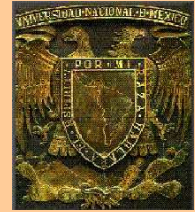
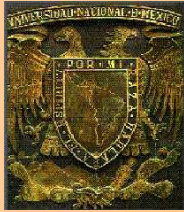


FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

(UNAM)

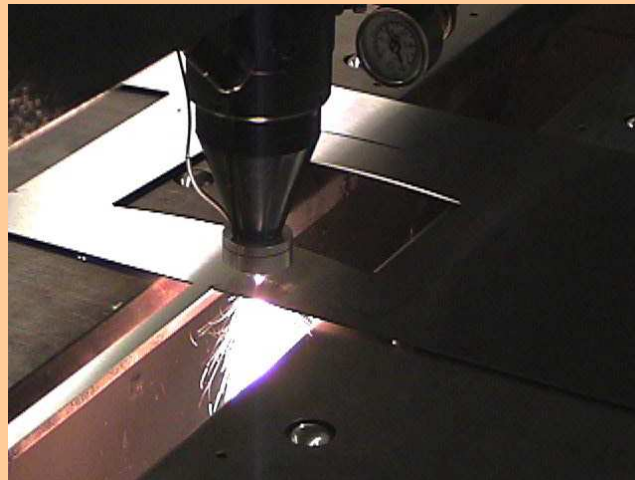
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA



LABORATORIO DE TECNOLOGÍA DE MATERIALES

LECTURAS DE INGENIERÍA 19

***PROCESOS DE MAQUINADO SIN ARRANQUE DE
VIRUTA***



M. en I. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez.

CUAUTITLÁN IZCALLI 2011

INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la Ciencia y Tecnología actuales implican la generación y aplicación del conocimiento en muchas áreas y consecuentemente el estudiante de Ingeniería debe estar al tanto de los mismos, sin embargo, debido a la actualización poco frecuente de los programas y planes de estudio y por las limitaciones propias de semestres de apenas cuatro meses de actividades académicas, es difícil la actualización del estudiante en dichos conocimientos, además, dejar trabajos de investigación no funciona de la manera deseada, ya que en muchas ocasiones se descargan de Internet y se imprimen sin leerlos siquiera, de ese modo, surge la idea de crear una serie de apuntes de temas básicos para el ingeniero actual como son: el endurecimiento superficial del acero, las fundiciones de hierro, la tribología y el desgaste, la superplasticidad, los avances en la industria siderúrgica, superaleaciones, etc.

En este trabajo se muestra un panorama general de los procesos de corte sin arranque de virutas. Estos métodos resultan muy eficientes, ya que el material no sufre calentamiento por fricción y además, en muchos casos la superficie no necesita operaciones de acabado.

ATTE.

Mtro. Felipe Díaz del Castillo Rodríguez

CAPITULO 1

MAQUINADO LÁSER

La palabra láser corresponde a las iniciales de "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation" (luz amplificada por la estimulación de emisiones de radiación). Un láser es un generador de luz y un amplificador que genera una sola longitud de onda o color de luz. El corte con láser utiliza un haz de luz infrarroja, o calor, enfocado a un punto pequeño para vaporizar o fundir un agujero a través de una pieza de trabajo. Debido a que la luz láser es una sola longitud de onda, no se desvía o ampliar, y rápidamente se puede enfocar a un punto mucho más pequeño que la luz blanca ordinaria.

El nombre y el color del láser dependen del tipo de material especial que se utilice:

- Gas argón emite un rango de luz azul-verde
- Gas criptón emite un rango de luz roja o amarilla
- YAG (itrio aluminio granate) emite un rango de luz infrarroja invisible
- Diodo emite un rango de luz infrarroja no visible
- Excímer: emite en el rango ultravioleta

1.1. HISTORIA

En 1916, Albert Einstein estableció los fundamentos para el desarrollo de los láseres y de sus predecesores, los máseres (que emiten microondas), utilizando la ley de radiación de Max Planck basada en los conceptos de emisión espontánea e inducida de radiación.

En 1928 Rudolf Landenburg reportó haber obtenido la primera evidencia del fenómeno de emisión estimulada de radiación, aunque no pasó de ser una curiosidad de laboratorio, por lo que la teoría fue olvidada hasta después de la Segunda Guerra Mundial, cuando fue demostrada definitivamente por Willis Eugene Lamb y R. C. Rutherford.

En 1953, Charles H. Townes y los estudiantes de postgrado James P. Gordon y Herbert J. Zeiger construyeron el primer máser: un dispositivo que funcionaba con los mismos principios físicos que el láser pero que produce un haz coherente de microondas. El máser de Townes era incapaz de funcionar en continuo. Nikolái Básiov y Aleksandr Prójorov de la Unión Soviética trabajaron

independientemente en el oscilador cuántico y resolvieron el problema de obtener un máser de salida de luz continua, utilizando sistemas con más de dos niveles de energía. Townes, Bášov y Prórorov compartieron el Premio Nobel de Física en 1964 por "los trabajos fundamentales en el campo de la electrónica cuántica", los cuales condujeron a la construcción de osciladores y amplificadores basados en los principios del máser-láser.

Townes y Arthur Leonard Schawlow son considerados los inventores del láser, el cual patentaron en 1960. Dos años después, Robert Hall inventa el láser semiconductor. En 1969 se encuentra la primera aplicación industrial del láser al ser utilizado en las soldaduras de los elementos de chapa en la fabricación de vehículos y, al año siguiente Gordon Gould patenta otras muchas aplicaciones prácticas para el láser.

El 16 de mayo de 1980, un grupo de físicos de la Universidad de Hull liderados por Geoffrey Pret registran la primera emisión láser en el rango de los rayos X. Pocos meses después se comienza a comercializar el disco compacto, donde un haz láser de baja potencia "lee" los datos codificados en forma de pequeños orificios (puntos y rayas) sobre un disco óptico con una cara reflectante. Posteriormente esa secuencia de datos digital se transforma en una señal analógica permitiendo la escucha de los archivos musicales. En 1984, la tecnología desarrollada comienza a usarse en el campo del almacenamiento masivo de datos. En 1994 en el Reino Unido, se utiliza por primera vez la tecnología láser en cinemómetros para detectar conductores con exceso de velocidad. Posteriormente se extiende su uso por todo el mundo.

Ya en el siglo XXI, científicos de la Universidad de St. Andrews crean un láser que puede manipular objetos muy pequeños. Al mismo tiempo, científicos japoneses crean objetos del tamaño de un glóbulo rojo utilizando el láser. En 2002, científicos australianos "teletransportan" con éxito un haz de luz láser de un lugar a otro. Dos años después el escáner láser permite al Museo Británico efectuar exhibiciones virtuales. En 2006, científicos de la compañía Intel descubren la forma de trabajar con un chip láser hecho con silicio abriendo las puertas para el desarrollo de redes de comunicaciones mucho más rápidas y eficientes.⁴

1.2. EL FUNDAMENTO DEL LÁSER: LA EMISIÓN ESTIMULADA

El átomo está integrado por un núcleo, formado por un conjunto de protones y neutrones, y por una serie de electrones emplazados a determinada distancia, alrededor del núcleo. Electrones,

protones y neutrones son las tres partículas básicas. Los electrones poseen una masa muy pequeña y carga negativa. Por su parte, protones y neutrones tienen aproximadamente la misma masa, pero mientras los primeros poseen carga eléctrica positiva, los neutrones carecen de carga. Los electrones del átomo, cuya energía depende de su distancia al núcleo, pueden encontrarse en estado excitado —con una energía superior a la normal— o en reposo. En el estado excitado, el electrón almacena una determinada proporción de energía.

En virtud del llamado proceso de absorción, cuando un fotón —recordemos que las ondas de luz también se denominan fotones— choca con un electrón no excitado, puede hacer que pase al estado de excitado. Habitualmente, un electrón que resulta excitado, al cabo de un tiempo pasa nuevamente al estado de reposo, emitiendo al pasar un fotón. Este fenómeno, conocido como emisión espontánea, es el que tiene lugar, por ejemplo, en el Sol o en las bombillas. Ahora bien, un electrón puede ser inducido a liberar su energía almacenada. Si un fotón pasa al lado de un electrón excitado, éste retorna al estado no excitado a través de la emisión de un fotón de luz igual al que pasó junto a él inicialmente. Este proceso se conoce como emisión estimulada y constituye el fundamento del láser.

1.3. LA LUZ NORMAL Y EL RAYO LÁSER

Las tres características que diferencian el rayo láser de la luz del Sol o de la generada por una bombilla, es que aquél es un haz de luz monodireccional, monocromático y coherente.

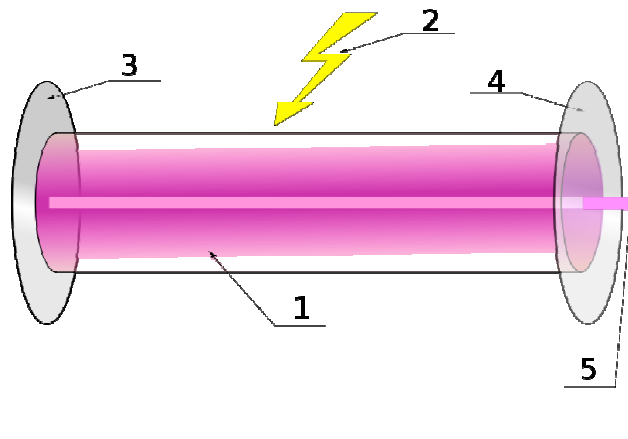
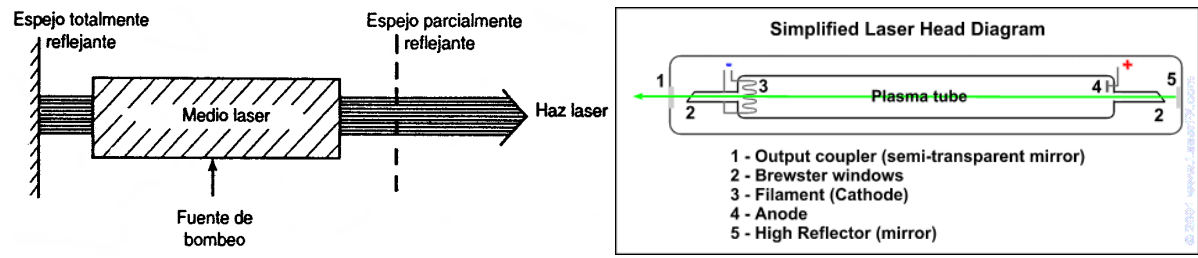
Los emisores de luz despiden millones de ondas, que pueden tener idéntica dirección o poseer direcciones distintas. La bombilla es un emisor de luz omnidireccional, frente al láser, que es monodireccional. En cuanto a la característica del monocromatismo, el color de una luz está en función de su frecuencia; si todas las ondas poseen la misma frecuencia, poseen también el mismo color. Los filamentos de las bombillas están formados por átomos y moléculas diferentes y, por tanto, la energía absorbida y desprendida en forma de fotones adopta valores diversos. Puesto que la frecuencia del fotón está en relación con su energía, al variar la energía varía la frecuencia emitida. La luz de una bombilla tiene múltiples frecuencias, dependiendo del filamento que se haya empleado en su construcción. Por el contrario, en un láser, la fuente de luz proviene de un gas o de un sólido muy purificado. En ambos casos, los átomos tienen

idénticos niveles energéticos. Como resultado, los fotones generados poseen idéntica energía y frecuencia.

Las ondas electromagnéticas son señales alternas, es decir, cambian constante-mente de valor. Esta variación tiene forma de curva. La parte de la curva en que se encuentra la onda en un momento concreto y en una posición dada se llama fase. Dos ondas de idéntica dirección y frecuencia se encuentran cada una, normalmente, en una fase distinta. En el caso de que una de ellas se situara en un máximo y otra en un mínimo, se anularían. Sin embargo, puede suceder que ambas señales posean la misma fase y, consecuentemente, los mismos valores, lo que tendría como resultado una onda de doble de tamaño. Dado que en la luz normal las ondas no están en fase, una proporción elevada de su energía se pierde, puesto que unas señales se anulan con otras. Por el contrario, en el láser, todas las ondas poseen la misma fase y la energía resultante es la máxima posible, puesto que no se anula ninguna onda. Éste es el sentido del término coherente.

1.4. AMPLIFICADORES ÓPTICOS: LÁSER

Los requisitos básicos en cualquier láser son idénticos. En primer lugar, se necesita un medio que presente la estructura de nivel de energía deseada para permitir el efecto láser. El medio puede ser un gas, un cristal sólido aislante, un líquido ó un cristal semiconductor, por consiguiente, se tienen láser de estado sólido, láser gaseoso, láser coloreado y láser semiconductor, por mencionar algunos de los tipos de láser más conocidos. En segundo lugar, para establecer una inversión de poblaciones, es necesario bombear energía al sistema. El método de bombeo utilizado, también depende del medio activo. En el láser gaseoso, la excitación se suministra generalmente haciendo pasar una descarga eléctrica a través del gas; el láser de estado sólido suelen bombearse inundando el cristal con radiación intensa de un tubo de destellos; Los láser coloreados se bombean mediante una lámpara estroboscópica ó a partir de otro láser; los láser semiconductores se bombean al dispositivo por medio de una inyección de corriente. Por último, se necesita un mecanismo mediante el cuál sea posible introducir realimentación óptica y así mantener la ganancia del sistema por encima de todas las pérdidas. Como se vio antes, esto se logra al limitar el medio entre dos reflectores para formar una cavidad resonante óptica. En la figura.1.1. se muestra el sistema láser completo.



Componentes principales:

1. Medio activo para la formación del láser
2. Energía bombeada para el láser
3. Espejo reflectante al 100%
4. Espejo reflectante al 99%
5. Emisión del rayo láser

Figura 1.1.- Componente de un rayo láser completo

Aunque actualmente existen a disposición varios cientos de láser diferentes, en ingeniería sólo son de uso común unos cuantos tipos. En la tabla 1.1. se enumeran las características de los principales tipos de láser.

