



34
2ejam
**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**CORTE DE ACEROS CON
LASER DE CO₂**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
P R E S E N T A :
P A B L O B A R R E R O R U I Z

ASESOR: ING. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN



CD. UNIVERSITARIA

JULIO DE 1995

FALLA DE ORIGEN

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

AGRADECIMIENTOS.

A mi madre quién me guió desde los primeros estudios, *gracias*.

A mi padre y hermano, por ser un apoyo y un ejemplo a seguir, *gracias*.

A Flor por estar a mi lado en momentos difíciles, *gracias*.

**A las personas del Departamento de Ingeniería Mecánica
que brindaron su apoyo para la realización de éste estudio:**

Ing. Ubaldo E. Marquez Amador.

Ing. Javier Cervantes Cabello.

**y muy en especial a la Ingeniera Magdalena Trujillo Barragán
por su gran paciencia y comprensión,**

gracias.

**A mis profesores por transmitirme desinteresadamente sus
conocimientos,**

gracias.

**A mis compañeros, por su apoyo y sobre todo por brindarme
su amistad:**

Adolfo Altamirano M.	Esteban Ambríz G.
Alvaro Ayala R.	Gabriel Espinoza T.
Guillermo Fernández R.	Pablo A. Martínez A.
Alfredo Nava C.	Arturo A. Valencia G.
Salvador A. Valverde R.	Mauricio Vázquez C.
Jaime Villegas B.	

gracias.

A la Universidad por brindarme un hogar y educación,

gracias.

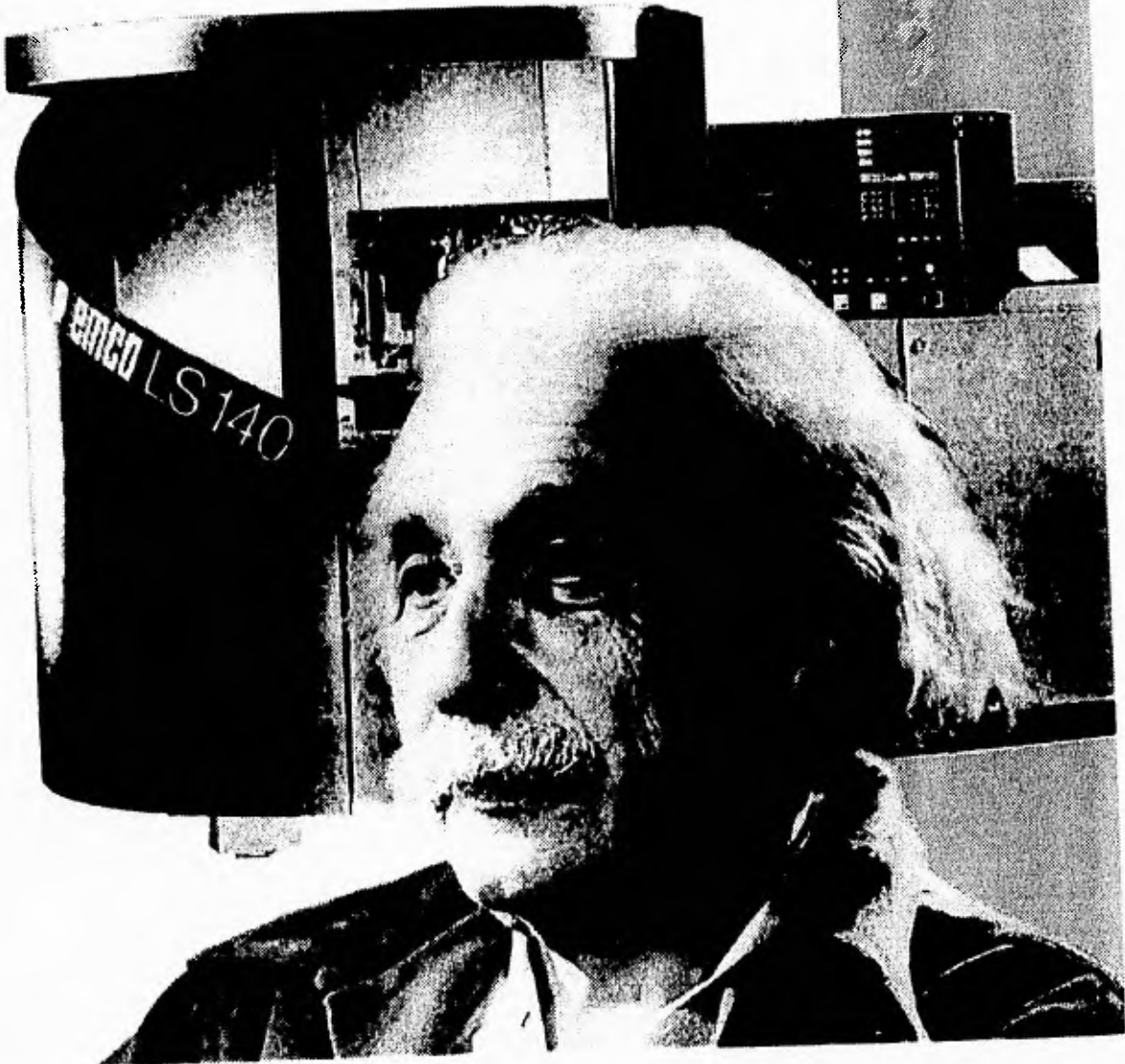
TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN.	1
II. ANTECEDENTES.	5
LA LUZ.	6
FORMA EN QUE SE PRODUCE LUZ.	7
EL LÁSER.	8
COMPONENTES BÁSICOS DE UN LÁSER.	10
PROPIEDADES DEL LÁSER.	12
TIPOS DE LÁSERES.	14
APLICACIONES.	25
III. PROCESAMIENTO DE MATERIALES.	28
PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LOS PROCESOS POR LÁSER.	29
MATERIAL	30
ENFOQUE.	34
HAZ LÁSER.	40
MEDIO.	47
GAS DE PROCESO.	48
TIPOS DE OPERACIONES.	53
CORTE DE MATERIALES	54
SOLDADURA DE MATERIALES.	56
TRATAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL.	57
PERFORADO DE MATERIALES.	57
VENTAJAS SOBRE TÉCNICAS DE MAQUINADO CONVENCIONAL.	58
IV. SISTEMA EMCO LS 140.	59
CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA.	60
FUENTE DEL LÁSER.	61
MÁQUINA.	65
CONTROLADOR.	67
POSIBLES APLICACIONES DEL SISTEMA EMCO LS140.	70

V. DESARROLLO EXPERIMENTAL.	71
SELECCIÓN DE MATERIALES.	73
METODOLOGÍA.	75
LOCALIZACIÓN DEL PUNTO FOCAL.	78
DENSIDAD DE POTENCIA.	79
MECANISMO DE CORTE BÁSICO.	80
CRITERIOS DE EVALUACIÓN.	83
VI. RESULTADOS.	90
ACERO DE BAJO CARBONO.	91
ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS.	92
PARÁMETROS DE CORTE ÓPTIMOS.	99
APARIENCIA DEL CORTE.	100
METALOGRAFÍA.	104
ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN.	106
LÁMINA GALVANIZADA.	109
ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS.	109
PARÁMETROS DE CORTE ÓPTIMOS.	116
APARIENCIA DEL CORTE.	117
METALOGRAFÍA.	121
ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN.	122
ACERO INOXIDABLE 304.	125
ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS.	126
PARÁMETROS DE CORTE ÓPTIMOS.	133
APARIENCIA DEL CORTE.	135
METALOGRAFÍA.	139
ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN.	141
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CORTE.	144
VII. CONCLUSIONES	146
VIII. BIBLIOGRAFÍA.	154
LIBROS	155
ARTÍCULOS DE JOURNALS, CONFERENCIAS Y REVISTAS CIENTÍFICAS.	157

CAPITULO

1



INTRODUCCIÓN.

La manufactura significa hacer artículos y objetos mediante procesos industriales. La derivación de la palabra manufactura refleja su significado original: *hacer a mano*. Sin embargo, hoy en día la manufactura se efectúa principalmente mediante maquinaria.

La mecanización de la industria se inició con la revolución industrial durante el siglo XVIII, siendo a finales de ese siglo y principios del siguiente, que se produjeron máquinas básicas en Inglaterra y el resto de Europa para formar, moldear y cortar metal.

Una gran proporción de los productos de la industria actual, se manufacturan por medio de procesos de corte (principalmente en láminas de metal). El corte significa la separación de una pieza de una cinta, hoja o barra, con un corte a lo largo de una sola línea.

La manufactura siempre ha sido y es en la actualidad un arte creciente y cambiante. La demanda para producir el gran número creciente de artículos industriales y de consumo dio el ímpetu para desarrollar y refinar los procesos, la maquinaria y los sistemas de manufactura, en especial en el corte de materiales.

De los más recientes procesos desarrollados a la fecha, se encuentran los denominados *procesos de maquinado no convencionales*, de los cuales sobresalen el corte con plasma, el corte con chorro de agua y el corte con láser; cada uno con ventajas (y desventajas) frente a procesos convencionales (troquelado y punzonado por ejemplo) y entre ellos mismos.

El *corte con láser* es un proceso *alternativo* o bien, *complementario* de los procesos convencionales de corte, debido al gran número de ventajas que presenta, y aún más si éste

posee controlador numérico por computadora -CNC-, como el caso del sistema EMCO LS140 con que cuenta el Laboratorio de Manufactura Avanzada, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la UNAM. De este modo, el objetivo de la tesis surge de la necesidad de un óptimo aprovechamiento del sistema láser, antes mencionado, mediante un proyecto de investigación teórico-práctico, de donde se destacan los siguientes objetivos:

- Mediante una investigación bibliográfica completa (y actualizada), comprender el efecto láser y los fenómenos que rodean a éste cuando interacciona con la materia,
- Estudiar los componentes y el funcionamiento del sistema láser EMCO LS140,
- Realizar pruebas de corte, de acuerdo con un procedimiento lógico de investigación práctica, en materiales de uso frecuente en ingeniería, reportando los resultados y parámetros óptimos de operación para cada material-calibre.

En este estudio se emplean términos de uso no frecuente en ingeniería, por lo que se hace hincapié en el seguimiento lógico de los temas, motivo por el cual se recomienda una lectura ordenada, y emplear la tabla de contenidos para la rápida búsqueda de un tema, a manera de re-lectura.

De la misma forma, en el segundo capítulo de este estudio, se hablará acerca de los antecedentes que nos llevan a la comprensión del efecto láser y sus características, las cuales permiten el empleo del láser en un sin número de aplicaciones, para, en el tercer capítulo, llegar al procesamiento de materiales, comprendiendo aún más la interacción del láser y de los muchos parámetros que intervienen en los procesos con láser.

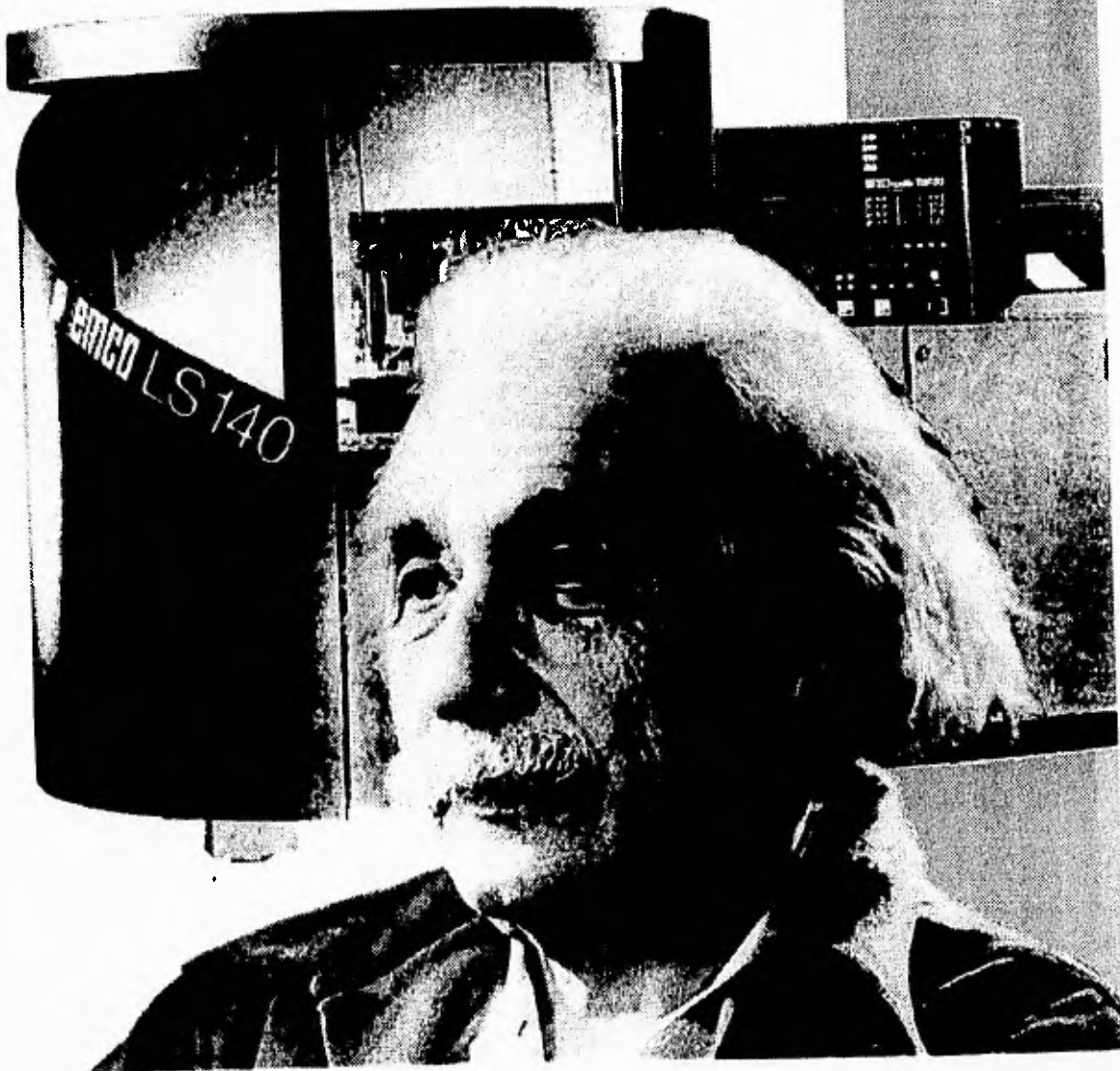
En el cuarto capítulo se describen las características del sistema láser empleado. En el quinto y sexto capítulo se hablará del desarrollo experimental llevado a cabo, así como del análisis de los resultados obtenidos, respectivamente.

En el séptimo capítulo se expondrán las conclusiones generales del estudio, para finalmente listar la bibliografía en el octavo capítulo.

El aprendizaje nunca termina. Como ya se mencionó, los métodos se hacen anticuados y cambian con la rápida expansión del conocimiento, razón por la cual, resulta indispensable la preparación actualizada de todo ingeniero mecánico, permitiendo con ello la utilización de la nueva tecnología, y no corriendo el riesgo de quedarse en lo obsoleto.

CAPITULO

2



II. ANTECEDENTES.

LA LUZ.

La luz es una onda electromagnética al igual que lo son las ondas de radio y televisión, las microondas o los rayos X. Todas ellas tienen la misma naturaleza y sólo reciben distintos nombres según la frecuencia a la que oscilan. Las diferentes zonas del espectro se pueden referenciar por su frecuencia o por su longitud de onda (figura 1)

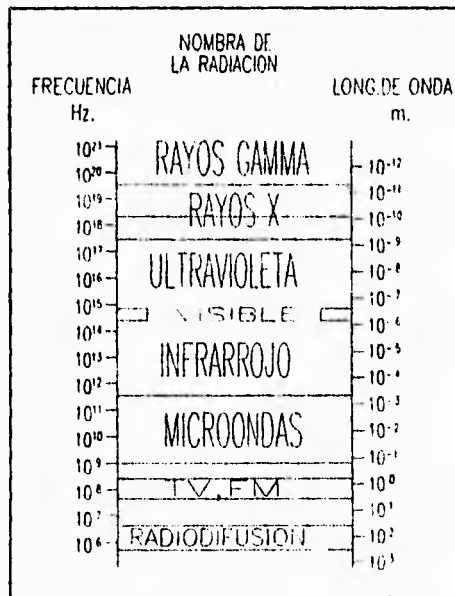


Figura 1 Espectro electromagnético.

Solo una pequeña parte del amplio espectro electromagnético es lo que se conoce como luz y aún es más pequeña la zona a la que el ojo humano es sensible.

Cuando hablamos de luz lo más frecuente es referirnos en términos de longitudes de onda. Cuando queremos examinar desde un punto de vista ondulatorio un proceso físico en que intervenga la luz, ésta se comportará como una onda. Algunos de estos fenómenos son,

por ejemplo, interferencias, difracción, etc. Sin embargo, si se estudia desde un punto de vista corpuscular, la luz se comportará como un chorro de partículas denominadas *fonones*, como si éstos fueran la unidad básica que la constituye. Algunos fenómenos en los que se pone en manifiesto este aspecto corpuscular son el efecto eléctrico, el de emisión y el de absorción de la luz.

Cuando la luz se propaga en un medio distinto al vacío su velocidad es siempre menor que al vacío ($c = 299,793 \text{ Km/seg}$). En el caso del aire se puede considerar que es prácticamente igual a c . De esta manera podemos deducir que, la velocidad a la que se propaga un rayo láser en la atmósfera es aproximadamente $300,000 \text{ Km/seg}$.

FORMA EN QUE SE PRODUCE LUZ.

Un sistema atómico o molecular se caracteriza por niveles energéticos, generalmente de más baja energía, conocidos como estado base o estado fundamental. Un átomo en dicho estado puede ser excitado a uno de mayor energía a través de varios procesos, uno de los más importantes se lleva a cabo a través de colisiones con otras partículas, mientras que en otro se realiza por medio de la absorción de radiación electromagnética, éste último método es conocido como *absorción estimulada*. Por otro lado, cuando el átomo está en el estado excitado puede haber una transición a uno de menor energía, con la consecuente emisión de radiación electromagnética; sin embargo, a diferencia del proceso de absorción, éste puede ocurrir de dos maneras:

La primera se conoce como *emisión espontánea*, en la que el átomo en el estado excitado emite radiación aún en ausencia de un campo externo, es decir, sin el estímulo de una señal de entrada.

La segunda, es llamada *emisión estimulada*, en la que una señal incidente de frecuencia apropiada, hace que un átomo en estado excitado emita radiación. La radiación estimulada depende de la intensidad del campo externo y de la diferencia en el número de átomos en ambos estados, en contraste con la emisión espontánea que sólo depende de la población en estado excitado.

El hecho de que existan dos tipos de emisión (espontánea y estimulada) fue deducido por Einstein en 1917. La consideración que llevó a esta predicción fue la descripción del equilibrio termodinámico en un campo de radiación.

Townes en 1954, por primera vez utilizó el fenómeno de emisión estimulada en la construcción de un aparato amplificador de microondas llamado MASER (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation). Por la misma época un aparato similar fue propuesto por Basov y Prokhorov. El principio MASER fue extendido a las frecuencias ópticas por Schawloe y Townes en 1958, lo que llevó a la construcción de lo que hoy conocemos como el LÁSER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

EL LÁSER.

El láser se genera por la transición de los electrones entre niveles de energía alta y baja (figura 2), en un material denominado *medio activo*. Al principio del proceso de *emisión o radiación*, se presenta una emisión de *fotones* (mínima unidad de luz) de naturaleza aleatoria. Cada fotón estimula a otro electrón excitado para que emita fotones (figura 3 y 4). Los nuevos fotones poseerán características similares al del fotón inicial, como la longitud de onda, dirección y fase, hasta producirse una corriente de fotones idéntica (figura 4).

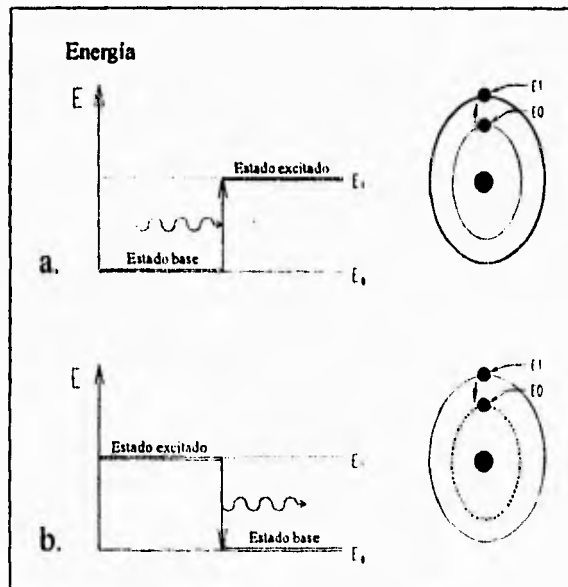


Figura 2 Absorción (a) y, emisión de energía (b).

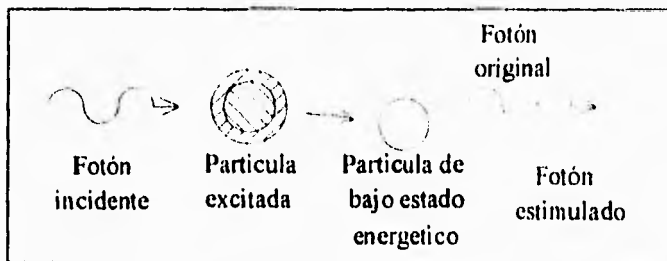


Figura 3 Excitación

Para asegurar la interacción de los fotones con los electrones excitados, se coloca el medio activo entre dos espejos opuestos entre sí, consiguiendo además, una amplificación mucho mejor.

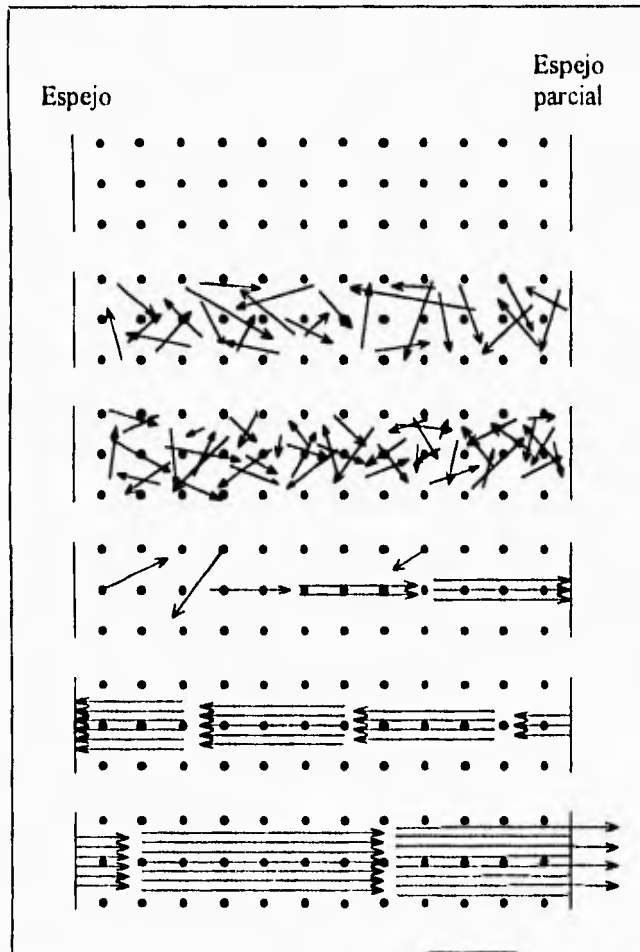


Figura 4 Estados de amplificación: Láser apagado, Estado aleatorio inicial, Estimulación inicial, Amplificación y Haz coherente.

En la figura 4 podemos apreciar que, conforme los fotones pasan delante del medio activo, se estimulan mas y más emisiones. Los fotones que no están alineados con el sistema óptico, no son redireccionados por los espejos; la *cavidad óptica* (lugar donde se contiene el medio activo) solo amplificará aquellos fotones con una orientación adecuada.

COMPONENTES BÁSICOS DE UN LÁSER.

Los tres componentes principales de cualquier láser (requeridos para lograr una emisión estimulada) son, un medio activo, un dispositivo amplificador y un resonador óptico.

- El medio activo (también llamado materiales láser) consiste de, una colección de átomos de un gas, moléculas de un líquido, iones de un cristal o cualquiera de otras posibilidades que actúan como amplificador para las ondas de luz. (figura 5). La longitud de onda característica de un láser depende del medio activo.
- Para que exista amplificación, el medio tiene que ser mantenido en un estado de *inversión de población*, es decir, un estado en el cual el número de átomos en el nivel superior de energía sea mayor que el del nivel inferior¹. El mecanismo de bombeo provee la energía para tener dicha inversión de población, valiéndose para ello de fuentes mecánicas, químicas, eléctricas o luminosas.
- El tercer componente básico es un par de espejos opuestos entre si, entre los cuales se coloca el medio activo; uno de los espejos transmite parte de la radiación incidente para uso práctico, mientras que el otro posee una reflexión teórica del 100%. A este sistema se le conoce como *resonador óptico* (figura 6). Cuando el medio es colocado dentro de un resonador óptico, el sistema actúa como oscilador, ya que los espejos producen la reflexión múltiple de la radiación (haces).

MATERIALES LÁSER	
Gases	CO ₂ , He, Na, Ar
Líquidos	Sustancias orgánicas líquidas
Cuerpos sólidos	Rubi, Nd-Yag, Nd-Glass
Semiconductores	GaAs

Figura 5 Materiales con los cuales es posible generar un láser.

¹ Bajo circunstancias normales, siempre existe un mayor número de átomos en el estado de menor energía comparado con los estados excitados. si una onda electromagnética pasa a través de dicho medio, ésta será atenuada en vez de ser amplificada, por lo tanto, para tener amplificación, se debe tener inversión de población.

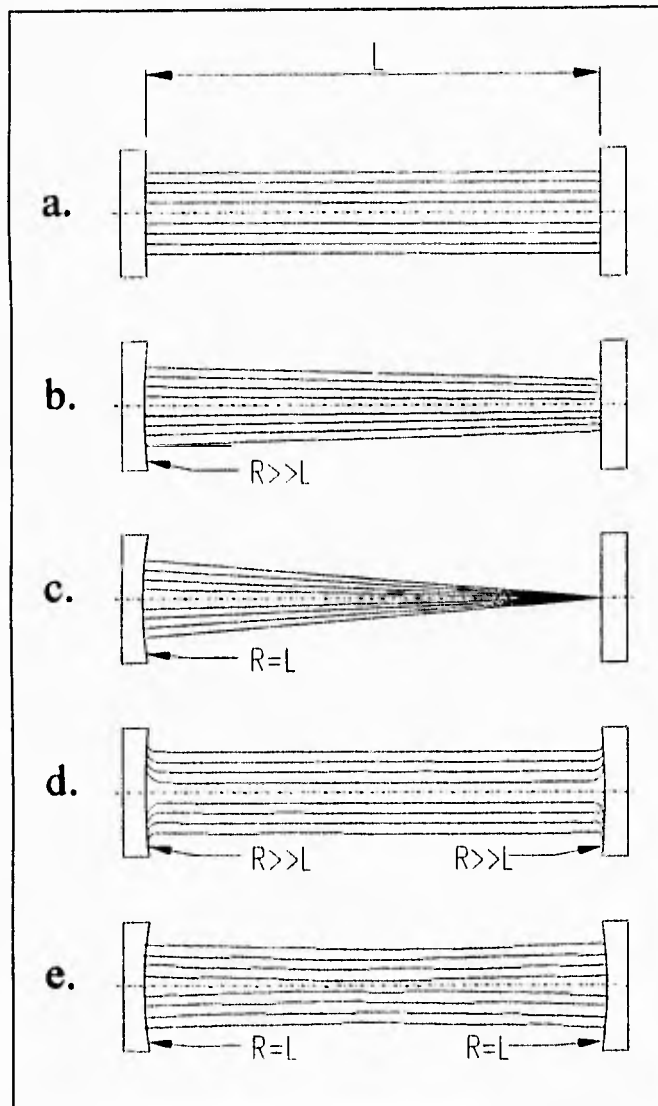


Figura 6 Tipos de resonador.

De acuerdo al diseño del resonador será el modo de oscilación. En la figura 6a podemos observar el resonador de plano paralelo, en la 6b el de espejo plano con uno de radio de gran curvatura, en la 6c el resonador hemisférico, en la 6d el resonador supraconfofocal, en la 6e el resonador confocal.

PROPIEDADES DEL LÁSER.

La luz láser se caracteriza principalmente por su alto grado de monocromaticidad, coherencia, difracción y radiación.

Monocromaticidad. Una alta monocromaticidad implica que el rango de frecuencias emitidas por la fuente de luz es pequeña; esto a menudo es evaluado midiendo el ancho de la línea espectral. La luz láser típicamente contiene una o unas líneas espectrales muy delgadas; las fuentes de luz ordinaria presentan múltiples anchos de línea. Lo anterior es fácilmente comprobable al hacer pasar por un prisma una luz blanca y un haz láser (figura 7). Cabe mencionar que el ancho de banda está dado por las emisiones espontáneas en la cavidad láser.

Coherencia. La coherencia espacial y temporal se refieren a la relación entre los componentes electrónicos y magnéticos de una onda electromagnética. Cuando estos componentes están totalmente alineados, se dice que el haz es coherente. La coherencia espacial se refiere a la correlación de fases en diferentes puntos en el espacio en un instante de tiempo; la coherencia temporal se refiere a la correlación de fases en un punto del espacio en un periodo de tiempo (ver figura 8). Para un láser de gas de alta calidad, se han hecho estimaciones de que existe coherencia hasta una distancia de 16,100 Km (10,000 millas). En los láseres de rubi y de inyección, la coherencia no es tan buena como en los de gas, pero es muy superior a la de las fuentes de luz normal.

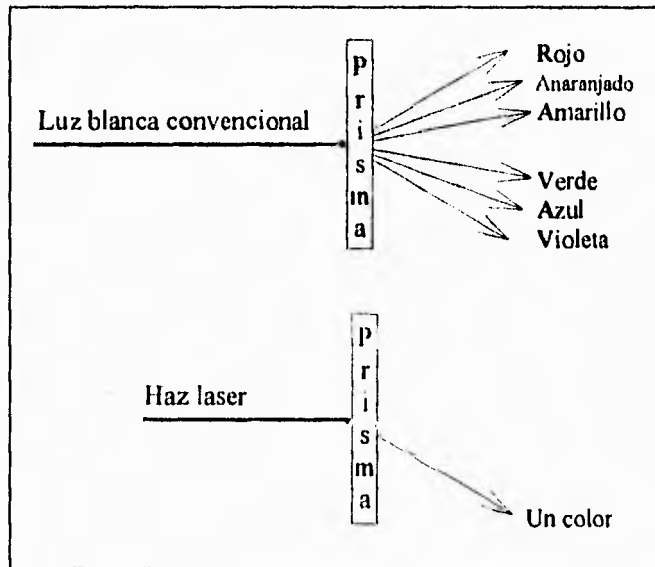


Figura 7 El láser es monocromático.

Difracción y Radiación. La difracción es el fenómeno por el cual la luz se curva alrededor de objetos filosos. Cuando una luz ordinaria se proyecta a distancia, una cantidad sustancial de difracción de luz se produce, lo que conduce a pérdidas de intensidad de luz conforme la distancia a la fuente de luz se incrementa. Una ventaja de los haces láser sobre la luz ordinaria es que el láser produce haces con difracción muy limitada. La luz de baja difracción como esta, a menudo se denomina como *haces colimados*.

Una fuente ordinaria de luz radia en todas las direcciones posibles. En cambio, la salida de un láser es casi una onda plana uniforme cuya divergencia es debida principalmente a los efectos de la difracción (ver figura 9). En un láser bien construido, la salida será tal que tendrá una distribución de fase constante y uniforme a través de la apertura de salida.

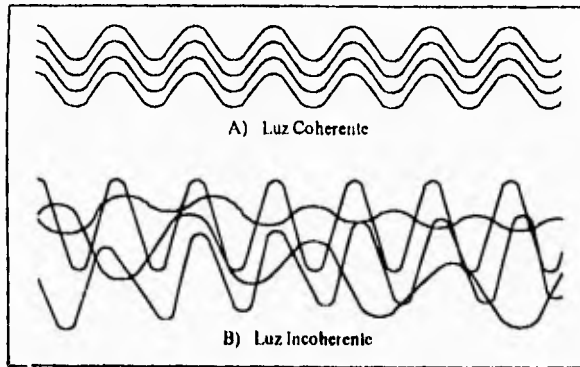


Figura 8 Coherencia.

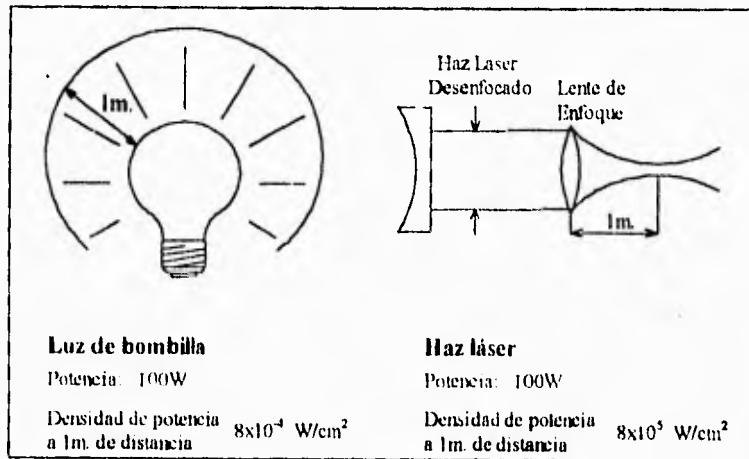


Figura 9 Radiación.

TIPOS DE LÁSERES.

Casi 1000 tipos de láseres han sido desarrollados desde 1960. Una clasificación común de los más importantes, de acuerdo con su medio activo, es la siguiente:

- a) Láseres de gas.
- b) Láseres de estado sólido, y
- c) Láseres de estado líquido,

Es importante mencionar que todos los tipos de láseres operan en uno o dos modos temporales: onda continua CW (el haz se emite sin interrupción) o modo pulsado (el haz se emite periódicamente).

a) LÁSERES DE GAS.

Los láseres de gas generalmente consisten de un tubo ópticamente transparente lleno de un gas sencillo o una mezcla de gases (figura 10), de acuerdo a esto podemos dividirlos, a su vez, en tres subgrupos: de átomos neutros, de iones, y de gas molecular.

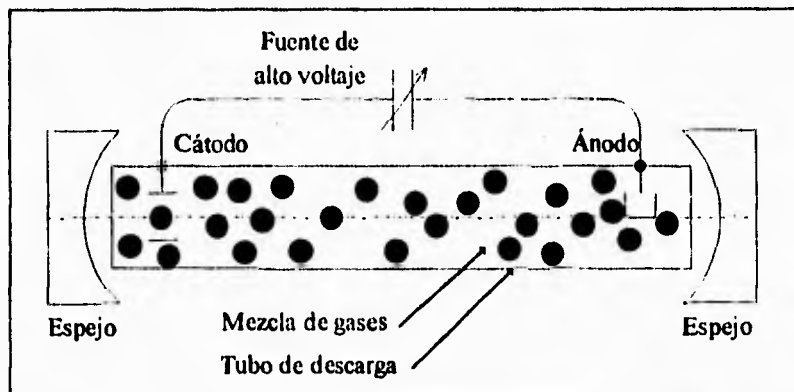


Figura 10 Esquema general de un láser de gas.

Láseres de Átomos neutros. El láser de helio - neón (HeNe) es un láser de gas atómico típicamente neutro. Estos pueden ser sintonizados desde el infrarrojo hasta varias frecuencias visibles, la más común la de longitud de onda de $0.6328 \mu\text{m}$. El enlace entre los elementos ocurre durante una transición electrónica en el átomo de Ne; la

presencia del helio es esencial, debido a que éste es excitado primero por una descarga eléctrica, para después transferir su energía al átomo de Ne a través de interacciones cinéticas. La excitación se realiza por medio de una descarga eléctrica de corriente directa (DC) en un tubo de descarga de baja presión. Generalmente las emisiones son de una potencia máxima de 50 mW. Las áreas de aplicación de los láser de este tipo incluyen la holografía, análisis, alineación, medición, visión y comunicaciones con fibra óptica, las cuales requieren energía direccional de baja potencia

Láseres de gas iónico Los láseres de gas iónico emplean un gas ionizado como el argón (Ar), kriptón (Kr) y xenón (Xe) como medio activo, para producir el haz láser en un rango de 0.5 a 1.0 μm de longitud de onda. La excitación es iniciada por medio de una descarga eléctrica, produciéndose dos estados, en el primero el gas es ionizado, para que después los electrones sean llevados a un estado de excitación. El haz láser resultante puede alcanzar niveles de potencia de hasta varios Watts. Las aplicaciones típicas incluyen cirugías y espectroscopias, las cuales requieren altos niveles de potencia, mayores a los alcanzados con láseres de átomos neutros.

Láseres de gas molecular. Los láseres de este tipo utilizan gas molecular como medio activo, el cual es excitado cambiando su forma de vibrar (modo vibracional). La transición entre los diferentes modos vibracionales produce fotones. Los láseres de monóxido de carbono (CO), de hidrógeno (H) y bióxido de carbono son ejemplos de este tipo.

El láser de bióxido de carbono emite luz con una longitud de onda de 10.6 μm (emisión infrarroja). El medio activo es una combinación de bióxido de carbono, nitrógeno y helio. La excitación del bióxido de carbono se realiza incrementando la energía vibracional de las moléculas. El bombeo se realiza por medio de una descarga eléctrica de corriente alterna o directa (AC o DC respectivamente), donde sólo un pequeño porcentaje de bióxido de carbono es excitado directamente por la descarga. Mucha de la energía eléctrica es absorbida por el nitrógeno, de tal manera que, la gran mayoría de moléculas de bióxido de carbono efectúan su excitación por medio de colisiones con las moléculas de nitrógeno transfiriéndole su energía vibracional (ver figura 12.); esto es una extremadamente eficiente y selectiva transferencia de energía. Siendo el N_2 una molécula diatómica, tiene un sólo modo vibracional; los niveles de energía para el CO_2 son más complicados debido a que es una molécula triatómica, con tres identificables modos vibracionales: el modo simétrico (oscilación simétrica sobre el eje molecular, figura 11a), el modo deformación (dos vibraciones perpendiculares entre sí, sobre un eje perpendicular al eje molecular, figura 11b) y el modo asimétrico (oscilación asimétrica sobre el eje molecular, figura 11c).

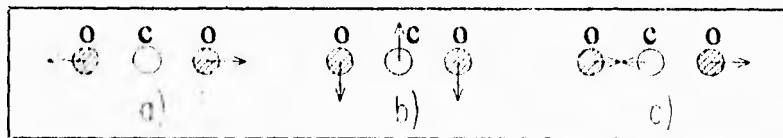


Figura 11 Modos vibracionales.

El estado excitado del N₂ es muy cercano al estado de excitación requerida por el bióxido de carbono (estado 001). Una vez que la molécula de CO₂ es excitada, los electrones pueden liberar energía a través de colisiones con otras moléculas de CO₂ aún en el estado base; estas colisiones disminuyen los electrones excitados a estados de energía intermedia² (ver figura 12). De estos cambios de energía, solo la transformación de electrones del estado 001 al estado 100 libera energía en forma de radiación láser a 10.6 μm, la energía restante entre los estados intermedios y el estado base se pierde a través de transferencia de energía cinética, la cual genera calor en lugar de luz. Las moléculas de CO₂ liberan mucho menos energía calorífica que energía luminosa, por lo que su eficiencia energética es mayor que la de otros tipos de láser. El helio tiene una difusividad térmica muy alta, por lo que al adicionar éste a la mezcla del medio activo, la cantidad de energía liberada a través de calentamiento es extremadamente alta, esta combinación hace del láser de CO₂ una herramienta apropiada para aplicaciones industriales en términos de eficiencia de energía (hasta el 10%) y la alta potencia de salida alcanzable.

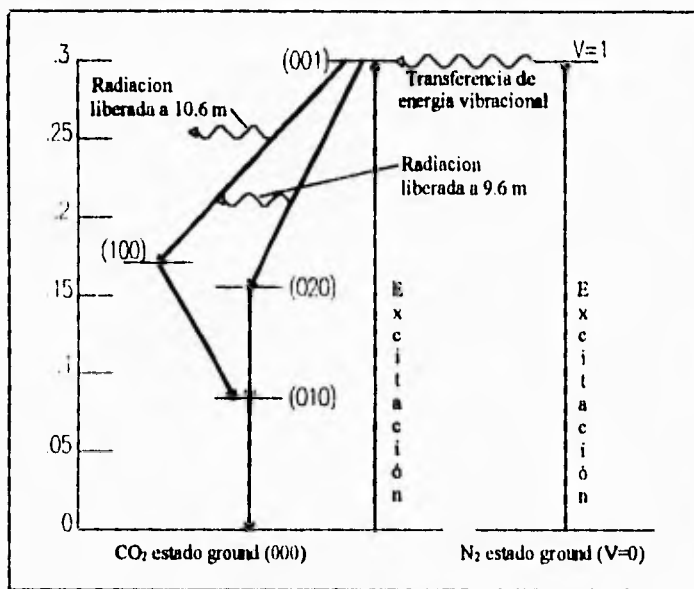


Figura 12 Niveles de energía del CO₂.

Se puede disponer de varias diferencias geométricas en la descarga eléctrica y flujo de gas, lo que contribuye al amplio rango de potencias de láser, desde varios Watts hasta 15 kW. Los láseres de CO₂ de alta potencia generalmente operan con un modo transversal³

² El paso de un estado excitado al fundamental no tiene porque ser directo, sino que puede realizarse pasando por estados energéticos intermedios.

³ Este modo se refiere a la forma transversal del haz, del cual se hablara con mayor detalle en el siguiente capítulo.

mezclado; el contorno del haz puede variar con el tiempo entre varias posibles configuraciones. Los láseres de mediana y baja potencia son más estables, pudiendo mantener un modo transversal Gaussiano. Los láseres de CO₂ son ampliamente utilizados en la industria en aplicaciones de corte, soldadura y tratamiento térmico.

Los láseres de CO₂ pueden ser clasificados de acuerdo al método de flujo del gas. Los tres principales tipos de flujo son:

- *el tubo de descarga sellada,*
- *el de flujo axial y,*
- *el de flujo transversal o cruzado*

El método de flujo determina que tan rápido el bióxido de carbono puede retirarse de la cavidad óptica, para que el nuevo bióxido de carbono pueda introducirse, excitarse y estimularse.

El *láser de descarga sellada* (figura 13a) contiene al medio activo confinado en la cavidad láser, por lo que no se requiere de un suministro de gas o un sistema de tratamiento de gas. sin embargo, debido a que no existe flujo de gas (el CO₂ utilizado no puede ser descargado o reemplazado con nuevo CO₂) la potencia de salida está limitada a 50 W, además su vida útil depende de la disociación de bióxido de carbono en oxígeno y monóxido de carbono.

