f_p$  es la frecuencia de la pulsación (es el recíproco de la unidad de tiempo);  $\delta = \tau/T = \tau * f_p$  se llama **DUTY CYCLE** y representa la duración del pulso en el periodo de la pulsación (Fig. 4.18).

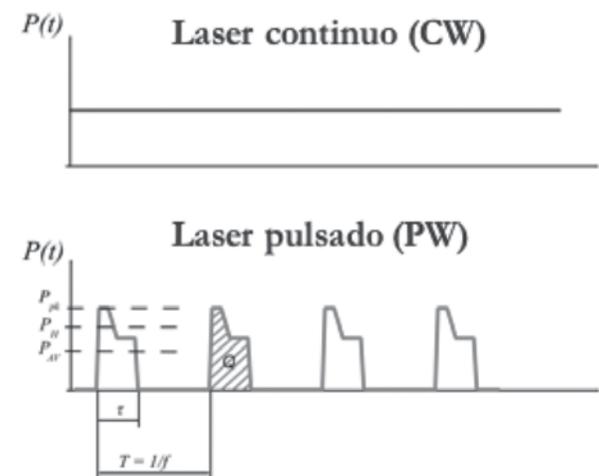


Fig. 4.18: Potencia emitida por Láser continuo (CW) y Láser pulsado (PW).

La potencia generada es constante por un Láser continuo pero, por un Láser pulsado es generada solo por el tiempo  $\tau$  por cada periodo de la pulsación  $T$ . Entonces, hay diferentes medidas de potencia que son útiles para entender y comparar el efecto durante la interacción con los materiales. Los más utilizados son:  $P_{pk}$  [ W ] que es la **potencia máxima** para cada pulsación (ecuación 4.25);  $P_H$  [ W ] que es la **potencia media para cada pulsación**, si  $\tau$  es la duración de cada pulsación (ecuación 4.26);  $P_{AV}$  [ W ] que es la **potencia media**, si  $f_p$  es la frecuencia de la pulsación (ecuación 4.27).

$$P_{pk} = \max P(t) \quad (4.25)$$

$$P_H = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P(t) dt \quad (4.26)$$

$$P_{AV} = f_p * Q = f_p * P_H * \tau \quad (4.27)$$

Además,  $Q [J]$  es la **energía para cada pulsación** es muy utilizada para comparación entre fuentes similares pero de diferentes constructores (ecuación 4.28):

$$Q = P_H * \tau = \int_0^{\tau} P(t) dt \quad (4.28)$$

Los sistemas para conseguir las pulsaciones de energía son diferentes:

- Por medio de la excitación impulsada a través del bombeo por **Lámpara flash** (duración de la pulsación:  $10^{-4}$  s).
- Por medio del efecto de un sistema electro-mecánico: **Q-Switch**
- Por **Mode locking** (duración de la pulsación:  $10^{-14}$  s)

### Irrradiación

La Irradiación,  $I$ , es la densidad de potencia transportada por los rayos Láser. Está en relación con la intensidad del campo eléctrico y magnético (ecuación 4.29).

$$I = \frac{P}{S} \left[ \frac{W}{m^2}, \frac{W}{cm^2}, \frac{W}{mm^2} \right] \quad (4.29)$$

### Flujo

El Flujo  $F$ , es la densidad de energía transportada por los rayos Láser (ecuación 4.30):

$$F = \frac{Q}{S} \left[ J/m^2 \right] \quad (4.30)$$

Se puede también escribir:

$$F = \frac{Q}{S} = \frac{P * \tau}{S} \quad (4.31)$$

### Tiempo de interacción

El tiempo de interacción,  $\tau_i$ , es un parámetro característico del funcionamiento continuo que se puede escribir como en la ecuación 4.32:

$$\tau_i = \frac{d_s}{v} \quad (4.32)$$

Donde  $d_s$  es el diámetro del spot y  $v$  la velocidad de proceso.

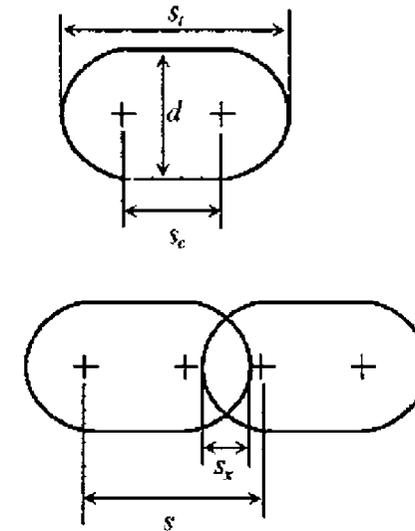


Fig. 4.19: Factor de recubrimiento  $R$ , para Láser pulsado (PW).

Para los procesos pulsados (PW) el tiempo de interacción es la duración del pulso. Además, se define el factor de recubrimiento  $R$  que significa como las pulsaciones se superponen entre sí (Fig. 4.19 y ecuación 4.33).

$$R = \frac{S_x}{S_t} = 1 - \frac{v * T}{d_s} \quad (4.33)$$

Donde,  $d_s$  es el diámetro del spot y  $v$  la velocidad de proceso.

Para los procesos que utilizan pulsaciones, es necesario conocer muy bien las características de la fuente Láser porque algunos parámetros de proceso están escondidos: típicamente la frecuencia de la pulsación, por ejemplo, depende de otras características, y no puede ser modificada independientemente.

### 4.4 LOS PARÁMETROS DE LA CALIDAD DEL HAZ LÁSER DESPUÉS LA FOCALIZACIÓN: EL PARÁMETRO BPP

El parámetro BPP (Beam Parameter Product) es el producto entre el radio del haz [mm] y la mitad del ángulo de divergencia [mrad], (ecuación 4.34). Se utiliza muy frecuentemente para clasificar la calidad del haz Láser después de la focalización o después de la última lente que sirve para reducir el diámetro del spot ( $d_s$ ) y, de esta manera, aumentar la densidad de energía disponible para el proceso.

$$BPP = \frac{d_0}{2} * \frac{\theta}{2} \quad (4.34)$$

Por la ecuación 4.16, se consigue la ecuación 4.35:

$$k = \frac{\theta * d_0}{\lambda} \quad (4.35)$$

Por la ecuación 4.19, se consigue la ecuación 4.36:

$$K = \frac{k_{gauss}}{k} = \frac{\theta_{gauss}}{\theta} = \frac{4}{\pi k} = \frac{1}{M^2} \quad (4.36)$$

El parámetro BPP se puede, por lo tanto, escribir en función de la calidad del haz Láser (ecuación 4.37):

$$BPP = \frac{d_0}{2} * \frac{\theta}{2} = \frac{k\lambda}{4} = \frac{\lambda}{\pi} M^2 \quad (4.37)$$

En el caso de la longitud de onda del Láser de estado sólido Nd:YAG (ecuación 4.38):

$$BPP_{Nd:YAG} = \frac{1.064}{\pi} * M^2 = 0.34 * M^2 \quad (4.38)$$

Se evidencia como la diferencia entre BPP y  $M^2$  esta en la longitud de onda.

#### 4.5 DIODOS LÁSER

Son fuentes Láser que se basan en los materiales semiconductores. Se obtienen longitudes de onda desde **0.80** hasta **0.95**  $\mu\text{m}$  que dependen de la temperatura de funcionamiento.

Son fuentes muy eficientes con una eficiencia cuántica casi unitaria y una eficiencia global cercana al **30%**.

Para conseguir altas potencias es necesario poner juntos un elevado número de diodos (**stack**) y usar lentes para la integración de la radiación producida.

La distribución de potencia es uniforme y usualmente se distribuye en una región cuadrada o rectangular. Se pueden conseguir potencias de hasta 6.0 kW con una fuente muy compacta y de pequeñas dimensiones.

Se pueden transportar a través de fibra óptica.

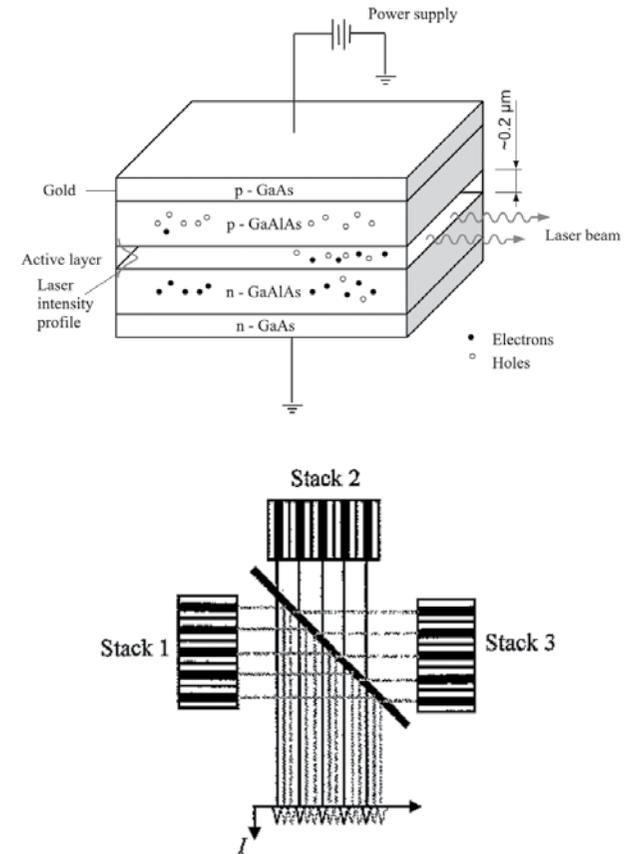


Fig. 4.20: Esquema de un diodo e integración de la energía de tres stacks de diodos.

#### 4.6 FUENTES YB:YAG DISCO

Cuando se diseña y se realiza un sistema Láser, el problema principal es la estabilidad de la cavidad de resonancia o el mantenimiento de la temperatura del medio activo porque este se puede deteriorar o también puede modificar la dimensión y, en consecuencia, la calidad de la radiación emitida.

Si el cristal es producido en una forma de disco y después ese disco se coloca sobre un material que puede disipar calor eficientemente, se consigue una elevada estabilidad del medio activo y se puede obtener una alta potencia emitida. Esta arquitectura es aquella del Láser a disco (Fig. 4.21).

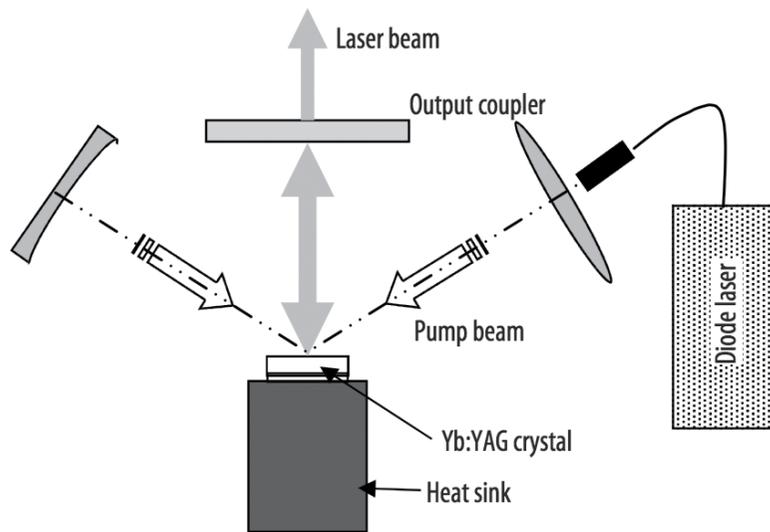


Fig. 4.21: Esquema de un Láser a disco Yb:YAG.

La alta eficiencia del medio activo del Láser a disco se obtiene con la forma de la cavidad de resonancia que puede estar muy bien refrigerada.

Otra razón de esta alta eficiencia está también en relación al medio activo (Yb) que puede estar contenido en alto porcentaje (hasta 25%). (En el caso del Nd el porcentaje es menor del 3 %).

Este tipo de Láser se bombea con diodos, emitiendo una longitud de onda en el campo infrarrojo ( $1.03\mu\text{m}$ ). Se pueden transportar a través de fibra óptica.

Un disco de diámetro de 7 mm y espesor de 0.3 mm genera 500 W de radiación Láser.

En la Fig. 4.22, el Láser TruDisk de Trumpf.

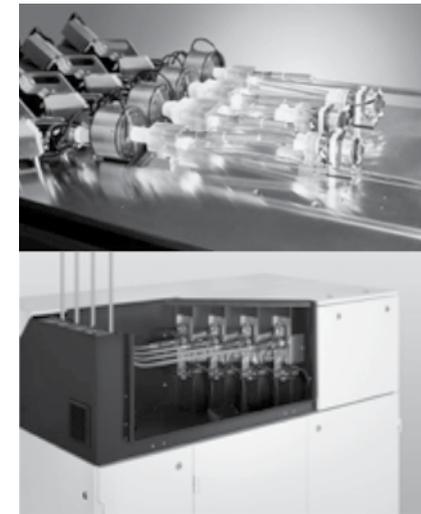


Fig. 4.22: Trumpf TruDisk Láser series. Potencias: desde 1000 hasta 16000 W con una calidad del haz muy buena.

#### 4.7 FUENTES YB:VIDRIO EN FIBRA

La idea es generar la radiación electromagnética en medio de la fibra óptica que puede servir también para el transporte de los rayos Láser (Fig. 4.23). El bombeo se obtiene a través de diodos y los espejos son remplazados por dos retículos de Bragg (Fig. 4.24).

La fibra, que está dopada con el medio activo Yterbio (YB), tiene una buena conductividad del calor y el enfriamiento se obtiene solo con aire en movimiento para las bajas potencias.

Un módulo de Láser generado en fibra va a producir 300 W de potencia. La calidad es en promedio buena, pero para conseguir altas potencias es necesario agregar algunos módulos.

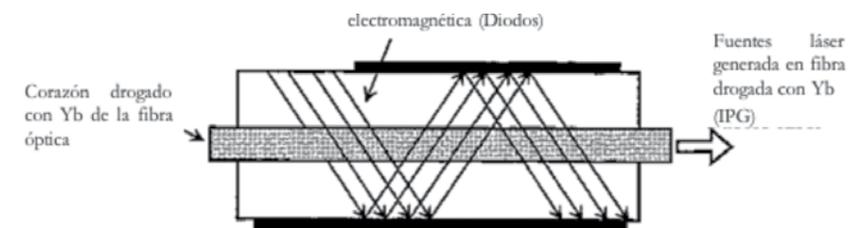


Fig. 4.23: Esquema del funcionamiento de un Láser Yb:vidrio generado en fibra.

Como se puede ver en la imagen, la fuente Láser que se va a diseñar es muy compacta. Se pueden agregar algunos módulos y, por lo tanto, obtener alta potencia, pero al subir la potencia instalada se consigue una reducción de la calidad del haz.

Cuando la potencia sube más allá de 2 kW se debe adjuntar un sistema de enfriamiento con agua.

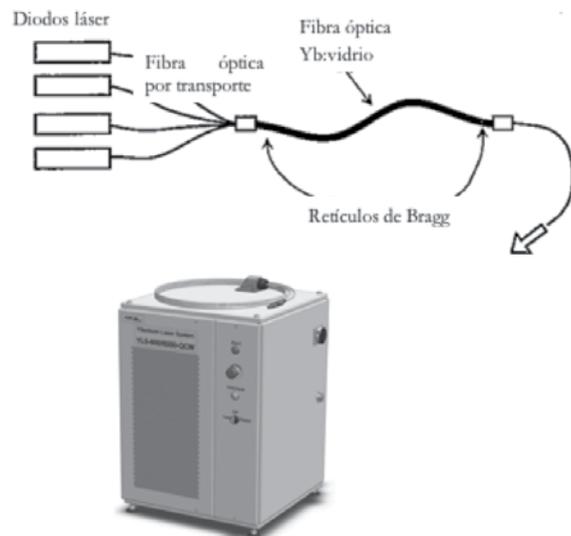


Fig. 4.24: Esquema del bombeo por Diodos Láser (arriba) y Fuentes Láser IPG generada en fibra dopada con Yb (abajo).

#### 4.8 SUMARIO DE LOS TIPOS DE RADIACIONES LÁSER

En la Tabla 4.3 están las principales características de las fuentes Láser que hemos presentado:

FUENTE LÁSER	UNIDAD DE MEDIDA	CO <sub>2</sub>	Nd:YAG	DIODO	FIBRA
Longitud de onda, $\lambda$	[ $\mu\text{m}$ ]	10.6 *	1.06 **	0.80-0.95 **	1.03 **
Rendimiento, $\eta$	[%]	20	5-20	30-40	30
Potencia Máx, P	[kW]	40	6-15	10	100
Densidad de Potencia Máx, I	[W/cm <sup>2</sup> ]	10 <sup>8</sup>	10 <sup>7</sup> -10 <sup>9</sup>	10 <sup>6</sup>	10 <sup>9</sup>

Tabla 4.3: Características principales de las radiaciones Láser.

#### 4.9 SISTEMAS DE ELABORACIÓN CON FUENTES LÁSER Y LAS DIMENSIONES CARACTERÍSTICAS DEL HAZ FOCALIZADO

Los sistemas de elaboración industriales con fuentes Láser (Fig. 4.25) están constituido de:

- Fuentes Láser: CO<sub>2</sub>, Nd:YAG, Diodos, Yb:YAG; Laser Yb:vidrio en fibra.
- Sistemas de transporte de la radiación Láser: espejos o fibra óptica.
- **Sistemas de focalizaciones** de la radiación Láser por espejos o lentes.
- Sistemas de medidas de la potencia y su distribución integradas o externas. Sistema de movimiento de los materiales y componentes (CNC).
- Servicios y sistemas de asistencia (entrega del gas de asistencia en la región de trabajo, sistema de medida y control durante el trabajo).

Como hemos visto, los rayos Láser que son generados en las fuentes Láser se transportan al lugar de trabajo por espejos (siempre en el caso del CO<sub>2</sub>) o por fibra óptica. El sistema de focalización (cabezal) para el corte tiene algunas particularidades.

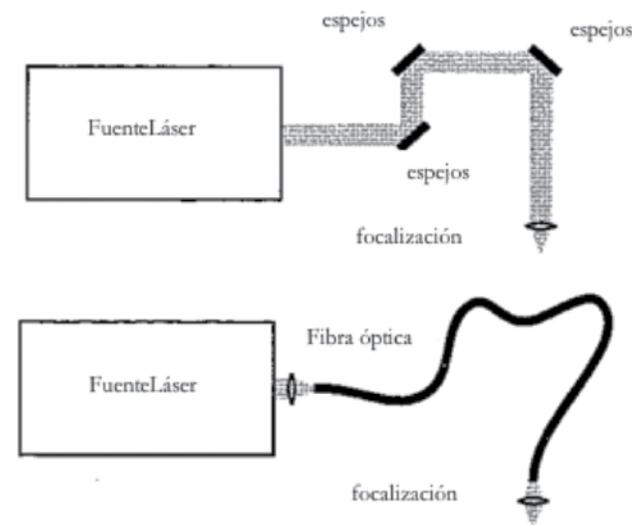


Fig. 4.25: Esquema básico de un sistema industrial de elaboración con fuente Láser

#### Sistemas de focalización de la radiación Láser

La focalización cerca del área de trabajo es necesaria para concentrar la energía y obtener una alta densidad. Esta densidad debe ser en relación al tipo de proceso y material que se quiere transformar.

Los rayos láser cuando salen de la cavidad de resonancia tienen una **baja divergencia** y, por lo tanto, una elevada **transportabilidad**. Como hemos visto, la divergencia depende de la arquitectura del Láser y los constructores la indican en los datos técnicos por el medio del ángulo de divergencia  $\theta$  (mrad) o del factor  $M^2$  (adimensional).

Las lentes o los espejos permiten concentrar la energía pero, después de la focalización, la divergencia se torna importante (Fig. 4.26 y Fig. 4.27).

### Las dimensiones características del haz focalizado

Las dimensiones características del haz focalizado (Fig. 4.26 y Fig. 4.27) son:  $d_l = d_f =$  diámetro salida láser; diámetro haz sobre la lente;  $d_0 =$  diámetro del cuello del haz después de la focalización;  $z_0 = f =$  distancia de focalización;  $d_s =$  diámetro sobre la superficie de trabajo;  $\Delta z_{pdc} =$  profundidad de campo de focalización.

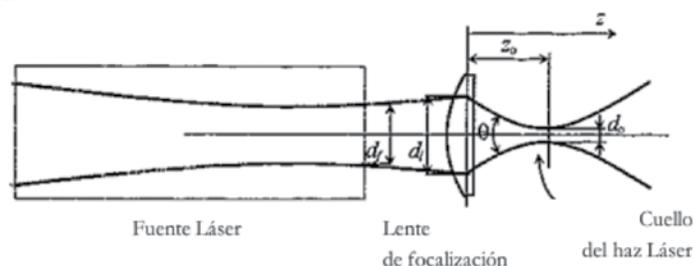


Fig. 4.26: Dimensiones características de la salida del haz y focalización.

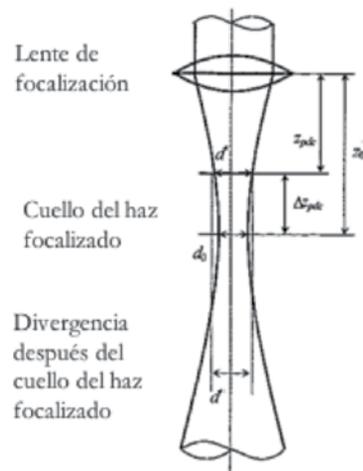


Fig. 4.27: Dimensiones características del haz focalizado

### Relación entre el diámetro y la distancia de focalización

El haz después de la lente de focalización tiene una conformación de un hiperboloide (ecuación 4.39):

$$d(z)^2 = d_0^2 + (z - z_0)^2 * \theta^2 \quad (4.39)$$

El ángulo de divergencia en la región de focalización se puede calcular por la ecuación 4.40:

$$\theta = 2 * \arctg\left(\frac{d_l}{2z_0}\right) \approx 2 * \arctg\left(\frac{d_f}{2z_0}\right) \approx \frac{d_f}{f} \quad (4.40)$$

Recordando la ecuación 4.16 (abajo):

$$d_0 = \frac{k\lambda}{\theta} \quad (4.16)$$

Es posible obtener la siguiente relación (ecuación 4.41), que explica una importante ley física:

(1) El diámetro de focalización,  $d_0$ , es inversamente proporcional a la distancia focal  $f$ . Esto significa que, solo con una distancia focal pequeña se obtiene el diámetro de focalización mínimo:

$$d_0 = (k\lambda f)/d_f \quad (4.41)$$

Además, el diámetro de focalización  $d_0$  está en relación con el factor de la calidad del haz Láser,  $M^2$ , y del diámetro de focalización ideal por la fuente con una distribución de potencia de Gauss,  $d_{0,gauss}$ , (ecuación 4.42):

$$d_0 = M^2 * d_{0,gauss} \quad (4.42)$$

Esto pone en evidencia el significado del factor de calidad del haz Laser: típicamente  $M^2 > 1$  y, por lo tanto, una peor calidad significa también un diámetro de focalización más grande (o una más baja densidad de potencia disponible).

### Profundidad del campo de focalización

La profundidad de campo de focalización,  $\Delta z_{pdc}$ , se puede calcular mediante la ecuación 4.39 porque hay una relación aproximadamente lineal entre el diámetro del láser  $d(z_{pdc})$  - en la posición  $z_{pdc}$  - y el diámetro de focalización  $d_0$ . Para la mayoría de los autores, se trata de una relación lineal a través de un parámetro característico y constante que se llama  $h$ , siendo  $h = \sqrt{2} \approx 1.41$

La mencionada relación lineal es la siguiente:

$$d(Z_{pdc}) = h * d_0 = 1,41 * d_0 \quad (4.43)$$

$$\Delta Z_{pdc} = (h^2 - 1)^{1/2} * (d_0 f / d_f) \quad (4.44)$$

Por la mencionada (4.41), se pueden obtener relaciones anteriores (ecuaciones 4.43 y 4.44) que explican unas importantes leyes físicas:

(2) La profundidad de campo de focalización es proporcional a la distancia de focalización (ecuación 4.43).

$$\Delta Z_{pdc} = \sqrt{h^2 - 1} * k\lambda \left(\frac{f}{d_f}\right)^2 \quad (4.45)$$

(3) La profundidad de campo de focalización es proporcional al diámetro de focalización (ecuación 4.44).

$$\Delta Z_{pdc} = \sqrt{h^2 - 1} * \frac{d_0^2}{k\lambda} \quad (4.46)$$

### La focalización en el caso del láser a fibra

Los rayos láser que son generados en la fibra divergen al salir y es necesario primero una lente de colimación y después una lente de focalización (Fig. 4.28).

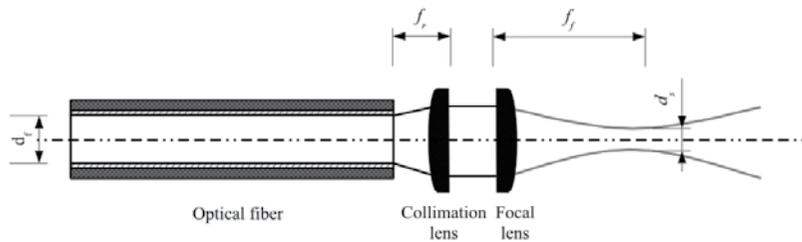


Fig. 4.28: Colimación y focalización a la salida de una fibra óptica

El diámetro de focalización en el caso de las radiaciones Láser generadas en fibra es (ecuación 4.44):

$$d_s = d_f \frac{f_c}{f_f} \quad (4.47)$$

Donde: **ds** diámetro de focalización, **df** diámetro de la fibra óptica; **f<sub>c</sub>** distancia de focalización; **f<sub>f</sub>** distancia de colimación.

### Sistemas de medida de la potencia y su distribución

El hecho de saber la potencia generada y la posición exacta del cuello del haz láser después de la focalización (Fig. 4.29 y Fig. 4.30) es fundamental porque, como vamos a ver, una variación pequeña de la posición del material puede comportar una diferencia significativa en la densidad de potencia disponible.

La medida de esta dimensión es muy importante; se puede medir a través de:

- experimentos;
- o también por sistemas de medida específicos (Primes, Promotec).

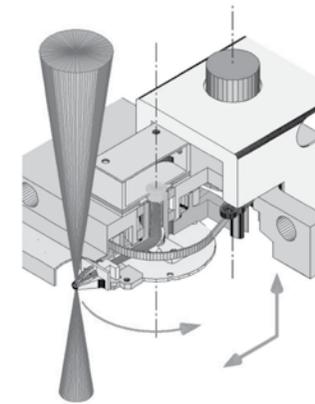


Fig. 4.29: Esquema del funcionamiento del FOCUS MONITOR de PRIMES GmbH.