Tabla 1.1. Clasificación de los láser

Medio	Principales longitudes de onda	Salida	Modo	Eficiencia típica %	Diámetro del haz típico (mm)
LÁSER GASEOSO					
HeNe	633 nm	0.1 – 50 mW	Continuo	0.1	1
Argón	488 ó 514nm	5mW - 20W	Continuo	0.1	1
CO ₂	10.6µm	20W – 15kW	Continuo	10	25
LÁSER DE ESTADO SÓLIDO					
Rubi	694nm	30mJ – 100J	Pulsos	0.5	5 - 10
*Nd - YAG	1.064µm	10mJ – 150J	Pulsos	1 - 2	1 – 10
LÁSER SEMICONDUCTOR					
GaAlAs	750 – 905nm	1 – 40mJ	Continuo	Hasta 20	
GaAsP	1.1 - 1.6µm	1 – 10mW	Continuo	Hasta 20	
LÁSER EXIMER					
Ar – Fluoruro	193nm	50W	Pulsos	Hasta 1	2x4 – 25x30
Kr-Fluoruro	248nm	100W	Pulsos	Hasta 2	2x4 – 25x30
LÁSER COLOREADO					
Bombeado con láser de iones	400–1000nm ajustable	Hasta 2W	Continuo	5 - 25	0.6 – 1
Bombeado con láser de pulsos	300–1000nm ajustable	Hasta 15W	Pulsos	Depende de la luz de bombeo	2 - 10

* (neodymium – doped yttrium –aluminium – garnet)

Los más comunes son el láser con CO₂ y el láser con cristal en estado sólido Nd;YAG (neodymium – doped yttrium –aluminium – garnet); de los dos el láser con CO₂ es el más poderoso con una potencia de salida de 50 Kw. Ambos tipos de láser pueden diseñarse para proveer una salida constante, un láser con luz de onda continua (OC) o en un modo pulsado de salida, en este último caso el poder de salida en los picos del pulso puede ser hasta 20 veces la potencia promedio.

La longitud de onda de la luz proveniente del láser con CO₂ es de 10.6 micrones (micrómetros) y esta longitud de onda es fácilmente absorbida por la mayoría de los sólidos permitiendo al láser con CO₂ usarse en una amplia variedad de materiales; esta gran longitud de onda tiene una desventaja la cual no puede ser transferida por cristal o fibra óptica sino que

requiere de espejos reflectantes de metal para manipular el rayo y materiales tales como seleniuro de zinc o arseniuro de galio para enfocar el lente.

La luz del láser con Nd;YAG dispone de magnitudes menores de 1.06 micrones permitiendo el uso de lentes de cristal para enfocar y cables de fibra óptica para transmitir el rayo, esto da una clara ventaja sobre el láser con CO₂ puesto que permite la unión de equipos de manipulación comercialmente disponibles tales como el soporte de control numérico (CN) o robots con láser; el poder de salida actualmente disponible para el láser con Nd;YAG está limitado alrededor de 6 kW , sin embargo se debe restringir los espesores que se deban cortar. Con el láser de ondas continuas hay más derretimiento que vaporización y un gas asistente se usa para soplar el vapor y el metal derretido, creando un corte limpio y angosto, claramente delineado por el rayo a lo largo del material. El láser con pulsos generalmente provee bastante energía, de tal manera que imparte suficiente fuerza para que el mismo

1.5. APLICACIONES DEL LÁSER

En la actualidad, las aplicaciones del láser son múltiples. Dado que un haz de rayos láser origina una línea recta de luz, es posible utilizarla como guía en el tendido de tuberías, para definir techos o paredes completamente planos en los trabajos de construcción o para medir distancias —calculando el tiempo que tarda la luz en ir y volver al objetivo a medir—. Por otra parte, el rayo láser proporciona gran definición, lo que permite utilizarlo en las impresoras de los ordenadores. La grabación de imágenes en tres dimensiones se basa, asimismo, en el empleo de dos rayos láser, uno de los cuales da directamente en la película, mientras el segundo rebota en el objeto que se desea fotografiar. Como es sabido, el volumen de información que transmite una onda electromagnética depende de su frecuencia; en este sentido, la luz de un rayo láser resulta idónea para la transmisión de señales. En el ámbito de la medicina, los bisturís cauterizantes recurren también a la tecnología del láser, lo que permite realizar cortes muy finos de gran precisión y evita cualquier riesgo de contagio; asimismo, el láser cauteriza de manera inmediata, alejando el peligro de hemorragias. Una de las aplicaciones más cotidianas del láser es la lectura de discos compactos. Pueden mencionarse también la fabricación de circuitos integrados, la lectura de códigos de barras o el trabajó con materiales industriales.

1.6. MECANIZADO LÁSER

La tecnología del mecanizado láser se basa en la generación de un rayo láser de alta potencia que es dirigido contra la pieza mediante un sistema de espejos de alta precisión, figura 1.2. En la zona de incidencia del rayo consiguiendo una elevada densidad de potencia que produce la volatización del material.

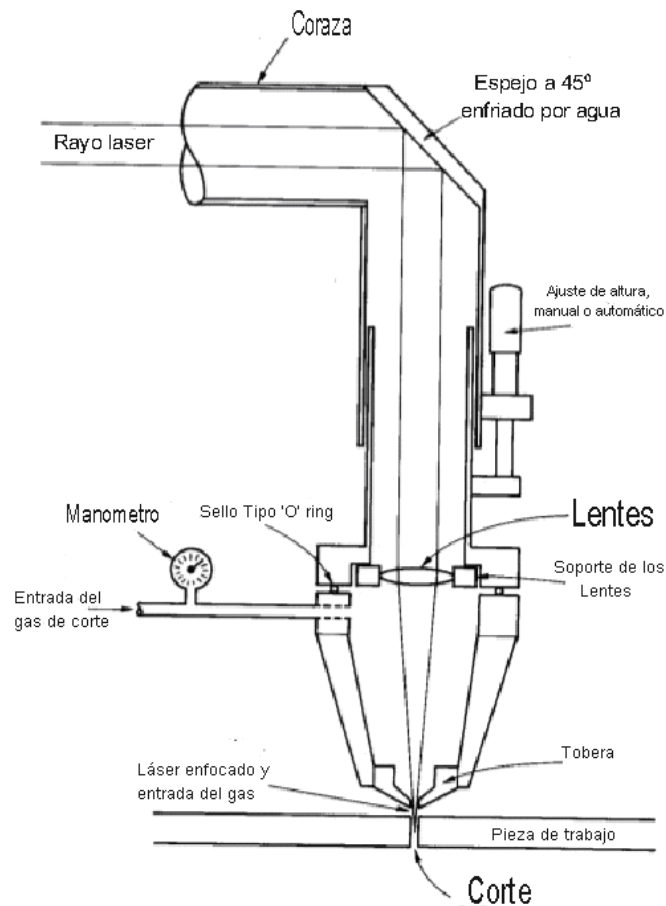


Figura 1.2. Corte con rayo láser

El rayo láser erosiona el material en múltiples capas obteniendo de este modo la geometría y profundidad deseada, figura 1.3.

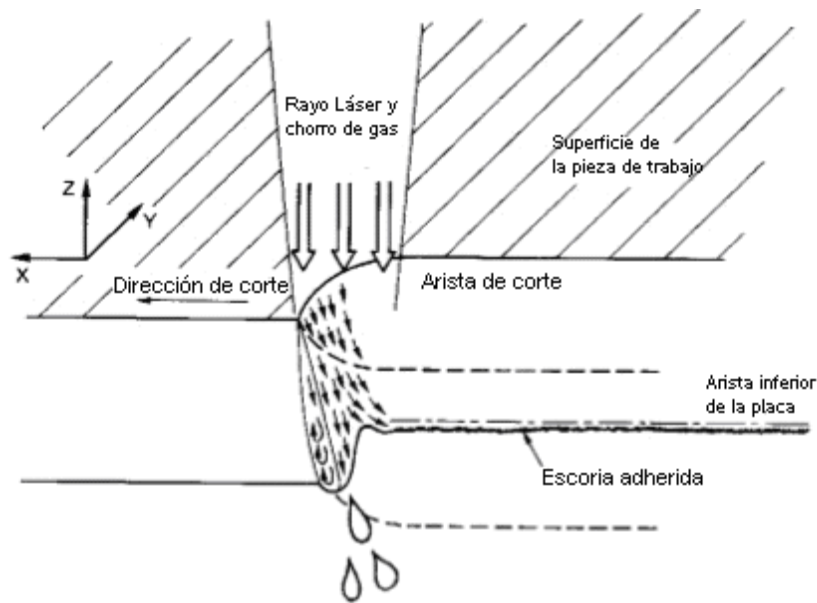


Figura 1.3. Melt shearing or fusion cutting

Mediante esta tecnología se pueden realizar micro mecanizados imposibles de conseguir por otras tecnologías, gracias a la reducida dimensión del rayo láser ($30\mu\text{m}$). Además, permite trabajar sobre cualquier tipo de material metálico y cerámico, sin tener que asumir los costes de utillaje y desgaste de herramientas o de fabricación de electrodos y, en un tiempo reducido.

El mecanizado láser permite la creación de cavidades para aplicaciones tan diversas como moldes técnicos de precisión, técnica médica, electrónica y moldes de semiconductores, micro tecnología, construcción de prototipos.

La tecnología del mecanizado por láser posibilita el mecanizado de figuras y piezas pequeñas dimensiones, permitiendo obtener esquinas vivas y agujeros de pequeño diámetro, es decir, formas geométricas que no es posible o es muy costoso obtener mediante procesos convencionales. El mecanizado por láser permite el procesado de casi todo tipo de materiales, independientemente de su dureza o maquinabilidad. Los resultados obtenidos varían de un material a otro debido a sus propiedades físicas, pero en principio no se encuentra el obstáculo de la dureza. Se pueden obtener piezas a partir de fotografías, es decir, partiendo de una imagen se consigue un proceso parecido al grabado de una foto, figura 1.4.



Figura 1.4. Aplicación del rayo láser

La tecnología láser tiene un ámbito de aplicación dirigido fundamentalmente al mecanizado de formas complejas de pequeño tamaño, como pueden ser los moldes de inyección de plástico que se aprecian en la figura 1.5. Con todo ello, hay que concluir remarcando que el mecanizado mixto fresado láser aparece como una clara solución para el procesado óptimo de piezas precisas de pequeño tamaño, como son los moldes de inyección.



Figura 1.5. Fabricación de moldes pequeños para la inyección de plásticos.

1.7. CORTE

Al cortar, la calidad del haz es particularmente importante. Por este motivo, se trabaja con un rayo altamente focalizado, que se caracteriza por la llamada distribución normal (campana de

Gauss). Actualmente, esta distribución óptima de la energía se consigue hasta potencias de en torno a los 2kW. Los láseres de corte de más de 3kW implican ya una distribución más alta. Se emplea principalmente para acero no aleado en chapas dentro de un rango de espesores de hasta 15mm, acero de alta aleación de hasta 10mm y aluminio de hasta 8mm. La anchura de las hendiduras de corte oscila entre 0.2 y 0.5mm.

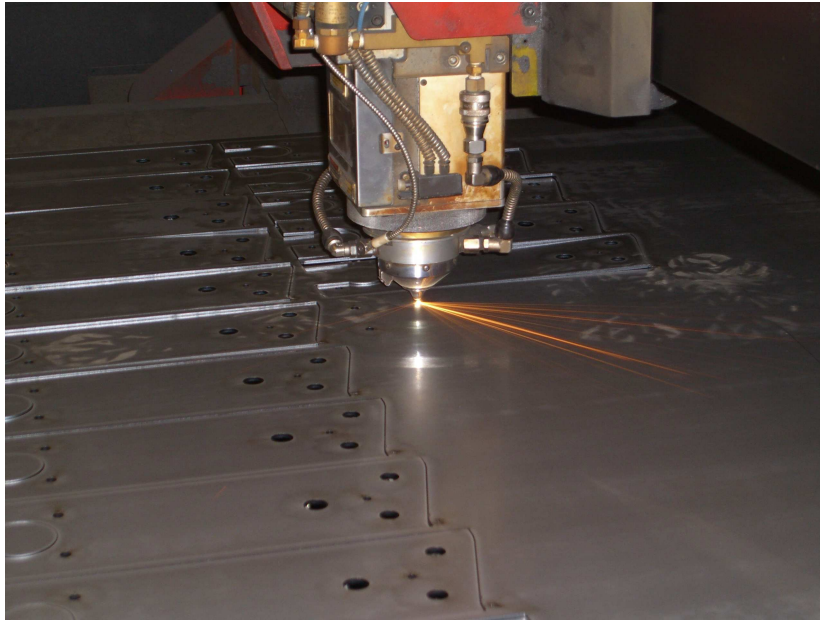
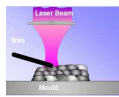


Figura 1.6. Corte con rayo láser

Para obtener un buen resultado de corte sin retocar la pieza cortada, resultan decisivas tanto la correcta focalización como la posición del foco. Al cortar acero no aleado mediante oxicorte por láser, el foco se sitúa en el tercio superior del espesor de la chapa. Para aceros altamente aleados, sin embargo —aquí se trata de un proceso de corte por fusión—, se enfoca por debajo del borde inferior de la chapa. También el aluminio se corta por fusión a alta presión, enfocando generalmente en el tercio inferior del espesor de la chapa.

1.8. SOLDADURA



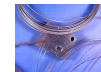
En primer lugar se plantea la pregunta: **¿Nd:YAG o láser de gas de CO₂?** El láser de CO₂ es el que domina, pues con él se obtienen las potencias más altas. Con un láser de CO₂ de 6kW, en

una chapa de 5mm, se alcanzan velocidades de corte superiores a los 2m/min. La ventaja del láser Nd:YAG es que el rayo se puede dirigir con flexibilidad mediante fibra óptica, lo cual supone una ventaja para la automatización. El rayo láser de CO₂ se conduce mediante un espejo de desviación.



Figura 1.7. STARWELD Tool, es un láser de soldadura de Nd:YAG (estado sólido) pulsado en una cabina Clase I. El sistema incorpora una mesa motorizada en los ejes X-Y-Z y un microscopio estereoscópico.

1.8.1. Tolerancia de componentes/alambre de aportación



Muchos tipos de soldadura se llevan a cabo sin alambre de aportación, en cuyo caso las dimensiones de la hendidura se pueden delimitar en torno a 0.1mm. Empleando alambre de aportación es posible soportar tolerancias más altas. De esta manera, se dispone de un abanico de procesos más amplio. Para el aluminio también se utiliza alambre de aportación, por motivos metalúrgicos. Los sistemas de dirección del alambre son exactamente iguales a los empleados para la soldadura TIG con alambre frío.

