

13
2ej



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

**OPTIMIZACION DEL PROCESO
DE CORTE CON LASER
PARA EL ACERO INOXIDABLE 304**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

MIGUEL ANGEL ARCE MORALES

ASESOR: M.I. ARMANDO ORTIZ PRADO



CD. UNIVERSITARIA

AGOSTO 1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

A mis amados padres:

***Vicente Arce Hernández y
Ma. de los Angeles Morales Trejo....***

y a mi querida Facultad de Ingeniería.

AGRADECIMIENTOS:

A mis hermanos

***Jesús
Vicente
Eduardo
Soledad
y
Angeles***

por estar siempre a mi lado y creer en mi, mil gracias.

A los profesores del Departamento de Ingeniería Mecánica por las facilidades otorgadas y en especial al maestro Armando Ortiz Prado por su apoyo y sus valiosos conocimientos.

Y a todos mis compañeros del seminario, en especial a

***Beatriz Elizabeth López Montoya
Guillermo Hernandez Ruiz
Jorge Rodríguez Olvera,***

por su amistad, comprensión y apoyo desinteresado.

**OPTIMIZACION DEL PROCESO DE CORTE CON LASER
PARA EL ACERO INOXIDABLE 304**

CONTENIDO

PROLOGO

I. ACERO INOXIDABLE 304.	1
II. DESCRIPCION DEL SISTEMA LASER EMCO LS 140.....	8
III. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL CORTE.....	16
IV. METODOLOGIA DE EXPERIMENTACION.....	27
V. RESULTADOS.....	31
CONCLUSIONES.....	40
RECOMENDACIONES.....	42
APENDICES	46
<i>Apéndice A: Códigos G y funciones miscelaneas.</i>	
<i>Apéndice B: Puesta en marcha del sistema láser EMCO LS140.</i>	
<i>Apéndice C: Programa CNC para corte de probetas</i>	

BIBLIOGRAFIA

PROLOGO



En los últimos años la implementación del rayo láser en los procesos industriales ha ganado mayor aceptación a nivel mundial y en forma más reciente en nuestro país, en donde a la fecha se cuenta ya con más de seis instalaciones industriales. Lo anterior se debe en gran medida a las múltiples ventajas que representa utilizar un sistema que no requiera cambios ni ajustes de herramientas, por carecer de ellas, que sea ágil, flexible, y que proporcione fácilmente y a menor costo tolerancias tan estrechas como una micra. Por otra parte, conforme los nuevos sistemas han ido adquiriendo mayor velocidad, precisión y repetibilidad, los procesos láser se han vuelto cada vez más rentables, confiables y económicos.

En la actualidad, el corte con láser es uno de los más importantes y prometedores procesos de manufactura láser, ya que las características del haz lo han hecho ideal para procesar una amplia gama de materiales, que van desde cerámicos, polímeros, maderas, etc., hasta aleaciones de alta dureza y compuestos de ingeniería avanzada [30]. Muchas configuraciones de sistemas láser se encuentran ya disponibles en el mercado y la selección del sistema adecuado es esencial para la obtención de resultados óptimos en el corte de un material determinado.

Algunos materiales que encuentran atractiva la aplicación del láser son los aceros inoxidables, los cuales son ampliamente utilizados en las industrias aeroespaciales, médicas, químicas y de procesamiento de alimentos, entre otras. El corte sin contacto del haz láser elimina los problemas de ajuste y desgaste de las herramientas de corte en los procesos por compresión y cizalladura, y reduce al mínimo los daños y deformaciones en el material ocasionados en los procesos convencionales de maquinado térmico, pues las características inherentes del material hacen difícil su procesamiento por estos métodos convencionales, debido a que su alta dureza y baja conductividad térmica propician la ejecución deficiente del método de corte. Por su parte, el haz láser también se encuentra con algunas dificultades al procesar este material, pues el grado de reflexión es muy alto y la baja fluidez del estrato derretido impide la obtención de cortes de gran calidad por el método tradicional de corte con oxígeno como gas de proceso [20], [23], [24]. El resultado es una línea de escoria adherida a la superficie inferior de la pieza de trabajo que ocasiona que las partes procesadas requieran de una segunda operación de acabado.

En cierta forma, este problema ha quedado solucionado con el uso de sistemas de alta potencia (5-15 kW) y gases inertes de proceso como el argón o el nitrógeno (proceso *Clean Cut*) [13], [14]. A pesar de ello, este tipo de aplicación requiere de una gran inversión, pues los costos operativos y de adquisición son considerables. Por otra parte, se han tratado de obtener modelados matemáticos en 1, 2 y 3D del fenómeno de incidencia del haz sobre el material que permitan obtener en forma automática parámetros de corte óptimos como la potencia, la velocidad de corte y la presión del gas de proceso, y con esto evitar los ensayos tradicionales por prueba y error [22], [28], [29]. Desafortunadamente los requerimientos computacionales son muy elevados y los resultados son sólo aproximados. Los esfuerzos por realizar los procesos láser en forma óptima han sido muchos y muy diversos, y sin embargo, la carencia de información técnica al respecto aún existe. En los procesos de corte con láser comunes se requiere obtener un conjunto de parámetros operativos que hasta la fecha siguen siendo encontrados por prueba y error, involucrando en ello consumo de tiempo y experimentos de calibración para determinar el comportamiento láser-material-espesor. El establecimiento de estos

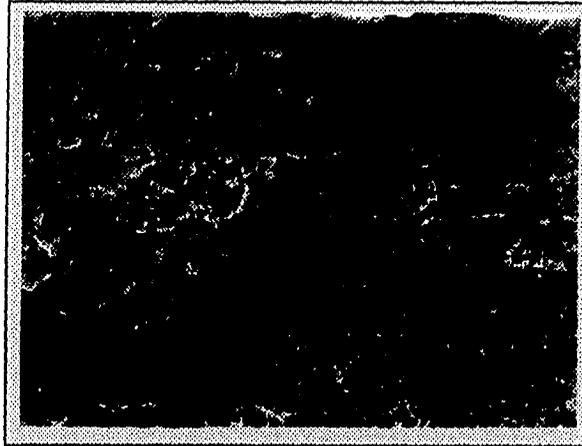
procedimientos de prueba para los sistemas de corte con láser es de gran importancia para la implementación y aplicación de nuevos láseres en la industria.

En este estudio se optimiza el proceso de corte con láser para el acero inoxidable 304 mediante la sustitución de oxígeno por aire comprimido como gas de proceso y la determinación de condiciones óptimas operativas de parámetros como la *posición focal*, la *velocidad de corte*, la *presión del gas de proceso* y la *posición de la boquilla*. En los primeros capítulos se proporcionan las características principales de nuestro material de estudio así como la descripción detallada del sistema láser empleado. Posteriormente, se presentan en el capítulo tres los efectos que, según la literatura, tienen los diferentes factores que intervienen en la realización del corte.

El proceso de experimentación de este ensayo consiste en cortar láminas calibre 24 de acero inoxidable empleando el sistema láser EMCO LS 140 con una lente de 63.5 mm (2.5 pulg.) y un punto focal de 0.1714 mm de diámetro. Se efectúan los cortes variando en forma sistemática los parámetros antes mencionados y con los cortes obtenidos se hace una evaluación minuciosa con el fin de determinar los valores óptimos. Dicha evaluación consiste en realizar la medición de la *altura de la escoria generada*, la *rugosidad promedio*, el *ancho de corte*, la *microdureza* y la *zona afectada por el calor*. También se analiza la composición de las escorias obtenidas en los cortes realizados con los diferentes gases de proceso.

Finalmente, con los resultados obtenidos se ha determinado la influencia que tienen los parámetros antes mencionados en el fenómeno de incidencia del haz así como las condiciones que permiten obtener la realización de procesos de corte en forma económica y con la mayor calidad posible. Del mismo modo se presenta una sugerencia para efectuar la búsqueda de condiciones óptimas operativas de la manera más rápida y eficiente.

I. ACERO INOXIDABLE AISI 304.



Micrografía del acero inoxidable 304 (110x).

Los aceros inoxidable tienen por característica principal su excelente resistencia a la corrosión, la cual se debe básicamente al alto contenido de cromo que encontramos típicamente en su composición y que es de por lo menos 12 %. Esta cantidad de cromo permite formar en el acero una fina capa protectora de óxido de cromo en el momento en que se encuentra en contacto con el oxígeno o algún otro medio corrosivo.

De acuerdo a su estructura cristalina y al mecanismo de endurecimiento, se distinguen cuatro clases de aceros inoxidable: los aceros inoxidable ferríticos (con más de 30% de Cr y menos de 0.12% de C), los aceros inoxidable martensíticos (con 17% de Cr y más de 0.15 % de C), los aceros inoxidable austeníticos (con un máximo de 18 % de Cr, 14 % de Ni, y menos de 0.08% de C) y los aceros inoxidable EP o endurecidos por precipitación, también conocidos como austeno-ferríticos con composición similar a los aceros inoxidable austeníticos pero además incluyen otros elementos como aluminio, niobio y tantalio.

El acero inoxidable AISI 304 se encuentra dentro de la clasificación de los inoxidable austeníticos, de los cuales se muestran en la página siguiente las tablas I y II con sus aleaciones más comunes así como algunas de sus aplicaciones.

ACEROS INOXIDABLES AUSTENITICOS					
NORMA AISI	%C	%Cr	%Ni	%Mn	Otros elem.
201	max. 0.15	16.0-18.0	3.5-5.5	5.5-7.5	max. 0.25 (N ₂)
202	max. 0.15	17.0-19.0	4.0-6.0	7.5-10.0	max. 0.25 (N ₂)
301	max. 0.15	16.0-18.0	6.0-8.0	max. 2.0	-----
302	max. 0.15	17.0-19.0	8.0-10.0	max. 2.0	-----
303	max. 0.8	17.0-19.0	8.0-10.0	max. 2.0	min. 0.15 (S)
304	max. 0.8	18.0-20.0	8.0-12.0	max. 2.0	-----
304L	max. 0.03	18.0-20.0	8.0-12.0	max. 2.0	-----
305	max. 0.12	17.0-19.0	10.0-13.0	max. 2.0	-----
308	max. 0.08	19.0-21.0	10.0-12.0	max. 2.0	-----
309	max. 0.20	22.0-24.0	12.0-15.0	max. 2.0	-----
310	max. 0.25	24.0-26.0	19.0-22.0	max. 2.0	-----
316	max. 0.08	16.0-18.0	10.0-14.0	max. 2.0	1.5-3.0 (Si)
317	max. 0.08	18.0-20.0	11.0-15.0	max. 2.0	3.0-4.0 (Mo)
321	max. 0.08	17.0-19.0	9.0-12.0	max. 2.0	min. 5xC (Ti)
347	max. 0.08	17.0-19.0	9.0-13.0	max. 2.0	min. 10xC (Nb)

Tabla I

ACERO AISI	APLICACION
201,202,301	Industria aérea: conductos de combustible, tornillos, partes del motor.
302	Arquitectura: marcos, fachadas; sin límite de aplicación.
304	Procesos químicos: tanques, Intercambiadores de calor, tuberías, etc. Procesos de alimentos: recipientes, tanques, pasteurizadoras, barriles, etc. Artículos domésticos: utensilios de cocina, cubiertos, fregaderos, tuberías, Industria textil: contenedores de cloro, blanqueador y otras sustancias. Transportación: cuerpos de trailers, estructuras, defensas, interiores, etc.
303	Tuercas, tornillos, palancas, piezas de carburador.
305	Piezas sometidas a giro y fatiga (ejes).
308	Líneas de soldadura
309,310	Equipos para procesos químicos y fotográficos; líneas de soldadura; para resistencia a la oxidación a 2000 °F
316,317	Similar al 304 y además para equipos de procesos químicos que requieren una alta resistencia a la corrosión.
347	Similar al 301, 302 y 304; donde se requiere alta resistencia a la corrosión ante temperaturas de 800 a 1500 °F

Tabla II

Este tipo de aceros se caracteriza por tener al níquel como elemento estabilizador de la austenita (se dice que es un elemento gamágeno o favorecedor de la fase γ) lo cual es favorable pues se incrementa el campo de la austenita eliminando casi por completo a la ferrita de la aleación Fe-Cr-C. Por otra parte, entre mayor cantidad de Ni presente este tipo de inoxidable menor será la cantidad necesaria de carbono (también elemento gamágeno) para formar la estructura austenítica. Otros elementos también presentes son el manganeso y el molibdeno los cuales incrementan la resistencia química de la aleación y también favorecen la formación de austenita.

Algo que es indeseable en los inoxidables austeníticos es que al ser sometidos durante cierto tiempo a temperaturas comprendidas entre 450°C y 900°C se provoca la precipitación de carburos del tipo $C_6 (Cr, Fe)_{23}$. Esta precipitación es aún más intensa en el rango de los 600 a 850°C.

Los carburos se precipitan principalmente en los límites de grano, provocando un ataque intergranular cuya intensidad dependerá de la temperatura y del tiempo al que haya sido expuesto (fig. 1.1). Este ataque ocasiona que la cohesión entre los granos disminuya y que las zonas contiguas pierdan su contenido de cromo, por lo que en esas zonas pierden su carácter de inoxidables y por lo tanto su resistencia a la corrosión.

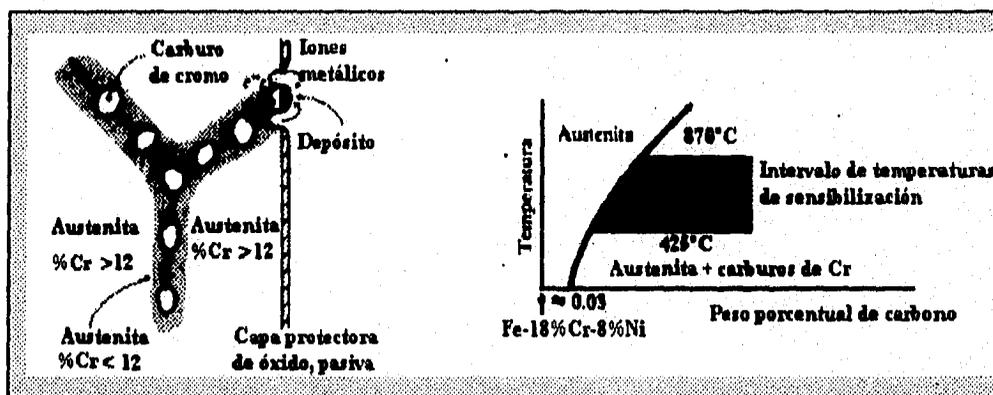


Figura 1.1.