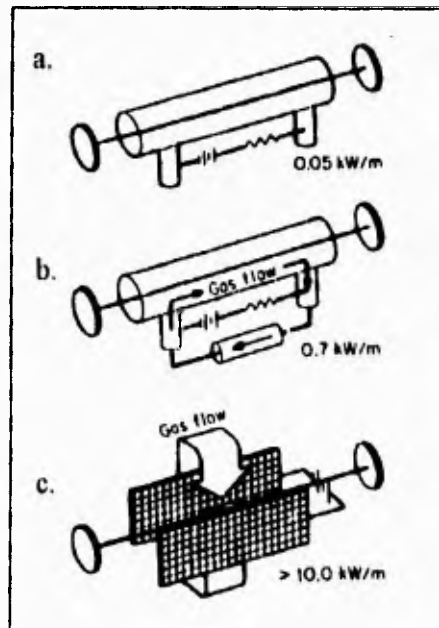


Figura 13 Tipos de flujo, descarga sellada, flujo axial y flujo transversal

El *láser de flujo axial* es el método más utilizado, en éste, el gas fluye a lo largo del eje de la cavidad óptica (figura 13b.), es decir, permite el reemplazo del gas. La potencia de salida llega a ser de hasta 4 kW en onda continua. Para producir un sistema compacto de gran longitud de descarga puede plegarse la cavidad óptica (figura 14).

Los láseres de flujo axial pueden clasificarse de acuerdo con la velocidad del flujo de gas en *flujo a baja velocidad* y *flujo a alta velocidad*. Los láseres con flujo a baja velocidad alcanzan potencias de 50 a 70 W por cada metro de longitud de la cavidad. Las bajas velocidades de flujo provocan que el láser incremente considerablemente su temperatura, y la relativa baja conductividad de la mezcla de gas limita el tamaño del diámetro de la cavidad óptica; el calentamiento de la cavidad provoca distorsiones en la óptica debido a la expansión térmica. Esta distorsión afecta el modo transversal y la estabilidad del haz, sin embargo, mediante un enfriamiento externo del resonador y la óptica, se puede generar un haz con buen ajuste y estabilidad. Los modelos con flujo de alta velocidad, generalmente presentan velocidades de 60 m/s, por lo que las moléculas de CO_2 sólo tienen tiempo para un ciclo de excitación / estimulación antes de salir de la cavidad óptica. Generalmente las potencias de salida son de 600 W por metro de cavidad, alcanzado potencias totales de 6 kW. Debido al enfriamiento convectivo del flujo a alta velocidad, las distorsiones térmicas en la óptica del resonador son minimizadas, y un amplio diámetro de abertura puede usarse para producir modos transversales cercanos en forma a los Gaussianos.

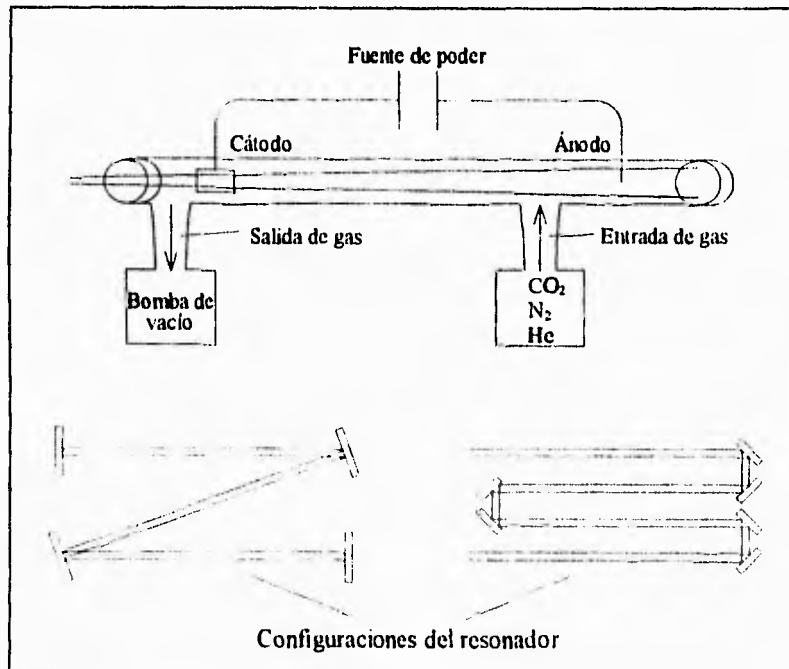


Figura 14 Láser de CO_2 con flujo axial.

El tercer tipo de láser de CO₂ es el de *flujo transversal*, en el cual la mezcla de gases fluye perpendicularmente al eje de la cavidad óptica (figura 15). El flujo de gas se realiza por medio de un soplador y es enfriado por un intercambiador de calor. Los electrodos son colocados en cualquier lado de la cavidad, y con relativamente bajos voltajes mantienen altas descargas de corriente, debido a la pequeña distancia de separación. El haz es generalmente reflejado o plegado (figura 16) varias veces dentro de la cavidad, creando un diseño compacto, el cual pueda proveer salidas de uno a 10 kW por metro de la cavidad y una salida total mayor de 15 kW; sin embargo, la calidad de haz se deteriora a altos niveles de potencia y la salida del haz puede cambiar entre varios posibles modos transversales.

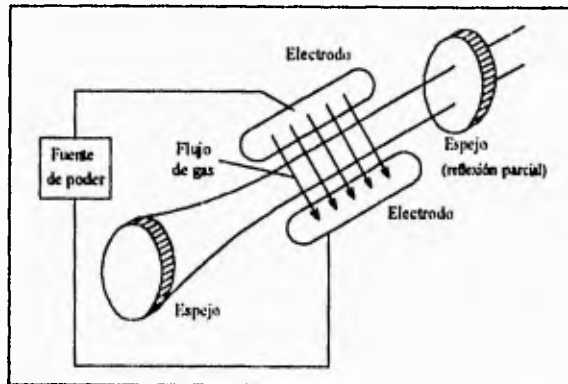


Figura 15 Láser de CO₂ con flujo transversal

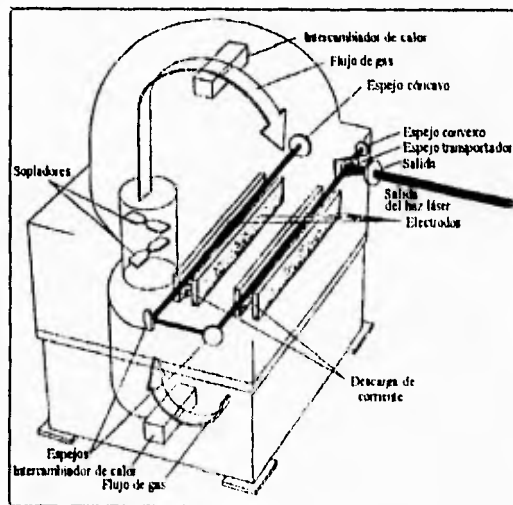


Figura 16 Láser de CO₂ con flujo transversal de alta velocidad

La descarga eléctrica para todos los tipos de láser de CO₂ se realiza por medio de AC, DC o AC/DC. En la mayoría de los láseres de CO₂ se puede producir una salida pulsada, sin embargo, la relación de pulsos con potencia promedio es relativamente baja debido a la limitada capacidad de almacenamiento de energía del medio gaseoso.

En general, el costo del gas es mínimo, excepto el del helio, el cual puede llegar a ser muy caro. La óptica esta hecha de Selenuro de Zinc (SeZn), Arsenuro de Galio (GaAs) o de varias sales (NaCl o KCl). Las sales poseen pobres propiedades higroscópicas.

El **láser excimer** es un tipo de láser de gas que ha ido incrementado su popularidad, recibe ese término originado por "excited dimer" (molécula diatómica excitada), compuesto de dos especies idénticas, las cuales existen solo en un estado excitado. Algunos láseres excimers usan xenón (Xe₂) y fluoruro (F₂) como medio activo, pero la mayoría de estos láseres emplean un complejo excitado (exciplex), el cual consta de un gas noble (grupo 0 de la tabla periódica) y un átomo halógeno (del grupo VII A de la tabla periódica) como medio activo. Los excimers complejos típicos incluyen fluoruro de argón (ArF), fluoruro de kriptón (KrF), fluoruro de xenón (XeF) y cloruro de xenón (XeCl). Estos complejos sólo existen temporalmente cuando el gas noble está en un estado electrónicamente excitado. La unión es muy fuerte pero solo dura algunos nanosegundos. Cuando el átomo de gas noble no es ampliamente excitado, cada molécula del compuesto se disocia en sus componentes elementales, esta disociación es acompañada por la liberación de la energía ligada en forma de fotones. La longitud de onda de salida de los láseres excimer varía de 0.193 a 0.351 μm . en el ultravioleta (ver figura 17).

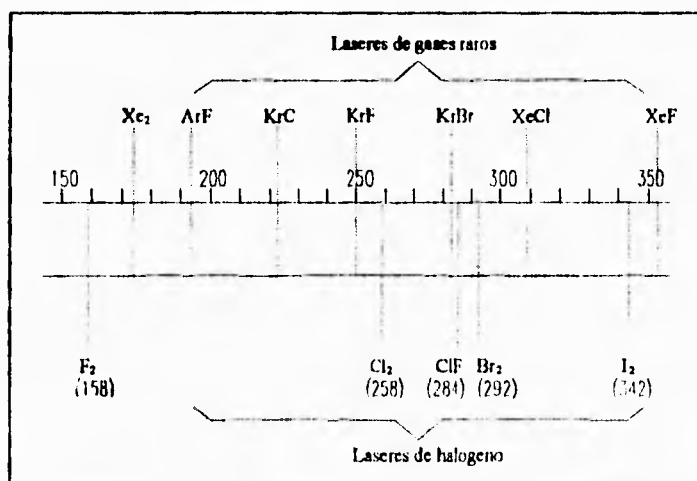


Figura 17 Espectro para diferentes tipos de láseres Excimer

Estos compuestos pueden formarse induciendo el gas noble (Ar, Kr o Xe) del compuesto, a un estado excitado mediante una descarga eléctrica, un haz electrónico, o una combinación de ambos. En el método de descarga eléctrica, una descarga provee la energía

inicial para la excitación del gas noble. La descarga también inicia un proceso de ionización (liberación de electrones) en el átomo de halógeno, el cual libera energía para sostener la excitación de los electrones del gas noble. La energía de descarga del electrón es pequeña (de cuatro a seis electron-volts); consecuentemente, el proceso de ionización es el mecanismo dominante de excitación. En el método de haz electrónico, la alta energía de este haz (1-2 MeV) provoca la ionización de átomos. Los átomos ionizados atraen átomos neutros para formar moléculas ionizadas las cuales pierden algo de energía y llegan a ser excimers. El haz electrónico proporciona suficiente energía para sostener una excitación continua en el gas noble, de manera que la ionización del halógeno no tiene una influencia efectiva en la excitación.

Un excimer generalmente es formado en una cavidad óptica rectangular. El haz de salida se origina desde el resonador con descarga transversal. El espectro de emisión de los fotones lo constituye una ancha banda continua (100-200 Å). Esta banda provoca que la sección transversal estimulada sea pequeña, de manera que se requieren altas concentraciones de excimer para la amplificación. A menudo, todos los gases pueden ser utilizados con un láser excimer sencillo, sin embargo, el láser debe ser acondicionado entre cada gas.

Los láseres excimers producen haces pulsados de alta potencia, con un promedio mayor de 100 W y repeticiones promedio en rangos de 100 pulsos por segundo. El problema de una potencia grande es que el medio activo y la cavidad del resonador se calientan durante el proceso de excitación. Los límites de longitud (L) del láser son de 2-3 m, en caso de ser mayor, toda la energía del haz será absorbida por el excimer sin que se pueda producir el haz láser. Esta pequeña longitud limita la potencia máxima, lo cual hace que el rango de materiales posibles de procesar sea muy parecido al del láser de CO₂. La potencia promedio de un láser excimer bombeado mediante descarga eléctrica, está limitada por la inestabilidad de la descarga, la deshomogenización del excimer, y por los efectos químicos y térmicos del medio. En los láseres de KrF, XeF y XeCl, estos problemas son dirigidos por la rápida y perpendicular conducción de la mezcla de gases a la zona de descarga.

Los láseres excimers son usados para maquinado de polímeros, remover películas de polímero de sustratos metálicos, remover películas metálicas de sustratos poliméricos, micromaquinado de cerámica y semiconductores, y para el marcado de materiales térmicamente sensibles, entre otras aplicaciones. Las características del haz de un excimer lo hacen ideal para la remoción de algunos materiales. La alta energía de cada fotón reduce el tiempo de interacción entre el irradiado y el volumen de material de la pieza de trabajo, por lo tanto, la zona afectada por el calor "HAZ" (heat affect zone) es mínima (menor que la producida por láseres de Itruro de aluminio granate -Nd:YAG y de CO₂) y la precisión es alta. El uso de láseres excimer para corte, barrenado y marcado se ha incrementado desde su desarrollo en los 70's.

Los mecanismos de remoción de material de láseres excimer son diferentes a los de láseres de CO₂ o Nd:YAG. En lugar de remover material a través de fusión o vaporización, donde el material cambia de estado de sólido a líquido y/o a gaseoso (sublimación), lo remueve por ablación, rompiendo los enlaces químicos del material hasta disociarlo en sus componentes químicos; no se presentan fases líquidas o gaseosas del material.

inicial para la excitación del gas noble. La descarga también inicia un proceso de ionización (liberación de electrones) en el átomo de halógeno, el cual libera energía para sostener la excitación de los electrones del gas noble. La energía de descarga del electrón es pequeña (de cuatro a seis electron-volts); consecuentemente, el proceso de ionización es el mecanismo dominante de excitación. En el método de haz electrónico, la alta energía de este haz (1-2 MeV) provoca la ionización de átomos. Los átomos ionizados atraen átomos neutros para formar moléculas ionizadas las cuales pierden algo de energía y llegan a ser excimers. El haz electrónico proporciona suficiente energía para sostener una excitación continua en el gas noble, de manera que la ionización del halógeno no tiene una influencia efectiva en la excitación.

Un excimer generalmente es formado en una cavidad óptica rectangular. El haz de salida se origina desde el resonador con descarga transversal. El espectro de emisión de los fotones lo constituye una ancha banda continua (100-200 Å). Esta banda provoca que la sección transversal estimulada sea pequeña, de manera que se requieren altas concentraciones de excimer para la amplificación. A menudo, todos los gases pueden ser utilizados con un láser excimer sencillo, sin embargo, el láser debe ser acondicionado entre cada gas.

Los láseres excimers producen haces pulsados de alta potencia, con un promedio mayor de 100 W y repeticiones promedio en rangos de 100 pulsos por segundo. El problema de una potencia grande es que el medio activo y la cavidad del resonador se calientan durante el proceso de excitación. Los límites de longitud (L) del láser son de 2-3 m, en caso de ser mayor, toda la energía del haz será absorbida por el excimer sin que se pueda producir el haz láser. Esta pequeña longitud limita la potencia máxima, lo cual hace que el rango de materiales posibles de procesar sea muy parecido al del láser de CO₂. La potencia promedio de un láser excimer bombeado mediante descarga eléctrica, está limitada por la inestabilidad de la descarga, la deshomogenización del excimer, y por los efectos químicos y térmicos del medio. En los láseres de KrF, XeF y XeCl, estos problemas son dirigidos por la rápida y perpendicular conducción de la mezcla de gases a la zona de descarga.

Los láseres excimers son usados para maquinado de polímeros, remover películas de polímero de substratos metálicos, remover películas metálicas de substratos poliméricos, micromaquinado de cerámica y semiconductores, y para el marcado de materiales térmicamente sensibles, entre otras aplicaciones. Las características del haz de un excimer lo hacen ideal para la remoción de algunos materiales. La alta energía de cada fotón reduce el tiempo de interacción entre lo irradiado y el volumen de material de la pieza de trabajo, por lo tanto, la zona afectada por el calor "HAZ" (heat affect zone) es mínima (menor que la producida por láseres de Itruro de aluminio granate -Nd:YAG y de CO₂) y la precisión es alta. El uso de láseres excimer para corte, barrenado y marcado se ha incrementado desde su desarrollo en los 70's.

Los mecanismos de remoción de material de láseres excimer son diferentes a los de láseres de CO₂ o Nd:YAG. En lugar de remover material a través de fusión o vaporización, donde el material cambia de estado de sólido a líquido y/o a gaseoso (sublimación), lo remueve por ablación, rompiendo los enlaces químicos del material hasta disociarlo en sus componentes químicos; no se presentan fases líquidas o gaseosas del material.

b) LÁSERES DE ESTADO SÓLIDO.

Los láseres de estado sólidos emplean iones suspendidos en un medio llamado *matriz cristalina* para producir un haz láser (figura 18). Los iones (también llamados dopantes) proveen los electrones de excitación, mientras que la matriz cristalina propaga la energía entre los iones. Las dos principales clases de iones del medio activo son el cromo (Cr^{3+}) para láseres de rubí y el niobio (Nd^{3+}) para láseres de Itruro de aluminio granate Nd:YAG (Yttrium-Aluminium-Garnet) y Nd:glass. El láser de rubí (figura 19) fue el primero de todos los láseres en construirse. En un principio fue muy utilizado aunque en la actualidad no lo es tanto, dada su baja eficiencia energética y baja potencia.

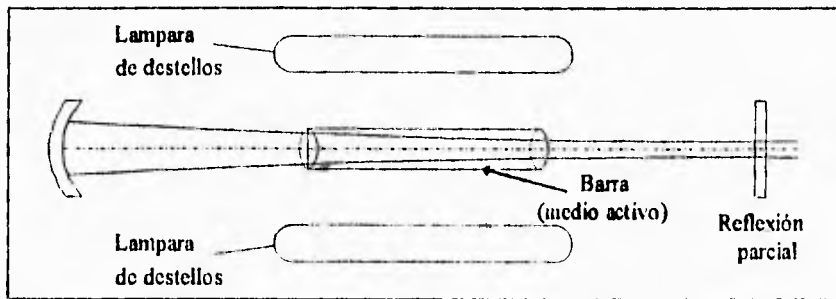


Figura 18 Esquema de un láser de estado sólido.

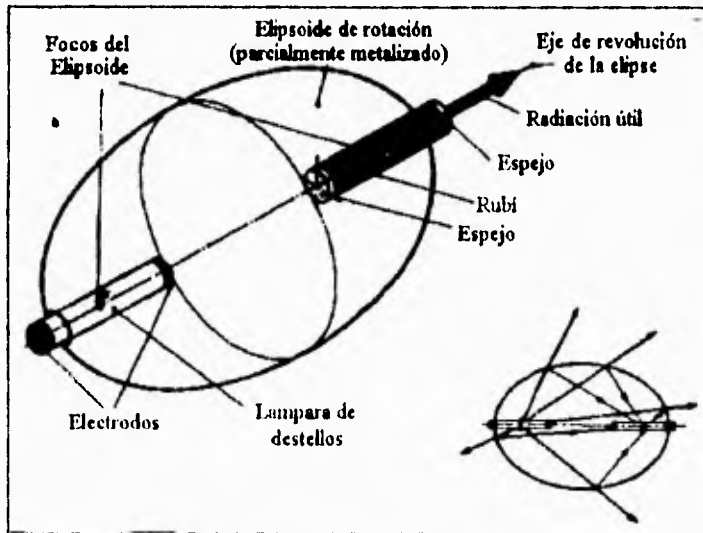


Figura 19 Láser de rubí en un arreglo de elipsoide de revolución.

Los láseres Nd:YAG y Nd:glass son muy similares, tanto en su estructura como por la acción del medio activo. La excitación se realiza mediante bombeo óptico con una lámpara de destellos de kriptón o xenón, obteniéndose una salida con longitud de onda de $1.06 \mu\text{m}$, cerca de la región infrarroja del espectro. El láser Nd:glass utiliza un vidrio que aloja iones de niobio, estas barras de vidrio pueden ser de mayor tamaño que el de los cristales YAG (y de menor costo), solo que las barras de vidrio poseen menor conductividad térmica, lo que limita la operación pulsada de los láseres Nd:glass. Por lo anterior, los láseres Nd:glass se emplean en aplicaciones que requieren baja repetición de pulsos con alta energía (hasta 100 Joules por pulso).

Los láseres Nd:YAG poseen un cristal complejo de Itruro de aluminio con una composición química $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$. El cristal YAG posee una relativa alta conductividad, lo que provee una disipación térmica en la cavidad óptica y permite operaciones en onda continua de algunos cientos de Watts. Cuando se opera en modo pulsado, se pueden tener grandes rangos de pulsación a potencias promedio de 1 kW. El medio activo más empleado en la actualidad son los iones Nd^{+3} los cuales contaminan o dopan (proceso en el cual se añaden impurezas, en cantidades cuidadosamente controladas, a un material, para hacerlo rico o pobre en electrones) un cristal YAG. El cristal YAG es transparente e incoloro, cuando es dopado con aproximadamente 1% de Nd, el cristal adopta un color azulado.

La lámpara de destellos de kriptón requiere de baja corriente para operar con una eficiencia de energía alta, por lo que son empleadas en operaciones de onda continua. Las lámparas de destello de xenón presentan una mejor unión espectral, con los estados energéticos de los iones de niobio, que la presentada por las lámparas de kriptón, por lo que estos pueden soportar las más altas descargas de densidad de corriente requeridas, por operaciones de modo pulsado. La cavidad del bombeo óptico posee una forma elíptica (similar al arreglo de la figura 19), donde la barra de cristal y la lámpara de destello se colocan, cada una, en uno de los focos de la elipse. La distancia entre la barra de cristal y la lámpara de destello se minimiza para que la unión directa entre los dos aumente, además, la luz radiada por la lámpara de destello que no este dirigida a la barra de cristal, es reflejada por las paredes de la cavidad elíptica hacia la barra de cristal. Esta combinación de bombeo directo e indirecto requiere menor suministro eléctrico y una aceptable eficiencia de energía en operaciones de modo continuo y pulsado.

Generalmente se requiere de un sistema de enfriamiento para la operación de láseres Nd:YAG. Para remover el calor y lograr una operación apropiada del láser, se coloca agua afuera de la cavidad óptica, proporcionando a la barra de cristal y a la lámpara de destello con esto, de una camisa refrigerante transparente.

La salida característica de un láser Nd:YAG puede ser alterada al variar la forma de onda de la descarga de bombeo. La eficiencia promedio de estos láseres es del 3%.

c) LÁSERES DE ESTADO LÍQUIDO.

La operación y el efecto de los láseres líquidos son similares al del láser de estado sólido. La diferencia principal radica en su arreglo, el cual es muy similar al de los láseres de gas (figura 20).

El láser líquido consiste de un tubo donde se colocó el líquido que hace la función de medio activo. El líquido consiste de un solvente (principalmente alcohol) al que se le añaden iones, principalmente de "elementos raros" como por ejemplo de samario, terbio y particularmente europio.

Alrededor del tubo láser se colocan lámparas de destello, ya que, similar a los láseres de estado sólido, éste tipo de láser solo puede ser bombeado ópticamente y por ende trabajar en modo pulsado exclusivamente (la operación continua se vuelve casi imposible de realizar dado que la inversión de población es difícil de mantener).

El diseño de estos láseres permite que las frecuencias puedan variarse, por lo que se denominan "sintonizables".

Los avances con respecto a los láseres de estado sólido son que la concentración del líquido (medio activo) puede ser ajustado fácilmente, el calor provocado por la excitación puede ser ampliamente disipado por el constante bombeo. Otra ventaja es que el tamaño de construcción del tubo láser (relacionada a la salida del láser) es teóricamente ilimitado. Los límites en los láseres de estado sólido suelen ser representados por la producción del cristal.

Existen dos desventajas de los láseres líquidos: el elevado incremento de temperatura, el cual conduce a rendimientos relativamente bajos con altas frecuencias de pulso (el rango espectral de estos láseres comprende el espectro visible y parte del espectro infrarrojo y ultravioleta), y las altas pérdidas por refracción en el resonador.

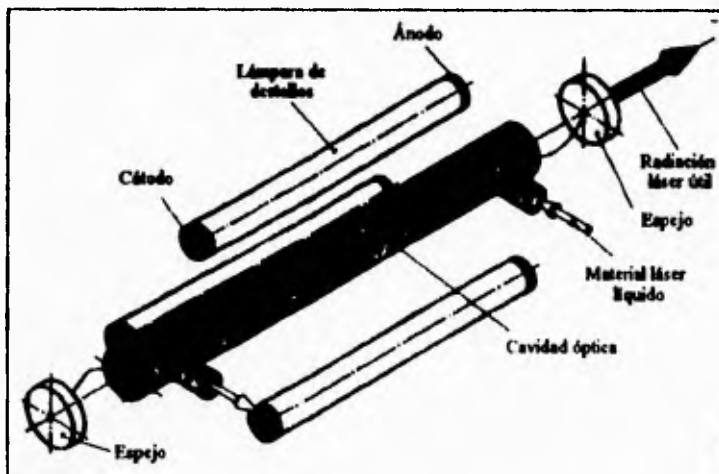


Figura 20 Láser líquido.

Una selección de diversos tipos de láseres se enlistan en la figura 21. En ésta se pueden observar las altas potencias que poseen los equipos, lo cual es la perspectiva actual, sobre todo en el campo del procesamiento de materiales.

APLICACIONES.

Los láseres constantemente han encontrado nuevas aplicaciones, algunas de las más importantes se mencionan a continuación.

PROCESAMIENTO DE MATERIALES (CO₂, Nd y Ar).

Una de las áreas donde los láseres han llegado a ser ampliamente utilizados, es en el procesamiento de materiales. Un haz láser puede utilizarse para tratar térmicamente una capa superficial (poco profunda) de un componente metálico, o fundir y soldar un par de componentes sin introducir suficiente calor como para distorcionarlos. Se pueden hacer cortes estrechos, y se pueden taladrar agujeros. Entre las ventajas sobre técnicas convencionales se encuentra el no requerir afilado de herramientas cortantes, y el uso de un control por computadora para dirigir operaciones de corte y taladrado, entre otras. La principal desventaja (quizá la única) es el alto costo de los equipos. De los principales tipos de operaciones se hablará, con mayor amplitud, en el siguiente capítulo.

COMUNICACIONES (Diodo y Nd:YAG).

La tecnología de las comunicaciones ha sido un campo que representa las aplicaciones exitosas del láser. Las comunicaciones que han tenido un rápido crecimiento en éste sector son la transmisión de datos. La luz láser posee una alta frecuencia; su frecuencia es 100' 000, 000 de veces mayor que la señal de radio más alta de FM, de tal manera que, trabajando un láser con cable de fibra óptica, la transmisión de datos puede incrementarse significativamente. El enlace de comunicaciones a través de pulsos de luz codificados de láser, viajando en fibras del vidrio, es ya utilizado en el sistema telefónico "Chicago Bell". Un cable de 144 fibras puede llevar 40,000 conversaciones telefónicas simultáneas. La luz también ofrece una alternativa atractiva a las microondas para comunicaciones por satélite.

TOPOGRAFÍA (He-Ne y rubi).

Un láser puede usarse como una línea recta en topografía. Se pueden medir distancias al cronometrar el viaje de un pulso de luz, del láser a un espejo y el regreso a un detector.

MEDIO ACTIVO	TIPO	DURACIÓN DE PULSO	POTENCIA	LONG. DE ONDA	PRIMERA DEMOSTRACIÓN	BOMBEO
Rubi	cristal	20 nseg	10 MW	694 nm	1960	Lámpara
Helio-Neón	gas	CW	3 mW	633 nm	1960	Descarga
Nd-glass	vidrio	40 pseg	1 TW	1.06 μ m	1961	Lámpara
Nd-YAG	cristal	15 nseg	10 MW	1.06 μ m	1964	Lámpara
Diodo	semiconductor	CW	100 mW	900 nm	1962	Eléctrico
Nitrógeno	gas	6 nseg	500 kW	337 nm	1963	Descarga
Cianuro de hidrógeno	gas	1 μ seg	10 W	337 μ m	1964	Descarga
Iones de Argón	gas	CW	10 W	515 nm	1964	Descarga
CO ₂	gas	CW	1 kW	10.6 μ m	1964	Descarga
Tintas	líquido	5 nseg	50 kW	450-900 nm	1966	Láser pulsado
Tintas	líquido	1 μ seg	1 MW	450-900 nm	1967	Lámpara
Tintas	líquido	CW	100 mW	450-900 nm	1969	Láser CW
Hidrogeno molecular	gas	2 nseg	1.5 kW	160 nm	1970	Descarga
Fluoruro de metilo	gas	CW	10 W	1.06 μ m	1970	Láser

Figura 21 Características de algunos tipos de láseres. Las cantidades mostradas solamente sugieren las capacidades promedio de cada tipo de láser en la actualidad.

APLICACIONES MÉDICAS (CO₂ y Ar).

La ciencia médica es uno de los primeros campos en reconocer el potencial del láser y en tomar ventaja de esto. El primer uso clínico fue en cirugía ocular, ya que las cualidades especiales del láser proveen de una herramienta valiosa para la unión de retinas, el cual es un procedimiento de cirugía complicado. Un haz láser puede utilizarse para sellar capilares en una capa superficial poco profunda, sin afectar tejidos más profundos. Lo anterior puede realizarse mientras, sin dolor, se vaporiza un tumor de la superficie o se corta un órgano. El láser es empleado en la actualidad en un gran número de procedimientos de cirugía ocular, incluyendo la fotocoagulación, el glaucoma y la remoción de cataratas. Otras aplicaciones médicas son cirugías regulares, endoscopia, fotorradiación e investigaciones.

HOLOGRAFÍA (He-Ne y Ar).

Las fuentes del láser permiten la producción de imágenes tridimensionales. Las vistas holográficas de objetos microscópicos se realizan ahora por medio de avanzados láseres de rayos X.

SEPARACIÓN DE ISÓTOPOS Y ESPECTROGRAFÍA (Varios).

La separación de isótopos y espectrografía se refiere a la detección, separación e investigación de átomos y moléculas, por medio de las frecuencias de luz que absorben de las fuentes del láser.

APLICACIONES MILITARES (Nd y CO₂)

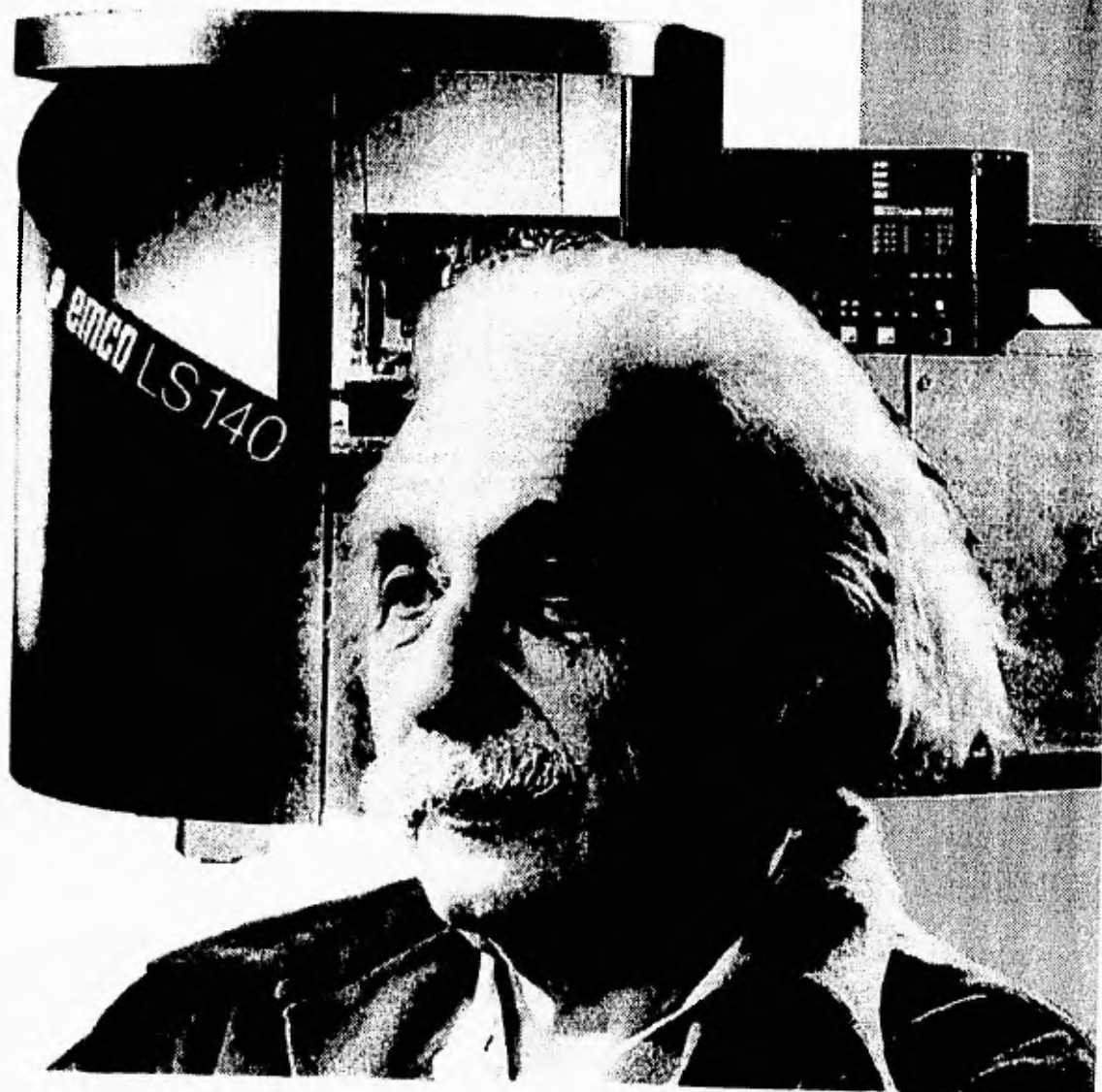
Las aplicaciones militares incluyen el hallazgo, indicación y destrucción de blancos. Dirigiendo un haz láser a un blanco y tomando el tiempo que se toma en reflejarse de regreso, el personal militar puede determinar la distancia al objetivo. También, se han desarrollado armas de defensa, antisatélite y antimisil.

APLICACIONES EN LA INFORMACIÓN

Pequeños láseres son utilizados en aparatos de impresión de imágenes, y en discos que permiten la reproducción y grabación de grandes capacidades de audio, video y otros datos.

CAPITULO

3



III. PROCESAMIENTO DE MATERIALES.

PARÁMETROS QUE INTERVIENEN EN LOS PROCESOS POR LÁSER.

La física del procesamiento láser es muy compleja. Un diagrama del balance de energía se muestra en la figura 22. Existen pérdidas por dispersión y reflexión en la superficie de la muestra, mientras que el calor difundido en el volumen del material, provoca cambios de fase, fusión y/o vaporización.

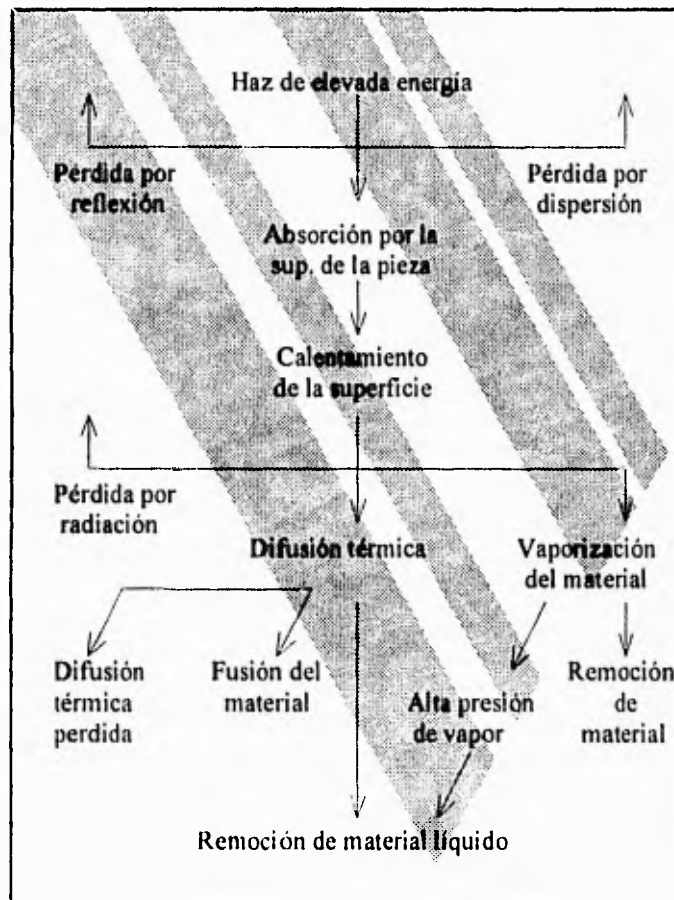


Figura 22 Balance de energía. Se ilustran los efectos de un haz que incide en la superficie de un material

Para realizar con láser procesos de buena calidad es necesario determinar los parámetros involucrados en éstos. La figura 23. muestra un diagrama causa-efecto, agrupando los factores en: material, haz láser, enfoque, gas de proceso y medio.

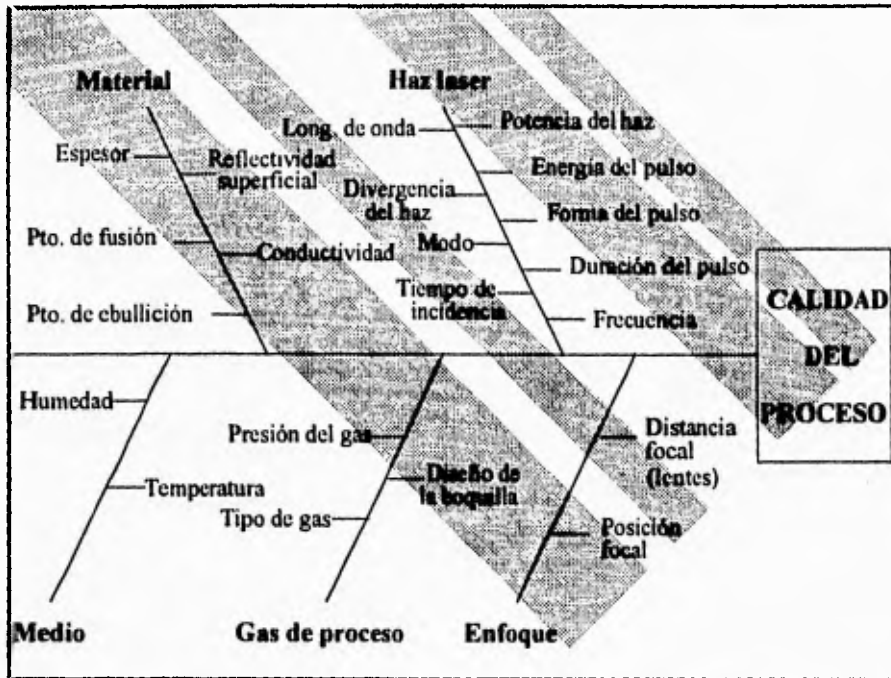


Figura 23 Diagrama Causa-Efecto. Se muestran los parámetros que afectan la calidad de los procesos

MATERIAL

Las propiedades del material juegan un papel importante al evaluar la posibilidad de procesar una pieza, ya que determinan si el láser será reflejado, absorbido y/o transmitido. Las propiedades más significativas son las siguientes:

1. Las propiedades que afectan directamente la manera en la cual la luz es absorbida por el material son: las características superficiales del material, la reflectividad de la superficie a una longitud de onda en particular (figura 24), y el coeficiente de absorción del material.

En lo que se refiere a la incidencia del haz y su transferencia de energía al material, debemos considerar que sólo una parte de la energía incidente se transmite al interior, ya que parte de ella es reflejada por la superficie del material.

La potencia que se transmite (P_t) al material se relaciona con la potencia incidente (P_i) mediante el coeficiente de acoplamiento C .

$$P_t = C \times P_i$$

En el caso de que la superficie sea pulida, se tiene para el coeficiente de acoplamiento C , la expresión $C = 1 - R$, donde R es el coeficiente de reflexión del material para la longitud de onda de la radiación incidente.

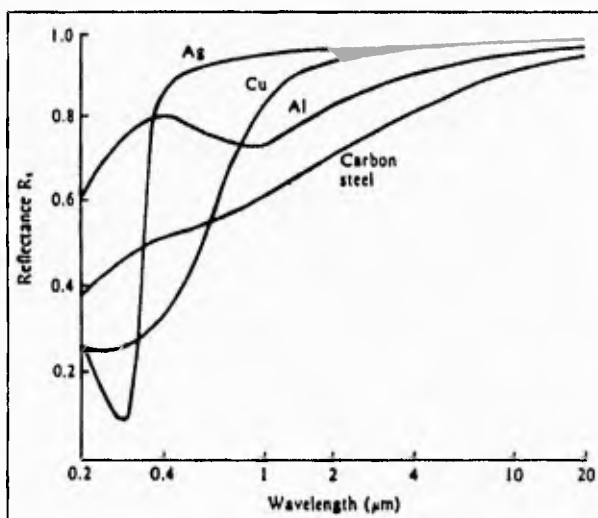


Figura 24 Reflexión de algunos metales a diferentes longitudes de onda.

Para que el material pueda ser tratado mediante el haz láser es preciso que la potencia transmitida sea absorbida por el mismo, dando lugar a un aumento de temperatura, por lo que el coeficiente de acoplamiento de un material es un factor que también depende de ésta (figura 25).

Finalmente indicaremos que, el coeficiente de acoplamiento depende del grado y de la dirección de polarización del haz cuando este incide oblicuamente sobre la superficie del material. Este hecho tiene cierta importancia para los metales.

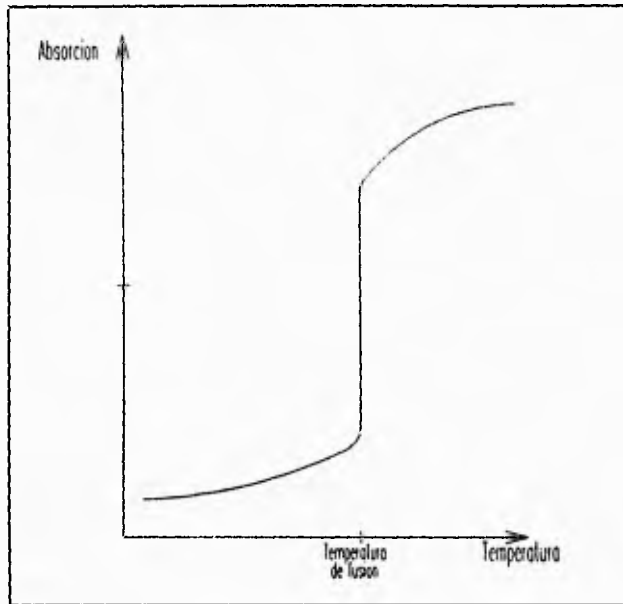


Figura 25 Curva típica que relaciona la absorción (coeficiente de acoplamiento) de los metales con su temperatura.