La colimación de energía también es importante en la soldadura. Sin embargo, no hay que enfocar con tanta intensidad como en el corte.

Normalmente, es posible acogerse a una distribución más alta. Las principales aplicaciones de soldadura son las de potencia entre 3 y 6kW para el láser de CO₂. No obstante, también se utilizan sistemas de 10kW y más. La potencia típica de los láseres Nd:YAG es de 3kW.

1.9. ¿FLUJO DE GAS CENTRAL O DESCENTRADO?

El láser de CO₂ genera una nube de plasma por encima del borde superior de la chapa. Por un lado, ésta es necesaria para el llamado acoplamiento, pero no debe estar muy desarrollada. Con el flujo de gas, ya sea central (coaxial al rayo láser) o descentrado (no axial, a través de una boquilla externa para gas), se gana influencia sobre ella. En la mayoría de los casos, el gas protector se inyecta de forma descentrada. Los flujos central y descentrado pueden combinarse. Hecho a medida o confeccionado en serie, ésta es la cuestión en la técnica láser. Para los gases de corte se emplean estándares amplios. Por el contrario, para la soldadura a menudo merece la pena utilizar mezclas gaseosas especiales.

1.9.1. Gas de resonador para láser de CO₂

El resonador del láser de CO₂ contiene CO₂ como gas de láser propiamente dicho, así como nitrógeno y helio. En función del tipo de instalación, se realiza la mezcla in situ o se trabaja con gases previamente mezclados. Para garantizar la pureza del gas necesaria, el sistema de suministro debe estar adaptado. Esto afecta tanto al reductor de presión como a los conductos de suministro, tabla 1.2

Tabla 1.2. Gases de resonador de CO₂

Tipo de gas	Pureza
Helio	4.6
Dióxido de carbono	4.5
Nitrógeno	5.0

1.9.2. Gases de corte

Para el oxicorte por láser de acero no aleado se emplea oxígeno de gran pureza (3.5). El nitrógeno se utiliza en el corte por fusión de acero de alta aleación (tabla 1.3). En casos extraordinarios también se usa argón. En razón de los consumos de gas correspondientes, por

regla general es recomendable un suministro central basado en un frigorífico evaporador, es decir, un suministro líquido.

Tabla 1.3. Pureza de los gases de corte

Tipo de gas	Pureza
Argón	4.6
Oxígeno-Oxycut	3.5
Nitrógeno-Nitrocut	5.0

1.9.3. Gases protectores para soldadura

Por regla general, la soldadura láser se efectúa bajo un gas protector. El más universal es el helio. También el argón se emplea con frecuencia. Las recién llegadas son las mezclas gaseosas, con argón y helio como base y distintos aditamentos activos, en función del tipo de soldadura y del material. Raramente se utiliza nitrógeno.

1.9.4. Comparación de los gases protectores:

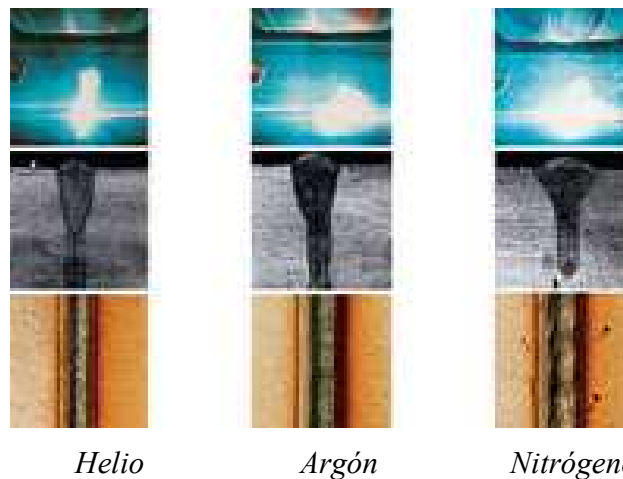


Figura 1.8.- Comparación de los gases protectores en la soldadura láser

1.10. VENTAJAS DEL CORTE POR LÁSER

- Gran versatilidad en la definición del contorno que se desea cortar. Podemos definir cualquier forma y complejidad en el corte final con una gran precisión en los detalles.
- Repetibilidad garantizada en las diferentes series de fabricación.
- La potencia del láser se puede regular automáticamente durante el mecanizado, de forma que el corte de ángulos y pequeños contornos sea de la máxima calidad.
- La precisión del corte y la ausencia de contacto mecánico con la pieza reducen significativamente la aparición de distorsiones e impurezas. Desaparecen las rebabas y se evitan trabajos posteriores de limpieza.
- Las paredes de corte son paralelas entre sí y perpendiculares a la pieza, no redondeadas, como sucede con otras técnicas de corte.
- Se aprovecha mejor el material gracias al mínimo grosor del surco producido por el láser.

CAPITULO 2

CORTE CON PLASMA

2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

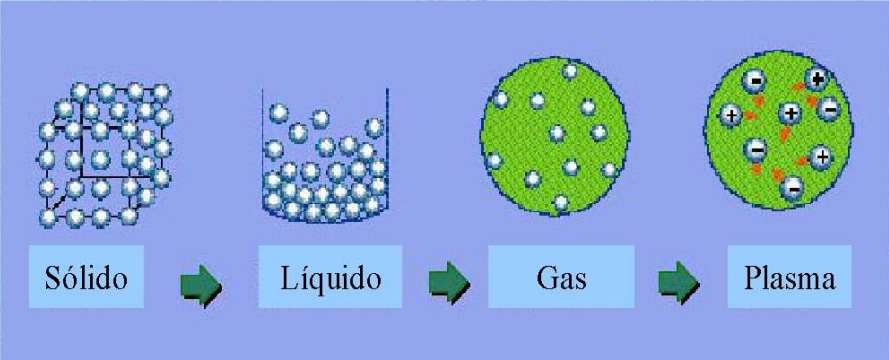
Los primeros trabajos de laboratorio con plasmas se debieron a Langmuir y Tonks en los años 20 del siglo pasado y fueron inspirados por la necesidad de desarrollar tubos de vacío que pudieran conducir corrientes elevadas. Ya en estos experimentos se descubrieron algunas de las propiedades más características de los plasmas. Así, por ejemplo, se observó que las partículas del plasma se distribuyen de manera tal que cualquier campo eléctrico que se genere en el plasma, ya sea por separación espontánea de sus cargas o por medios externos al sistema, tiende a ser blindado por éste. Este fenómeno recibe el nombre de blindaje de Debye por haber sido Petrus J. Debye (1884-1966) el primero en estudiarlo. Otra característica descubierta ya en aquella época tiene que ver con la existencia de una frecuencia natural de oscilación del plasma. Esta llamada frecuencia de plasma depende de la densidad del mismo, siendo mayor mientras mayor es la densidad.

La existencia de esta frecuencia característica tiene importantes consecuencias en la propagación de ondas electromagnéticas en un plasma. A diferencia del vacío o de un gas neutro, ondas electromagnéticas de frecuencia inferior a la frecuencia característica, no se propagan en un plasma. Este hecho explica, por ejemplo, la razón por la cual un vehículo espacial reingresa a la atmósfera y se interrumpen sus comunicaciones con la Tierra. En efecto, debido a la fricción del vehículo con la atmósfera, la temperatura aumenta, lo que produce la ionización de esta última en torno al vehículo, generándose así un plasma en el cual las ondas de radio son inferiores a la frecuencia característica de éste, con la consiguiente interrupción de las comunicaciones.

Mucho se ha especulado en las películas y en revistas sobre el plasma, pero ¿sabemos realmente que es? El plasma ha sido denominado por muchos como el cuarto estado de la materia, ya que todo elemento en estado plasma tiene características concretas y definidas, figura 2.1.

Cuarto estado de la materia

- A muy bajas temperaturas, la materia se encuentra en estado **sólido**.
- Al aumentar la temperatura, los sólidos se transforman en **líquidos**.
- A temperaturas mayores, los líquidos se evaporan y transforman en **gas**.
- Cuando un gas es calentado, los átomos que lo constituyen se ionizan, es decir, los electrones se separan de los núcleos y entonces se obtiene un gas de partículas cargadas, o **plasma**.



Sólido → Líquido → Gas → Plasma

Figura 2.1. ¿El cuarto estado de la materia?

El plasma se forma mediante la ionización de los átomos, que al romperse pierden su cubierta de electrones, los cuales se desplazan libremente. Esta materia, aparentemente artificial, existe de manera natural en la magnetosfera terrestre y en el sol, que incluso la lanza en violentas explosiones conocidas como viento solar, figura 2.2.

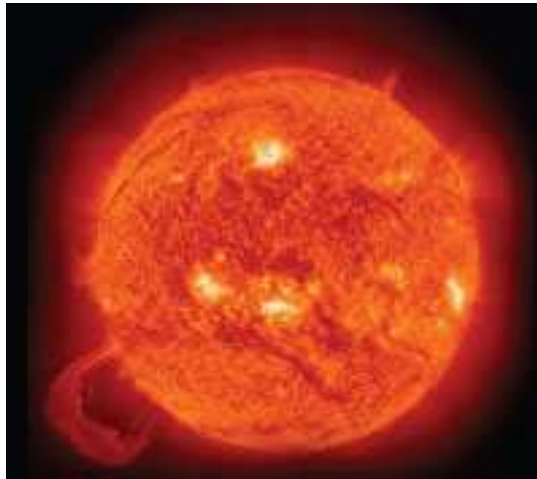


Figura 2.2. El viento solar

Este estado de la materia se produce bajo gran presión y temperatura, la cual puede ser aprovechada para generar energía, mediante los reactores de fusión, figura 2.3, pero la tecnología necesaria para confinar el plasma mediante campos magnéticos, y para alcanzar las temperaturas del estado plasma, no es 100% fiable, y esta aun en desarrollo.

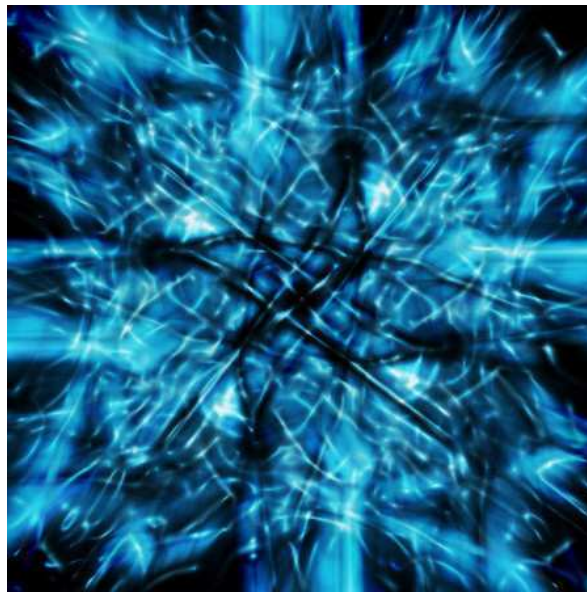


Figura 2.3. Generación de energía con plasma

Cuando se habla de los estados de agregación de la materia, casi todo el mundo piensa sólo en sólidos, líquidos y gases. Pero resulta que estos tres estados sólo constituyen el 1% del total de

la materia que, por el momento, sabemos que contiene el Universo. ¿Alguien habría dicho que en el Universo casi toda la materia es algo denominado plasma, que no es ni sólido, ni líquido, ni gas? ¿Pero qué es exactamente el plasma?

2.2 PARTÍCULAS EN DESORDEN.

El plasma está constituido por cationes (es decir, átomos con carga eléctrica positiva porque han perdido algunos de sus electrones), electrones y neutrones. Se trata, pues, de un puñado de partículas que se mueven sin orden aparente. Para confinar un plasma en un espacio determinado se aplican campos magnéticos. El plasma es el estado en el que se encuentra la materia que constituye los cuerpos más masivos del Universo: las estrellas. Sin ir más lejos, el Sol es, en sí mismo, un plasma gigantesco, lleno de átomos de hidrógeno y helio que han perdido total o parcialmente sus electrones como consecuencia de las elevadísimas temperaturas que se generan (de hasta 15 millones de grados Celsius). Para conseguir un plasma, sin embargo, no es necesario aplicar temperaturas tan elevadas. De hecho, con una vela y un cerillo tenemos suficiente. La corona anaranjada que a veces se observa en la llama de una vela es producto de la disociación e ionización de las moléculas del aire y constituye un plasma de baja densidad y temperatura.

2.3. PLASMAS COTIDIANOS

Los plasmas conducen la corriente eléctrica, característica que el hombre ha aprovechado para desarrollar aplicaciones relacionadas con la producción de energía eléctrica. Las lámparas o tubos fluorescentes contienen una pequeña cantidad de vapor de mercurio y un gas inerte (que no reacciona con nada) que acostumbra a ser argón. Al encender un fluorescente, el argón se ioniza (pierde electrones) formando así un plasma que excita a los átomos de mercurio. Como consecuencia de esta excitación, los átomos de mercurio emiten luz visible y ultravioleta.



Figura 2.4. Lámpara fluorescente

Dentro del tubo fluorescente existe un revestimiento que se encarga de filtrar la luz ultravioleta, de forma que sólo recibimos la radiación del visible. Las lámparas fluorescentes presentan una eficiencia energética considerablemente superior a la de una bombilla estándar. Los carteles de neón y el alumbrado urbano usan un principio similar.

No sería atrevido decir que si algo ha hecho famoso al plasma por todas partes, no son ni los tubos fluorescentes ni los carteles de neón, sino las denominadas televisiones de plasma que lucen en los escaparates de las tiendas de electrónica y en un buen puñado de hogares. En el interior de una televisión de plasma se encuentran gases inertes (xenón y neón) en forma de plasma que reaccionan con el fósforo de cada subpíxel de la pantalla para producir luz coloreada. Las televisiones de plasma presentan una resolución superior a las televisiones convencionales, si bien hay que recordar que la duración de una pantalla de plasma no es indefinida y oscilaría entre doce y diecisiete años.