Generalmente se aplican tres métodos para controlar o reducir la corrosión intergranular de los aceros inoxidables austeníticos:

- a) mediante un temple austenítico (hipertemple);
- b) con la adición de elementos que presentan una fuerte tendencia a formar carburos (o estabilizadores);
- c) reduciendo el nivel de carbono a menos de 0.03%.

El tratamiento térmico consiste en un calentamiento a temperaturas de entre 1030 a 1120°C, seguido de un enfriamiento con agua. A estas temperaturas se disuelven los carburos de cromo y se obtiene una aleación más homogénea. Es importante enfriar rápidamente toda la estructura después del recocido a la temperatura de disolución, ya que en el caso contrario la estructura se sensibilizaría por completo.

Elementos como el niobio y el titanio se emplean como estabilizadores en la fabricación de aceros inoxidables como el 347 y el 321, respectivamente. Estos elementos presentan una afinidad más fuerte que el cromo para formar carburos, de modo que se añaden a la aleación en un porcentaje suficiente para que sólo con estos elementos se formen los carburos, evitando así la formación de $Cr_{23}C_6$.

Finalmente, otra alternativa para evitar la corrosión intergranular es reducir el contenido de carbono a porcentajes inferiores al 0.03%. En el caso de nuestro material de trabajo se emplearía el acero inoxidable 304L, donde L: *low carbon content*.

Entre las cualidades mecánicas principales de los inoxidables austeníticos se encuentran su excelente ductilidad, conformabilidad y su facilidad para ser trabajados en frío. Presentan una resistencia mayor que la de los ferríticos al alto impacto y a las bajas temperaturas debido a que carecen de temperatura de transición frágil-dúctil. Esta característica es de gran importancia ya que los hace insustituibles a temperaturas bajo cero. Al someterse a estas condiciones se incrementa su resistencia a la tracción, su límite elástico, su módulo de elasticidad su límite de fatiga y su difusividad térmica, entre otras. Sin embargo, algunas propiedades se ven afectadas como el calor específico, la conductividad térmica, la emisividad y la resistencia eléctrica. No son ferromagnéticos, como los ferríticos o los martensíticos. Los altos contenidos de cromo y níquel influyen en el alto costo de este tipo de aleaciones.

En particular, el acero inoxidable AISI 304 es ampliamente recomendado para la construcción de equipos soldados, sujetos al ataque de agentes medianamente corrosivos, sometidos a temperaturas de hasta 300°C. Ya que su contenido de carbono es mínimo (aprox. 0.08%), el tiempo requerido para la precipitación de carburos es mayor, permitiendo así la soldadura en chapas de mediano espesor sin problema alguno. La soldadura es posible con todos los procedimientos. Pueden realizarse con llama oxiacetilénica o por resistencia. Para espesores delgados puede emplearse la soldadura por arco y bajo atmósfera de argón puro. Los problemas por corrosión intergranular se presentan principalmente con las piezas soldadas de mayores espesores que son sometidas por mayor tiempo a elevadas temperaturas, por lo que su empleo queda limitado a las piezas que posteriormente puedan recibir un temple austenítico.

Esta aleación se emplea ampliamente para la construcción de equipo de procesos químicos como intercambiadores, evaporadores, recuperadores, piezas de hornos, toberas, conductos para gases de combustión, etc, y algunas otras aplicaciones. Para ciertos usos que requieran resistencia a elevadas temperaturas (400 a 800°C) se recomienda la aleación 304L.

A continuación se muestra la composición química de esta aleación, algunas constantes físicas y sus propiedades mecánicas en función de la temperatura.

Composición química (%):

C : max. 0.08; **Si** : max. 1.0; **Mn** : max. 2.0; **P** : max. 0.045

S : max. 0.03; **Cr** : 18 - 20; **Ni** : 8.0 - 10.5

Tratamiento térmico : Temple austenítico. Se disuelven los carburos precipitados entre 1,030 y 1,100 °C; enfriamiento por agua. Con este tratamiento pueden aparecer pequeñas cantidades de ferrita dependiendo de la composición química, de la temperatura del tratamiento y de su enfriamiento.

Constantes físicas :

Densidad : 7.75 kg/dm³

Dureza (HB) : max. 192

Ensayo Izod : 118 - 206 J/cm²

Conductividad térmica (W/cm °C): 0.147 @ 20 °C ; 0.209 @ 500 °C.

Calor específico (J/g °C): 0.46 @ 20 °C ; 0.59 @ 650 °C.

Resistividad ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$): 72 @ 20 °C ; 115 @ 650 °C.

Coef. de dilatación térmica: 16.5 (de 21 a 100 °C); 18.5 (de 21 a 540°C);
 $\times 10^{-6}$ (mm/mm °C) 19.5 (de 21 a 650 °C).

Propiedades en función de la temperatura :

T (°C)	Rt (N/mm ²)	Le (N/mm ²)	A (%) (L =5mm)
20	590	245	62
100	530	195	56
200	480	155	54
300	440	130	50
400	420	120	45
500	375	110	40
600	315	100	38
700	235	90	37

Rt : Resistencia a la tracción

Le : Límite elástico

A : Alargamiento

I. Acero inoxidable AISI 304.

T (°C)	Re ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)	C _e (J/g °C)	Me (kN/mm ²)	Mr (kN/mm ²)
-160	-----	0.330	-----	-----
-75	-----	0.394	-----	-----
20	72	0.452	196	79.5
100	78	0.486	192	76.5
200	86	0.528	184	72.5
300	93	0.542	177	69.0
400	99	0.565	166	65.5
600	110	0.588	150	60.0
850	----	0.649	125	51.0

Re : Resistividad eléctrica
Ce : Calor específico
Me : Módulo de elasticidad
Mr : Módulo de rigidez

II. DESCRIPCION DEL SISTEMA LASER EMCO LS 140.



Sistema Láser EMCO LS 140.

A continuación se describen en forma resumida y por separado cada una de las partes constitutivas más importantes del sistema. Posteriormente se proporcionan en forma más detallada los datos técnicos y de operación que caracterizan a dicho sistema.

FUENTE DEL LASER (Resonador) : Este es un sistema láser de CO_2 , estimulado con corriente directa, con flujo lento de gas y de construcción compacta. El medio activo en el cual se genera el haz es una mezcla de los gases bióxido de carbono, nitrógeno y helio. El resonador contiene esta mezcla de gases que es el medio donde se genera el haz láser a partir de la activación de la corriente directa (fig. 2.1). Ambos extremos del resonador están equipados con espejos parcialmente reflejantes. Durante el proceso de emisión la energía eléctrica estimula la radiación que posteriormente se amplifica y se convierte en un haz de luz coherente con potencia aprovechable. El 30% de la energía de luz oscilante es aprovechada, siendo ésta la potencia láser nominal disponible de 140 Watts en modo continuo (CW). El haz láser no puede ser visto ya que su longitud de onda es de $10.6 \mu\text{m}$ la cual se encuentra en la región infrarroja del espectro electromagnético. El resonador es enfriado continuamente por agua.

II. Descripción del sistema láser EMCO LS 140.

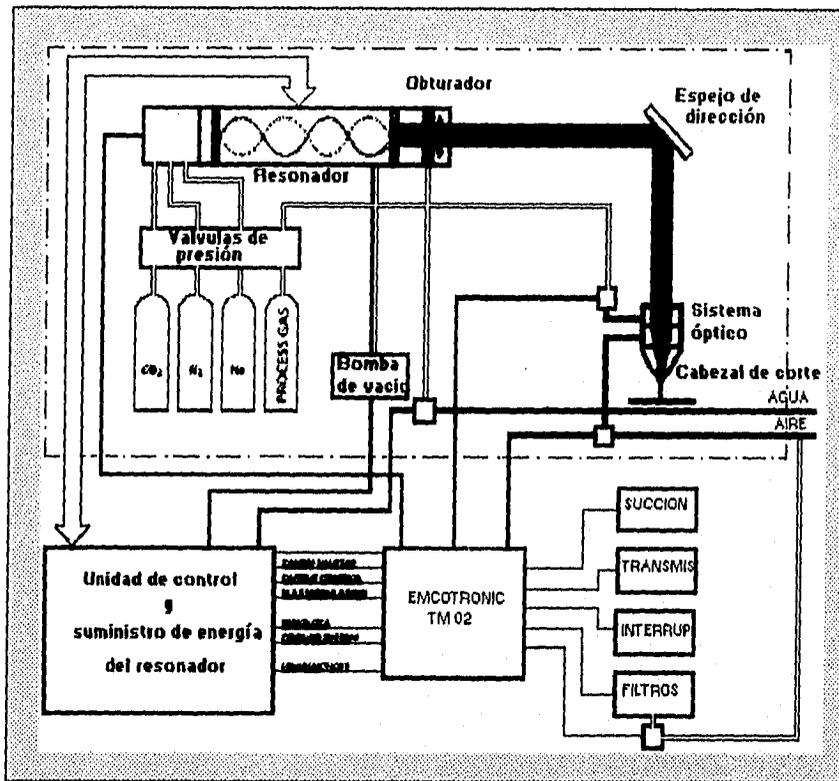


Figura 2.1.

CABEZAL DE CORTE : La energía láser disponible es enfocada por una lente con distancia focal de 2.5" y guiada hacia la pieza de trabajo. La energía se encuentra altamente concentrada (p_{pot} aprox. 550,000 W/cm²) a tal grado que es capaz de fundir y evaporar el material. Durante el proceso de corte, alguno de los tres gases de proceso (O_2 , N_2 , aire comprimido) es dirigido hacia la zona de incidencia del haz. Esto permite eliminar el material fundido y simultáneamente enfriar la región de corte. La posición exacta del cabezal o de la boquilla en la dirección del eje Z es ajustada manualmente mediante un micrómetro (fig. 2.2).

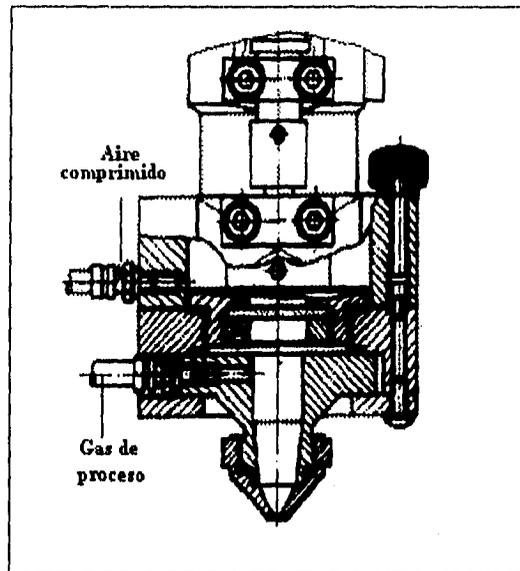


Figura 2.2.

SUMINISTRO DE GASES Y BOMBA DE VACIO : Los gases por separado se mezclan dentro de la máquina y se introducen al resonador. El suministro de los gases, tanto del gas de proceso como de los que van al resonador, y la bomba de vacío son controlados automáticamente (fig. 2.1). Este control puede también ser efectuado en forma manual para reajustes y pruebas. La unidad de control electrónico de presiones controla la presión de vacío del gas que va al resonador y la del gas de proceso. Con lo anterior se evitan los daños que pudiera ocasionar la falta de suministro (cuando los tanques están vacíos) o alguna falla en la bomba de vacío.

SISTEMAS DE VIGILANCIA Y SEGURIDAD : Durante la operación de corte (con la puerta corrediza cerrada), en el modo de edición o en el modo manual, el sistema láser EMCO LS 140 es clasificado como "**safty classification 1**" de acuerdo a las normas DIN 67836 y VDE 0836/2.77, la cual corresponde al estándar de clasificación más alto y es absolutamente seguro para el personal operativo y para el medio ambiente. Los circuitos corta-corriente de seguridad, funcionan como sistemas de monitoreo al activar el seguro del haz (obturador o shutter) y apagar por completo la fuente del láser. Este sistema funciona en el momento en que no se tienen las condiciones de seguridad requeridas (cuando la puerta corrediza está abierta o existe una falla en el circuito de corriente). Otros dispositivos de seguridad son sus ventanas de inspección fabricadas en plexi-glass que son impermeables a la

radiación emitida por el haz, y la unidad de succión y filtros, que eliminan los vapores y humos generados durante el proceso (fig. 2.3).

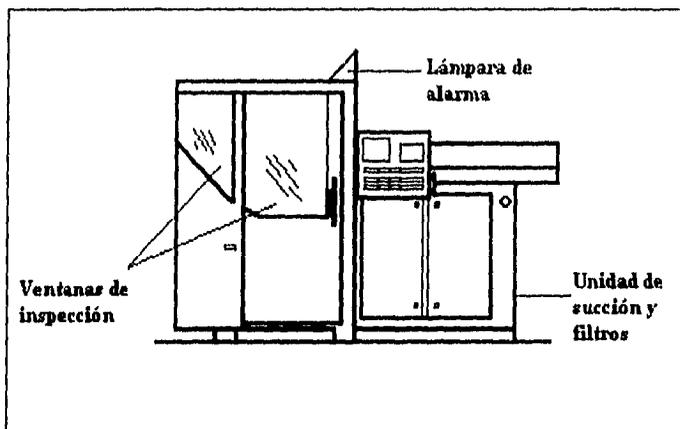


Figura 2.3

CONTROLADOR EMCOTRONIC TM02-L: Este controlador es un microprocesador que controla los tres ejes, permite realizar interpolaciones lineal y circular (2D), tiene una memoria de 64 kB, expandible a 128 kB y se pueden realizar compensaciones de herramientas y avance. Permite un control de avance que va desde 0 hasta 120% y es posible alcanzar una exactitud de 1 μm o más (fig. 2.4).

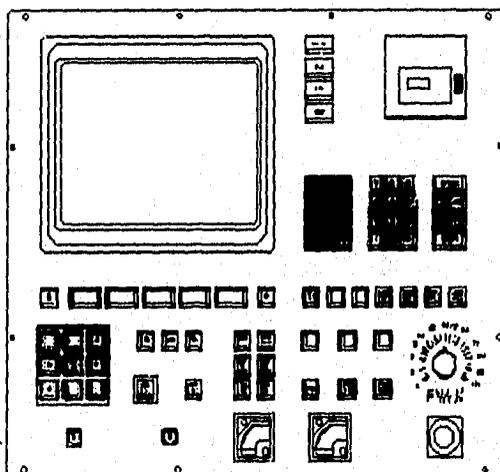
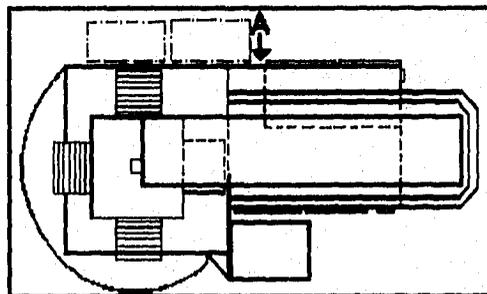


Figura 2.4.