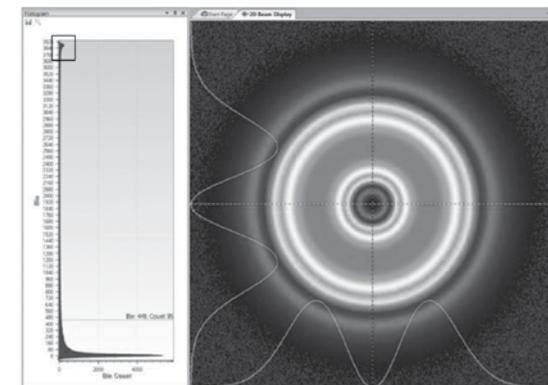


Fig. 4.30: Una imagen de la medida de la distribución de energía en el haz a través del "Beam Analyzer" de Spiricon.

#### 4.10 NORMAS DE SEGURIDAD EN EL USO DEL LÁSER

Los rayos Láser pueden causar serios problemas, especialmente en los ojos, pero pueden afectar a toda la materia orgánica.

Por el hecho que, la mayoría de los rayos son invisibles y muy rápidos (hablamos de la velocidad de la luz), no es posible evitar la colisión. Por ello, es necesario vestirse adecuadamente.

#### 5. LA INTERACCIÓN CON EL MATERIAL

##### 5.1 ABSORCIÓN, REFLEXIÓN Y TRANSMISIÓN DE ENERGÍA

Las radiaciones electromagnéticas van a interactuar con los materiales por el campo eléctrico y el campo magnético. Las interacciones con los materiales sólidos conducen a una reflexión y a una transmisión de la energía en el material (absorción de energía). La energía absorbida aumentará la temperatura del material. Por lo tanto, las elevadas densidades de potencia que se consiguen con las fuentes Láser industriales, permiten el calentamiento hasta la fusión del material y todos los procesos térmicos de las superficies.

Las superficies reales de los materiales no son perfectas y entonces los rayos al reflejarse no siguen la ley de Snell pero son dispersados por la rugosidad (Fig. 5.1).

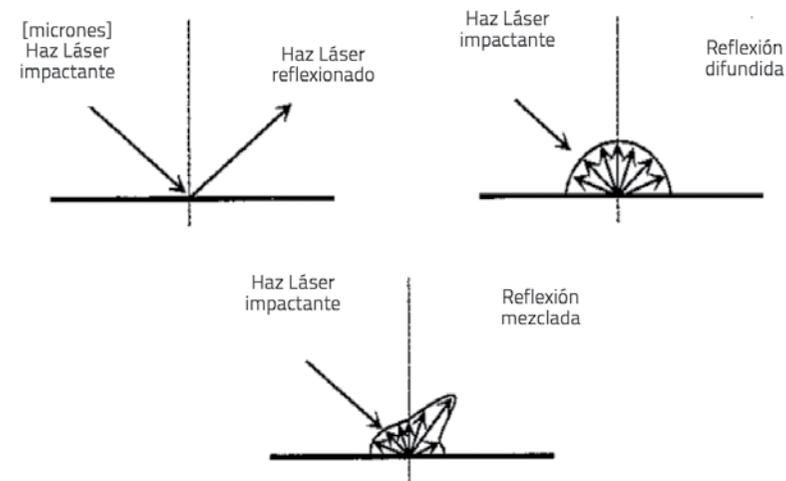


Fig. 5.1: Efecto de la rugosidad de la superficie sobre la reflexión de los rayos Láseres.

En el caso de las aplicaciones industriales del Láser, para modelar el proceso se utilizan típicamente los coeficientes o índices de Absorción A, de Reflexión B, y de Transmisión T, que son adimensionales y representan los porcentajes de energía o potencia que es absorbida (Pa), reflejada (Pr) y transmitida (Pi), respectivamente. Si bien están en relación con los índices de refracción, se pueden medir directamente.

Los coeficientes o índices de Absorción A, de Reflexión B, y de Transmisión T, tienen las siguientes relaciones (ecuaciones 5.1 y 5.2):

$$R + A + T = 1 \quad (5.1)$$

$$R=Pr/Pi ; A=Pa/Pi ; T=Pt/Pi \quad (5.2)$$

La absorción de la energía Láser es típicamente bastante baja, en particular por los materiales metálicos, y en estado sólido (Fig. 5.2 y Fig. 5.3). Solo en el caso de los cerámicos y por el Láser CO2 es alta.

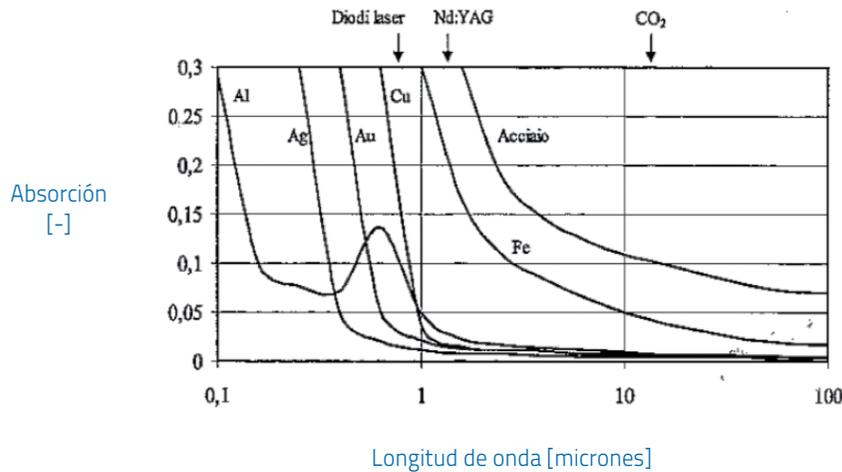


Fig. 5.2: Coeficiente de absorción A de los rayos Láseres para diferentes metales.

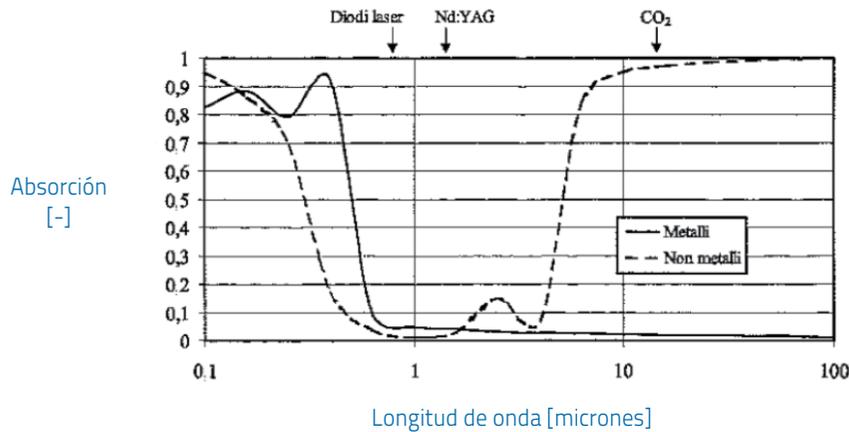


Fig. 5.3: Coeficiente de absorción A para metales y cerámicos

La absorción de la energía Láser, aumenta cuando la temperatura crece, en particular, entre las temperaturas de fusión y de vaporización. Este hecho es fundamental por la eficiencia del proceso térmico (Fig. 5.4).

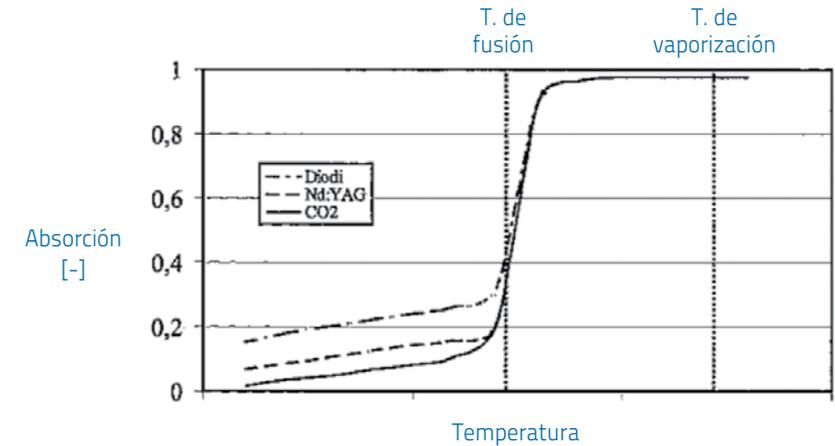


Fig. 5.4: Aumento del coeficiente de absorción con la temperatura

La absorción de energía ocurre por interacción del campo electromagnético con el material solo en los estratos superficiales del material, con una ley de tipo exponencial: la Ley de Beer-Lambert, ecuación.

$$I_{abs} = I * e^{-\beta z} \quad (5.3)$$

donde:  $I_{abs}$ : Irradiación absorbida;  $I$ : Irradiación emitida;  $\beta$ : coeficiente de absorción.

Hay algunas diferencias entre el comportamiento de los metales y los materiales no metálicos (Fig. 5.5), pero la absorción ocurre siempre en un espesor muy delgado (unos micrómetros).

La energía transportada de los rayos Láser se absorbe por un espesor superficial y después se difunde por conducción térmica al interior. La absorción es muy rápida mientras que la conducción requiere tiempo. Significa que se pueden conseguir diferentes distribuciones de temperatura en el material, utilizando y controlando diferentes parámetros de proceso.

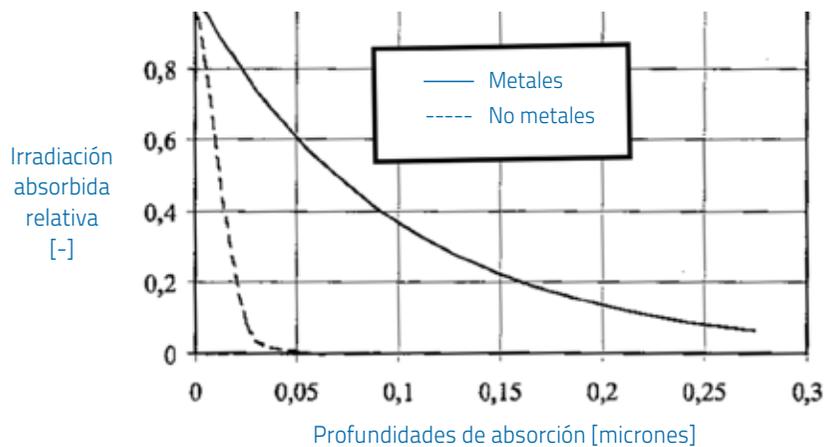


Fig. 5.5: Espesor de absorción del Láser por diferentes materiales

## 5.2 LOS PARÁMETROS DE PROCESO Y LA INTERACCIÓN DEL LÁSER CON EL MATERIAL

Vamos a considerar algunos de los parámetros de proceso de la interacción del Láser con los materiales más importantes porque controlan la distribución de temperatura en el material: la irradiación  $I$ , y el tiempo de interacción  $\tau$  (Fig. 5.6).

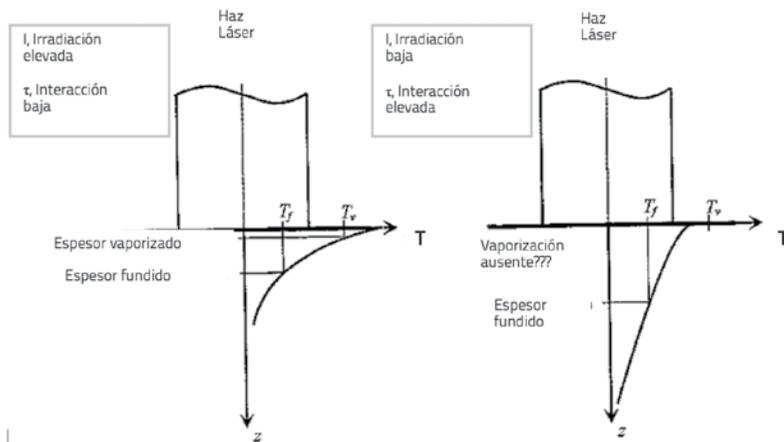


Fig. 5.6: Absorción de energía Láser y conducción de energía térmica: diferentes distribuciones de temperatura

Por ejemplo, una irradiación elevada (o una potencia elevada) pero con un tiempo de interacción bajo (o una elevada velocidad de proceso) realiza una distribución de temperatura con una muy elevada temperatura en la superficie (incluso superiores a la de vaporización característica del material) pero con una baja penetración al interior o un pequeño espesor fundido (Fig. 5.6, izquierda). Al revés, una irradiación baja (o una potencia baja) pero con un tiempo de interacción alto (o una baja velocidad de proceso) realiza una distribución de temperatura con una baja temperatura en la superficie (por ejemplo, superior a la característica de fusión pero inferior a la de vaporización del material) pero con una alta penetración al interior o un espesor fundido mayor (Fig. 5.6, derecha). En el primer caso, las temperaturas superficiales suben hasta a causar la vaporización. En el segundo caso, las temperaturas en superficie son más bajas y el espesor del material fundido es mayor porque el calor se ha difundido por conducción más en la profundidad.

## 5.3 LA ELECCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE PROCESO

Manejando los parámetros del proceso de interacción Láser – material (en el ejemplo sobre la irradiación y el tiempo de interacción) se puede cambiar el tipo de interacción y obtener diferentes distribuciones de temperatura en el material y, por lo tanto, diferentes procesos: corte, soldadura, ablación y otros.

Por ejemplo, en la Fig. 5.7 una baja irradiación y un alto tiempo de interacción conducen a los procesos de tratamiento térmico, el corte y la soldadura. Una alta irradiación y bajo tiempo de interacción al proceso de granallado. La perforación se consigue con condiciones intermedias.

Hay, además, indicaciones muy generales para la irradiación que se refieren a la sola condición de la potencia Láser disponible,  $P$ , y de las dimensiones del área,  $S$ , de focalización:

- $P/S \approx 10^3 \text{ W/cm}^2$  --> modificación de la estructura pero sin fusión.
- $P/S \approx 10^4 \text{ W/cm}^2$  --> modificación de la estructura pero con fusión.
- $P/S \approx 10^6 \text{ W/cm}^2$  --> fusión y vaporización.
- $P/S > 10^7 \text{ W/cm}^2$  --> vaporización pero con porción de material fundido

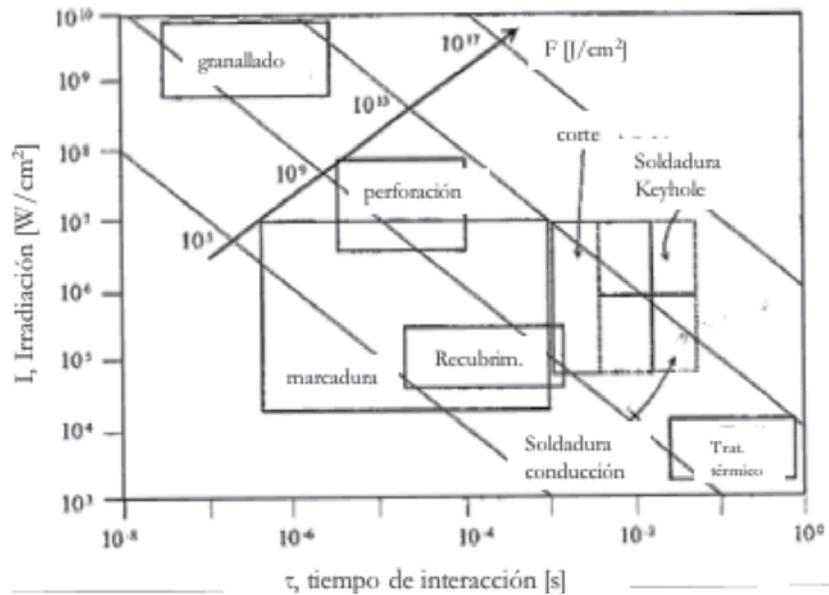


Fig. 5.7: Elección de los parámetros de proceso

#### 5.4 COMENTARIO SOBRE EL PLASMA Y LA INTERACCIÓN CON EL LÁSER

Como vimos, en algunas condiciones de interacción entre el Láser y los materiales, se puede conseguir la vaporización del material que conduce a la formación del plasma. El plasma puede interactuar con la radiación electromagnética y, por lo tanto, puede absorber la energía antes de que pueda impactar el material (Fig. 5.8). El efecto del plasma es máximo cuando la irradiación es alta y el tiempo de interacción bajo. Por esta razón, la formación del plasma es un problema que puede complicar los procesos de corte, soldadura y otros procesos.

En el corte, la formación del plasma no es común e interesa, cuando existe, solo una porción del borde superior del surco de corte, la superficie superior de la chapa cortada, donde hay el material líquido con las temperaturas más altas y bastante para vaporizar el metal.

En la soldadura, pueden formarse diferentes tipos de plasmas y establecerse diferentes tipos de interacciones.

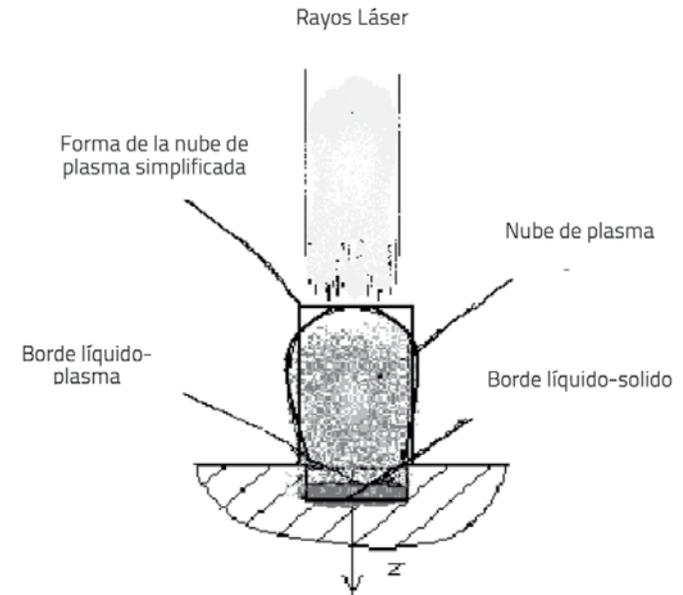


Fig. 5.8: Esquema del efecto de la vaporización con la formación de la pluma de plasma

## 6. APLICACIONES LÁSER: EL PROCESO DE CORTE CON LA RADIACIÓN LÁSER

### 6.1 MECANISMO DE CORTE CON EL LÁSER

Existen diferentes mecanismos de corte con el Láser pero el más común es el corte por fusión: el Láser funde el material gracias a su alta energía transmitida que viene absorbida. Es necesario que el material líquido pueda salir del surco de corte y, por esta razón, se utiliza un gas de asistencia a presión (Fig. 6.1).

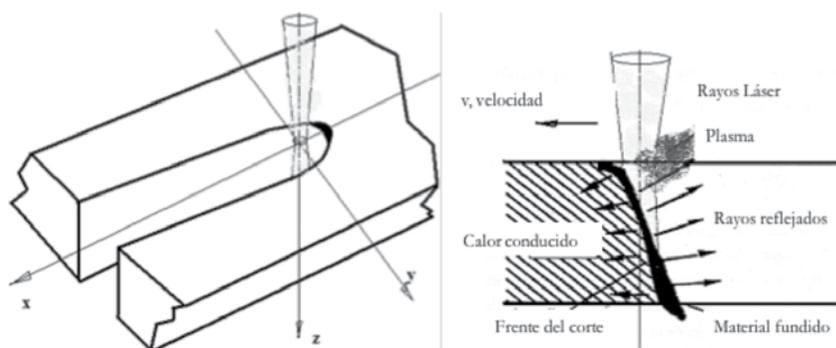


Fig. 6.1: El surco de corte y esquema del mecanismo de corte Láser por fusión

Como hemos visto, los rayos Láser que son generados en la fuente Láser se transportan al lugar de trabajo por espejos (siempre en el caso del  $\text{CO}_2$ ) o por fibra óptica.

El sistema de focalización (cabezal) para el corte tiene algunas particularidades que vamos a describir en los próximos parágrafos.

### 6.2 SISTEMAS LÁSER PARA EL CORTE DE CHAPAS

Los sistemas de elaboración por corte Láser necesitan de algunas características específicas del proceso:

- Un cabezal para el corte Láser.
- Un gas de asistencia adecuado al material cortado.
- Estrategias para el corte de geometrías complicadas.

Los principales parámetros del proceso de corte Láser que es necesario considerar son:

- Potencia y densidad de potencia.
- Posición del diámetro de focalización con respecto de la superficie de la chapa.

- Velocidad de proceso de corte.
- Caudal, presión y pureza del gas de asistencia.

Además:

- Diámetro y posición de la tobera para el gas de asistencia.

### El cabezal de corte

La cabeza de corte incluye el sistema de focalización (la lente), la tobera del gas de asistencia en la cabeza de corte, la tobera de emisión del gas de asistencia en presión coaxial con la dirección de propagación de los rayos Láser (Fig. 6.2).

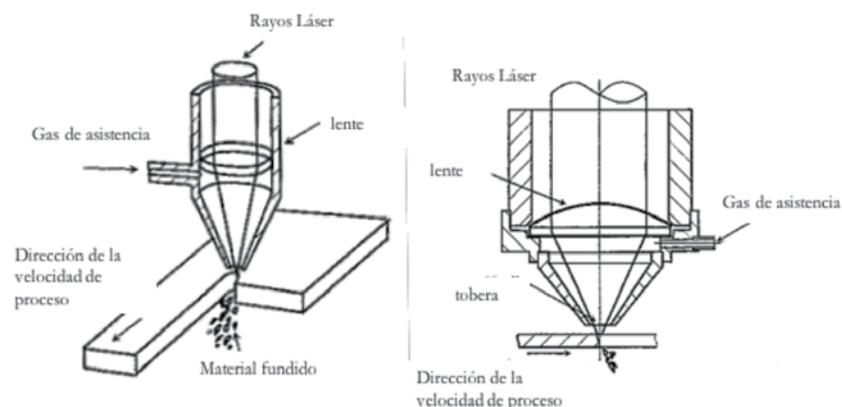


Fig. 6.2: Cabeza de corte Láser: en evidencia lente de focalización y recorrido del gas de asistencia.

### Las funciones del gas de asistencia

El gas de asistencia está a presión porque debe llevar el material fundido fuera del surco de corte a través de la fuerza que va a ejercitar.

El gas de asistencia puede ser típicamente solo aire porque es el gas más barato. En este caso, tiene también una reacción oxidativa y participa en el proceso térmico con un aporte de energía que se agrega a la energía absorbida por los rayos Láser.

Para algunos materiales (por ejemplo las aleaciones ligeras) es necesario evitar el Oxígeno porque produce una reacción muy violenta con generación de calor que no puede ser controlada y, por lo tanto, se utilizan preferentemente Argón o Nitrógeno. Al revés, es también posible utilizar solo Oxígeno cuando la reacción oxidativa contribuye al balance energético del proceso, pero sin causar problemas para la calidad del corte.

El balance de energía (ecuaciones 6.1) puede dar algunas indicaciones útiles para planear el proceso de corte cuando se conocen las propiedades del material que se va a cortar.

$$A * P = w * h * V * \rho * (C_p * \Delta T + L_f + m' * L_v) \quad (6.1)$$

Donde: **A**: absorción; **P**: potencia láser; **w**: anchura del surco de corte; **h**: espesor del material; **V**: velocidad de proceso;  **$\rho$** : densidad;  **$C_p$** : capacidad térmica;  **$\Delta T$** : intervalo de temperatura hasta la fusión;  **$L_f$** : calor de fusión;  **$m'$** : masa que se va a vaporizar;  **$L_v$** : calor de vaporización.

Se puede escribir también como en la ecuación 6.2, donde a la derecha hay todas constantes del material cortado:

$$\frac{P}{h * V} = \frac{w * \rho}{A} * (C_p * \Delta t + L_f + m' * L_v) \quad (6.2)$$

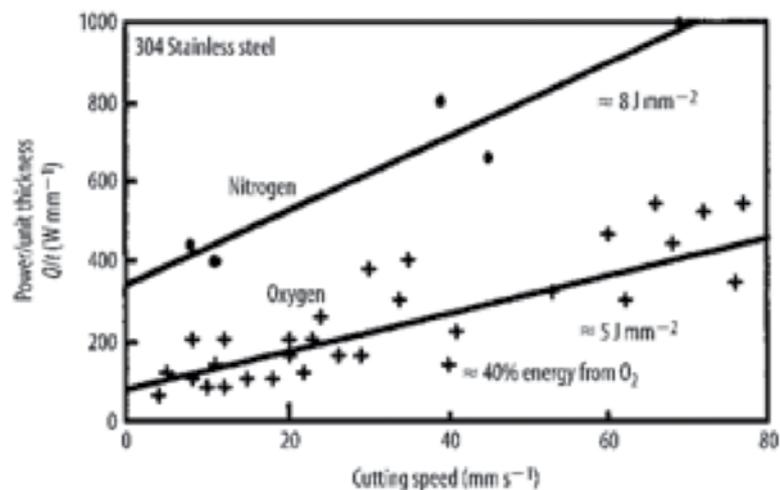


Fig. 6.3: Relación entre velocidad de proceso y potencia Láser dividida por el espesor de la chapa.

Como se puede obtener, la potencia Láser dividida por el espesor de corte tiene una relación lineal con la velocidad del proceso (ecuación 6.3 y Fig. 6.3).

$$\frac{P}{h * V} = f(\text{material}) [J/m^2] \quad (6.3)$$

### 6.3 LA CALIDAD DEL CORTE LÁSER

La calidad del corte se mide directamente por algunas características geométricas del surco de corte. En la Fig. 6.4 los parámetros característicos de la geometría del surco de corte están descritos: la anchura, "w", y la inclinación de la pared lateral del corte, por la medida de "u".

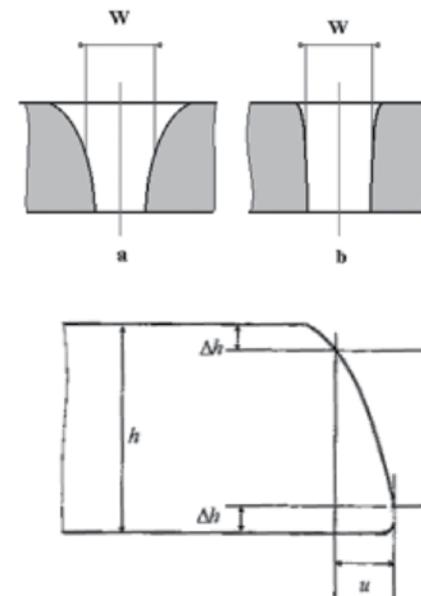


Fig. 6.4: Geometría del surco de corte.

Se mide "u" en la Fig. 6.4 para clasificar el corte:

- Corte muy bueno (Campo 1) cuando:  $0 < u < 0.05 + 0.0025 * h$
- Corte bueno (Campo 2) cuando:  $0.05 + 0.0025 * h < u < 0.1 + 0.015 * h$
- Corte malo (Campo 3) cuando:  $0.1 + 0.015 * h < u < 0.25 + 0.025 * h$
- Corte muy malo (Campo 4) cuando:  $u > 0.25 + 0.025 * h$

Donde: **w**: anchura del surco de corte; **h**: espesor del material;  **$\Delta h$** : medida de referencia; **u**: parámetro de la calidad del corte.