Así, la materia intergaláctica, interiores estelares, el sol y otras estrellas son plasmas. Por esta razón, el plasma es considerado actualmente el cuarto estado de la materia, es decir, la materia en estado natural se encuentra en forma de sólidos, líquidos, gases y predominantemente plasmas. Incluso tan pronto nos alejamos de la atmósfera terrestre, nos encontramos con materia en estado de plasma que comprende la magnetosfera, los cinturones de radiación de Van Allen y el viento solar. En la Tierra misma nuestro contacto con los plasmas se limita a la luz proveniente de los rayos de una tormenta eléctrica, el resplandor de las auroras boreales, los tubos fluorescentes o avisos de neón. Pareciera en consecuencia que pertenecemos a aquel 1 % del universo donde los plasmas no ocurren en estado natural. La razón por la cual la atmósfera terrestre no se encuentra en estado de plasma se debe a que la temperatura es demasiado baja como para producir la ionización de los átomos que la componen. De no ser así, la vida, como nosotros la conocemos, no sería posible.

Existen una serie de mecanismos que protegen la atmósfera terrestre del viento solar, impidiendo la ionización de la misma, haciendo así posible la vida. Es interesante notar que por cada átomo ionizado existen en la atmósfera 10122 átomos neutros.

2.4. APLICACIONES

Regresando a la Tierra, y a escasos 60 años del inicio del estudio sistemático de los plasmas, éstos han aportado una gran variedad de aplicaciones tecnológicas ilustraremos a continuación algunas de éstas.

a) Conversores de energía y propulsión iónica.

Si se hace pasar un plasma con velocidad v entre las placas de un condensador y se aplica un campo magnético en una dirección perpendicular al movimiento del plasma, la fuerza de Lorentz $V \times B$ impulsa los electrones a una de las placas del condensador y a los iones a la otra. De esta manera pueden obtenerse grandes diferencias de potencial para luego extraer una corriente eléctrica del condensador sin la ineficiencia característica de un ciclo calórico. El principio invertido se ha utilizado para desarrollar motores iónicos en misiones espaciales. En este caso, se hace circular una corriente a través del plasma. La fuerza $J \times B$ expulsa el plasma fuera de la máquina y la fuerza de reacción acelera el vehículo.

b) Láser

El método más común para invertir la población de niveles que dan lugar a una amplificación de la amplitud luminosa (láser) consiste en utilizar descargas en gases. Así, el desarrollo de la potencia de un láser depende en gran medida del desarrollo de la física del plasma.

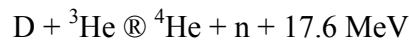
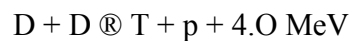
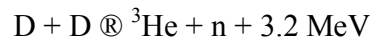
c) Fusión termonuclear controlada

A pesar del gran interés puramente científico de la física del plasma, la razón principal que ha impulsado el enorme desarrollo de este campo en los últimos 25 años, ha sido la necesidad de utilizar una fuente de energía de amplios recursos.

Como se ha señalado antes, la mayor parte de la energía solar proviene de reacciones nucleares de fusión. La fusión nuclear es un proceso en el cual dos núcleos livianos se funden para formar

un núcleo más pesado. En todas estas reacciones se libera una cantidad de energía, debido a que en los núcleos iniciales hay un exceso de masa con respecto a los productos finales. El exceso de masa, Dm , genera una cantidad de energía de acuerdo a la relación de Einstein, $E = Dm c^2$, donde c es la velocidad de la luz en el vacío.

Las reacciones nucleares de fusión más frecuentes en el Sol son:



El deuterio (D) es un núcleo compuesto por un protón (p) y un neutrón (n). El ${}^3\text{He}$ es un núcleo compuesto por 2p y 1n y el tritium (T) por 2n y 1p.

El deuterio se encuentra en abundancia en el agua de mar en forma de hidrógeno pesado, es decir, es un átomo como el de hidrógeno cuyos núcleos poseen además de un protón, un neutrón (de aquí el nombre de hidrógeno pesado). Constituye, por lo tanto, una fuente prácticamente inagotable de energía.

2.5. CORTE CON PLASMA

El corte por plasma es un proceso que utiliza un orificio de boquilla de alta precisión para estrangular un gas ionizado a alta temperatura con el propósito de que éste pueda usarse para fundir y cortar secciones de metales conductores de electricidad, figura 2.5.

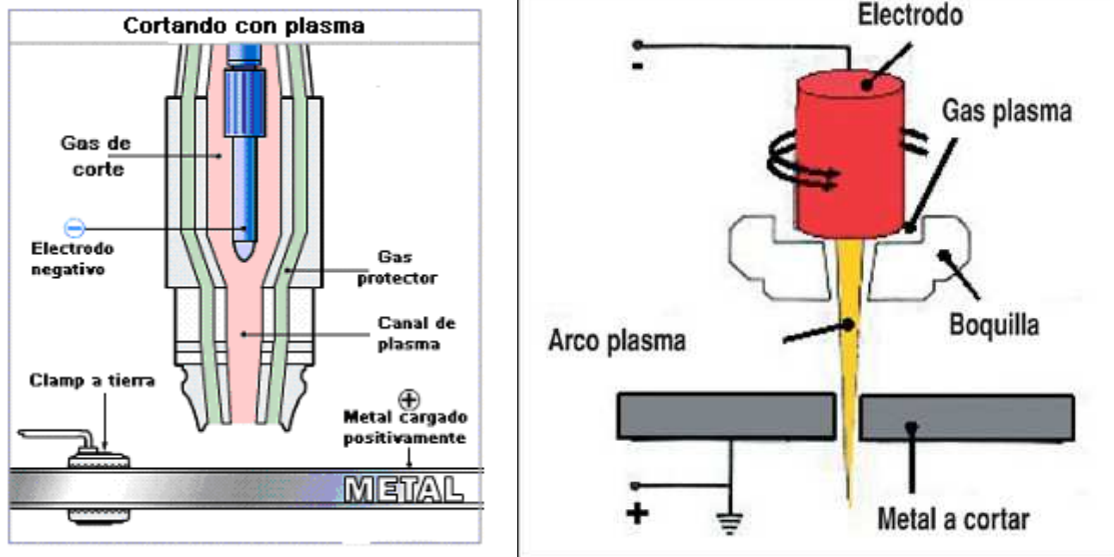


Figura 2.5. Corte con plasma

El gas contenido en la boquilla circula en la corriente con el fin de ionizarlo, se calienta y después se hace salir por una boquilla con un diámetro muy reducido, de tal manera que el gas ionizado se comporta como cualquier material conductor de la electricidad.

Si se reduce mucho la sección por donde pasa la corriente se estará aumentando la resistencia, provocando un calentamiento del gas alcanzando temperaturas muy elevadas y velocidades muy altas, más o menos la velocidad del sonido.

Este gas caliente es el que se aporta sobre la pieza y es el que consigue la fusión y la propia presión del gas, además evacua ese material fundido por la parte inferior de la chapa.

Todos los pasos anteriores se muestran resumidos en la figura 2.6.

Una de las principales causas de las investigaciones que se realizan al respecto desde la década de los cincuenta, es la de acelerar el proceso a través de temperaturas más elevadas, por lo cual se han desarrollado varios tipos de procesos dentro del corte por plasma:

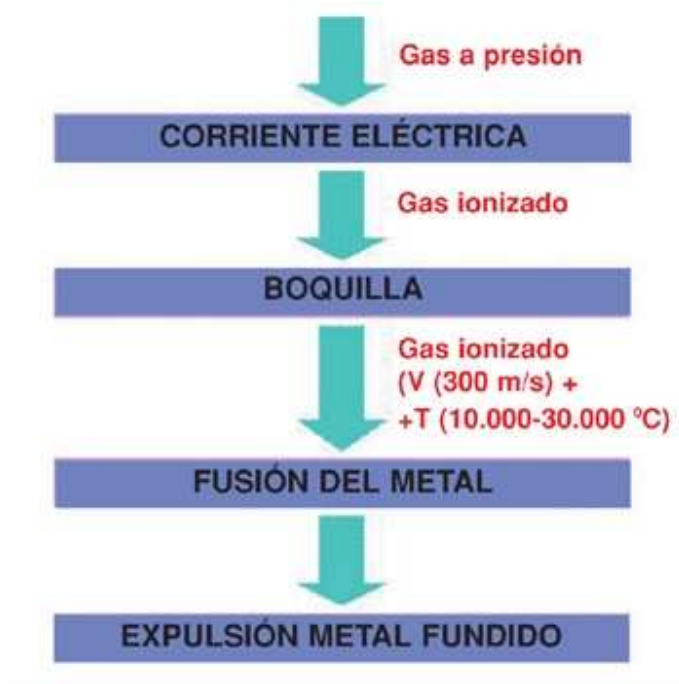


Figura 2.6. Corte con plasma.

2.6. TIPOS DE PROCESOS:

Arco transferido / No transferido:

Generalmente es el más usado ya que se precalienta el material y se favorece el proceso de fusión del mismo.

En seco:

Tiene varias opciones:

- Sin gas de aportación: se utiliza un solo gas para calentar y fundir la pieza
- Con gas de protección: se inyecta alrededor de la boquilla del método convencional y crea una zona que restringe la proyección del gas ionizado y además la mantiene limpia.
- Aire como gas plasma: favorece la oxidación del material y una reacción exotérmica que generalmente también favorece el proceso.



Figura 2.7. Plasma en seco

Arco protegido con agua:

En vez de utilizar el gas protector en la parte exterior de la boquilla, se utiliza agua inyectada a presión lo que favorece la refrigeración de la boquilla, pieza que sufre bastante durante el proceso por las altas temperaturas. El agua también consigue que esta zona esté limpia subiendo la calidad del corte, y restringe la temperatura en la zona con lo que se acelera la velocidad.



Figura 2.8. Arco protegido con agua

- Arco sumergido

- Reduce el ruido y la radiación ultravioleta
- Evita la formación de humos y gases
- Se reduce la velocidad (10 – 20%)
- Peligro de pequeñas explosiones: debido al hidrógeno, ya que con la pieza completamente sumergida en agua puede presentarse una disociación de la misma, el oxígeno se va por el material fundido y el hidrógeno se deposita sobre todo en la parte inferior de la chapa. Para evitar esto se mantiene el agua en constante agitación.

Gases para distintos materiales

El aire se puede utilizar en todos estos procesos. En el corte del acero se resalta el uso del oxígeno que favorece las reacciones exotérmicas que generan calor. En materiales inoxidables y aleaciones de aluminio se suele utilizar el hidrógeno como gas de aporte, dependiendo del rango de aplicaciones y espesores con la idea de utilizar lo menos posible el hidrógeno que se puede remplazar por el propano.

Material	Gas de corte	Gas de aportación	Rango aplicación
Acero	Aire O ₂	Aire	1 a 20 mm Espesores >6 mm
Inoxidable	Aire O ₂ , N ₂ , Ar/H ₂ /N ₂	Aire, N ₂ +Propano	Alta calidad pieza Grandes espesores+ calidad
Aleaciones	Aire, N ₂ , N ₂ , Ar/H ₂	Aire, N ₂ , N ₂ + propano	Grandes espesores Bajo contenido Al, 1 a 3 mm espesor, 2 a 19 mm espesor, Grandes espesores

2.7. DENSIDAD DE ENERGÍA

La densidad de energía causada por un soplete de plasma es determinada por la proporción de la circulación de corriente eléctrica a través de la boquilla.

Esta densidad de energía puede ser medida como los amperes por pulgada al cuadrado. Los sistemas convencionales de plasma con nitrógeno, tienen una densidad de energía en un rango de 12.000 a 20.000 amperes/pulgada²

Esta densidad de energía ha sido típicamente determinada por factores económicos. En otras palabras, si se incrementa la densidad de energía cambiando el amperaje con respecto a la proporción de orificio de boquilla, el electrodo y la boquilla (artículos de consumo) se gastarán de un modo inaceptable, incrementando por lo tanto el coste del proceso.

Aunque la alta densidad causa mejor calidad de corte, esta se obtiene a un costo inaceptable. Debido a esto, los fabricantes de plasma han tenido que diseñar sus sistemas de plasma para operar con una calidad de corte correcta, combinando un aceptable nivel de vida del consumible.

A comienzos de los 80, el oxígeno fue presentado como un gas de plasma para cortar con gran calidad y en grandes espesores, que permitió que compitiera productivamente con el nitrógeno. El canto cortado con oxígeno era más recto y la formación de rebaba era mínima. El corte con oxígeno también proveyó de un canto más limpio metalúrgicamente hablando, que permitía mejores soldaduras debido a la desaparición de los nitruros

Desafortunadamente, este progreso en la tecnología creó la reducción de la vida de los consumibles debido a la reacción del oxígeno sobre el electrodo dentro del soplete. Los primeros sistemas de plasma (nitrógeno) convencionales eran capaces de perforar hasta 500 o 600 veces antes de que la calidad del consumible afectara seriamente a la calidad del corte. Los sistemas de oxígeno, cortando el mismo material y con las mismas velocidades, requerían nuevos consumibles después de 100 o 150 perforaciones.

Los sistemas de oxígeno causaron un coste mayor por metro cortado, pero cuando la mejor calidad del corte, al mismo tiempo que la eliminación de operaciones secundarias se impusieron, el proceso de corte por oxígeno fue una alternativa aceptable a los sistemas de nitrógeno convencionales. Evidentemente el proceso de plasma con oxígeno sería bien recibido, si la vida de los consumibles mejorara...

2.8. CAPACIDADES DE CORTE DEL PLASMA CONVENCIONAL.

Ambos sistemas de plasma de oxígeno y nitrógeno – cuando se opera apropiadamente - son capaces de cortar materiales (aceros al carbono, aluminio, y aceros inoxidable) de 9.5 mm. hasta 40 mm. con un rango de ángulo de corte de 1 a 4 grados. Generalmente, cuanto mayor es el espesor a cortar, mayor es la perpendicularidad del canto cortado. Cuando se cortan materiales de menos de 10 mm. es esperado que el ángulo cortado aumente. Estos ángulos en el corte, han sido aceptados por los usuarios de plasma, debido a la alta productividad (metros por hora cortados) de estos sistemas en general.