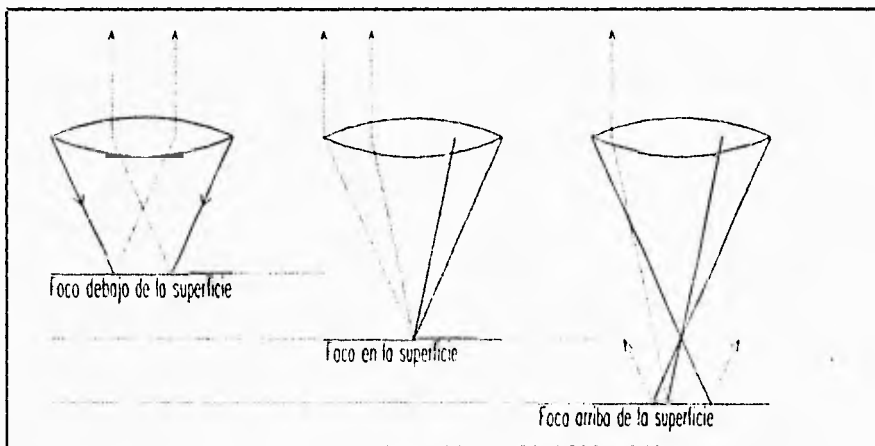


Figura 26 Reflexión de la luz a diferentes posiciones del punto focal.

Las últimas investigaciones muestran que:

- Algunos materiales pueden reflejar una gran cantidad de luz de regreso a la cavidad del láser, incrementando la potencia (figura 26).
- El incremento de potencia depende de la reflectividad de la pieza de trabajo.
- El incremento de potencia conduce a operaciones de proceso no homogéneas.
- La rugosidad disminuye dicho incremento de potencia.
- Cuando el punto focal está debajo de la superficie del material, el incremento de potencia es mayor.

2. Las propiedades que afectan el flujo de calor en el material involucran a la conductividad térmica y a la difusividad. En general, un material con alta difusividad térmica aceptará y conducirá energía térmica muy rápidamente.

Una vez que la energía de la onda ha sido absorbida por el material, se produce un aumento de su temperatura. Este aumento no se limita a las zonas donde incide el haz sino que se difunde hacia las zonas adyacentes.

3. Las propiedades relacionadas con la cantidad de energía requerida para provocar un cambio de fase deseado, como fusión o vaporización, incluyen a la densidad, el calor específico y calores latentes.

Los fenómenos físicos que ocurren cuando el haz láser de alta potencia incide e interacciona con una superficie absorbente pueden ser observados en la figura 27.

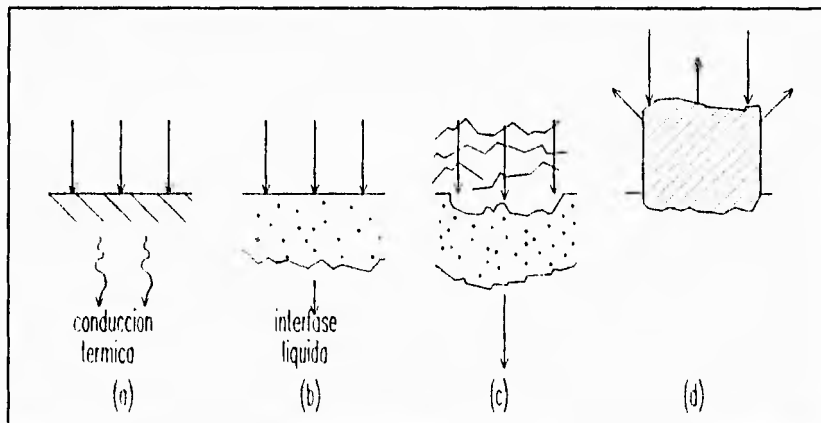


Figura 27 Fenómenos físicos que ocurren al incidir un haz láser de alta potencia en una superficie absorbente. (a) Absorción y calentamiento; (b) Fusión; (c) Vaporización; (d) Producción de plasma.

El progreso del mecanismo de absorción de calor y conducción, fusión y vaporización depende de la densidad de energía y del tiempo de interacción; si la intensidad del haz láser es muy alta, una pluma de plasma se forma en o cerca de la superficie del material, provocando pérdidas de absorción y dispersión, además de producir riesgos operacionales debido a la emisión de una luz brillante muy intensa.

ENFOQUE.

La luz emitida por un láser se separa (diverge), por lo que requiere ser concentrada de nuevo, e incluso aún más, para aumentar la densidad de potencia en un sólo punto (*punto focal* - área de diámetro pequeño), por lo tanto, entre menor sea el punto focal mayor será la densidad de potencia.

Lentes. Los componentes de transmisividad óptica (lentes) dependen de la refracción de la luz que pasa a través de ellos. La refracción de la luz depende de la forma de la lente y del índice de refracción (medida de cuanto curva, detiene o frena el material a la luz que pasa a través de él).

Las lentes son clasificadas como positivas o negativas. Las lentes positivas desvían rayos paralelos de manera que converjan; las lentes negativas desvían rayos paralelos de manera que diverjan (figura 28.)

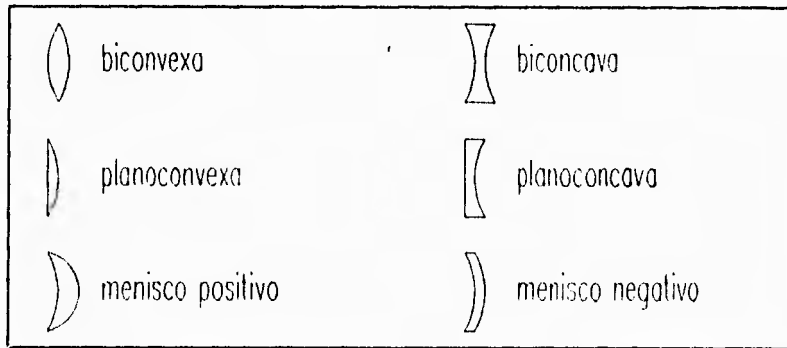


Figura 28 Lentes positivas: biconvexa, plano convexa y de meniscos positivos, y lentes negativas: biconcava, planoconvexa y de meniscos negativos.

Si las lentes no son bien diseñadas, pueden presentar *aberraciones*, con lo que los rayos que llegan paralelamente a la lente, no convergen en un punto único, sino que sufren una dispersión alrededor del mismo. La consecuencia inmediata de este hecho es una disminución de la densidad de potencia obtenida en el punto focal, al aumentar la zona irradiada. Los tipos de aberraciones que afectan la focalización del haz son:

- a) *esférica*, que produce que los rayos no se reúnan en un punto, sino que originen una superficie envolvente, llamada *curva cáustica*;
- b) *astigmatismo*, formación de dos imágenes paralelas en lugar de un punto;
- c) *de coma*, en la que la imagen toma aspecto de cola de cometa;
- d) *cromática*, que es la que se produce cuando al entrar sólo luz blanca en el sistema las radiaciones monocromáticas que la componen no se desvían por igual.

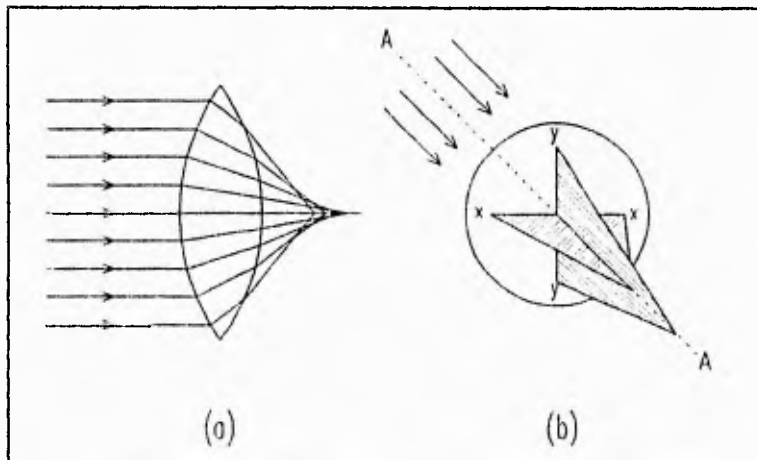


Figura 29 Aberraciones. (a) esférica y, (b) astigmatismo.

La aberración de astigmatismo y coma son propias de haces luminosos que no inciden de forma perpendicular a la lente. Este caso no suele producirse en nuestro campo de aplicación.

La aberración esférica es la de mayor importancia al considerar la focalización de un haz coaxial al eje óptico, por una lente o un sistema de lentes convergentes, operación frecuentemente realizada en la mayor parte de aplicaciones industriales.

Para seleccionar las lentes de un sistema láser, es necesario conocer las características inherentes a éstas, de acuerdo con su forma y material de fabricación.

Las formas de lentes positivas comúnmente empleadas por su economía son las plano-convexas, que se emplean principalmente donde el punto focal y las aberraciones esféricas no son críticas; las lentes de meniscos positivos reducen las aberraciones esféricas, logrando menores puntos focales. Las lentes esféricas son, quizás, las más costosas por conseguir menores aberraciones y puntos focales, éste diseño es particularmente útil en corte.

En la actualidad, el costo de las lentes fluctúan entre 400 y 1200 dólares para los diseños antes mencionados.

El índice de refracción depende de la naturaleza del material y de la longitud de onda de la luz, por lo que es importante una selección apropiada de materiales. Una tabla de regiones espectrales, a las cuales transmiten diversos materiales, puede observarse en la figura 30.

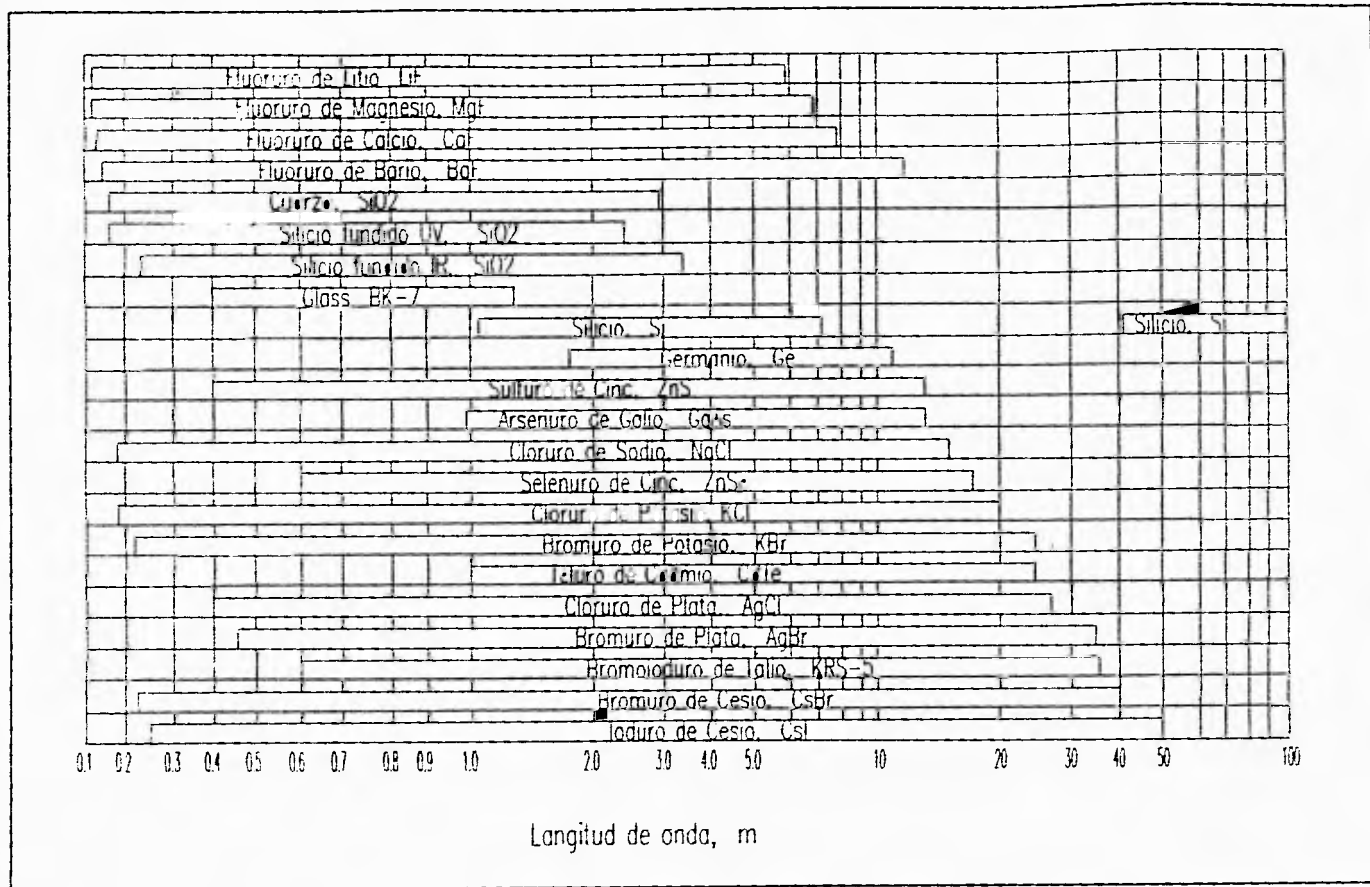


Figura 30 Regiones espectrales a las cuales, diversos materiales ópticos transmiten adecuadamente.

Los materiales ópticos están limitados por su higroscopia, por sus inapropiadas propiedades mecánicas y por sus coeficientes de absorción, éste último, por muy pequeño que sea conduce a la destrucción de la lente debido a los haces de elevada energía y al enfriamiento limitado; existe enfriamiento por agua, en los bordes de las lentes en materiales higroscópicos, y enfriamiento por aire, de cualquier manera la conductividad térmica es pobre, el enfriamiento no es suficiente.

Las lentes de Irtran tienen una transmitancia del 85-90% a una radiación de 10 μm pero presentan un relativo bajo nivel de apertura (relación entre el diámetro de la lente y su distancia focal). Las lentes revestidas de germanio poseen una transmitancia del 95%, son consideradas bastante estables en condiciones ambientales normales de laboratorios e industrias. Las lentes de KCl y NaCl a pesar de poseer el mayor nivel de apertura presentan dificultades por la absorción de humedad y otros vapores, los cuales podrían hacerlo poco práctico en aplicaciones industriales; este tipo de lentes suelen ser las más económicas del mercado. Las lentes de GaAs poseen un terminado óptico permanente de alta calidad, y son consideradas lo mejor en materiales semiconductores contando con un alto nivel de apertura (100 W/cm^2) pero es mucho más cara que cualquier otra lente.

Distancia focal. La distancia entre la lente y el punto focal, y la localización del punto focal son dos factores a considerar muy importantes. Cuando el haz entra a la lente, se logra enfocar en un punto infinitamente pequeño; en la práctica, el haz virgen experimenta difracción y tiene cierta divergencia, así que, el haz es enfocado a un "cuello"¹ con diámetro y longitud determinados; la distancia donde el cuello no cambia apreciablemente se conoce como *espesor de foco*, ver figura 31.

En general, las lentes con distancia focal grande, poseen un espesor de foco grande. El punto focal mínimo puede determinarse con la siguiente ecuación:

$$w = \frac{8 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot D_i}$$

donde w es el diámetro del punto focal (mm.), λ es la longitud de onda del haz (mm.), f es la distancia focal (mm.), y D_i es el diámetro del haz (mm.). El espesor del foco puede estimarse de la siguiente manera:

$$\Delta f = \frac{8 \cdot \lambda}{\pi} \left(\frac{f}{D_i} \right)^2$$

donde Δf es el espesor de foco (mm.)², ver figura 30. Como regla, para obtener un espesor de foco grande se requiere de un lente con distancia focal grande y un haz de baja divergencia.

¹ El diámetro del punto focal no tiende a cero, dado que existe un límite hasta el cual el haz puede ser enfocado, a éste se le conoce con el nombre de "límite de difracción".

² Se han desarrollado otros modelos que involucran el ángulo de divergencia total θ en radianes, $w = f \cdot \theta$.

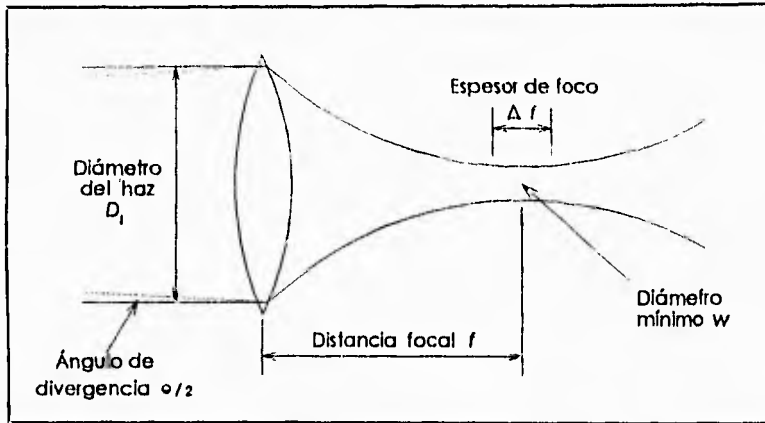


Figura 31 Diámetro de punto focal y espesor de foco.

Posición del punto focal. La posición del punto focal es la distancia perpendicular de la superficie de la pieza de trabajo a el punto focal; los efectos que se presentan al variar dicha posición son:

- diferente diámetro de punto focal, lo que conlleva a una variación en la densidad de potencia en la superficie del material. Diferentes efectos se presentarán en el material de acuerdo con el proceso de manufactura deseado (figura 32).
- variación en la reflexión de la luz por la superficie de la pieza de trabajo (figura 26),
- variación en la reflexión interna (figura 33),
- Ancho y profundidad de superficie de interacción diferentes.

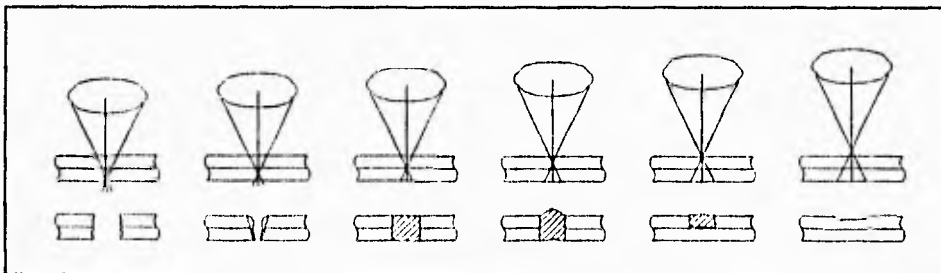


Figura 32 Efectos del enfoque (posición focal).

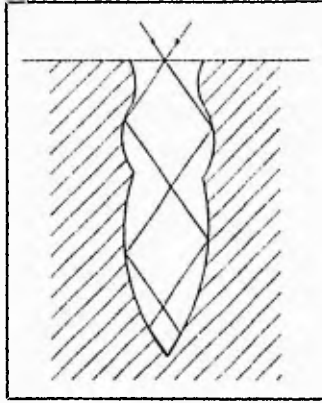


Figura 33 Ilustración de las múltiples reflexiones internas.

HAZ LÁSER.

Longitud de onda y divergencia. La longitud de onda es la característica de longitud espacial asociada con un ciclo de vibración para un fotón en el haz láser; ésta depende del correcto diseño del resonador óptico.

La selección de los accesorios ópticos como lentes, espejos, polarizadores, y ventanas depende de la longitud de onda del láser.

El diámetro del haz láser normalmente se incrementa con el aumento de la distancia del láser debido a la *divergencia* del haz. La *divergencia* del haz se expresa como un ángulo (en miliradianes), representando el incremento del diámetro del haz por cada unidad de distancia que viaje éste (figura 31); éste puede ser utilizado para predecir el diámetro mínimo del haz, que es posible de alcanzar cuando se enfoca con lentes. Se puede apreciar que el diámetro y la divergencia del haz depende de la potencia de salida promedio del láser. La divergencia del haz, en láseres de alto desempeño, se incrementa con la potencia (en general, se recomienda trabajar con la menor divergencia posible).

Modo longitudinal. Para facilitar la comprensión de este aspecto la explicación se realizará en base a un ejemplo.

Una cuerda atada (fija) en un extremo, es tratada de hacer vibrar mediante movimientos en el otro extremo (figura 34a).

Al comienzo, la cuerda permanece en reposo. Solo si la frecuencia se incrementa (movimientos de ascenso y descenso rápidos) podremos ver que una vibración se forma en el *punto nodal* (figura 34b), el cual se encuentra exactamente en donde esta sujeta la cuerda.

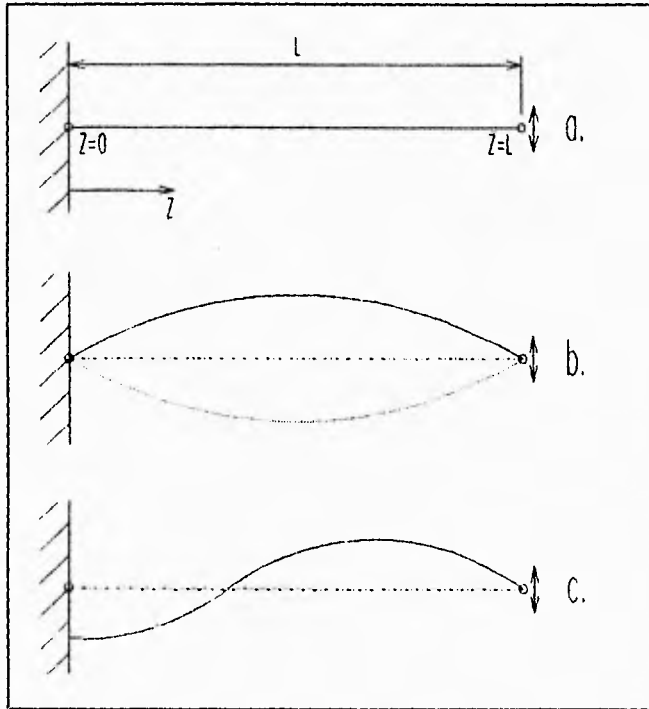


Figura 34 La cuerda necesita para vibrar un punto fijo: punto nodal.

La vibración mostrada en la figura 34c no es posible que se lleve a cabo, ya que la cuerda esta fija en el punto $Z=0$. Para *conservar* la vibración de la cuerda es necesario que el punto de fijación de la cuerda se encuentre donde comience o termine una onda.

El proceso en un resonador óptico es similar al de la cuerda, solo que la fijación de la onda (cuerda) se encuentra en la cara de los espejos, a una distancia L entre dichos espejos (ambas superficies de los espejos pueden ser comparadas a los puntos nodales de la cuerda del ejemplo).

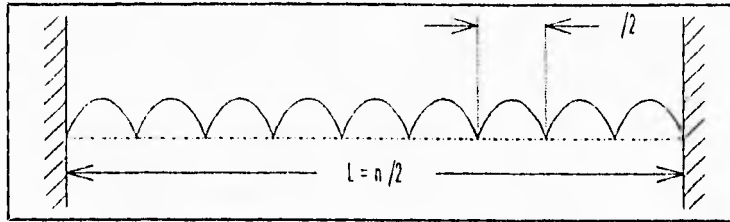


Figura 35 Resonador. Sus paredes (espejos) pueden ser comparadas con planos nodales. Debido a la reflexión en el resonador, existen complicadas interferencias: modo longitudinal.

De lo anterior podemos concluir que, las ondas pueden conservar la vibración (resonar) en la dirección del eje del resonador, únicamente en aquellas longitudes de onda que en un recorrido completo del resonador, $2L$, avanzan un número entero de longitudes de onda, $n\lambda$, donde λ es el valor de la longitud de onda. Lo anterior es lo que se conoce como **modos longitudinales o axiales**, donde cada modo longitudinal corresponde a una longitud de onda.

La longitud de onda de un láser está en función de la longitud del resonador o, dicho de otra forma, la longitud del resonador debe estar de acuerdo con la longitud de onda de la radiación láser.

Modo transversal. Las ondas luminosas pueden propagarse diagonalmente con respecto al eje del resonador (figura 36), por lo que las vibraciones falsamente perpendiculares se distribuyen en un plano x-y.

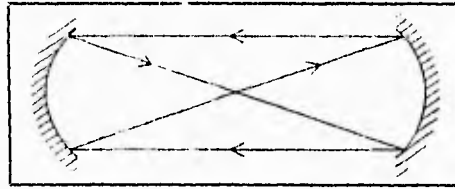


Figura 36 Ejemplo de un rayo autoreplicante excéntrico que incrementa el modo transversal.

La unión de ondas que viajan coaxial y excéntricamente al eje del resonador constituyen el modo transversal del haz, también denominado modo electromagnético transversal " TEM_{xy} ", y mediante éste podemos conocer como es la distribución de energía a través de la sección transversal del haz. Los modos poseen un subíndice X e Y que indican el número de brechas (gaps) o áreas de baja energía dentro de la sección transversal del haz, en dirección X e Y .

Si la radiación de un láser fuera proyectada por un resonador de espejos redondos a una pantalla distante, lo que veríamos sería la siguiente distribución de energía de acuerdo con el tipo de TEM_{xy} :

TEM_{xy}	$X=0$	$X=1$	$X=2$
$Y=0$			
$Y=1$			
$Y=2$			

Figura 37 Distribución de energía de acuerdo al tipo de TEM.

Los principales modos transversales son:

- 1) TEM₀₀, *Gaussiano*. El haz de este tipo muestra un denso círculo de energía, el cuál se concentra hacia el centro. El término Gaussiano es empleado para describir el incremento de densidad de energía hacia el centro (en los haces de alta calidad éste índice de cambio se aproxima a una curva de distribución Gaussiana); éste modo experimenta la menor pérdida de energía por difracción al tener una mínima divergencia, por lo que puede ser enfocado en el punto más pequeño posible.
- 2) TEM₀₁, *Emisión de resonador inestable. Dona*: Este término nada científico sirve para describir la salida de un láser común, el cuál presenta una distribución de energía circular ahuecada al centro. A pesar del nombre, los láseres con éstas cavidades pueden operar establemente; ésta salida también puede ser identificada como TEM₀₁. El modo TEM₀₁ es atractivo para los láseres de CO₂ porque ofrecen buena calidad de haces, aún cuando requieren mayor energía del medio activo que los Gaussianos. Las potencias de salida con un resonador inestable son de 0.50 a 0.67 la potencia de un Multimodo. El diseño de un resonador inestable también permite el uso de espejos metálicos de reflexión total, los cuales pueden manejar altos niveles de potencia óptica.
- 3) TEM₀₀, *Multimodo*. Este es un término general para describir una combinación de modo Gaussiano y dona, juntos con otros tipos más complejos. La sección transversal de un haz de energía multimodo generalmente es un círculo denso, pero difiere al tipo Gaussiano en que no hay ningún incremento total de energía hacia el centro. El denso círculo de salida justifica el uso de la nomenclatura TEM₀₀, aunque éste puede confundirse con el modo Gaussiano (figura 38).

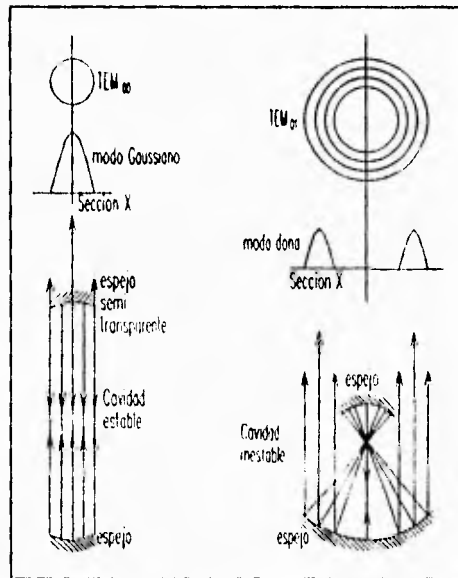


Figura 38 Modos transversales principales.

Modo temporal. Los láseres pueden operarse en modo de onda continua (CW) o modo pulsado; En modo de onda continua el haz se emite sin interrupción; en modo pulsado, el haz se emite periódicamente, a través de este proceso se pueden generar pulsos de duración corta a elevada potencia desde niveles menores de energía eléctrica continua (figura 39).

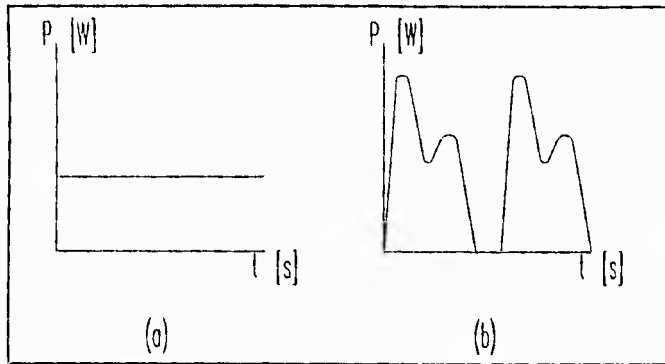


Figura 39 Modo de operación, (a) Onda continua CW; (b) Modo pulsado.

Existen dos formas de generar pulsos:

- Actuando sobre el bombeo.

Cuando el bombeo es interrumpido y vuelve a iniciarse poco después, repitiéndose el proceso a la frecuencia adecuada, obtendremos un láser cuya salida consiste en un tren de pulsos de potencia superior a la que tendría el mismo láser trabajando en continuo.

- Actuando sobre el factor de calidad de la cavidad resonante.

La técnica consiste básicamente en la introducción de un obturador de conmutación rápida dentro del resonador.

Potencia del haz. La potencia de salida (potencia generada en el resonador) es la característica básica de todo láser. En general, las más altas potencias en onda continua se alcanzan con láseres de CO_2 , mientras que los láseres Nd:YAG proveen las mayores potencias en operación pulsada. La cantidad de potencia láser requerida está determinada por las características del material, las cuales ya fueron mencionadas.

Energía del pulso, duración y frecuencia. En algunas máquinas, estos parámetros pueden ser variados en forma independiente, pero en otras máquinas son interdependientes, de tal manera que el cambio de uno requiere el cambio de otro. La potencia máxima que el láser entrega en un pulso está relacionada a la energía del pulso y a la duración de éste, de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_p = \frac{E}{D}$$

donde P_p es la potencia máxima en watt (W), E es la energía del pulso en joules (J), y D es la duración del pulso en segundos (s).

Por ejemplo, para remover una gran cantidad de material, se utiliza un gran pico de potencia para alcanzar la presión de vapor requerida. Se recomienda que la potencia máxima se obtenga incrementando la energía del pulso manteniendo constante la duración de éste. Generalmente, si se realizan operaciones con pulsos de duración prolongada se producirá un exceso de fundición en el material; seleccionando la duración de pulso apropiada, se conseguirán pequeñas zonas afectadas por el calor, HAZ.

Densidad de energía. Es un factor importante a considerar, ya que es la concentración de energía en la superficie del material. Se define como la potencia del haz sobre el área del punto focal.

$$I_0 = \frac{P_p}{A}$$

donde A es el área del punto focal (cm^2) e I_0 la densidad de energía.

La relación que involucra la energía del pulso, la densidad de energía, el área del punto focal y la duración del pulso se presenta a continuación:

$$E = I_0 \cdot A \cdot D$$

por otra parte, la potencia de energía media, la cual está limitada por la capacidad de suministro de energía eléctrica, es igual a la energía emitida por el láser en un segundo:

$$P_0 = E \cdot R$$

donde P_0 es la potencia media de salida (W) y R la frecuencia en hertz (Hz)

Forma del pulso. La capacidad de remoción de material por medio de pulsos depende del perfil temporal de éstos (*forma del pulso*); la forma del pulso involucra el uso de una serie de escalones rectangulares (figura 40) por ejemplo, formas pasivas y activas.

En la forma de pulsos pasivos, se divide un pulso corto en muchos componentes, para después recombinarlos con una atenuación apropiada de cada componente, mientras que en la forma de pulsos activa, se emplea un obturador con un aumento de tiempo más corto que la longitud del pulso requerido. Si un pulso grande incide en el obturador, la transmisión se controla de tal manera que produce el contorno apropiado.

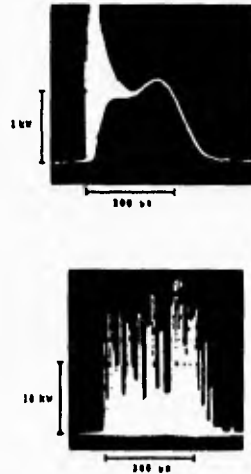


Figura 40 Formas de pulsos.

MEDIO.

Los factores del medio, como la temperatura, humedad, polvo, vapor de aceite y vibración (debida al maquinado), pueden afectar el desempeño de la óptica. En aplicaciones láser de alta potencia, es muy importante que ningún vapor de aceite ni polvo, se sitúen en la superficie de los elementos ópticos, de lo contrario se producirá un aumento de temperatura. Debido a que la absorción de radiación en materiales, se incrementa con la temperatura, se puede provocar daño o destrucción total del sistema óptico.

GAS DE PROCESO.

En la mayor parte de los procesos con láser se utilizan gases de aporte. Generalmente se trata de un chorro de gas con dirección coaxial al haz láser (utilizando para ello dispositivos que permiten además el enfoque del haz mediante un sistema óptico colocado en su interior), el cual protege la(s) lente(s) del vapor y polvo generados durante el proceso. En algunas aplicaciones es preferible un flujo excéntrico al eje del haz (figura 42).

Tipo de gas. La selección de aire comprimido, oxígeno, nitrógeno, gas inerte, u otro gas, depende del proceso, del material, del espesor, de los parámetros del proceso y de la economía del trabajo.

OPERACIÓN	MATERIAL	GAS DE PROCESO
CORTE	METALES	O ₂ , N ₂ , He, Ar
	PLÁSTICOS	Aire, N ₂
	COMPOSITOS	N ₂
ROZADURA	METALES	He, Ar
	METALES	Ar
TRATAMIENTO TÉRMICO	METALES	Ar

Figura 41 Gases de procesos comúnmente utilizados.

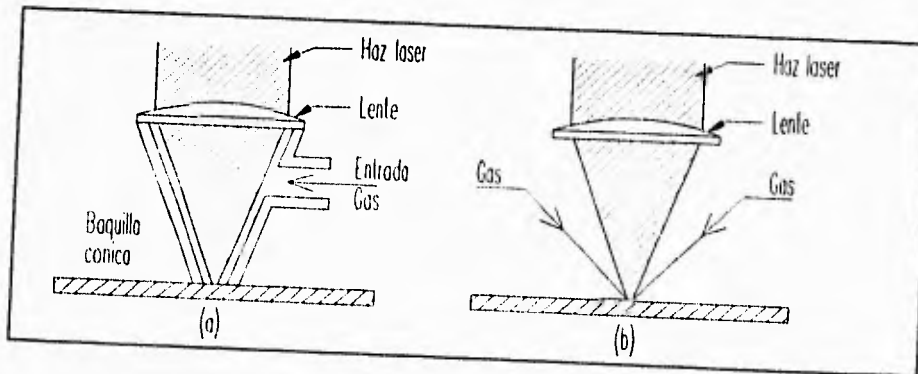


Figura 42 Dirección de flujo. (a) Flujo axial; (b) Flujo excéntrico.

De tal forma, las razones para la utilización de gas de aporte son básicamente las siguientes:

- Proteger la óptica de focalización. Los gases desprendidos en el proceso debidos a la evaporación del material tratado, son muy perjudiciales para la óptica utilizada.
- Reducir el efecto de absorción de energía incidente por parte del gas expulsado en la vaporización del material en tratamiento.
- Producir o evitar reacciones químicas. Los gases inertes inhiben las reacciones de oxidación. El oxígeno favorece reacciones de oxidación exotérmicas que incrementan el rendimiento del proceso.
- Eliminación de material fundido. Principalmente en el corte de metales, se elimina mecánicamente el fúndente producido en el proceso, mediante un chorro de gas a presión.

En soldadura, la dirección excéntrica del gas de proceso, emplea gas inerte para dirigir el plasma fuera de la cavidad de soldadura (*keyhole*); controlando el plasma en soldadura de secciones gruesas y mejorando la posibilidad de penetración y las condiciones en la zona de fusión (figura 42b). Dispositivos para el control de plasma emplean varios conceptos para redirigir el plasma, de manera que la energía de este, complemente la del haz láser, e incremente la eficiencia de la soldadura.

Diseño de la boquilla, presión del gas. Las boquillas son parte importante del equipo ya que, entre otras funciones, mantienen limpia(s) de vapor y rocío la(s) lente(s) del sistema. El régimen de flujo juega un papel importante en el diseño de la boquilla, debido a que la configuración de ésta es responsable de la velocidad y turbidez del gas de proceso; se han diseñado, para optimizar las condiciones de operación, una serie de boquillas subsónicas y supersónicas (figura 43); los flujos supersónicos generalmente provocan inestabilidad, lo cual impide obtener resultados fiables; si el flujo de gas es muy alto se salpicará el material fundido, mientras que con un flujo bajo el vapor del metal podría condensarse en la superficie de la(s) lente(s). Los mejores resultados en el corte de metales de 3 mm. de espesor pueden obtenerse con el uso de un chorro de gas convergente a velocidad sónica.

Las boquillas convergente - divergente (figura 43d) con flujo supersónico, minimizan el filo de las esquinas obtenidas con flujos convergentes, con lo que se reduce la divergencia del gas que escapa, además, se pueden obtener cortes limpios a velocidades más elevadas que con boquillas convergentes. La boquilla de anillo provee simultáneamente de dos diferentes gases, es efectiva en el corte de aceros blandos de 5 mm.

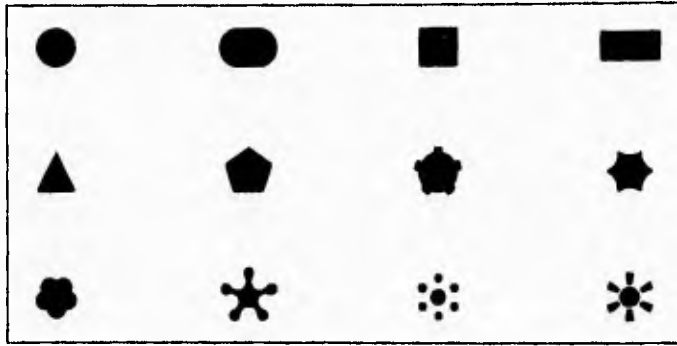


Figura 45 Boquillas, formas de salida.

El diseño con tres lóbulos resulta efectivo en la demora de la formación del disco de choque hasta una presión de 6.5 bar.

Distancia entre boquilla - material. Esta distancia afecta la distribución del chorro de gas en la superficie de trabajo, es decir, en el punto donde se concentra el flujo de gas, lo que se determina la cantidad de flujo que interacciona con el material. Esto en ocasiones se vuelve crítico, cuando el frente de erosión no es cubierto en su totalidad con el chorro de gas.

Importantes investigaciones del comportamiento del flujo de gas, en diferentes diseños de boquillas, han arrojado datos esenciales (figura 46).

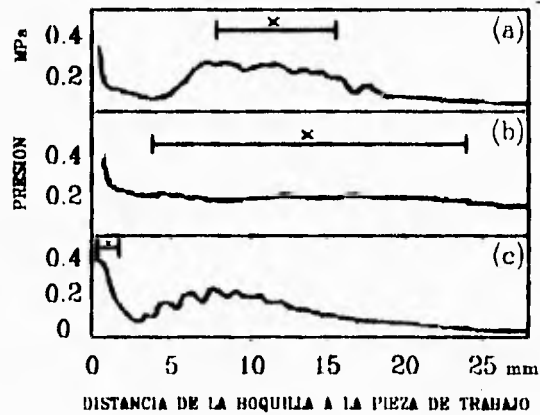


Figura 46 Gráficas de distribución de presión en: (a) flujo encontrado de dos direcciones, (b) boquilla paralela, (c) boquilla cónica,

Las boquillas cónicas muestran fuertes fluctuaciones, resultado de una presión de cámara mayor que la presión crítica (presión a la salida). La distancia "x" es considerada la distancia de trabajo, ya que es la presión más alta, a pesar de ser pequeña como el caso de la boquilla cónica. Como se observa en los diagramas de presión, y como se ha comprobado experimentalmente, no existen diferencias significativas entre los diferentes diseños de boquillas, siempre y cuando se trabajen dentro de su distancia óptima.

Se puede minimizar el efecto discos de choque Mach a distancias de boquilla - material mayores de 3.5 mm.

Dicho lo anterior se recomienda:

- Evitar la formación del disco de choque Mach en el chorro de gas. El disco de choque disminuye la eficiencia de maquinado por la caída del gradiente de presión, entre la superficie y la base de la ranura u hoyo, provocando también, la reducción de efectividad del chorro en la expulsión de material fundido.
- Valorar la presión del gas en la pieza de trabajo, en lugar de la presión de la boquilla (o a la salida) como un parámetro del chorro, ya que, una caída de presión significativa ocurre entre la salida de la boquilla y el frente de erosión.
- Mantener una distancia de 3 a 4 mm. entre la boquilla y la superficie de la pieza de trabajo, para minimizar una caída de presión discontinua debido a la formación de un disco de choque Mach.
- Usar una boquilla con salida no circular (salida con lóbulos) para trabajar a altas presiones sin la formación de discos de choque Mach.
- Asegurar el control de calidad del maquinado con la forma de la salida de boquilla. Algunas superficies irregulares (tales como escorias, muescas o escalones o excentricidades) provocan la separación del chorro de gas, lo que conduce a una pérdida de presión.
- Protección de la boquilla. Las melladuras y rasguños a la salida de la boquilla pueden afectar el flujo del chorro.

TIPOS DE OPERACIONES.

El primer paso hacia el éxito de las aplicaciones es la selección propicia del sistema para el trabajo a desarrollar. Las diferencias inherentes entre los sistemas láser los hacen ser las mejores herramientas para algunos trabajos, a comparación de otros.

Los principios básicos del procesamiento de materiales por láser puede ser englobados como a continuación se menciona:

1. Un haz de alta intensidad es generado por una fuente de haz láser.
2. El haz es enfocado a la superficie de la pieza de trabajo por medio de lentes.
3. El área enfocada es movida a través de la superficie del material por medio de: la manipulación óptica del haz, el movimiento mecánico de la pieza de trabajo, o ambos.
4. La zona fundida generada por láser puede ser tratada, generalmente, de las siguientes formas dependiendo de los resultados requeridos:
 - *Corte.* Se presentan diversos mecanismos para lograr este propósito, pero quizá el que predomina es el ataque y lanzamiento de la fundición, mediante un chorro de gas a alta presión, el cuál puede ser inerte u oxidante.
 - *Soldadura.* La soldadura es protegida en una atmósfera inerte (helio, argón, etc.), la cual es soplada a través de una boquilla a donde enfoca el haz. En los casos donde la oxidación de la soldadura es un problema son útiles las cámaras de atmósfera controlada.
 - *Tratamiento Superficial.* Esta puede tomar la forma de soldadura superficial, a menudo de emplea en la adición de aleaciones. El tratamiento térmico por láser se lleva a cabo de la misma forma que la soldadura, sólo que con menor energía para establecer una fusión (por ejemplo, con haces desenfocados o, a velocidades relativas láser-material altas). El estricto ciclo térmico experimentado por las capas superficiales del material produce cambios en la microestructura, por ejemplo endurecimiento por transformación martensítica.
 - *Perforado.* Este proceso difiere de los anteriores, ya que requiere de un haz enfocado con suficiente energía como para vaporizar casi cualquier sustancia, provocando la remoción de material en la trayectoria del haz. Esta energía es generalmente provista por un láser pulsado.