Además, se ponen:

- $\Delta h = 0.1 * h$  cuando  $h < 2$  mm
- $\Delta h = 0.2 * h$  cuando  $h > 2$  mm

La calidad del corte Láser se ve afectada también, por algunos defectos que pueden ocurrir. Los más comunes son (Fig. 6.5):

- Adhesiones o rebabas.
- Zonas Térmicamente Alteradas (ZTAs).
- Estrías.

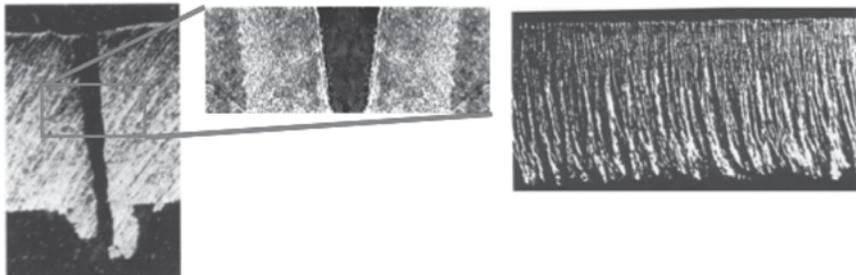


Fig. 6.5: Surco de corte en sección con rebabas (izquierda). Zona Térmicamente Alterada (centro). Estrías (derecha).

Adhesiones o rebabas se presentan en el borde inferior del surco de corte. Es el resultado de una porción del material líquido, que se solidifica antes de salir del borde inferior del surco de corte (Fig. 6.5 a la izquierda).

La Zona Térmicamente Alterada es una región del material cerca del surco de corte. Las temperaturas del proceso alrededor de la temperatura de fusión del material cortado modifican la estructura del material (Fig. 6.5 al centro).

La forma de las estrías es característica y se presentan como pequeños defectos de las paredes laterales del surco de corte (Fig. 6.5 a la derecha). Las estrías constituyen el defecto más difícil de comprender. Existen algunas teorías pero ninguna está establecida. Algunos investigadores propusieron diferentes teorías por la observación de la geometría de las estrías en diferentes condiciones de proceso (por ejemplo: Fig. 6.6 y Fig. 6.7).

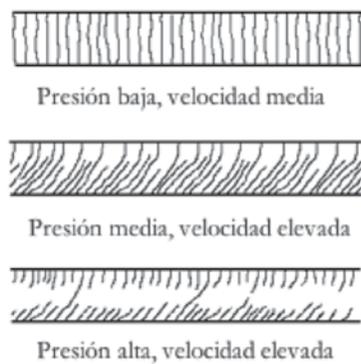


Fig. 6.6: La forma de las estrías es diferente y depende de los parámetros del proceso

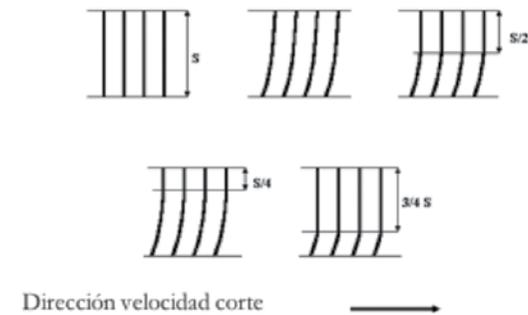


Fig. 6.7: Algunos investigadores ponen la atención sobre el hecho que tal vez las estrías tienen dos direcciones

### Estrategias de corte: cortar aristas, punto inicial y punto final del recorrido

El corte con el láser debe tener en consideración algunos puntos importantes para evitar geometrías incorrectas. En particular, las aristas son críticas y, por lo tanto, son necesarias algunas estrategias al planear el recorrido de los rayos láser (Fig. 6.8). En la misma manera, es necesario hacer una elección de los puntos iniciales y finales cuando se deben realizar recorridos cerrados (Fig. 6.9).

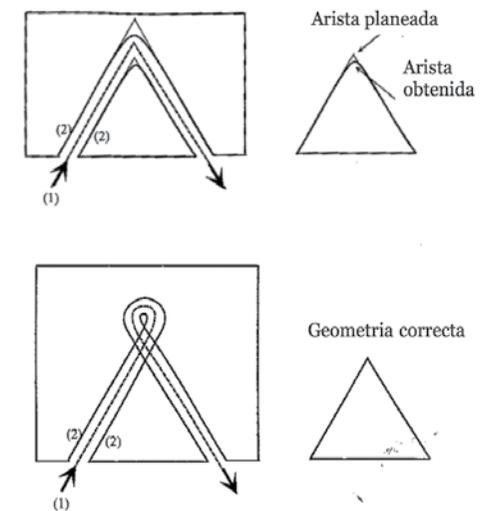


Fig. 6.8: Las aristas demandan una estrategia específica para evitar geometrías erróneas.

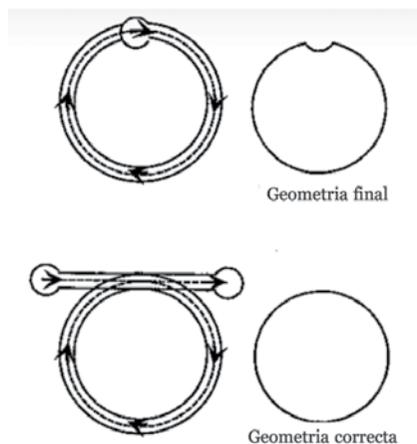


Fig. 6.9: Punto inicial y punto final deben estar fuera de la geometría planeada.

#### 6.4 ÁREA DE FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE CORTE LÁSER

La investigación para encontrar el área de factibilidad del corte Láser debe tener en cuenta los principales parámetros del proceso, por ejemplo, la velocidad y la presión del gas de asistencia. Un posible resultado está en la Fig. 6.10, que presenta unos resultados experimentales.

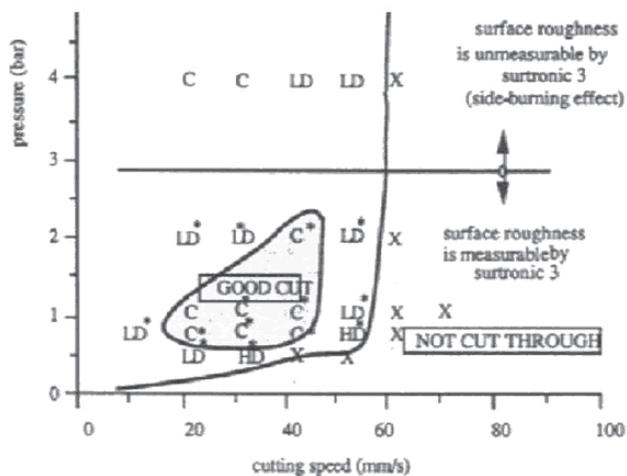


Fig. 6.10: Área de factibilidad del proceso de corte Láser

En donde:

**C:** el material fue cortado con buena calidad del corte.

**LD:** el material fue cortado pero la calidad no fue buena por la rebaba (*Light Dross*).

**HD:** el material fue cortado pero la calidad no fue buena por la demasiada cantidad de rebaba (*High Dross*).

**X:** el material no fue cortado

Este resultado experimental requiere unas aclaraciones.

#### Un modelo del corte Láser

Existen muchos modelos matemáticos para investigar el proceso de corte Láser. Aquí está descrito un modelo analítico que se basa sobre tres balances: uno de energía, el segundo de masa y el tercero de fuerza. Los resultados son:

- **La geometría del surco de corte** (Fig. 6.11).
- **El espesor del material líquido** entre el surco de corte, **su velocidad y su temperatura.**

A través del modelo matemático, se pueden observar diferentes aspectos:

- Los espesores del material líquido tienen una geometría que depende de la forma del surco de corte: en la superficie superior el espesor está delgado y va aumentando por abajo; los espesores máximos del líquido están en correspondencia de la superficie inferior de la chapa (Fig. 6.12). Además, cuando la velocidad de proceso aumenta puede ocurrir que los flujos del material líquido que provienen de ambas paredes se van a encontrar antes de la salida del surco de corte, cuyo fenómeno lo denominamos: oclusión u obstrucción porque la salida del líquido del surco de corte está ocluida. Como vamos a ver en seguida, en este fenómeno está la base para entender el mecanismo de formación de la rebaba.

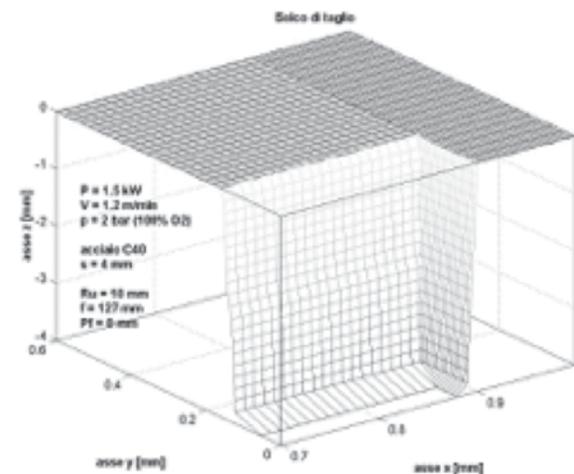


Fig. 6.11: Geometría del surco de corte por modelación matemática

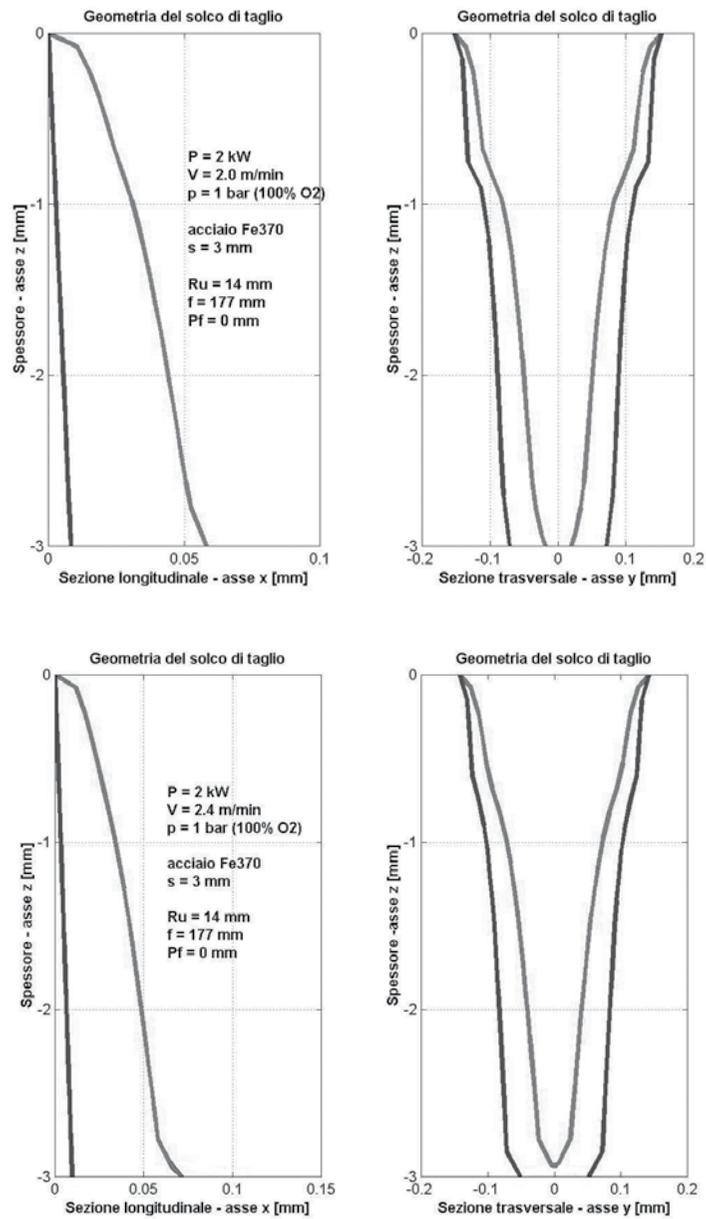


Fig. 6.12: Esquema del surco de corte: sección transversal (derecha sobre e bajo) y sección longitudinal (izquierda sobre e bajo). Baja velocidad de proceso (sobre). Alta velocidad de proceso (bajo).

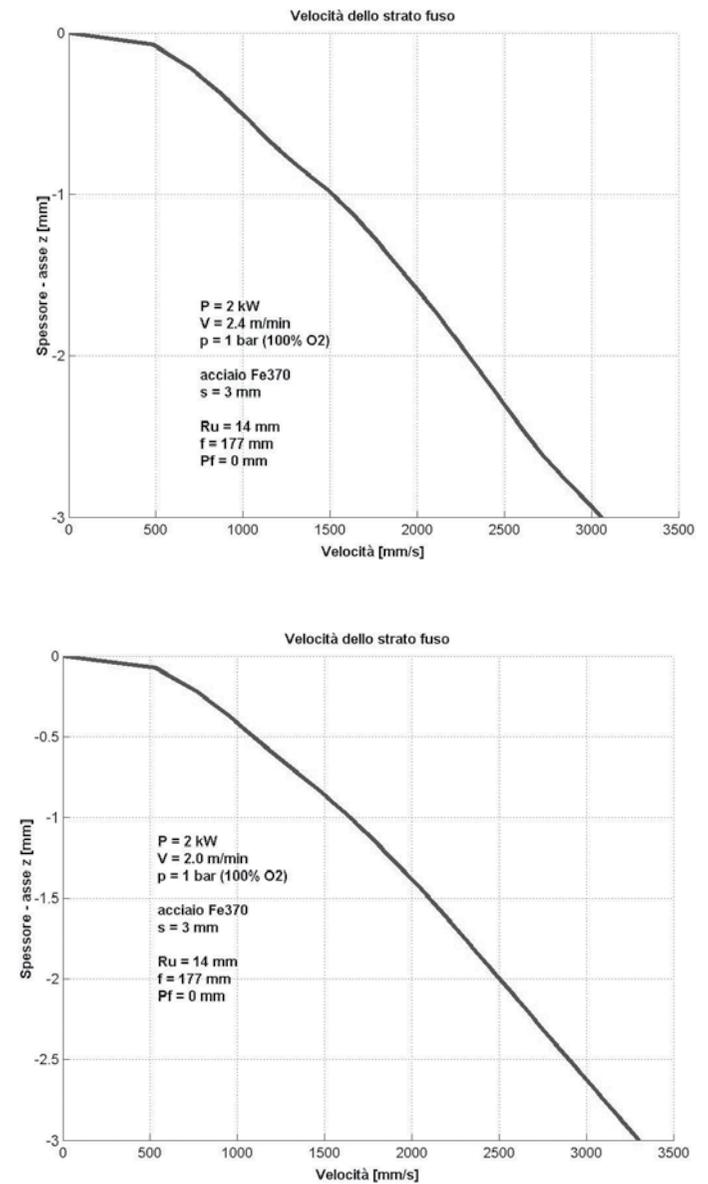


Fig. 6.13: Velocidad del material líquido entre el surco de corte. Baja velocidad de proceso (sobre). Alta velocidad de proceso (bajo).

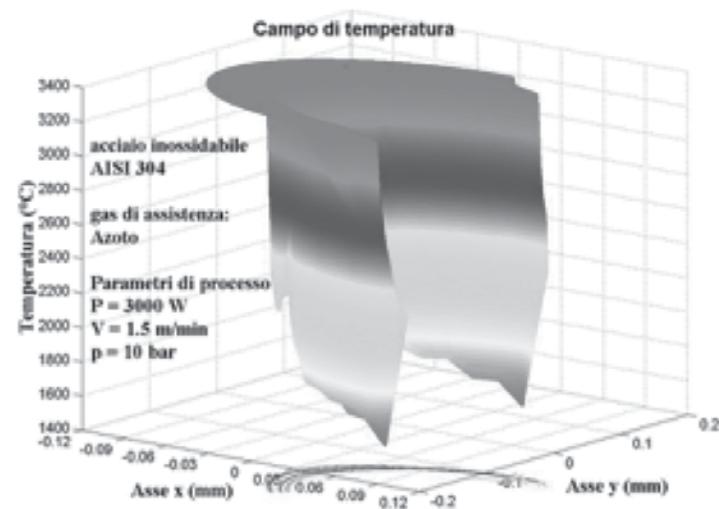
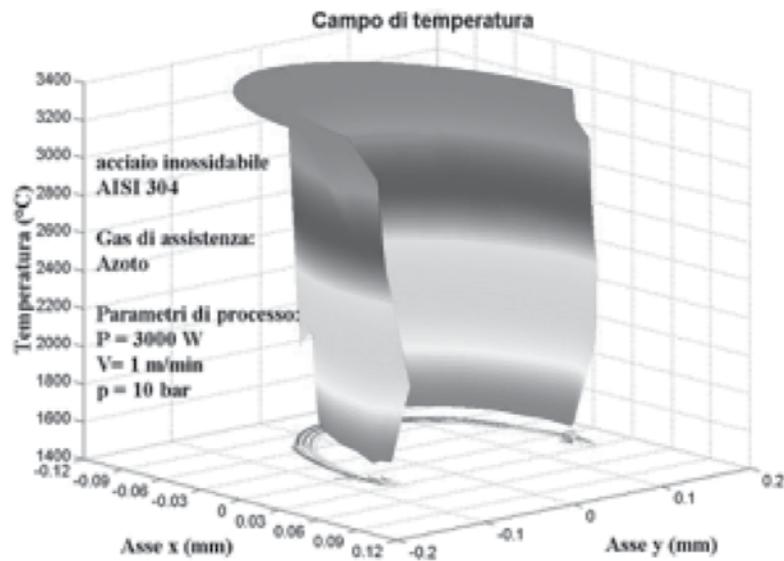


Fig. 6.14: Temperatura del material líquido entre el surco de corte. Baja velocidad de proceso (sobre). Alta velocidad de proceso (bajo).

Por medio del modelo matemático fue posible individualizar dos mecanismos que determinan los bordes del área de factibilidad del proceso de corte Láser y son responsables de la formación de rebabas:

### Primer mecanismo de formación de la rebaba

Fue posible investigar el primer mecanismo que causa la formación de escoria: el borde azul en la Fig. 6.15 depende de la velocidad de salida del material líquido del surco de corte. El material debe salir a través del borde inferior pero cuando la velocidad del material líquido es más baja que 2500 mm/s, la adhesión del líquido al sólido es tan fuerte por la viscosidad que no se puede evitar la formación de rebaba por re-solidificación.

El defecto depende, por lo tanto, de la **velocidad del material líquido** que tiene un valor constante y crítico. El material no va a salir completamente del borde inferior del surco de corte cuando la velocidad de salida del líquido sea inferior al valor crítico.

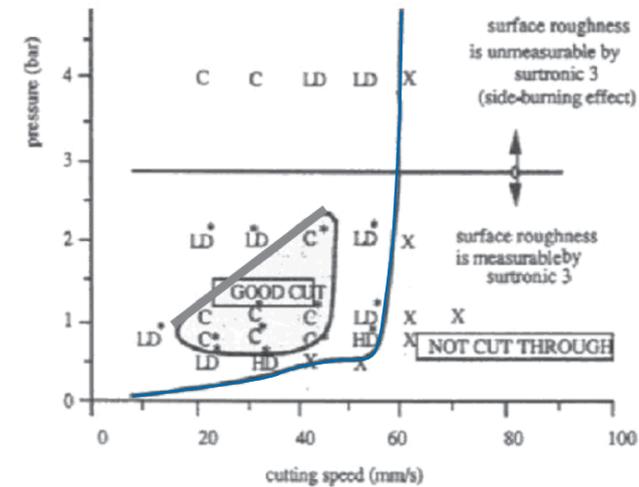


Fig. 6.15: Primer mecanismo de formación de la rebaba: velocidad de salida del surco de corte demasiado baja.

### Segundo mecanismo de formación de la rebaba

El espesor del material líquido entre el surco de corte depende de los parámetros del proceso (Fig. 6.12). Cuando la velocidad de proceso es muy alta en comparación a la potencia absorbida, el espesor del líquido aumenta y va a ocluir el surco de corte cuando hay espesores del líquido mayores a la anchura del surco de corte; por consecuencia, la salida del líquido del surco de corte está obstruida. Algunas porciones del material líquido no pueden salir con una velocidad bastante alta del surco de corte para separarse del material sólido y van a solidificarse en el borde inferior (formación de rebaba).

La porción del material líquido aumenta cuando aumenta la velocidad del proceso. Cuando a través del modelo matemático los espesores del material líquido entre el surco de corte suben más de lo consentido por la dimensión de la geometría, ocurre una oclusión y, por lo tanto, se forma la rebaba.

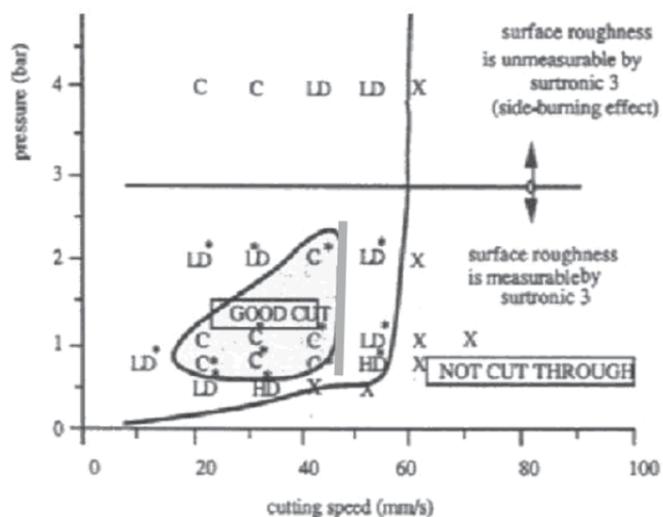


Fig. 6.16: Segundo mecanismo de formación de la rebaba: fenómeno de la oclusión

### Sumario sobre el área de factibilidad y las razones de los defectos

En conclusión, podemos decir que el área de factibilidad del proceso de corte Láser está en relación con el flujo de material líquido que va a salir del surco de corte. Dos diferentes mecanismos fueron identificados para explicar la formación de la rebaba:

- El primer mecanismo depende de la **velocidad del material líquido**. La formación del defecto **depende de la presión del gas de asistencia y de la velocidad del proceso, con una ley de relación lineal**.
- El segundo mecanismo depende de la **oclusión** del surco de corte por el espesor del material líquido. Este defecto **depende de la velocidad pero no depende de la presión del gas de asistencia**. Cada valor de la presión de asistencia produce el mismo efecto.

### 6.5 COMPARACIÓN CON OTROS PROCESOS DE CORTE

En general, las ventajas de la tecnología Láser, en comparación con otros procesos de corte de chapas, son:

- La calidad del surco de corte es muy alta cuando los espesores son inferiores a 20 mm.
- Se puede realizar un surco de corte estrecho.
- El Láser no se va a desgastar.
- El recorrido puede ser planeado rápidamente y, además, el mismo recorrido tiene alta flexibilidad porque va a actuar de acuerdo con el control numérico (CNC) que es el control de la máquina que va a guiar el rayo láser.

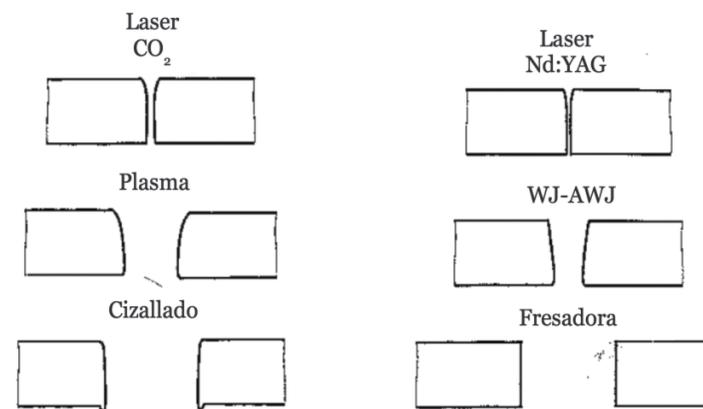


Fig. 6.17: Comparación entre los surcos de corte de diferentes tecnologías

## 7. APLICACIONES LÁSER: LA SOLDADURA CON LA RADIACIÓN LÁSER

El Láser constituye la tecnología más difundida para el corte desde los años '90. En el caso de la soldadura con fuentes Láser, si bien es ahora un proceso bastante conocido, la investigación científica sigue para aclarar algunos fenómenos en relación con la calidad del proceso. La soldadura constituye un proceso muy importante que pide elevado conocimiento, tiene muchos aspectos críticos y hay otras tecnologías con alta eficiencia por las cuales la tecnología Láser se difunde con una velocidad inferior. Con el desarrollo de las últimas fuentes con alta eficiencia, el Láser está empezando a imponerse en este ámbito también.

Diferentes procesos de soldadura son posibles:

- La soldadura Láser con elevada precisión o por conducción (*Conduction Welding*).
- La soldadura Láser con elevada profundidad de penetración (*Keyhole Welding*).
- *El Remote Welding*.
- La soldadura híbrida Láser-GMA (*Gas Metal Arc*).
- La soldadura de materiales disímiles asistida por el Láser.
- La soldadura con latón (aleaciones de cobre y zinc) asistida por el Láser.

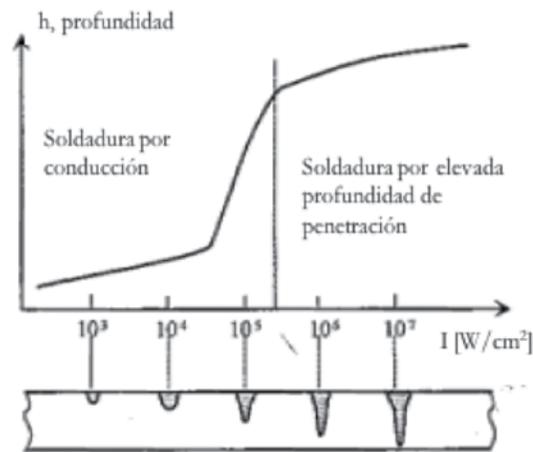


Fig. 7.1: Formas de costuras dependientes de las diferentes densidades de potencia.

### Elevada profundidad de penetración o elevada precisión

El único parámetro de proceso que gobierna la transición desde la soldadura por conducción (*Conduction Welding*) hasta la soldadura por elevada profundidad de penetración (*Keyhole Welding*) es la irradiación,  $I$ , o la densidad de potencia.

En el gráfico de la Fig. 7.1, hay una representación de este hecho donde la región de transición se coloca para una irradiación entre  $10^5$  y  $10^6$   $W/cm^2$ .