El formato de programación se realiza de acuerdo con la estructura DIN 66025 (ISO 1056), con 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. Sus modos de operación son : *modo manual*, para un movimiento manual de trayectorias; *modo ejecutable*, para trabajar con los datos en memoria; *modo editor*, para elaboración, corrección y transmisión de programas por teclado o interface; y *modo automático*, para ejecutar la programación en control numérico.

La forma en la que se puede realizar la entrada o edición de datos es posible mediante la interface RS-232C (V24), a 150-4800 bd, cinta de grabación Phillips MDCR a 600 signs/seg (ó 6 kbd).

SOPORTE DE LA MAQUINA : La construcción del soporte de la máquina es robusta y sólida, el diseño compacto ha sido posible al ajustar directamente la fuente del láser sobre el soporte. En esta estructura es posible guiar al haz en forma precisa, de tal manera que se garantiza un posicionamiento con una alta precisión. El soporte de la máquina contiene al gabinete eléctrico, a la bomba de vacío y al sistema de succión. Dentro del área de maquinado se cuenta con tres rieles móviles, 12 soportes de punta, seis soportes magnéticos y una pieza para la fijación del riel con escala de medición integrada, todo lo anterior para la sujeción del material de corte. La generación de las geometrías y perfiles se realizan mediante la incidencia del haz sobre el material de trabajo y el movimiento relativo que permite la mesa de coordenadas que es gobernada por control numérico (fig. 2.5).



Vista de planta del sistema láser

Figura 2.5

DATOS TECNICOS DE LA MAQUINA :

Desplazamiento máximo en los ejes X y Y:	460x460 mm
Desplazamiento en el eje Z :	tosco: 40 mm ; fino: 15 mm
Unidades de avance:	servomotores de paso A/C
Avance en X y Y :	1-4000 mm/min
Avance simultáneo X/Y :	max. 6000 mm/min
Precisión de posicionamiento:	+/- 0.10 mm
Repetibilidad:	+/- 0.05 mm
Guías de trayectoria :	lubricación manual
Lente del cabezal de corte:	1" diam., 2.5" dist.focal
Diámetro del punto focal:	aprox. 0.17 mm
Densidad de potencia:	aprox. 550,000 W/cm ²
Tipo de boquillas:	cónicas de 1 y 3.2 mm
Suministro eléctrico principal:	3/N/PE 400/ 230V 50/60 Hz
Fluctuación de voltaje permisible:	+5% a 10%
Carga conectada:	4.5 kVA
Fusible principal del sistema :	16 A
Lámpara de la máquina	1 x 40 W
Dimensiones del sistema LS-140 (LxBxH):	3500x2450x2050 mm
Peso total :	aprox. 1,400 kg

DATOS TECNICOS DE LA FUENTE DEL LASER-CO₂ :

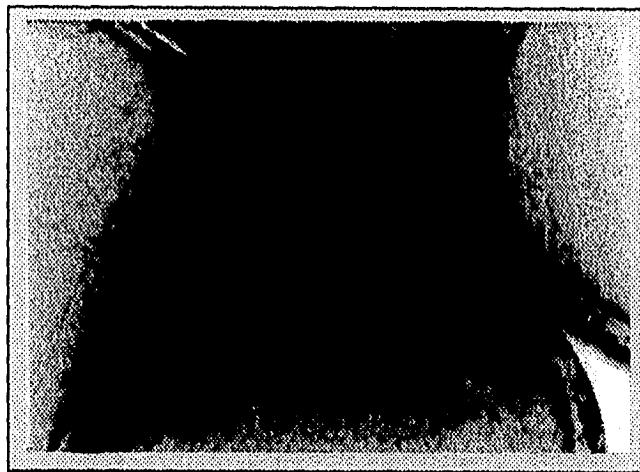
Capacidad nominal :	140 W
Rango de trabajo (CW) :	0 - 160 W
Diámetro del haz :	10 mm
Divergencia del haz (ángulo total):	2 mRad
Longitud de onda :	10.6 μ m
Frecuencia:	2.828 e13 Hz
Modo transversal :	TEM ₀₁
Tiempo de calentamiento:	10 min
Presión en el resonador:	15-25 mbar
Refrigerante del resonador:	agua
Refrigerante de espejos y electrodos:	aire
Tipo de bombeo:	corriente eléctrica 20 kV
Resonador óptico:	de lentes plano/convexo
Reflexión parcial en el espejo plano:	70% (30% pot. aprovechada)
Reflexión parcial en el espejo convexo:	99% (1% sistema de control)
Peso de la fuente del láser :	aprox. 210 kg
Dimensiones de la fuente (LxBxH):	2470x500x283 mm
Temperatura de trabajo :	10 - 35°C
Humedad relativa :	75% o menos

CONSUMO Y PRESIONES DE FLUIDOS :

Presión del agua:	2.5 - 4 bar
Consumo mínimo:	6 l/min
Presión del aire comprimido:	6 - 8 bar
Consumo mínimo:	3000 l/min
Presión CO ₂ :	5 bar
Pureza CO ₂ :	4.5
Presión N ₂ :	5 bar
Pureza N ₂ :	5 (ó 4.6)
Presión He :	5 bar
Pureza He :	4.6
Presión O ₂ :	max. 8 bar
Pureza O ₂ :	3
Presión CO ₂ en la fuente :	1.5 bar
Presión N ₂ en la fuente :	1.2 bar
Presión He en la fuente :	2 bar

*Nota: La relación de consumo de gases es aprox. : 1 CO₂ : 1 N₂ : 8 He.

III. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CALIDAD DEL CORTE.



Cortes óptimos en AISI 304 con O₂ (izq.) y aire (der.) como gas de proceso.

Para optimizar los procesos de corte con rayo láser es necesario conocer debidamente los factores que intervienen en el buen desarrollo del mismo, así como también es importante visualizar y comprender el efecto que produce la incidencia del haz láser sobre el material. En la figura 3.1 se muestra la distribución aproximada que tiene la energía total del haz al incidir sobre la pieza de trabajo.

En general, el proceso de corte con láser está regido por un balance de energía entre la energía del haz incidente y la energía requerida para la conducción hacia la pieza de trabajo, las pérdidas hacia el ambiente y la energía para el cambio de fase. La remoción del material ocurre ya sea por fusión o evaporación del material de la pieza de trabajo para formar una brecha en el momento en que el láser penetra por el espesor de dicha pieza. En ocasiones, se pueden originar pérdidas adicionales de energía a partir de ciertos fenómenos, tales como el sobrecalentamiento del estrato derretido, la absorción parcial del haz debido a la formación de plasma y la reflexión de la energía del haz.⁽¹⁾

⁽¹⁾ Referencia [28].

III. Factores que influyen en la calidad del corte.

A continuación se explica el efecto que tienen ciertos factores y parámetros de corte sobre la eficiencia con que se realizan los procesos con haz láser.

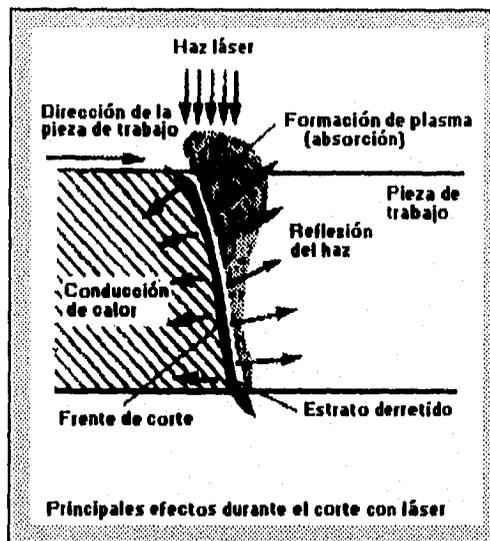


Figura 3.1.

Factor material.- Las propiedades del material más importantes por considerar son: a) las que tienen que ver con la forma en la cual la luz es absorbida por el material: la reflectancia para una determinada longitud de onda (fig. 3.2); b) las que influyen en el mecanismo de corte: como la absorción y conducción de calor (la fusión y vaporización dependen básicamente de la densidad de potencia y del tiempo de interacción)⁽²⁾; c) las que afectan el flujo de calor en el material: la conductividad y difusividad térmica; y d) las que se relacionan con la cantidad de energía requerida para originar un cambio de fase: la densidad, el calor específico, los calores latentes de fusión y evaporación.

⁽²⁾ Si la densidad de potencia es muy alta generalmente se conduce a la formación de plasma la cual a su vez puede ocasionar pérdidas por absorción y dispersión.

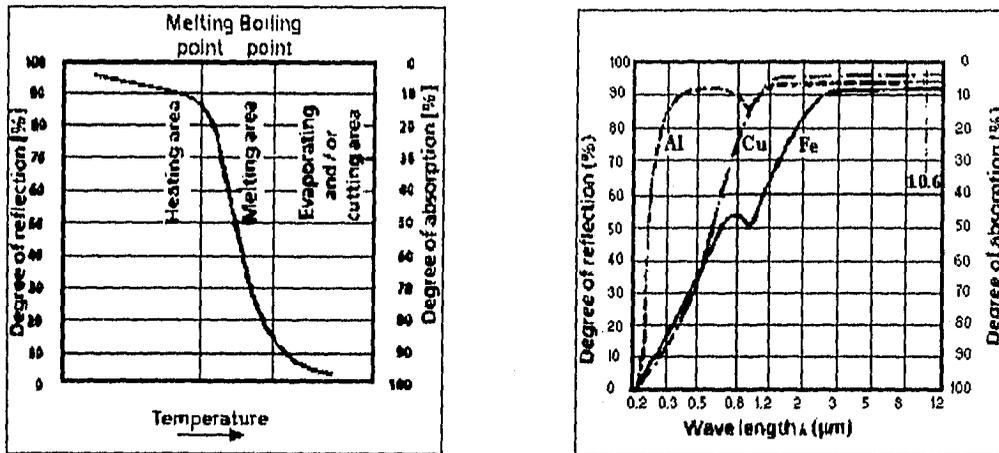


Figura 3.2. Gráficas de absorción y reflexión para temperatura y longitud de onda

Factor velocidad de corte.- Cuando se discute sobre velocidades de corte con láser, es importante determinar si la velocidad de corte máxima significa en realidad la velocidad más rápida, sin importar la calidad, si se refiere a la velocidad más rápida con la calidad mínima aceptable, o bien a la mejor combinación de calidad y velocidad. La velocidad máxima de corte real que se puede alcanzar para una pieza de trabajo está prácticamente determinada por su geometría. Esto es, entre más compleja sea la geometría, menor será el promedio en velocidad de corte, permaneciendo invariables todas las demás condiciones. Las piezas que son altamente complejas requieren mayor tiempo para la aceleración y desaceleración que los cortes en línea recta.

Para el modo continuo, la eficiencia de corte, en función de la velocidad del mismo, depende básicamente del espesor del material. Por ejemplo, en la figura 3.3 se muestra la velocidad de corte contra el espesor del material para diferentes materiales a 1,000 W. La velocidad de corte no sólo depende de la reflectividad del material a una temperatura determinada, sino además de la penetración del haz en el material (para la soldadura con láser la velocidad es un factor aún más crítico que para el corte).

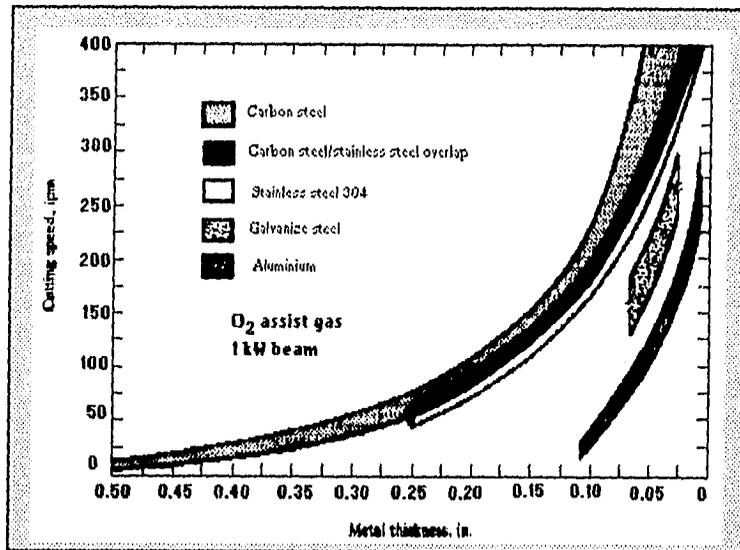


Figura 3.3.

Por ejemplo, para el caso del corte de láminas delgadas las velocidades de corte elevadas ocasionan un exceso de material fundido, un gradiente de temperatura y con esto también un incremento en la temperatura en el frente de corte de tal forma que la evaporación contribuye en mejor forma con el proceso. Por otra parte, se puede presentar la formación de plasma dependiendo de la intensidad del haz, y de la densidad del material. Usando un sistema láser de CO₂ de 1.5 kW de potencia y una calidad del haz con un factor K de 0.75, ($K = 2\lambda \cdot \text{profundidad de foco} / \pi \cdot \text{diámetro del foco}^2$) se han efectuado algunos experimentos en hojas delgadas de metal.⁽³⁾ El haz se ha enfocado a un diámetro de 50 μm el cual se logra sólo con un diseño especial de la óptica. Con este arreglo se obtuvo una intensidad de 10^8 W/cm^2 en el modo continuo. Al cortar hojas de aleación de Fe de 0.25 mm de espesor con velocidades de corte de entre 20 y 105 m/min, con una potencia entre 200 y 1200 W el proceso indicó el siguiente comportamiento: a) formación de plasma azul; b) incremento en el ancho de corte con valores de hasta dos veces el diámetro de foco a la velocidad de corte máxima de 105 m/min; c) velocidades mayores de corte a las calculadas con las relaciones de Fresnel en un rango de potencia bajo (200 W) y velocidades de corte menores a las esperadas teóricamente con potencias elevadas.

Todos estos fenómenos indican que el proceso de corte con láser está fuertemente influenciado por los efectos de formación de plasma. En general, el

⁽³⁾ Referencia [19].

proceso se ve afectado por una compleja interrelación entre el haz enfocado, el estado de plasma, la dinámica de la película derretida y del tiempo de interacción entre el haz y el material.