CORTE DE MATERIALES.

El corte con láser es un proceso inducido térmicamente, perfectamente establecido en la industria, en el cual la energía de un haz de luz focalizado es absorbida por el material, formando así el corte. El corte se produce a través del movimiento relativo entre el láser y la pieza de trabajo.

El movimiento relativo del láser y la pieza de trabajo producen un *frente de erosión o de corte*, delante del haz láser (figura 47). La temperatura en el interior de la pieza de trabajo, depende de la distancia al frente de erosión, y es independiente del tiempo.

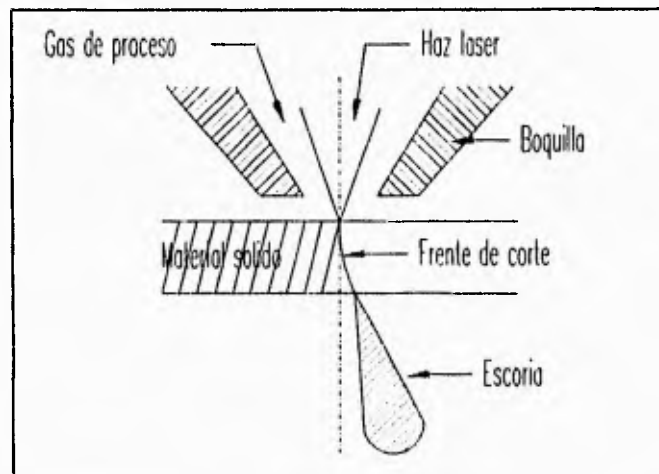


Figura 47 Mecanismo de corte.

Los factores que determinan la posible aplicación del láser en el corte de materiales son, en su mayoría, propiedades ópticas, térmicas, eléctricas y mecánicas del propio material.

El corte transversal producido por el láser, no es necesariamente recto, debido a que el haz es reflejado desde las nuevas superficies formadas (figura 33).

Existen cinco mecanismos diferentes de corte con láser, que dependen básicamente del tipo de material a cortar, los cuales son:

- a. **VAPORIZACIÓN.** La energía del haz calienta el material por arriba de la temperatura de ebullición, con lo que el material se evapora y se retira (este mecanismo requiere 10 veces más energía que la necesaria para b.).
- b. **FUNDICIÓN Y SOPLADO.** La energía del haz funde el material, y por medio de un chorro de gas inerte se retira la fundición de la zona de corte (este mecanismo requiere alrededor de dos veces la energía de c.). Este mecanismo se realiza generalmente en materiales sensibles al calor.
- c. **ACCIÓN EXOTÉRMICA.** La energía del haz calienta el material hasta la temperatura de ignición donde, por medio de un chorro de gas reactivo, se hace arder el material (tal como en b. el chorro también retira la escoria, este mecanismo llega a requerir alrededor de 10 veces la energía de d.).
- d. **FRACTURA POR ESFUERZOS TÉRMICOS.** La energía del haz establece un campo térmico en materiales cerámicos con lo que se logra direccionar una fractura.
- e. **MARCADO.** Una variante de a. es empleada para realizar cortes ciegos, a manera de concentradores de esfuerzo a lo largo de la línea trazada.

Lo que distingue a estos cinco mecanismos es la manera en la cual el calor interacciona y afecta a la pieza de trabajo.

SOLDADURA DE MATERIALES.

Para entender la posible aplicación del láser en el campo de la soldadura partiremos de la idea de que soldar es la acción de unir dos materiales calentándolos hasta su punto de fusión y uniéndose al solidificarse.

Bajo este punto de vista el láser se utiliza como la fuente de calor capaz de fundir los materiales a unir. De esta manera, el haz láser penetra el material produciendo una cavidad rodeada de material fundido. Conforme el haz se mueve, con relación a la pieza de trabajo, el material fundido rodea el hoyo, rellenándolo detrás del avance del haz, para solidificarse posteriormente.

La energía del haz puede ser continua o pulsada. La velocidad de soldadura está determinada por el tipo de material, la profundidad de penetración y la intensidad del haz. En láseres pulsados, la velocidad de soldadura está limitada además por la frecuencia y la potencia de cada pulso, en general, las velocidades en modo pulsado son substancialmente menores que las de modo continuo.

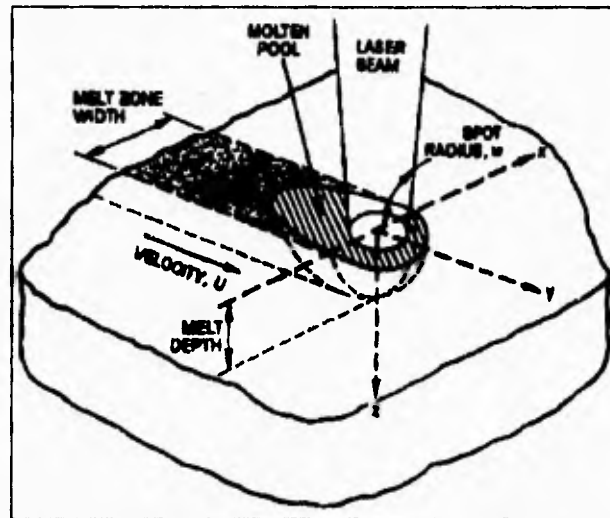


Figura 48 Mecanismo de soldadura.

TRATAMIENTO TÉRMICO SUPERFICIAL.

El objetivo del tratamiento superficial es conseguir dotar a la superficie de un material, de las propiedades necesarias para resistir la operación continua bajo ciertas condiciones, tales como cargas mecánicas elevadas, alta temperatura y entornos químicamente agresivos.

Los métodos mayormente utilizados son el endurecimiento térmico y la aleación superficial. En ambos casos el láser se utiliza como fuente de calor.

El endurecimiento térmico consiste en proporcionar al material la suficiente energía para conseguir niveles de temperatura capaces de provocar cambios en sus propiedades metalúrgicas, sin llegar a la fusión o evaporación del material.

La aleación superficial consiste en disponer el material de la aleación sobre la pieza a tratar en forma de polvo, láminas o varillas. Al actuar el haz láser con su gran intensidad se genera la alta temperatura y el gradiente térmico que exige la aleación. A través de ellos el material se funde, se agita vigorosamente y se difunde por las capas adyacentes del material base, consiguiendo velocidades de difusión muy elevadas.

A diferencia de los procesos anteriores, corte soldadura y perforado, es más importante la distribución espacial de la energía incidente que su concentración. En el tratamiento de grandes superficies con láseres de alta potencia se trabaja con el haz no focalizado.

PERFORADO DE MATERIALES.

Cuando se trata de mecanización clásica, el diámetro y la forma del agujero vienen determinados por las características de la herramienta (broca) empleada. Del mismo modo, en el perforado con láser influirán el tipo de láser, la distribución de energía, la potencia, el sistema óptico y la técnica utilizada, así como el material a perforar.

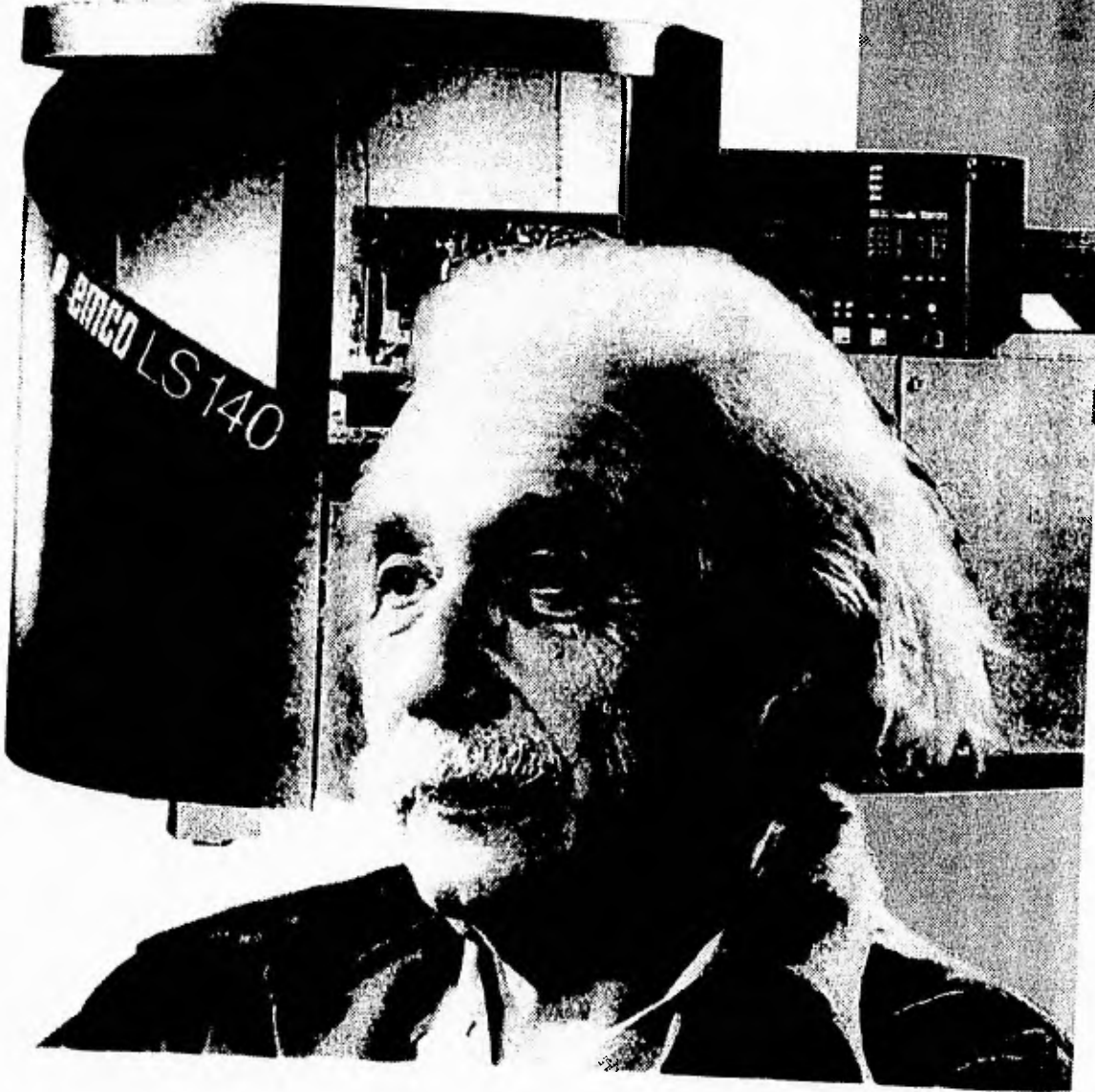
El diámetro del agujero se puede controlar variando la cantidad de energía suministrada por el haz y también por la longitud focal y el grado de desfocalización de la lente. El diámetro mínimo vendrá determinado además por la longitud de onda del láser.

VENTAJAS SOBRE TÉCNICAS DE MAQUINADO CONVENCIONAL.

1. Los láseres pueden ser concentrados en puntos muy pequeños (de alta densidad de potencia), con lo que se facilita el corte en áreas inaccesibles para métodos tradicionales
2. Virtualmente, no hay restricciones de las geometrías a cortarse. Pueden ser cortadas formas extremadamente complejas, debido a que el láser actúa como una fuente de energía móvil pequeña, y por lo tanto, no presenta restricción de un radio de giro mínimo, el cual se aplica en sierras (seguetas) u otras herramientas de corte.
3. El corte con láser, al no ser un proceso de contacto, no requiere el uso de herramientas cortantes (que se desgastan y requieren tiempo para su cambio), además, el montaje y sujeción de las piezas de trabajo son mínimos. Aquellos materiales que sufren distorsiones durante corte mecánico (cauchos, gomas, etc.) pueden ser cortados en forma más precisa.
4. Los cortes realizados son suaves, con lo que se reduce o eliminan operaciones posteriores.
5. El control por computadora, naturalmente, conlleva a una gran flexibilidad de operaciones. La producción de un número de piezas diferentes puede realizarse en forma más económica que por medio de un troquel (dado el alto costo de las herramientas de este último) para volúmenes de producción bajos y medianos. Disminución drástica en los costos de prototipos.
6. Son mínimos, los daños térmicos por oxidación, las zonas afectadas por el calor, las distorsiones térmicas, etc. como resultado de las pequeñas áreas expuestas al haz láser. Los anchos de corte son estrechos (lo que conduce a un ahorro de material), y el corte es casi perpendicular a la superficie del material.
7. El láser puede procesar materiales difíciles de maquinar por métodos convencionales, tal como, metales de alta dureza, cerámicos y compuestos.
8. La energía del láser es químicamente limpia, diferente a la empleada en el corte por flama. La pureza de los materiales procesados no se altera.
9. Los procesos láser en general resultan fáciles, rápidos y precisos.

CAPITULO

4

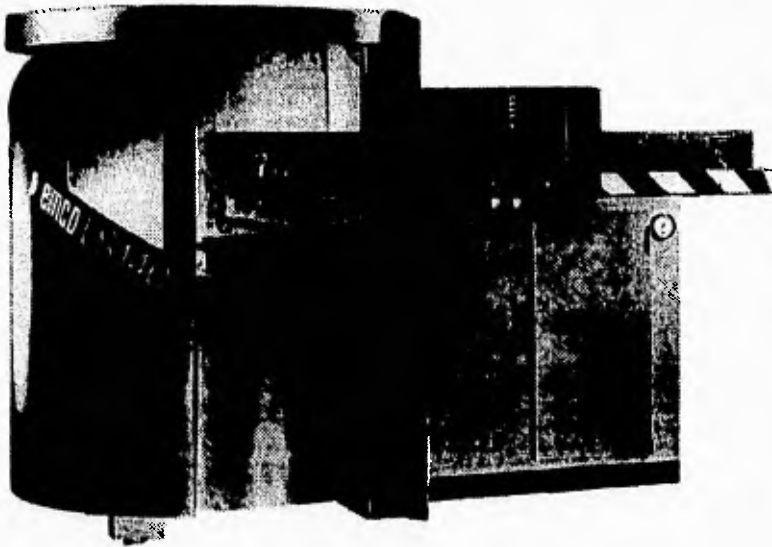


IV. SISTEMA EMCO LS 140.

CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA.

El sistema EMCO LS140 es un sistema compacto de corte con láser de CO₂, el cual incorpora una fuente de haz láser y una mesa de coordenadas gobernadas por control numérico, para conseguir el movimiento relativo entre la pieza y el haz. De tal manera que podemos dividir la máquina, para su estudio, en tres componentes:

- FUENTE DEL LÁSER.
- MÁQUINA.
- CONTROL.



FUENTE DEL LÁSER.

<i>Longitud de onda emitida:</i>	10.6 μm (infrarrojo).
<i>Frecuencia:</i>	2.828 E13 Hz.
<i>Potencia nomina:</i>	140 Watts.
<i>Rango típico (onda continua):</i>	30 - 160 Watts.
<i>Divergencia (ángulo total):</i>	2 mRad.
<i>Diámetro del haz, (antes de ser enfocado):</i>	10 mm.
<i>Modo Transversal:</i>	TEM ₀₁ .

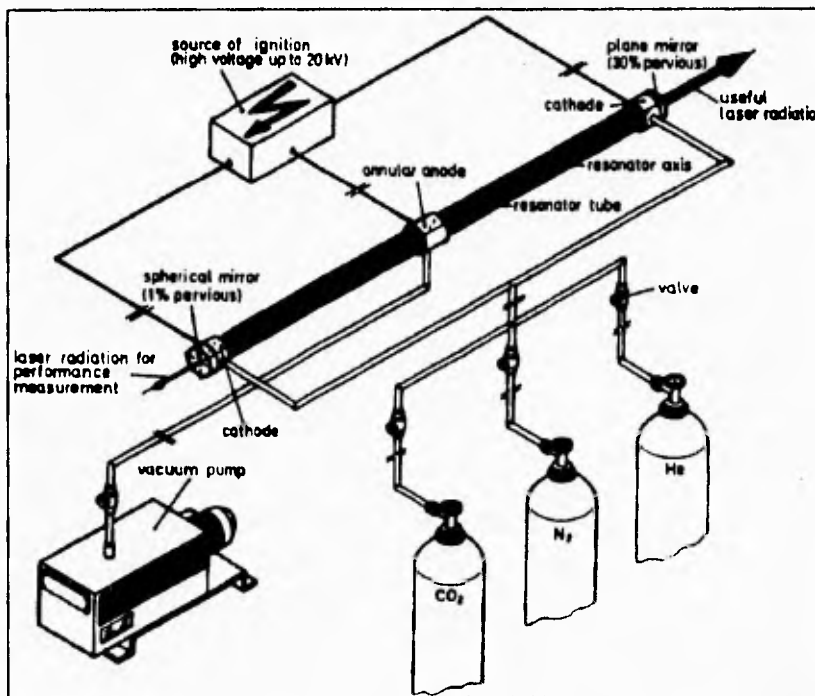


Figura 50 Fuente del láser.

Medio activo: Mezcla de gases: He, N₂, y CO₂.

Los tres gases son suministrados continuamente al resonador, en forma axial (figura 50), desde tanques controlados por válvulas de regulación de flujo. Una vez que los gases se alojan en el resonador, la presión en este es de 15 a 20 mbar. El suministro de gases frescos se realiza muy cerca de los espejos, para evitar que partículas de polvo puedan provocar un descenso de eficiencia.

La mezcla de gases usada es succionada en el centro del resonador por medio de la bomba de vacío, y es conducida a la atmósfera.

El enfriamiento del resonador se realiza por agua. Los espejos y electrodos son enfriados por medio de aire.

Tipo de bombeo: Corriente eléctrica 20,000 Volts.

La excitación del sistema EMCO LS140 se lleva a cabo mediante una descarga eléctrica. Un alto voltaje (20 kV) se suministra a través de un ánodo anular colocado al centro del resonador. La descarga se lleva a cabo en ambas direcciones al final del resonador, donde se encuentran los cátodos.

El desempeño del láser esta determinado por la intensidad de corriente.

Resonador óptico: Sistema óptico de lentes plano-convexo.

El resonador óptico consiste de un espejo plano y otro esférico de radio de curvatura grande. El espejo plano posee un reflexión parcial del 70%, donde el 30 % restante se emplea para el proceso de maquinado. La lente esférica presenta una reflexión parcial del 99%, donde el 1% restante es utilizado en el sistema de control de la potencia.

Los electrones generados por la descarga, adquieren una gran energía cinética que transfieren a los átomos y moléculas al colisionar en el interior del tubo de descarga, con lo cual se llenan los distintos niveles de energía de las moléculas, además de producirse iones.

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

Cuando se llega a esta situación estacionaria, el aumento de inversión de población, debida al bombeo del medio activo, se ve compensado exactamente por la disminución que sufre por la emisión estimulada que se genera.

OTROS DATOS .

Espejo desviador:	colocado a 45°
Sistema de posicionamiento del haz:	altura ajustable.
Lente:	1" de diámetro y 2.5" de distancia focal.
Diámetro del punto focal	0.17 mm. aprox.
Densidad de potencia:	550,000 W/cm ² .
Gas de proceso:	O ₂ , N ₂ , Aire.
Tipo de boquillas:	Cónicas de 1 y 3.2 mm (diámetro a la salida).

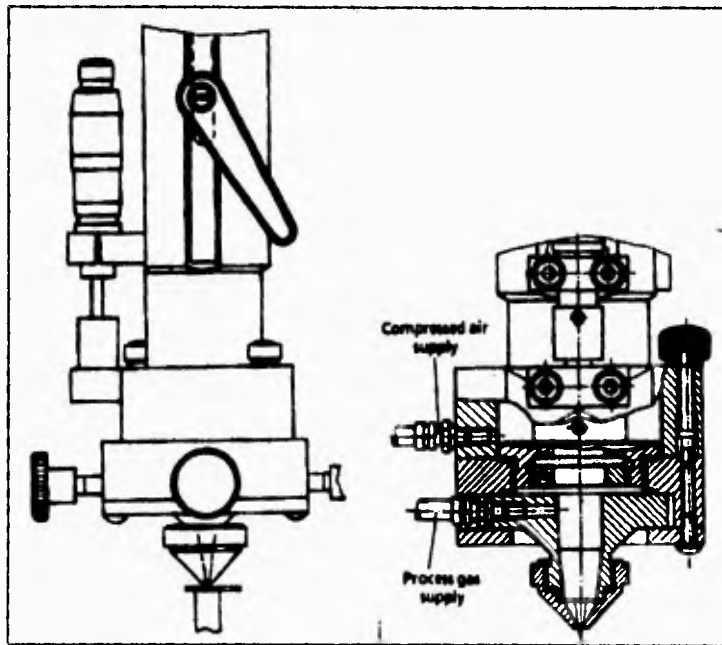


Figura 51 Cabezal del láser.

ESPECIFICACIONES MECÁNICAS.

<i>Peso de la fuente del láser:</i>	210 Kg. aprox.
<i>Longitud de la fuente del láser:</i>	2470 mm.
<i>Ancho de la fuente del láser:</i>	500 mm.
<i>Altura de la fuente del láser:</i>	283 mm.

PRESIONES Y GASTOS DE LOS FLUIDOS.*Presión en los tanques:*

La presión interna de los tanques debe ser, para el CO₂ de 50-60 bar (870 psi) y para N₂, He y O₂ de 200 bar (2900 psi). La presión a la salida de los tanques debe ser de:

- CO₂ 5 bar (73 psi), calidad de 4.5
- N₂ 5 bar (73 psi), calidad de 5.0
- He 5 bar (73 psi), calidad de 4.6
- O₂ 8 bar (116 psi), gas de proceso

Presión en la fuente del láser (válvulas de reducción de presión):

- CO₂ 1.5 bar.
- N₂ 1.2 bar.
- He 1 bar.

Presión en la boquilla (presión del gas de proceso, manómetro del cabezal):

- Boquilla de 1 mm. 6 bar aprox. (Metal y madera).
- Boquilla de 3.2 mm. 0.2 bar aprox. (Plásticos).

Suministro de aire comprimido:

- presión: 6 - 8 bar.
- gasto mínimo: 3000 l/min

Suministro de agua:

- presión: 2.5 - 4 bar
- gasto mínimo: 6 l/min.

MÁQUINA.

Rango de trabajo:

Trayectorias en los ejes X y Y 460 × 460 mm.

Carrera manual en dirección Z

Rango tosco: 40 mm.
 Rango fino: 15 mm.
 Área de corte: 700 × 700 mm.

Motores de avance:

Servo-motores de paso:
 Avance en los ejes X y Y: 1 - 4000 mm/min.
 Avance rápido en X y Y: 6000 mm/min.

Sistema de lubricación:

Guías de trayectoria: grasa de lubricación (manual).

Suministro eléctrico:

Suministro principal: 3/N/PE 400/230V 50/60 Hz.
 Fluctuación de voltaje permisible: + 5% bis - 10%.
 Carga conectada: 4.5 kVA.
 Fusible principal del sistema láser: 16 A.

Lampara de la máquina: 1 × 40 W.

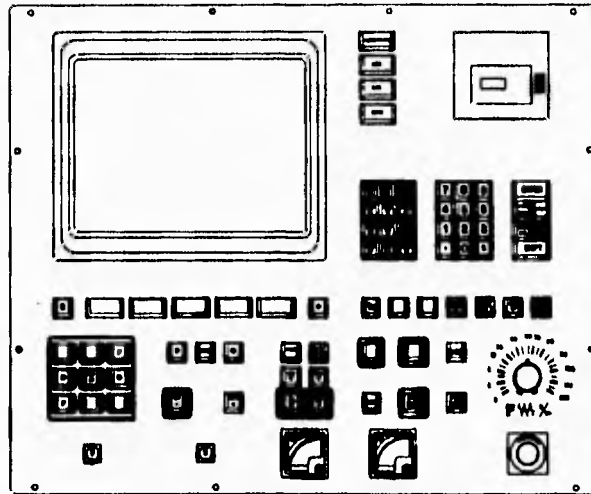
Dimensión del sistema láser (L×W×H): 3500×2450×2050 mm.

Peso del sistema láser: 1400 kg. aprox.

OTRAS CARACTERÍSTICAS.

- La base de la máquina es de acero, y ésta soporta al gabinete eléctrico, el dispositivo de succión, la bomba de vacío y los elementos neumáticos. Además, se encuentran montadas la unidad motriz y la fuente del láser.
- El área de maquinado se encuentra completamente blindada, con acceso por medio de una puerta mecánica. El área de trabajo posee iluminación total.
- La recolección de polvo y gas se realiza mediante tubos de succión, un cesto de succión con colador y piezas de succión adicional con conexión al cabezal de corte. La unidad de succión se encuentra instalada en la base de la máquina, bajo el área de maquinado. Los dispositivos de succión se encuentran directamente bajo el cabezal de corte.
- El tobogán de corte es una rejilla estable, resistente a la tensión, soportada en los rieles. El tubo de succión se encuentra en éste.
- Para la sujeción de las piezas de trabajo se tienen: 3 rieles móviles, 12 soporte de punta y 6 soportes magnéticos. Además, una pieza para el aprisionamiento del riel, con escala de medición integrada. Aquí la pieza de trabajo solo se coloca encima de las puntas y soportes magnéticos, ya que al no ser éste un proceso de contacto, no se requiere una sujeción fuerte.

CONTROLADOR.



Controlador Emcotronic TM02-L

Microprocesador controlador de 3 ejes
 Interpolación lineal y circular (2 ½ D)
 Memoria para programas de 64 kB (expandible a 128 kB)
 Compensación de herramientas y avance.

Parámetros adicionales

Monitor monocromático 12"	
Exactitud	0.001 mm (0.0001 pulgadas)
Control de avance	0 - 120%
Rango de interpolación	± 9999.999 mm.

Modos de operación.

Modo manual.	Movimiento manual de trayectorias y control de la fuente del láser.
Modo ejecutable.	Trabajo en la memoria de entrada.
Modo editor.	Transmisión del programa por teclado o interface.
Modo automático	Trabajando con programación NC.

Submodos.

Bloque sencillo, salto de bloque, corrida en vacío, punto de referencia, estado, interface de autoencendido del láser.

Formatos de programación.

De acuerdo con la estructura DIN 66025 (ISO 1056)

Entrada de punto decimal

Memoria de programación permanente para datos de maquinado y programas de piezas de trabajo, registro de cambio de posición y acercamiento automático del punto de referencia.

Entrada / Edición de datos.

Interface RS-232C (V24), 150-4800 bd, cinta de grabación (Philips MDCR) 600 signs/sec. (correspondiente a 6 kbaud)

OTRAS CARACTERÍSTICAS.*Sistema de medición / sistema de control de alimentación.*

Todo sistema de control numérico, cuenta con una referencia en base a ejes coordenados, tales como el X-Y, para comenzar a operar la máquina.

Para aproximarse al punto de referencia (cero máquina *M*), la unidad de control mide dicho punto en dirección X y Y. Si un motor está fuera de paso, se emitirá una alarma.

Interruptor límite para acercarse al punto de referencia.

En los límites de los ejes X e Y se montan los interruptores, los cuales reportan a la computadora la posición de las respectivas correderas.

Obturador - Shutter.

Es un dispositivo de paso del haz láser; cuando el shutter está abierto el haz se libera. El shutter está sujeto a altos incrementos de temperatura, por lo que cuenta con un enfriamiento continuo por agua. El shutter es controlado neumáticamente.

MEDIDAS DE PROTECCIÓN.

El sistema láser EMCO LS140 fue diseñado con dispositivos de seguridad, entre los que destacan:

Ventanas de inspecciones impermeables a la radiación.

La radiación del láser de este sistema, con longitud de onda de 10.6 μm , es de un rango infrarrojo y por lo tanto, invisible al ojo humano y peligroso para piel y ojos. Las ventanas de inspección de plexi-glass son impermeables a esta radiación.

Sistema de cierre de fuente emisora, blindaje del área de maquinado.

El sistema de cierre de la fuente emisora del láser, el blindaje del área de maquinado y su protección por medio de los contactos de la puerta ofrecen gran seguridad al usuario.

Si el láser se provee de energía y la secuencia de cierre de seguridad no se cumple, se emitirá una alarma de advertencia.

La fuente del láser es protegida también por medio de un interruptor de llave. Con este interruptor, el shutter puede ser abierto, liberando el haz láser.

Unidad de succión y filtros.

Los materiales maquinados con láser, siempre producen humos, vapores y polvos. En algunos materiales estos productos son extremadamente nocivos para la salud. El sistema EMCO ofrece la succión de estos, directamente en el lugar de maquinado, y su depuración por medio de filtros de polvo y filtros de carbón activado, que van de acuerdo al material utilizado.

*** *Es importante*, que aquella persona que desee aprender el funcionamiento del sistema, lea en su totalidad el contenido del manual de operación, en especial los temas: precauciones, riesgos y cuidados del láser y riesgos y cuidados de los gases.

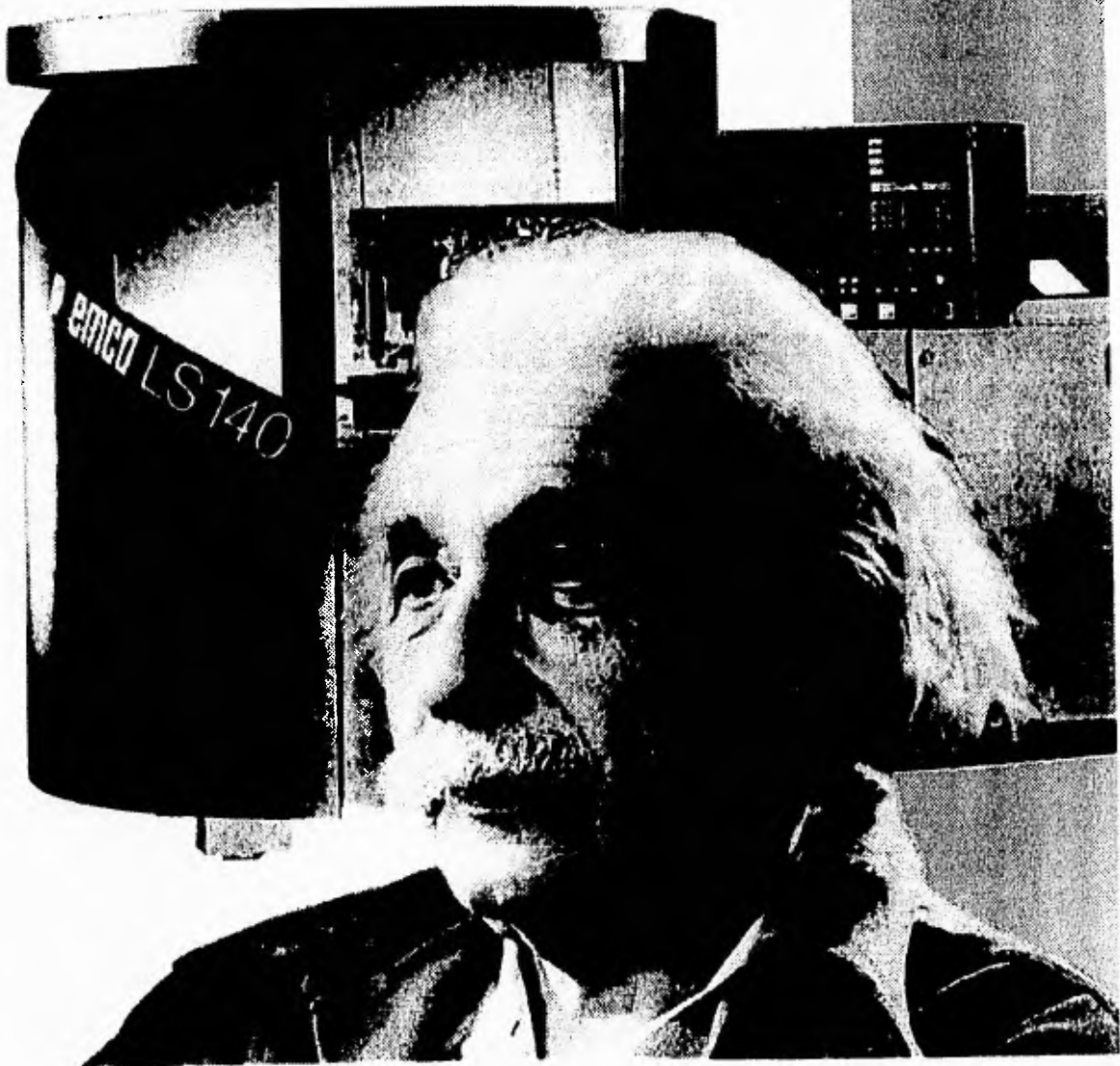
POSIBLES APLICACIONES DEL SISTEMA EMCO LS140.

El sistema EMCO LS 140 permite los siguientes tipos de maquinados:

- Corte y barrenado de metales (acero de hasta 2 mm. de espesor), madera, papel, caucho, piel, cartón, textiles, etc.
- Grabado de cerámicos y vidrios.
- Soldadura de plásticos.

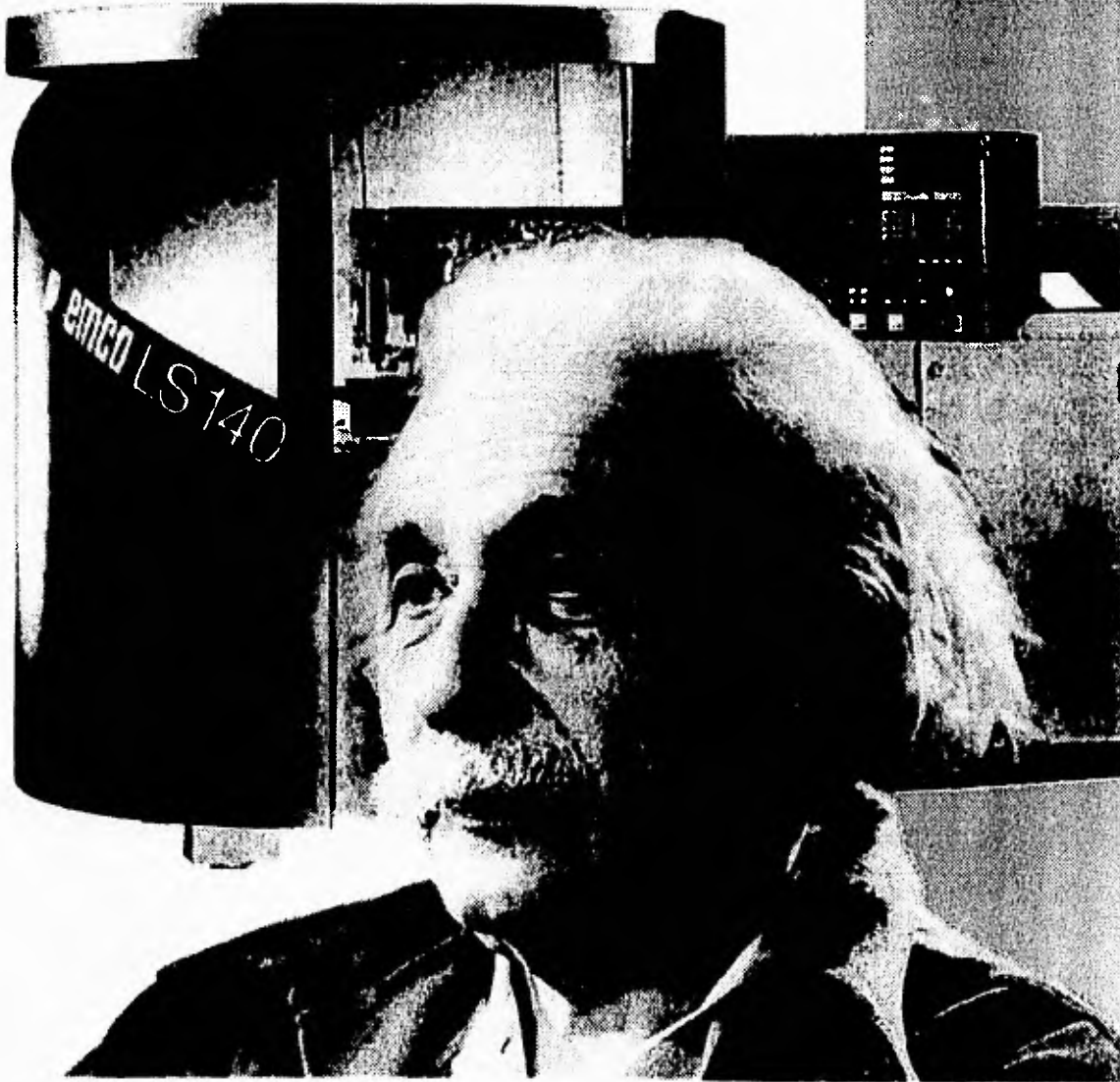
CAPITULO

5



CAPITULO

5



V. DESARROLLO EXPERIMENTAL.

Por más de treinta años, el láser de bióxido de carbono ha llegado a ser extensamente aceptado como una herramienta industrial, particularmente en el campo del corte de materiales.

El maquinado por láser puede reemplazar a los métodos mecánicos de remoción de material, en muchas aplicaciones industriales, particularmente en el procesamiento de materiales difíciles de maquinar, tal como, metales de alta dureza, cerámicos y compuestos; a pesar del gran desarrollo de los materiales compuestos, su alto costo y difícil fabricación, permiten solo un uso limitado en aplicaciones de ingeniería, dando paso a los metales.

Los metales y sus aleaciones poseen muchas propiedades útiles, lo que permite una extensa gama de aplicaciones en ingeniería. Dentro de éste grupo se ha clasificado a los metales con hierro y sin él, siendo los primeros metales ferrosos y los segundos no ferrosos. El hierro y sus aleaciones (entre los que destacan los aceros) representan aproximadamente el 90% de la producción mundial de metales, fundamentalmente debido a la combinación de su buena resistencia, tenacidad y ductilidad con su relativo bajo costo, además de poder ser procesados en casi cualquier forma útil, ya sea con herramientas formadoras o cortantes, esto incluye, taladros, tornos, fresadoras, troqueles, dobladoras, cizallas, corte con láser, corte con chorro de agua, entre otras.

Dentro del corte con láser, un parámetro que es importante tomar en cuenta, es la longitud de onda a la cual emiten los sistemas láser, dado que de esta depende el grado de interacción del material con el láser.

En el caso particular del sistema láser utilizado, la longitud de onda que emite es de gran absorción por polímeros, no así por metales (figura 24). Por lo que los rangos de trabajo para los polímeros son muy grandes, al contrario de los metales, donde los rangos son reducidos y por ende críticos de no trabajarse en ellos.

SELECCIÓN DE MATERIALES.

Para seleccionar los materiales a estudiar, se evaluaron aquellos de mayor utilización en el Laboratorio de Mecánica, no olvidándonos que el objetivo principal es el uso óptimo del sistema láser con que se cuenta en el mismo, y sin dejar a un lado que la mayor parte de los materiales que se utilizan en la industria metal-mecánica son los aceros. Dado lo anterior se seleccionaron láminas de acero de bajo carbono (lámina negra), lámina galvanizada y lámina de acero inoxidable AISI 304, no sólo por ser los más utilizados en el mercado, sino porque cada uno de ellos posee características típicas diferentes, de acuerdo al contenido de elementos químicos presentes en cada uno. Con esto se pretende caracterizar el comportamiento de dichos aceros ante el corte con láser, para posteriormente, en el caso que se presente una lámina de acero de igual o distinto tipo-calibre a los estudiados, se pueda tener preparada una lista de parámetros de corte a la cual se ajuste, pues como bien se sabe, cada material debería tener sus propios parámetros, de lo contrario esto nos llevaría a crear un sin número de pruebas sin sentido.

A continuación se presenta una breve descripción de los materiales utilizados.

ACEROS DE BAJO CARBONO.

Los aceros al carbono son aquellos en los cuales el carbono es el elemento de aleación que controla en forma esencial las propiedades mecánicas del material, y en los que la cantidad de manganeso no puede exceder de 1.65%, y los contenidos de cobre y silicio deben ser cada uno menores de 0.60%. Los aceros al carbono pueden subdividirse en los que contienen entre 0.08 y 0.35% de carbono, los que contienen entre 0.35% y 0.50% de carbono y los que contienen más de 0.50% de carbono. Estos se conocen respectivamente como aceros de bajo carbono, medio carbono y alto carbono.

El acero de bajo carbono es relativamente suave y dúctil y no puede endurecerse en forma apreciable por tratamiento térmico. Representa el tonelaje más grande de todo el acero producido. Las aplicaciones típicas de éste son la fabricación de hoja de lata, láminas (para carrocería de automóviles), planchas y flejes para treflado, cables, clavos, tornillos, bielas, barras para reforzamiento de hormigón, elementos estructurales ligeros y pesados (bastidores de automóviles), y para barras acabadas en caliente y en frío que se utilizan para maquinar partes.

LÁMINA GALVANIZADA.

Los recubrimientos pueden ser utilizados para propósitos de decoración, protección o resistencia al desgaste. Pueden ser metálicos, poliméricos o cerámicos. Se utilizan para modificar la composición de la superficie de un material. Sólo cuando los dos materiales del

sistema se combinan, estará terminado el diseño de ingeniería (por supuesto, si el recubrimiento posee las características para la situación a utilizar).

Galvanización es el nombre genérico que reciben los procedimientos para aplicar un delgado recubrimiento superficial de cinc a ciertos artículos de hierro y acero. Con excepción de las pinturas, es el recubrimiento protector más ampliamente utilizado para materiales ferrosos.

El galvanizado protege contra la corrosión del oxígeno atmosférico y del vapor de agua, a través de dos efectos. En el primero, impide físicamente el contacto del hierro del artículo galvanizado con el aire circundante. Además de esto, si se rompe el recubrimiento y el metal de base ferrosa queda expuesto al medio ambiente, el cinc que circunda la grieta proporciona un tipo pasivo de protección catódica para el hierro. Químicamente, en la corrosión por oxidación se forman óxidos complejos de hierro en la superficie del metal; en esencia, éstos son compuestos iónicos que suponen la transferencia de electrones de la capa exterior, o de valencia, de los átomos de hierro a las moléculas de oxígeno. Sin embargo, el cinc es más electropositivo que el hierro, es decir, más propenso a perder sus electrones de valencia al reaccionar químicamente con otro elemento para dar un compuesto. Esto significa que el recubrimiento de cinc será atacado preferentemente por el agua atmosférica y el oxígeno del aire siempre que esté en contacto eléctrico con el metal ferroso de base. Además, cuando el área de la grieta es muy pequeña, los productos de corrosión del cinc tenderán a cerrarla. Es por ello que se analizarán los resultados de la reacción del cinc con el láser, y su facilidad de maquinado a través de dicho proceso.

ACERO INOXIDABLE.

Los aceros inoxidable descansan principalmente en la presencia de cromo para lograr las cualidades de inoxidable. En general, mientras más alto sea el contenido de cromo (cantidades que excedan el 12%), más resistente a la corrosión será el acero. El cromo forma una película tenaz de óxido que evita la corrosión. En los aceros AISI, los cuales por lo común contienen menos de un contenido de aleación total de 5%, la resistencia a la corrosión se mejora por pequeñas cantidades de fósforo, cobre y cromo.