### Características de la soldadura de elevada precisión o por conducción

Las características de la soldadura por conducción son:

- La primera es una condición de tipo geométrica (ecuación 7.1 y Fig. 7.2): la altura ( $h$ ) del cordón de soldadura tiene la misma dimensión del ancho ( $w$ ):

$$h/w = 1 \quad (7.1)$$

- La segunda condición es la siguiente: la vaporización del material es insignificante.

La energía viene absorbida en la superficie del material, para luego ser transmitida por conducción hacia el interior del material. Como analogía, se puede pensar una fuente de calor en la superficie exterior que transmite calor al interior del material.

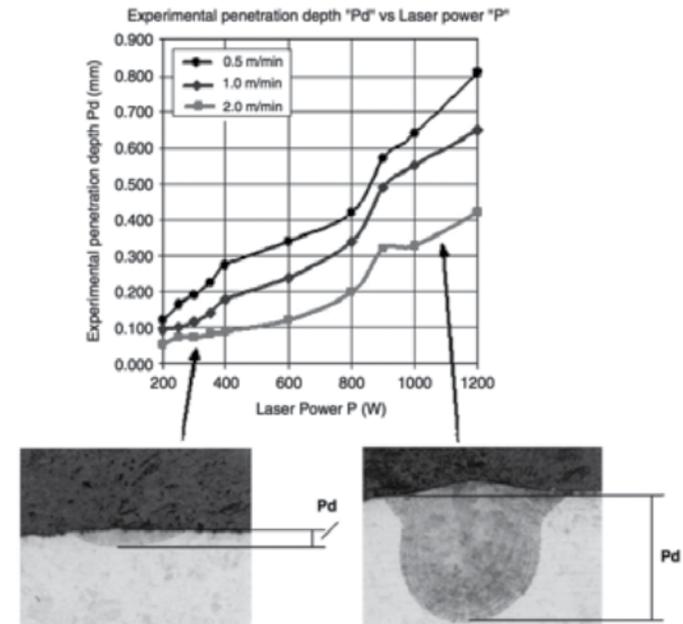


Fig. 7.2: Conformación del cordón de soldadura por conducción

## Características de la soldadura de elevada profundidad de penetración

Las características de la soldadura por elevada profundidad de penetración son:

- La primera es una condición de tipo geométrica (ecuación 7.2 y Fig. 7.3), esta es, que la altura (h) del cordón de soldadura es mucho mayor que el ancho (w): puede ser más de ocho hasta diez veces la altura!

$$h/w > 8-10 \quad (7.2)$$

- El cordón de soldadura visto en corte tiene una forma característica que se asemeja un **clavo**: la cabeza de la sección es ancha y la porción restante tiene una forma delgada (Fig. 7.3).
- La alta energía transmitida por los rayos Láser produce una forma característica del baño de fusión que parece también una cerradura (*keyhole*, Fig. 7.4 a la derecha). Esta forma se obtiene porque **una porción relevante del material se vaporiza**.

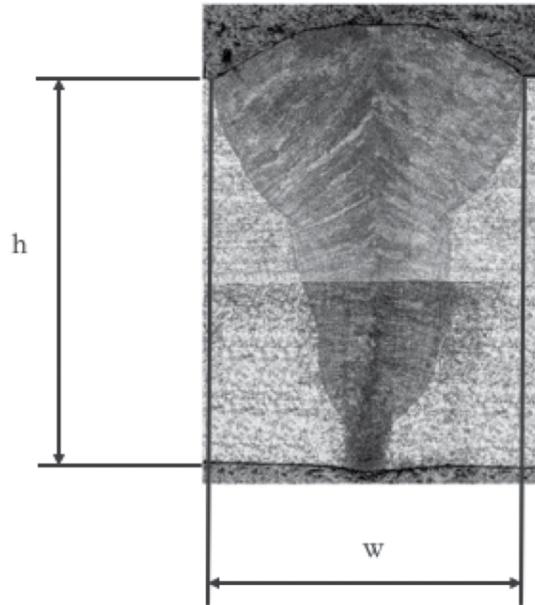


Fig. 7.3: Geometría característica de la soldadura de elevada profundidad de penetración

La soldadura con elevada profundidad de penetración es muy importante porque es única en el panorama de los procesos de soldadura y no se puede obtener por ningún otro proceso convencional.

En la Fig. 7.4, se muestra la comparación de las soldaduras que se pueden conseguir manejando la densidad de potencia del proceso.

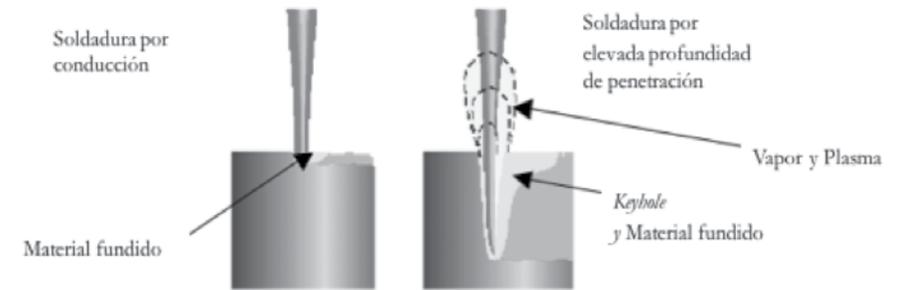


Fig. 7.4: Comparación entre las características de la soldadura de conducción y de elevada profundidad de penetración

## 7.1 COMPARACIÓN CON OTRAS TECNOLOGÍAS DE SOLDADURA

Las actuales fuentes Láser tienen alta energía y densidad de potencia. La interacción con los materiales metálicos produce una costura delgada y elevadas penetraciones (soldadura por elevada profundidad de penetración). En este caso, la soldadura ocurre con un mecanismo llamado *keyhole*.

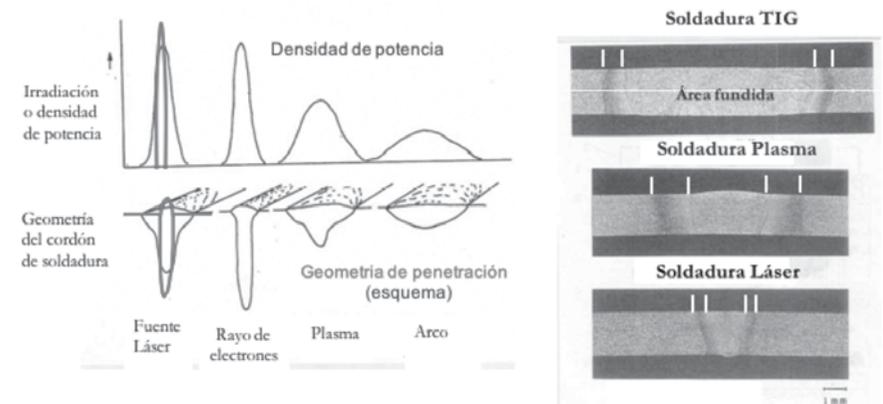


Fig. 7.5: Comparación entre diferentes procesos de soldadura

Un área fundida y térmicamente alterada más estrecha caracteriza la soldadura por Láser en comparación con la soldadura por Arco y la soldadura por Plasma (Fig. 7.5). La soldadura por rayos de electrones produce una geometría comparable con la soldadura por Láser, aunque tiene una complicación adicional por cuanto requiere de vacío.

Por último, un área fundida y térmicamente alterada estrecha, significa también un nivel pequeño de deformaciones.

## 7.2 LOS PRINCIPALES DEFECTOS EN LA SOLDADURA

Es necesario conocer las posibilidades que cada proceso ofrece a través del control de los parámetros operativos que van a definir la calidad del cordón de soldadura.

Por lo tanto, la soldadura en general, y el cordón de soldadura en particular, pueden presentar diferentes defectos:

- **Metalúrgicos** (dimensión del grano del cristal, inclusiones no metálicas, porosidades).
- **Geométricos** (protuberancias, socavaduras *-undercut-* y coladuras), Fig. 7.6.
- **Tensión y deformación residual** por la contracción de solidificación.



Fig. 7.6: Defectos en la soldadura Láser: la protuberancia (izquierda); las socavaduras- *undercut* - (centro), la coladura (derecha).

Cada defecto, con un poco de experiencia, puede ser conectado con los parámetros de proceso.

## 7.3 PLANEAR UNA SOLDADURA CON EL LÁSER

Hay importantes diferencias entre la soldadura con fuentes térmicas a arco tradicionales (*GMAW*) y Láser, que son los siguientes:

### Con los procesos *GMAW*:

- Utilizan un material de aporte.
- La soldadura tradicional necesita de un achaflanado y los bordes pueden ser juntas con poca precisión.
- Es necesario un gas de asistencia que sirve para proteger el baño de fusión y también, generalmente, debe facilitar la formación del arco eléctrico (**facilitar la formación de plasma**).

### Con la soldadura por Láser:

- No utiliza, generalmente, un material de aporte.
- La soldadura Láser si bien no requiere de bordes achaflanados, si juntas más precisas.
- Es necesario un gas de asistencia que sirve para proteger el baño de fusión y también ayude a **evitar la formación de plasma**.

Las diferencias son tan grandes que el diseño de una soldadura tradicional debe ser modificada cuando se pide utilizar una fuente térmica Láser y viceversa. Es importante enfatizar los siguientes aspectos:

- **Nota 1:** Planear y proyectar una soldadura Láser significa conocer el proceso para hacer un diseño adecuado: las piezas deben poseer juntas con precisión, sin espacio entre ellas y sin achaflanado, por ejemplo.
- **Nota 2:** Cambiar una soldadura tradicional por una con Láser significa que es necesario siempre cambiar el diseño! Las diferencias entre los procesos de soldadura a arco y Láser son tan grandes que no se puede mantener el mismo diseño.

## 7.4 LOS PARÁMETROS DE PROCESO POR LA SOLDADURA LÁSER

Los parámetros de proceso que requieren un control son numerosos:

- La fuente térmica misma constituye el primer parámetro de proceso, el más importante: fuentes en estado gaseoso ( $\text{CO}_2$ ), en estado sólido (Nd:YAG) o Láser generados en fibra, significan diferentes longitud de onda.

Además:

- Potencia, irradiación o densidad de potencia y velocidad de proceso.
- El efecto del funcionamiento en régimen continuo y pulsado.
- Parámetros del recorrido óptico (diámetro y distancia de focalización, posición del foco).
- Gases de asistencia por protección del baño de fusión (Helio, Argón o Nitrógeno).
- Material o los materiales posibles de ser soldados.
- La geometría de las piezas.
- Cuando sea necesario, el material de aporte.

Vamos a comentar algunos de los parámetros mencionados:

## Funcionamiento en régimen continuo y pulsado

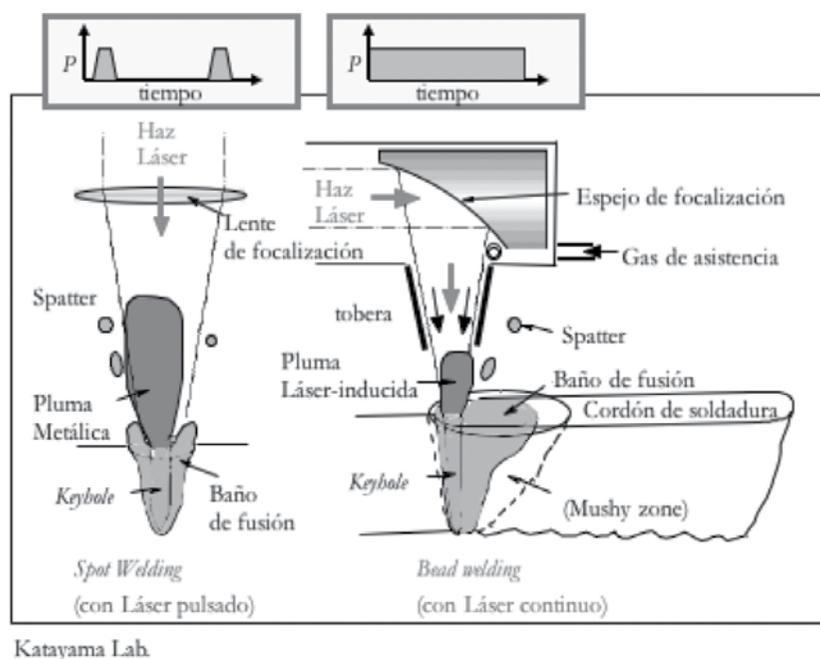


Fig. 7.7: Esquema para explicar las principales diferencias entre el funcionamiento continuo (derecha) y pulsado (izquierda)

El funcionamiento en régimen continuo, típico con el Láser a  $\text{CO}_2$ , utiliza espejos porque la lente de focalización no puede soportar el estrés térmico de las altas potencias necesarias para la soldadura de elevada profundidad. Hoy en día, en la industria se utilizan potencias de hasta 6 kW. Por el hecho que cada kW puede penetrar hasta 1.5 mm de espesor de chapa, se pueden soldar chapas de hasta 9 mm de espesor. La penetración de la energía hacia el interior del material está reducida por la presencia de una pluma de plasma inducida por el Láser (ver Fig. 7.8), que absorbe una porción bastante alta de la energía que impacta la superficie de la chapa.

El funcionamiento en régimen pulsado, típico para el Láser a Nd:YAG, utiliza lente de focalización porque por la pulsación el estrés térmico de la lente es más bajo y puede ser soportado.

En las próximas páginas, vamos a describir con más detalles las diferencias que existen entre la soldadura por fuentes en el estado gaseoso y sólido.

## Soldadura con Fuentes en estado gaseoso ( $\text{CO}_2$ )

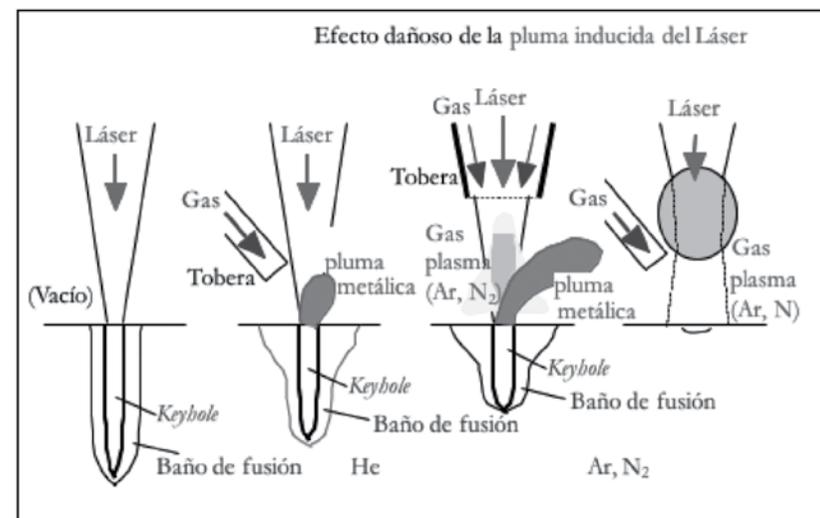


Fig. 7.8: Esquema para explicar el efecto de la pluma de plasma inducida por el Láser

Como ya fue dicho anteriormente, la interacción del Láser en el estado sólido con el material produce, absorción mediante de la energía, una fusión y vaporización.

Las temperaturas del vapor son tan altas que se produce, también, un **plasma metálico** que parece una pluma, y se ubica en correspondencia de la superficie superior de la chapa. Se dice que esta pluma "es inducida por la interacción con el Láser".

En el vacío el plasma no puede formarse (Fig. 7.8, a la izquierda).

En las aplicaciones industriales, no se puede soldar en el vacío y se deben utilizar gases de asistencia para proteger el baño de fusión. Estos gases van a interactuar con el Láser y absorben energía del proceso directamente, y además se produce un **plasma gaseoso** (Fig. 7.8) que tiene un efecto dañino en la absorción de energía de proceso.

### El efecto del gas de asistencia (ejemplo de las aleaciones de aluminio)

Hay diferentes gases que se utilizan para la protección del baño de fusión (Fig. 7.9):

- El Helio no interacciona con el Láser a  $\text{CO}_2$  y el plasma es una pluma metálica que sale del *keyhole*. Por el tema del costo, el Helio se utiliza raramente.
- El Argón presenta la más elevada absorción de la energía de los rayos Láser (o la más baja energía de primera ionización) y va a interactuar con la formación de una pluma muy larga de plasma inducido por la interacción con el Láser.
- El Nitrógeno se pone en el medio.



- El Nitrógeno produce un cordón de soldadura sin porosidades pero la profundidad de soldadura es más baja (Fig. 7.12).

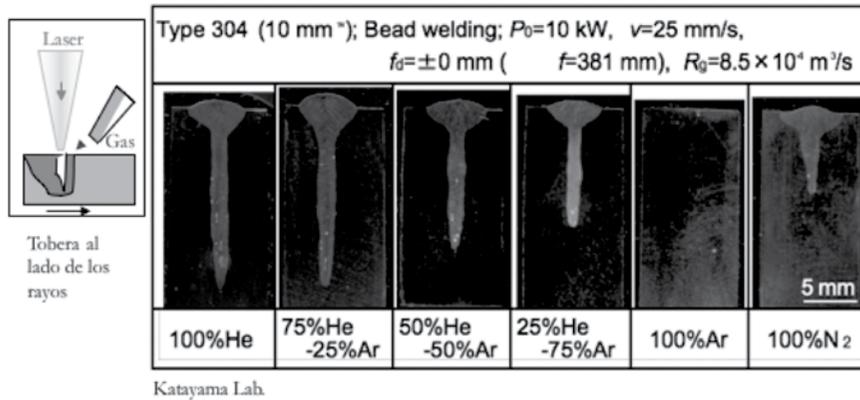


Fig. 7.12: El efecto del gas de asistencia con la geometría del cordón de soldadura (acero inoxidable)

#### Fuentes en estado sólido (Yb:vidrio fibra)

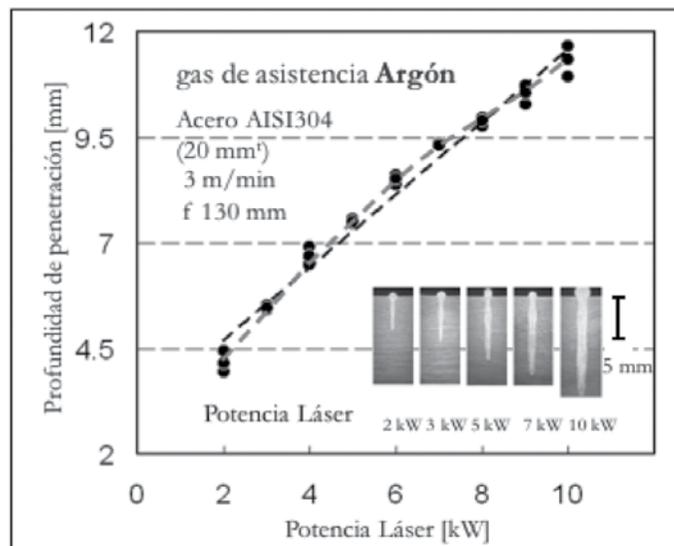


Fig. 7.13: La profundidad de penetración en el caso del Láser en estado sólido Yb:vidrio en fibra (acero inoxidable)

En el caso de las fuentes Láser en estado sólido Yb:vidrio en fibra, para la menor longitud de onda (1.03μm) en comparación con el Láser a CO<sub>2</sub> (10.6μm), el efecto del plasma inducido por el Láser es muy limitado. La penetración aumenta con la potencia Láser a través de una ley lineal, y por lo tanto, el efecto del plasma, que típicamente aumenta con el incremento de la potencia, es muy pequeño.

#### 7.5 ALGUNOS DETALLES MÁS Y UN SUMARIO SOBRE LOS MECANISMOS DE SOLDADURA

Se reportan algunos puntos importantes sobre los mecanismos de soldadura:

- La pluma metálica y el plasma del gas de asistencia inducido por el Láser interactúan con el rayo Láser.
- La pluma metálica y el plasma del gas de asistencia inducido por el Láser absorben directamente energía del proceso (absorción directa) y, también, contribuyen a una dispersión por refracción, porque tienen un índice de refracción diferente del aire. Por lo tanto, producen una reducción de la eficiencia del proceso.

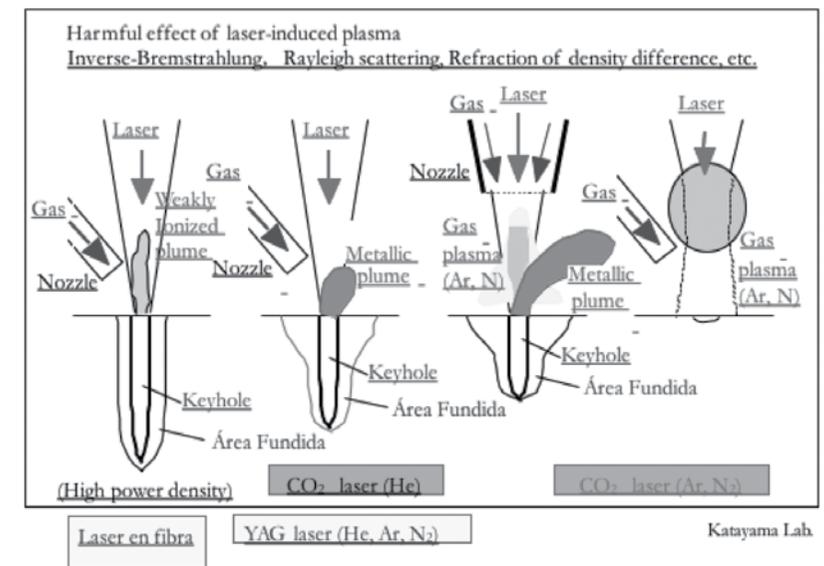


Fig. 7.14: Esquema y sumario de los mecanismos de soldadura

- Fuentes Láser Nd:YAG y Yb:vidrio en fibra (fuentes en estado sólido), generan rayos electromagnéticos con longitud de onda que producen una baja interacción con los gases de asistencia y, por lo tanto, una eficiencia bastante alta para el proceso de soldadura (Fig. 7.14).

- Fuentes Láser a CO<sub>2</sub> (en estado gaseoso) generan rayos electromagnéticos con longitud de onda más elevada, que producen una alta interacción con los gases de asistencia, reduciendo la eficiencia del proceso de soldadura (Fig. 7.14).

### Absorción y posición del *keyhole*: efecto de la velocidad de proceso

Cuando la velocidad de soldadura aumenta se observan dos fenómenos: la absorción baja (la energía absorbida baja) y la posición del spot Láser con el área del *keyhole* cambia. En la Fig. 7.15a y 7.15b se presentan los datos experimentales. La absorción es muy alta en la soldadura por *keyhole*, porque los rayos Láseres se reflejan muchas veces en el estrecho canal y se puede pensar que la absorción misma sea en relación con la posición del spot Láser.

Potencia Láser: 10 kW, diámetro Láser: 200 mm, Gas de asistencia: Argón 40 l/min

Velocidad de soldadura	2 m/min	3 m/min	6 m/min	10 m/min	15 m/min
Imagine					
esquema					
Área Láser/ Área <i>keyhole</i>	100%	100%	85%	69%	66%
absorción	84%	84%	79%	74%	68%

Fig. 7.15a: Absorción y posición del *keyhole* y del spot Láser: efecto de la velocidad

Si vamos a considerar una velocidad de proceso baja (Fig. 7.15b a la izquierda), se observa que:

- El haz Láser esta en el centro del área del *keyhole*
- Se generan porosidades por la turbulencia que ocurre en el área fundida, dado que, el *keyhole* tiene una forma demasiado estrecha y larga.

Para una velocidad de proceso alta (Fig. 7.15b a la derecha), se observa que:

- El haz Láser se coloca en frente al área del *keyhole*.
- El flujo del material fundido es estable, sin generaciones de porosidades, pero la profundidad de penetración de la soldadura es un poco más baja.

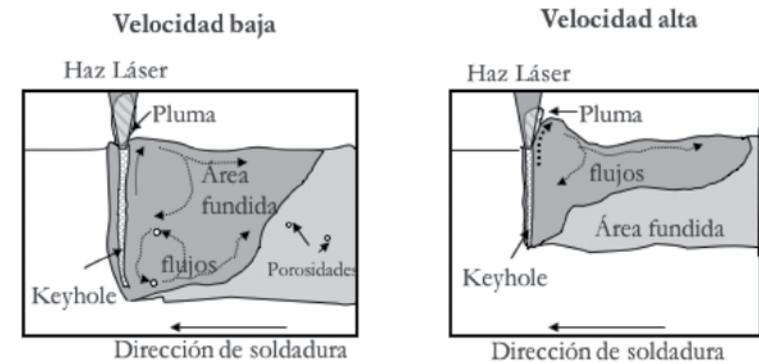


Fig. 7.15b: Posición del *keyhole* y del spot Láser: efecto de la velocidad

### Absorción y *keyhole*: efecto de la densidad de potencia Laser

Velocidad de soldadura: 3 m/min, Diámetro Área Láser: 200 mm, Gas de asistencia: Argón 40 l/min

Potencia	2 kW	4 kW	6 kW	8 kW	10 kW
Imagine					
Esquema					
Diámetro <i>Keyhole</i>	0.42 mm	0.48 mm	0.54 mm	0.58 mm	0.62 mm
Absorción	75%	83%	82%	82%	84%

Katayama Lab.

Fig. 7.15c: Posición del *keyhole* y del spot Láser: efecto de la densidad de potencia

Cuando el área del *keyhole* aumenta por aumentar la potencia Láser, la absorción se incrementa con la potencia Láser y, por lo tanto, se eleva la eficiencia del proceso de soldadura.