Factor enfoque.- Entre menor sea la magnitud del punto focal mayor será la densidad de potencia. La refracción de la luz depende principalmente de la forma de la lente y de su índice de refracción. En lo que a la óptica se refiere, existen lentes positivas, que son las que ocasionan que los rayos paralelos converjan (biconvexa, planoconvexa, menisco positivo) y las lentes negativas, que permiten que el haz diverja (bicóncava, planoconcava, menisco negativo) (fig 3.4).

Si las lentes no han sido debidamente diseñadas pueden ocasionar aberraciones como: la esférica (los rayos de luz nunca se reúnen en un punto), el astigmatismo (formación de imágenes dobles), la cromática, entre otras. Las lentes planoconvexas son las más usuales, los meniscos positivos reducen las aberraciones esféricas, logrando puntos focales de menores dimensiones. Las lentes esféricas son probablemente las más costosas por ser las que consiguen menores aberraciones y puntos focales de menor dimensión. En general, los materiales ópticos se encuentran limitados por sus indeseables características mecánicas y sus deficientes coeficientes de absorción.

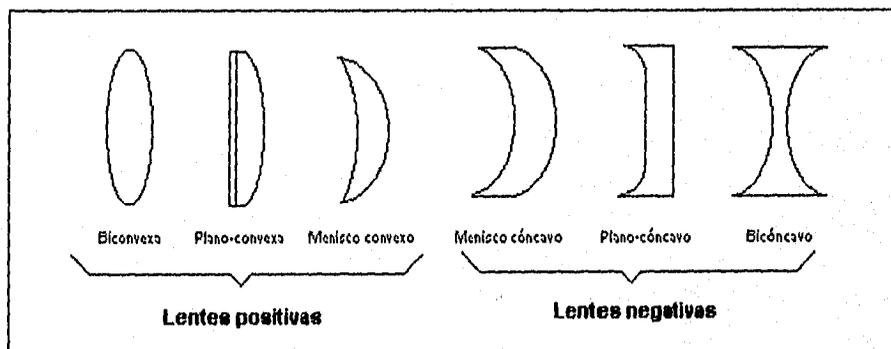


Figura 3.4.

La distancia focal y en particular la localización del punto focal es uno de los factores de mayor importancia para la realización de un corte determinado (además de la potencia, por supuesto). Cuando el haz pasa a través de la lente éste es

III. Factores que influyen en la calidad del corte.

enfocado en un punto con diámetro de fracción de milímetro (punto focal), y luego experimenta una ligera divergencia (fig. 3.5). La profundidad de foco es la zona donde el punto focal presenta una divergencia prácticamente nula, siendo ésta la región en la que nos debemos encontrar cuando realizamos un corte. La dimensión del punto focal y la profundidad de foco se determinan con las siguientes relaciones:

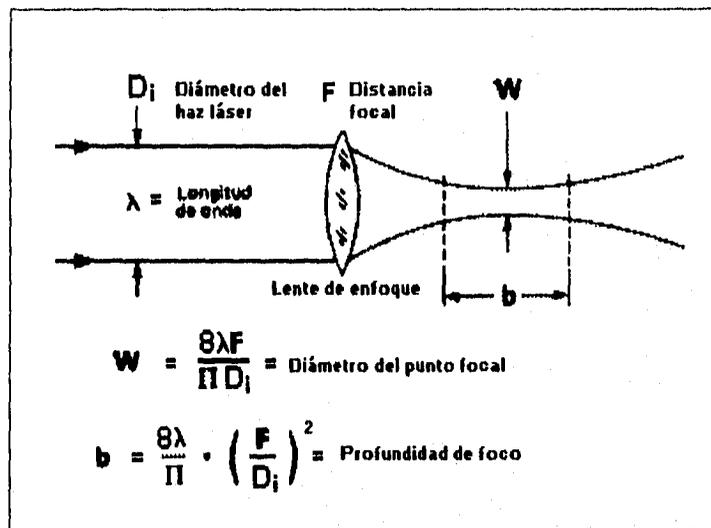


Figura 3.5.

donde:

- W : diámetro del punto focal (mm)
- λ : longitud de onda (mm)
- F : distancia focal (mm)
- D_i : diámetro inicial del haz (mm)
- b : profundidad de foco (mm)

** (Para nuestro caso particular, con una $F = 2.5$ pulg = 63.5 mm; $D_i = 10$ mm y $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$, se tiene que $W = 0.1714$ mm y $b = 1.0884$ mm).

III. Factores que influyen en la calidad del corte.

De las relaciones anteriores se puede observar que se pueden conseguir grandes profundidades de foco con lentes de distancia focal grande y un haz de baja divergencia.

La *posición del punto focal o posición focal* es la distancia perpendicular que existe entre la superficie del material y el punto focal (fig. 3.6). Algunos efectos de la variación de la posición focal son: disminución en la densidad de potencia, para una posición alejada de la superficie; variación en la reflexión del haz por la superficie de trabajo; variación en el ancho de corte y calidad superficial del mismo. La posición focal tiene un efecto crítico en la forma y calidad del límite de corte. Para un corte adecuado se requiere, entre otras cosas, de una baja divergencia del haz, de una distancia focal grande, y de una posición de foco adecuada de acuerdo al espesor y tipo de material con el que se esté trabajando (algunos investigadores recomiendan ubicar el punto focal a 1/3 del espesor del material para láminas con espesor de más de 6.35 mm).⁽⁴⁾

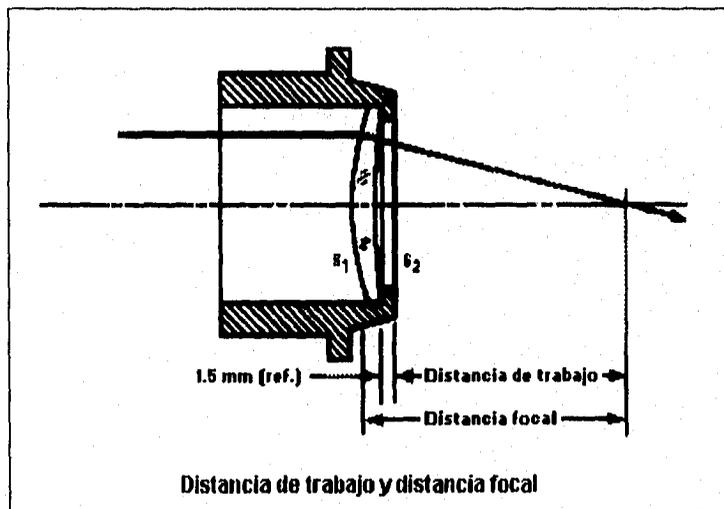


Figura 3.6.

⁽⁴⁾ Referencia [26].

III. Factores que influyen en la calidad del corte.

Factor haz láser.- Las potencias más altas en modo continuo se consiguen con láseres de CO₂ y las más altas en modo pulsante con láseres Nd: YAG. En estos últimos la energía del pulso, la duración y la frecuencia pueden ser variados en algunas máquinas en forma independiente, pero en otras máquinas son interdependientes. La capacidad de remoción del material por medio de pulsos depende del perfil temporal del haz. La cantidad de radiación láser que penetra en el material depende de la reflectancia del mismo. Generalmente la reflectancia varía en forma proporcional a la longitud de onda. La polarización del haz tiene un efecto más notorio para el caso de los metales que para el de los dieléctricos, debido a la alta reflectividad para la radiación incidente. La reflectividad de la superficie de un material irradiado con un haz láser se calcula con las ecuaciones de Fresnel.⁽⁵⁾

Un aspecto sumamente importante es el hecho de que tanto la potencia de salida real de todo láser como el modo temporal TEM presenta *fluctuaciones* por lo que la suavidad del corte está fuertemente relacionada con el corto periodo de estabilidad del haz. Esta variación que se denomina "*calidad instantánea del haz*" (en inglés: *instantaneous beam quality*) se define como los cambios que va sufriendo el perfil de potencia de salida del haz en cada milisegundo de emisión. Se presume que estos cambios en perfil del haz y localización espacial son los determinantes principales de la calidad de corte y en algunos casos hasta de la velocidad de corte.

Factor del medio de operación.- Los cambios bruscos de temperatura, la humedad, el polvo, los vapores de aceite y las vibraciones influyen en el desempeño deficiente de la óptica. Esto puede ocasionar incrementos de temperatura, incrementando al mismo tiempo la absorción de calor, lo cual en un caso extremo puede ocasionar la destrucción de los elementos ópticos.

Factor gas de proceso.- En las operaciones de corte con láser se emplean generalmente diferentes gases de proceso de acuerdo al tipo de material con el que se esté trabajando, algunos de los más comunes son: oxígeno, aire, argón y nitrógeno. El gas de proceso es un chorro de gas con una presión óptima en

⁽⁵⁾ $R_p = \frac{\tan^2(\theta_1 - \theta_2)}{\tan^2(\theta_1 + \theta_2)}$: reflectancia para la luz polarizada en plano paralelo al de incidencia; $R_s = \frac{\sin^2(\theta_1 - \theta_2)}{\sin^2(\theta_1 + \theta_2)}$; donde θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia y refracción respectivamente.

III. Factores que influyen en la calidad del corte.

dirección coaxial al haz láser, el cual entre otras cosas, protege la óptica de la incidencia de partículas generadas durante el corte.⁽⁶⁾

La selección del gas de proceso depende del tipo de operación, del material, de su espesor y de los parámetros mismos del proceso así como de la economía y calidad requerida en las piezas terminadas. En síntesis, las funciones que tiene el uso del gas de proceso son las siguientes:

- a) proteger la óptica del sistema;
- b) reducir la formación de escoria;
- c) reducir las pérdidas por absorción de energía a causa de la formación de plasma;
- d) enfriar el material en la región de corte y así reducir al mínimo la formación de ZAC;
- e) evitar o producir intencionalmente reacciones químicas favorables al proceso.

En ocasiones es adecuado emplear oxígeno cuando intencionalmente queremos provocar una reacción exotérmica (como en el corte de metales), incrementando así la eficiencia del proceso, la velocidad de corte y la posibilidad de trabajar con mayores espesores. De esta manera, cuando el haz incide sobre la superficie del metal, se incrementa la temperatura a tal grado que cuando se induce el chorro de oxígeno se provoca al mismo tiempo la oxidación de la superficie del material por la reacción exotérmica generada, la remoción del material fundido y evaporado en el punto de interacción y el enfriamiento del material en la cercanía del frente de corte. Para el caso de cortes con sistemas láser con potencia de hasta 1 kW se emplea generalmente oxígeno, pero con sistemas de mayor potencia (por ejemplo 15 kW) no se requiere de esta reacción de oxidación para realizar el corte. En tales casos se cambia el gas de proceso por argón, helio o nitrógeno (siendo el argón el más adecuado) con el objeto de mejorar considerablemente la calidad del corte y realizar cortes limpios, con bordes menos ásperos eliminando así la necesidad de una segunda operación para el acabado de las piezas.

Factor boquillas.- El régimen de flujo del gas de proceso juega un papel importante en el diseño de la boquilla debido a que la configuración de ésta es

⁽⁶⁾ En algunas operaciones, como en el caso de la soldadura, se prefiere un flujo excéntrico al eje del haz. Lo anterior es con el objeto de dirigir el plasma generado fuera de la cavidad de soldadura, mejorando así las condiciones del control de proceso.

responsable de la velocidad y turbulencia con que sale el gas. Existen boquillas subsónicas y supersónicas (Fig. 3.7). Si el flujo de gas es muy alto se provocará que el metal fundido salpique las regiones cercanas, mientras que con un flujo reducido el metal evaporado puede condensarse en la superficie de la lente o bien puede impedir la realización misma del corte.

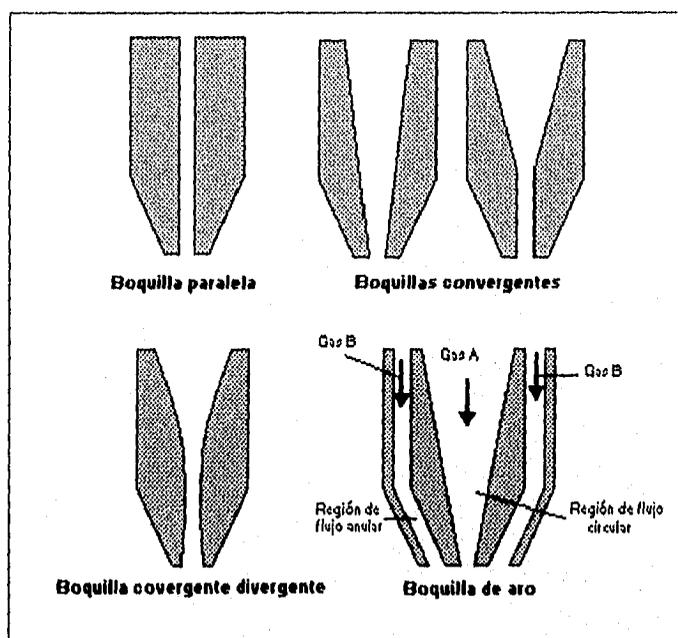


Figura 3.7.

Las boquillas convergentes divergentes con flujo supersónico minimizan el filo que se produce en las esquinas de los cortes que se realizan con flujos convergentes, con lo que se reduce la divergencia del gas que escapa, además de que se pueden obtener cortes limpios a velocidades más elevadas que con boquillas convergentes. La boquilla de anillo suministra al mismo tiempo dos diferentes tipos de gases (para el corte de aceros blandos de aprox. 5 mm de espesor). También existen boquillas para dar acceso tanto a gases como a líquidos, como en el caso de las boquillas para sistemas de corte WACS.⁽⁷⁾ En la soldadura con láser se

⁽⁷⁾ Referencia [14].

III. Factores que influyen en la calidad del corte.

emplea el mismo tipo de boquillas que en el corte para dispersar el plasma del punto de interacción.

Por otra parte, la distancia que existe entre la boquilla y el material afecta directamente al diámetro del chorro de gas que incide sobre la entrada de la brecha de corte, es decir al punto donde se concentra el flujo del gas. Esto se vuelve más crítico cuando el frente de erosión no es cubierto en su totalidad con el chorro de gas. El diseño y operación de la boquilla tienen por objeto:

A) Evitar la formación del disco de choque en el chorro de gas, el cual reduce la eficiencia del proceso por caída de diferencia de presión entre la superficie y la brecha de corte, provocando cortes irregulares.