Existen tres clases comunes de aceros inoxidable, los austeníticos, los ferríticos y los martensíticos. Los nombres de estas clases reflejan la microestructura de la cual está compuesto en forma normal el acero. Los elementos de aleación en el acero pueden clasificarse como estabilizadores de austenita y estabilizadores de ferrita. Los estabilizadores de austenita de importancia son el carbono, níquel, nitrógeno y manganeso. Estos elementos mejoran la retención de austenita conforme se enfría el acero. Cuando está presente 12% o más de manganeso, o cuando está presente 20% o más de níquel, es imposible enfriar el acero con la lentitud suficiente para permitir que la austenita se transforme en ferrita. Aun con contenidos mucho más bajos de níquel y manganeso la transformación es muy lenta y la austenita es estable a la temperatura ambiente.

Los aceros inoxidable austeníticos se producen y usan en el tonelaje más grande. Aunque todos contienen níquel, en forma ocasional se usa el manganeso y el nitrógeno como sustitutos del níquel. Estos tres elementos son responsables de la estructura austenítica.

METODOLOGÍA.

Al trabajar en un sistema ya establecido, como es el caso del sistema láser EMCO LS140, varios de los parámetros que influyen en el procesamiento de materiales se vuelven constantes (como ya fue comentado en el capítulo anterior).

Una vez que se cuenta con las láminas de los materiales seleccionados, se procede a cortar secciones cuadradas de 20×20 mm, mediante un haz láser continuo de 120 Watts, con oxígeno como gas de proceso. En un primer paso el corte se realizará variando la posición del punto focal y la velocidad de corte, y se mantendrá constante el resto de parámetros (presión del gas de proceso y distancia de la boquilla al material) con valores estándar, es decir, tomando en cuenta valores recomendados, ya sea en artículos científicos o en el mismo manual de la máquina. Los rangos de trabajo serán:

- *para la posición del punto focal* de -0.4 a 1.2 mm con intervalo de 0.4 mm (dichos intervalo se recomienda dadas las características del sistema óptico de la máquina, cuyos resultados de los cálculos se presentan en la figura 53).
- *para la velocidad* su rango inferior será el 60% de la velocidad recomendada para el material-calibre. El rango superior deberá determinarse incrementándose la velocidad recomendada en intervalos de 100 a 50 mm/min, hasta que no se logre el corte del material. El intervalo de 50 mm/min deberá emplearse para los materiales - calibres que resulten más sensibles a éste parámetro.

Una vez concluido este primer paso, se procede a analizar las muestras en base a los *criterios de evaluación* recomendados a continuación, con el fin de determinar el mejor corte. Al término de lo anterior se habrá concluido con la primera etapa del estudio.

Posteriormente, una vez determinados los mejores parámetros de la primera pareja de variables, se procede a fijar los valores de velocidad y posición del punto focal como constantes y a variar la presión del gas de proceso y la distancia de la boquilla al material. Los rangos de variación, para esta segunda pareja de variables, son:

- de 3 a 6 bar con intervalos de 1 bar, y de 0.5 bar para materiales - calibres sensibles a la presión del gas de proceso,
- y de 0.3 a 1.2 mm con intervalo de 0.13 mm para la distancia de la boquilla al material.

A continuación se repite el análisis de las muestras. Lo anterior constituye la segunda etapa del estudio.

El orden de variación de parámetros se decidió de esa manera, dado que la primera pareja de variables son los que, de acuerdo con pruebas anteriores a la realización de este estudio, resultaron tener una mayor influencia en el proceso de corte.

En la tercera y última etapa se analizan las muestras generadas, con el fin de obtener conclusiones generales. En esta se expresarán las cualidades de la pieza seleccionada, cortada con los que resultaron ser los mejores parámetros de operación.

Para este estudio se prefiere el modo temporal continuo en lugar del modo pulsado para evitar una mayor pérdidas de energía por conducción (transferencia de calor en sólidos), lo que permite una velocidad de corte ligeramente mayor. La potencia de 120 Watts se seleccionó dado que es el valor más alto que, en las condiciones actuales de la máquina, se puede mantener durante el proceso.

Este procedimiento se repite para cada material - calibre seleccionado.

El intervalo de 0.4 mm en la posición del punto focal se recomiendan dado que, como veremos a continuación, este valor resulta ser ligeramente menor, de la mitad del espesor de foco (figura 53), de acuerdo con los cálculos del sistema óptico empleado.

DATOS:

$\lambda =$	$10.6 \mu\text{m} = 10.6 \times 10^{-3} \text{ mm}$	Longitud de onda del haz emitido.
$f =$	$2.5 \text{ pulg} = 63.5 \text{ mm}$	Distancia focal.
$\pi =$	3.141593	Pi.
$D_i =$	10 mm	Diámetro del haz antes de ser enfocado.
$W =$	$?$	Diámetro mínimo del haz enfocado.
$\Delta f =$	$?$	Espesor del foco.

OPERACIONES:

$$w = \left(\frac{8 \cdot \lambda \cdot f}{\pi \cdot D_i} \right) = \left(\frac{(8) \cdot (10.6 \times 10^{-3}) \cdot (63.5)}{(3.141593) \cdot (10)} \right) = 0.1714 \text{ mm}$$

$$\Delta f = \frac{8 \cdot \lambda \left(\frac{f}{D_i} \right)^2}{\pi} = \frac{8 \cdot (10.6 \times 10^{-3}) \left(\frac{63.5}{10} \right)^2}{3.141593} = 1.0884 \text{ mm}$$

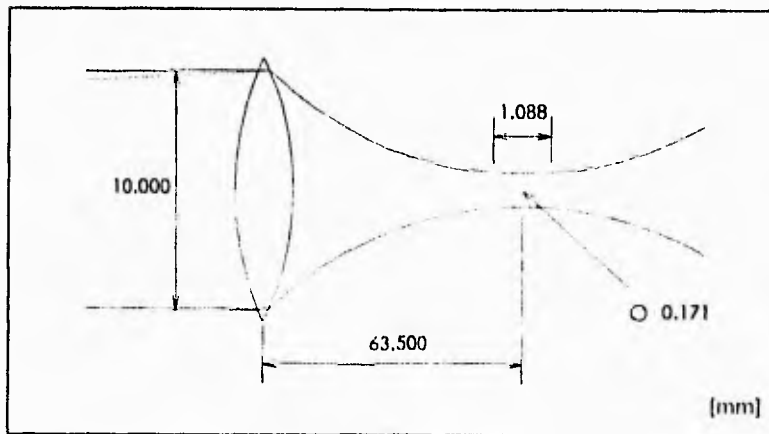


Figura 53 Condiciones del punto focal.

LOCALIZACIÓN DEL PUNTO FOCAL.

Cuando se trabaja con el sistema láser es absolutamente esencial calcular la posición del punto focal para que, en el proceso de corte se controle exactamente dicho parámetro.

La forma más sencilla y fácil de determinar la posición del punto focal, es mediante un medidor de foco, el cual no es más que una pequeña lámina de acrílico inclinada que, al hacer incidir el láser sobre ella, nos indicará la posición del punto focal. El procedimiento es el siguiente:

- Destornille la boquilla y retirela del cabezal láser.
- Coloque el medidor de foco sobre los rieles que alojan los soportes magnéticos y de pico.
- Coloque el cabezal láser tan cerca como sea posible de la superficie superior del medidor (distancia no mayor de 2 mm).
- Encienda el N₂ como gas de proceso.
- Ajuste la presión de dicho gas a 0.5 bar.

Encienda el haz láser y mueva la mesa (en el eje en el cual se haya colocado el medidor) seleccionando una velocidad de 2000 mm/min. Cabe señalar que donde se observa más estrecha la línea, es donde se sitúa el punto focal.

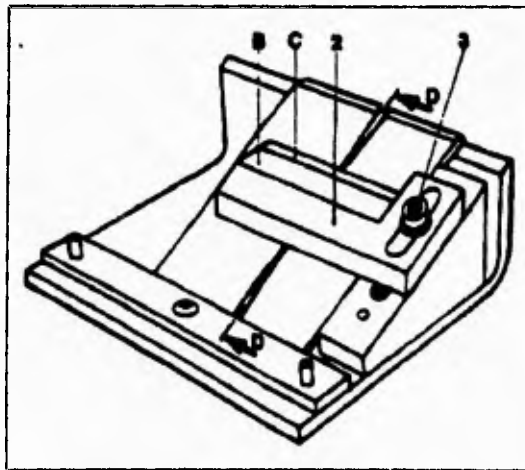


Figura 54 Medidor de foco.

- Apague el láser
- Coloque el medidor de paro (parte 2, figura 54)
- Atornille totalmente la boquilla.
- Mueva el cabezal láser hasta que se encuentre sobre la superficie B del medidor.
- Mida la distancia de la boquilla a la superficie B mediante el micrómetro y tome en cuenta la distancia de B a C, la cual es de 1 mm. De esta forma se podrá conocer la posición del punto focal en función de la boquilla (cuando esta se encuentra totalmente cerrada).

Con el montaje y ajuste del sistema óptico actual del sistema (lente de 63.5 mm de distancia focal), la posición del punto focal se encuentra a una distancia de 2.54 mm de la salida de la boquilla (cerrada en su totalidad) a la superficie de la pieza.

DENSIDAD DE POTENCIA.

Es un factor importante a considerar, ya que es la concentración de potencia en la superficie del material. Dado que la potencia de operación se encontró en un promedio de 116 Watts (de acuerdo con el medidor de potencia del sistema), la densidad de potencia en el punto focal fue de:

DATOS:

$d =$	0.01714 cm	diámetro del punto focal
$\pi =$	3.141593	Pi
$P =$	116 Watts	potencia del haz
$A =$?	área de punto focal
$\rho_{pot} =$?	densidad de potencia

OPERACIONES:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{(3.141593) \cdot (0.01714)^2}{4} = 2.307 \times 10^{-4} \text{ [cm}^2\text{]}$$

$$\rho_{pot} = \frac{P}{A} = \frac{116}{2.307 \times 10^{-4}} = 502743.51 \left[\frac{W}{\text{cm}^2} \right]$$

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

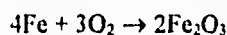
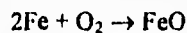
Para una mejor comprensión de la importancia de los criterios de evaluación, es indispensable conocer el mecanismo de corte básico en los aceros.

MECANISMO DE CORTE BÁSICO.

El corte de aceros se realiza mediante el calentamiento producido por el láser, y el empleo de oxígeno como gas de proceso.

El oxígeno produce una reacción química de oxidación del metal, la cual genera mucho energía calorífica (*reacción exotérmica*) que contribuye con más de la mitad de la energía térmica del proceso (60%)¹. Con la ayuda del oxígeno, el proceso de corte se acelera notablemente, ya que en la reacción exotérmica los cambios de energía son generalmente provocados por el rompimiento o formación de un enlace químico en una reacción, donde al cambio de energía se denomina calor de reacción. Cuando un enlace químico es roto, la energía es absorbida, y cuando se forma un enlace químico, la energía es cedida. Cuando la reacción libera energía en forma de calor se dice que es exotérmica, y cuando absorbe calor se dice que es endotérmica.

Las reacciones principales del hierro son:



El oxígeno genera material oxidado de baja viscosidad, el cuál no se adhiere bien a la pieza de trabajo permitiendo ser removido fácilmente.

El láser sirve como un dispositivo de calentamiento, el cuál repetidamente inicia la reacción de oxidación convirtiéndose en un ciclo de ignición y extinción. Una explicación secuencial se presenta en la figura 55.

¹ La evaporación juega un papel mínimo en la remoción de material. La temperatura en la zona de corte se encuentra en un rango de 1600 a 2000 °C en la cual, la mezcla de hierro y óxido no experimentan ebullición. Esto puede ser confirmado simplemente observando el proceso. El color de la zona de corte es amarillo, indicando el rango de temperaturas antes mencionado. Si se produjera ebullición del material, los colores en la zona de corte serían azul y violeta (2730 °C). Estos colores pueden observarse durante procesos de soldadura, los cuales involucran un mecanismo de ebullición.

La figura 55 muestra el punto focal del láser en movimiento hacia la superficie de la pieza de trabajo con una velocidad V (velocidad lineal del haz sobre la superficie del material). El impacto del láser provoca calentamiento en el área bajo el haz. Las más altas temperaturas se alcanzan en el punto más próximo al haz láser (el cuál llamaremos X), ya que es irradiado por mayor tiempo. Eventualmente, el avance gradual del haz sobre el borde del material provoca que éste aumente su temperatura hasta la ignición, con ayuda del flujo de oxígeno coaxial al haz. La oxidación exotérmica combinada con la irradiación continua de la superficie del material, producen una combustión de alta energía de corte, calcinando radialmente a X a velocidades superiores a V . De esta manera, el láser deja a su paso el corte del material para posteriormente enfriarse y autoextinguirse, dado que existe una marcada diferencia entre los rangos de reacción del oxígeno a temperatura ambiente y a temperaturas elevadas.

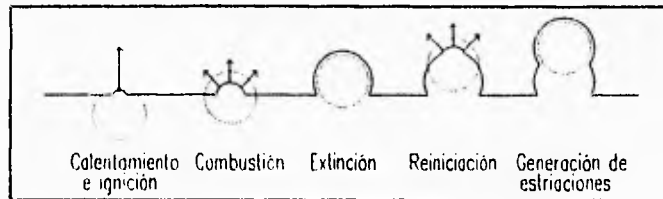


Figura 55 Esquema del ciclo de corte de acero con láser-oxígeno.

El proceso de iniciación, seguido por el corte, continua a lo largo de la longitud de corte, dejando características asociadas con la estriación del corte láser-oxígeno.

Una ilustración de un corte típico es mostrada en la figura 56. Las estriaciones causadas por el proceso son observables fácilmente a simple vista.

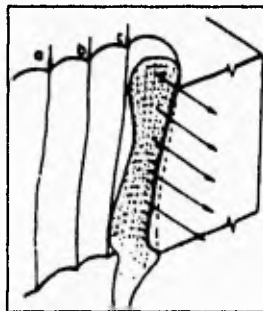


Figura 56 Estriaciones formadas por el corte con láser.

ESTRIACIONES.

Se pueden observar dos tipos de estriaciones, primarias y secundarias. Las estriaciones primarias pueden ser observadas a través del corte de calibres pequeños de acero de baja carbono. Cuando los calibres aumentan (mayores de 2 mm), las estriaciones primarias generalmente solo cubren la parte superior del corte. La parte inferior es cubierta por patrones de estriaciones secundarias, las cuales son menos regulares que los patrones primarios, aunque se derivan de estas.

Una hipótesis acerca de la formación de estriaciones secundarias, nos dice que el gas de proceso al soplar el material oxidado fuera del corte (hacia abajo), cubre la fundición de material. Esta cubierta obstaculiza la reacción y causa el rompimiento de las líneas de estriación.

En general, las estriaciones muestran las siguientes características.

- Las estriaciones son regularmente espaciadas en secciones parciales de elipses.
- La generación de estriaciones no está determinada principalmente por el tiempo de interacción del haz láser en el material.
- La dinámica del gas y las ondas de choque en la zona de corte no son responsables primarios de la geometría de las estriaciones.
- La evaporación juega un papel extremadamente pequeño en la remoción de material de la zona de corte, no siendo este responsable de la generación de estriaciones.
- Para propósitos de generación de estriaciones, el haz láser puede asumirse meramente como un dispositivo de pre-calentamiento, el cual inicia y acelera la reacción de oxidación.

CRITERIOS DE EVALUACIÓN.

El corte puede ser exitosamente evaluado en términos de la cantidad de escoria acumulada (adherida a la pieza), el perfil del corte, la rugosidad de las superficies generadas (estriaciones), el ancho de corte y/o la zona afectada por el calor HAZ.²

Tamaño de escoria. El tamaño de la escoria es un indicador del perfil generado por el corte³, dado que, como se presenta en forma gráfica en la figura 57, se observa el detrimento de éste, al no manejarse las velocidades de corte adecuadas.

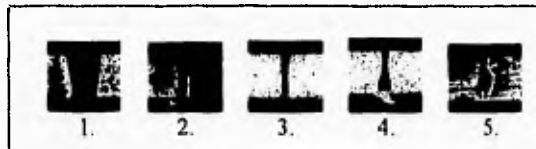


Figura 57 Perfiles de corte a diferentes velocidades.

En la figura 57 podemos observar los efectos en la pieza al aumentar la velocidad de corte. En la figura 57.1 podemos observar el efecto en la pieza al manejarse bajas velocidades de corte, mientras que en las figuras 2 y 3, a mayores velocidades, el corte es de caras casi paralelas a la superficie. Al aumentar aún más la velocidad de corte, se pueden esperar perfiles como los observados en las figuras 4 y 5, donde se llega al punto de no lograrse el corte.

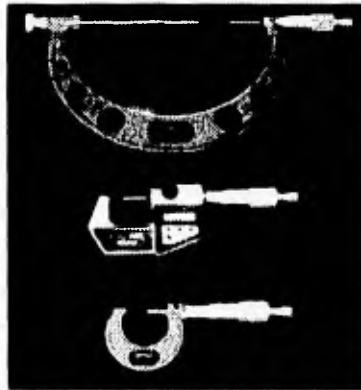


Figura 58 Micrómetros.

² Dynamic Behavior in Laser Gas Cutting of Mild Steel, Y. Arata; S. Takeuchi., Transaction of JWRI, Vol. 8, No.2, 1979, p 15-26.

³ New Laser-Gas Technique for Stainless Steel, Y. Arata, H. Maruo Transaction of JWRI, 1984, p 526-536

Para este estudio, el tamaño de escoria se evalúa mediante un promedio de mediciones, a través de los diferentes bordes cortados, con la ayuda de micrómetros de exteriores (figura 58). Una vez que la muestra es cortada, se mide en su totalidad (de la superficie de la muestra a la escoria) y se le resta el espesor de la lámina.

Rugosidad. Una superficie perfecta es una abstracción matemática ya que cualquier superficie real por más perfecta que parezca presentará irregularidades que se originan durante su proceso de fabricación. Una irregularidad menor es la rugosidad.

La medición de la rugosidad es un requerimiento importante al evaluar las condiciones del corte, debido a que las irregularidades de las superficies generadas por el corte, son producidas en parte por los mecanismos de corte presentados con anterioridad, los cuales provocan la formación de estriaciones (figura 56).

Para este estudio, la rugosidad se mide con un rugosímetro *Mitutoyo Surftest 402* con analizador de datos *Mitutoyo Surftest Analyser* (figura 59), el cual emplea un palpador de diamante con un radio de punta de 10 μm . La longitud de muestreo es de 1.25 mm, mientras que la longitud de evaluación, para cada muestra, es de tres (tres veces la longitud de muestreo).

La escala de medición está dada por Rz, la cual arroja el promedio de los picos y valles más grandes de la superficie.

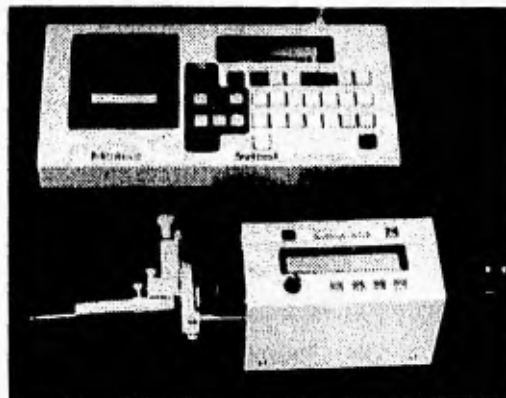


Figura 59 Rugosímetro Mitutoyo Surftest con analizador de datos.

Ancho de corte. Una de las ventajas que presenta el corte con láser, son los pequeños anchos de corte (figura 60), los cuales, de acuerdo con el fabricante, dependen del espesor del material; encontrándose entre 0.15 y 0.2 mm cuando se manejan parámetros de operación adecuados, sin embargo, de no ser así, estos llegan a ser de un tamaño considerablemente mayor, razón por la cual, es oportuno la medición de éstos.

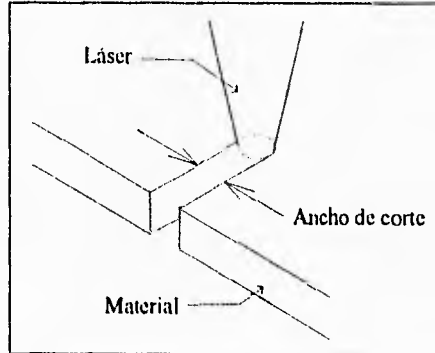


Figura 60 Ancho de corte de una pieza.

Para este estudio, los anchos de corte serán medidos mediante el microscopio de un microdurómetro compacto DURIMET de Leitz Wetzlar (figura 61), el cual cuenta con rejilla y pantalla de medición de hasta 2 mm.

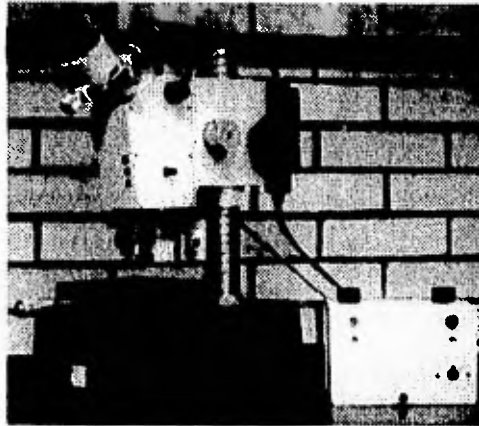


Figura 61 Microdurómetro Leitz Wetzlar.

Zona afectada por el calor (HAZ). Otra de las ventajas del corte con láser son las reducidas HAZ. De acuerdo con el fabricante, la HAZ es tan pequeña que no presenta deformaciones al material, encontrándose el valor máximo de ésta, igual a 0.1 del espesor del material (no se especifica el tipo de material).

Para determinar la HAZ de los diferentes materiales - calibres estudiados, se realizarán pruebas metalográficas con el fin de conocer posibles cambios en la microestructura, en las muestras cortadas con los que resulten ser los mejores parámetros. Solamente se estudiarán las mejores muestras dado que no se persigue con éste estudio, lograr un tratamiento térmico, aunque quizá éste sea una consecuencia del proceso de corte.



Figura 62 Equipo de preparación de estudio metalográfico.

Dicho lo anterior, las muestras seleccionadas serán cortadas en forma transversal y montadas en resina fenólica, para lograr una mejor manipulación de la pieza a la hora de su *pulido y ataque*. La superficie de la muestra debe ser: *plana*, porque la pequeña profundidad de foco de los sistemas ópticos de observación a grandes aumentos, no permitiría enfocar la imagen simultáneamente en los planos situados a distintos niveles; y estar debidamente *pulida* para que sólo puedan aparecer en ella detalles propios de su estructura, y no de circunstancias ajenas a ella que puedan enmascararla.

El *ataque* de la muestra tiene por objeto el mostrar, en forma selectiva, diversos constituyentes estructurales de las muestras, por medio de un reactivo para cada tipo de material. Para este estudio se realizará un ataque por inmersión (el reactivo se coloca en una cápsula en la que se introduce la probeta con la superficie pulida hacia arriba, para poder observar el proceso) con los reactivos: nital (Ácido nítrico) para los aceros de bajo carbono, con y sin recubrimiento, y Cloruro Férrico para el acero inoxidable 304.

Las muestras preparadas metalográficamente deberán ser observadas al microscopio, preferentemente en aumentos superiores a 100X (160 y 320X) para conocer los constituyentes estructurales de las muestras, además de los posibles cambios sufridos en el material, cercanos a la zona de corte.

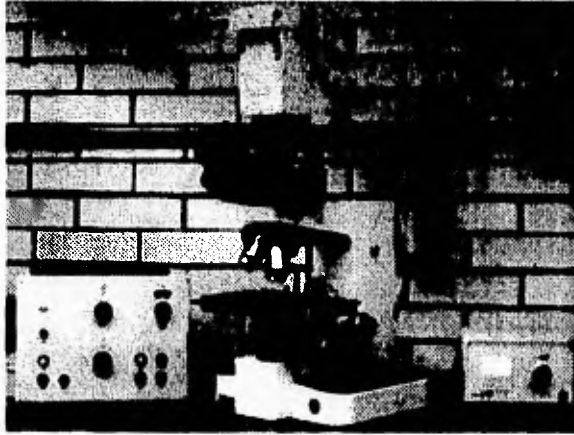


Figura 63 Microscopio metalográfico.

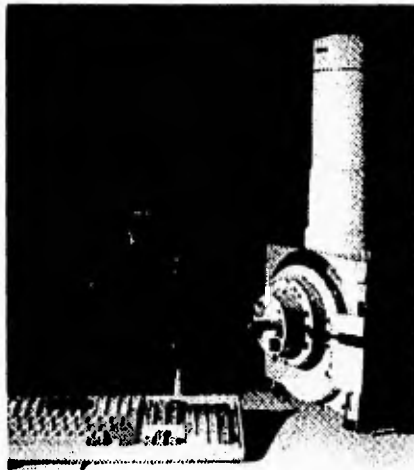


Figura 64 Microscopio electrónico de barrido PHILIPS XL20.

Los detalles y fines estructurales posibles de observar al microscopio, solo serán vistas en una sección plana y no en tres dimensiones como en realidad son, ya que los elementos estructurales que observamos en la probeta realmente están dispuestos en el espacio, ocupan un volumen, y es sólo esta disposición real la que nos puede dar la imagen correcta de su estructura.

Para evitar errores de interpretación se utilizará la ayuda de un estudio de composición a través de la sonda de rayos X de un microscopio electrónico (análisis EDX). Dicho estudio puede proporcionarnos la composición de elementos a lo largo de una línea, definida por el usuario preferentemente próxima al corte y a una distancia donde se homogeneice el material, con el fin de detectar variaciones de la composición, producto de un posible calentamiento.

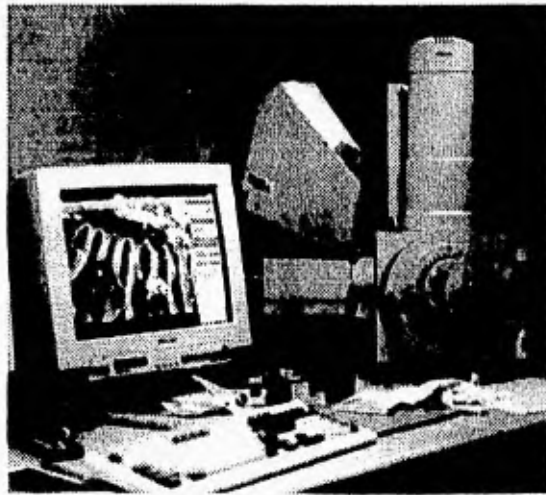


Figura 65 Microscopio electrónico . La flecha en la fotografía indica el accesorio para identificación de elementos.

Los detalles y fases estructurales posibles de observar al microscopio, solo serán vistas en una sección plana y no en tres dimensiones como en realidad son, ya que los elementos estructurales que observamos en la probeta realmente están dispuestos en el espacio, ocupan un volumen, y es sólo esta disposición real la que nos puede dar la imagen correcta de su estructura.

Para evitar errores de interpretación se utilizará la ayuda de un estudio de composición a través de la sonda de rayos X de un microscopio electrónico (análisis EDX). Dicho estudio puede proporcionarnos la composición de elementos a lo largo de una línea, definida por el usuario preferentemente próxima al corte y a una distancia donde se homogeneice el material, con el fin de detectar variaciones de la composición, producto de un posible calentamiento.

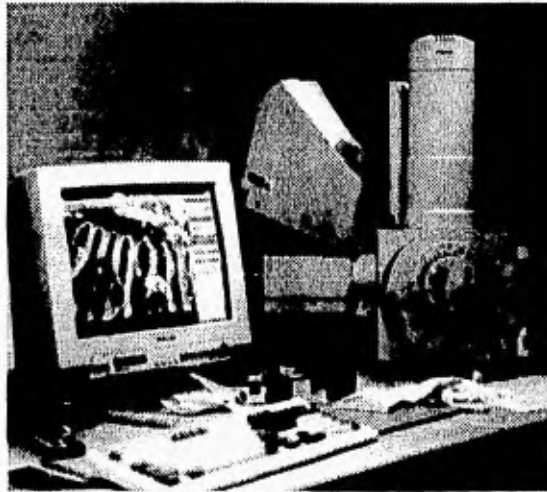


Figura 65 Microscopio electrónico . La flecha en la fotografía indica el accesorio para identificación de elementos.

Análisis de resultados. Los datos obtenidos serán analizados por medio de gráficas de una hoja electrónica de cálculo, y comprobados al macroscopio (figura 66), donde se deberán tomar decisiones finales con respecto a la selección de los mejores parámetros.

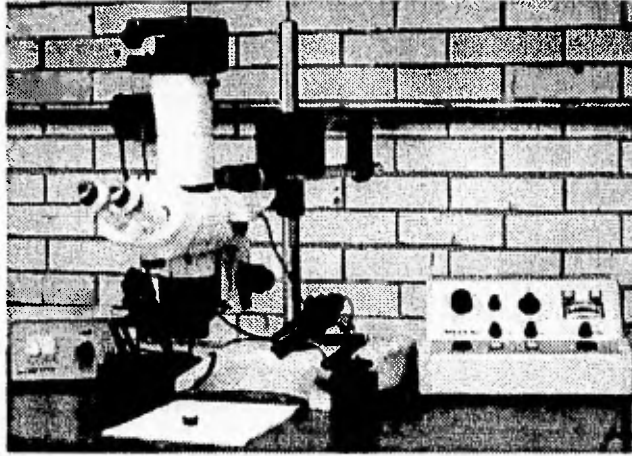


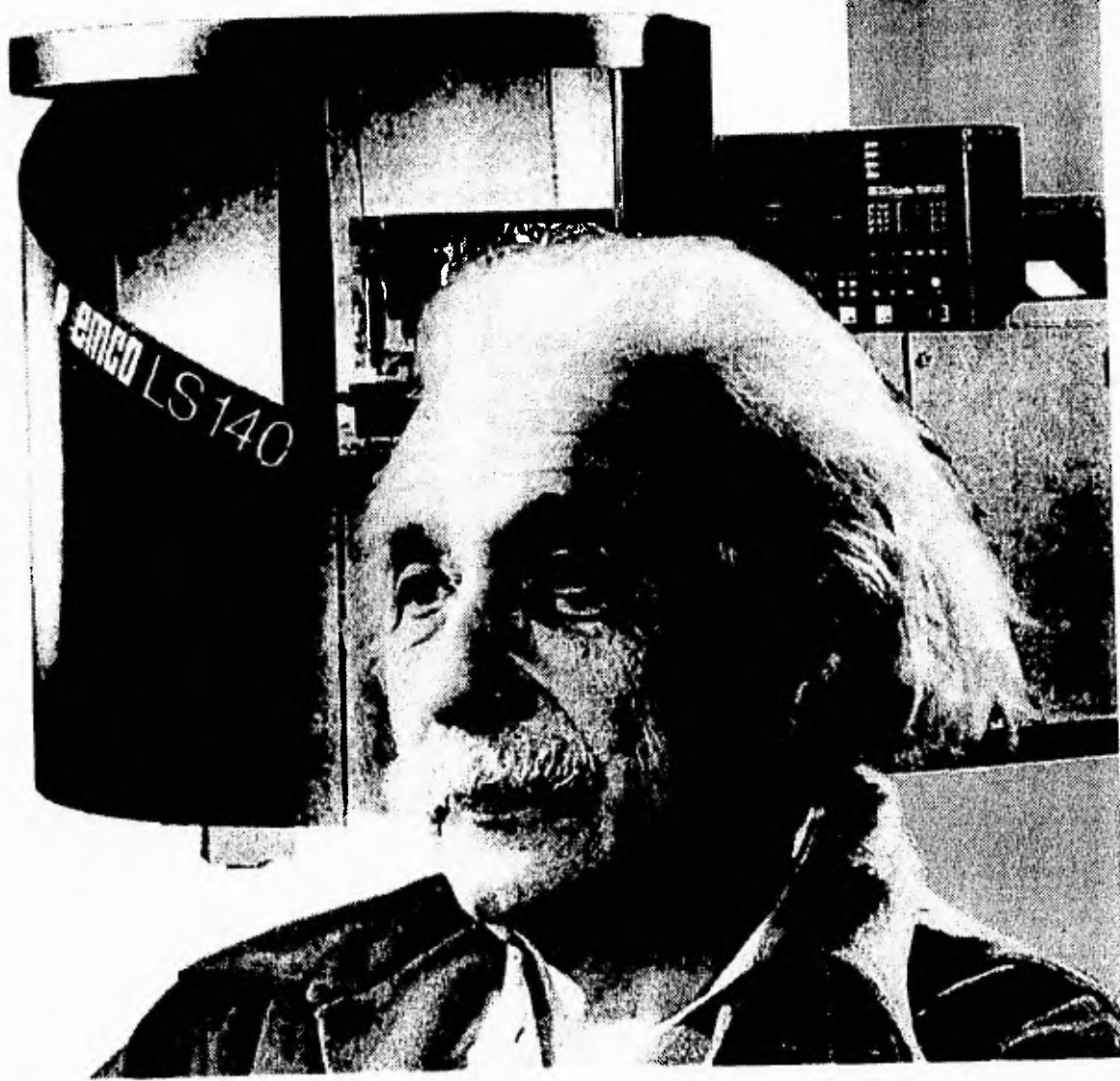
Figura 66 Macroscopio Wild Photomakroskop M400.

No necesariamente se obtiene mayor información de una micrografía a 2000 aumentos que una simple macrografía a 5 aumentos. De hecho, existen aspectos muy importantes que se pierden cuando nos acercamos al detalle.

A manera de conclusión se presentarán macrografías, de cada material calibre, donde se mostrará la apariencia de la muestras mejor cortadas.

CAPITULO

6



VI. RESULTADOS.

Las muestras generadas por los ensayos fueron medidas tal como se indica en el capítulo V. Los datos fueron capturados en una hoja de cálculo electrónica y analizados por medio de gráficas (para todos y cada uno de los ensayos). Por lo tanto, las gráficas solo mostrarán los valores de las piezas que resultaron ser cortadas con los parámetros óptimos, aunque, de cualquier manera, se comentaran los resultados generales.

ACERO DE BAJO CARBONO.

El corte de láminas de acero de bajo carbono se realiza por el calentamiento de la pieza, por medio del láser, y una reacción de oxidación generada por el oxígeno empleado como gas de proceso (dicho mecanismo se explica con mayor detalle en el capítulo V).

La escoria lanzada de la zona de corte esta compuesta, casi en su totalidad, de hierro y FeO (aproximadamente la mitad del hierro es oxidado).

Existe una diferencia sustancial entre la tensión superficial del hierro y del óxido de hierro. La tensión superficial del hierro es de 1872 mN/m (a 1530 °C), mientras que la del FeO es de sólo 585 mN/m (a 1430 °C). Esto tendrá efecto en la estructura de la mezcla de Fe y FeO, y en la adherencia de la escoria a la pieza de trabajo (la escoria presenta poca adherencia a la pieza). En la figura 67 podemos observar como el hierro tiende a formar esferas en una matriz de FeO¹.

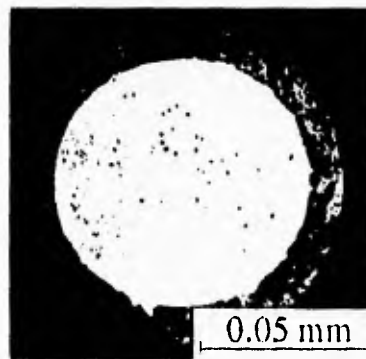


Figura 67 Corte transversal de una típica partícula lanzada del corte.

¹The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel and generation of striations on the cut edge. A.Ivarson, J.Powell. *Journal of Materials Processing Technology*. V40, 1994. p 359 - 374.

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS.

POSICIÓN DEL PUNTO FOCAL

Al variar la posición del punto focal, estaremos variando la densidad de energía en la superficie de la pieza, además de la reflexión de los haces en el exterior e interior del material, tal como lo muestran las figuras 26 y 33 respectivamente (la densidad de energía en el punto focal, de 0.17 mm de diámetro, es de aproximadamente 502,744 W/cm² teóricos).

En la figura 68a podemos apreciar que, la posición del punto focal no constituye un parámetro de gran variación del ancho de corte, excepto en el calibre 14 (el de mayor espesor) a una posición del punto focal de 1.2 mm.

El tamaño de escoria (figura 68b), al igual que el ancho de corte, no varía considerablemente a diferentes posiciones del punto focal en los calibres 24 y 18, no así para el calibre 14, donde se requiere un delicado control del punto focal.

La rugosidad (figura 69c) muestra alta sensibilidad a la posición del punto focal para los tres calibres, y de nuevo en especial para el calibre mayor.

En el caso de calibres pequeños (24 y 18) se requiere posicionar el punto focal a 0.8 mm dentro del material, de no ser así se corre el riesgo de generar cortes con rugosidad de hasta 40 µm. El ancho de corte y el tamaño de escoria no resultan ser un problema, dado que varían mínimamente. En el caso del calibre 14 el resultado es contrario al de los calibres menores. De no manejarse la posición del punto focal en la superficie de la pieza, el ancho de corte llega a ser mayor de 0.8 mm. con tamaños de escoria cercanos a 1 mm, mientras que la rugosidad es en general alta a cualquier posición del punto focal.

Las diferencias entre calibres, de la posición del punto focal óptima, pueden ser atribuidas a la forma en que lleva a cabo el mecanismo de inicio de corte, con respecto a una mayor o menor densidad de energía en la superficie de la pieza.

En el calibre 14 podemos apreciar claramente la formación de un punto crítico en las diferentes gráficas de los criterios de evaluación.

En general las cualidades de las piezas siguen un comportamiento directamente proporcional con el espesor del material, es decir, el ancho de corte, el tamaño de escoria y la rugosidad, suelen aumentar al cortar calibres de mayor espesor.

El calibre de corte máximo en acero de acuerdo con el fabricante del sistema láser, es no mayor de 2 mm, sin embargo, en pruebas realizadas antes de éste estudio, se logró cortar acero en espesores mayores a los establecidos por el fabricante (figura 69).

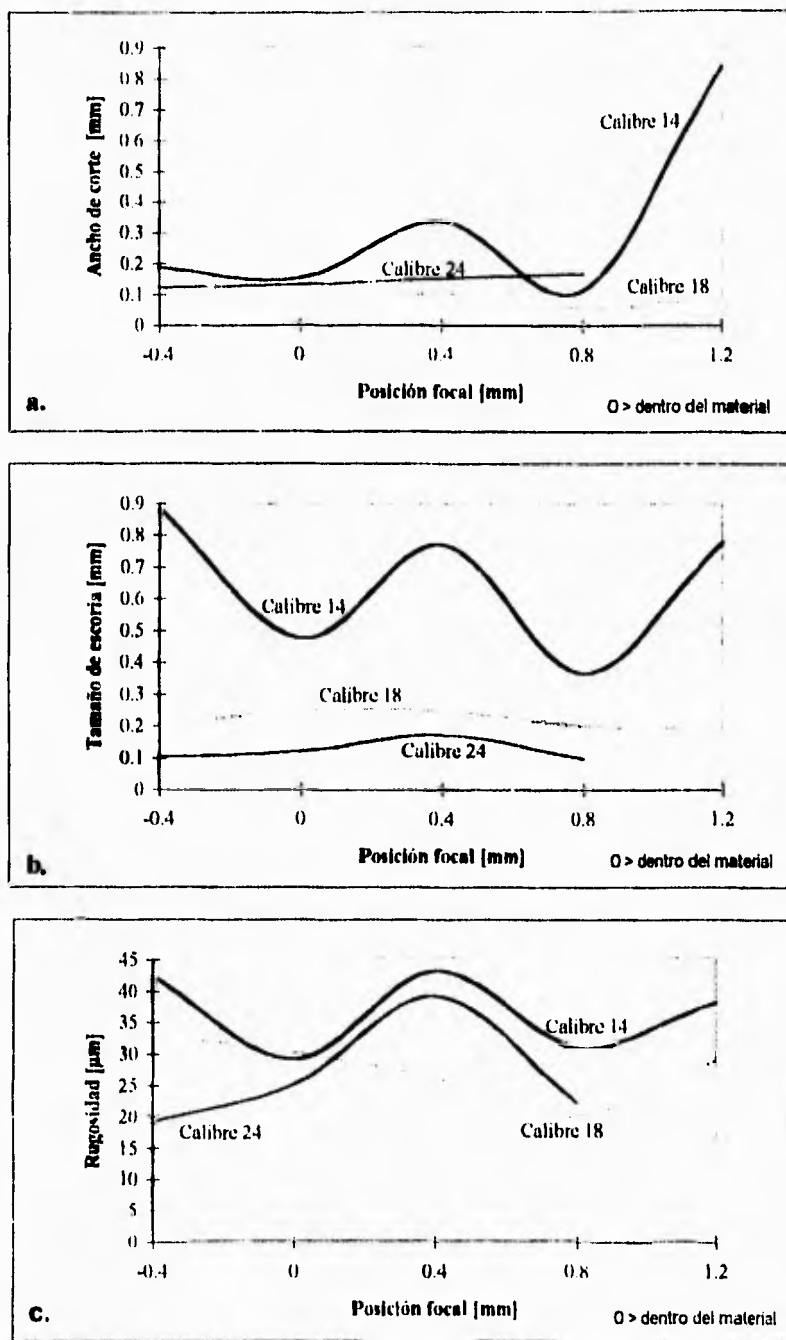


Figura 68 Acero de bajo carbono. Efectos de la posición del punto focal.

VELOCIDAD DE CORTE.

Este parámetro tiene que ver directamente con el tiempo de interacción, que tendrá del haz láser y del chorro de oxígeno con el material.

En la figura 70a podemos apreciar una casi nula relación del ancho de corte al variar la velocidad, dado que, como podemos observar, los intervalos de medición del ancho de corte son extremadamente pequeños. Lo anterior se presenta en especial en los calibres 14 y 18.

El tamaño de escoria (figura 70b) para los calibres 24 y 18, no presentan gran variación con respecto de la velocidad de corte, teniendo un máximo de 0.17 y 0.255 mm respectivamente.

El tamaño de escoria para el calibre 14 puede llegar a ser un problema a velocidades mayores de 800 mm/min.

La rugosidad (figura 70c), de las superficies generadas por el corte, suele ser alta en general; de hasta 40 μm para el calibre 14 y 30 μm para los calibres 24 y 18.

La velocidad de corte esta muy relacionada con la densidad de potencia en la superficie del material (colocación del punto focal). Lo anterior puede comprobarse al conocer que el acero de baja aleación calibre 14 se corta mejor a mayor velocidad que el calibre 18, siendo éste último de menor espesor. El calibre 14 se corta mejor colocando el punto focal en la superficie de la pieza, proveyendo a ésta con una mayor energía superficial necesaria para iniciar el proceso de oxidación.

Una limitación del corte con láser es que no realiza buenos cortes en aceros de bajo carbono (en ningún calibre), a velocidades menores de 400 mm/min (figura 69).