### El efecto de la velocidad de proceso sobre la forma de la costura

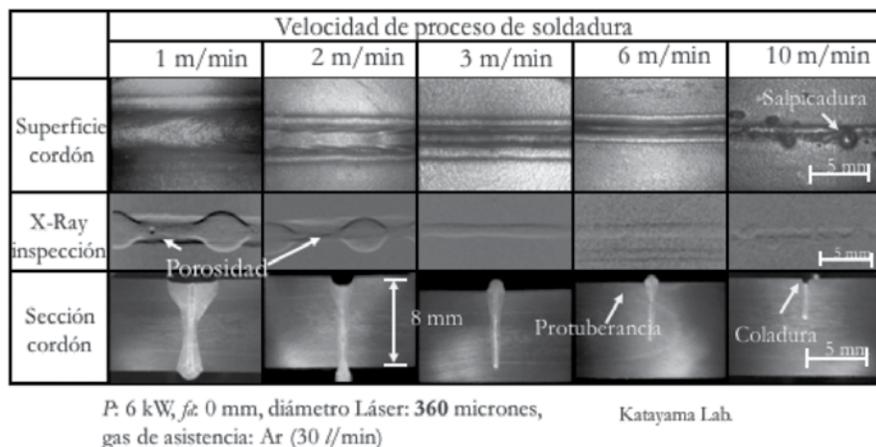


Fig. 7.16a: Efecto de la velocidad del proceso sobre la forma de la costura

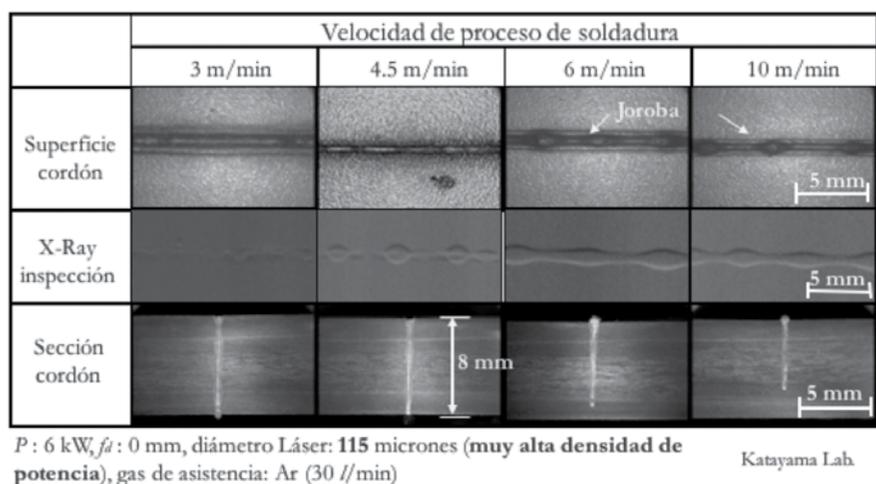


Fig. 7.16b: Efecto de la densidad de potencia y velocidad de proceso sobre la costura

En el caso de un acero inoxidable (AISI 304), se observan los siguientes efectos de la velocidad de soldadura (Fig. 7.16a):

- La penetración completa de una chapa de 8 mm de espesor se consigue cuando hay 6 kW de potencia emitida de la fuente Láser y una velocidad de soldadura inferior a 2 m/min.

- Se consiguen costuras con una penetración profunda y estrecha para velocidades entre 3 ~ 10 m/min, aunque sin penetración completa de la chapa de acero inoxidable.
- Con velocidades superiores a 10 m/min se presentan defectos de coladuras y salpicaduras.

Comparando las Fig. 7.16a y Fig. 7.16b, se observan los efectos de la densidad de potencia y de la velocidad de proceso sobre la costura para un acero inoxidable (AISI 304). La densidad de potencia fue modificada por medio del diámetro de la fibra de transporte utilizada antes el colimador y la focalización: en la Fig. 7.16a se utiliza una fibra de 360µm de diámetro mientras en la Fig. 7.16b el diámetro de la fibra es más pequeño, con una medida de 115µm (se recuerda que la densidad de potencia se calcula dividiendo la potencia por el área del spot Láser). En la Fig. 7.16b hay una muy alta densidad de potencia. En conclusión, se puede opinar:

- La penetración completa de una chapa de 8 mm de espesor se consigue con 6 kW y una velocidad inferior a 4.5 m/min gracias a la alta densidad de potencia.
- Las costuras son estrechas y con penetración profundas (siempre).
- Las costuras presentan jorobas.

### 7.6 SUMARIO SOBRE LA SOLDADURA LÁSER

Como fue visto, algunos parámetros del proceso tienen una marcada importancia sobre la calidad de la soldadura:

- Velocidad de soldadura:** la dimensión del ancho de la costura baja al aumentar la velocidad del proceso. Velocidades demasiado altas producen defectos: salpicaduras, coladuras y socavaduras. Velocidades demasiado bajas producen también defectos: turbulencia del baño de fusión y porosidades.
- Densidad de potencia:** controla la profundidad de la penetración. Cuando la irradiación es demasiado alta, la interacción con el plasma metálico, inducido por el gas de asistencia, produce defectos: salpicaduras y otros.
- El **gas de asistencia** tiene una función fundamental para la protección del baño de fusión, pero influye sobre la absorción de energía y, por lo tanto, en la penetración, a través de la formación de plasma inducido por el Láser.

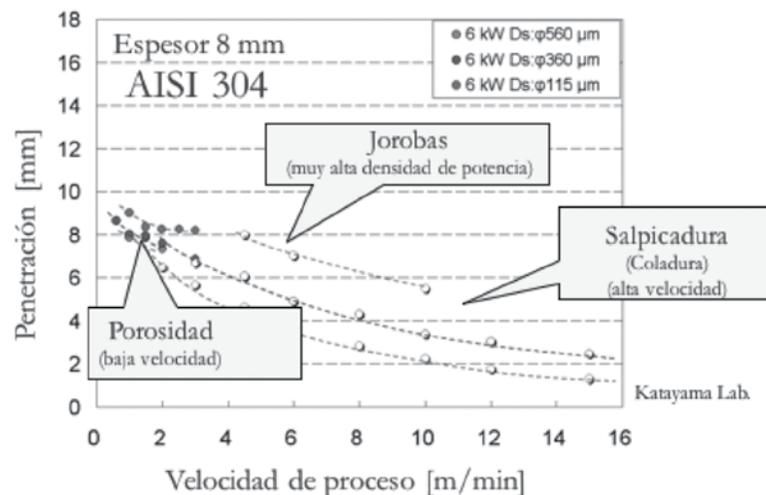


Fig. 7.17a: Una primera área de factibilidad del proceso por velocidad de soldadura y densidad de potencia.

### 7.7 ÁREA DE FACTIBILIDAD DEL PROCESO DE SOLDADURA

El área de factibilidad de un proceso de soldadura Láser de buena calidad tiene una forma característica en función de la densidad de potencia y de la velocidad de proceso: está un área pequeña que tiene un borde para velocidades de soldadura altas, así como un borde también para velocidades de soldadura demasiadas bajas. Entonces, las velocidades admisibles para una buena calidad se reducen al aumentar la densidad de potencia.

En particular (Fig. 7.17b):

- Cuando la velocidad de soldadura es demasiada baja, se consigue el defecto de la coladura.
- Cuando la velocidad de soldadura es demasiada alta, se obtiene el defecto de las incisiones o socavaduras -undercut-.

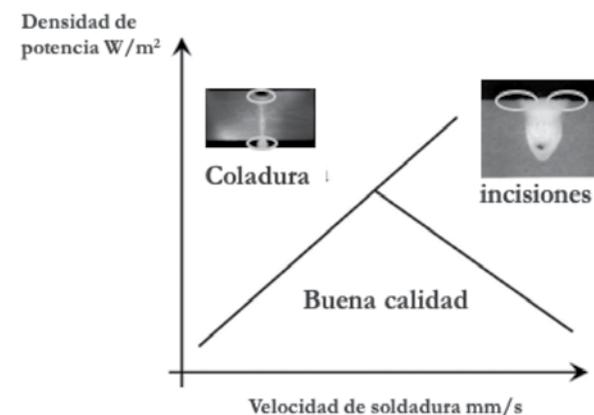


Fig. 7.17b: Área de factibilidad de proceso por velocidad de soldadura y densidad de potencia

### 7.8 REMOTE WELDING

Se llama remote welding a aquel proceso de soldadura láser que emplea una distancia de focalización grande en combinación con sistemas galvanométricos para el posicionado del haz. Este proceso es muy rápido porque se aprovecha de la velocidad de la luz, mientras se van a limitar los movimientos del cabezal de soldadura. Una configuración habitual se observa en las imágenes de la Fig. 7.18.



Fig. 7.18: La soldadura Remote Welding.

### 7.9 SOLDADURA HIBRIDA LÁSER-GMA (GAS METAL ARC).

Una soldadura híbrida utiliza dos fuentes térmicas diferentes en el misma área de trabajo y, entonces, hay una interacción entre las fuentes mismas. Una configuración que

está muy investigada y, ahora es también utilizada, es la soldadura híbrida que emplea un Láser y un arco eléctrico, tal como se ve en el esquema de la Fig. 7.19.



Fig. 7.19: Esquema del proceso de soldadura híbrida Láser-GMA.

La idea consiste en alcanzar una sinergia entre las fuentes térmicas. En este caso, también, disfrutar de sus características muy diferentes: de algún modo, las ventajas de una fuente térmica van a esconder las desventajas de la otra.

**Las ventajas del Láser son:**

- Alta irradiación posible.
- Alta velocidad de proceso.
- Elevada penetración (soldadura por *keyhole*).
- Zona Térmicamente Alterada (ZTA) reducida y minimización de las distorsiones térmicas.

**Las ventajas de la soldadura por arco (GMA):**

- Costo fuente térmica bajo
- Calafateado y empleo de material de aporte que significan: insensibilidad a errores de posición y posibilidad de modificar la metalurgia del baño metálico líquido.

La soldadura híbrida Láser-GMA comparte las ventajas de ambos procesos y, por lo tanto, se consiguen:

- Elevadas velocidad y penetración en comparación a los procesos con arco.
- Insensibilidad a errores de posición de las piezas por el material de aporte del proceso con arco.
- Posibilidad de soldar materiales con baja absorción Láser, cuando el baño de fusión está producido por el arco.

- Posibilidades de modificar el baño de fusión por la utilización de un material de aporte (y soldar materiales disímiles).

El problema consiste en el hecho que desde la unión de dos fuentes térmicas se pueden realizar dos procesos diferentes, que dependen de la elección de la dirección de soldadura. Por ejemplo, en el esquema de la Fig. 7.20, hay un equipo de la soldadura híbrida Láser-TIG.

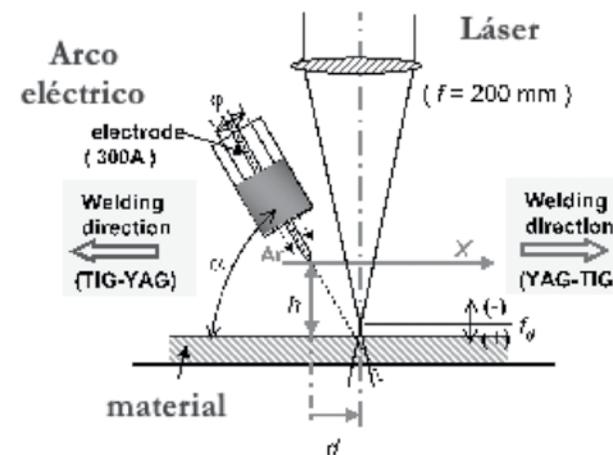


Fig. 7.20: Esquema del proceso de soldadura híbrida Láser Nd:YAG-TIG (Tungsten Inert Gas).

Si el proceso está conducido por el ARCO Eléctrico, se llama: soldadura ARCO Eléctrico-Láser.

Si, al revés, está conducido por el Láser, se llama: **soldadura Láser-ARCO Eléctrico**.

Todos los parámetros de proceso de ambas fuentes térmicas deben ser considerados y, además, hay nuevos parámetros como son la posición del electrodo y del haz Láser.

Las fuentes térmicas producen una sinergia y las profundidades de penetración son más altas que si se sumaran las penetraciones de los procesos de Arco y Láser por separado.

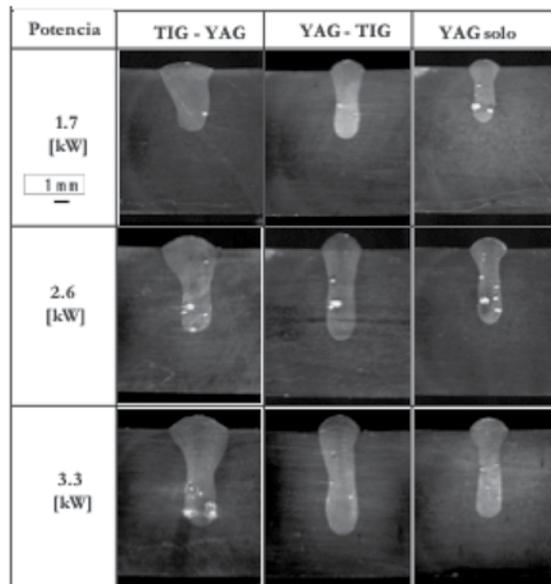


Fig. 7.21: Efecto de sinergia al utilizar en forma conjunta dos fuentes térmicas diferentes

En las Fig. 7.20 y Fig. 7.21, se presentan algunos datos experimentales que ayudan a describir el efecto que se consigue cuando el Láser conduce el proceso, o en caso opuesto, cuando lo hace el Arco Eléctrico.

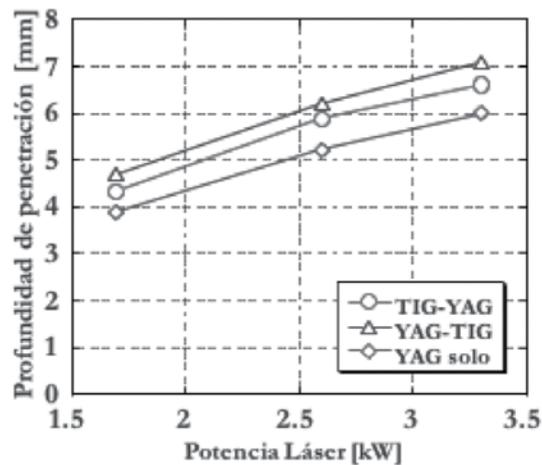


Fig. 7.22: Profundidades de penetración por soldadura híbrida

## Sumario sobre el proceso de soldadura híbrida Láser-GMAW

- Los procesos de soldadura por Arco y Láser son complementarios.
- El empleo de ambas fuentes, si bien es una complicación de la arquitectura del sistema de elaboración, permite conseguir un nuevo proceso con las ventajas de ambos.
- Los procesos se diferencian por el hecho que puede conducir el Láser (proceso Láser-GMA) y también el Arco (proceso GMA-Láser). Se puede conseguir una sinergia con profundidades de penetración más altas que la adición de las penetraciones por cada proceso (necesaria la optimización del proceso).

## 7.10 SOLDADURA DE MATERIALES DISÍMILES

Las particulares características de las fuentes térmicas Láser (elevada densidad de potencia disponible y pequeña área donde la energía se focaliza), han ayudado al desarrollo de soldaduras de materiales disímiles. En particular, es posible realizar soldaduras por combinación de diferentes materiales metálicos y, así como también, la soldadura de buena calidad de aceros con un alto contenido de carbono.

También, la soldadura Láser de los polímeros tiene un interés bastante alto porque se consigue con fuentes de baja potencia y bajo costo. En particular, se pueden soldar polímeros disímiles. Hay algunas características comunes a todas las soldaduras por Láser de los polímeros:

- Las uniones son siempre por sobre posición.
- El gas de asistencia es siempre necesario para proteger la unión (típicamente Argón).

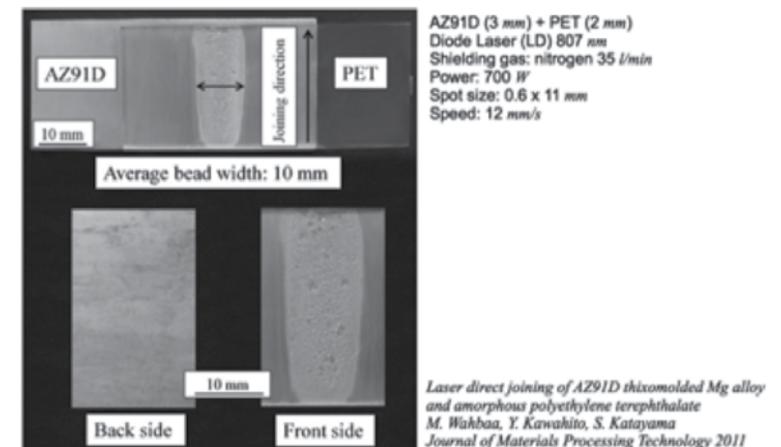


Fig. 7.23: El proceso de soldadura de metales y polímeros asistido por el Láser: LAMP (Laser Assisted Metal and Plastic joining).

Hay algunas consideraciones sobre la soldadura Láser de los polímeros:

- La soldadura es posible tanto para polímeros opacos como transparentes.
- Se pueden también soldar polímeros y materiales compuestos.
- Se utilizan fuentes Láser con alta eficiencia en estado sólido de baja potencia instalada y, por lo tanto, de bajo costo.
- La resistencia de las uniones puede ser superior a aquellas con pegamentos.
- Son posibles nuevas aplicaciones: soldadura de metales y polímeros (Fig. 7.23 y Fig. 7.24). El proceso de soldadura de metales y polímeros asistido por el Láser fue descubierto por el Prof. Katayama (Katayama Lab., Osaka, Japon) con el nombre de LAMP (Laser Assisted Metal and Plastic joining).

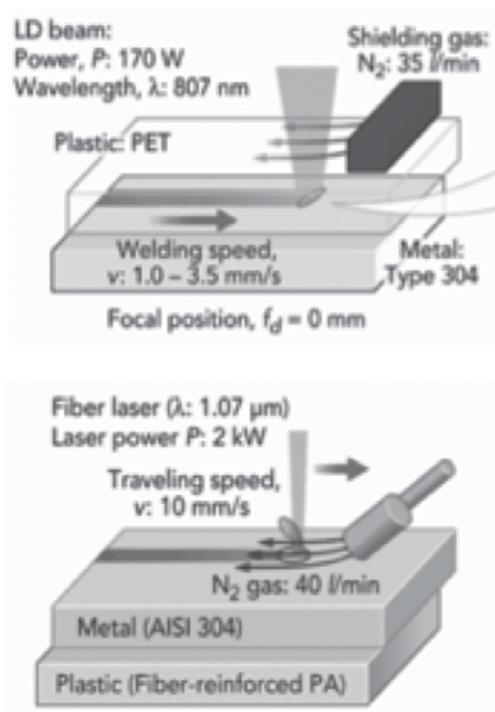


Fig. 7.24: Soldadura Láser de metal con polímero: configuraciones cuando el polímero es transparente al rayo Láser (arriba) o cuando el polímero es opaco

La soldadura LAMP se obtiene por diferentes mecanismos (Fig. 7.25):

- Mecanismo físico (fuerzas de Van der Waals)
- Efecto mecánico de unión (Efecto ancla)
- Vínculo químico

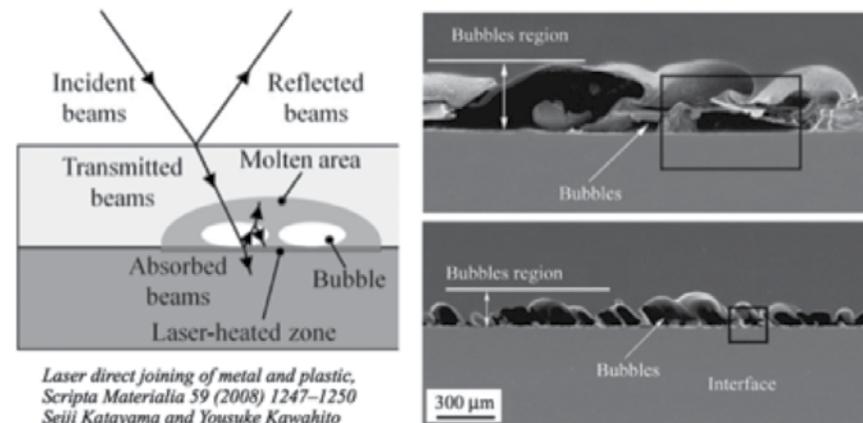


Fig. 7.25: Mecanismo de unión del proceso LAMP (Laser Assisted Metal and Plastic joining).

## 7.11 SOLDADURA CON LATÓN (ALEACIONES DE COBRE Y ZINC)

La soldadura con latón es un proceso de soldadura Láser cuando se utiliza un material de aporte con una temperatura de fusión inferior a aquella del material base (Fig. 7.26).

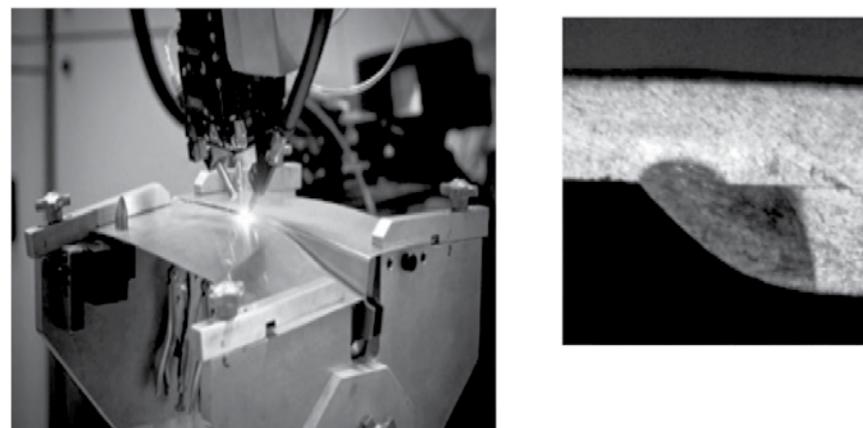


Fig. 7.26: Sistema Láserline GmbH con Láser Trumpf de soldadura con latón.

## 8. APLICACIONES LÁSER: TRATAMIENTO TÉRMICO CON LÁSER

Vimos, como manejando los parámetros de proceso y, en particular, la irradiación y el tiempo de interacción, se va a favorecer la absorción en los espesores superficiales cuando hay una irradiación alta y un tiempo de interacción bajo, o la conducción al interior, cuando sucede al revés, es decir, hay una irradiación baja y un tiempo de interacción alto. En el primer caso, las temperaturas superficiales pueden subir hasta causar la vaporización y la formación de plasma. En el segundo, las temperaturas en la superficie son más bajas y el espesor del material fundido es mayor porque el calor se ha difundido más en la profundidad.

Existen muchos modelos matemáticos para calcular el campo térmico generado por la absorción de energía Láser y también se pueden utilizar modelos FEM (*Finite Element Method*). Dos modelos analíticos están escritos abajo (ecuaciones 8.01 [Steen] y 8.02 [Cappello]):

$$T(x, y) = T_0 + \frac{A * P}{2\pi k h} * e^{-\frac{Vx}{2\alpha}} * K_0\left(\frac{V * \sqrt{x^2 + y^2}}{2\alpha}\right) \quad (8.1)$$

$$T(z, t) = T_0 + A * I * \frac{\sqrt{4\alpha t}}{k} * ierfc\left(\frac{z}{\sqrt{4\alpha t}}\right) \quad (8.2)$$

donde:  $T_0$ : temperatura inicial;  $A * P$ : potencia absorbida porque  $A$  es el coeficiente de absorción y  $P$  la potencia Láser emitida;  $\alpha$ : difusividad;  $k$ : coeficiente de conducción;  $h$ : espesor;  $K_0$ : the Bessel function;  $ierfc$ : the error function;  $V$ : Velocidad de proceso.

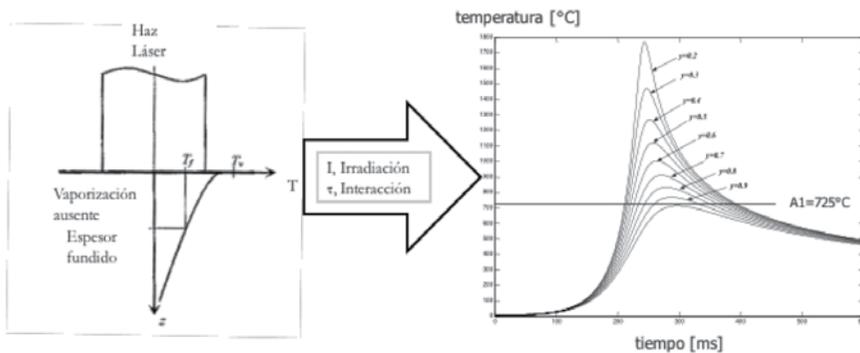


Fig. 8.1: Distribución de la temperatura y elección de los parámetros de proceso

En la Fig. 8.1 hay un esquema para significar que a través del control de los parámetros de proceso se pueden conseguir diferentes distribuciones de la temperatura y, por lo tanto, se pueden realizar diferentes tratamientos térmicos superficiales.

## 8.1 ¿CUALES TRATAMIENTOS TÉRMICOS SON POSIBLES?

En teoría, con el Láser son posibles todos los tratamientos térmicos conocidos, pero típicamente se realizan temple sin refrigeración con agua o aceite, que no se utilizan porque el calor absorbido por el material queda en la superficie y una elevada velocidad de refrigeración se obtiene por medio de la conducción térmica hacia el interior del material mismo.

Algunos de los tratamientos térmicos más utilizados e investigados son:

- El tratamiento térmico de templado (aceros y fundiciones).
- La modificación superficial por fusión del material.
- El tratamiento térmico de revenido (aceros y fundiciones).

El tratamiento térmico de temple para aceros y fundiciones es el más estudiado y, hoy en día, con la difusión de la tecnología Láser, son también los más promisorios. El temple se obtiene con el calentamiento para transformar la estructura de los aceros y de las fundiciones desde ferrita más perlita en austenita y, después, con un enfriamiento brusco para transformar la austenita en martensita (Fig. 8.2).

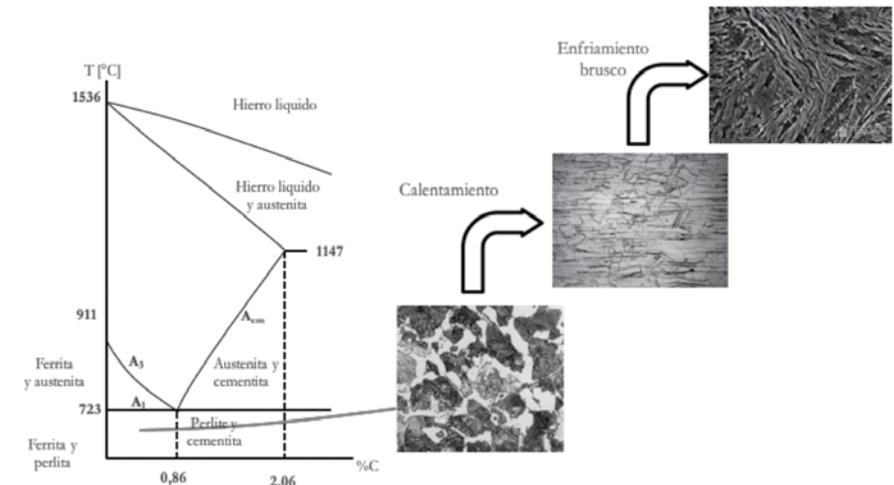


Fig. 8.2: Esquema del temple de aceros.

El ciclo térmico que se realiza en el material es sencillo porque después del calentamiento, no es necesaria la refrigeración con agua o aceite.

En la Fig. 8.3 se muestra la sección de un tratamiento térmico superficial realizado con un Láser a CO<sub>2</sub> sobre un acero inoxidable. Se puede ver la forma del área térmicamente transformada y endurecida, que depende de la distribución de potencia en el haz de luz (típicamente cerca de TEM<sub>00</sub> o TEM<sub>01</sub>\*).