B) Con diseños de salida ovalada se puede trabajar con presiones superiores a los 7 bar sin la formación del disco de choque, las cuales se emplean en el corte de metales no ferrosos como aluminio, latón, cobre, titanio, que para procesos *clean cut* utilizan presiones superiores a los 18 bar.

C) Asegurar el control en la calidad del proceso mediante la forma de salida de la boquilla. Algunas superficies irregulares como rebabas, escalonamientos, muescas, o excentricidades provocan una mala distribución del chorro de gas ocasionando una pérdida de presión.

Es importante destacar que en flujos supersónicos existe la desventaja de la onda de choque, las cuales pueden ocasionar discontinuidades en el campo del fluido. La forma de salida de la boquilla también puede influir en la realización del proceso. El diseño con tres lóbulos resulta efectivo en el retraso de la formación del disco de choque para presiones superiores a los 7 bar. En síntesis, no existen diferencias significativas entre los diferentes tipos de boquillas, siempre y cuando se trabajen dentro de su distancia óptima. Hoy en día en muchos sistemas láser se emplean boquillas aerodinámicas que reducen los costos en gases de proceso y mejoran la calidad del corte.

IV. METODOLOGIA DE EXPERIMENTACION.



Microscopio electrónico de barrido Phillips XL20.

Lo que se pretende con el siguiente estudio es optimizar el proceso de corte del acero inoxidable 304 mediante el sistema láser descrito en el capítulo II. De esta manera, se busca efectuar cortes con la mayor calidad posible, en el menor tiempo y de la forma más económica. En la sección anterior se dio una breve explicación de los efectos que presentan ciertos factores sobre la realización del corte. En esta sección, se experimentará sólo con algunos de estos factores dadas las condiciones que nos permite la máquina cortadora, de tal manera que permanecerán constantes la potencia y polarización del haz, el tipo de óptica, y el tipo de boquilla.

Para este ensayo se cortarán secciones de 15x15 mm en acero inoxidable 304 calibre 24 (0.635 mm) con un haz continuo de 130 W utilizando oxígeno y aire comprimido como gases de proceso. Se emplea una lente de 63.5 mm de distancia focal (2.5 pulg.) y un punto focal de 0.1714 mm de diámetro. Los parámetros de ensayo son: la posición del punto focal o posición focal (Pf), la velocidad de corte (Vc), la presión del gas de proceso (Pg), y la distancia de la boquilla a la superficie del material ($Db-s$). Previamente se realizan pruebas para determinar el rango de trabajo que permite la máquina en cada uno de estos parámetros. Cada parámetro representará a un grupo (A, B, C, D.), el cual contendrá cada uno de los valores de los rangos establecidos. Los grupos con los rangos de trabajo e intervalos para cada parámetro son:

- A): Pf de -2.0 a 3.0 mm, en intervalos de 0.5 mm;
- B): Vc de 100 a 1300 mm/min, en intervalos de 100 mm/min;
- C): Pg de 1 a 7 bar, en intervalos de 1 bar;
- D): $Db-s$ de 0.2 a 2.4 mm, en intervalos de 0.2 mm.

A cada uno de los valores contenidos en los rangos, sin importar el grupo al que pertenezcan, se les asignará un número en forma aleatoria, de modo que la secuencia de experimentación se lleve a cabo también en forma aleatoria. Mientras se está experimentando con algún valor en particular se asignarán a los demás parámetros los valores óptimos sugeridos en la literatura.⁽¹⁾ Estos valores óptimos son:

$$Pf = 0.0 \text{ mm}; Vc = 600 \text{ mm/min}; Pg = 6 \text{ bar}; Db-s = 0.8 \text{ mm}$$

Con el fin de obtener un análisis estadístico, se realizarán 7 cortes con condiciones idénticas de cada uno de los valores. Una vez terminado el experimento, se someterán todos los cortes realizados a la siguiente evaluación con el fin de establecer los valores óptimos experimentales:

- 1) Observación del aspecto general de corte, con el Macroscopio Wild Photomakroskop M400 (figura 4.5);
- 2) Medición de la *altura de escoria* (Ae), con el micrómetro láser LSM 9602 (figura 4.1);
- 3) Medición de *rugosidad* (Ra), con el rugosímetro Mitutoyo Surftest 402 (figura 4.2);
- 4) Medición del *ancho del corte* (Ac), con el microscopio del microdurómetro compacto Durimet Leitz Wetzlar (figura 4.3);
- 5) Medición de la *microdureza* en cercanía de la región de corte con el microdurómetro Durimet Leitz Wetzlar (figura 4.3);
- 6) Prueba cualitativa de *corrosión* en ácido clorhídrico al 80%.

⁽¹⁾ En la literatura no existen datos para el corte del acero inoxidable con aire comprimido, por lo que asignaremos los mismos valores que para el corte con O_2 . Tampoco se proporcionó un valor óptimo Pf , por lo cual supondremos que el valor óptimo se encuentra sobre la superficie de la pieza de trabajo.

IV. Metodología de experimentación.

7) Medición de la *zona afectada por el calor (ZAC)*, con equipo de pulido y ataque electroquímico (figura 4.6), microscopio metalográfico y microscopio electrónico de barrido Phillips XL20 (figura 4.4).

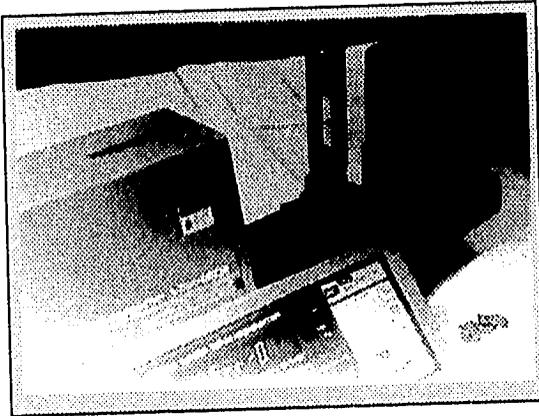


Figura 4.1. Micrómetro láser LSM 9602.



Figura 4.2. Rugosímetro Mitutoyo SurfTest 402.

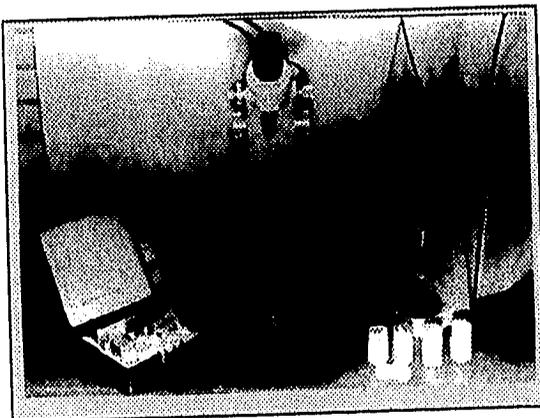


Figura 4.3. Microdurómetro Leitz Wetzlar.

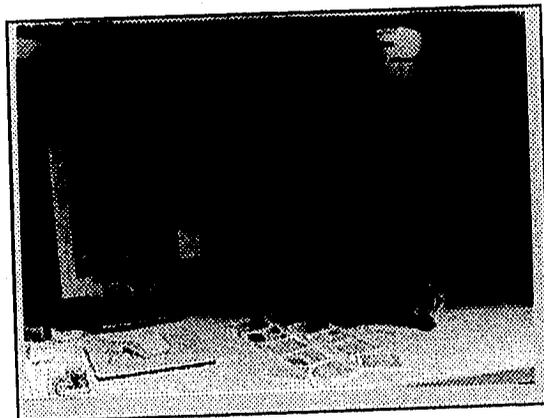


Figura 4.4. Microscópio electrónico Phillips XL20.



Figura 4.5. Photomakroskop M400

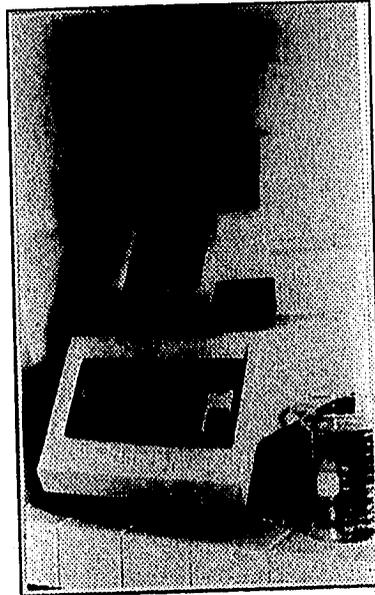


Figura 4.6. Pulidora electroquímica

Los valores óptimos experimentales de cada parámetro se determinarán mediante la evaluación de los puntos 1) a 4). La evaluación de los puntos 5), 6) y 7) se realizará sólo con los valores finales óptimos y con los resultados más críticos obtenidos.

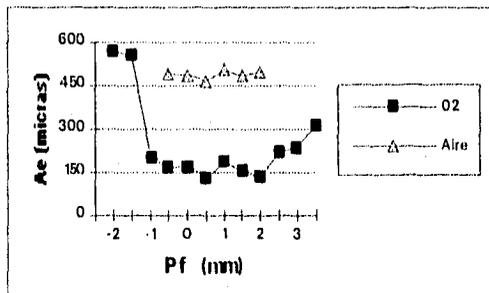
Todo lo anterior debe realizarse tanto para el oxígeno como para el aire comprimido como gases de proceso. Finalmente se comparan los resultados de cada uno de los gases y se determina cual de los dos resulta ser el proceso más conveniente.

V. RESULTADOS.

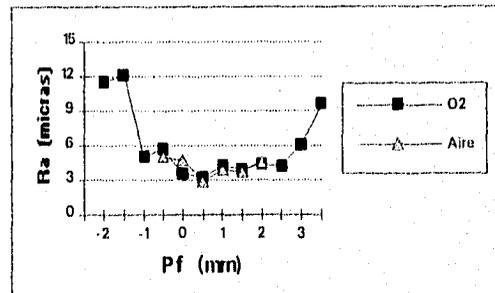


Micrografía de la escoria generada en un corte con aire (25x).

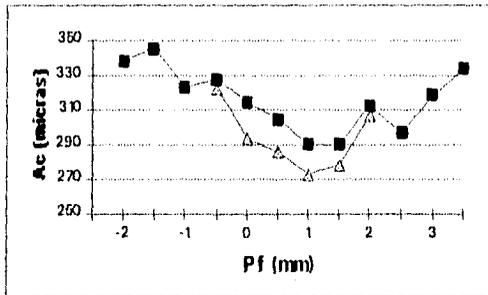
1) Para los valores Pf la formación de escoria fue aceptable en el rango de -0.5 a 1.0 mm, siendo óptima en 0.5 mm. Los cortes con aire comprimido presentaron una mayor escoriación y no se aprecia una influencia significativa con la variación en Pf . Para ambos gases, la rugosidad resultó aceptable en el rango de -0.5 a 1.5 mm siendo mínima en 0.5 mm (aprox. $3 \mu\text{m}$). Los cortes con aire presentaron valores Ra y Ac ligeramente menores que los cortes con O_2 .



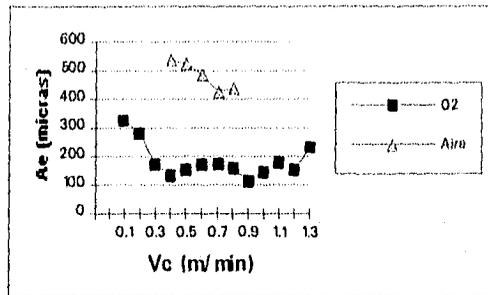
Gráfica 1



Gráfica 2

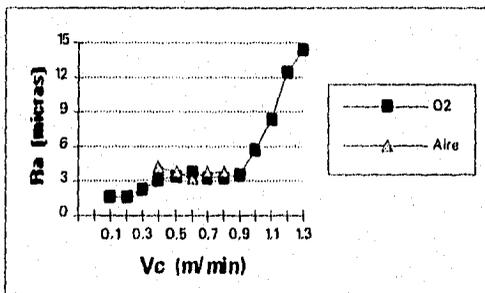


Gráfica 3

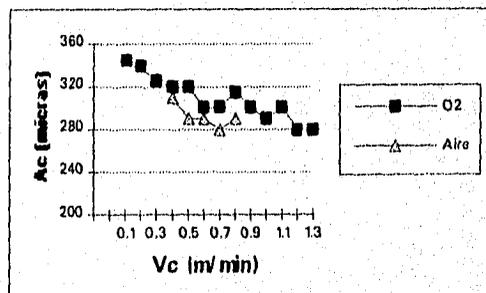


Gráfica 4

2) El valor V_c con menor formación de escoria fue de 900 mm/min, llegando a ser aceptable, para el caso del oxígeno, de 400 a 1000 mm/min. La escoriación vuelve a incrementar conforme aumenta V_c . Por otro lado, a bajas velocidades de corte se observaron rugosidades mínimas, siendo éstas de hasta 1.5 μm (figura 5.1). Los valores R_a son aceptables de 500 a 900 mm/min. Para valores V_c elevados se incrementa considerablemente la rugosidad (figura 5.2). Se registraron valores A_c mínimos en las velocidades de 1000 a 1300 mm/min (A_c de aprox. 270 μm).



Gráfica 5



Gráfica 6

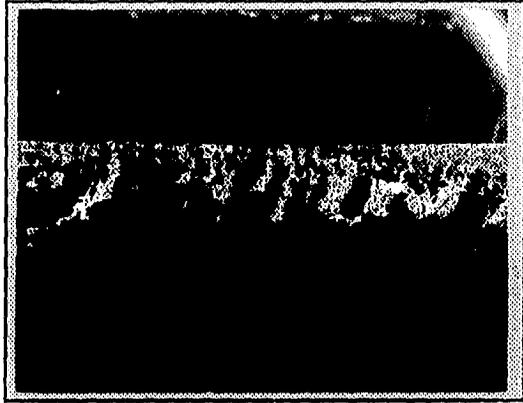
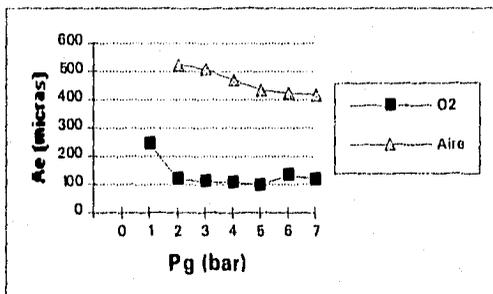


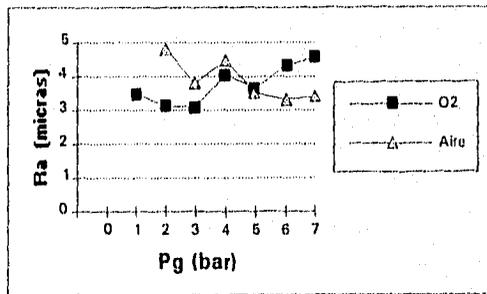
Figura 5.1. Rugosidad para $V_c = 0.1$ m/min (45x).