Figura 69 La figura superior muestra una pieza cortada con parámetros no recomendados.
La figura inferior muestra el corte de acero de bajo carbono con un espesor de 3.6 mm.

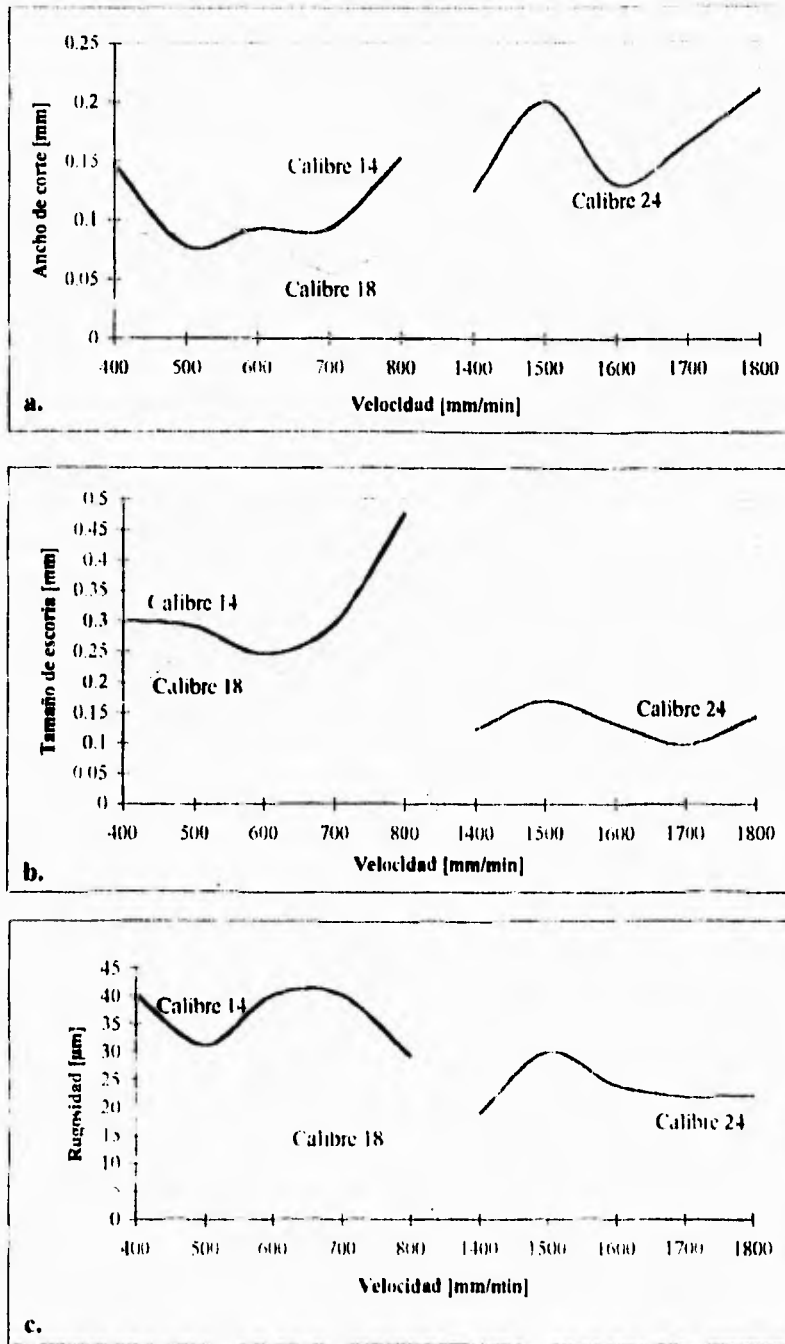


Figura 70 Acero de bajo carbono. Efectos de la velocidad

GAS DE PROCESO: PRESIÓN DEL GAS Y DISTANCIA DE LA BOQUILLA.

La relación entre el macho de corte y la presión del gas, en un rango de 4 a 6 bar, es casi inexistente, ya que las gráficas tienden en general a una horizontal a través de intervalos extremadamente pequeños (figura 71a). Los anchos de corte incluso llegan a ser menores al diámetro del punto focal (0.171 mm). El ancho de corte es mayor en calibres delgados, debido a que la posición del punto focal en este calibre se encuentra por debajo de la pieza (mayor diámetro del haz en la superficie).

En la figura 71b podemos observar nuevamente, una nula relación del tamaño de escoria con la presión del gas, donde los tamaños de escoria más grandes se presentan en los calibres de mayor espesor, llegando a ser cercanos a 0.7 mm en el calibre 14, y de 0.1 en el calibre 24.

La rugosidad presenta una mayor dependencia de la presión del gas en el calibre 14, ya que ésta oscila entre 31 y 50 μm . En el caso de los calibres delgados (24 y 18) la presión del gas continúa sin ser un parámetro de gran peso; la rugosidad en estos calibres es cercana a las 20 μm .

De no manejarse la presión óptima, se corre el riesgo de una pos-oxidación además de un desperdicio de gas², aunque de cualquier manera, la presión del oxígeno puede variar $\pm 10\%$ sin cambios apreciables en la geometría de las estriaciones.

La distancia de la boquilla a la pieza de trabajo, es un parámetro de gran peso en el corte de acero de bajo carbono, en especial para el calibre 14 (figura 72). El ancho de corte en el calibre 14, al variar la distancia de la boquilla al material (en un rango de 0.254 a 1.02), oscila entre 0.49 y 0.1 mm. En el caso de los calibres delgados, la distancia de la boquilla no presenta gran variación del ancho de corte, encontrándose éste entre 0.1 y 0.05 para el calibre 24 y 18 respectivamente, además se presenta un rango donde se estabiliza el ancho de corte.

El tamaño de escoria aparentemente no presenta una variación con respecto a la distancia de la boquilla en los calibres 24 y 18, aunque en el calibre 14, el tamaño de escoria es cercano a 1 mm (figura 72b).

La rugosidad es el criterio de evaluación del corte, que presenta mayor sensibilidad a la variación de la distancia de la boquilla. La figura 72c muestra valores en general altos, de rugosidad. Los valores de rugosidad oscilan entre 17 y 34 μm para los tres calibres.

En general se puede observar claramente un punto crítico de los criterios de evaluación, para cada calibre al variar la distancia de la boquilla.

² En el caso de sistemas láser de alta potencia, se recomienda disminuir la presión del gas al aumentar el espesor del material, ya que se corre el riesgo de quemarlo.

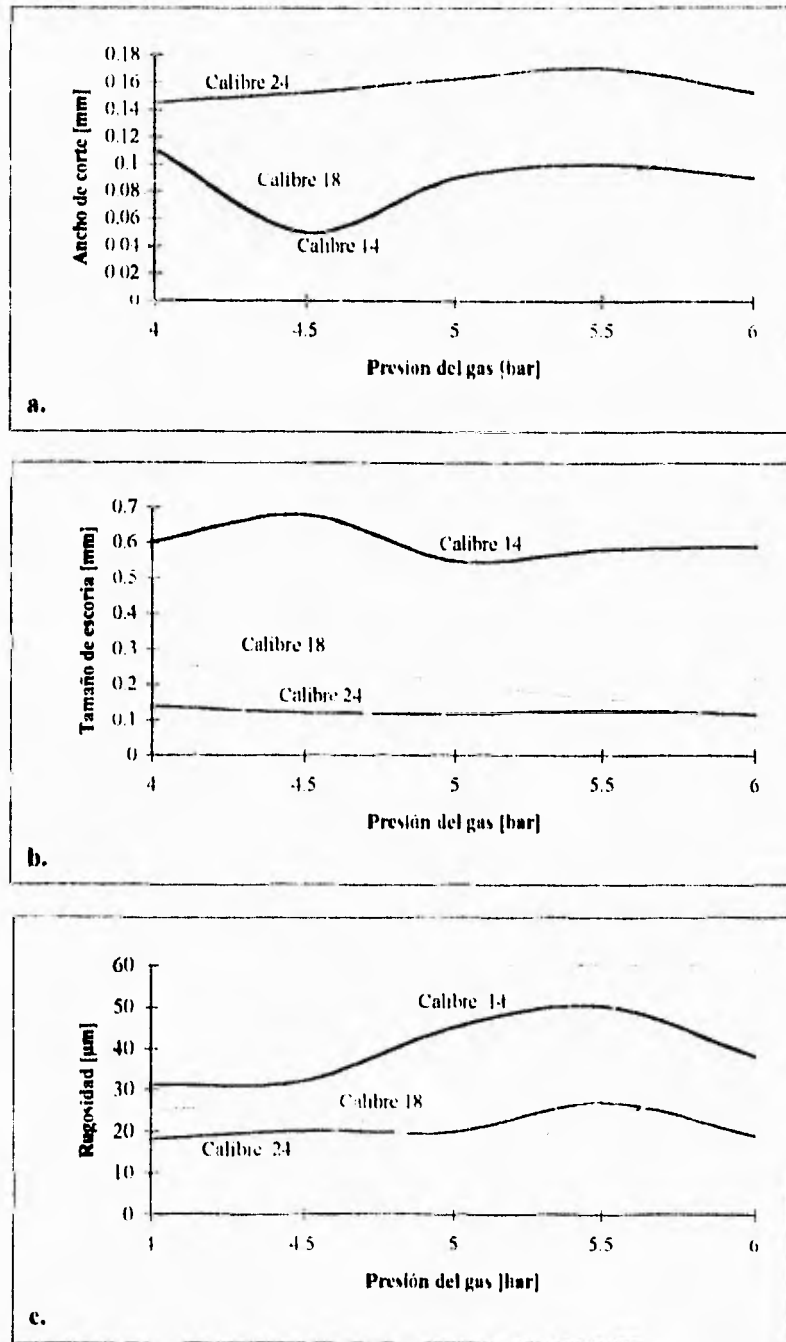


Figura 71 Acero de bajo carbono. Efectos de la presión del gas.

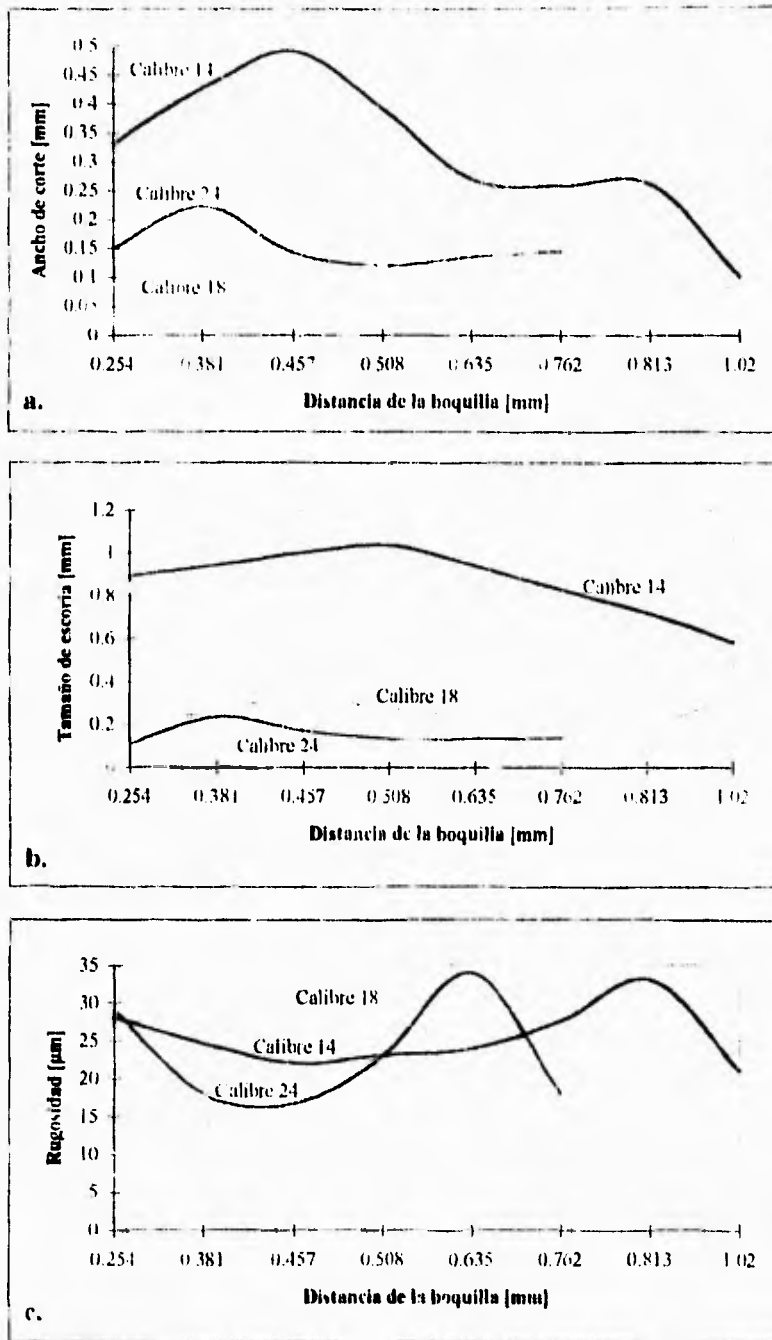


Figura 72 Acero de bajo carbono Efectos de la distancia de la boquilla

PARÁMETROS DE CORTE ÓPTIMOS.

DATOS:

MATERIAL: Acero de bajo carbono.

RUGOSIDAD SUP:

5 μm	Cal 24	(0.635 mm)
3 μm	Cal 18	(1.27 mm)
5 μm	Cal 14	(1.984 mm)

PARÁMETROS DE CORTE:

POTENCIA:

120 Watts	(requeridos por el programa)
116 Watts	(reales)

VELOCIDAD:

1700 mm/min	Cal 24
700 mm/min	Cal 18
800 mm/min	Cal 14

POSICIÓN. PTO. FOCAL:

(>0 dentro del material)

0.8 mm	Cal 24
0.8 mm	Cal 18
0.0 mm	Cal 14

GAS DE PROCESO: Oxígeno.

PRESIÓN DEL GAS:

4.0 bar	Cal 24
5.0 bar	Cal 18
5.5 bar	Cal 14

DISTANCIA DE BOQUILLA:

0.762 mm	Cal 24
0.813 mm	Cal 18
1.02 mm	Cal 14

APARIENCIA DEL CORTE.

En las figuras 73a, 74a y 75a podemos observar la vista superior del corte, donde en el caso de los calibres 24 y 18 se presenta una banda paralela al corte, de material quemado en forma muy superficial (no mayor de 5 μm). El ancho de la banda es comparable al ancho de corte (no se presenta arrastre de material fundido en la superficie).

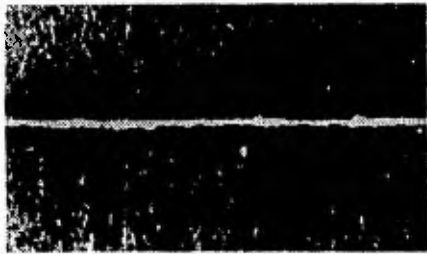
Los anchos de corte generados son de 0.145, 0.09 y 0.1 mm, para los calibres 24, 18 y 14 respectivamente; todos ellos menores al diámetro del punto focal teórico (0.171 mm).

La rugosidad de las superficies generadas por el corte es, en los calibres 24 y 18, de estriaciones primarias. En el caso del calibre 14, se observa que la rugosidad varía con la distancia, y que tiende a la formación de estrias secundarias.

La rugosidad promedio es de 18, 17 y 21 μm para los calibres 24, 18 y 14 respectivamente.

Las vistas posteriores muestran, en la mayoría de los casos, escoria discontinua a lo largo de la base de las muestras cortadas. El tamaño de escoria es de 0.1375, 0.265 y 0.58 mm para los calibres 24, 18 y 14 respectivamente; en la mayoría de los casos la escoria es removible fácilmente.

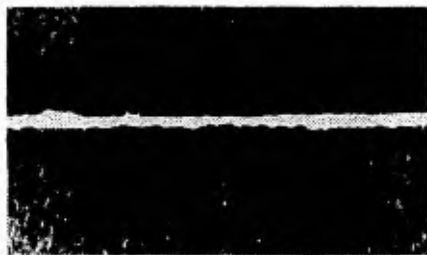
El inicio de corte es en general no accidentado en calibres delgados. Cuando se inicia el corte se logra escuchar una pequeña explosión, pudiendo ser tan severa como la presentada en la figura 75d, cuya perforación en el material es cercana a los 3 mm. de diámetro.



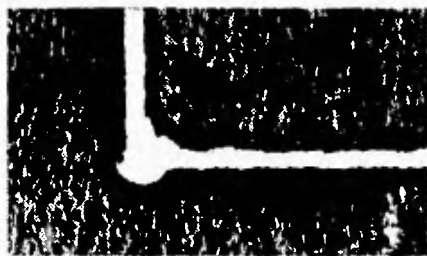
a. Vista superior del corte (11X)
Ancho de corte promedio = 0.145 mm.



b. Estrías (11X)
Rugosidad promedio = 18 μm .

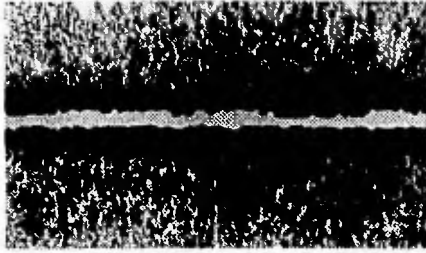


c. Vista posterior del corte (11X)
Tamaño de escoria promedio = 0.1375 mm.



d. Inicio de corte (11X)
Diámetro promedio = 0.5 mm.

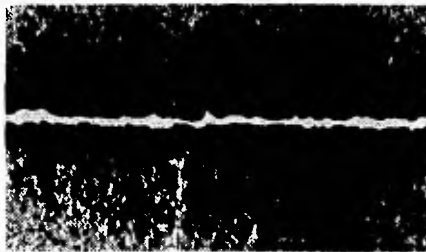
Figura 73 Lámina de acero de bajo carbono, calibre 24.



a. Vista superior del corte (11X)
Ancho de corte promedio = 0.09 mm.



b. Estructuras (11X)
Rugosidad promedio = 17 μm .

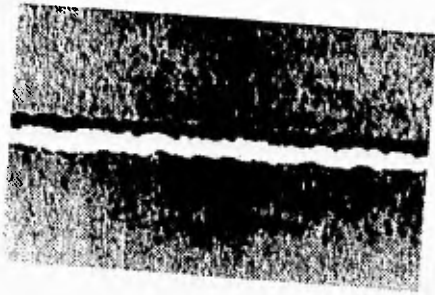


c. Vista posterior del corte (11X)
Tamaño de escoria promedio = 0.265 mm.



d. Inicio de corte (11X)
Diámetro promedio = 0.6 mm.

Figura 74 Lámina de acero de bajo carbono, calibre 18.



a. Vista superior del corte (11X)
Ancho de corte promedio = 0.1 mm.



b. Estriaciones (11X)
Rugosidad promedio = 21 μm .



c. Vista posterior del corte (11X)
Tamaño de escoria promedio = 0.58 mm.



d. Inicio de corte (11X)
Diámetro promedio = 2.9 mm.

Figura 75 Lámina de acero de bajo carbono, calibre 14.

METALOGRAFÍA.

Debido a que el corte se realiza por medio de una reacción química, algunos cambios químicos son de esperarse.

Las piezas procesadas, con los que resultaron ser los mejores parámetros, fueron cortadas en forma transversal para realizar un estudio metalográfico.

El estudio muestra que los cambios en la microestructura son mínimos, dado el bajo contenido de carbono del material procesado, y que dichos cambios se presentan solamente a poca distancia de la zona de corte, lo que comprueba las pequeñas zonas afectadas por el calor HAZ.

El corte con láser de aceros de bajo carbono genera, en una zona superficial cercana al corte, el equivalente a un enfriamiento al aire conocido en el medio de los tratamientos térmicos como normalizado (figuras 76 y 77), el material en el frente de corte alcanza una temperatura de 1650 °C (promedio)³, superior a la temperatura de austenización (900°C), en una zona muy próxima al corte (50 µm, después de ésta distancia el material luce homogéneo). Algunas investigaciones al respecto, reportan la existencia de otro factor de evaluación: la carburización⁴, consecuencia de la quemadura de material.

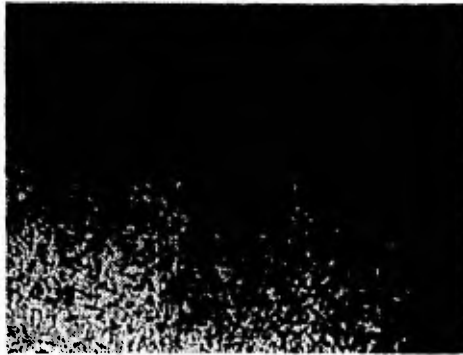


Figura 76 Acero de bajo carbono a 160X. Ataque: nital 7 segundos.

El ataque al material con nital revela en forma oscura la perlita para diferenciar la ferrita.

³The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel and generation of striations on the cut edge. A. Ivarson, J. Powell. Journal of Materials Processing Technology (Journal article). V 40, 1994. p 359 - 374.

⁴Dilthey reporta que el carbono se retendrá por la capa de material fundido mientras que el hierro es oxidado y lanzado del frente de corte (escoria). Laser cutting os steel - cut quality depending on cutting parameters. Dilthey, U. Faerber, M. Welding in the world (Journal article) v 30, n 9-10, 1992- p 275-278.

METALOGRAFÍA.

Debido a que el corte se realiza por medio de una reacción química, algunos cambios químicos son de esperarse.

Las piezas procesadas, con los que resultaron ser los mejores parámetros, fueron cortadas en forma transversal para realizar un estudio metalográfico.

El estudio muestra que los cambios en la microestructura son mínimos, dado el bajo contenido de carbono del material procesado, y que dichos cambios se presentan solamente a poca distancia de la zona de corte, lo que comprueba las pequeñas zonas afectadas por el calor HAZ.

El corte con láser de aceros de bajo carbono genera, en una zona superficial cercana al corte, el equivalente a un enfriamiento al aire conocido en el medio de los tratamientos térmicos como normalizado (figuras 76 y 77), el material en el frente de corte alcanza una temperatura de 1650 °C (promedio)³, superior a la temperatura de austenización (900°C), en una zona muy próxima al corte (50 µm, después de ésta distancia el material luce homogéneo). Algunas investigaciones al respecto, reportan la existencia de otro factor de evaluación: la carburización⁴, consecuencia de la quemadura de material.



Figura 76 Acero de bajo carbono a 160X. Ataque: nital 7 segundos.

El ataque al material con nital revela en forma oscura la perlitita para diferenciar la ferrita.

³ *The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel and generation of striations on the cut edge.* A. Ivarson, J. Powell. *Journal of Materials Processing Technology* (Journal article). V 40, 1994. p 359 - 374.

⁴ Dilthey reporta que el carbono se retendrá por la capa de material fundido mientras que el hierro es oxidado y lanzado del frente de corte (escoria). *Laser cutting of steel - cut quality depending on cutting parameters.* Dilthey, U. Faerber, M. *Welding in the world* (Journal article) v 30, n 9-10. 1992- p 275-278.

Al aumentar el calibre se incrementa ligeramente la concentración de carbono en la zona próxima al corte, debido a que el haz permanece con un tiempo de interacción mayor que en los calibres más pequeños. Este factor es el que determina la mayor concentración de carbono, dado que el material consumido por el corte (posible causante de carburización), no varía considerablemente entre los diferentes calibres.



Figura 77 Acero de bajo carbono a 320X. Ataque: nital 7 segundos.

En las imágenes anteriores podemos darnos cuenta, en forma meramente visual, de la concentración de carbono, pero podemos comprobarlo mediante un estudio de composición de elementos.

ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN.

Los aceros al carbono comerciales contienen pequeñas cantidades de otros elementos, además de hierro y carbono, como parte de la composición normal. La composición estándar de un acero de bajo carbono es la siguiente: de 0.08 a 0.13 %C, de 0.3 a 0.6 %Mn, 0.04 %P máximo y 0.05 %S máximo.

El análisis de composición de elementos, a lo largo de una línea cercana al corte (a una distancia no mayor de 15 μm) y otra alejada del corte (0.25 mm) demuestran que el enfriamiento de la pieza (después de ser cortada) es lo suficientemente lento para permitir que el carbono se difunda fuera de la estructura de austenita. De esta forma encontramos que los cambios son: un aumento de carbono (27.485% más que la composición homogénea) y de oxígeno (34.26% más que en la composición homogénea del material).

Otros cambios perceptibles son un aumento en la composición de nitrógeno, azufre y manganeso, y una disminución de hierro y fósforo.

La figura 78 muestra la zona afectada por el calor **HAZ** (lado izquierdo de la ilustración) la cual fue utilizada para el estudio de composición de elementos. La muestra está limitada por la resina en la cuál fue montada.



Figura 78 Microscopia donde se muestra el área del estudio de composición.

Los principales cambios en las propiedades mecánicas, predecibles debido a los cambios en la composición, a una distancia de 15 μm (promedio) de la zona de corte son:

- *endurecimiento del material*, a consecuencia del incremento de carbono.
- *fragilización del material*, por un mayor aumento de azufre que manganeso. El azufre tiende a fragilizar el material al formar sulfuro de hierro (FeS) y concentrarse en los límites de grano. El aumento de manganeso no es lo suficientemente alto para compensar el aumento de azufre (el manganeso se contrapone a los malos efectos del azufre al formar MnS).
- *ligero aumento de resistencia y dureza*. El fósforo tiende a disolver la ferrita aumento con ello las propiedades mencionadas.
- *Reducción de ductilidad*. El fósforo en cantidades mayores reduce la ductilidad, aumentando con ello la tendencia del acero a agrietarse cuando se trabaja en frío.

La tabla de la figura 79 muestra los resultados del estudio de composición de elementos realizado.

ACERO DE BAJO CARBONO.

Perfil de composición cerca del corte (15µm)

Wt%	Fe	C	Mn	P	S	N	O
1	49.93	20.21	0.94	0.28	0.36	4.56	23.63
2	75.01	9.89	2.63	0.79	0.86	4.53	6.29
3	75.01	9.89	2.63	0.79	0.86	4.53	6.29
4	76.04	8.69	1.69	0.48	0.61	5.29	7.20
5	77.02	9.79	2.46	0.74	0.89	3.72	5.38
6	76.86	8.86	2.63	0.68	0.81	5.11	5.04
7	77.02	9.79	2.46	0.74	0.89	3.72	5.38
8	76.86	8.86	2.63	0.68	0.81	5.11	5.04
9	77.02	9.79	2.46	0.74	0.89	3.72	5.38
10	76.86	8.86	2.63	0.68	0.81	5.11	5.04
Total	681.82	126.21	20.49	6.35	7.79	47.56	109.68
Media	68.182	12.621	2.049	0.635	0.779	4.756	10.968

Perfil de composición a distancia del corte (0.25 mm).

Wt%	Fe	C	Mn	P	S	N	O
1	75.99	10.80	2.30	0.73	0.87	3.71	5.60
2	79.41	7.68	2.20	0.71	0.75	4.35	4.89
3	79.41	7.68	2.20	0.71	0.75	4.35	4.89
4	77.39	10.66	2.65	0.77	0.81	3.56	4.17
5	77.39	10.66	2.65	0.77	0.81	3.56	4.17
6	76.83	9.15	2.09	0.67	0.80	4.40	6.06
7	76.83	9.15	2.09	0.67	0.80	4.40	6.06
8	57.29	13.97	0.72	0.55	0.66	3.87	22.93
9	57.29	13.97	0.72	0.55	0.66	3.87	22.93
10	57.29	13.97	0.72	0.55	0.66	3.87	22.93
Total	744.81	99.00	20.33	6.74	7.37	40.05	81.69
Media	74.481	9.900	2.033	0.674	0.737	4.005	8.169

Figura 79 Resultado del análisis de composición

LÁMINA GALVANIZADA.

El mecanismo de corte que rige en éste material continua siendo la acción oxidante del gas de proceso, solo que ahora el material presenta una mayor oposición al corte, debido al recubrimiento de cinc. El recubrimiento de cinc presenta una superficie más reflejante, la cual impide el contacto físico del acero con el oxígeno soplado, además de brindar al acero una protección catódica. Estas condiciones dificultan el proceso de corte, haciendo necesario un mayor tiempo de interacción del láser - oxígeno.

El cinc es altamente reflejante a la longitud de onda del sistema utilizado (10.6 μm) lo que conduce, entre otras cosas, a una extremadamente alta dificultad de inicio de corte.

Para lograr iniciar el corte del material, se observó que es necesario comenzar el corte desde fuera de la pieza o bien retirar parcialmente el recubrimiento de cinc (de alta reflexión), con lo que además se aumenta la rugosidad superficial. Cuando se logra iniciar el corte se produce una explosión violenta, que incluso llega a liberar la pieza de trabajo de los soportes magnéticos.

En general las piezas cortadas presentan escoria de poca adherencia en la parte inferior, mientras que en la superficie se observa una banda paralela al corte.

La mayor parte de cinc se evapora por acción de la alta temperatura en el frente de corte (1600°C), dejando a su paso una delgada banda del material faltante, la cual es limitada por el cinc que fue arrastrado al haber sido líquido. Esta banda resulta muy delgada (aproximadamente del ancho de corte) a pesar de que el cinc presenta un muy bajo punto de fusión (419.4°C) y de ebullición (907°C), dado que parte del óxido (ZnO) se recubre de una capa de carbonato básico (CO_3Zn) que protege la fundición⁵.

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS.

POSICIÓN DEL PUNTO FOCAL.

La posición del punto focal no presenta cambios considerables con respecto al ancho de corte, tamaño de escoria y rugosidad, lo cual es fácil de apreciar en las gráficas, las cuales tienden a una línea horizontal a través de amplios rangos de valores.

Las gráficas de la figura 80, muestran en general que los calibre más delgados son los más sensibles a la posición del punto focal, ya que estos son a su vez más sensibles a la presión del gas de proceso con que fueron cortados en la primera etapa del desarrollo, en base a condiciones estándar de operación del gas de proceso. De esa manera tenemos que el ancho de corte para el calibre 22 es muy cercano a 1 mm, mientras que el tamaño de escoria resulta ser mayor a 1 mm.

⁵ Cómo funciona. Enciclopedia Salvat de la técnica. Fascículo 35. Salvat Editores. S.A. Barcelona, España 1980. p 122-126.

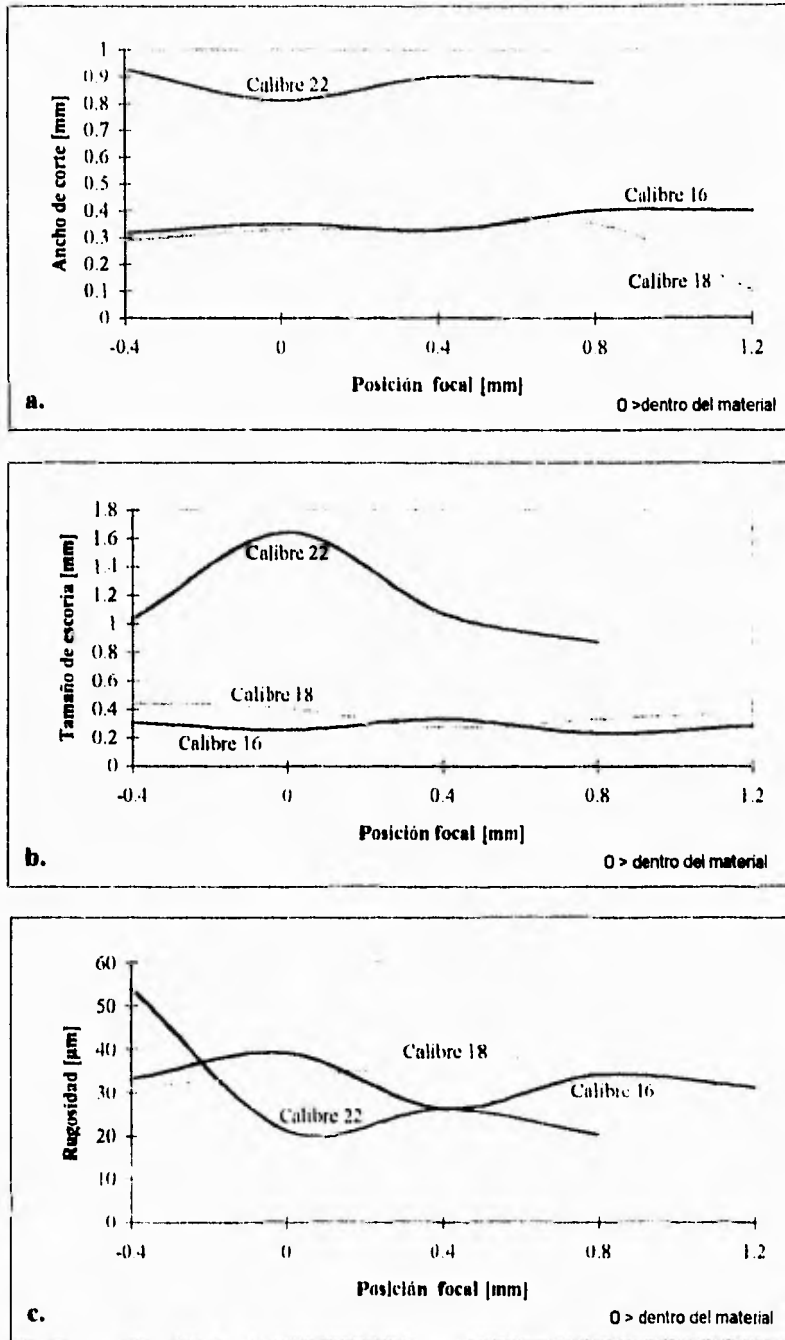


Figura 80 Lámina galvanizada. Efectos de la posición del punto focal

Con respecto a la rugosidad, los tres calibres se encuentran aparentemente, en rangos muy cercanos entre sí.

Se observa que la posición del punto focal, para el calibre 22, es óptima en la superficie de la pieza, mientras que para los otros calibres la posición del punto focal es indiferente.

VELOCIDAD DE CORTE.

La velocidad es función de la densidad de potencia y del tiempo de interacción necesario para producir el corte eficiente del material, lo cual se comprueba al conocer que un espesor mayor (calibre 16) es posible de cortar, con un buen acabado, a una velocidad mayor (400 mm/min) que la de un calibre menor (400 mm/min), esto debido a que en el calibre mayor la posición del punto focal se encuentra en la superficie de la pieza; aunque no con ello se generan anchos de corte menores (ver figura 81a).

Las velocidades de corte son mucho menores que las empleadas en el corte de aceros de baja carbono sin recubrimiento; inclusive llegan a ser menores de 500 mm/min (velocidad crítica en el corte de aceros de baja carbono sin recubrimiento, dado que se llega a tener problema con la fusión del material).

El ancho de corte, el tamaño de escoria y la rugosidad, suelen presentar mayor problema en los calibres delgados (figura 81a) dado que, como ya fue comentado, la presión y altura de la boquilla fueron fijadas, en la primera etapa del desarrollo, de acuerdo con condiciones estándar de operación. De esta manera tenemos que, el ancho de corte va de 1 mm a 0.1 mm, para los diferentes calibres. El tamaño de escoria llega a estar cercano a los 2 mm, y la rugosidad de hasta 38 μm .

En general las condiciones para el calibre 18 son extremadamente semejantes a la del calibre 16. Esto resulta singular ya que la diferencia de espesores es muy pequeña (aproximadamente 0.3 mm) aunque el corte de materiales se realizó con un sistema compacto, esa diferencia de espesores resulta lo suficientemente grande como para generar diferentes condiciones de corte.

El rango de velocidades estudiado para el corte de los calibres 18 y 16 fue de 300 a 700 mm/min con intervalos de 100 mm/min; si se emplean velocidades fuera del rango establecido, la calidad del corte tanto decrece como simplemente no se logra. El rango de velocidades para el calibre 22 resulta ser considerablemente mayor, de 1200 a 1600 mm/min, que para los calibres 18 y 16.

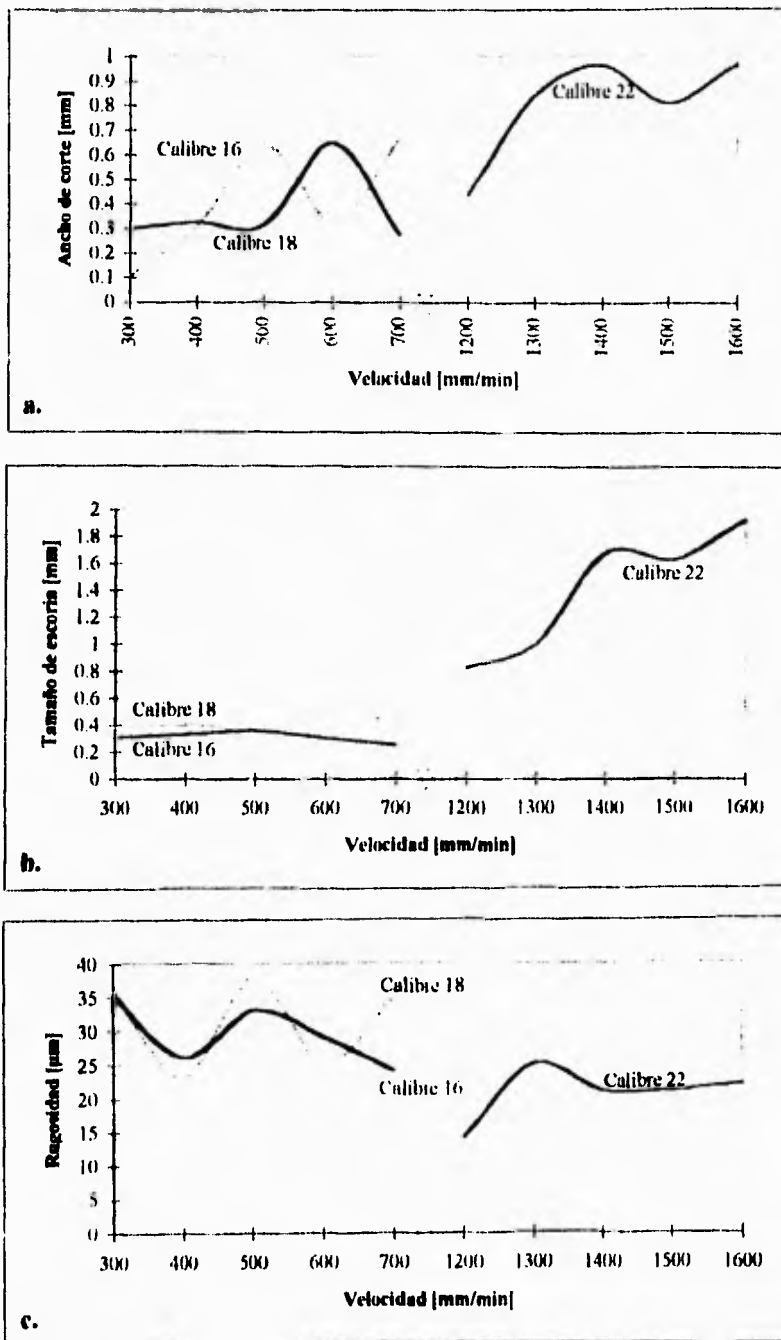


Figura 81 Lámina galvanizada. Efectos de la velocidad.

GAS DE PROCESO: PRESIÓN DEL GAS Y DISTANCIA DE LA BOQUILLA.

La presión del gas de proceso no resulta una variable importante en la combinación de parámetros seleccionados, aunque de hacerse en rangos distintos a los aquí presentados, se producirán pequeñas explosiones que dejarán como consecuencia mala calidad del corte (figura 82). La reducción de la presión del gas de proceso reduce el consumo de éste.

En general, el ancho de corte y el tamaño de escoria para los tres diferentes calibres estudiados, no presentan variación con respecto a la presión del gas de proceso (figura 83). Por ejemplo, el ancho de corte para el calibre 22 se mantiene entre 0.33 y 0.23 mm (figura 83a) y el tamaño de escoria se encuentra preferentemente en 0.65 mm (figura 83b).

La rugosidad de las piezas cortadas muestra una variación considerable con respecto a la presión del gas, como lo vemos en la gráfica de la figura 83c.

La distancia de la boquilla resulta ser el parámetro más importante, para el corte de lamina galvanizada, ya que de no manejarse ésta adecuadamente para cada calibre, se producirán pequeñas explosiones que dejarán como consecuencia una mala calidad de corte.

Al variar la distancia de la boquilla, el rango de ancho de corte se mantiene uniforme para cada calibre, siendo excesivo en el caso del calibre 18, donde el rango va de 1.16 a 1.37 mm, siendo este una consecuencia de cortar a una más alta velocidad (figura 84a), ya que como lo reporta la bibliografía⁶, a mayor velocidad se genera mayor temperatura en el frente de corte.

El tamaño de escoria, al variar la distancia de la boquilla, resulta ser excesivo en el caso del calibre 22, donde el rango de tamaño de escoria es de 0.61 a 1.07 mm. Para los calibres mayores el tamaño de escoria no resulta ser un problema (figura 84b).

La rugosidad promedio es aceptable (21 μm) para los diferentes calibres estudiados (figura 84c).



Figura 82 Lamina galvanizada cortada con parámetros no recomendables.

⁶The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel and generation of striations on the cut edge. A. Ivarson, J. Powell. *Journal of Materials Processing Technology*. V 40, 1994. p 359 - 374.

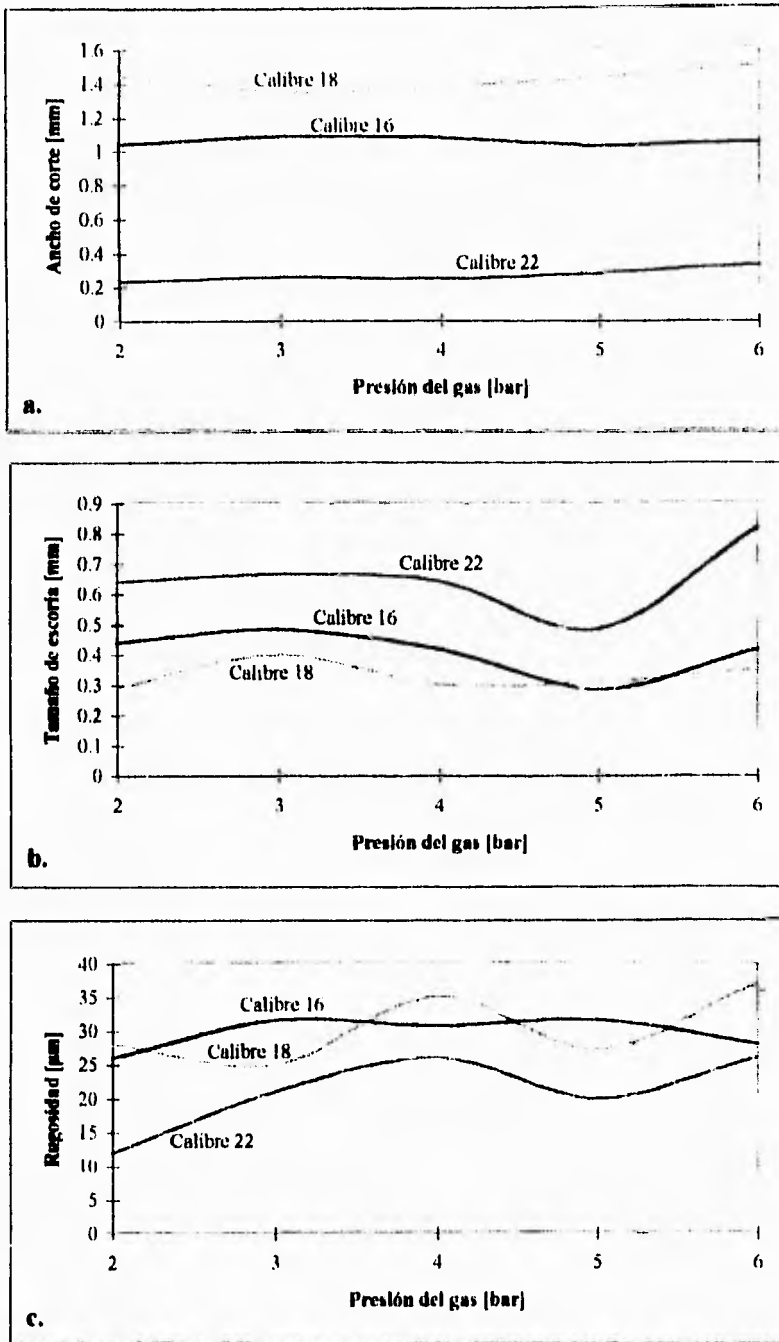


Figura 83 Lámina galvanizada. Efectos de la presión del gas.