La capacidad de cortar más espesor en sistemas de plasma convencionales varía dependiendo del fabricante del sistema y niveles de potencia. En términos generales, los sistemas de plasma son capaces de cortar aluminio de 150 mm. de grosor, acero inoxidable de 125 mm. de grosor, y aceros al carbono de 32 mm. de grosor. Indudablemente es posible cortar secciones más gruesas de acero al carbono, pero el proceso no es económicamente ventajoso cuando se compara con el proceso de oxicorte.

2.9. OTROS FACTORES QUE AFECTAN EL PROCESO DE PLASMA.

El *arco doble* es un problema muy común que afecta el proceso de plasma. En los términos simples, un arco doble es un arco que encuentra su camino desde el negativo (electrodo) al positivo (chapa) a través de una pequeña parte de cobre de la boquilla. Un arco se genera del electrodo al interior de la boquilla, y el segundo arco del exterior de la boquilla a la chapa. Cuando esto ocurre, el orificio de la boquilla se daña. Este daño afecta a la constricción del arco, causando una reducción seria en la calidad de corte. También incrementa la suciedad sobre el electrodo necesitando la sustitución de la boquilla más frecuentemente.

El arco doble debe ser controlado para que cualquier proceso de plasma sea económico y fiable.

El arco doble podría ser causado por algunos factores:

1. Perforar demasiado cerca de la chapa.
2. Arrastrar la boquilla sobre la chapa; durante el proceso de corte.
3. Una circulación de gas impropia o malos ajustes de corriente, en relación al orificio de boquilla.

La concentricidad en el soplete puede ser definida de dos maneras; concentricidad mecánica de alineación, y concentricidad de circulación de gas. Es imperativo que los consumibles; electrodo, boquilla y anillo remolino, estén realizados a máquina con una exactitud casi perfecta. Esto asegura que el arco esta apropiadamente estrechado para producir cortes rectos. La fabricación de los consumibles debe de ser controlada en las tolerancias más estrictas para el rendimiento óptimo del soplete.

El intervalo libre de escoria, es un término usado para describir la velocidad que se debe suministrar para una mejor calidad de corte sobre un determinado espesor de material.

Un intervalo libre de escoria más amplio es deseado siempre que la velocidad de corte pueda variar con pequeños efectos sobre la formación de rebaba. Esto permite la aceleración y la desaceleración necesarias en los dispositivos de control de movimiento.

En resumen, hay varios factores críticos que afectan el rendimiento de los sistemas de plasma. El buen diseño, la fabricación de precisión y la ingeniería optimizada, son necesarios para superar estos desafíos y ofrecer plasmas de gran rendimiento y calidad.

2.10. PLASMA DE ALTA DEFINICIÓN

El plasma de alta definición es un proceso que mejora la calidad del corte y escuadra el canto de materiales de menos de 10 mm. La densidad de energía es la intensidad de la corriente por centímetro cuadrado y lo que se busca con este proceso es que esté mucho más elevada que con cualquier tipo de corte por plasma convencional. Se consiguen densidades tres veces más altas, del orden de 6000 o 9000 A/cm², acelerando la velocidad de corte. Este proceso compite con el láser para cortar espesores bastante reducidos, tanto en velocidad como en calidad de corte.

Los progresos recientes en la tecnología de plasma convencional con oxígeno y nitrógeno han permitido el desarrollo de sistemas de plasma de alta definición, que causan mejoras drásticas sobre los sistemas convencionales cortando materiales finos.

La limitación para cortar con plasma es simplemente que el material que se esté cortando sea conductor de la electricidad.



Figura 2.9.

2.10.1. Tecnología de protección...

Este desarrollo, permite que las torchas de plasma de mano corten con la boquilla tocando directamente en la chapa. Se ha eliminado el problema de doble arco que afecta la vida de la boquilla y a la calidad de corte. Esta tecnología incluye un escudo de cobre fino y aislado eléctricamente que protege la boquilla de la chapa. Esta tecnología de revestimiento, incrementa la vida de la boquilla enormemente y aumenta la capacidad de perforación.

2.10.2. Proporcionando vida a los consumibles...

Uno de los desarrollos más importantes en los plasmas modernos, es admitir las ventajas del corte con plasma por oxígeno, obteniendo mayor durabilidad en los consumibles.

Durante el proceso de corte con oxígeno, el material interno del electrodo (hafnio) queda en un estado fundido. Al final de cada ciclo cortado, pequeñas partes de este material fundido se eyectan desde la punta del electrodo, bien a la parte interior de la boquilla o bien salen al exterior por su orificio. Esta pérdida de material crea un hoyo en la punta del electrodo que al final (después de 100 a 150 perforaciones) produce un cambio en la calidad de corte. La boquilla está también afectada por las proyecciones depositadas en el interior, que causan una circulación de gas incorrecta. Las nuevas tecnologías incluyen un microprocesador que controla simultáneamente durante todo el proceso la corriente eléctrica y la circulación del gas. Este control minimiza la reacción química y térmica al principio de cada corte, y resolidifica el material del electrodo al final de cada ciclo, causando un incremento en la vida de los consumibles de 600 a 1200 perforaciones, sin afectar a la calidad de corte.

2.10.3. Concentricidad del soplete y de los consumibles...

El diseño del soplete de alta definición y de los consumibles permite la perfecta alineación entre ambos. Esto se consuma utilizando el anillo de remolino como un aislante, herramienta de alineación y control de circulación. Esto asegura que la perpendicularidad de la pieza cortada sea consistente.

2.10.4. Intervalo libre de rebaba...

Los sistemas de alta definición incluyen un colector mezclador de gas que crea un gas de revestimiento que incrementa el rango de velocidad libre de rebaba. Esto elimina la rebaba prácticamente sobre la mayoría de los materiales y espesores.

2.10.5. Anillo de circulación de alto rendimiento...

Es importante crear un torbellino poderoso del gas alrededor de la superficie del electrodo en orden a mantener un punto de incidencia del arco exacto. Este torbellino es originado soplando el gas de plasma alrededor del electrodo, que crea un dibujo de circulación del gas similar a un "Tornado". Debido al pequeño diámetro de orificio requerido para estrangular apropiadamente el arco de alta definición, existe una gran dificultad para generar suficiente fuerza de soplado; no hay suficientemente circulación de gas.

Los nuevos anillos torbellino fueron desarrollados para admitir una circulación de gas relativamente alta, mientras aliviaban la presión dentro del soplete antes de que el arco fuera definitivamente estrangulado.

Estos anillos de alta circulación solventaron el problema de una circulación de gas estrecha y permitió que con el arco correcto, se mantuviera la vida de las piezas.

2.10.6. El incremento de la densidad de energía...

Las innovaciones arriba indicadas, fueron combinadas para permitir la densidad de energía creciente de los sistemas de alta definición, y así alcanzar los rangos requeridos de 40.000 a 60.000 A/pulg². Esto ha producido una duración de vida del consumible de entre 600 a 1200 perforaciones. Este proceso elimina los problemas de calidad en el corte que han atormentado a los procesos de plasma por debajo de los 10 milímetros de espesor.

2.10.7. La vida del consumible...

Antes del lanzamiento a producción de los sistemas de alta definición, era necesario llevar a cabo pruebas de laboratorio extensivas tanto a la vida de consumibles como a la calidad de corte. Típicamente, el desgaste de consumibles en sistemas de plasma convencionales resulta de una degradación bastante lineal en la calidad de corte, hasta el punto de que ésta deja de ser aceptable. El desgaste de los consumibles, produce pérdida en la perpendicularidad, y la formación de más rebaba. Sería necesario cambiar los parámetros de corte para compensar este uso

Los resultados de las pruebas con plasma de alta definición, han mostrado que el desgaste del consumible no tiene ese efecto de calidad lineal sobre las piezas cortadas. A decir verdad, la calidad del corte es relativamente constante durante toda la extensión de vida del consumible, permitiendo mucha mejor repetitibilidad en las tolerancias de las piezas cortadas. Las boquillas y los electrodos se desgastaran en base uno a uno, haciendo el almacenaje más sencillo.

Muchos usuarios de la alta definición han informado sobre periodos de vida más largos que los reales, y eso es indudablemente positivo...

2.10.8. Capacidades de corte de la alta definición...

La alta definición, al igual que los demás sistemas de plasma, produce la mejor calidad de corte dentro de ciertos grosores y tipos de material. Es también importante recordar que no es posible producir cortes sin rebaba y de buena calidad, si el dispositivo de control de movimiento es inadecuado.

El control de movimiento debe tener unas características de aceleración / desaceleración excelentes, gran fluidez en los desplazamientos, libre de vibraciones en los contornos, junto con especificaciones de exactitud y de repetitibilidad que superen a los dispositivos convencionales. Los parámetros como velocidad, altura de corte, las presiones de gas y la pureza deben ser mantenidos de acuerdo a las especificaciones para aprovechar por completo las cualidades de la alta definición.

Los aceros al carbono en espesores de entre 0.9 mm. hasta 25 mm. pueden cortarse con los sistemas de alta definición. La apariencia del corte en acero al carbono de menos de 8 mm. es suave y perpendicular, sin redondeos en la parte superior de las piezas. Sobre acero laminado en

frío prácticamente la rebaba es inexistente, mientras que sobre acero laminado en caliente puede haber un poco de rebaba fácil de quitar. Estos cortes son muy similares en apariencia a cortes con láser, con la excepción de una sangría mas ancha. En estos términos, la perpendicularidad en el corte es casi perfecta (de entre 0 y 2 grados). El aluminio se corta muy bien con el sistema de alta definición, usando aire como gas plasmógeno y aire o metano como gas de protección.

Aunque los costos son mayores, el metano proporciona un canto increíblemente suave sobre el aluminio.

Se debe de tener cuidado al programar y cortar agujeros pequeños. Debido a que el plasma es un proceso de arco transferido, a veces se produce una muesca pequeña al final de un corte en el momento de cruzar por encima de la sangría que genera la entrada al contorno. Esto puede ser minimizado a través de una programación cuidadosa, una buena regla es limitar los tamaños de los agujeros haciéndolos más grandes (>5 mm.).



Figura 2.10. Unidad de plasma de alta definición de 260 A

CAPITULO 3

CORTE CON CHORRO DE AGUA.

3.1. INTRODUCCIÓN

El corte con chorro de agua (en inglés WJC, Water Jet Cutting) usa una corriente fina de agua a alta presión y velocidad dirigida hacia la superficie de trabajo para producir un corte. También se emplea el nombre de maquinado hidrodinámico para este proceso, pero el corte por chorro de agua es el término de uso más frecuente en la industria.

Es un proceso por erosión de tipo mecánico. Se desarrolló en los años sesenta para utilizar exclusivamente agua ya que había industrias como la electro-espacial que tenía problemas para cortar algunos materiales como los recién aparecidos materiales tipo fibra.

Sin embargo, el origen es un poco anterior a eso ya que la primera persona que se encargó de desarrollar el tema del agua como herramienta de corte fue Norman Franz, un ingeniero forestal que trabajaba en el desarrollo de nuevas tecnologías para el corte de madera, llegando a hacer unas máquinas prototipo con las que experimentó intentando alcanzar grandes presiones de agua, bastante mayores de las que se utilizan hoy industrialmente. El problema era que no se podía mantener esa presión de forma continua.

Con este proceso por erosión se inyecta agua a presión en la pieza a través de la boquilla, si a esta agua se le añade un abrasivo, en este caso es él quien se encarga de realizar la erosión del material y poder arrancar las partículas para al final realizar el corte, figura 3.1.

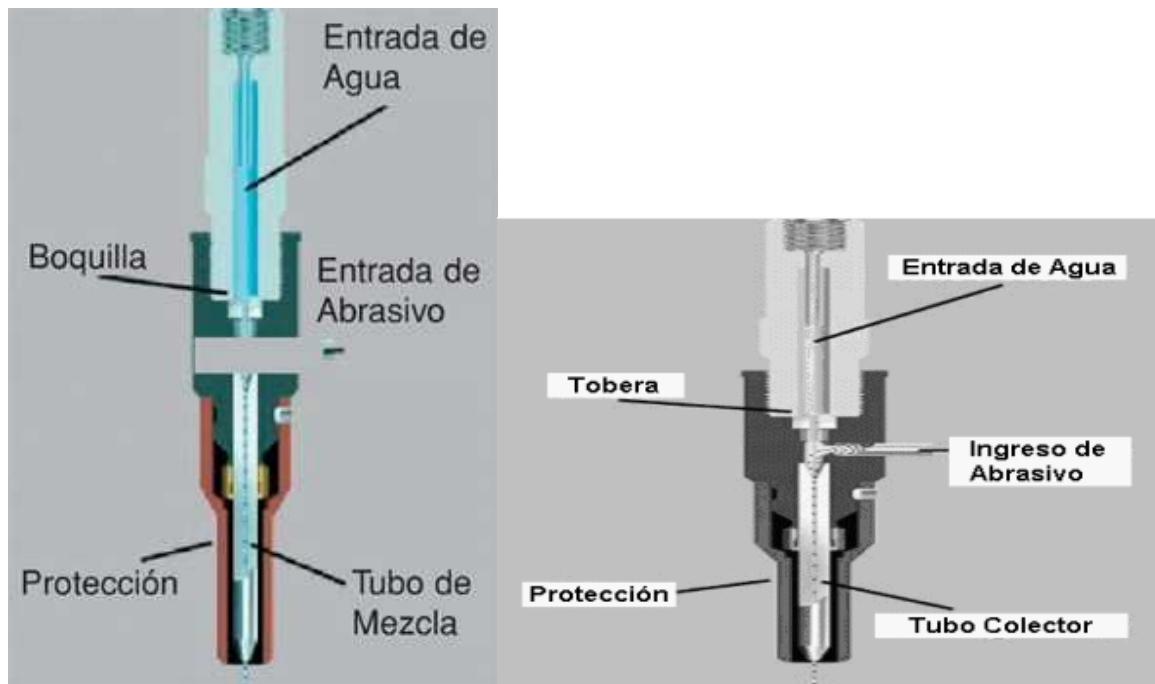


Figura 3.1.- Boquilla utilizada en el corte con chorro de agua.

Lo principal es alcanzar una presión muy elevada del agua, una de las máximas que se alcanzan actualmente es de 414 MPa, 40.000 N/cm. La forma de conseguir esta presión es mediante una bomba que se denomina intensificador, que fue introducida por Ingres Run, y que permite alcanzar estas presiones de agua.