Figura 5.2. Rugosidad para $V_c = 1.3$ m/min (45x).

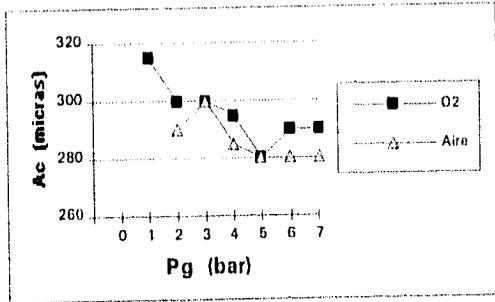
3) Con presiones elevadas de aire comprimido mejoró la calidad del corte, incluso, la escoria adherida es removida con facilidad. Para el caso del O_2 no se observa una influencia importante, aunque el aspecto general del corte es desfavorable en las presiones inferiores. La P_g óptima del O_2 fue de 5 bar y la del aire de 7 bar. Nuevamente los valores R_a y A_c del aire son ligeramente menores que los del oxígeno.



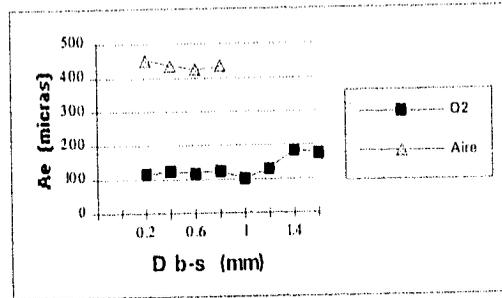
Gráfica 7



Gráfica 8



Gráfica 9



Gráfica 10

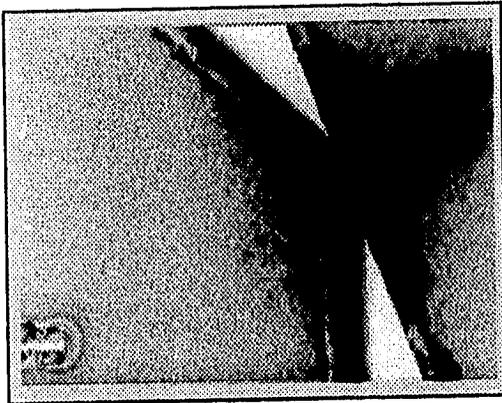


Figura 5.3. Formación de escoria en cortes con O₂ (izq.) y aire (der.) (10x).

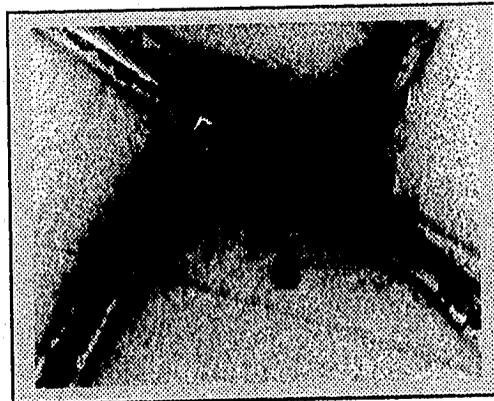
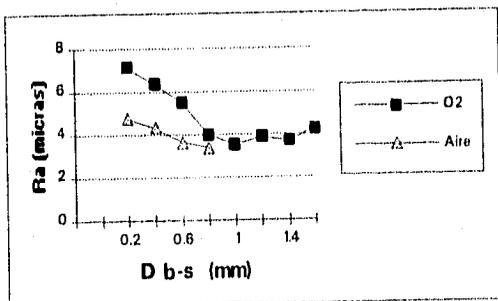
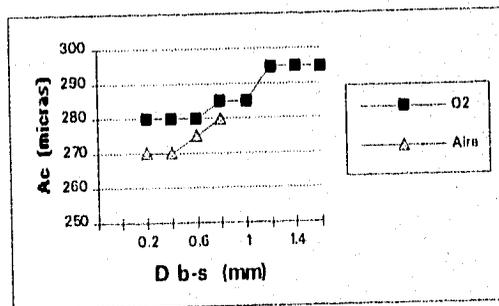


Figura 5.4. Comparación de escoria adherida para O₂ (izq.) y aire (der.) (12x).



Gráfica 11



Gráfica 12

4) La variación $Db-s$ no mostró gran influencia en la altura de la escoria. Con el acercamiento de la boquilla se obtuvieron valores Ac mínimos, sin embargo, lo anterior ocasionó incrementos en las rugosidades y aspectos desfavorables. El valor óptimo fue de 1 mm para el O_2 y de 0.6 mm para el aire. Como se aprecia en las gráficas, la variación de este parámetro muestra la menor influencia sobre los valores Ae , Ra y Ac .

La determinación de los valores óptimos experimentales se realizó de acuerdo a los resultados que proporcionaron los cortes con la mejor calidad, la mayor rapidez y el menor consumo de gas de proceso; dicho lo anterior en orden de importancia.

Con lo anterior se tiene que los valores óptimos experimentales son:

Oxígeno :

$Pf = 0.5$ mm
 $Vc = 900$ mm/min
 $Pg = 5$ bar
 $Db-s = 1$ mm

Aire :

$Pf = 0.5$ mm
 $Vc = 800$ mm/min
 $Pg = 7$ bar
 $Db-s = 0.6$ mm

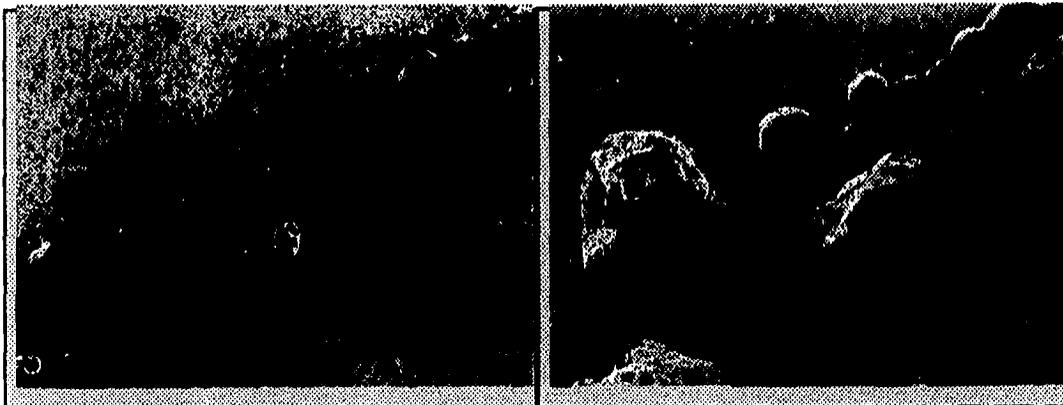


Figura 5.5. Corte óptimo con aire (sin escoria).

Figura 5.6. Escoriación en corte óptimo con aire (25x).

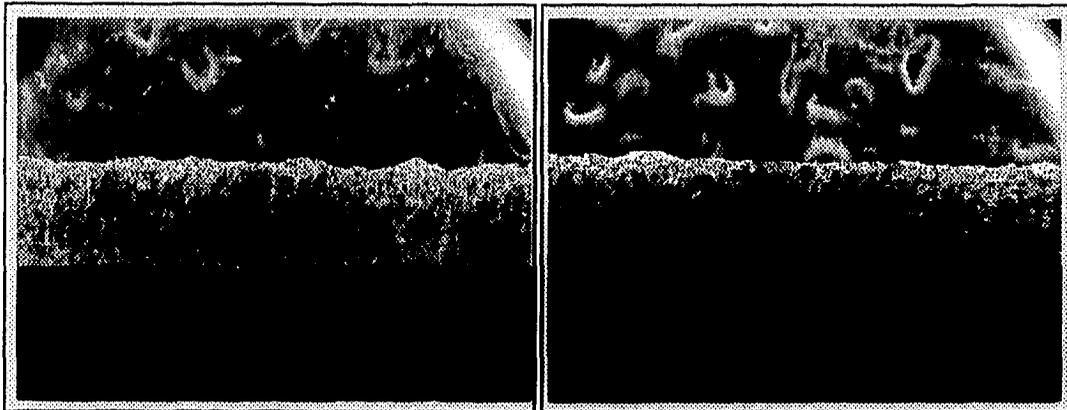


Figura 5.7. Rugosidad en corte óptimo con O₂ (45x).

Figura 5.8. Rugosidad en corte óptimo con aire (45x).

Si se establecen grados de calidad del cero al diez, con base en los peores resultados obtenidos y los resultados ideales, la calificación de las propiedades evaluadas en los corte óptimos sería la siguiente:

Propiedad	Valor max. real (mm)	Valor mín. ideal (mm)	Valor opt. oxígeno (mm)	Calidad (oxígeno)	Valor opt. aire (mm)	Calidad (aire)
Ae	573	0	110	8.0	50	9.0
Ra	14.5	0	3.5	7.5	3.4	7.6
Ac	350	170	290	3.3	280	3.8

5) Para la medición de microdureza se tomaron probetas con cortes de peores características ($Pf = -2.0$ mm; $Pf = 3.0$ mm; $Vc = 100$ mm/min; $Pg = 1$ bar), probetas con cortes óptimos de aire y O₂, y probetas con corte a cizalla como piezas patrón. Con una carga de 200 gramos los resultados son:

No. de Probeta	Dureza Vickers (HV: 200 gr)	Desviación (σ)
1: $Pf = -2$ mm	190.0	3.78
2: $Pf = 3$ mm	187.3	3.68
3: $Vc = 0.1$ m/min	203 *	4.23
4: $Pg = 1$ bar	205 *	4.56
5: Optimo O_2	186.0	3.22
6: Optimo A	186.0	3.57
7: Pieza patrón	186.0	3.34

Todas las mediciones se realizaron en diferentes regiones de corte de cada probeta y luego se tomó un promedio. Como se observa, los valores máximos de dureza se obtuvieron para las probetas 3 y 4, mientras que las demás muestran prácticamente la misma dureza que la pieza patrón.

6) Para la prueba cualitativa de corrosión se sumergieron probetas con corte a cizalla y probetas con parámetros óptimos de O_2 y aire en una dilución de ácido clorhídrico al 80% (figura 5.9). Después de mantenerlas por 24 hrs. dentro de esta sustancia el resultado fue el siguiente:

Probeta	Espesor inicial (μ m)	Espesor final (μ m)	Rapidez de corrosión (μ m/hr)
Pieza patrón	685	300.9	16.0
Corte óptimo O_2	685	270.5	17.3
Corte óptimo A	685	278.1	16.9

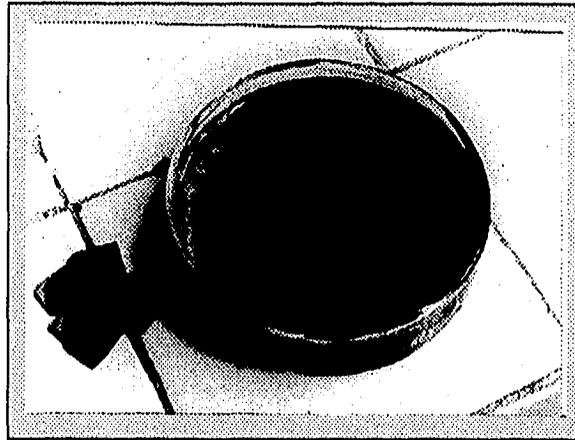


Figura 5.9. Probetas en HCl al 80 %.

Como se puede apreciar, el corte óptimo con O_2 presenta la mayor rapidez de corrosión, seguido por el corte óptimo con aire y al final el corte hecho en cizalla.

7) Finalmente, para la medición de la zona afectada por el calor (ZAC) se realizó un pulido y ataque electrofítico en probetas con cortes óptimos, con cortes inadecuados y con cortes extremadamente defectuosos. Después de realizar la medición con ayuda del microscopio electrónico de barrido los resultados son:

- a) En los cortes óptimos es difícil observar la extensión de la ZAC, ya que ésta se encuentra principalmente en la región de fusión incompleta, la cual es menor de $30 \mu\text{m}$ para ambos casos (figura 5.10).
- b) En cortes inadecuados la extensión de la ZAC se aprecia con menor dificultad, siendo ésta de aproximadamente $200 \mu\text{m}$ (figura 5.11).
- c) En los cortes extremadamente defectuosos, la extensión de la ZAC alcanzó hasta $380 \mu\text{m}$, incluso se aprecian algunos carburos precipitados.

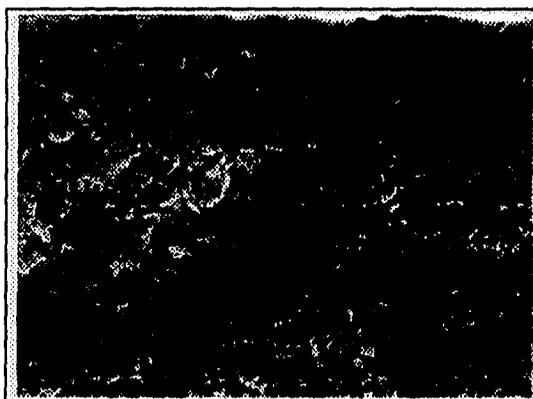


Figura 5.10.



Figura 5.11.

También se analizó la composición de los diferentes tipos de escoria provenientes de los cortes óptimos y ambos se componen esencialmente de una mezcla de óxido de hierro y óxido de cromo, sin embargo, los porcentajes son completamente diferentes, siendo para el O₂ de 80% FeO y 15% Cr₂O₃ y para el aire de 22% FeO y 77% Cr₂O₃, como se observa en las figuras 5.12 y 5.13.

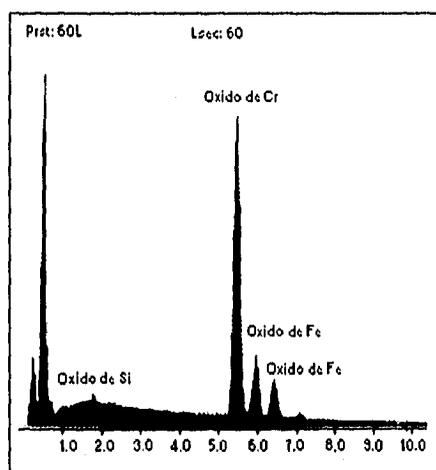


Figura 5.12. Oxidos en la escoria del corte óptimo con aire.