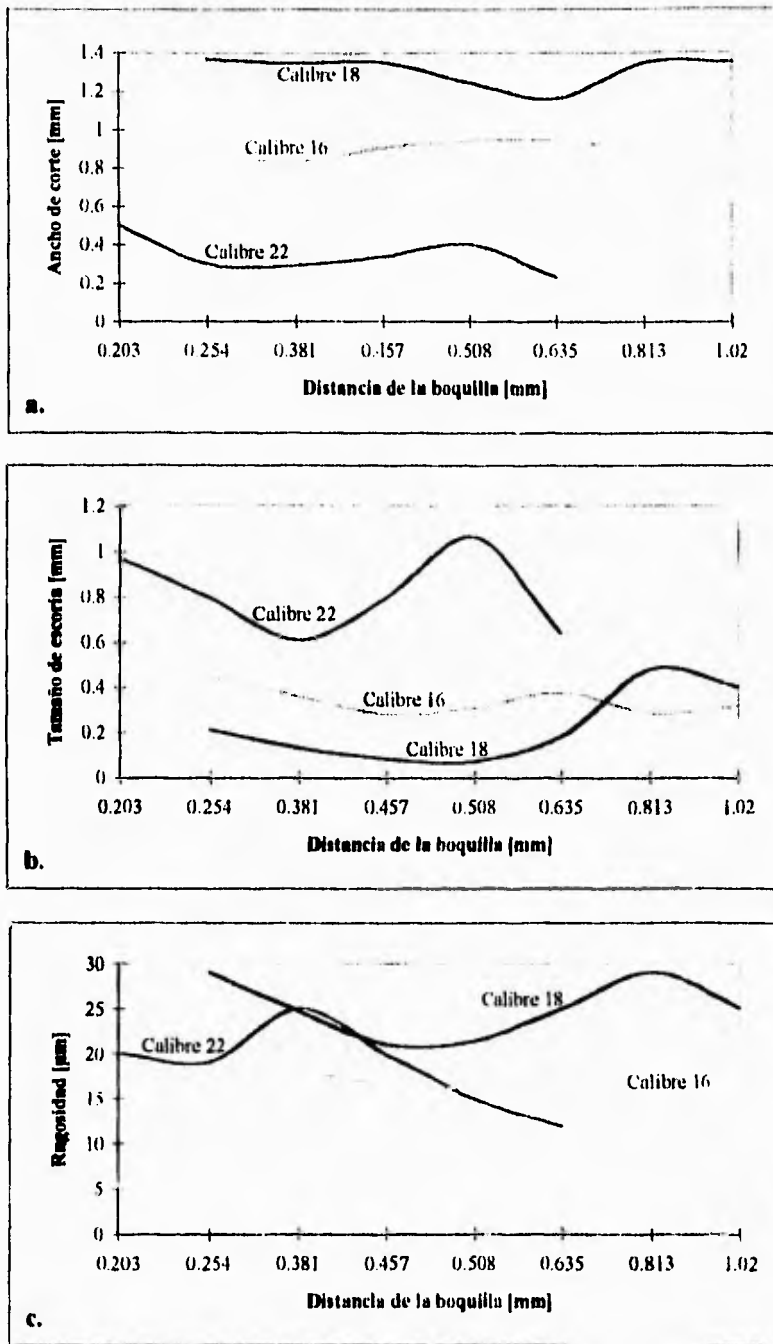


Figura 84 Lámina galvanizada. Efectos de la distancia de la boquilla.

PARÁMETROS DE CORTE ÓPTIMOS.

DATOS:

MATERIAL:	Acero de bajo carbono con recubrimiento de cinc.	
TAMAÑO DE RECUBRIMIENTO:	13.50 μm	Cal 22 (0.635 mm)
(promedio)	21.64 μm	Cal 18 (1.27 mm)
	12.74 μm	Cal 16 (1.984 mm)
RUGOSIDAD SUPERFICIAL:	3 μm	Cal 22
(promedio)	3 μm	Cal 18
	4 μm	Cal 16

PARÁMETROS DE CORTE:

POTENCIA:	120 Watts (requeridos por el programa) 116 Watts (reales)	
VELOCIDAD:	1500 mm/min	Cal 22
	300 mm/min	Cal 18
	400 mm/min	Cal 16
POSICIÓN. PTO. FOCAL:	0.0 mm	Cal 22
(<i>>0 dentro del material</i>)	1.2 mm	Cal 18
	0.4 mm	Cal 16
GAS DE PROCESO:	Oxigeno.	
PRESIÓN DEL GAS:	2 bar	Cal 22
	3 bar	Cal 18
	4 bar	Cal 16
DISTANCIA DE BOQUILLA:	0.635 mm	Cal 22
	1.020 mm	Cal 18
	1.020 mm	Cal 16

APARIENCIA DEL CORTE.

En las figuras 85a, 86a y 87a podemos observar la vista superior del corte de los diversos calibres cortados, donde en todos los casos se presenta una banda paralela al corte limitada por el material arrastrado (arrastrado cuando alcanza el punto de fusión). El tamaño de la banda es de aproximadamente el ancho de corte.

La rugosidad generada en el calibre 22 presenta estriaciones secundarias que surgen a partir de las primarias (superiores). Esto es una consecuencia de la generación de carbonato básico (CO_3Zn) que protege la fundición e impide la libre salida de escoria y la continuación del proceso de oxidación a través del material. A pesar de lo anterior, la rugosidad promedio es de $12 \mu\text{m}$.

Para los calibres 18 y 16 la rugosidad se presenta uniforme, es decir no existen estriaciones secundarias. La rugosidad se encuentra en un valor promedio de 25 y $26 \mu\text{m}$ respectivamente.

Todas las muestras en general presentan escoria adherida en la superficie inferior, prediciendo un corte no perpendicular a la superficie, aunque la escoria como tal, no cause problemas dada su baja adherencia que presenta con el material.

El máximo problema que enfrenta el corte de lámina galvanizada es el inicio de corte. En las ilustraciones para los diferentes calibres podemos constatar la necesidad de remover parte de la capa de cinc para iniciar el corte. En las figuras 85d, 86d y 87d, se observa el inicio de corte, donde el láser-oxígeno traspasa la lámina, en forma paulatina (calibres 22 y 18) y en forma abrupta (calibre 16).



a. Vista superior del corte (11X)

Ancho de corte promedio = 0.23 mm.



b. estriaciones (11X)

Rugosidad promedio = 12 μ m.



c. Vista posterior del corte (11X)

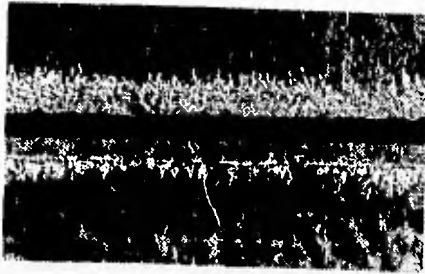
Tamaño de escoria promedio = 0.64 mm.



d. Inicio de corte, (11X)

Diámetro promedio = 0.23 mm.

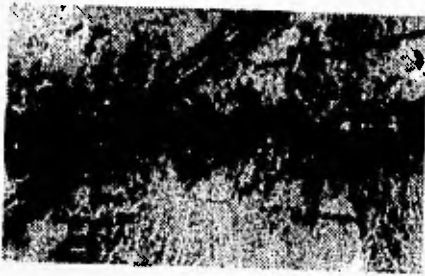
Figura 85 Lámina galvanizada, calibre 22.



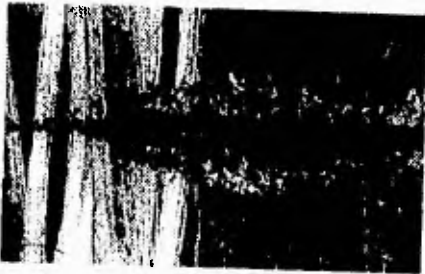
- a. Vista superior del corte (11X)
Ancho de corte promedio = 1.35 mm.



- b. Estriaciones (11X),
Rugosidad promedio = 25 μm .



- c. Vista posterior del corte (11X)
Tamaño de escoria promedio = 0.4 mm.



- d. Inicio de corte (11X)
Diámetro promedio = 1.5 mm.

Figura 86 Lamina galvanizada, calibre 18.



a. Vista superior del corte (11X)
Ancho de corte promedio = 0.65 mm.



b. Estriaciones (11X)
Rugosidad promedio = 26 μ m.



c. Vista posterior del corte (11X)
Tamaño de escoria promedio = 0.33 mm.



d. Inicio de corte (11X)
Diámetro promedio = 2.7 mm

Figura 87 Lámina galvanizada, calibre 16.

METALOGRAFÍA.

El estudio metalográfico reporta, al igual que en el caso del corte de acero de baja aleación sin recubrimiento, la modificación de la estructura próxima al corte ($50\ \mu\text{m}$), solo que ahora en forma discontinua, consecuencia de la presencia del recubrimiento de cinc, que impide el proceso de oxidación (figuras 88 y 89).



Figura 88 Acero de bajo carbono galvanizado (160X). Ataque: nital 7 segundos.



Figura 89 Acero de bajo carbono galvanizado (320X). Ataque: nital 7 segundos

Algo peculiar que además se puede observar es la concentración de carbono aún en una pequeña parte de la superficie de la pieza (figura 89 parte superior).

ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN.

Para comprobar la autenticidad de las aseveraciones realizadas en metalografía, se realizó un análisis de composición a lo largo de un perfil cercano al corte (15 μm aproximadamente) y otro alejado de él (0.3 mm. aproximadamente), donde el material es homogéneo. La ilustración de la figura 90 muestra la zona afectada por el calor (parte derecha), la cual fue analizada en éste estudio.



Figura 90 Microscopía donde se muestra el área del estudio de composición

El análisis muestra que el recubrimiento de cinc impide una alta precipitación de carbono. El pequeño porcentaje de carbono precipitado (5.23% mayor que en la composición homogénea) se produce debido al lento enfriamiento de la pieza (después de ser cortada), permitiendo con ello la difusión de carbono fuera de la estructura de austenita.

Otros cambios importantes, en la zona afectada por el calor, resultan ser el incremento de oxígeno, nitrógeno, cinc y azufre, además de una disminución de hierro y fósforo.

Los principales cambios en las propiedades del material, predecibles debido a los cambios en la composición, a una distancia de 15 μm (promedio) de la zona de corte son:

- *ligero endurecimiento del material*, a consecuencia del incremento de carbono.
- *fragilización del material*, por el aumento en el contenido de azufre. El azufre tiende a fragilizar el material al formar sulfuro de hierro (FeS) y concentrarse en los límites de grano. El aumento de manganeso no es lo suficientemente alto para compensar el aumento de azufre (el manganeso se contrapone a los malos efectos del azufre al formar MnS).
- *ligera disminución de resistencia y dureza*. El fósforo tiende a disolver la ferrita aumento con ello las propiedades mencionadas.
- *protección a la corrosión*. El aumento en el contenido de cinc provee de protección a la corrosión al perfil cortado. Dicha protección no llegará a ser lo suficientemente alta como para impedir el avance de la oxidación, que se encuentra en la zona afectada por el corte, ya que se observa que el oxígeno (óxidos) se incrementó en un 20.35% con respecto del material homogéneo.

La tabla de la figura 91 muestra los resultados del estudio de composición de elementos realizado en lámina galvanizada.

ACERO DE BAJO CARBONO GALVANIZADO.

Perfil de composición cerca del corte (15µm)

Wt%	Fe	C	Mn	P	S	Zn	N	O
1	91.468	0.202	2.342	0.67	0.72	0.783	0.527	3.288
2	91.468	0.202	2.342	0.67	0.72	0.783	0.527	3.288
3	91.468	0.202	2.342	0.67	0.72	0.783	0.527	3.288
4	92.581	0.248	1.01	0.72	0.81	1.118	0.329	3.184
5	92.581	0.248	1.01	0.72	0.81	1.118	0.329	3.184
6	92.923	0.222	1.95	0.45	0.95	0	0.331	3.174
7	90.127	0.151	2.06	0.75	1.02	2.385	0.393	3.214
8	90.127	0.151	2.06	0.75	1.02	2.385	0.393	3.214
9	90.127	0.151	2.06	0.75	1.02	2.385	0.393	3.214
10	88.287	0.192	2.38	0.8	0.82	3.848	0.475	3.198
Total	902.31	2.03	20.75	6.57	7.68	23.71	3.91	33.04
Media	90.2311	0.2031	2.0752	0.657	0.768	2.3707	0.3909	3.304

Perfil de composición a distancia del corte (0.3 mm).

Wt%	Fe	C	Mn	P	S	Zn	N	O
1	90.298	0.255	1.94	0.55	0.76	3.093	0.437	2.667
2	90.298	0.255	1.94	0.55	0.76	3.093	0.437	2.667
3	90.298	0.255	1.94	0.55	0.76	3.093	0.437	2.667
4	90.043	0.18	2.75	0.66	0.68	2.217	0.435	3.035
5	91.775	0.224	2.11	0.78	0.54	1.822	0.354	2.665
6	90.381	0.172	2.22	0.73	0.7	2.832	0.346	2.619
7	91.775	0.224	2.11	0.78	0.54	1.822	0.354	2.665
8	92.728	0.175	2.3	0.66	0.53	0.534	0.354	2.719
9	92.121	0.187	2.25	0.59	0.65	0.700	0.412	2.750
10	92.865	0.226	1.38	0.79	0.87	0.805	0.307	2.757
Total	917.56	1.93	20.75	6.72	7.36	14.75	3.49	27.45
Media	91.756	0.1932	2.075	0.672	0.736	1.4747	0.3466	2.745

Figura 91 Resultado del análisis de composición

ACERO INOXIDABLE 304.

A pesar de que los aceros inoxidable se pueden cortar con láser al igual que los aceros de baja aleación (con chorro de oxígeno presurizado) los mecanismo de corte difieren ligeramente. La energía del láser se combina con la liberada por la oxidación del hierro, aunque constantemente esta oxidación es frustrada por la presencia de cromo en el acero. Cuando un acero al carbono es oxidado, el óxido producido es poroso, lo que contribuye con un mayor paso de oxígeno a través del metal. Mientras que cuando el cromo es oxidado, el óxido forma un sello sobre la base del metal previniendo una mayor oxidación. El sello de óxido de cromo es parcialmente efectivo, dado que es roto continuamente por la oxidación misma del cromo, y por la naturaleza turbulenta de la fundición en la zona de corte (el óxido de cromo se diluye en óxido de hierro). El régimen al cual la oxidación del acero inoxidable puede progresar durante el corte es obviamente menor, con respecto a aceros de bajo carbono, por la presencia del sello parcial de óxido de cromo.

El material fundido no deja la zona de corte tan fácil como en los aceros de baja aleación. El óxido de cromo Cr_2O_3 se encarga de proteger a una pequeña porción de la fundición generada por la oxidación, provocando que la escoria sea de alto punto de fusión (2180°C) y que ésta se adhiera a la parte inferior del corte⁷.

Un estudio realizado por Ivarson⁸ reporta que las partículas lanzadas durante el corte de acero inoxidable, están compuestas de una mezcla de Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , y NiO . Donde el 30% del hierro lanzado del frente de corte es oxidado (Fe_2O_3), y aproximadamente también el 30% del cromo lanzado del frente de corte es oxidado (Cr_2O_3). Aquí, la formación de NiO es despreciable.

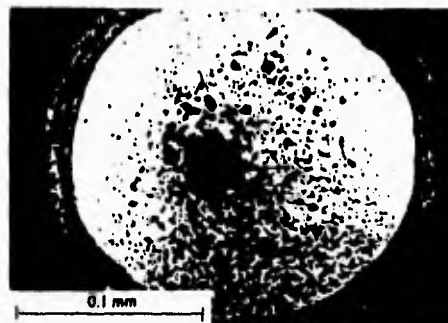


Figura 92 Corte transversal de una partícula lanzada del corte de Acero Inoxidable.

⁷ William M. Steen. *Laser Material Processing*. Springer-Verlag. 2nd Printing. Great Britain 1994. p. 81.

⁸ Laser cutting of steel: analysis of the particles ejected during cutting. A. Ivarson; J. Powell. *Welding in the world* (Journal article). v 30, n9-10, 1992. p 116-122.

La figura 92 muestra una típica partícula de escoria, lanzada durante el corte de acero inoxidable. Dichas partículas están compuestas de un núcleo metálico, rodeado de una capa de cromo y de óxido de cromo.

El tamaño de las partículas de escoria se encuentra entre 50 y 500 μm de diámetro.

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS.

POSICIÓN DEL PUNTO FOCAL.

El ancho de corte no muestra ningún cambio al variar la posición del punto focal, en los calibres estudiados: 24, 20 y 18, siendo en general menores de 0.3, 0.25 y 0.15 mm respectivamente (figura 93a).

El tamaño de escoria se mantiene casi constante al variar la posición del punto focal en el calibre 18 al variar la posición focal, no así en el caso de los calibres 24 y 20 (ver figura 93b). El tamaño de escoria en el calibre 18 es menor de 0.7 mm, y para los calibres 24 y 20 se encuentra en un promedio de 0.3 mm.

La rugosidad llega a ser de hasta 35 μm en el calibre 24, con relativamente baja fluctuación en comparación con los otros calibres (figura 93c). Los calibres 20 y 18 disminuyen su rugosidad al colocar el punto focal cerca de la superficie del material.

Al incrementarse el espesor de las láminas cortadas se incrementa el ancho de corte y el tamaño de escoria. En forma inversa, la rugosidad tiende a aumentar al disminuir el espesor de los calibres

Se observa en general que la mejor calidad se alcanza al colocar el punto focal en la superficie del material, siendo este un indicativo de la necesidad de una alta energía que permita el inicio del proceso de oxidación.

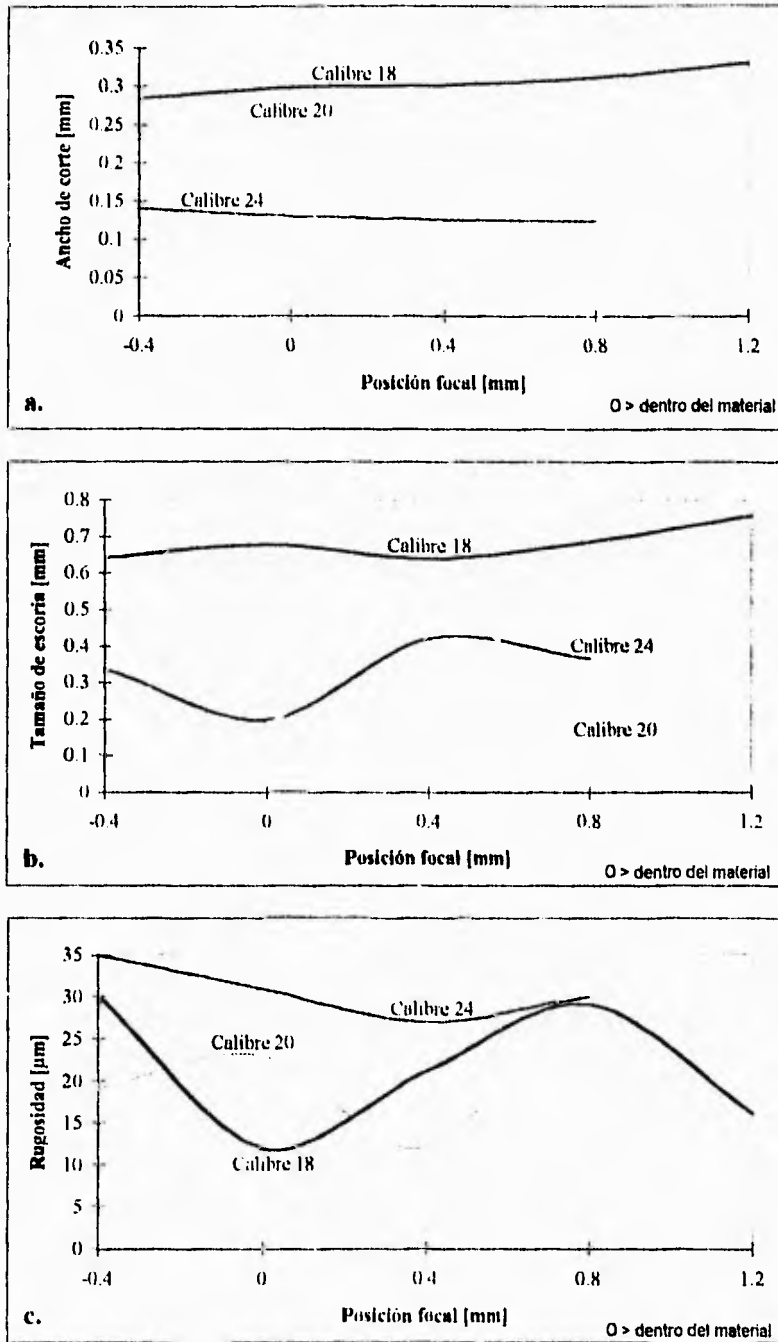


Figura 93 Acero Inoxidable 304. Efectos de la posición del punto focal.

VELOCIDAD DE CORTE.

Las velocidades de corte poseen rangos de trabajo extremadamente pequeños, como lo muestran las gráficas de la figura 95, consecuencia de la necesidad de un mayor tiempo de interacción del láser-oxígeno con el material, lo que comprueba que el corte de acero se dificulta al aumentar los aleantes de éste (en especial el cromo).

Los ancho de corte son en general pequeños y sin fluctuaciones considerables (figura 95a). El ancho de corte es ligeramente superior a los 0.2 mm en los calibres estudiados, solo que en el calibre 24 el ancho de corte cae hasta 0.13 mm, a una velocidad cercana a los 1300 mm/min.

El tamaño de escoria es pequeño, en el caso del corte de los calibres 24 y 20, cuyos valores promedio son cercanos a los 0.24 mm. El tamaño de escoria generado en el corte del calibre 18 se encuentra en un promedio de 0.64 mm.

El ancho de corte y el tamaño de escoria se incrementa, por lo general, al aumentar el espesor de la lámina, por el contrario de la rugosidad donde se incrementa al disminuir el calibre del acero inoxidable.

La alta velocidad permitida en el corte de láminas delgadas (0.8 mm.) se debe a la comparativamente baja conductividad térmica con respecto de aceros de bajo carbono. A mayores espesores (> 0.8 mm), los óxidos de cromo predominan sobre los efectos de conductividad térmica, impidiendo el proceso.

Dados los pequeños rangos de velocidades de corte para los diferentes calibres, los valores de ancho de corte, tamaño de escoria y rugosidad, no muestran fluctuaciones considerables al variar dicho parámetro. De manejarse velocidades de corte superiores a las establecidas en éste estudio, se corre el riesgo de no realizar el corte total de la pieza, es decir, solamente se erosionará superficialmente al material, y al no ser pasado el corte, la escoria saldrá despedida por arriba del frente de corte (figura 94).



Figura 94 Pieza cortada con parámetros no recomendados.

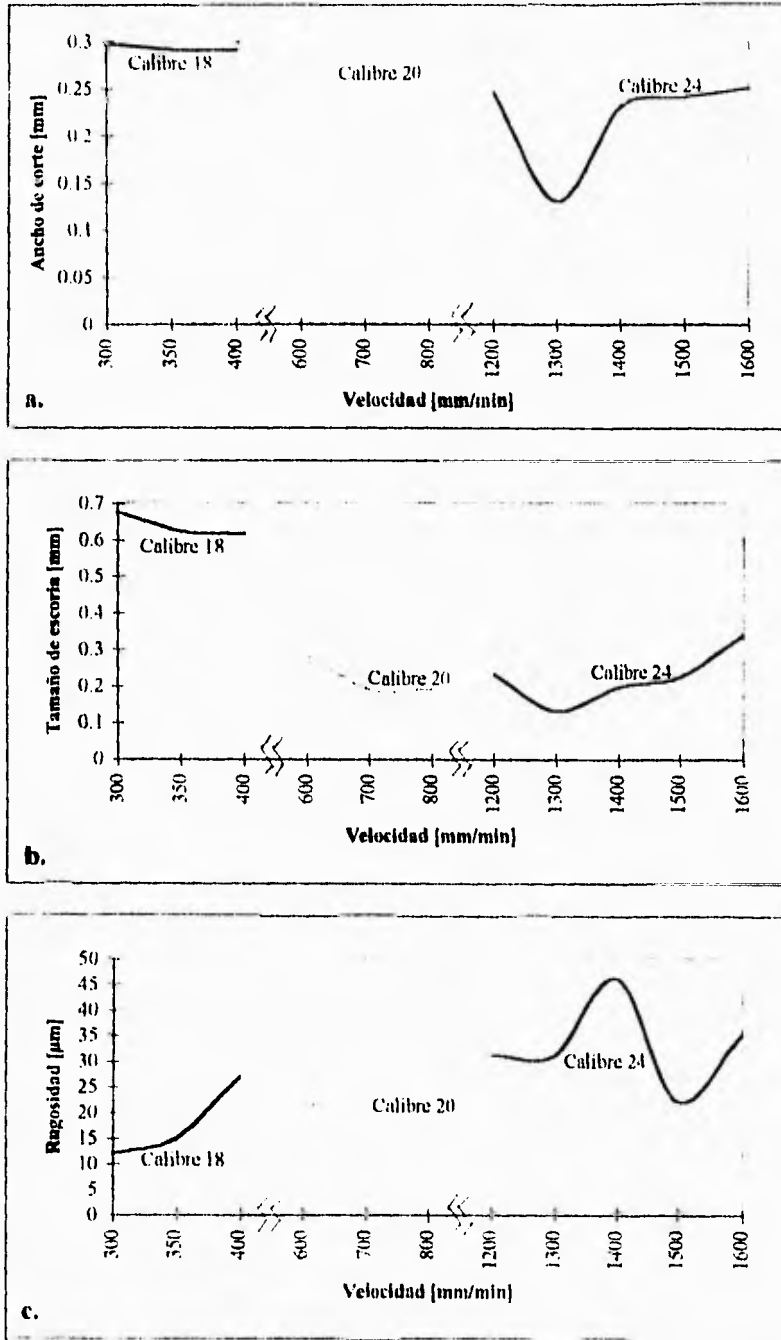


Figura 95 Acero Inoxidable 304. Efectos de la velocidad.

GAS DE PROCESO: PRESIÓN DEL GAS Y DISTANCIA DE LA BOQUILLA.

En general, los anchos de corte no presentan fluctuaciones al variar la presión del gas de proceso, tal como lo podemos observar en la figura 96a (se debe tener en cuenta los pequeños intervalos en que se grafica el ancho de corte). Los anchos de corte se encuentran cerca de 0.25 mm.

El ancho de corte muestra un comportamiento casi constante en los calibres 20 y 18, con un promedio de 0.164 y 0.292 mm respectivamente (figura 96b). En el caso del calibre 24, el tamaño de escoria fluctúa entre 0.255 y 0.455 mm.

La rugosidad de la superficie generada por el corte no es constante dado que el óxido de hierro diluye óxido de cromo, siendo esta escoria difícil de lanzar por el chorro de oxígeno.

La rugosidad tiende a un valor cercano a las 20 μm en todos los calibres estudiados al variar la presión del gas (figura 96c). La rugosidad promedio del corte de laminas calibre 24 y 18 es de 22 μm , mientras que la rugosidad promedio del calibre 20 es de 19 μm .

En general, la rugosidad tiende a incrementarse a presiones del gas de proceso mayores de 5 bar.

El ancho de corte no muestra fluctuaciones apreciables al variar la distancia de la boquilla. Los valores de ancho de corte son muy cercanos entre sí, siendo para los calibres 24, 20 y 18 de 0.259, 0.249 y 0.225 respectivamente (figura 97a).

El tamaño de escoria también muestra un comportamiento constante al variar la distancia de la boquilla, en los calibres 20 y 18 (figura 97b). Los calibres 20 y 18 tienden a mantener un valor de 0.25 y 0.15 mm respectivamente a distancias de boquilla - material mayores de 0.457 mm. El calibre 24 muestra ligeras fluctuaciones, encontrando un valor más apropiado, de 0.255 de tamaño de escoria, a una distancia de la boquilla de 0.508 mm.

Claramente la rugosidad disminuye para los tres calibres estudiados al aumentar la distancia de la boquilla (ver figura 97c); solo el calibre 24 muestra de nuevo un incremento de rugosidad a distancias de boquilla - material superiores de 0.47 mm.

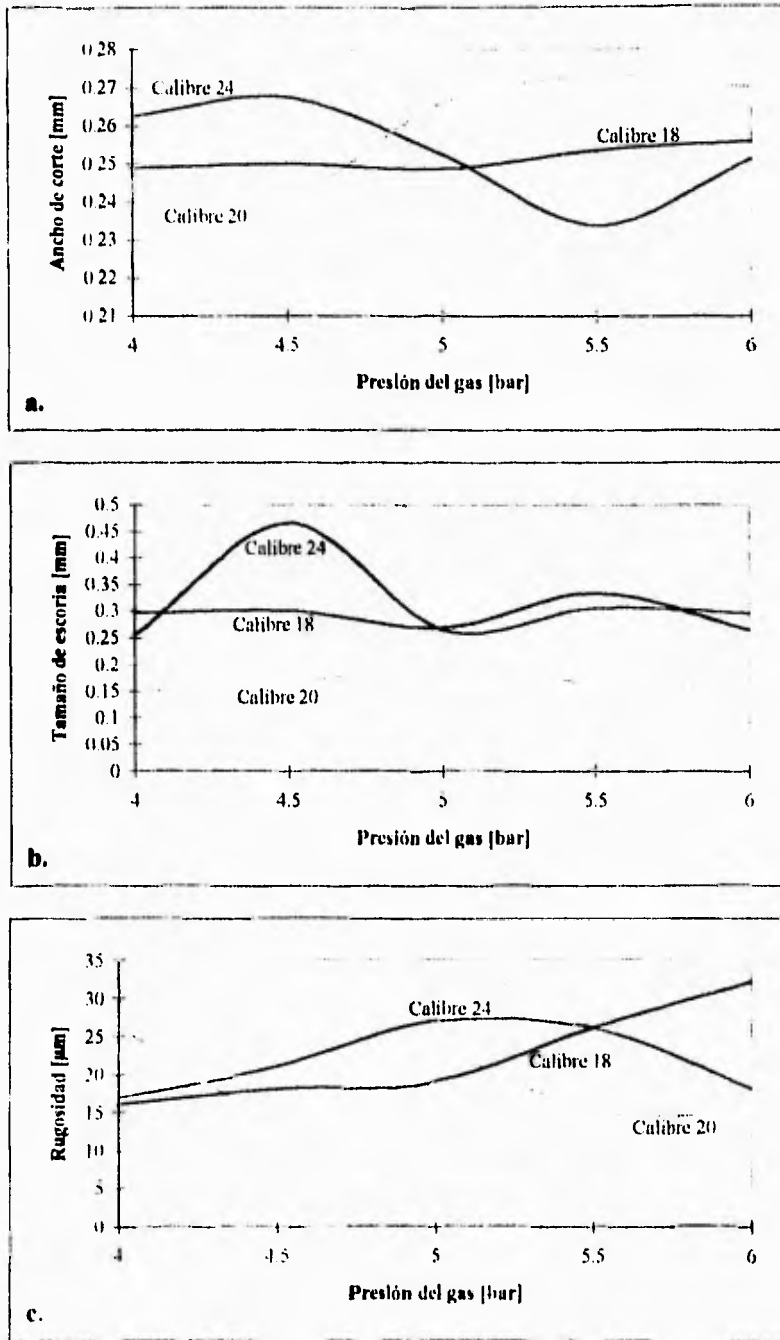


Figura 96 Acero Inoxidable 304. Efectos de la presión del gas.

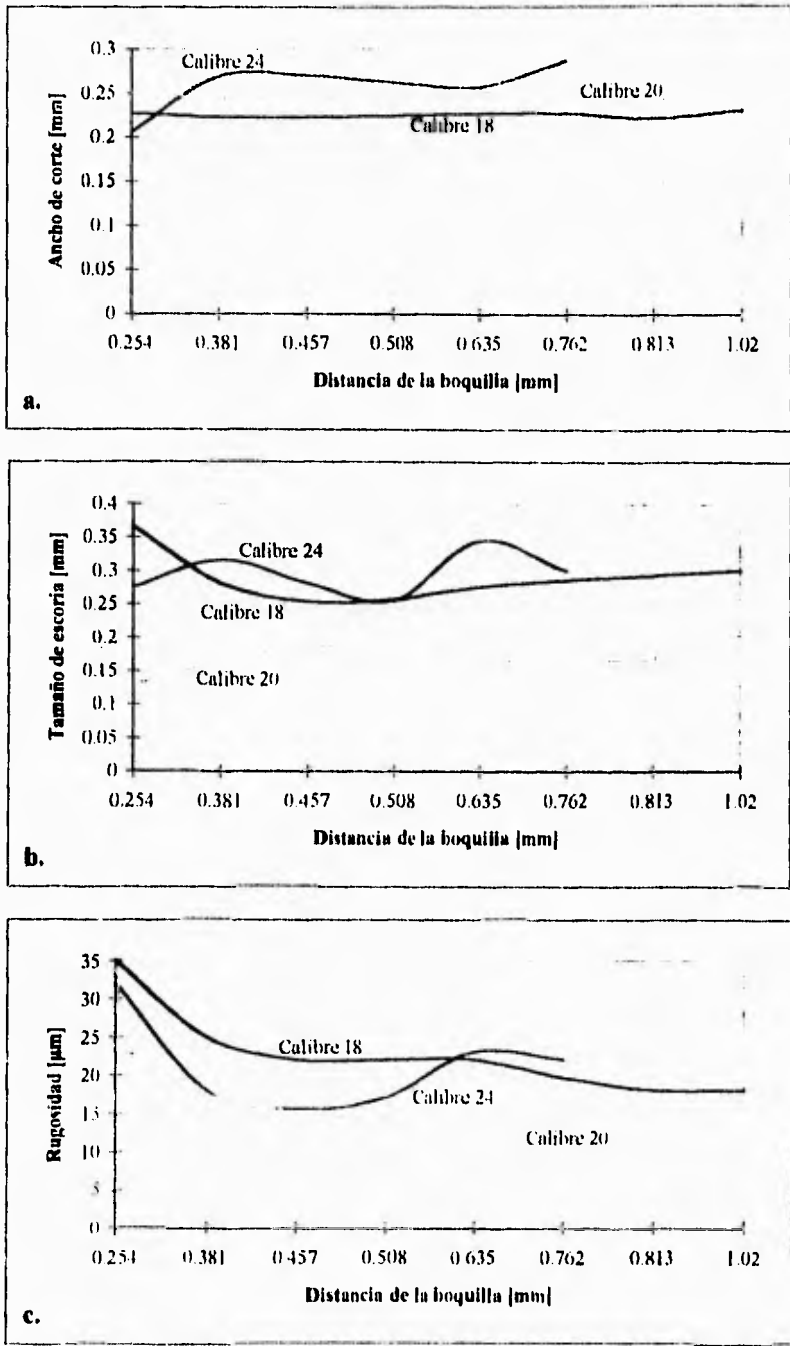


Figura 97 Acero Inoxidable 304. Efectos de la distancia de la boquilla.

PARÁMETROS DE CORTE ÓPTIMOS.

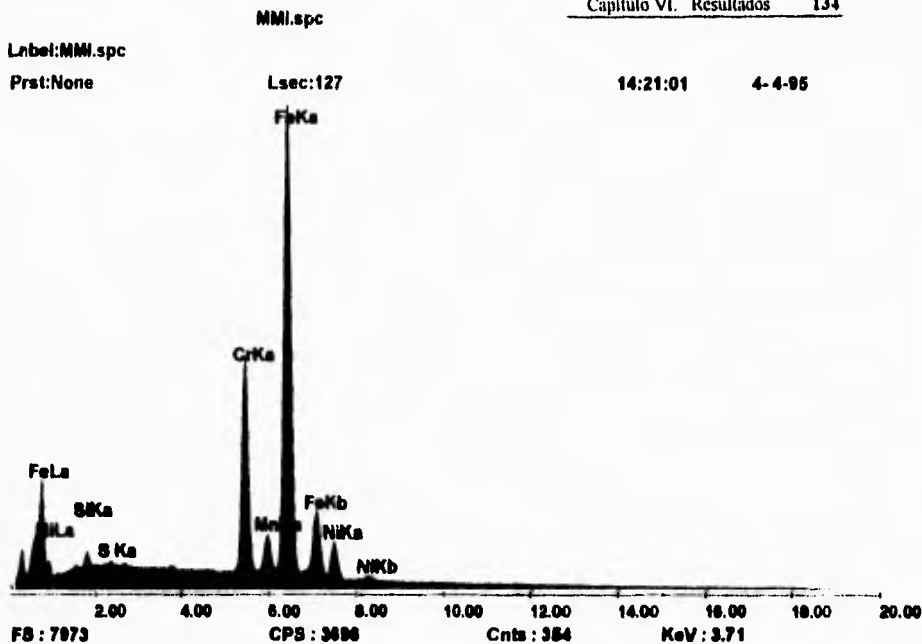
DATOS:

MATERIAL:	Acero Inoxidable 304.		
RUGOSIDAD SUPERFICIAL:	5 μm	Cal 24	(0.635 mm)
	3 μm	Cal 20	(0.953 mm)
	5 μm	Cal 18	(1.270 mm)
COMPOSICIÓN PROMEDIO⁹ (%W):	71.731	Fe	
	18.140	Cr	
(la hoja de resultados del análisis - se presenta en la siguiente pagina)	7.700	Ni	
	1.054	Mn	
	0.909	Si	
	0.466	S	

PARÁMETROS DE CORTE:

POTENCIA:	120 Watts (requeridos por el programa) 116 Watts (reales)		
VELOCIDAD:	1300 mm/min	Cal 24	
	700 mm/min	Cal 20	
	300 mm/min	Cal 18	
POSICIÓN. PTO. FOCAL:	0.0 mm	Cal 24	
(>0 dentro del material)	0.0 mm	Cal 20	
	0.0 mm	Cal 18	
GAS DE PROCESO:	Oxigeno.		
PRESIÓN DEL GAS:	4.0 bar	Cal 24	
	4.5 bar	Cal 20	
	4.5 bar	Cal 18	
DISTANCIA DE BOQUILLA:	0.508 mm	Cal 24	
	0.813 mm	Cal 20	
	1.02 mm	Cal 18	

⁹En el análisis de rayos X por energía dispersada EDX no se estudio la cantidad de carbono, dado que éste es un elemento ligero difícil de cuantificar. El contenido de carbono, de acuerdo con las normas AISI-SAE debe ser no mayor de 0.08 %W.



ZAF Quantification Method, Standardless

PEI User Set : 1, Elements

Element	K Ratio	Weight %	Atomic %
SiK	0.0043	0.909	1.767
S K	0.0035	0.466	0.794
CrK	0.2089	18.140	19.059
MnK	0.0105	1.054	1.048
FeK	0.7029	71.731	70.167
NiK	0.0700	7.700	7.165
Total		100.000	100.000

Element	Net Inten	Backgrd	Inten Error	P/B
SiK	17.24	28.21	3.47	0.61
S K	10.97	24.57	4.82	0.45
CrK	306.57	30.57	0.53	10.03
MnK	13.58	32.39	5.95	0.42
FeK	734.64	32.02	0.33	22.95
NiK	55.51	23.31	1.42	2.38

Element	Z	A	F
SiK	1.1132	0.4180	1.0001
S K	1.1197	0.6560	1.0017
CrK	0.9953	0.9900	1.1535
MnK	0.9782	0.9969	1.0072
FeK	0.9974	0.9626	1.0090
NiK	1.0147	0.8871	1.0000

APARIENCIA DEL CORTE.

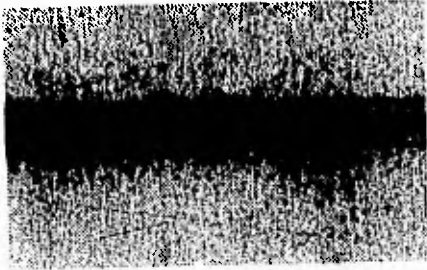
Las piezas cortadas lucen un aspecto superficial muy limpio. La figura 99a muestra la superficie del corte de una lámina calibre 24, en la cual se puede apreciar una pequeña banda de material quemado en forma superficial. El ancho de corte es de 0.263 mm

Las figuras 100a y 101a muestran la superficie de las piezas con calibre 20 y 18 respectivamente, en ellas se aprecia un ligero resplandor proveniente de la rugosidad de las superficies generadas por el corte. El ancho de corte es de 0.241 mm para el calibre 20, y de 0.23 mm para el calibre 18.

En las figuras 99, 100 y 101 se aprecia que los tres calibres estudiados presentan estriaciones secundarias, a todo lo largo de las superficies generadas por el corte. Lo anterior es consecuencia de la protección que el cromo brinda al hierro en todo momento (aún en la escoria), con lo cual se dificulta el lanzamiento de escoria y se genera este tipo de estriaciones. La rugosidad es de 17, 15 y 18 para los calibres 24, 20 y 18 respectivamente.

La parte posterior de las piezas cortadas, no está exenta de escoria adherida. La figura 99c presenta la parte posterior del corte de una lámina calibre 24. En ésta se observa: la presencia de una pequeña banda de material quemado paralelo al corte, y escoria adherida en forma discontinua. Las figuras 100c y 101c muestran la vista posterior de las láminas calibre 20 y 18, en ellas se observa la presencia de escoria adherida en forma continua, con un tamaño de escoria promedio de 0.169 y 1.3 respectivamente. El tamaño de escoria del calibre 24 se encuentra en un promedio de 0.255 mm.