El agua a presión se hace pasar por una boquilla muy reducida y se consigue una velocidad muy alta, del orden de 3 veces la del sonido. Esta velocidad tiene como finalidad arrancar el corte.

Luego, se pasa a la cámara donde se le añade el abrasivo y así sale por un extremo para cortar el material.

Para obtener una corriente fina de agua, se usa una pequeña abertura de boquilla de un diámetro de 0.004 a 0.016 pulg (0.1 a 0.4 mm). A fin de que la corriente tenga la energía suficiente para cortar se usan presiones hasta de 90000 lb/pulg² (400 Mpa), y el chorro alcanza velocidades hasta de 3000 pies/s (900 m/s). Una bomba hidráulica presuriza el fluido al nivel deseado. La unidad de boquilla consiste en un soporte y una boquilla de joya. El soporte está hecho de acero inoxidable y la boquilla de Zafiro, rubí o diamante. El diamante dura más, pero es el de mayor costo.

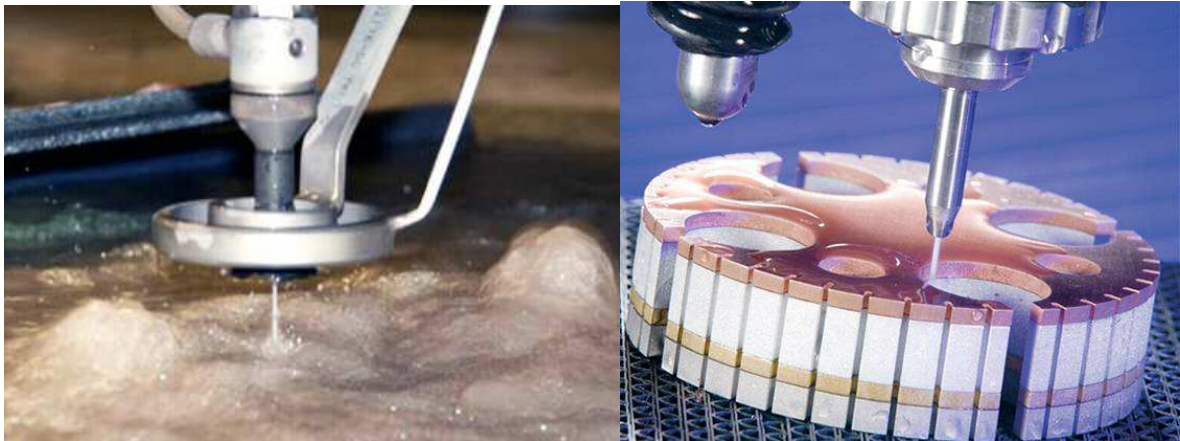


Figura 3.2. El chorro de agua con un diámetro de 0.1 a 0.4 mm

En el corte por chorro de agua (WJC) deben usarse sistemas de filtración para separar las virutas producidas durante el proceso. Los fluidos de corte en ese sistema son soluciones de polímeros, las cuales se prefieren debido a que tienden a producir una corriente coherente. Ya se ha analizado en clase los fluidos de corte en el contexto del maquinado convencional, pero el término se usa merecidamente en el WJC.

Los parámetros de proceso importantes en el WJC incluyen la distancia de separación, el diámetro de abertura de la boquilla, la presión del agua y la velocidad de avance del corte. La distancia de separación es la abertura entre la boquilla y la superficie de trabajo. En general, se prefiere que esta distancia sea mínima para reducir la dispersión de la corriente del fluido antes de que golpee la superficie. Una distancia de separación normal es de 1/8 de In. (3.2 mm). El tamaño del orificio de la boquilla afecta la precisión del corte; las aberturas más pequeñas se usan para cortes más finos sobre materiales más delgados. Para cortar materia prima más gruesa se requieren corrientes de chorro más densas y mayores presiones. La velocidad de avance del corte se refiere a la velocidad a la que se mueve la boquilla a lo largo de la trayectoria de corte. La velocidad de avance típica varía desde 12 in/min (5mm/seg) hasta 1200 in/min (500mm/seg), dependiendo del material de trabajo y su grosor. Por lo general, el WJC se hace en forma automática usando un control numérico computarizado o robots industriales para manipulación de la unidad de boquilla a lo largo de la trayectoria deseada.

El WJC se usa en forma eficaz para obtener tiras de materia prima plana, como plásticos, textiles, materiales compuestos, mosaicos para pisos, alfombras, piel y cartulinas. Se han instalado celdas robóticas con boquillas para WJC ensambladas como herramienta de un robot para seguir patrones tridimensionales de corte irregular, por ejemplo para cortar y recortar tableros de automóvil antes del ensamble. En estas aplicaciones, la ventaja del WJC es que la superficie de trabajo no se tritura ni quema como en otros procesos mecánicos o térmicos, en consecuencia, la pérdida de material es mínima porque la ranura de corte es estrecha, esto reduce la contaminación ambiental y existe la facilidad de automatizar el proceso usando controles numéricos o robots industriales.

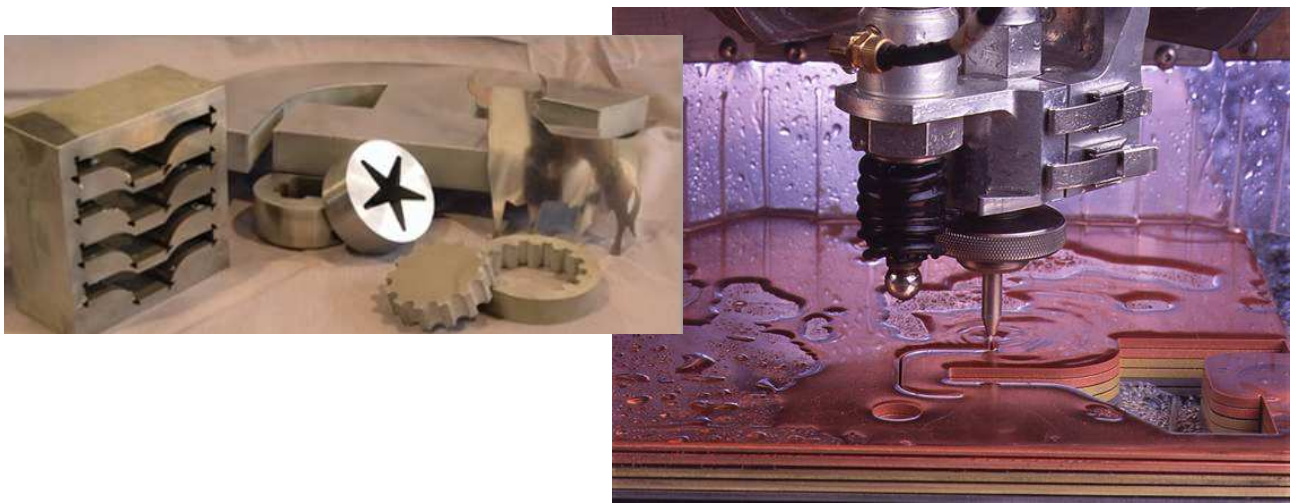


Figura 3.3. Corte de diversos materiales.

Tal vez uno de los problemas con los procesos de corte por agua es que a medida que avanza el chorro, este se flexiona o electa hacía atrás y hace que la parte superior de la pieza se corte antes que la inferior, figura 3.4. Si se hace un corte recto no hay problema, pero si es necesario cortar esquinas interiores tendríamos que avanzar el corte para poder cortar la parte inferior y superior, lo que al final nos puede dar un mal acabado y en algunas aplicaciones se tendría que rechazar el producto.

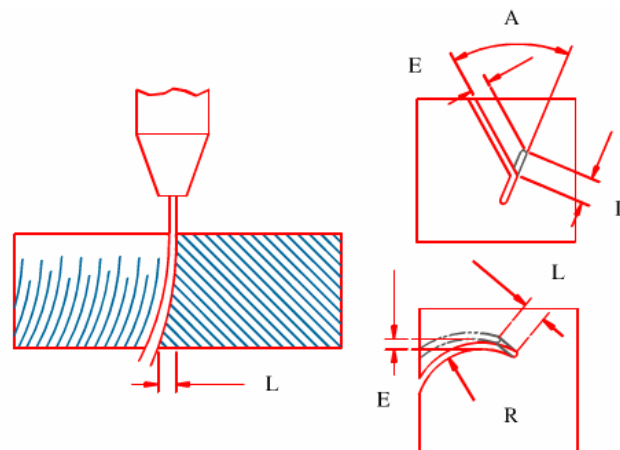


Figura 3.4. Errores geométricos en el corte con chorro de agua

Otro problema es el de la inclinación de los bordes, normalmente la zona superior que está enfrentada al chorro tiene una abertura mayor que en la parte inferior. El sistema de corte dinámico controla para reducir estos problemas, en este caso, reduciendo la velocidad antes de llegar a las esquinas se evitan estas entradas en la parte superior de la pieza y en el caso de los bordes inclinados se corrige la inclinación de la boquilla.

Sin embargo, este proceso tiene las siguientes ventajas:

- No se origina una zona afectada térmicamente
- Puede cortar cualquier material con amplio rango de espesores (de 1/16" a 6" de grueso)
- No requiere operaciones secundarias
- Kerf reducido (0,5 – 1 mm)
- Fuerza de corte pequeña (1,4 – 2,3 kg)
- Proceso limpio, sin gases
- Puede realizar agujeros para iniciar corte
- Proceso seguro (baja compresibilidad del agua)

- Corta formas y geometrías de gran detalle

Finalmente, como otros inconvenientes de este proceso, se encuentran :

- Más lento que oxicorte o plasma
- Coste elevado de abrasivo (0,23 kg/min a 1 kg/min)
- Ruido
- Inversión inicial elevada (mayor que oxicorte o plasma)

Existen dos sistemas que emplean el principio antes descrito, el que emplea sólo agua y que es empleado para cortar todo tipo de materiales blandos, como por ejemplo: madera, alimentos, plásticos, etc. Y el otro sistema de similares características pero que sólo difiere en el ingreso de un abrasivo al chorro, para permitir el corte de materiales duros como: aceros, titanio, aleaciones, etc.

3.2. EL MÉTODO

Los investigadores de esta materia, se han basado en las leyes fundamentales de la física y la mecánica de los fluidos para interpretar los fenómenos que aquí ocurren. Por ejemplo, el chorro impacta el material con una cierta energía cinética E_a y abandona el material con una energía E_{ex} , la cual debe ser menor que la inicial para que se produzca el corte. La diferencia de estas dos energías es la energía disipada E_{dis} , producto del impacto, la fricción, etc., en el corte.

$$E_{dis} = E_a - E_{ex} \quad (3.1)$$

La energía cinética depende directamente de los flujos máscicos de agua y abrasivo, así como también de la velocidad del chorro agua-abrasivo que depende de la presión de agua generada por la bomba y de la eficiencia del inyector.

Para que se logre el corte, los investigadores han podido comprobar, que existe una presión límite entre el éxito del corte y el fracaso de éste, que se puede denominar “presión crítica”, la que varía para los diferentes materiales y espesores. Pero también influyen otros parámetros en el éxito del corte como: la cantidad de abrasivo, tipo de éste, cantidad de agua, diámetros de tobera/tubo colector.

La elección de una correcta presión de trabajo y de los parámetros de operación, influyen de manera importante en el corte, tanto en su capacidad y calidad como en los costos. Por lo cual existen software de simulación que permite tener una idea de cómo resultaría el corte, principalmente a través de la velocidad de corte posible de obtener.

3.3. Y ASÍ ES COMO TRABAJA:

Cuando cortamos con un chorro de agua, la energía necesaria para cortar es producida por un chorro fluido que fluye por un tubo de mezcla muy estrecho. Pero primero hay que producir la presión necesaria. Un componente esencial del dispositivo de corte del 2D o 3D es la bomba de alta presión, una bomba de circuito cerrado con fundamentalmente un accionamiento hidráulico de aceite. En el primer ciclo la presión del aceite es generada por una bomba hidráulica. Esta se transforma en una alta presión de agua en el segundo ciclo mediante la acción de un transbordador.

A través de una operación continua la bomba de alta presión produce una presión de agua de hasta 6000 bars que fluye por el tubo de mezcla en el cabezal de corte a una velocidad de aproximadamente . 1000 metros por segundo. De esta manera, la energía potencial se transforma en energía cinética. Como protección para los componentes de alta presión y de la bomba de transferencia de la presión, como también para la boquilla, se utiliza agua de corte filtrada. El cabezal de corte abrasivo con su tubo de mezcla está integrado en la unidad de control, en un robot o en un portal de 2D o 3D.

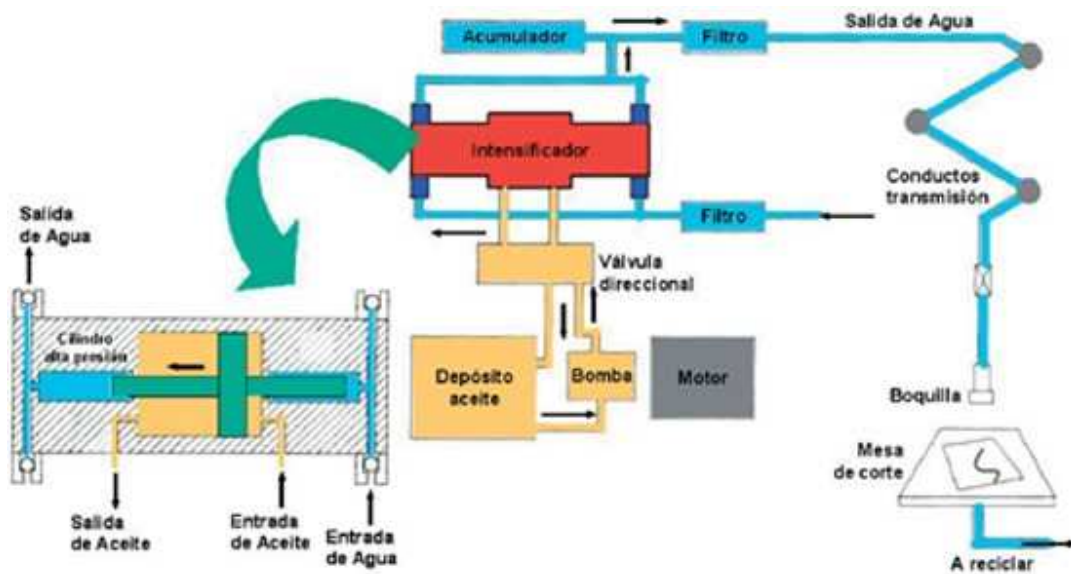


Figura 3.5. Elementos que constituyen un equipo de corte con chorro de agua

El sistema se puede integrar también en un portal transversal que mueve el material debajo del chorro de agua. Los ejes guiados por control numérico hacen posible el proceso de corte en tres dimensiones. El material a tratar se encuentra de forma segura encima de la parrilla de corte y los contornos son cortados con el cabezal de corte. Esto también permite cortar materiales inestables, especialmente blandos, sin contaminación.