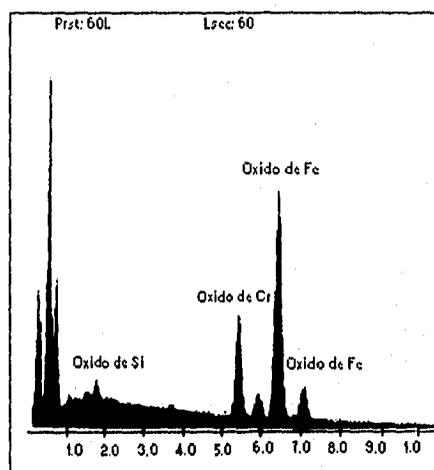


Figura 5.13. Oxidos en la escoria del corte óptimo con O₂.

CONCLUSIONES

Una vez analizados los resultados se llegó a las siguientes conclusiones:

a) *A partir de la gráfica Pf-Ac, en el rango de -0.5 a 1.0 mm de Pf se ve reflejado el valor de la profundidad de foco que para nuestro caso particular es de 1.0884 mm, donde a partir de este valor el haz sufre una divergencia, teniendo un punto focal de 171.4 μm de diámetro (este valor es comparable con el valor mínimo Ac de 270 μm).*

b) *La rugosidad del corte depende principalmente del tiempo de interacción del haz con el material, es decir, de la velocidad de corte. De esta manera, a menor velocidad de corte menor rugosidad. Con velocidades de corte elevadas la rugosidad resultará en general indeseable (superior a 10 μm).*

c) *El efecto de la velocidad en el ancho de corte indica que para valores Vc mínimos (mayor tiempo de interacción) los valores Ac se incrementan debido al mayor tiempo de incidencia del haz. Por otra parte, para velocidades de corte elevadas los valores Ac disminuyen, pues apenas se tiene el tiempo suficiente para que el haz penetre el espesor del material.*

d) *En general Ae es alta si Vc es alta, ya que el tiempo de interacción entre el chorro de gas y la escoria es menor a estas velocidades de corte, y la eliminación de la escoria resulta incompleta.*

e) *El incremento en dureza del material se debe principalmente a los parámetros que más influyen en el control del calor transferido como lo son la presión del gas de proceso y la velocidad de corte. Para velocidades de corte y presiones reducidas la transferencia de calor es mayor y el enfriamiento en la zona de corte es insuficiente.*

f) Los cortes realizados con O_2 provocan un mayor daño en las características anticorrosivas del acero inoxidable que los cortes realizados con aire, lo cual se debe a que su acción oxidante es más agresiva que la del aire.

g) Se observa que la baja fluidez de la materia fundida es el obstáculo principal para la obtención de cortes satisfactorios en el acero inoxidable, así como también se puede pensar que el alto punto de fusión del Cr_2O_3 impide la difusión del oxígeno en el frente de corte derretido. La eficiencia en el corte del acero inoxidable está dictada por varios mecanismos físicos como la transferencia de momentum, la conducción de calor, el cambio de fase, la formación de plasma, la absorción por la superficie y la fluidez del estrato fundido. La conducción excesiva de calor hacia la pieza de trabajo da origen a fenómenos como la recristalización, el crecimiento de grano y la precipitación de carburos. Estos fenómenos ocasionan la formación de una ZAC detectable.

h) Si V_c es alta la ZAC es mínima, pues el haz se mueve más rápidamente y cualquier punto recibe menos calor para un tiempo determinado y por lo tanto la extensión de la ZAC disminuye. La obtención de una ZAC mínima en los cortes óptimos se debe básicamente a la utilización de parámetros adecuados del proceso y a la baja potencia empleada (la ZAC también puede incrementar con la potencia, pues el calor transferido es mayor).

i) Los parámetros más determinantes en el proceso son la posición focal y la velocidad de corte, pues los demás parámetros no mostraron tener tanta influencia como los anteriores. Se observa que la formación de escoria depende principalmente de la posición de foco y de la presión del gas de proceso.

Respecto a este último punto, para el caso del O_2 , la escoriación llega a ser mínima (100 μm), pero aún queda remanente en el material y prácticamente es irremovible, obteniéndose finalmente un corte de calidad regular. En cambio, para el caso del aire comprimido, a pesar de que la escoriación es muy notoria, ésta puede ser removida fácilmente, puesto que es una escoria frágil, permitiendo observar así un corte más limpio y de mayor calidad que en el caso anterior. Por otra parte, los menores valores registrados en rugosidad y ancho de corte se obtuvieron con el aire comprimido, lo cual nos indica que la reacción menos agresiva del aire permite obtener características ligeramente más finas que en los cortes realizados con O_2 . Se sospecha que la fragilidad de la escoria generada en el corte con aire se debe a su alto contenido de cromo y que dicha escoria se compone básicamente de cromita férrica ($FeCr_2O_4$), como se reporta en la referencia [23]. Sin embargo, lo anterior requiere de una investigación más profunda.

RECOMENDACIONES

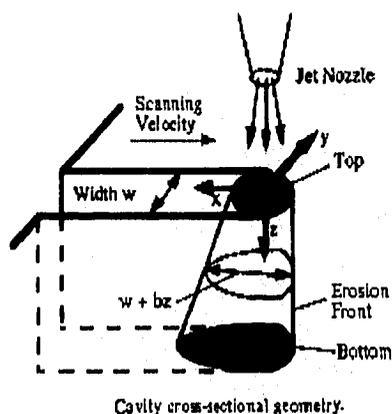
Con los resultados del estudio anterior se recomienda principalmente y con el fin de ahorrar tiempo en la búsqueda de los parámetros óptimos de corte para algún acero inoxidable en especial, realizar la búsqueda teniendo como parámetros fijos: a) una presión de gas de proceso superior a los 5 bar; b) una distancia $Db-s$ de entre 0.6 y 1.0 mm; y c) una potencia superior a 120 W, para láminas de espesor inferior al calibre 22 (0.795 mm). Los parámetros de ensayo serán únicamente Pf y Vc . Los valores Pf se variarán únicamente en un rango no mayor al valor de la profundidad de foco para una óptica determinada, que en nuestro caso, para una lente de 2.5 pulg. de distancia focal, la profundidad de foco, y por lo tanto el rango de variación, no será mayor de 1 mm, partiendo de un haz enfocado.

La variación Pf en un rango igual a la profundidad de foco se recomienda solamente para láminas con espesores inferiores al calibre 22. Para láminas calibre 20 (0.953 mm) en adelante se recomienda únicamente enfocar el haz sin realizar la búsqueda del valor Pf óptimo. En general, para láminas del calibre inferior al 22 se recomienda cortar con aire como gas de proceso, pues además de ser muy económico, la calidad del corte es superior a la del O_2 y los acabados son mucho más limpios al eliminar la escoria remanente. Para espesores superiores a los 3 mm la extrapolación de resultados sugiere, al igual que la literatura, ubicar el punto focal dentro de la superficie del material y trabajar con un haz pulsado para minimizar los efectos de la ZAC. Aunque en este estudio no se reporta el análisis hecho para estos calibres, se efectuó en forma adicional un estudio para calibres 18, 22 y 26 cuyos resultados se tomaron en consideración para hacer las recomendaciones anteriores.

Finalmente se proponen a manera de continuación de esta tesis tres opciones cuyo desarrollo ayudará a la realización de métodos de corte más eficientes y de mayor calidad y que por otra parte pueden ayudar al mejor entendimiento del fenómeno de corte y a la obtención de parámetros de corte óptimos haciendo uso de herramientas computacionales y de monitoreo del proceso.

1ª OPCION: OBTENCION DE UN MODELADO MATEMATICO

Para la obtención de un modelado matemático del fenómeno se sugiere revisar las referencias [22], [24], [25], [27], [28] y [29]. En especial en la referencia [28] se presenta una solución híbrida para estimar la extensión de la ZAC usando una solución analítica del balance de energía en el frente de corte para definir la forma de la brecha de corte. En este modelado se hacen las siguientes suposiciones: i) el principal mecanismo de eliminación es por fundición, los efectos por corte con gas reactivo son eliminados ya que se hace uso de gas inerte, existe acumulación mínima de fundición en el frente de corte gracias al chorro de gas; ii) efectos de convección despreciables; iii) las reflexiones iniciales en la superficie de corte son mucho mayores que las que ocurren en el frente de corte.



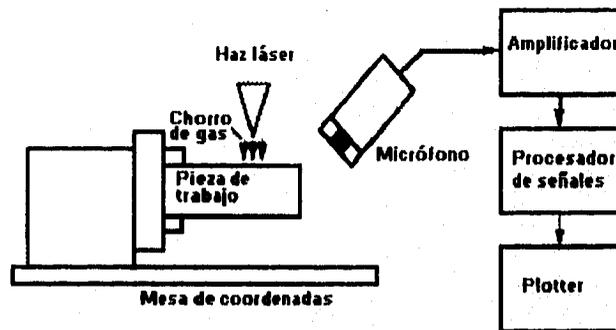
El frente de corte se divide en elementos planos infinitesimales y el balance de energía se expresa de la siguiente manera:

$$E_b(x,y)dx dy = E_c(x,y)dA + E_p(x,y)dx dy$$

donde $E_b(x,y)dx dy$ es la energía neta proveniente del haz, $E_c(x,y)dA$ es la energía de conducción y $E_p(x,y)dx dy$ es la energía requerida para el cambio de fase. La ecuación obtenida se resuelve numéricamente en una PC donde todo está en función de (x,y) . El desarrollo de métodos como el anterior resultaría muy útil como auxiliar en la planeación de procesos de corte, donde se requiere de tiempos computacionales cortos que determinen en forma automática parámetros del proceso como la potencia, la velocidad de corte, presión del gas de proceso, etc.

2ª OPCION: MONITOREO DEL PROCESO

En un intento por automatizar la obtención de los parámetros óptimos operativos de los procesos láser se ha experimentado con la implementación de un control de malla cerrada para los procesos de maquinado. Algunas técnicas comunes de monitoreo para el procesamiento con láser incluyen mediciones infrarrojas del perfil de temperaturas en el frente de erosión, monitoreo de luz visible, medición de temperatura para un punto determinado de la pieza de trabajo, detección del baño de chispas que atraviesa el espesor del material, medición acústica de la interacción entre el chorro de gas y el frente de erosión, etc. Para realizar algún desarrollo al respecto se recomienda revisar la referencia [21].

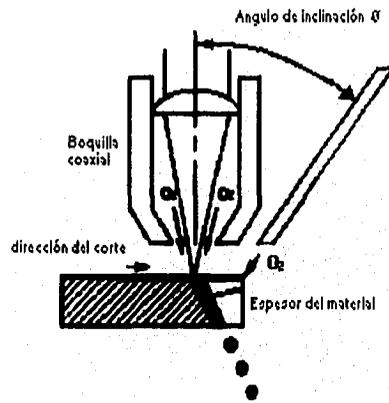


Arreglo experimental para monitoreo acústico.

3ª OPCION : OBTENCION DE CORTES LIMPIOS CON DOBLE CHORRO DE GAS

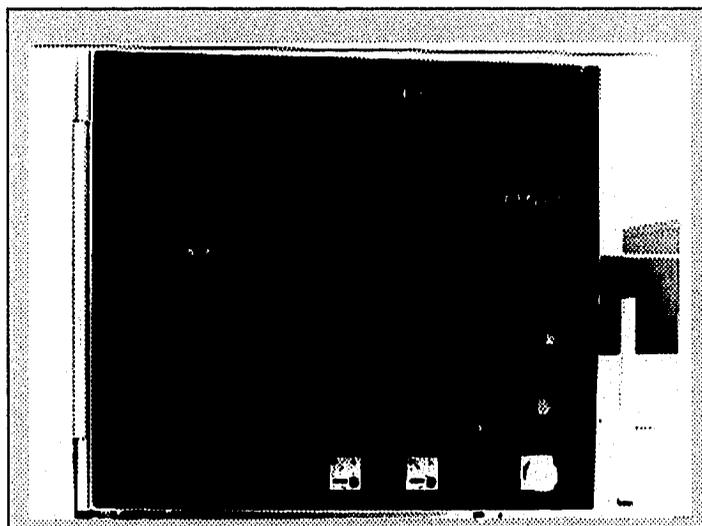
Comúnmente el corte con láser a alta presión que utiliza presiones de hasta 1 MP y superiores, se ha adoptado para maquinar acero inoxidable y otras aleaciones de alta temperatura en espesores de 2 a 10 mm. Se han obtenido bordes sin escoria y libres de oxidación empleando estas presiones de corte. El borde libre de oxidación se debe gracias al uso de gases inertes (argón principalmente) en lugar de oxígeno, lo cual resulta muy conveniente cuando se realizará un proceso posterior como el de soldadura. Por otra parte se ha desarrollado un proceso de corte con doble chorro de gas, también para el corte de

aceros inoxidables, el cual, bajo condiciones idénticas a las de un chorro coaxial de oxígeno convencional, logró cortar espesores tres veces superiores a los que se procesan comúnmente con chorro coaxial, haciéndolo sin la aparición de escoria remanente. El éxito de este proceso se acredita a la mayor transferencia de momentum y a la ausencia de formación de óxido de cromo apareciendo en vez de ello un nuevo componente con mayor fluidez. Para el seguimiento de este estudio se sugiere revisar la referencia [23].



Esquema del corte con láser con doble chorro de gas

APENDICE



Panel de control del sistema láser EMCO LS 140.

APENDICE A: CODIGOS G Y FUNCIONES MISELANEAS

APENDICE B: PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA LASER EMCO LS 140

APENDICE C: PROGRAMA CNC PARA CORTE DE PROBETAS

APENDICE A

CODIGOS G Y FUNCIONES MISELANEAS

Estructura en grupo y estado inicial de las funciones G

GRUPO 0	*	G00 : Desplazamiento rápido G01 : Interpolación lineal G02 : Interpolación circular (sentido horario) G03 : Interpolación circular (sentido antihorario) G04 : Penetración G05 : Calibración de potencia del haz
GRUPO 2		G94 : Avance en <i>mm/min</i> o <i>1/1000 pulg/min</i>
GRUPO 3	**	G53 : Cancelación de <i>offsets</i> 1 y 2 G54 : Llamada al <i>offset</i> 1 G55 : Llamada al <i>offset</i> 2
GRUPO 4	*	G92 : Establecer <i>offset</i> 5
GRUPO 5	**	G56 : Cancelación de los <i>offsets</i> 3,4,5 G57 : Llamada al <i>offset</i> 3 G58 : Llamada al <i>offset</i> 4 G59 : Llamada al <i>offset</i> 5
GRUPO 6		G25 : Llamada a subrutina G27 : Salto incondicional
GRUPO 7	#	G70 : Dimensiones en pulg. G71 : Dimensiones en mm
GRUPO 8	**	G40 : Cancelación de compensación de herramienta G41 : Compensación de corte a la izquierda G42 : Compensación de corte a la derecha

* Para efecto en bloques

** Estado inicial

Estado inicial y puede establecerse desde el modo monitor (MON).