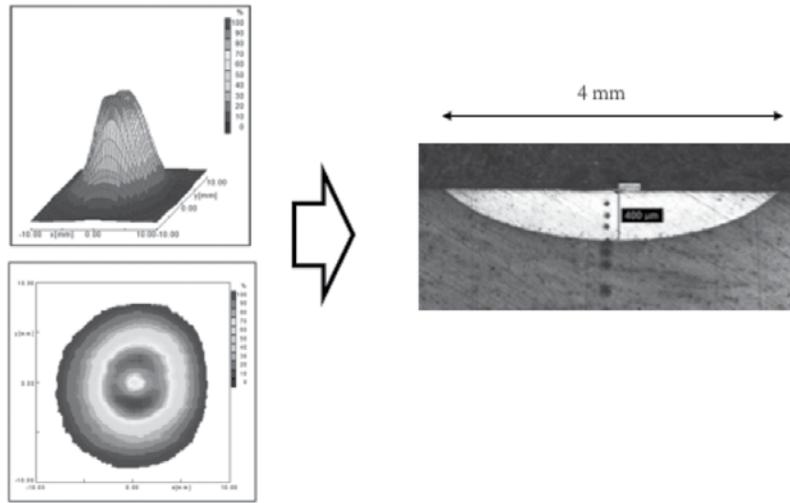


Fig. 8.3: Sección de un tratamiento térmico superficial con Láser a CO<sub>2</sub> sobre un acero inoxidable

Para conseguir un área transformada y endurecida rectangular, se puede modificar la forma del área mediante el empleo de un cabezal más adecuado para el tratamiento térmico con Láser. Incluso, es factible mejorar la distribución de potencia pero para ello será necesario un espejo integrador que modifica la forma del haz y de la distribución de potencia.

En el caso del Láser CO<sub>2</sub>, se utilizan **espejos integradores** que por sus geometrías reflejan los rayos y modifican la distribución de energía. Se consigue una distribución de energía rectangular y el área transformada se modifica de manera similar (Fig. 8.4).

El **Láser a Diodos** es particularmente adecuado para el tratamiento térmico de la superficie porque tiene una distribución de potencia muy uniforme (Fig. 8.5).

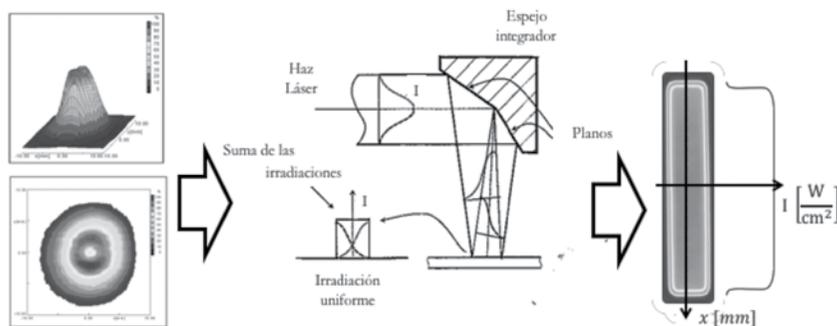


Fig. 8.4: Espejo integrador para un área endurecida rectangular

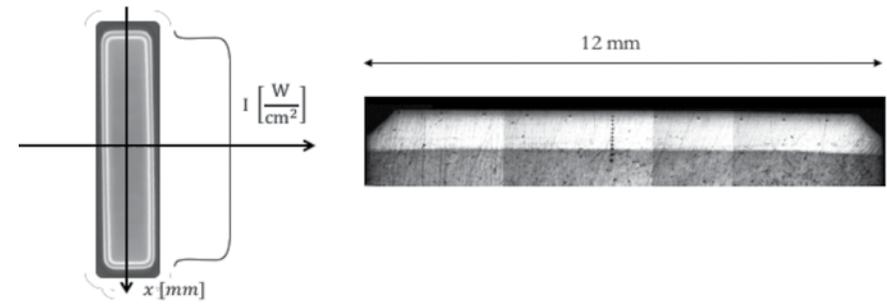


Fig. 8.5: Distribución de potencia en los Láseres a Diodos y resultado de un tratamiento térmico superficial

## 8.2 EL ÁREA DE FACTIBILIDAD POR EL TRATAMIENTO TÉRMICO DE TEMPLE

En el caso del temple las condiciones para obtener la transformación en martensita son tres (Fig. 8.2):

- **Primera Condición:** la temperatura del material  $T(x,y,z)$  debe ser mayor que la temperatura  $T_{\text{austenita}}$  para la transformación en austenita (ecuación 8.4b):

$$T(x,y,z) > T_{\text{austenita}} \quad (8.3)$$

- **Segunda Condición:** la refrigeración debe ser muy rápida; la velocidad de refrigeración debe ser mayor que la velocidad crítica de temple (ecuación 8.4a) o el tiempo de refrigeración  $t_{\text{refrigeración}}$  debe ser mayor que el tiempo para la transformación en martensita  $t_{Ms}$  (ecuación 8.3):

$$\text{Vel. de refrigeración} > \text{Vel. crítica de temple} \quad (8.4a)$$

$$t_{\text{refrigeración}} > t_{Ms} \quad (8.4b)$$

- **Tercera Condición:** la temperatura del material  $T(x,y,z)$  debe ser menor que la temperatura  $T_{\text{fundición}}$  para la fusión (ecuación 8.5):

$$T(x,y,z) < T_{\text{fundición}} \quad (8.5)$$

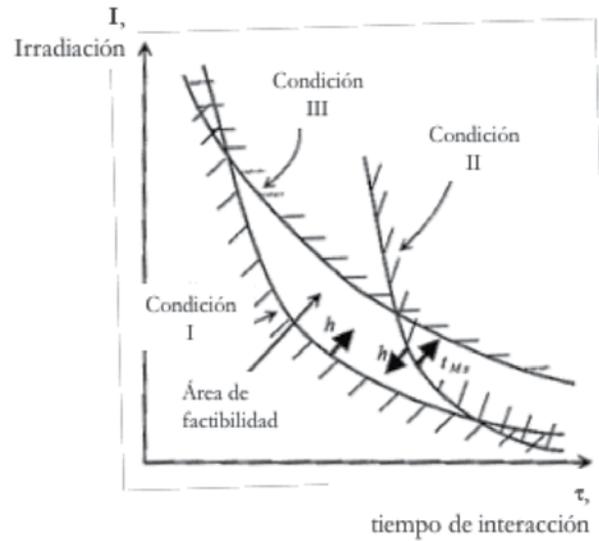


Fig. 8.6: Área de factibilidad del temple y tres condiciones para el temple

Estas tres condiciones se pueden sobreponer en un gráfico en función de la irradiación Láser y del tiempo de interacción, y servirán para determinar un área en el plano que representa el área de factibilidad del proceso de temple (Fig. 8.6).

Se observa que es un área muy delgada, que se va a reducir al aumentar el espesor de temple "h" porque el riesgo de causar una fusión superficial es más alto. Al revés, el área de factibilidad aumenta, cuando el material tiene una elevada actitud al proceso de temple.

La velocidad de proceso en la industria debe ser la más alta posible para obtener un tratamiento rápido. Una velocidad alta significa un tiempo de interacción bajo y, por lo tanto, es necesaria una irradiación adecuada (Fig. 8.7).

Además, una velocidad de proceso elevada significa un menor tiempo para la conducción del calor y la uniformidad de la temperatura en el espesor. Se obtiene entonces una dureza un poco más alta, pero una profundidad del tratamiento más baja (Fig. 8.8).

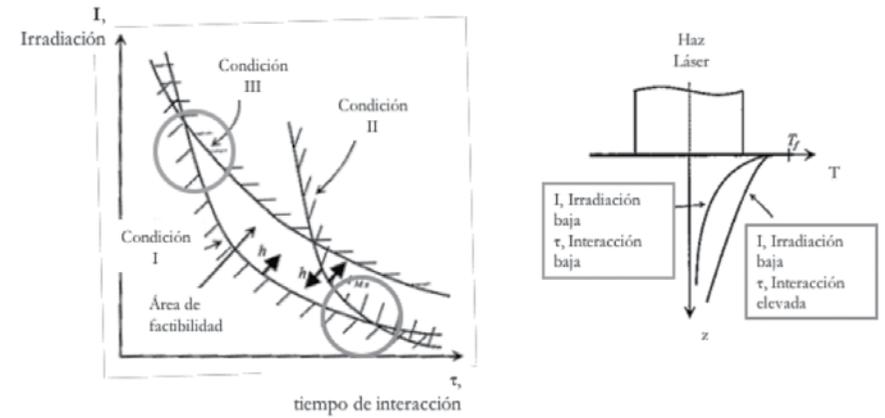


Fig. 8.7: Efecto de la velocidad de proceso.

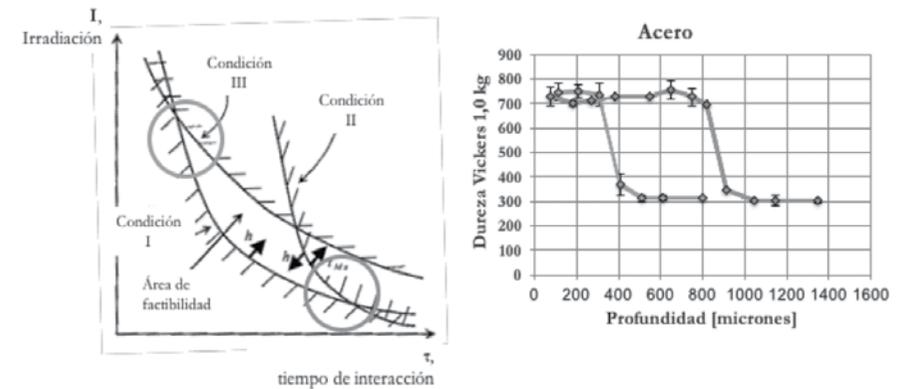


Fig. 8.8: Elección de los parámetros de proceso.

### 8.3 ¿CUALES SON LAS FUENTES LÁSER PARA LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS?

La mayoría de los metales tienen una absorción mayor cuando interactúan con fuentes Láser a Diodos o en estado sólido (Nd:YAG). Las fuentes a  $CO_2$  no son eficientes para este tipo de proceso: la absorción es baja y la calidad del haz es demasiado alta (Fig. 8.9).

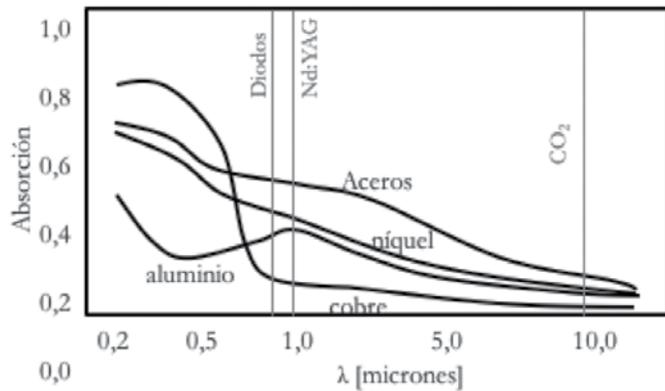


Fig. 8.9: Absorción del Láser por diferentes materiales

Las fuentes a CO<sub>2</sub> necesitan de un cabezal específico para el tratamiento térmico que tenga un espejo integrador (parágrafo 8.1) y también un tratamiento de la superficie de las piezas preliminar para aumentar la absorción. Estos pueden ser:

- Fosfatación.
- Recubrimiento con grafito.

Está claro que, la necesidad de contar con un cabezal específico y tratamientos preliminares representan una complicación.

#### 8.4 COMO TRABAJAR CON SUPERFICIES ANCHAS

Para tratar superficies anchas, más que la dimensión del haz Láser, es necesaria una estrategia. Una **primera estrategia** podría ser realizar **recorridos en paralelo**. Sin embargo, no puede dejar de tenerse en cuenta que, el segundo recorrido paralelo a el primero – en el caso del temple de acero – produce un problema por el tema del revenido, dado que el segundo recorrido realiza un tratamiento de revenido sobre el material endurecido durante el primero recorrido y, por lo tanto, una reducción de la dureza superficial (Fig. 8.10 y Fig. 8.11).



Fig. 8.10: Tratamiento de revenido por el segundo recorrido (izquierda) paralelo al primero (derecha)

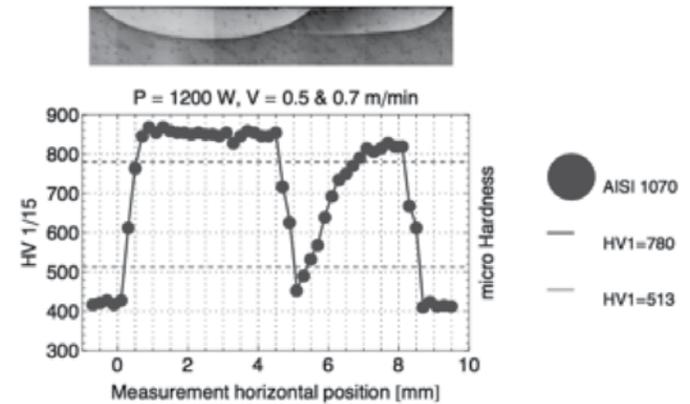


Fig. 8.11: Efecto de reducción de la dureza superficial por el tratamiento de revenido del segundo recorrido paralelo al primero

Una **segunda estrategia** emplea el **spot aparente**. Esta estrategia se puede utilizar solo para geometrías con eje de simetría (Fig. 8.12). La rotación de la pieza mientras los rayos Láser golpean la misma posición produce un anillo de material con la misma temperatura. Después, un segundo movimiento lineal va a realizar el calentamiento de toda la superficie cilíndrica. De este manera, cuando la superficie está ancha, puede ser necesario introducir el enfriamiento por agua o aceite y, entonces, se pierde una de las ventajas de los tratamientos superficiales por Láser.

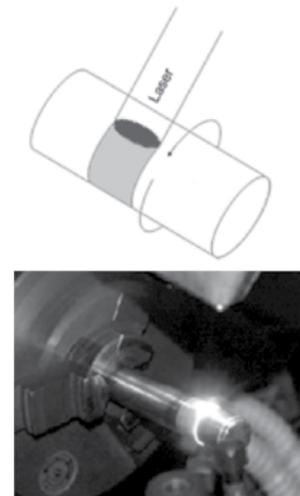


Fig. 8.12: Tratamiento térmico superficial Láser por spot aparente

## 8.5 COMPARACIÓN CON TRATAMIENTOS TÉRMICOS TRADICIONALES: VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS PROCESOS CON LÁSER

El tratamiento térmico superficial con Láser compite con procesos más antiguos como aquellos que emplean el principio de inducción, por ejemplo. Tienen algunas **ventajas** en comparación con los procesos tradicionales:

- El proceso es adecuado para pequeñas áreas porque se puede realizar sin refrigeración por agua o aceite. Para áreas grandes es necesaria una estrategia particular y, tal vez, una refrigeración; por lo tanto el proceso se complica.
- Porque se van a tratar pequeñas áreas, las distorsiones son limitadas.

Tienen, también, algunas **desventajas**:

- El endurecimiento es solo superficial.
- Es necesaria una puesta a punto experimental porque el área de factibilidad es limitada para evitar la fusión del material y para obtener una elevada velocidad de refrigeración. Así, en el mismo momento, se consigue la necesaria transformación en austenita (temple de aceros).
- La absorción del material debe ser constante y controlada, pero es necesario un control de proceso adecuado (típicamente la medida de la temperatura superficial).

Hoy en día, gracias al desarrollo de las nuevas fuentes Láser (con una elevada eficiencia) y por el aumento de conocimiento sobre este proceso, estos tratamientos térmicos por Láser se están tornando muy promisorios.

## 8.6 MODIFICACIÓN POR FUSIÓN DEL MATERIAL SUPERFICIAL

Con una adecuada irradiación se puede fundir la superficie de los materiales metálicos y conseguir un tratamiento térmico por fusión local. La profundidad y el ancho de las capas modificadas dependen, como ya sabemos, de la energía del rayo Láser (irradiación) sobre la superficie de trabajo, y de la velocidad de proceso (tiempo de interacción).

En el caso de una fundición esferoidal, la película modificada micro estructuralmente, consiste en una zona endurecida por fusión (Fig. 8.13): la Zona Fundida (ZF) (Fig. 8.14), y una zona endurecida por modificación en el estado sólido: la Zona de Transición (ZT) (Fig. 8.15). La zona de transición se ubica entre la zona fundida y el Material de Base (MB) (Fig. 8.16).

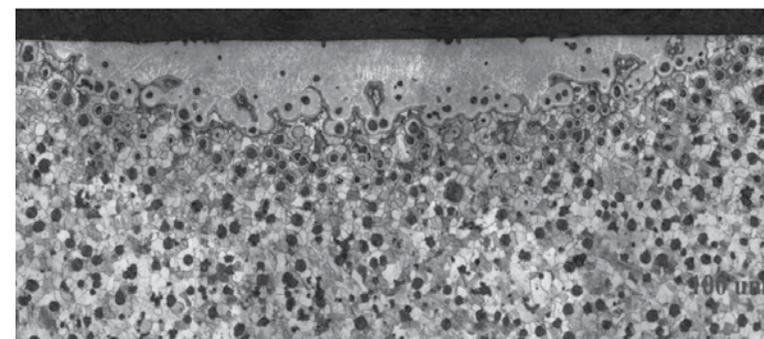


Fig. 8.13: Modificación por fusión de una fundición esferoidal.

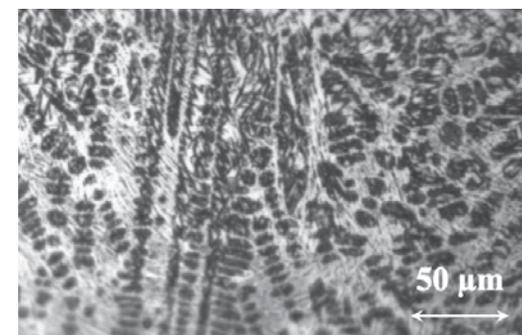


Fig. 8.14: Zona superficial fundida. Micro estructura de granos finos: austenita, ledeburita, pequeña porción de martensita.

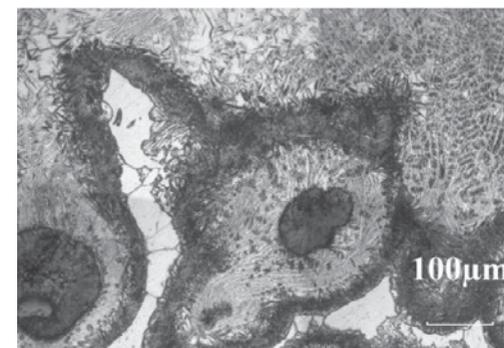


Fig. 8.15: Zona Térmicamente Alterada: ferrita, austenita, estuche de martensita alrededor a los esferoides de grafito

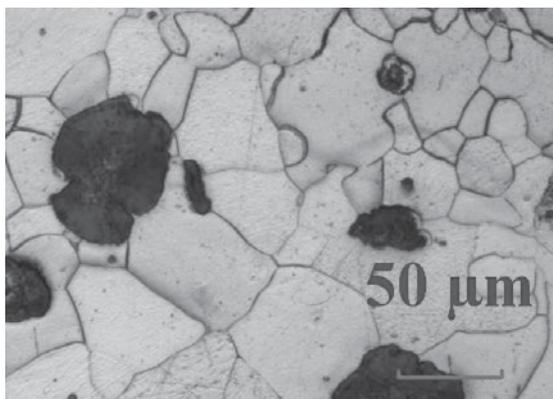


Fig. 8.16: Material Base:esferoides en grafito sobre una matriz de ferrita

## 8.7 TRATAMIENTO TÉRMICO DE REVENIDO (ACEROS Y FUNDICIONES) PARA PLEGADO

El objetivo del tratamiento térmico de revenido en la línea de plegado es posibilitar la operación de plegado en aquellos materiales donde la elasticidad es baja. Se realiza en las siguientes fases:

- Primera fase: Tratamiento térmico Láser de revenido en la línea de plegado para transformarlo en un material elástico (Fig. 8.17, izquierda).
- Segunda fase: Plegado (Fig. 8.17, centro).
- Tercera fase. Producto final (Fig. 8.17, derecha).



Fig. 8.17: Tratamiento térmico para plegado.

## 9. APLICACIONES LÁSER: MICRO ELABORACIONES LÁSER Y OTROS TRATAMIENTOS LÁSER

Hay un grupo importante de procesos asistidos por el Láser que fueron desarrollados en los años pasados y ahora ya son industriales o, tal vez, son todavía investigados.

En seguida nos vamos a introducir en ellos:

- El marcado o micro fresado Láser (*Laser milling*).
- La micro perforación Láser (*Laser Trepanning*).
- El granallado Láser (*Laser shock peening*).
- Los recubrimientos asistidos por Láser (*Laser cladding*) y reparación de piezas.
- El arranque de viruta asistido por el Láser.

### 9.1 MARCADO O MICRO FRESADO LÁSER (*LASER MILLING*)

Existen diferentes mecanismos que se pueden utilizar para marcar o micro fresar los materiales por Láser: marcado químico; marcado por modificación; y marcado por eliminación. Seguidamente comentamos en detalle cada mecanismo:

- El **"Marcado químico"** (Fig. 9.1 y Fig. 9.2) se consigue por generación de óxidos o compuestos en la superficie y, por lo tanto, por variación del índice de refracción (baja densidad de potencia, *-Color Laser Marking*). La interacción del Láser con el material en aire genera una oxidación de la superficie: con la elección de los parámetros de proceso se pueden modificar los índices de refracción de la superficie misma y conseguir diferentes coloraciones.
- El **"Marcado por modificación"** se consigue a través de la producción de una **transformación de la estructura de la superficie** sin fusión o con fusión y solidificación, por lo tanto, también por variación del índice de refracción, aunque en este caso con alta densidad de potencia.
- **"Marcado por eliminación"** de material en la superficie por vaporización (**mecanismo foto térmico**) o por vaporización directa sin fusión (**ablación**) (alta densidad de potencia y pulsación).

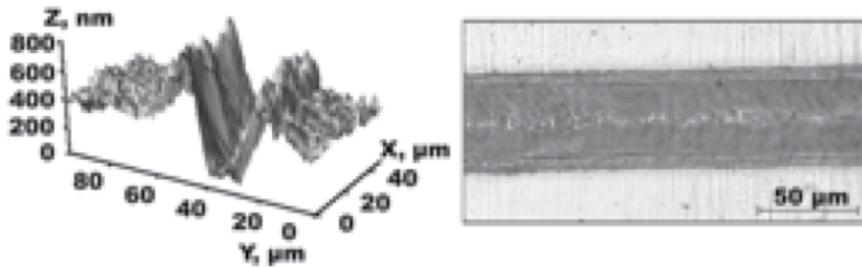


Fig. 9.1: Mecanismos de marcado químico. Tomado del artículo: "Development of complete colour palette based on spectrophotometric measurements of steel oxidation results for enhancement of colour laser marking technology", Vadim Veiko et alii., Material and Design, 89 (2016) 684–688.

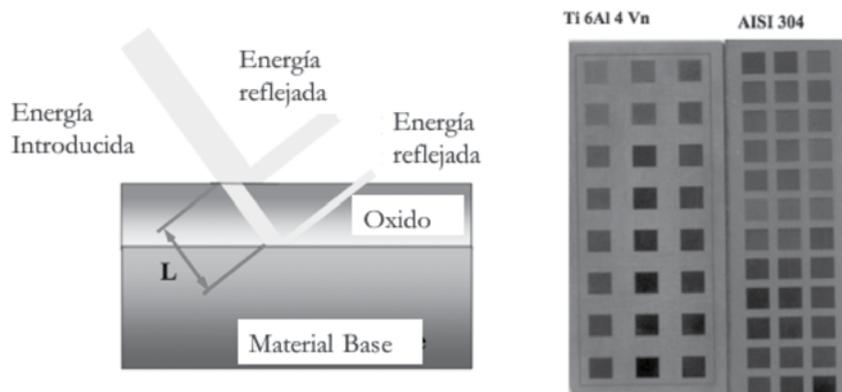


Fig. 9.2: Mecanismo del marcado por modificación

### Marcado por eliminación: mecanismo foto térmico

Se consigue por eliminación de material por fusión y después vaporización por excitación de los electrones. **La duración de la pulsación debe ser larga.**

### Marcado por eliminación: mecanismo no térmico o ablación

En este caso muy particular, el material se vaporiza sin pasar por el estado fundido. Los mecanismos de interacción Láser con el material pueden ser muy diferentes y dependen tanto de la longitud de onda como de la duración de la pulsación. '.

### Duración de la pulsación larga, corta y ultra-corta

Se dice pulsación ultra-corta cuando ocurre que la profundidad de difusión térmica " $\Delta p$ " es menor que la penetración óptica (ecuación 9.1).

La absorción de energía ocurre por una ley exponencial caracterizada por el coeficiente de absorción " $\alpha_{ab}$ " (Ley de Beer-Lambert, ecuación 9.2).

La **penetración óptica**, " $\delta$ ", se indica por el numero recíproco del coeficiente de absorción:  $\delta = 1/\alpha_{ab}$

La **profundidad de difusión térmica**, " $\Delta p$ " se mide por el tiempo de difusión " $t$ " y la difusividad térmica " $\alpha_{dif}$ " (ecuación 9.3):

$$\Delta p = \sqrt{4\alpha_{dif}t} < 1/\alpha_{ab} = \delta \quad (9.1)$$

$$I = I_0 * e^{-\alpha_{ab} * z} \quad (9.2)$$

$$\Delta p = \sqrt{4\alpha_{dif}t} \quad (9.3)$$

### Marcado foto térmico y ablación

- El **marcado por mecanismo foto térmico** se consigue con **pulsación larga** (se llaman también macro-elaboraciones) -----> la duración de la pulsación es mayor que: **1 ms = 10<sup>-6</sup> s.**
- La **ablación por interacción lineal** se consigue con **pulsación corta** (se llaman también micro-elaboraciones) -----> la duración de la pulsación es menor que: **1 ns = 10<sup>-9</sup> s.**
- La **ablación por interacción no lineal** se consigue con **pulsación ultra-corta** (se llaman micro-elaboraciones) -----> la duración de la pulsación es menor que **1 ps = 10<sup>-12</sup> s (1 fs = 10<sup>-15</sup> s).**

Hay un **Flujo-umbral** para conseguir la ablación:

- 1 hasta 10 J/cm<sup>2</sup> para metales;
- 0.5 hasta 2.0 J/cm<sup>2</sup> para materiales refractarios;
- 0.1 hasta 1 J/cm<sup>2</sup> para materiales orgánicos.

### Ablación con pulsación de larga duración

La energía Láser esta absorbida por un mecanismo lineal de excitación de la nube de los electrones: primero se produce una fusión, después una vaporización y, por ultimo, a las temperaturas más altas, la formación de plasma. El vapor y el plasma salen del área de interacción (Fig. 9.3).