Material textil, elastómeros, material fibroso, plásticos diluidos, sustancias alimenticias, papel, plásticos térmicos, etc. son cortados con una velocidad de flujo de hasta 200 metros por minuto con un chorro de agua puro. El proceso de corte abrasivo se usa para cortar materiales compactos y duros, tales como todos los metales, rocas duras, vidrio a prueba de balas, cerámica, etc. Antes de que el chorro de agua enfocado haga contacto con el material a tratar un medio de corte de arena muy fina es introducido en una cámara de mezcla, cuyo resultado es un microcorte.

De esta manera se forma un vacío en la cámara de mezcla que es usado para la incorporación del medio abrasivo. Después del traslado del medio abrasivo desde el tanque de almacenamiento, este es introducido en un aparato dispensador. Es aquí donde el agregado abrasivo necesario para el proceso de corte en curso es introducido. El chorro abrasivo es enfocado de nuevo en el tubo de mezcla y dirigido hasta el material en tratamiento.

Olivino granulado finamente y arena de granito, como también corindón con un tamaño promedio de 0.2 a 0.5 milímetros se usan normalmente como abrasivo. Cuanto más duras son las partículas sólidas mejor la realización del corte. Los componentes de la unidad del abrasivo consisten esencialmente del cabezal de corte abrasivo, el sistema de dispensación del abrasivo, la válvula de retención y descarga y los módulos de tanques del abrasivo para el abastecimiento permanente de hasta tres diferentes mezclas de corte.

La eliminación de la energía residual se puede realizar durante la operación de abrasivo de alto rendimiento a través de un absorbente de energía (catcher) integrado dentro de una vasija de agua. Se pueden cortar de esa manera. aceros altamente flexibles y templados hasta 100 milímetros , otros metales hasta 120 milímetros, metales no ferrosos hasta 150 milímetros, materiales blandos hasta 200 milímetros, así como material de espuma y revestimientos de hasta 300 milímetros.

Resumiendo, el proceso completo se puede resumir como se muestra en la figura 3.6:



Figura 3.6.- Fases del proceso de corte por agua

3.4. SISTEMAS GENERADORES DE PRESIÓN.

Existen dos sistemas principales para generar la presión necesaria, las bombas de émbolos y el llamado “intensificador de presión”. Las primeras poseen generalmente tres émbolos conectados a un cigüeñal e impulsado por un motor eléctrico, figura 3.7. Pueden llegar a generar presiones bajas y medias (hasta 344 MPa en últimos diseños) sin problemas. La principal ventaja de estas bombas es que es muy eficiente en las presiones mencionadas y su principal desventaja es que sobre estas presiones se torna insegura y produce importante variabilidad en el caudal de entrega.



Figura 3.7. Bomba de émbolos

El “intensificador de presión” consiste principalmente en un cilindro con diferencia de diámetros y un pistón con igual diferencia, figura 3.8. La sección del pistón con mayor diámetro es impulsado por un fluido hidráulico, produciendo una presión mucho mayor sobre el agua debido a la diferencia de diámetros (en una relación sección pistón-aumento de presión de 1:10 a 1:25). Las presiones normales que pueden generar son por sobre los 400 MPa y se ha llegado a los 690 MPa en algunos equipos modernos.

Su principal ventaja radica en la alta presión que puede generar y que puede alimentar a varios inyectores simultáneamente, y en contra, su baja eficiencia debido al sistema hidráulico que posee, ya que pierde potencia por el calor que necesita disipar mediante un sistema intercambiador, además de necesitar un acumulador de presión debido a su gran variabilidad de entrega.

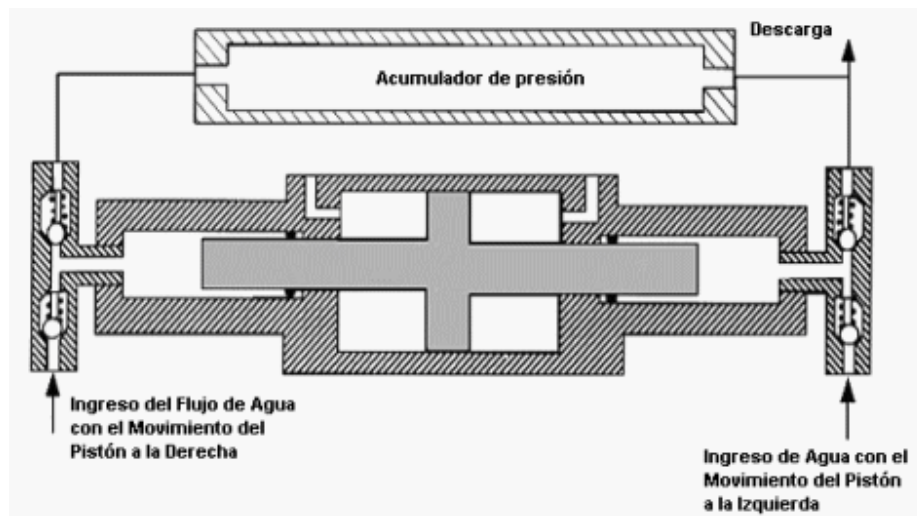


Figura 3.8. Intensificador de presión doble

3.5. ABRASIVOS EMPLEADOS

En general los abrasivos que se emplean o que dan buenos resultados en el corte deben poseer ciertas características adecuadas como: buena estructura, una dureza adecuada, un buen comportamiento mecánico y tener un grano de forma y distribución adecuadas. Para cortar materiales, como acero por ejemplo, son adecuados abrasivos con granos duros y de formas afiladas y para materiales como aluminio son preferibles los de granos más blandos y no de gran calidad, lo que lo hace más económico.

Los abrasivos más utilizados son: granate, oxido de aluminio, olivino, arena silica, entre otros. Siendo el Granate tipo “Almandino” el que presenta características más estables y que permite ser empleado sobre gran cantidad de materiales, por lo que es el más popular a nivel mundial.

3.5.1. Introducción del abrasivo

Una vez que el chorro de agua pasa por la tobera, su velocidad se incrementa de gran manera, entrando luego a una zona de un diámetro bastante mayor o zona de mezcla. Debido a la altísima velocidad con que ingresa a esta zona, se produce un fenómeno llamado “depresión” o “efecto Venturi”, el que es aprovechado para succionar las partículas de abrasivo y agregarlas al chorro.

Normalmente la alimentación del abrasivo hacia el inyector se realiza por medio de un pequeño recipiente cercano a este y que a su vez es surtido neumáticamente desde un recipiente de mayor tamaño. También existen otros sistemas, como por ejemplo: el que parte del agua de alta presión es desviada hacia un estanque donde se mezcla con el abrasivo y es conducida al inyector, o bien otro sistema el cual el agua y el abrasivo, previamente mezclados, son impulsados al inyector por una membrana accionada por parte del fluido hidráulico que impulsa al intensificador de presión y conducido al inyector para la descarga.

3.6. EQUIPOS

Existe actualmente una gran variedad de equipos en el mercado, que permiten realizar gran cantidad de trabajos. Equipos de tamaños pequeños para realizar trabajos muy precisos y delicados, equipos de tamaños medios para pequeñas industrias y grandes equipos para satisfacer grandes demandas de trabajo.



Figura 3.9. Equipo pequeño



Figura 3.10. Equipo de gran capacidad

Los equipos actuales de esta tecnología poseen poderosos sistemas de control computacionales en dos ejes de desplazamiento, en sistemas con inyectores convencionales, y hasta seis ejes en sistemas con inyectores robotizados que permiten gran capacidad de movimiento del inyector para realizar complicados trabajos.

En lo que respecta a los costos, el valor comercial aproximado varía normalmente entre US\$90.000 a US\$200.000 (según el tamaño y capacidades) y unas cuantas veces más si se trata de equipos robotizados.

El futuro de este método se espera bastante auspicioso, ya que existen a nivel mundial una gran y creciente cantidad de centros de investigación y desarrollo de esta tecnología, los que han alcanzado logros importantes sólo en las últimas décadas, provocando que cada vez más compañías la integren dentro de sus procesos.

Si se analiza desde el punto de vista de los costos, inicialmente éste es aún muy alto comparado con otros métodos, pero que con el desarrollo que se está alcanzado es muy probable que se logre revertir, lo que sumado a las ventajas que posee puede representar una inversión bastante atractiva si se piensa en el largo plazo.

3.7. CORTE CON CHORRO DE AGUA EN TRES DIMENSIONES

Existen dos subgrupos de aplicaciones de corte con chorro de agua en 3D, donde el cabezal de corte es montado en un brazo de robot, y en las mesas de corte, donde en adición a los ejes X, Y y Z, se añade un eje rotativo al sistema.



Figura 3.11.

Las aplicaciones de corte con robot pueden cortar materiales como tableros, toldos de autos, paneles de puertas, y muchas otras con diferentes profundidades y curvas extremas. Las velocidades y los ciclos de corte son consideraciones muy importantes en los sistemas de corte de chorro de agua de 3D.

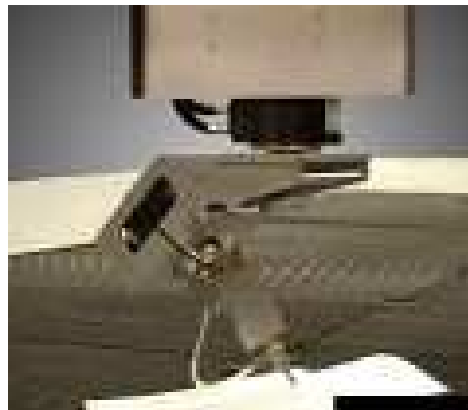


Figura 3.12.

Un sistema de corte con chorro de agua con un cabezal de 5 ejes puede cortar biseles, agujeros en tubería y conos partiendo de una lamina plana. Mientras estos sistemas son más costosos, estos tienen una mayor versatilidad, y pueden ser usados en las aplicaciones de corte de metal mas avanzadas.

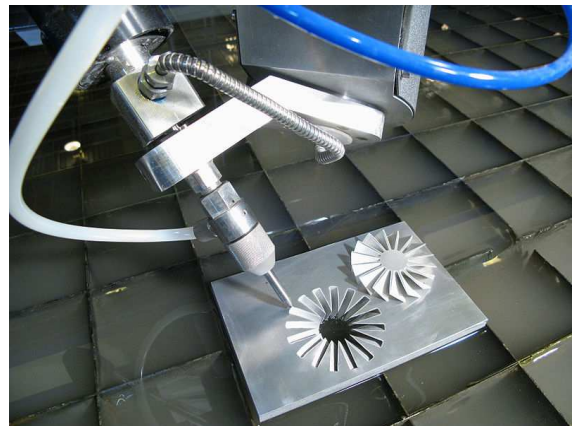


Figura 3.13. *Sistema de corte con chorro de agua con un cabezal de 5 ejes*

CAPÍTULO 4

ELECTROEROSIÓN

4.1. INTRODUCCIÓN

La Electroerosión o maquinado por descargas eléctricas (EDM - *Electric Discharge Machining*) es un método de arranque de material que se realiza por medio de descargas eléctricas controladas que saltan, en un medio dieléctrico, entre un electrodo y una pieza, figura 4.1.

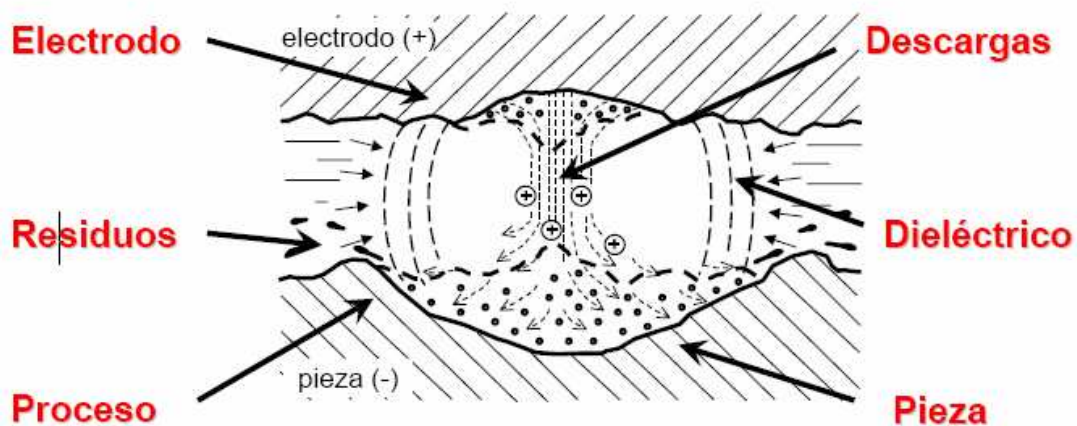


Figura 4.1. Electroerosión.

El maquinado por electroerosión o electrodescargas ha estado presente desde hace más de cuarenta y cinco años, en sus inicios, se le consideró como un método para maquinado de metales, que en poco tiempo convertiría en obsoletos, todos los procesos de maquinado anteriores. Sin embargo, el proceso de corte por descargas eléctricas tiene algunas limitantes por lo que no ha cumplido con las optimistas expectativas. El desarrollo de esta tecnología se inicia durante los años posteriores a la Segunda Guerra Mundial, los principales investigadores en este campo fueron dos científicos rusos B.R y N.I Lazarenko, en la entonces Unión Soviética, y es de hecho a ellos a quien se les atribuye la invención de la primera máquina que se puede considerar como apropiada para el maquinado por electroerosión ó electroerosionadora en 1944.