Estructura en grupo y estado inicial de las funciones Misceláneas

GRUPO 0	*	M03 : Modo continuo M04 : Modo pulsado M05 : Láser (<i>OFF</i>)
GRUPO 1	**	M38 : Parada precisa (<i>ON</i>) M39 : Parada precisa (<i>OFF</i>)
GRUPO 2	*	M00 : Parada programada M17 : Fin de subrutina M30 : Fin de programa con regreso al inicio
GRUPO 3	**	M08 : Gas de proceso (<i>ON</i>) M09 : Gas de proceso (<i>OFF</i>)
GRUPO 7	**	M23 : Abrir obturador M24 : Cerrar obturador
GRUPO10		M90 : Cancelación de función espejo M91 : Espejo en eje X M92 : Espejo en eje Y M93 : Espejo en eje X y Y
GRUPO13	*	M99 : Establecer parámetros de pulso
GRUPO14	**	M67 : Seguidor de potencia (<i>OFF</i>) M68 : Seguidor de potencia fijo M69 : Seguidor de potencia flexible
GRUPO15	*	M98 : Potencia mínima y duración de pulso

* Para efecto en bloques

** Estado inicial

Estado inicial y puede establecerse desde el modo monitor (MON).

APENDICE B PUESTA EN MARCHA DEL SISTEMA LASER LS 140

El siguiente procedimiento es una sugerencia de puesta en marcha para el sistema láser EMCO LS 140, el cual puede resultar muy útil cuando no se ha tenido anteriormente contacto alguno con esta máquina. Por otra parte, también puede resultar adecuado como procedimiento rutinario y de chequeo en el momento en que se requiera operar el sistema.

PUESTA EN MARCHA

Paso 1 : Abrir llaves de aire comprimido, suministro de agua, y tanques de gas. En caso de requerirlo, las presiones de los tanques de gas deben ajustarse a :

CO₂: 2 bar (30 psi); He: 2 bar; N₂: 1.4 bar (20 psi); O₂: 8 bar (120 psi).

Paso 2 : Encender el interruptor principal de la máquina y checar que las presiones de la fuente del láser sean las adecuadas (He: 2 bar; N₂: 1.2 bar; CO₂: 1.5 bar). En caso contrario ajustar las presiones.

Paso 3 : Poner la llave al obturador o *shutter*, sin girar. Poner la llave a la fuente del láser, y girar.

Paso 4 : En el panel de control: presionar las teclas C.E. (botar alarma), AUX. ON (prender auxiliares), LASER SOURCE ON (encender la fuente) y CYCLE START (iniciar ciclo). Después de presionar la última tecla, la mesa de coordenadas se va a su posición de referencia.

Paso 5 : En el modo editor (*EDIT*): llamar un programa o crearlo.

Paso 6 : Colocar la pieza de trabajo sobre los rieles y enfocar el haz. Para efectuar el enfoque la boquilla debe estar girada hacia la derecha hasta el tope. En el modo manual (*MAN*) se desplaza la mesa de coordenadas con las flechas hasta que la pieza de trabajo quede abajo del cabezal de corte. Posteriormente, bajar con el micrómetro el cabezal hasta que apenas pase la lina de 0.038 mm entre la superficie del material y la boquilla. Luego, con el micrómetro desplazar el

cabezal 2.5 mm hacia arriba. (Para el lente de 2.5", el punto focal del haz se encuentra a 2.54 mm abajo de la boquilla girada hasta el tope).

Paso 7: Ajustar la distancia entre la superficie del material y la boquilla, girando ésta última hacia la izquierda. Esta distancia se calibra con las linternas de acuerdo al material con que se esté trabajando. Generalmente se ajusta a una distancia de 1 mm.

Paso 8: En el modo manual (*MAN*): seleccionar *PROCESS GAS* y elegir el gas de proceso:

1 = O₂; 2 = N₂; 3 = Aire comprimido; 4 = fuera de operación.

Paso 9: Presionar la tecla *PROCESS GAS ON* y regular la presión con la perilla que se encuentra a un lado del cabezal de corte. (El tipo de gas de proceso y la presión del mismo dependen del material y de su espesor, por ello se sugiere consultar previamente el tipo de gas y la presión adecuada antes de trabajar con la máquina.).

Paso 10: Estando en el modo manual seleccionar *LASER POWER UP* (Encender la fuente del láser) y con el menú que se despliega se tienen dos opciones para activar el haz :

Manual:

- * Seleccionar *VACUUM ON* (la presión del manómetro indica aprox. 0 milibar);
- * Seleccionar *LASER GAS ON* (la presión indica entre 18 y 25 milibar);
- * Seleccionar *HV ON* (se encienden los cañones).

* Nota: Los dos medidores de corriente deben marcar aprox. 50 μ A, de no ser así, desactivar cada una de las selecciones anteriores, pero en sentido contrario, y reintentar la operación.

Automático:

- * Seleccionar *AUTO START UP* (todos los pasos del modo manual se ejecutan automáticamente).

Paso 11: En el modo ejecutable (*EXC*): Teclar el comando *G05* y presionar la tecla *CYCLE START*. Con lo anterior se realiza la calibración de potencia del haz (esperar aprox. 1 minuto).

Paso 12: En el modo automático (*AUTOM*): seleccionar *DRY RUN* (corrida en vacío) y luego presionar la tecla *CYCLE START*. Con lo anterior se verifica que la posición donde queremos que se realice la pieza coincida con la posición del *offset* (*G54*, *G55*, etc.) establecido en el programa de dicha pieza. De no ser así, presionar la tecla *RESET*, pasar al modo editor (*EDIT*), presionar las teclas *SHIFT/PSO* (*Position Shift Offset*) y ajustar la posición del *offset* de acuerdo a la posición requerida por la pieza.

Paso 13: Una vez que coinciden las posiciones, regresar al modo automático y desactivar la corrida en vacío (volver a presionar *DRY RUN*), girar la llave del shutter y presionar *CYCLE START*. En este momento la máquina realiza el corte según las instrucciones de nuestro programa.

*Nota: la llave del shutter es un seguro para el operador que, en caso de activación del haz por accidente, evita la salida del mismo. Por ello es importante abrir y cerrar al shutter de manera consciente de su efecto.

SECUENCIA DE APAGADO

Paso 1: En el modo manual seleccionar *LASER POWER UP* y presionar *HV ON* (se desactiva), presionar *LASER GAS ON* (se desactiva), y luego seleccionar *VACUUM ON* (se desactiva).

Paso 2: Presionar la tecla *LASER SOURCE OFF*, después la tecla *AUX OFF*.

Paso 3: Quitar las llaves del obturador y de la fuente del láser y apagar el interruptor principal de la máquina.

Paso 4: Cerrar las llaves de los tanques de gas, suministro de agua y aire comprimido.

PROGRAMA 100

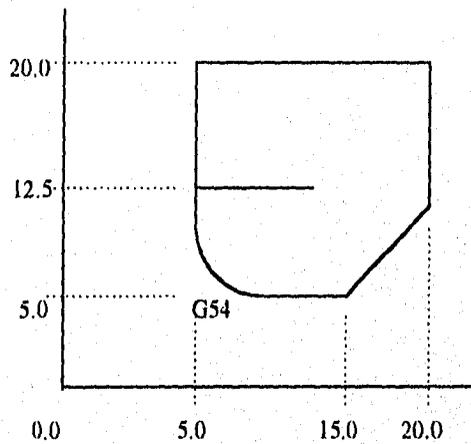
```

N00 G54 G71 G94 S140 F700
N10 M98 D0=140 D1=60
N20 T0101
N30 G25 L9001 (pieza 1)
N40 G92 X 25.0 Y0.0
N50 G59
N60 G25 L9001 (pieza 2)
N70 G56
N80 G92 U 25.0
N90 G59
N100 G25 L9001 (pieza 3)
N110 G56
N120 G92 U 25.0
N130 G59
N140 G25 L9001 (pieza 4)
N150 G56
N160 G92 U 25.0
N170 G59
N180 G25 L9001 (pieza 5)
N190 G56
N200 G92 U 25.0
N210 G59
N220 G25 L9001 (pieza 6)
N230 G56
N240 G92 U 25.0
N250 G59
N260 G25 L9001 (pieza 7)
N270 G56
N280 G00 X 100.0 Y100.0
N290 G53
N300 M30
    
```



PROGRAMA SUBROUTINA 90

```
N00 G00 X12.5 Y12.5
N10 M08 G04 D4=1
N20 M03 M24
N30 G01 X5.0 Y12.5 D0=20
D1=1 D2=255 D3=500 D4=120 D5=140
N40 X5.0 Y8.0
N50 G03 X8.0 Y5.0 I3.0 J0.0
N60 G01 X15.0 Y5.0
N70 X20.0 Y10.0
N80 X20.0 Y20.0
N90 X5.0 Y20.0
N100 X5.0 Y12.5
N110 M23 M05 M09
N120 M17
```



BIBLIOGRAFIA

- [1] "*Industrial application of lasers*"; Ready, John F. 1ª Edition; Academy Press; New York, U.S.A., 1978.
- [2] "*Lasers : operación, equipo, uso y diseño*"; Coherent, Inc.; 1ª edición, editorial Limusa; México, 1985.
- [3] "*Advanced manufacturing technology*"; Götsch, David L. ; SME , Delmar Publishers Inc., United States of America, 1990.
- [4] "*Aplicaciones Industriales del láser*"; Bachs, L.; 1ª Edición, Marcombo, Boixareu editores; Barcelona, España, 1988.
- [5] "*Processes and materials of manufacture*" ; Lindberg, Roy A. 4ª Edition, Allyn & Bacon; U.S.A., 1990.
- [6] "*Metals Handbook: Metallography and Microstructures*"; ASM, 9ª edition; vol. 9; United States of America, 1989.
- [7] "*User's manual EMCO LS 140, part I: Operation of the laser system; part II: Operating and programming of control*"; Ed. 91-4.
- [8] "*Corrosion engineering*"; Fontana, Mars; Greene, Norbert. 2ª edition, McGraw Hill; United States of America, 1978.
- [9] "*Aceros especiales y otras aleaciones*"; Apraiz, B. José. 5ª edición, Editorial Dossat; México, 1982.
- [10] "*Aceros inoxidables y aceros resistentes al calor*"; Incharza, Zabala Adrian. 1ª Edición, editorial Limusa; México, 1981.
- [11] "*Aceros inoxidables y aceros refractarios*"; R. Colombier, J. Hochman. Editorial URMO; España, 1968.
- [12] "*La ciencia e ingeniería de los materiales*" ; Askeland, Donald R. 1ª edición, Grupo editorial Iberoamérica; México, 1987.

ARTICULOS Y PUBLICACIONES

- [13] "*More laser power for production*"; Production, vol. 106, No.4, april 1994, pp 58-60.
- [14] "*Today's laser cutting: fast and clean*" ; Donald J. Hoffman, Leonard R. Migliore. Modern machine shop; april 1989, pp 88-95.
- [15] "*Laser cutting into the 90's*"; Donald J. Hoffman. Machine and tool BLUE BOOK; july 1988, pp 54-56.
- [16] "*Laser cutting issues*"; Eugene E. Sprau. Tooling and production; july 1989, pp 76-82.

- [17] "*Precision cutting and drilling with Nd:YAG laser*"; Lingenfelter, Anglin, Westrich, et.al.; Lasers in motion for industrial applications ; SPIE, vol. 744, 1987, pp55-63.
- [18] "*Capability testing of laser cutting machines*"; Bard M. Bronstad; Welding in the world/Le soudage dans le monde. Vol. 31, No. 3. Great Britain 1993. pp 172-175.
- [19] "*State of art in laser cutting with CO₂ lasers*"; E. Beyer, D. Petring ; ICALEO 1990, Germany. pp 199-212.
- [20] "*The oxidation dynamics of laser cutting of mild steel and the generation of striations on the cutting edge*"; Ivarson, Powell, et. al. Journal of materials processing technology; vol. 40, 1994, pp 359-374.
- [21] "*Investigation of acoustic sensing for laser machining process. Part 2: laser grooving and cutting*"; P. Sheng, G. Chryssolouris. Journal of materials processing technology; vol. 43, 1994, pp 145-163.
- [22] "*Three dimensional modelling of processes in the fast axial flow-CO₂ laser*"; Sashing, S. and Will, P.; Journal of physics, D: applied physics; vol. 26, pp 431-420
- [23] "*Off-axial gas jet assisted, laser cutting of 6.35 mm thick stainless steel*" ; M.J. Hsu, P.A. Molian. (Transaction of the ASME) Journal of engineering for industry; vol. 117, may 1995, pp 272-276.
- [24] "*Momentum and heat transfer of an inert gas jet to the melt in laser cutting*"; Vicanek, M. and Simon, G. Journal of physics D: applied physics; vol. 20, 1987, pp 1191-1196.
- [25] "*Analysis of laser evaporative and fusion cutting*"; P.S. Sheng, L. Cai. (Transaction of the ASME) Journal of engineering for industry 1996.
- [26] "*Using fiber-optic beam delivery with CW Nd:YAG laser systems*"; Lorne Weeter. The fabricator, march 1994, vol. 24, No. 2, pp 88-91.
- [27] "*Dynamic behavior in laser gas cutting of mild steel*"; Trans. J.W.R.I., vol. 8, no. 2, pp 15-26.
- [28] "*Analysis of heat affected zone formation for laser cutting of stainless steel*" ; P.S. Sheng, Vinay S. Joshi. Journal of materials processing technology, vol. 53, 1995, pp 879-892.
- [29] "*A three dimensional analysis of gas entrapment operating during the laser cutting process*"; O'Neil, W. and Steen, W.; Journal of physics D: applied physics; vol. 26, 1995; pp 12-17.
- [30] "*Machinig of advanced engineering materials using traditional and laser techniques*" ; K. Fenoughty, A. Jawaid and I. Pashby. Journal of materials processing technology; vol. 42, 1994, pp 391-400.