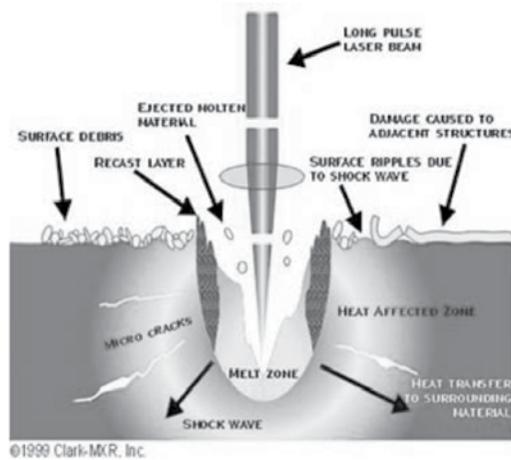


Fig. 9.3: Mecanismo foto térmico de marcado por eliminación

Se presentan diferentes efectos: alrededor del área del material vaporizado permanece una capa de material fundido y después se solidifica; el calor se difunde al interior también. En la parte superior, donde hay plasma, se forma una *Knudsen Layer* que está caracterizada por una velocidad constante (Fig. 9.4).

Por encima de la *Knudsen Layer* el vapor se expande muy rápido con una **onda de choque**. Hay defectos por daño de la superficie superior (Debris).

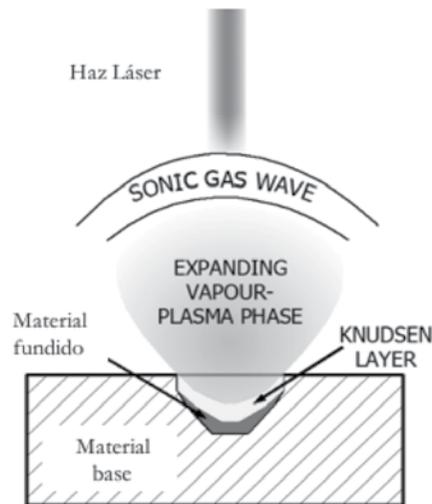


Fig. 9.4: Mecanismo foto térmico de marcado por eliminación: en evidencia el "Knudsen Layer" que esta caracterizado por una velocidad constante

### Ablación con pulsación de duración ultra-corta

La energía Láser puede hacer una acción para romper directamente los enlaces químicos cuando tiene una energía bastante alta ( $E=h*f=h*(\lambda/c)$ ).

Los mecanismos de interacción Láser con el material pueden ser muy diferentes y dependen tanto de la longitud de onda como de la duración de la pulsación (Fig. 9.5).

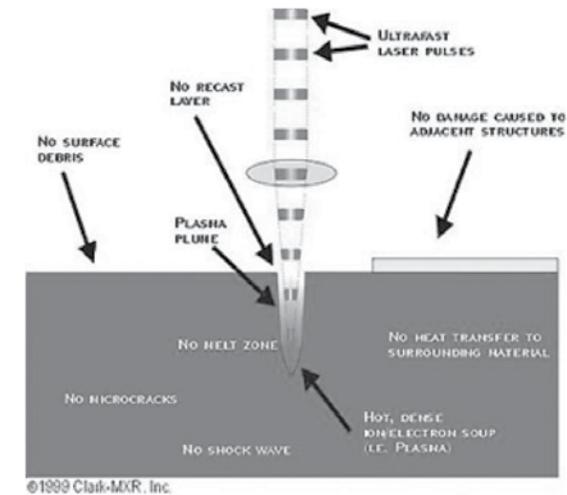


Fig. 9.5: Mecanismo foto térmico de marcado por eliminación

### SISTEMA LÁSER PARA MICRO-ELABORACIONES

Se emplean cabezales galvanométricos (Fig. 9.6) y diferentes lentes de focalización (Fig. 9.7).

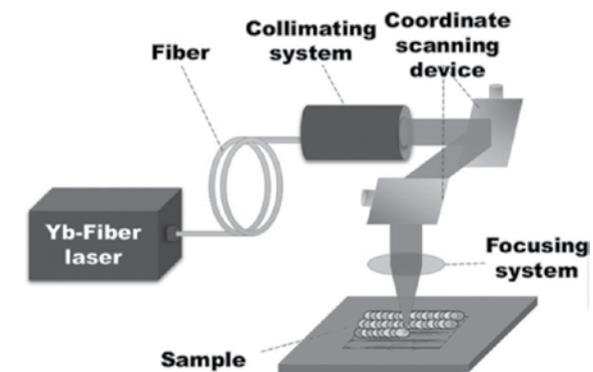


Fig. 9.6: Sistema Láser para micro-elaboraciones con cabezal galvanométrico

Para conseguir las mejores condiciones de focalización en correspondencia de la mesa de trabajo, se utilizan lentes de focalización muy particulares que se llaman **f- $\theta$**  por el hecho que pueden hacer una focalización sobre la mesa de trabajo.

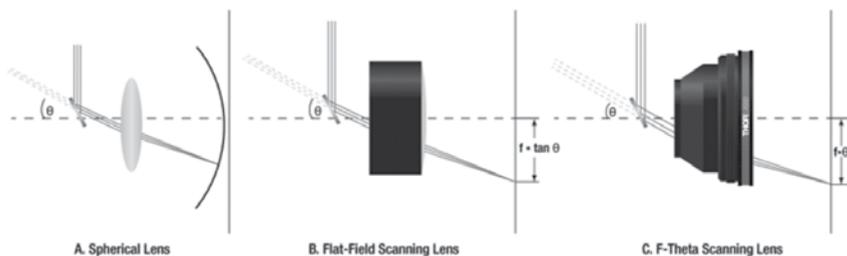


Fig. 9.7: Diferentes tipos de lentes para focalizar los rayos Láseres en el caso de las micro-elaboraciones.

### Las Fuentes Láser para el marcado

Las Fuentes Láser para el marcado son las siguientes:

- **CO<sub>2</sub>**: puede ser usada para el marcado por formación de óxidos o compuestos superficiales (marcado químico) o por modificación de la estructura de la superficie.
- **Fuentes en estado sólido (excluyendo los diodos)**: se utilizan en régimen de pulsación y con mecanismo de vaporización por ablación.
- **Diodos Láser**: no se utilizan por el tema de la dimensión del área de focalización y por la distribución de potencia.

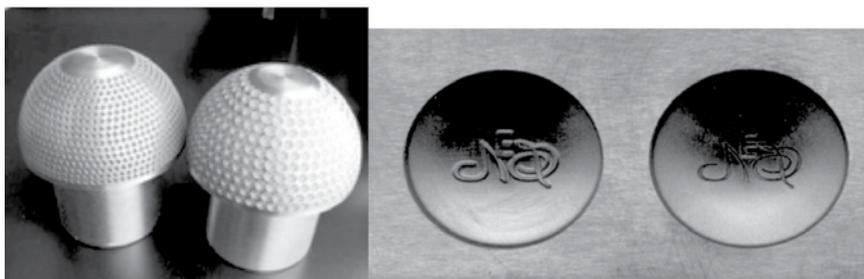


Fig. 9.8: Algunas piezas con micro-elaboración Láser

### 9.2 MICRO PERFORACIÓN LÁSER (LASER TREPPANNING)

Hay diferentes estrategias para realizar perforación (Fig. 9.9). La estrategia de "Laser trepanning" es la más precisa.

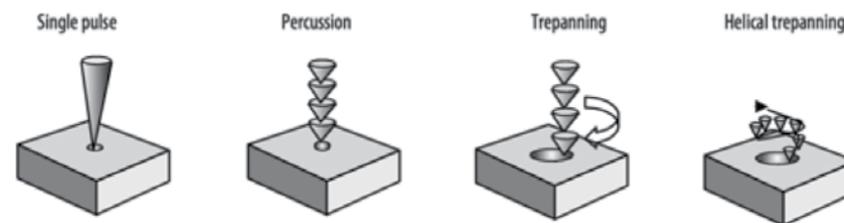


Fig. 9.9: Estrategias para la micro perforación

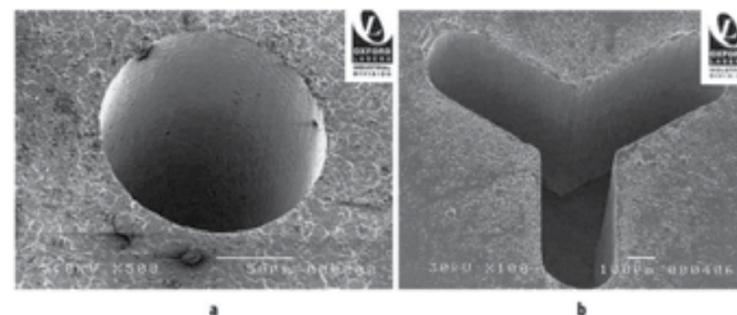


Figure 3.20 Examples of the quality of trepanned holes made by laser: a an example of a laser-trepanned hole as used in diesel fuel injectors (the typical diameter is 40–150  $\mu\text{m}$  through 1-mm steel), and b a spinneret hole showing the versatility of trepanned laser holes, which can be of almost any required shape. (Courtesy of AILU through <http://www.designforlasermanufacture.com> and Oxford Lasers)

Fig. 9.10: Estrategias para la micro perforación. Algunas micro perforaciones experimentales de alta calidad

### 9.3 GRANALLADO LÁSER (LÁSER SHOCK PEENING)

En el proceso de granallado tradicional (Fig. 9.11 y Fig. 9.12) se utilizan pequeñas esferas de metales o vidrios o cerámicos. Después de la elaboración, la superficie del producto final tiene una tensión residual de compresión y significa que se consigue una mejora de la resistencia a la fatiga y también a la corrosión.

Este tipo de granallado se utiliza para la mejora de las propiedades de: engranajes, engranajes de distribución, leva, resortes, piñones del cigüeñal para la distribución, válvulas, etc.



Fig. 9.11: El proceso de granallado tradicional

En el proceso de granallado asistido por Láser (Fig. 9.13) son necesarias las siguientes condiciones:

- Una alta densidad de potencia ( $> 1 \text{ GW/cm}^2$ ) con una pulsación corta (1–50 ns)
- Una capa superficial de material (alrededor de  $200\mu\text{m}$ ) con una alta absorción para realizar una ablación (solo en algunos casos: baja densidad de potencia).
- Un material que es transparente para confinar la onda de choque (agua, vidrio, cuarzo).

La pulsación del Láser produce la vaporización y ablación de la capa superficial de material con alta absorción que por el material transparente de confinamiento no puede expandirse. La onda de choque produce una sollicitación de la superficie de la pieza e introduce una tensión residual de compresión superficial.

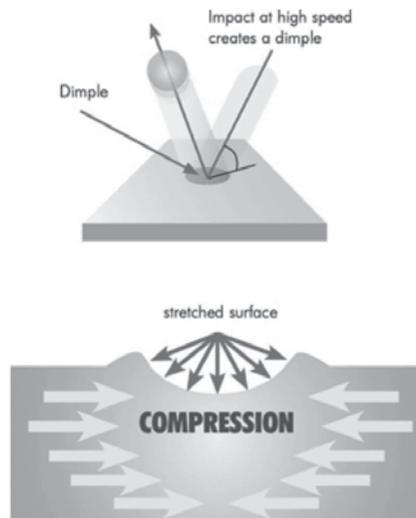


Fig. 9.12: Mecanismo del granallado tradicional

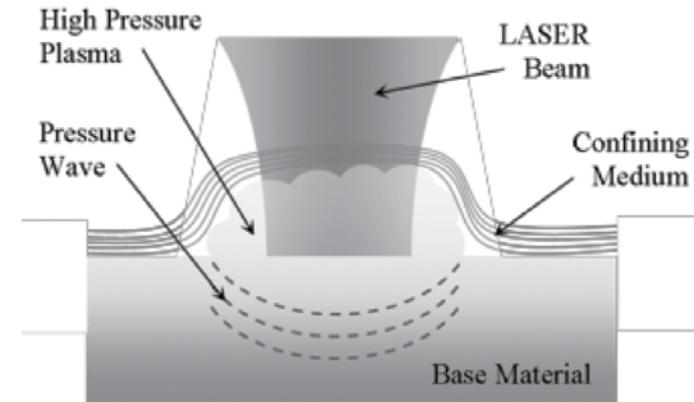


Fig. 9.13: Mecanismo del granallado asistido por Láser.

### Comparación entre el granallado asistido por Láser y el tradicional

Las ventajas del granallado tradicional son:

- Proceso barato
- Herramientas robustas
- Áreas grandes y pequeñas (versátil)

Las desventajas son:

- Puesta a punto del proceso experimental
- La capa de material con una tensión de compresión es poco profunda (alrededor de  $0.25 \text{ mm}$ )
- La superficie final puede tener una rugosidad mayor que aquellas con el proceso asistido por Láser.

Las ventajas del granallado asistido por Láser:

- Profundidad de tratamiento más alta (más de  $1 \text{ mm}$ )
- Tensión residual de compresión superior.
- Rugosidades más bajas.

Las Desventajas son:

- Áreas pequeñas porque áreas grandes requieren un tiempo demasiado largo.
- Herramientas muy caras y parámetros de proceso que requieren alto conocimiento técnico.
- Proceso complicado porque se necesita un medio con alta absorción y otro medio para el confinamiento.

## 9.4 RECUBRIMIENTO LÁSER (LASER CLADDING) Y REPARACIÓN DE PIEZAS

Hoy en día, algunos procesos asistidos por el Láser tienen una evolución muy importante y han generado nuevas técnicas de producción de piezas. Es el caso de los procesos de recubrimiento de piezas por fusión de polvo que han generado las nuevas técnicas de producción por adición (Fig. 9.14).

En este caso, el Láser se utiliza para fundir un polvo de metal que va a solidificar en la superficie de la pieza por intercambio de calor (conducción térmica) y convección con el aire (recubrimiento). Se pueden realizar recubrimientos con elevada calidad (mejor que aquellos obtenidos por tecnología con arco y plasma).

En la misma manera se puede agregar espesores de materiales y construir un componente por adición de material (producción aditiva). Las características del material al final son similares a aquellas de otros materiales obtenidos con procesos tradicionales, y las piezas producidas pueden ser utilizadas normalmente.

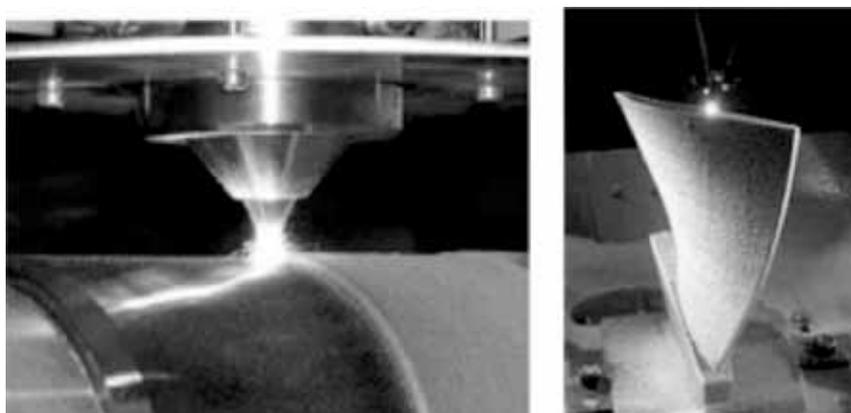


Fig. 9.14: Recubrimiento asistido por Láser con polvo (izquierda) y la nueva tecnología asistida por Láser de producción por adición (derecha)

### Las tres fases del proceso de recubrimiento asistido por Láser

Se puede esquematizar el proceso de recubrimiento asistido por Láser como en tres fases (Fig. 9.15):

- La fusión del material de aporte (capa superficial, alambre o polvo) por absorción de energía Láser.
- La fusión del material de base en el área de contacto por conducción térmica.
- La solidificación de la capa superficial fundida por convección y conducción térmica.

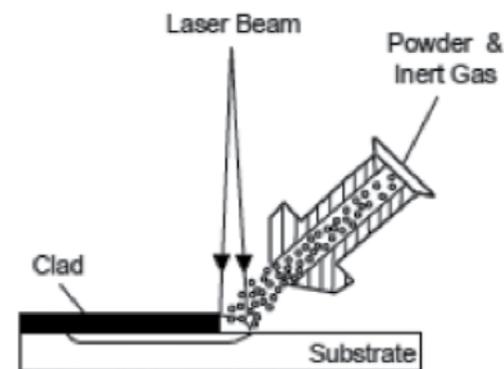


Fig. 9.15: Esquema del proceso del recubrimiento asistido por Láser

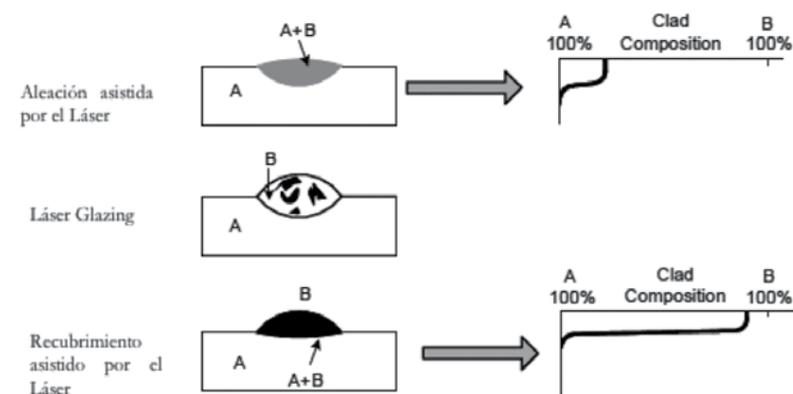


Fig. 9.16: Diferencias entre Láser Cladding, Láser Glazing y Láser Alloying.

### Láser Cladding, Láser Glazing y Láser Alloying

Por recubrimiento, se pueden obtener diferentes resultados que dependen del nivel de la irradiación empleada y otros parámetros de proceso; también de la naturaleza de los materiales involucrados.

El Láser *Cladding* es un recubrimiento asistido por Láser donde la superficie tiene una composición diferente en comparación a la composición del material base y se produce la formación de compuestos intermedios en la zona interfacial (A+B en la Fig. 9.15, abajo).

La aleación asistida (Láser *Alloying*) por Láser emplea un nivel de irradiación superior y en la superficie se consigue una mezcla del polvo empleado, con el material de base (A+B en la Fig. 9.15, arriba).

El Láser *Glazing* es un proceso intermedio entre los comentados y el baño de fusión se solidifica de manera particular donde hay un material agregado disperso en el material de base (Fig. 9.15, en el medio).

Hay, también, diferentes posibilidades para conseguir el proceso en el sentido que el material de aporte puede ser un alambre, un polvo o una capa superficial (Fig. 9.17).

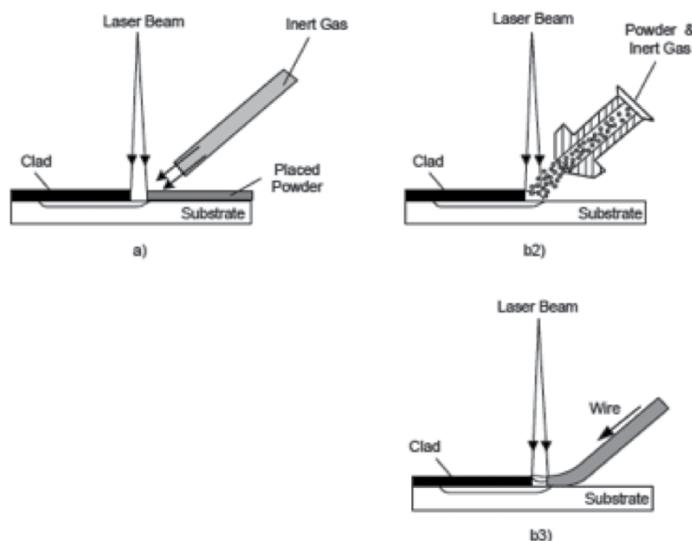


Fig. 9.17: Recubrimiento asistido por Láser con diferentes formas del material de aporte: alambre, un polvo o una capa superficial

El proceso que utiliza polvo es el más empleado pero tiene una complejidad elevada por el alto número de parámetros de proceso que son: los del propio sistema Láser empleado, del material de aporte, del sistema por el depósito del mismo, del movimiento necesario del cabezal, etc.

### Tipo de Láser y cabezales para el recubrimiento asistido por Láser y forma del recubrimiento

Se utilizan:

- Láser en continuo (CW) y en pulsado (PW) pero en las aplicaciones industriales se prefieren, en la mayor parte de los casos, los Láseres CW.
- Polvo con pequeñas partículas ayudan por el tema de requerir una cantidad de energía inferior para la fusión, aunque como contrapartida van a complicar el transporte (nunca se utilizan partículas menores de 15µm).

Los cabezales tienen la complicación del sistema para enviar el polvo que puede ser integrado (Fig. 9.18, izquierda) o por separado (Fig. 9.18, derecha).

La forma del recubrimiento (sección transversal), se observa en la Fig. 9.19.

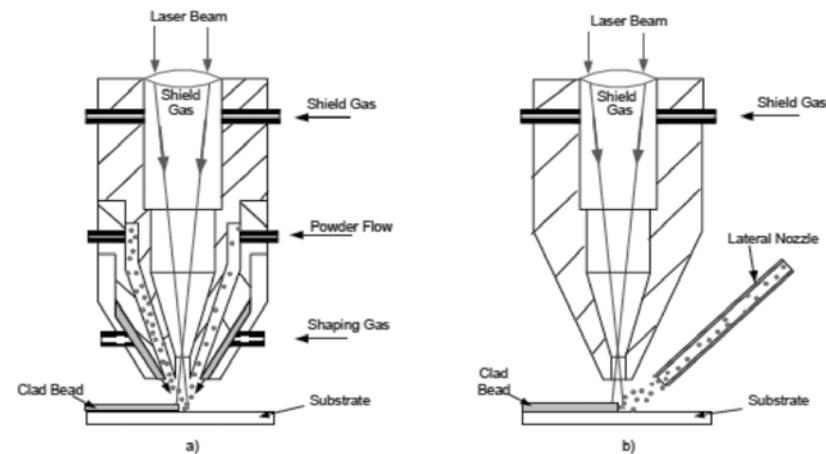


Fig. 9.18: Cabezales empleados para el recubrimiento asistido por Láser.

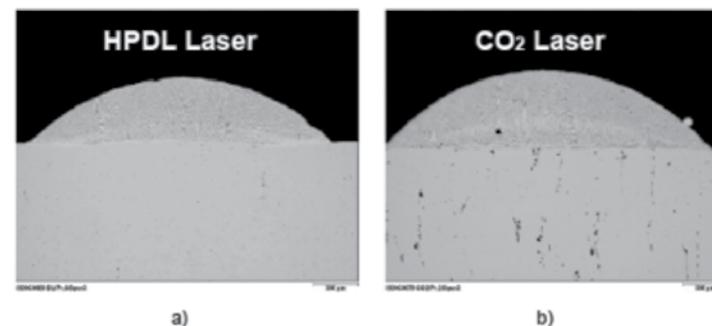


FIGURE 3.16

Cross section of a single track at process speed of 900 mm/min using different laser sources, a) HPDL laser at 1400 W, b) CO<sub>2</sub> laser at 3900 W (Source: Courtesy of Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology, Germany [125]).

Fig. 9.19: Forma de los recubrimientos

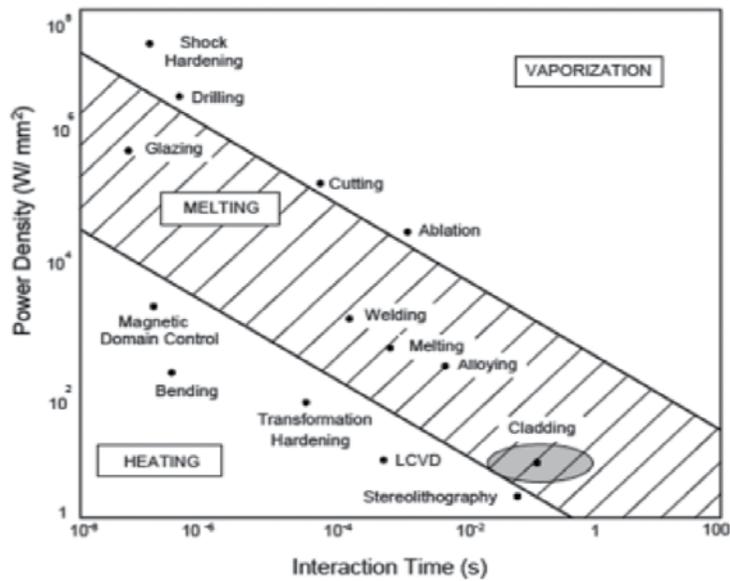


Fig. 9.20: Recubrimiento Láser, irradiación y tiempo de interacción

En la Fig. 9.20 se presenta una clasificación experimental de las elaboraciones con Láser por la densidad de potencia emitida de las fuentes térmicas, así como el tiempo de interacción. Como se puede observar, el Láser Cladding requiere de una irradiación bastante baja y un tiempo de interacción alto.

#### 9.4 ARRANQUE DE VIRUTA ASISTIDO POR EL LÁSER

El arranque de viruta asistido por Láser (Fig. 9.21) utiliza la energía térmica para reducir la resistencia del material a ser mecanizado (para materiales duros y refractarios).

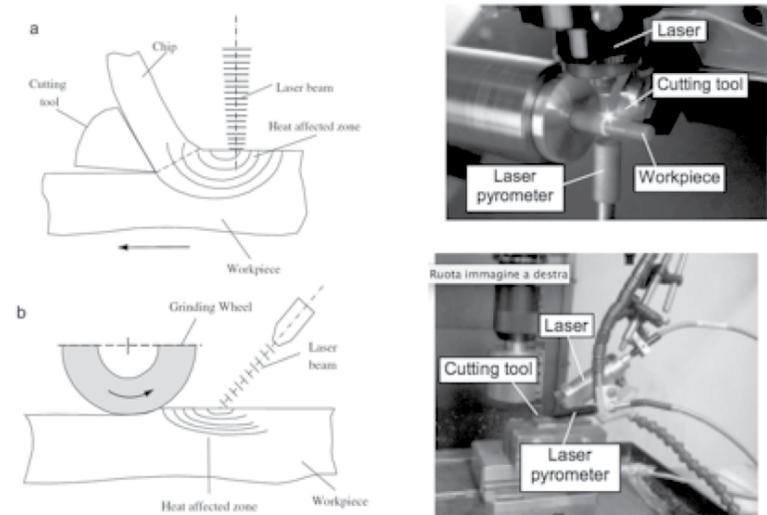


Fig. 9.21: Esquema de los procesos de arranque de viruta asistido por el Láser

Con la asistencia de una fuente térmica muy focalizada y que impacta en un área pequeña, se pueden mecanizar materiales frágiles, muy difíciles de elaborar. La velocidad de proceso aumenta porque las fuerzas para maquinarse disminuyen. La duración de las herramientas de corte aumenta porque el desgaste disminuye.