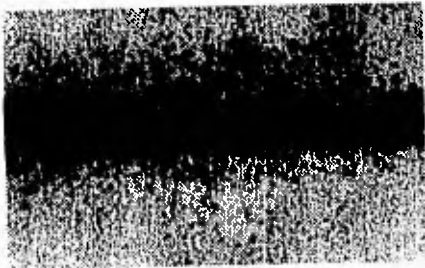
Los inicios de corte no son accidentados en ningún caso (figuras 99d, 100d y 101d), sin embargo, dado los pequeños anchos de corte generados, la detección de los inicios de corte se vuelve más evidente. Los inicios de corte son de 0.4, 0.9 y 0.75 mm en promedio para los calibres 24, 20 y 18 respectivamente.



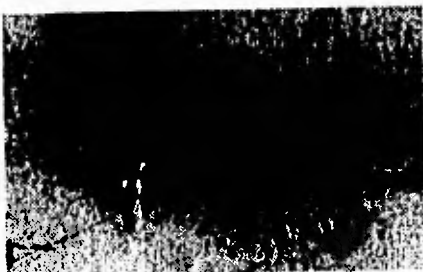
- a. Vista superior del corte (11X)
Ancho de corte promedio = 0.263 mm.



- b. Estriaciones (11X),
Rugosidad promedio = 17 μ m.



- c. Vista posterior del corte (11X)
Tamaño de escoria promedio = 0.255 mm.



- d. Inicio de corte (11X)
Diámetro promedio = 0.4 mm

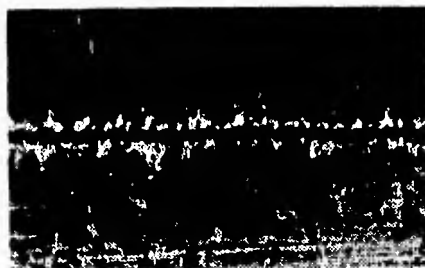
Figura 99 Acero inoxidable 304, calibre 24.



a. Vista superior del corte (11X)
Ancho de corte promedio = 0.241 mm.



b. Estrías (11X)
Rugosidad promedio = 15 μ m.

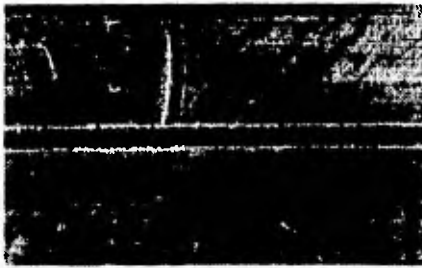


c. Vista posterior del corte (11X)
Tamaño de escoria promedio = 0.169 mm.



d. Inicio de corte (11X)
Diámetro promedio = 0.9 mm.

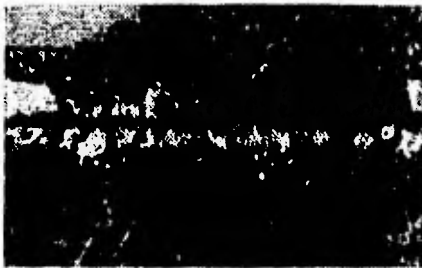
Figura 100 Acero inoxidable 304, calibre 20.



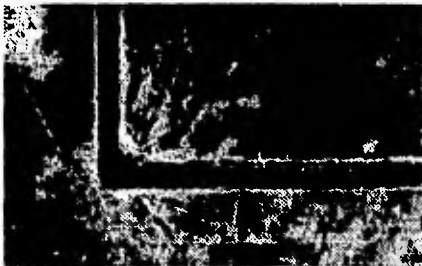
a. Vista superior del corte (11X)
Ancho de corte promedio = 0.23 mm.



b. Estriaciones (11X)
Rugosidad promedio = 18 μm .



c. Vista posterior del corte (11X)
Tamaño de escoria promedio = 0.3 mm.



d. Inicio de corte (11X)
Diámetro promedio = 0.75 mm.

Figura 101 Acero inoxidable 304, calibre 18.

METALOGRAFÍA.

El estudio metalográfico reporta que la estructura esta compuesta de granos austeníticos equidimensionales (figura 102).

Es de esperarse encontrar una estructura de éste tipo en todo momento dado que, el níquel y el manganeso contenidos en los aceros inoxidable serie 300's evitan la transformación de austenita durante el enfriamiento lento, por lo que a estos elementos se les conoce como estabilizadores de la austenita



Figura 102 Acero inoxidable 304 a 320X. Ataque: Ácido nítrico, 8 seg.

La figura 103 muestra una zona con una, aparentemente, diferente estructura. Dichas zonas se localizan discontinuamente a lo largo del perfil cortado a una distancia de 30 μm dentro del material.

Ya que el acero inoxidable 304 cuenta con estabilizadores de austenita, la muestra luce homogénea, excepto en algunas zonas cercanas al corte. La zonas afectadas por el calor HAZ, no se presentan en forma constante, sino sólo en algunas partes paralelas al corte, formando discontinuidades del perfil cortado.

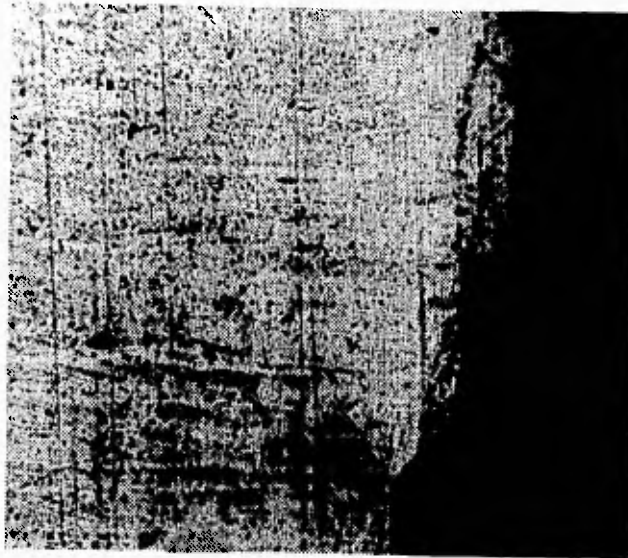


Figura 103 Acero inoxidable 304 a 160X. Ataque: Ácido nítrico, 8 seg.

La figura 103 muestra una zona con una, aparentemente, diferente estructura. Dichas zonas se localizan discontinuamente a lo largo del perfil cortado a una distancia de 30 μm dentro del material.

Ya que el acero inoxidable 304 cuenta con estabilizadores de austenita, la muestra luce homogénea, excepto en algunas zonas cercanas al corte. La zonas afectadas por el calor HAZ, no se presentan en forma constante, sino sólo en algunas partes paralelas al corte, formando discontinuidades del perfil cortado.

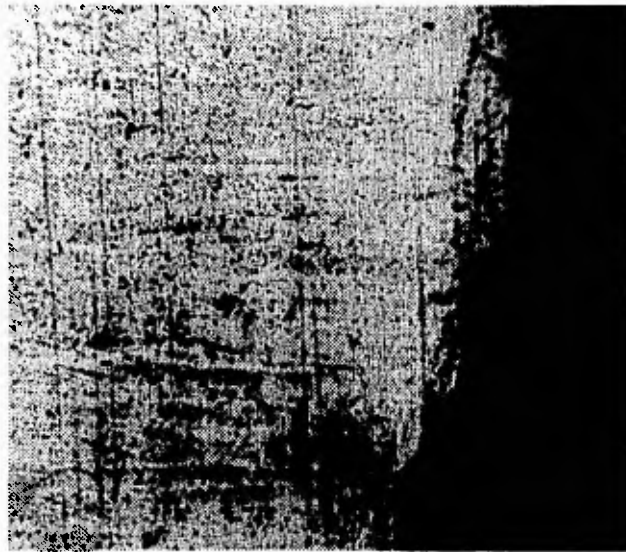


Figura 103 Acero inoxidable 304 a 160X. Ataque: Ácido nítrico, 8 seg.

ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN.

Se realizaron dos análisis de composición de elementos a lo largo de dos líneas, una próxima al corte (no más de 30 μm) y otra a una distancia aproximada de 0.15 mm, donde se observa una superficie homogénea (figura 104).

Los resultados de dicho análisis reportan un aumento del 25% de carbono en la zona próxima al corte con respecto a la zona homogénea (no debe confundirse dicho valor con el porcentaje total de contenido de carbono). Otro elemento que muestra un ligero incremento es el silicio con un 3.5%.

Los elementos que presentan una disminución de contenido en la zona afectada por el calor son: el cromo con un -3.01%, el níquel con un -1.01%, el manganeso con un -5.41%, el fósforo con un -4.09% y el azufre con un -5.18%.

Un ligero problema resulta ser la disminución del contenido de cromo (en 0.6% del contenido original), producto de la combustión y oxidación de dicho elemento. La resistencia a la corrosión en la zona afectada por el calor, se ve ligeramente disminuida a consecuencia de la pérdida de cromo.



Figura 104 Microscopía donde se muestra el área del estudio de composición.

ANÁLISIS DE COMPOSICIÓN.

Se realizaron dos análisis de composición de elementos a lo largo de dos líneas, una próxima al corte (no más de 30 μm) y otra a una distancia aproximada de 0.15 mm, donde se observa una superficie homogénea (figura 104).

Los resultados de dicho análisis reportan un aumento del 25% de carbono en la zona próxima al corte con respecto a la zona homogénea (no debe confundirse dicho valor con el porcentaje total de contenido de carbono). Otro elemento que muestra un ligero incremento es el silicio con un 3.5%.

Los elementos que presentan una disminución de contenido en la zona afectada por el calor son: el cromo con un -3.01%, el níquel con un -1.01%, el manganeso con un -5.41%, el fósforo con un -4.09% y el azufre con un -5.18%.

Un ligero problema resulta ser la disminución del contenido de cromo (en 0.6% del contenido original), producto de la combustión y oxidación de dicho elemento. La resistencia a la corrosión en la zona afectada por el calor, se ve ligeramente disminuida a consecuencia de la pérdida de cromo.

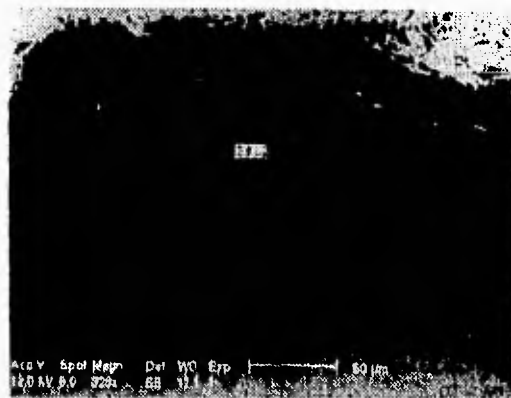


Figura 104 Microscopía donde se muestra el área del estudio de composición.

El material no presenta grandes variación en sus propiedades mecánicas, ya que los cambios de composición son generalmente proporcionales:

- el manganeso al disminuir proporcionalmente con el azufre, no presenta el riesgo de fragilización del material por formación de sulfuro de hierro (FeS); el manganeso continua contraponiéndose a los malos efectos del azufre.
- La disminución de fósforo, que aumentaba ligeramente la resistencia y la dureza del material, se contrarresta con el aumento de silicio, el cual incrementa la resistencia del acero sin disminuir en mucho la ductilidad.
- El aumento considerable de carbono con respecto al contenido en la zona homogénea no se toma muy en cuenta dado que, de cualquier manera, el contenido de carbono promedio de los aceros 304 es muy bajo (0.08%).

ACERO INOXIDABLE 304.

Perfil de composición cerca del corte (30µm)

Wt%	C	Fe	Si	P	S	Cr	Mn	Ni
1	0.21	72.06	0.60	0.38	0.66	18.57	0.47	7.04
2	0.12	70.83	0.57	0.48	0.67	19.89	0.58	7.66
3	0.10	72.06	0.57	0.47	0.62	20.47	0.23	5.46
4	0.15	71.24	0.47	0.38	0.42	20.51	0.56	6.02
5	0.18	71.24	0.55	0.39	0.56	20.51	0.56	6.02
6	0.15	71.70	0.56	0.34	0.48	20.33	0.42	6.01
7	0.15	71.70	0.56	0.34	0.48	20.33	0.42	6.01
8	0.18	71.02	0.61	0.47	0.68	20.37	0.65	6.02
9	0.18	71.02	0.61	0.47	0.68	20.37	0.65	6.02
10	0.18	71.02	0.61	0.47	0.68	20.37	0.65	6.02
Total	1.74	714.25	5.58	3.52	5.49	202.68	4.9	61.79
Media	0.174	71.425	0.558	0.352	0.549	20.268	0.49	6.179

Perfil de composición a distancia del corte (0.15 mm).

Wt%	C	Fe	Si	P	S	Cr	Mn	Ni
1	0.12	71.20	0.60	0.36	0.57	20.50	0.59	6.05
2	0.09	70.15	0.47	0.33	0.52	21.15	0.48	6.31
3	0.14	70.69	0.49	0.38	0.57	20.66	0.70	6.38
4	0.15	70.92	0.53	0.37	0.51	20.52	0.60	6.47
5	0.15	70.84	0.54	0.32	0.59	20.71	0.53	6.32
6	0.12	70.97	0.50	0.40	0.60	20.71	0.56	6.21
7	0.13	70.82	0.41	0.34	0.54	22.27	0.45	5.04
8	0.13	71.33	0.50	0.32	0.51	20.63	0.51	6.22
9	0.16	70.12	0.62	0.46	0.63	20.70	0.69	6.63
10	0.16	70.12	0.62	0.46	0.63	20.70	0.69	6.63
Total	1.36	707.24	5.39	3.67	5.76	208.96	5.18	62.42
Media	0.136	70.724	0.539	0.367	0.576	20.896	0.518	6.242

Figura 105 Resultado del analisis de composición

COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE CORTE.

A continuación se mencionan los parámetros óptimos seleccionados junto con los parámetros sugeridos por el fabricante.

No se pretende aseverar que los parámetros proporcionados por el fabricante son erróneos, dado que varias condiciones del proceso pueden variar, principalmente una hasta ahora no mencionada: el grado de pureza de los gases, tanto los empleados para la generación del haz, como la del oxígeno¹⁰. De tal manera que, podemos atribuirle a ésta la mayor parte de la diferencia existente entre los parámetros mencionados.

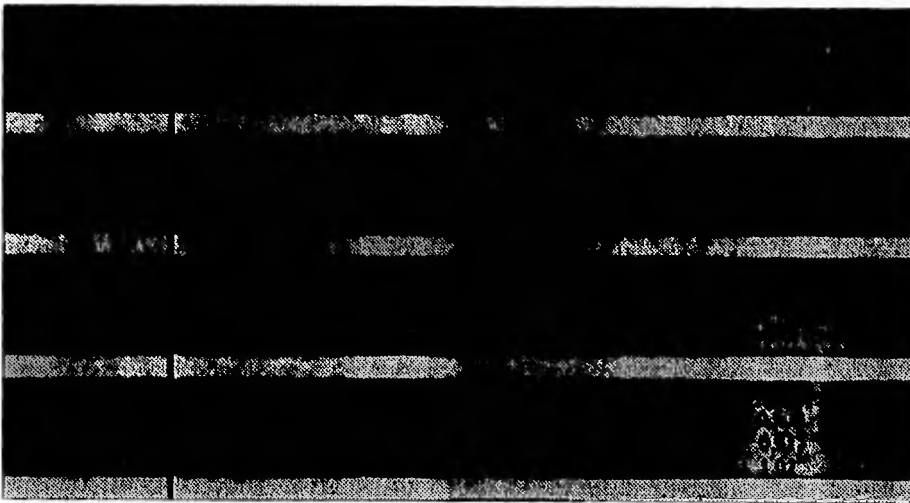


Figura 106 Parámetros de corte para aceros en diferentes calibres.

NOTAS:

- La potencia promedio durante el corte fue de 110 Watts.
- La boquilla empleada posee un diámetro a la salida de 1 mm.

¹⁰ Poncon reporta una considerable sensibilidad del proceso de corte a pequeños niveles de contaminación del oxígeno. Oxygen quality in laser cutting of low carbon steel and stainless steel. V. Pocon; C. Guillas. *Welding in the world*. Vol.30, No.9/10. pp 279-282, 1992.

- Las medidas promedio en milímetros de los diferentes calibres son:

Cal 24	0.635 mm.	Cal 18	1.270 mm.
Cal 22	0.795 mm.	Cal 16	1.588 mm.
Cal 20	0.953 mm.	Cal 14	1.984 mm.

- En la tabla se muestran los valores (del fabricante), simbolizados con ---, de calibres mayores de 1.5 mm, los cuales, de acuerdo con el fabricante, solo pueden ser cortados con potencias superiores a los 130 Watts.
- Los valores de velocidades del fabricante, fueron obtenidos de una gráfica que maneja valores para *aceros en general*, por lo que encontramos valores idénticos para un mismo calibre en diferente tipo de acero.
- El fabricante establece que la posición del punto focal sea colocada en todos los casos (en cualquier material) en la superficie de la pieza a cortar.
- El fabricante establece que la presión del gas de proceso sea para cualquier metal de 6 bar.

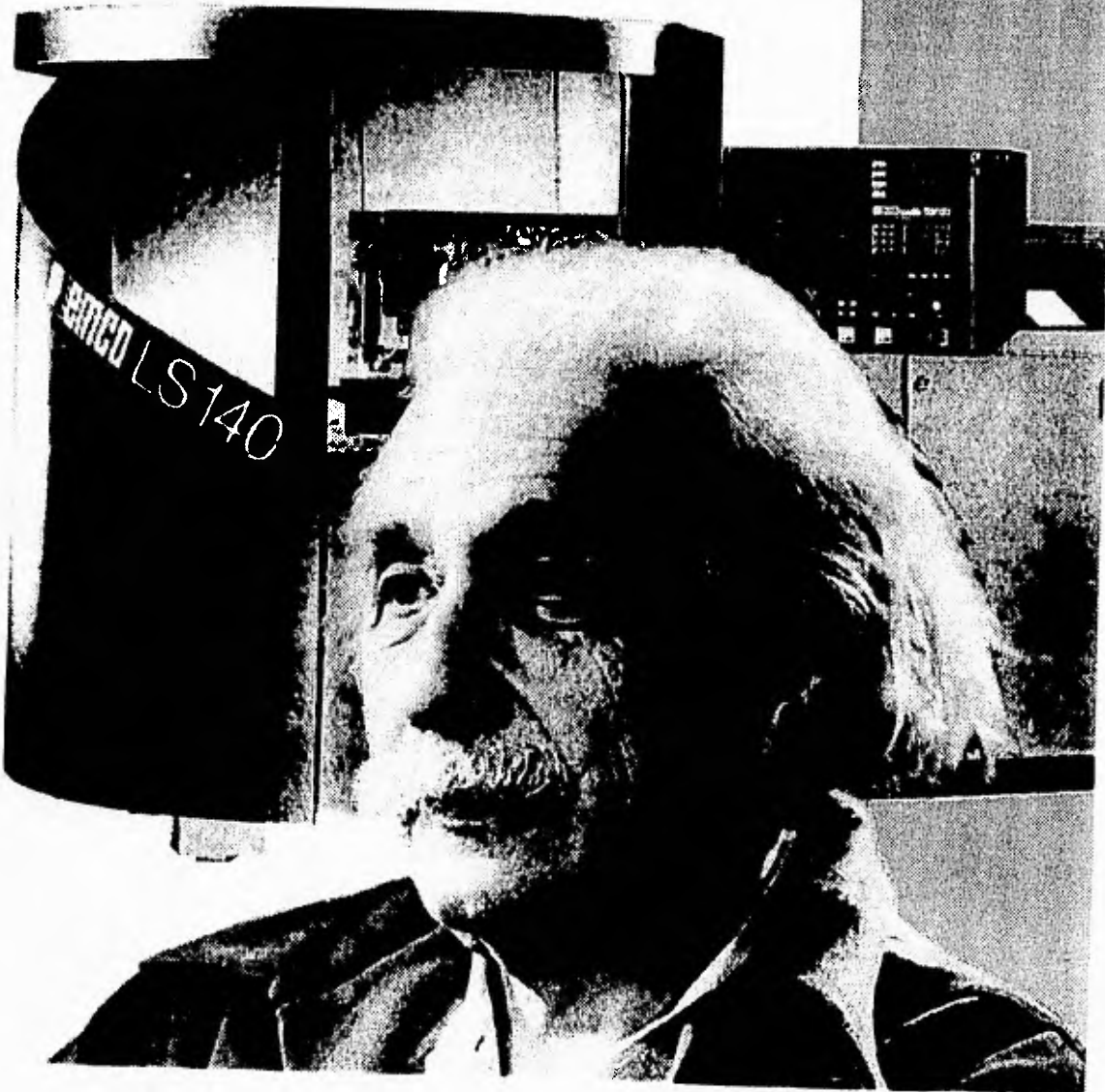
OBSERVACIONES.

De acuerdo con los valores establecidos en la tabla de la figura 106, podemos observar que:

- Las velocidades de corte son, si no más altas por lo menos iguales. Los procesos de corte se realizarán en menor tiempo.
- El fabricante no realizó investigación de los efectos en el material al variar la posición del punto focal.
- Las presiones del gas de proceso son en su totalidad menores, lo que permite un considerable ahorro de éste y una disminución en los costos de operación y producción.
- Los valores de las distancias de la boquilla al material, deducidos por la investigación aquí realizada y los proporcionados por el fabricante, no varían apreciablemente.

CAPITULO

7



VII. CONCLUSIONES

La metodología desarrollada y aplicada en éste estudio, permite el control de parámetros de corte de gran importancia mediante un número moderado de muestras, sin que con ello se dejen de obtener resultados óptimos, ya que se realiza el análisis de datos a través de gráficas donde se logra comprender los efectos que se presentan en el material al variar un parámetro de corte en particular.

De tal manera que, la precisión y calidad de las piezas cortadas con láser dependerán del control de los parámetros de corte. De lograrse dicho control, se eliminara la necesidad de un maquinado posterior.

El mecanismo por el cual se realiza el corte de aceros (con el equipo empleado), es por medio de una acción de oxidación, la cual suministra más de la mitad de la energía necesaria para el corte¹. De tal manera que al emplear oxígeno como gas de proceso, además de lograr el efecto de oxidación, también se logra lanzar la escoria fuera del material, aunque en ningún caso se logró generar superficies libres de escoria en su totalidad. La acción del láser es preferentemente la de iniciar la reacción de oxidación, al elevar la temperatura del acero, esto es debido a que los metales en general presentan una alta reflexión a la longitud de onda a la cual emite el láser de CO₂, con lo que el rango de calibres posibles de cortar se limita.

Los efectos de los parámetros de corte por lo general, se vuelven más críticos al aumentar el espesor de los aceros, aunque cada material aquí estudiado presenta una mayor dependencia a un parámetro o condición de corte en particular:

- El acero de bajo carbono requiere cortarse preferentemente con una posición del punto focal dentro del material, ya que en el calibre delgado se observó que el mejor corte se logra al colocar el punto focal en la superficie del material.
- La lámina galvanizada requiere de la utilización de una presión de gas y altura de la boquilla específica para cada calibre, con ello se evitan explosiones que generan mala calidad del corte.
- El acero inoxidable requiere cortarse a bajas velocidades dado que los elementos aleantes que lo componen dificultan la acción oxidante del corte.

¹ La bibliografía reporta que en sistemas láser de mayor potencia, el gas de proceso no es necesario; el oxígeno solo contribuye con mayores velocidades de proceso.

La oxidación del hierro a FeO durante el corte de aceros de bajo carbono contribuye con más de la mitad de la energía necesaria para la realización del corte.

En el corte de acero de bajo carbono, aproximadamente el 50% de Fe lanzado del frente de corte es oxidado (FeO). Un porcentaje mayor forma Fe_2O_3 (despreciable).

En láminas de acero de bajo carbono, la velocidad de corte no representa una variable de peso. El ancho de corte, el tamaño de escoria y la rugosidad no presentan grandes cambios al variar la velocidad aunque por lo general, al incrementarse el espesor del material a cortar se requiere una disminución de velocidad.

En el rango de velocidades de estudio del acero de bajo carbono, la temperatura en el frente de corte se encuentra en 1650 °C, la cual corresponde también a la temperatura alcanzada en el corte por oxiacetileno.

Cuando no se maneja la presión del gas de proceso óptima, se corre el riesgo de una post oxidación además de un desperdicio de gas.

En el corte de lámina galvanizada, la rugosidad superficial tiene gran peso en la absorción del haz, debido a las múltiples reflexiones que se pueden presentar en las ondulaciones (rugosidad). Como podemos observar en los datos del acero galvanizado, la rugosidad superficial es muy cercana (en la mayoría de los casos), a la longitud de onda del haz emitido por el sistema, lo que impide la múltiple reflexión del haz que favorecería la interacción del haz al inicio del corte. Este problema hace del corte de acero galvanizado poco útil, ya que por lo general se requiere preparar la pieza antes de ser procesada, además, el recubrimiento de cinc no es homogéneo, provocando en ocasiones cortes irregulares durante el trayecto del haz.

De acuerdo con lo anterior, podemos comprobar que los láseres que emiten con una longitud de onda grande, son muy sensibles al acabado superficial (rugosidad) del material a cortar.

En el corte de lamina galvanizada, el control de los parámetros del gas de proceso (presión del gas y distancia de la boquilla) resultan indispensables para una alta eficiencia y calidad del corte.

Por lo descrito en los párrafos anteriores el empleo del láser para el corte de lámina galvanizada resulta limitado, es decir, solo es adecuado el empleo de este proceso cuando se requiera formar perfiles o contornos que permitan el inicio de corte fuera del material de trabajo.

El cambio principal en la estructura de los aceros de bajo carbono, con y sin recubrimiento, es la precipitación de carbono en los límites de grano (a una distancia no mayor de 15 μm del borde cortado), producto de un enfriamiento lo suficientemente lento, para permitir la difusión de carbono en las fronteras de los granos de austenita.

Debemos tener muy en cuenta que en esta investigación no se busca un tratamiento térmico, pero si es éste una consecuencia del proceso.

Al incrementarse el contenido de elementos aleantes al hierro, se impide el proceso de oxidación. La oxidación del acero inoxidable durante el corte, es más compleja que en el caso de los aceros de bajo carbono, debido a la formación de tres óxidos, Fe_2O_3 , Cr_2O_3 , y NiO ,

Durante el corte de acero inoxidable 304, aproximadamente el 30% del hierro es oxidado a Fe_2O_3 , al igual que un 30% del cromo es oxidado a Cr_2O_3 . El papel de la oxidación del Ni es despreciable en comparación de las altas reacciones exotérmicas del hierro y del cromo. La energía de las reacciones de oxidación excede la energía que el láser suministra al corte, con un 60-40% respectivamente.

Los aceros inoxidables se cortan a velocidades menores a la de los aceros de baja aleación (hasta 57% menores) debido a la presencia de cromo (el corte requiere de mayor tiempo de interacción con éstos). Además, el espesor máximo que puede ser cortado es menor al de los aceros de baja aleación.

La rugosidad de la superficie generada por el corte no es constante, dado que el óxido de hierro diluye el óxido de cromo (escoria de alto punto de fusión), siendo ésta escoria difícil de lanzar por el chorro de oxígeno.

En el caso del corte de acero inoxidable, algunas zonas aledañas al corte serán susceptibles de corrosión dado que el proceso de corte disminuye considerablemente los elementos protectores. Como resultado del corte de acero inoxidable 304 se presenta una reducción del contenido de cromo. Las zonas afectadas por el calor están constituidas de óxidos y material solidificado, los cuales se adhieren posteriormente de la fusión al perfil del corte. Dicha adherencia se presenta en forma discontinua debido a la turbulencia de la fusión provocada por el gas de proceso.

La generación de estriaciones primarias y secundarias posee ventajas y desventajas ya que al formarse estriaciones secundarias, la pieza posee menor rugosidad en las superficies generadas por el corte, pero la eficiencia del proceso disminuye, ya que la generación de dicho tipo de estriaciones es un indicativo de la baja eficiencia con la que se lanza la escoria del frente de corte. Lo anterior puede apreciarse en el corte de los tres calibres de acero inoxidable estudiados, así como en el corte de lámina galvanizada calibre 22, donde la rugosidad (en éste último) es en promedio de 12 μm (la más pequeña alcanzada en éste estudio). La generación de estriaciones secundarias también se presenta en el corte de acero de bajo carbono calibre 14. En este caso, la generación de estriaciones secundarias es

debido a que la energía no es lo suficientemente alta para lograr un corte continuo del material (estriaciones primarias).

En el caso del corte de aceros al carbono, con un mayor porcentaje de carbono a los aquí estudiados, la bibliografía reporta una mayor facilidad de corte en éstos², lo que conduciría en general a una mayor velocidad de corte y un menor consumo de gas de proceso.

En base al estudio realizado se recomiendan las siguientes acciones generales:

- Manejar presiones moderadas del gas de proceso para logran velocidades de corte altas con piezas limpias debido al alto impulso del gas. Si las presiones del gas de proceso son excesivamente elevadas se pueden deteriorar los acabados de las superficies cortadas.
- Velocidades de corte moderadas. La mejor calidad de corte no se obtiene necesariamente a velocidades de corte elevadas. Si se manejan velocidades altas se tendrá un corte de mala calidad, provocado por el hecho de que el suministro de energía láser - oxígeno no se realiza en forma eficiente para producir un corte limpio.
- Se recomienda tomar en cuenta el ancho de corte para alcanzar la precisión dimensional permitida por la máquina, la cual puede llegar a ser de milésimas de milímetro (micras). Los anchos de corte son comparables con el diámetro del punto focal
- Las gráficas presentadas fueron generadas con valores promedio por lo que no deben ser consideradas como un todo del proceso. Es importante constatar los datos generados mediante observaciones al macroscopio.
- En el caso del corte de aceros con diferentes calibres a los aquí estudiados, se recomienda la interpolación de parámetros de corte. Los resultados aquí presentados además de garantizar el corte eficiente de los materiales - calibres estudiados, permiten el corte de calibres intermedios por medio de la interpolación de los parámetros de corte recomendados en éste estudio. Lo anterior fue comprobado en el corte de acero de bajo carbono calibre 16, lámina galvanizada calibre 20 y acero inoxidable 304 calibre 22.

² J.Powell reporta que el corte con láser de aceros con mayor porcentaje de carbono se facilita debido a la eficiente salida de escoria del frente de corte consecuencia de la reducción de tensión superficial de dicha escoria. J.Powell, I.A.Menzies. *An appraisal of CO₂ laser cutting*. 4th Int.Conf. Lasers in Manufacturing. May 88. Birmingham, U.K. p 69-82.

En base al análisis de los resultados, no se descarta la posibilidad de la existencia de otras combinaciones de parámetros, donde se logre también optimizar el corte de los diferentes tipos de materiales - calibre, pero la metodología aquí desarrollada y aplicada, se muestra como un camino viable y seguro para la obtención de una combinación de parámetros óptimos. También estamos conscientes de la mejora de la metodología (*mejora continua*) si se llega a comprender el comportamiento de los diferentes parámetros de operación, para un material - calibre determinado, permitiendo con ello la combinación de parámetros de operación diferentes a los aquí mostrados, pero que también generan cortes óptimos, solo que, la física del corte con láser es tan compleja en la mayoría de los casos, que la comprensión total del fenómeno resulta difícil de lograr.

La calidad del corte se mejoran considerablemente tras la segunda etapa del procedimiento (regulación de las cuatro variables), comprobando la efectividad de la metodología utilizada.

Los parámetros de corte recomendados en éste estudio presentan grandes ventajas con respecto de los parámetros recomendados por el fabricante, aunque en ningún momento queremos aseverar que estos últimos parámetros sean erróneos, quizá solamente podríamos decir que fueron producto de diferentes condiciones de estudios (la calidad de los gases pueden influenciar el corte con láser, a los que se les puede atribuir las diferencias con respecto de los parámetros recomendados por el fabricante).

Algunas de las ventajas de los parámetros de éste estudio sobre los recomendados por el fabricante son:

- Los procesos de corte podrán realizarse en menor tiempo, ya que las velocidades de corte recomendadas en éste estudio son, si no más altas por lo menos iguales.
- La calidad de las piezas será mayor en la mayoría de los casos, ya que el fabricante no realizó investigación de los efectos en el material al variar la posición del punto focal.
- Disminución en los costos de operación y producción, ya que las presiones del gas de proceso son en su totalidad menores a las recomendadas por el fabricante.

Dentro del capítulo IV, el cual describe el equipo empleado en éste estudio, no se comentan los inconvenientes del sistema dado que los problemas no son evidentes y mucho menos son comentados profundamente en el manual del equipo. Algunas condiciones en las cuales se lleva a cabo el corte de aceros con el sistema láser empleado son:

- Es un sistema compacto de 140 Watts nominales, que en las condiciones actuales suministra máximo 120 Watts. La baja potencia limita el rango de espesores posibles de cortar. En el mercado se ofrecen sistemas con potencias mayores a los 2 KW, inclusive con la óptica montada a brazos de robot.
- La lámina a cortar no debe presentar dobladuras, dado que no se tendría una distancia constante de la pieza al cabezal (diferente punto focal, presión de gas y distancia de la boquilla). Lo anterior podría solucionarse cambiando la lente por una de mayor distancia focal (mayor de 63 mm que es la actual), aunque las lentes de distancia focal corta son las más adecuadas para el corte de láminas de pequeño calibre.
- La capacidad de la máquina está limitada a piezas ligeramente menores de 500 × 500 mm.
- La estabilización de la potencia requerida para el corte, se lleva a cabo en un lapso no menor de 3 segundos. Este resulta ser un transcurso muy grande, aunque no repercute como en primera instancia pudiera pensarse dado que, la energía del láser se utiliza mayormente para iniciar el proceso de oxidación del Hierro y no como un todo del mecanismo de remoción de material en éste sistema láser.
- El corte de aceros con el sistema láser empleado, no genera cortes de buena calidad suficientes para competir con operaciones de cizallado convencionales (troquelado, punzonado).

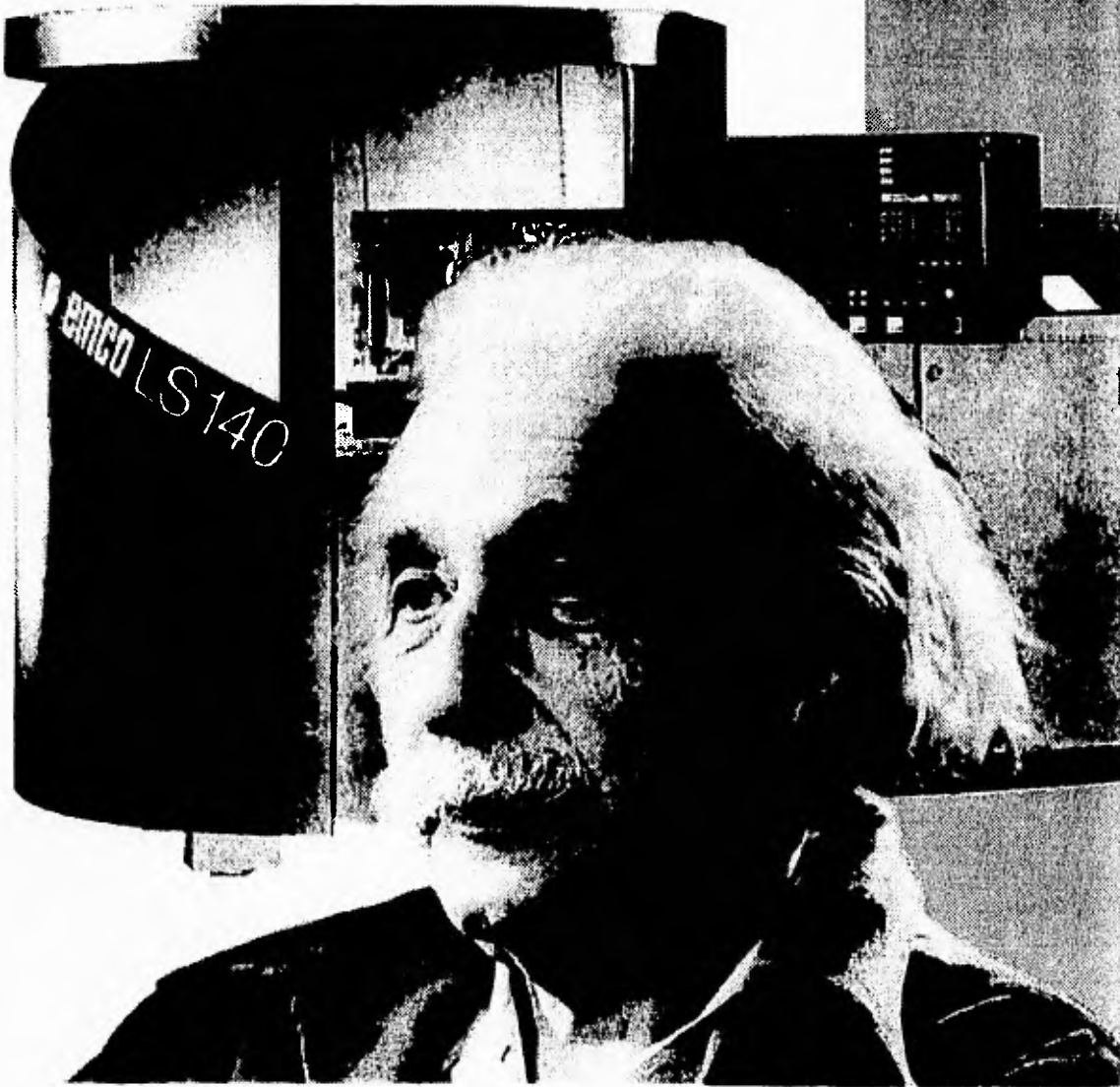
A pesar de lo antes mencionado, el sistema compacto EMCO LS140, se muestra como una alternativa viable en el corte de una gran gama de materiales (no solo los aquí estudiados), sustituyendo o complementando procesos de troquelado, cuyos costos de fabricación de herramental (matriz y punzón) llegan a ser tan elevados que requieren de la fabricación de elevados volúmenes de producción para resultar ser un proceso factible. El

proceso de corte con láser se recomienda preferentemente para el manejo de volúmenes de producción bajos y medianos.

El sistema láser EMCO LS140, cuenta con alta flexibilidad de manufactura inherente que le provee el controlador numérico. La máquina puede adaptarse rápidamente a los requerimientos de producción, en forma automática y exacta.

Se recomienda, a manera de continuación a este proyecto, un estudio de factibilidad donde se involucren los aspectos de costo de producción. Dicho estudio no fue posible de realizar en este trabajo dado que las condiciones de operación fueron extremas en cada caso.

CAPITULO



VIII. BIBLIOGRAFIA

LIBROS

Advanced Manufacturing Technology

David L. Goetsch
SME. Delmar Publishers Inc.
USA, 1990.

Aplicaciones Industriales del Láser

L. Bachs; J. Cuesta
Marcombo Boixareu Editores
España, 1988.

Interpretation of metallographic structures

William Rostoker
Jones R. Dvorak
Academic Press
2nd Edition
USA, 1977.

Introducción a la Metalurgia Física

Sydney H. Avner
Segunda Edición
Mc. Graw Hill
México, 1981.

Laser in Industry

S. S. Charschan
Wester Electric Series
USA 1972.

Laser Machining

George Chryssolouris
Springer-Verlag
Great Britain, 1994.

Laser Material Processing

William M. Steen.
Springer-Verlag.
2nd Printing.
Great Britain 1994.

Lasers Physics and Applications

A. Y. Spasor
World Scientific
Singapore, 1988.

Laser Technology

Laser Driven Processes
Stjepan Lugomer
Prentice Hall
USA, 1990.

Laser Technology Introduction

EMCO LASERTEC
Edition A 91-3

Metals Handbook

Metallography and Microstructures
ASM
Ninth Edition / Fourth printing
Volume 9
USA, 1989.

Principles of laser

Orazio Suelto
Third edition
Plenum Press
USA, 1989.

The Laser Guidebook

Jeff Hecht
Mc Graw Hill Int
Singapore, 1986.

User's Manual EMCO LS140

Part 1: Operation of Laser System
Part 2: Operating and Programming of Control
Edition 91-4

ARTÍCULOS DE JOURNALS, CONFERENCIAS Y REVISTAS CIENTÍFICAS.

*An automatic process-planing strategy applied to
a flexible two-dimensional cutting facility*

S. K. Ghosh; J. C. Beitiaarrangoitia.
Journal of Materials Processing Technology
Elsevier; No. 37
p 61 - 81.

Assist gases for laser cutting of steels

Gabzdyl, J.T.; Morgan, D.A.
Laser Institute of America (Conference Article)
v 75, 1993.
p 443 - 447.

Be an enlightened user

James R. Koelsch
Manufacturing Engineering (Magazine)
January, 1994
p 61 - 65

Beam versus stream

Paul C. Miller
Tooling & Production (Magazine)
June, 1994.
p 38 - 46.

Carbon dioxide lasers span power spectrum

Jeff Hecht
Laser Focus/Electro-optics (Magazine)
September 1992
p 87 - 96

Dynamic behavior in laser gas cutting of mild steel

Y. Arata; S. Takeuchi.
Transaction of JWRI (Journal article)
Vol. 8, No.2, 1979
p 15 - 26.

Dynamic behaviour of gas jets in laser cutting

O'Neill, W; Gabzdyl, J.T.
Laser Institute of America (Conference Article)
v 75, 1993.
p 449 - 458.

Industrial Laser Trends

Paula M. Noaker
Manufacturing Engineering (Magazine)
January, 1994
p 26

Innovations Improve Industrial Laser Systems

Dave Farson
Photonics Spectra (Magazine)
September, 1994.
p 92 - 95.

Kilowatt-Class CO₂ lasers meet present and future industrial needs

Michael W. Sasnett
Laser Focus/Electro-optics (Magazine)
March 1988
p 48 - 67

Laser beam cutting centers open new opportunities for job shops

Cincinnati, Inc.
Welding Journal
January, 1992
p 62 - 64.

Laser cutting of steel: analysis of the particles ejected during cutting.

A. Ivarson; J. Powell.
Welding in the world (Journal article)
v 30, n9-10, 1992.
p 116 - 122.

Laser cutting of steel - cut quality depending on cutting parameters.

Dilthey, U.; Faerber, M.
Welding in the world (Journal article)
v 30, n 9-10, 1992.
p 275 - 278.

Lasers Penetrate Fabricating

Paula M. Noaker
Manufacturing Engineering (Magazine)
October, 1993
p 33 - 40

New Laser-Gas Technique for Stainless Steel

Y. Arata; H. Maruo.
Transaction of JWRI (Journal article)
1984, p 526 - 536.

Oxygen quality in laser cutting of low carbon steel and stainless steel

Poncon, V.; Guillas, C.
Welding in the world (Journal article)
V30, n 9-10 1992
p 279 - 282

Role of oxygen purity in laser cutting of mild steel

Powell, J; Ivarson, A.
Laser Institute of America (Conference Article)
v 75, 1993.
p 433 - 442.

***The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel
and generation of striations on the cut edge.***

A. Ivarson, J. Powell.
Journal of Materials Processing Technology (Journal article)
V 40, 1994
p 359 - 374