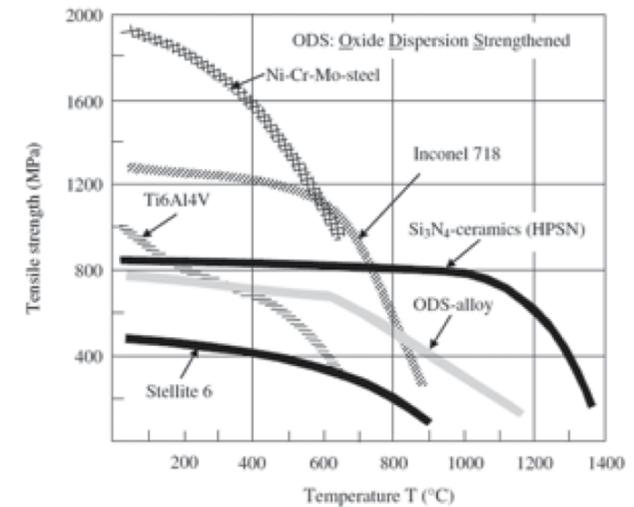


Fig. 9.22: Reducción de la resistencia del material con la temperatura.

Las ventajas de los proceso de arranque de viruta asistido por Láser son:

- Manejar la cantidad de energía Láser introducida en función de los parámetros del proceso por el mecanizado y del material.
- El calor absorbido por la viruta se dispersa con la viruta misma y no afecta el material base, pero, en el mismo momento, permite una reducción importante de la energía por el proceso de mecanizado.
- Ocurre una reducción de las fuerzas necesaria para el mecanizado (Fig. 9.22).
- Mejora de la rugosidad superficial.
- Aumento de la vida útil de las herramientas de corte.
- Reducción del tiempo de mecanizado (alrededor del 20%).
- Reducción final del costo (15%) del mecanizado incluyendo el costo del mantenimiento del Láser (por ejemplo Fig. 9.24 y 9.25).

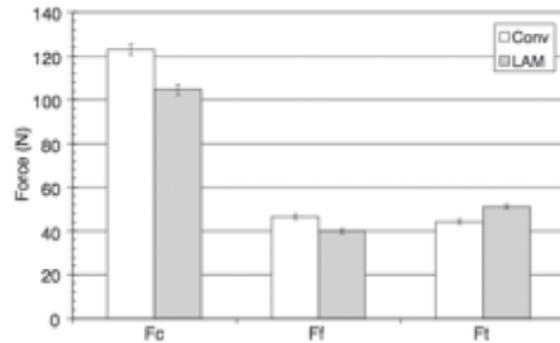


Fig. 13. Comparison of the average cutting force ( $F_c$ ), average feed force ( $F_f$ ), and average thrust force ( $F_t$ ) between conventional machining and LAM,  $v = 1.7 \text{ m/s}$ ,  $f = 0.10 \text{ mm/rev}$ ,  $d = 0.5 \text{ mm}$  (Tests Conv\_1&LAM\_1).

Fonte: Purdue University

Fig. 9.23: Comparación de la fuerza necesaria para el arranque de viruta entre las elaboraciones tradicionales y las asistidas por Láser. Material: hierro fundido.

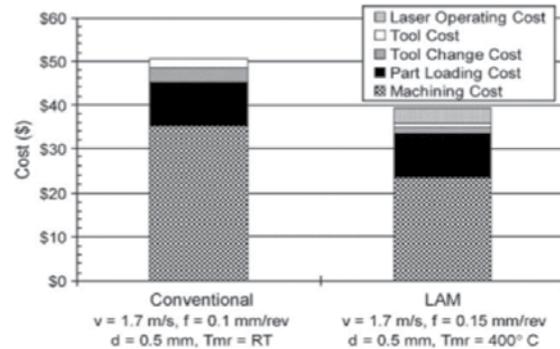
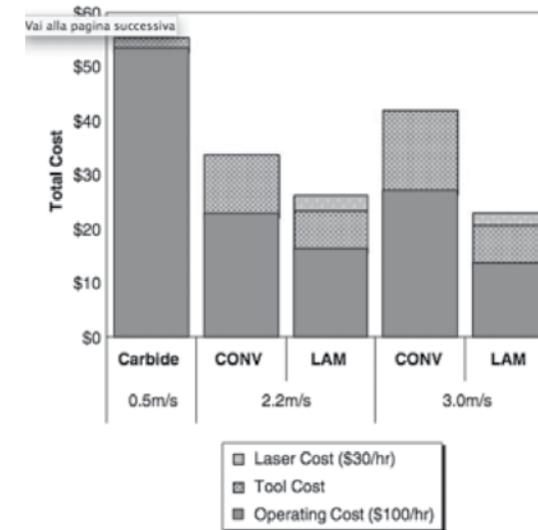
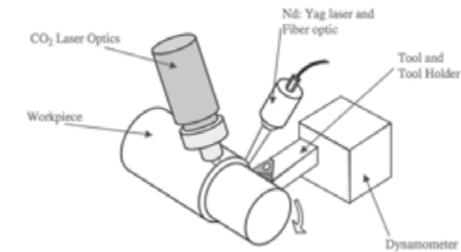


Fig. 9.24: Comparación del costo para el arranque de viruta entre las elaboraciones tradicionales y las asistidas por Láser. Material: hierro fundido.

En el caso del Inconel 718, se pueden agregar las siguientes ventajas:

- Aumento de la velocidad de proceso.
- Mejora de la rugosidad superficial.
- Aumento de la vida útil de las herramientas en materiales cerámicos (200-300%).
- Reducción del costo del mecanizado.



Fonte: Purdue University

Fig. 9.25: Comparación del costo para el arranque de viruta entre las elaboraciones tradicionales y asistidas por Láser para diferentes velocidades de proceso. Material: Inconel 718

## 10. CONCLUSIÓN

Este cuaderno tecnológico fue preparado siguiendo la trama de las presentaciones hechas durante la misión en el INTI en las sedes del PTM y de San Miguel de Tucumán, en el marco del programa del proyecto Europeo EuropeAid/130594/C/SER/AR que se intitula **"MEJORA DE LAS ECONOMÍAS REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL EN LA REPÚBLICA ARGENTINA"**.

Quiero agradecer a el INTI por el pedido de mi colaboración en el proyecto Europeo EuropeAid/130594/C/SER/AR en el tema de la transferencia de tecnología sobre las aplicaciones industriales del Láser y, también, por la posibilidad concreta de continuar nuestra colaboración en los próximos años en un trabajo juntos.

Quiero agradecer a EPTISA por el soporte durante todo el marco de la misión.

Quiero agradecer a los investigadores del grupo de trabajo, al cual pertenezco, del Departamento de Ingeniería Industrial de la Universidad de Bologna, involucrados desde hace años en la investigación el tema de las aplicaciones Láser. Al Prof. Giovanni Tani, que fue el primer investigador de esta materia en la Universidad de Bologna. Al Prof. Luca Tomesani, que estuvo, también, como mi ponente adjunto de la tesis doctoral. A todos los miembros del primitivo grupo de trabajo en Bologna: Leonardo Orazi, Alessandro Fortunato, Alessandro Ascari, Gabriele Cuccolini, Nunziante Pagano.

Quiero agradecer a Barbara Cimatti, la investigadora de la Universidad de Bologna, la experta de Diseño Industrial y la compañera de mi vida que me ha brindado su soporte siempre.

Agradezco al Director, Prof. Angelo Manaresi, y a todo el Staff de la Representación de la Universidad de Bologna.

## 11. BIBLIOGRAFÍA

[Capello] Le lavorazioni industriali mediante Láser di Potenza, Edoardo Capello, Clup, Milano, 2003.

[Corte 1] Prediction of melt geometry in laser cutting, G. Tani, L. Tomesani, G. Campana, Applied Surface Science 208-209 (2003) 142-147, DOI: 10.1016/S0169-4332(02)01353-3.

[Corte 2] Quality factors assessed by analytical modelling in laser cutting, G. Tani, L. Tomesani, G. Campana, A. Fortunato, Thin Solid Film 453-454 (2004) 486-491, DOI: 10.1016/j.tsf.2003.11.260.

[Corte 3] Prediction of kerf geometry and quality in laser cutting, G. Campana, A. Fortunato, G. Tani, L. Tomesani; pp. 443-448, and Proceedings of the Int. Conf. II° WLT (Wissenschaftliche Gesellschaft für Lasertechnik), Int. Conf. LIM 2003 (Laser in Manufacturing), Munschen, Germany, 23-26 June 2003. Editor: R. Poprawe, A. Otto.

[Corte 4] The role of assistant gas nozzle in laser cutting, G. Campana, A. Fortunato, M. Lollini, G. Tani, L. Tomesani; pp. 279-282, and Proceedings of the Int. Conf. XVI° AIV 2002 (Associazione Internazionale del Vuoto), Catania, 7-9 October 2002. Editor: Prof. Giovanni Bonizzoni, A. Raggio.

[Corte 5] Prediction of kerf-dependent heat affected zone in laser cutting, G. Tani, L. Tomesani, G. Campana; pp. 215-220, and Proceedings of the Int. Conf. CIRP ICME 2002 (3rd CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering), Ischia (Napoli), 3-5 July 2002. Editor: Prof. Roberto Teti.

[Soldadura 1] Hybrid laser-MIG welding of Aluminium alloys: the influence of shielding gases, G. Campana, A. Ascari, A. Fortunato, G. Tani, Applied Surface Science Vol. 255 issue 10 (2009) 5588-5590, DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.02.144.

[Soldadura 2] A study on shielding gas contamination in laser welding of non-ferrous alloys, G. Tani, A. Ascari, G. Campana, A. Fortunato, Applied Surface Science 254 (2007) 904-907, DOI: 10.1016/j.apsusc.2007.08.067.

[Soldadura 3] The influence of arc transfer mode in hybrid Laser-MIG welding, G. Campana, A. Fortunato, A. Ascari, G. Tani, L. Tomesani, Journal of Material Processing Technology 191 (2007) 111-113, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.03.001.

[Steen] Laser Material Processing, Steen W. M., Mazumder J., 2010, 4th edition, Springer.

[TratamientoTermico 1] 3D modelling of LASER hardening and tempering of hypo-eutectoid steels, G. Tani, L. Orazi, A. Fortunato, G. Campana, A. Ascari, Journal of Laser Micro/Nanoengineering, pp. 124-128, Vol. 3, No. 2, (2008), ISSN 1880-0688.

[TratamientoTermico 2] 3D Transient Model for CO2 Laser Hardening, G. Tani, L. Orazi, A. Fortunato, G. Campana, A. Ascari, Digital Library SPIE Vol. 6985, art. no. 69850A (2008), editor: Vadim P. Veiko..

[Granallado] Warm LASER shock peening: new developments and process optimization, G. Tani, L. Orazi, A. Fortunato, A. Ascari, G. Campana, CIRP Annals - Manufacturing Technology 60 (2011) 219-222, DOI:10.1016/j.cirp.2011.03.115.

## 12. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Velocidad de flujo, Potencia y  $M^2$  por fuentes Láser a  $CO_2$  a Flujo Axial Lento.

Tabla 4.2: Velocidad de flujo, Potencia y  $M^2$  por fuentes Láser a  $CO_2$  a Flujo Axial Rápido.

Tabla 4.3: Características principales de las radiaciones Láser.

## 13. ÍNDICE DE FIGURAS

### Capítulo tercero

Fig. 3.1: El campo electromagnético y su dirección de propagación.

Fig. 3.2: a) Absorción de un fotón. b) El átomo excitado. c) El átomo estable y la emisión de un fotón.

Fig. 3.3: a) Absorción de un fotón. b) El átomo excitado es golpeado por un segundo fotón. c) El átomo estable y la emisión de un fotón.

Fig. 3.4.: Esquema de la emisión estimulada a través de la inversión de población.

Fig. 3.5: Esquema de la cavidad de resonancia.

Fig. 3.6: Láseres de estado sólido emitiendo longitud de onda a (de abajo arriba) 405 nm, 445 nm, 520 nm, 532 nm, 635 nm y 660 nm [Wikipedia].

Fig. 3.7: El efecto de la alta focalización.

Fig. 3.8: El efecto de la alta coherencia y baja divergencia; comparación entre una fuente Láser y una lámpara con la misma potencia emitida.

### Capítulo cuarto

Fig. 4.1: El espectro electromagnético con evidencia de algunas de las fuentes Láser más usadas al final de la oración.

Fig. 4.2a: Esquema de un átomo con cuatro niveles de excitación como en el caso del  $CO_2$ .

Fig. 4.2b: Niveles de excitación del  $CO_2$ .

Fig. 4.3: Esquema del funcionamiento de una fuentes Láser a  $CO_2$ .

Fig. 4.4: Esquema de fuente Láser a  $CO_2$  a Flujo Axial Lento.

Fig. 4.5: Esquema de fuente Láser a  $CO_2$  a Flujo Axial Rápido.

Fig. 4.6: Cavidad de resonancia TruFlow de Trump (izquierda). Esquema de la cavidad de resonancia cuadrada con cuatro espejos de los cuales tres son completamente reflectantes (derecha).

Fig. 4.7: Esquema de fuentes Láser a  $CO_2$  de Flujo Axial Trasversal.

Fig. 4.8: Rofin DC series Láser. DC significa *diffusion cooled* o refrigerados por difusión.

Fig. 4.9: Trumpf TruCoax Láser.

Fig. 4.10: Rofin Sealed-Off series Láser.

Fig. 4.11: Blade RF Series – Sealed-Off  $CO_2$  LáserEiEn.

Fig. 4.12: Esquema del funcionamiento de una fuente Láser a Nd:YAG.

Fig. 4.13: Láser Nd:YAG donde se puede ver la porción donde se pone la cavidad de resonancia entre dos lámparas de flash (Sintec Optronics).

- Fig. 4.14: Algunas distribuciones de energía en la sección transversal de los rayos Láser.
- Fig. 4.15: Otras distribuciones de energía en la sección transversal de los rayos Láser y su clasificación.
- Fig. 4.16: Diferentes polarizaciones de las radiaciones electromagnéticas.
- Fig. 4.17: Forma del haz láser a la salida de la cavidad de resonancia: en evidencia el ángulo de divergencia  $\theta$
- Fig. 4.18: Potencia emitida por Láser continuo (CW) y Láser pulsado (PW).
- Fig. 4.19: Factor de recubrimiento, R, para Láser pulsado (PW).
- Fig. 4.20: Esquema de un diodo e integración de la energía de tres stacks de diodos.
- Fig. 4.21: Esquema de un Láser a disco Yb:YAG.
- Fig. 4.22: Trumpf TruDisk Láser series. Potencias: desde 1000 hasta 16000 W con una calidad del haz muy buena.
- Fig. 4.23: Esquema del funcionamiento de un Láser Yb:vidrio generado en fibra.
- Fig. 4.24: Esquema del bombeo por Diodos Láser (arriba) y Fuente láser IPG generada en fibra dopada con Yb(abajo).
- Fig. 4.25: Esquema básico de un sistema industrial de elaboración con fuente Láser.
- Fig. 4.26: Dimensiones características de la salida del haz y focalización.
- Fig. 4.27: Dimensiones características del haz focalizado.
- Fig. 4.28: Colimación y focalización a la salida de una fibra óptica.
- Fig. 4.29: Esquema del funcionamiento del FOCUS MONITOR de PRIMES GmbH.
- Fig. 4.30: Una imagen de la medida de la distribución de energía en el haz a través del "Beam Analyzer" de Spiricon.

## Capítulo quinto

- Fig. 5.1: Efecto de la rugosidad de la superficie sobre la reflexión de los rayos Láseres.
- Fig. 5.2: Coeficiente de absorción A de los rayos Láseres para diferentes metales.
- Fig. 5.3: Coeficiente de absorción A de los rayos Láseres para metales y cerámicos.
- Fig. 5.4: Aumento del coeficiente de absorción con la temperatura.
- Fig. 5.5: Espesor de absorción del Láser para diferentes materiales.
- Fig. 5.6: Absorción de energía Láser y conducción de energía térmica: diferentes distribuciones de temperatura.
- Fig. 5.7: Elección de los parámetros de proceso.
- Fig. 5.8: Esquema del efecto de la vaporización con la formación de la pluma de plasma.

## Capítulo sexto

- Fig. 6.1: El surco de corte y esquema del mecanismo de corte Láser por fusión.
- Fig. 6.2: Cabeza de corte Láser: en evidencia la lente de focalización y el recorrido del gas de asistencia.
- Fig. 6.3: Relación entre velocidad de proceso y potencia Láser dividida por el espesor de la chapa.
- Fig. 6.4: Geometría del surco de corte.
- Fig. 6.5: Surco de corte en sección con rebabas (izquierda). Zona Térmicamente Alterada (centro). Estrías (derecha).
- Fig. 6.6: La forma de las estrías es diferente y depende de los parámetros del proceso.
- Fig. 6.7: Algunos investigadores ponen la atención sobre el hecho que tal vez las estrías tienen dos direcciones.
- Fig. 6.8: Las aristas demandan una estrategia específica para evitar geometrías erróneas.
- Fig. 6.9: Punto inicial y punto final deben estar fuera de la geometría planeada.
- Fig. 6.10: Área de factibilidad del proceso de corte Láser.
- Fig. 6.11: Geometría del surco de corte por modelación matemática.
- Fig. 6.12: Esquema del surco de corte: sección transversal (derecha sobre y bajo) y sección longitudinal (izquierda sobre y bajo). Baja velocidad de proceso (sobre). Alta velocidad de proceso (bajo).
- Fig. 6.13: Velocidad del material líquido entre el surco de corte. Baja velocidad de proceso (sobre). Alta velocidad de proceso (bajo).
- Fig. 6.14: Temperatura del material líquido entre el surco de corte. Baja velocidad de proceso (sobre). Alta velocidad de proceso (bajo).
- Fig. 6.15: Primer mecanismo de formación de la rebaba: velocidad de salida del surco de corte demasiado baja.
- Fig. 6.16: Segundo mecanismo de formación de la rebaba: fenómeno de la oclusión.
- Fig. 6.17: Comparación entre los surcos de corte de diferentes tecnologías.

## Capítulo séptimo

- Fig. 7.1: Formas de costuras dependientes de las diferentes densidades de potencia.
- Fig. 7.2: Conformación del cordón de soldadura por conducción.
- Fig. 7.3: Geometría característica de la soldadura de elevada profundidad de penetración.
- Fig. 7.4: Comparación entre las características de la soldadura de conducción y de elevada profundidad de penetración.
- Fig. 7.5: Comparación entre diferentes procesos de soldadura.

Fig. 7.6: Defectos en la soldadura Láser: la protuberancia (izquierda); las socavaduras (centro), la coladura (derecha).

Fig. 7.7: Esquema para explicar las principales diferencias entre el funcionamiento continuo (derecha) y pulsado (izquierda).

Fig. 7.8: Esquema para explicar el efecto de la pluma de plasma inducida por el Láser.

Fig. 7.9: Efecto del gas de asistencia: su interacción con el Láser a CO<sub>2</sub> en el caso de la soldadura de una aleación de aluminio (Katayama Lab.).

Fig. 7.10: El ciclo de formación y dispersión de la pluma de plasma inducida por el Láser.

Fig. 7.11: El efecto del gas de asistencia y de la velocidad de proceso con la geometría del cordón de soldadura (aleaciones ligeras).

Fig. 7.12: El efecto del gas de asistencia con la geometría del cordón de soldadura (acero inoxidable).

Fig. 7.13: La profundidad de penetración en el caso del Láser en el estado sólido Yb:vidrio en fibra (acero inoxidable).

Fig. 7.14: Esquema y sumario de los mecanismos de soldadura.

Fig. 7.15a: Absorción y posición del keyhole y del spot Láser: efecto de la velocidad de proceso.

Fig. 7.15b: Posición del keyhole y del spot Láser: efecto de la velocidad de proceso.

Fig. 7.15c: Posición del keyhole y del spot Láser: efecto de la densidad de potencia de proceso.

Fig. 7.16a: Efecto de la velocidad de proceso sobre la forma de la costura.

Fig. 7.16b: Efecto de densidad de potencia y velocidad de proceso sobre la costura.

Fig. 7.17a: Una primera área de factibilidad de proceso por velocidad de soldadura y densidad de potencia.

Fig. 7.17b: Área de factibilidad de proceso por velocidad de soldadura y densidad de potencia.

Fig. 7.18: La soldadura *Remote Welding*.

Fig. 7.19: Esquema del proceso de soldadura híbrida Láser-GMA.

Fig. 7.20: Esquema del proceso de soldadura híbrida Láser Nd:YAG-TIG (*Tungsten Inert Gas*).

Fig. 7.21: Efecto de sinergia al utilizaren forma conjunta dos fuentes térmicas diferentes.

Fig. 7.22: Profundidades de penetración por soldadura híbrida.

Fig. 7.23: El proceso de soldadura de metales y polímeros asistido por el Láser: LAMP (*Laser Assisted Metal and Plastic joining*).

Fig. 7.24: Soldadura Láser de metales con polímeros: configuraciones cuando el polímero es transparente a los rayos Láser (alto) o cuando el polímero es opaco a los rayos Láser (bajo).

Fig. 7.25: Mecanismo de la unión del proceso del LAMP (*Laser Assisted Metal and Plastic joining*).

Fig. 7.26: Sistema Laserline GmbH con Láser Trumpf de soldadura con latón.

## Capítulo octavo

Fig. 8.1: Distribución de la temperatura y elección de los parámetros de proceso.

Fig. 8.2: Esquema del temple de aceros.

Fig. 8.3: Sección de un tratamiento térmico superficial con Láser a CO<sub>2</sub> sobre un acero inoxidable.

Fig. 8.4: Espejo integrador para un área endurecida rectangular..

Fig. 8.5: Distribución de potencia en los Láseres a Diodos y resultado de un tratamiento térmico superficial.

Fig. 8.6: Área de factibilidad del temple y tres condiciones para el temple.

Fig. 8.7: Efecto de la velocidad de proceso.

Fig. 8.8: Elección de los parámetros de proceso.

Fig. 8.9: Absorción del Láser por diferentes materiales.

Fig. 8.10: Tratamiento de revenido por el segundo recorrido (izquierda) paralelo al primero (derecha).

Fig. 8.11: Efecto de reducción de la dureza superficial por el tratamiento de revenido del segundo recorrido paralelo al primero.

Fig. 8.12: Tratamiento térmico superficial Láser por spot aparente.

Fig. 8.13: Modificación por fusión de una fundición esferoidal.

Fig. 8.14: Zona superficial fundida. Micro estructuras en granos finos: austenita, ledeburita, pequeña porción de martensita.

Fig. 8.15: Zona Térmicamente Alterada: ferrita; austenita; estuche de martensita alrededor a los esferoides de grafito.

Fig. 8.16: Material Base: esferoides en grafito sobre una matriz de ferrita.

Fig. 8.17: Tratamiento térmico para plegado.

## Capítulo noveno

Fig. 9.1: Mecanismos de marcado químico. Tomado del artículo: "Development of complete colour palette based on spectrophotometric measurements of steel oxidation results for enhancement of colour laser marking technology", Vadim Veiko et alii., *Material and Design*, 89 (2016) 684–688.

Fig. 9.2: Mecanismo del marcado por modificación.

Fig. 9.3: Mecanismo foto térmico de marcado por eliminación.

Fig. 9.4: Mecanismo foto térmico de marcado por eliminación: en evidencia el Knudsen Layer que esta caracterizado por una velocidad constante.

Fig. 9.5: Mecanismo foto térmico de marcado por eliminación.

Fig. 9.6: Sistema Láser para micro-elaboraciones con cabezal galvanométrico.

Fig. 9.7: Diferentes tipos de lentes para focalizar los rayos Láseres en caso de las micro-elaboraciones.

Fig. 9.8: Algunas piezas con micro-elaboración Láser.

Fig. 9.9: Estrategias para la micro perforación.

Fig. 9.10: Algunas micro perforaciones experimentales de alta calidad.

Fig. 9.11: El proceso de granallado tradicional.

Fig. 9.12: Mecanismo del granallado tradicional.

Fig. 9.13: Mecanismo del granallado asistido por Láser

Fig. 9.14: Recubrimiento asistido por Láser con polvo (izquierda) y la nueva tecnología asistida por Láser de producción por adición (derecha).

Fig. 9.15: Esquema del proceso del recubrimiento asistido por Láser.

Fig. 9.16: Diferencias entre Láser *Cladding*, Láser *Glazing* y Láser *Alloying*.

Fig. 9.17: Recubrimiento asistido por Láser con diferentes formas del material de aporte: alambre, un polvo o una capa superficial.

Fig. 9.18: Cabezales empleados para el recubrimiento asistido por Láser.

Fig. 9.19: Forma de los recubrimientos.

Fig. 9.20: Recubrimiento Láser, irradiación y tiempo de interacción.

Fig. 9.21: Esquema de los procesos de arranque de viruta asistido por el Láser.

Fig. 9.22: Reducción de la resistencia del material con la temperatura.

Fig. 9.23: Comparación de la fuerza necesaria para el arranque de viruta entre las elaboraciones tradicionales y las asistidas por Láser. Material: hierro fundido.

Fig. 9.24: Comparación del costo para el arranque de viruta entre las elaboraciones tradicionales y las asistidas por Láser. Material: hierro fundido.

Fig. 9.25: Comparación del costo para el arranque de viruta entre las elaboraciones tradicionales y asistidas por Láser por diferentes velocidad de proceso. Material: Inconel 718.

## 14. ABREVIATURAS UTILIZADAS

<b>CW</b>	<i>Continuous Wave</i> . Se utiliza cuando el Láser tiene una potencia generada en régimen continuo.
<b>DUE</b>	Delegación de la Unión Europea
<b>MB</b>	Material Base
<b>GMAW</b>	Gas Metal Arc Welding
<b>TIGW</b>	Tungsten Inert Gas Welding
<b>INTI</b>	Instituto Nacional de Tecnología Industrial
<b>PTM</b>	Parque Tecnológico Miguelete
<b>PyMEs</b>	Pequeñas y Medianas Empresas
<b>PW</b>	<i>Pulsed Wave</i> . Se utiliza cuando el Láser tiene una potencia generada en régimen pulsado.
<b>TdRs</b>	Términos de Referencia
<b>UE</b>	Unión Europea
<b>UGP</b>	Unidad de Gestión del Proyecto
<b>ZF</b>	Zona Fundida
<b>ZT</b>	Zona de Transición
<b>ZTA</b>	Zona Térmicamente Alterada





PROYECTO **MEJORA DE LAS ECONOMÍAS  
REGIONALES Y DESARROLLO LOCAL**

—  
APLICACIONES  
**INDUSTRIALES  
DE LA  
TECNOLOGÍA  
LÁSER**



**INTI**



**Unión Europea**

Instituto Nacional de Tecnología Industrial  
Gerencia de Cooperación Económica e Institucional  
Avenida General Paz 5445 - Edificio 2 oficina 212  
Teléfono (54 11) 4724 6253 | 6490  
Fax (54 11) 4752 5919  
[www.ue-inti.gob.ar](http://www.ue-inti.gob.ar)



Ministerio de Producción  
**Presidencia de la Nación**