La máquina inventada por los Lazarenko utilizaba el mismo principio y tenía muchas similitudes a los desintegradores utilizados en los Estados Unidos desde 1942, es decir, usaban

una fuente de poder de corriente directa y un baño de líquido dieléctrico. Sin embargo otra de las máquinas descritas en el artículo de los Lazarenko era muy diferente a las usadas hasta ese entonces, pues esta usaba un soporte para el electrodo que era controlado por un servomotor (Figura 4.2), lo cual permitía mantener a una distancia constante de trabajo al electrodo con respecto a la pieza de trabajo, además, el inicio e interrupción de la chispa estaban controlados por un circuito de resistencia capacitor y no por el movimiento del electrodo. Todas estas diferencias hicieron al proceso más eficiente y es de hecho sobre ese principio de funcionamiento sobre el cual se desarrollo la tecnología actual de la electroerosión de penetración. que se habían generado en sus inicios.

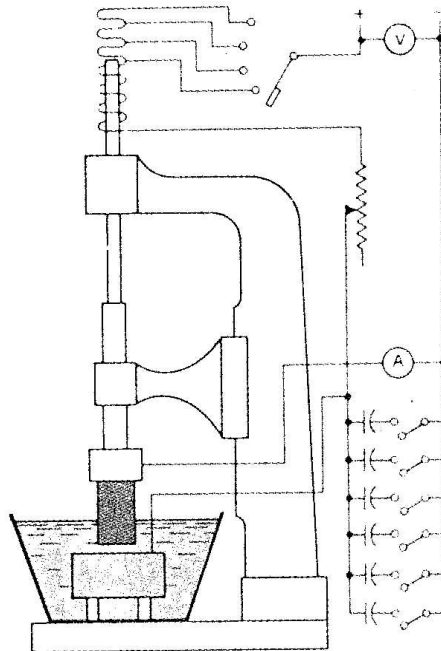


Figura 4.2. Inicio del maquinado por electro descarga

Durante los cinco años posteriores a la revelación de los Lazarenko se desarrolló rápidamente el proceso de maquinado por electroerosión. La idea de usar corriente directa pulsante se adoptó de manera universal, algunos utilizaron el circuito resistencia capacitor, otros usaron una línea de corriente alterna rectificadas y algunos otros utilizaron un alternador manejado por un motor de alta frecuencia, pero todos aceptaron la idea de controlar la chispa desde la fuente de poder.

4.2. PROCESO DE LA DESCARGA

El mecanizado por electroerosión se efectúa por tanto mediante el salto de chispas eléctricas entre dos electrodos sometidos a una determinada tensión eléctrica y sumergidos ambos en un líquido aislante (líquido dieléctrico).

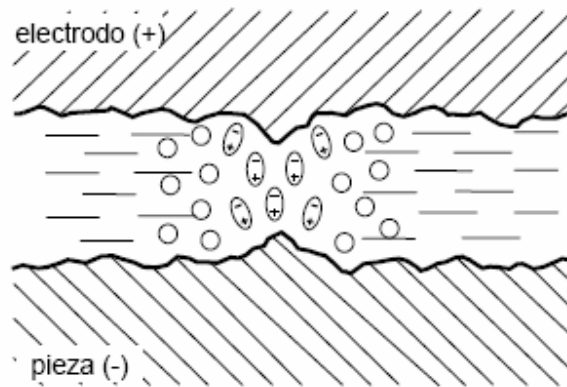


Figura 4.3.

Al estar ambos electrodos en un medio dieléctrico o aislante la tensión que se aplique a ambos ha de ser suficiente como para llegar a crear un campo eléctrico mayor que la rigidez dieléctrica del líquido.

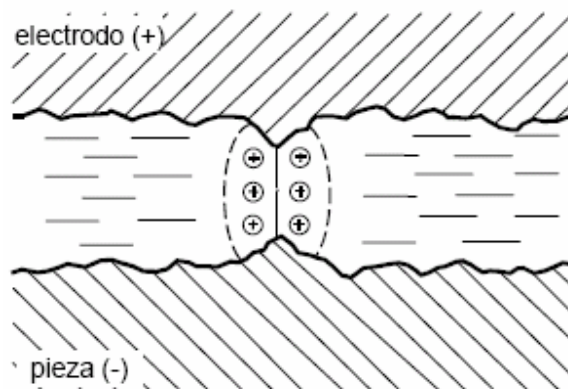


Figura 4.4.

Bajo la acción de este campo eléctrico, iones libres positivos y electrones se encontrarán acelerados creando un canal de descarga que se vuelve conductor, y es precisamente en este punto donde salta la chispa. Ello provoca colisiones entre los iones (+) y los electrones (-). Se forma entonces un canal de plasma.

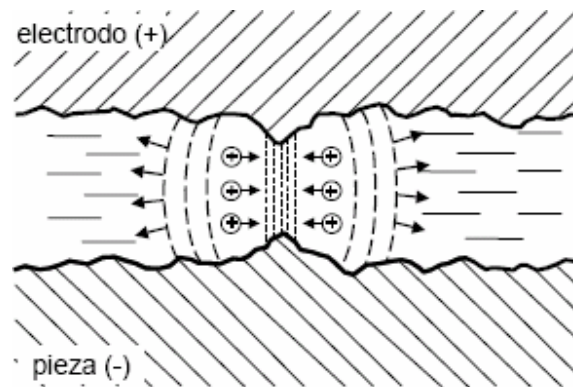


Figura 4.5.

Bajo el efecto de los choques se crean altas temperaturas en ambos polos y alrededor del canal de plasma se forma una bola de gas que empieza a crecer. Por otro lado las altas temperaturas que se han dado en los dos polos, van fundiendo y vaporizando parte del material de la pieza, mientras que el electrodo apenas si se desgasta muy ligeramente.

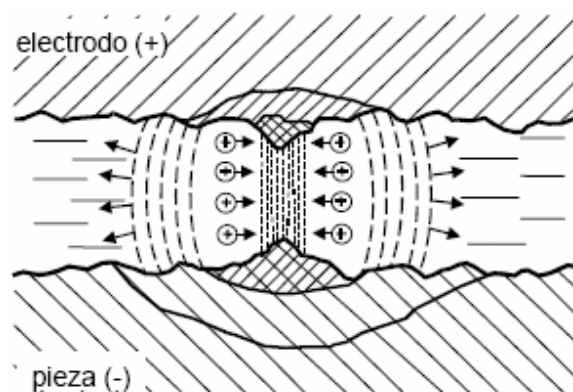


Figura 4.6.

En esta situación (bola de gas grande y material fundido en ambos polos), se corta la corriente eléctrica. El canal de plasma se derrumba y la chispa desaparece. El líquido dieléctrico entonces rompe la bola de gas haciéndola implosionar (explotar hacia adentro).

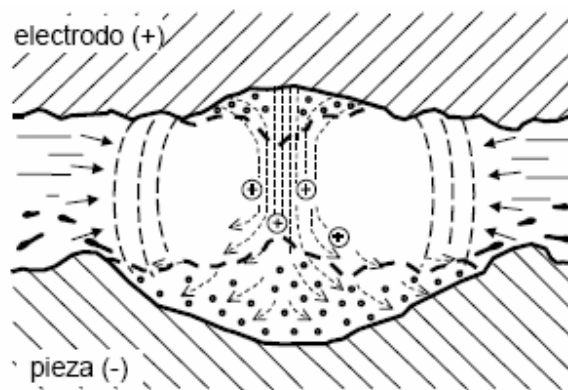


Figura 4.7.

Ello hace que se creen fuerzas que hacen salir el material fundido formando dos cráteres en las superficies. El material fundido se solidifica y es arrastrado en forma de bolas por el líquido dieléctrico, constituyendo lo que se puede llamar "viruta del proceso de electroerosión".

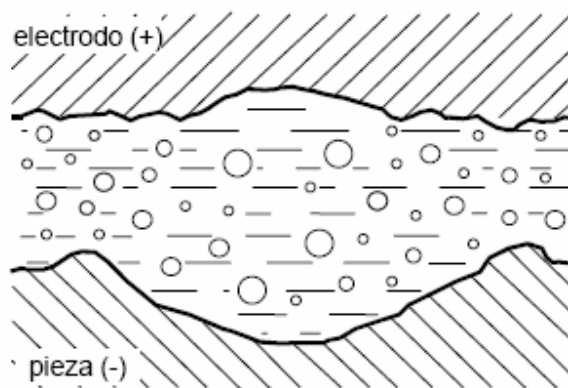


Figura 4.8.

4.3. APLICACIONES DE LA ELECTROEROSIÓN

Materiales conductores de la electricidad

- Independencia de las características mecánicas del material
- Grandes posibilidades para mecanizar los "materiales exóticos"
- Posibilidad de mecanizar un gran abanico de espesores

4.4. ELECTROEROSIÓN POR PENETRACIÓN (DIE-SINKING EDM)

Durante el proceso de electroerosión la pieza y el electrodo se sitúan muy cercanos entre sí, dejando un hueco que oscila entre 0,01 y 0,05 mm, figura 4.9, por el que circula un líquido dieléctrico (normalmente aceite de baja conductividad). Al aplicar una diferencia de tensión continua y pulsante entre ambos, se crea un campo eléctrico intenso que provoca el paulatino aumento de la temperatura, hasta que el dieléctrico se vaporiza.

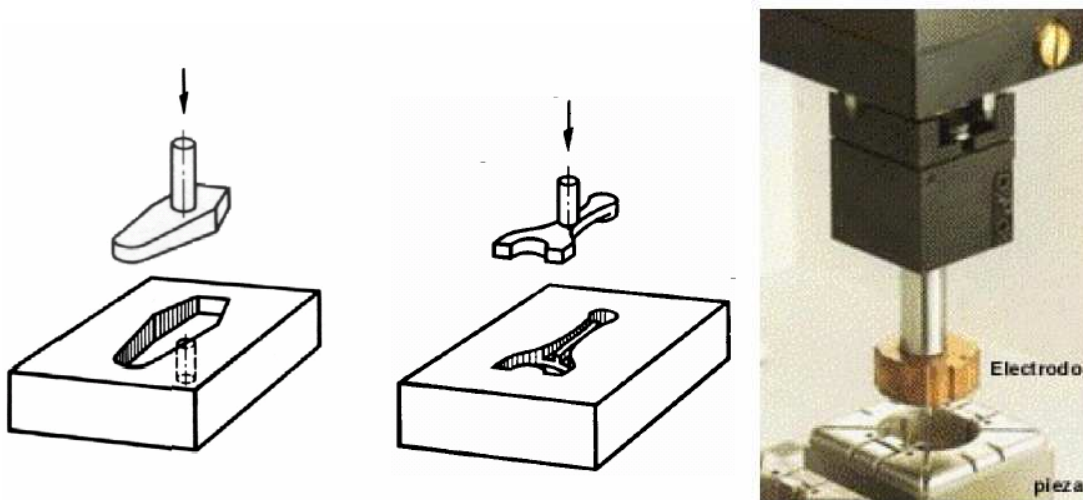


Figura 4.9. Electroerosión por penetración

Al desaparecer el aislamiento del dieléctrico salta la chispa, incrementándose la temperatura hasta los 20,000 °C, vaporizándose una pequeña cantidad de material de la pieza y el electrodo formando una burbuja que hace de puente entre ambas.

Al anularse el pulso de la fuente eléctrica, el puente se rompe separando las partículas del metal en forma gaseosa de la superficie original. Estos residuos se solidifican al contacto con el dieléctrico y son finalmente arrastrados por la corriente junto con las partículas del electrodo.

Dependiendo de la máquina y ajustes en el proceso, es posible que el ciclo completo se repita miles de veces por segundo. También es posible cambiar la polaridad entre el electrodo y la pieza.

El resultado deseado del proceso es la erosión uniforme de la pieza, reproduciendo las formas del electrodo. En el proceso el electrodo se desgasta, por eso es necesario desplazarlo hacia la pieza para mantener el hueco constante. En caso que el desgaste sea severo, el electrodo es reemplazado. Si se quiere un acabado preciso (tolerancia de forma ± 0.05 mm es preciso la utilización de 2 electrodos).

La rugosidad superficial (vdi, representa la aspereza producida por la chispa en la superficie mecanizada) que se obtiene en un proceso de electroerosión por penetración puede establecerse previamente, dentro de unos límites, al programar la máquina. Esta rugosidad puede variar entre 48 vdi (acabado muy rugoso) y 0 vdi (acabado sin rugosidad pero imposible de obtener)

El electrodo es comúnmente hecho de grafito pues este, por tener una elevada temperatura de vaporización, es más resistente al desgaste. Puede ser trabajado en una fresadora específica con el fin de crear ya sea un electrodo macho o un electrodo hembra, lo que significa que el electrodo tendrá la forma opuesta a la forma deseada y resultante en la pieza de trabajo.

Es buena práctica tener un electrodo de erosión en bruto y uno que consuma en forma fina y final, mas esto puede ser determinado por las dimensiones y características de la pieza a ser lograda.

Los electrodos pueden ser manufacturados en forma que múltiples formas pertenezcan al mismo pedazo de grafito.

También el cobre es un material predilecto para la fabricación de electrodos precisos, por su característica conductividad, aunque por ser un metal suave su desgaste es más rápido. El electrodo de cobre es ideal para la elaboración de hoyos o agujeros redondos y profundos. Comúnmente estos electrodos se encuentran de diámetros con tamaños milimétricos en incrementos de medio milímetro y longitudes variadas. Este proceso en particular es muy utilizado para antes del proceso de electroerosión con hilo, para producir el agujero inicial donde pase el hilo a través de un grosor de material que es inconveniente al taladro convencional. Si deseamos un buen acabado en el objeto a erosionar, sea cual sea el material en que se construya el electrodo este debe ser repasado a mano después ser mecanizado en la fresadora o torno debido a las marcas que las herramientas de corte utilizadas en estas maquinas producen pequeñas marcas en los electrodos.

4.4.1. Arquitectura de la máquina de electroerosión por penetración.

Mecánicamente esta formado por una fresadora u otro tipo de maquina herramienta que trabaje en forma similar.

El comando de descenso del husillo porta herramienta es remplazado por un motor eléctrico del tipo paso a paso.

En el porta herramienta se coloca la matriz de cobre cuya forma será copiada en el metal trabajado.

Sobre la base de la maquina se coloca el tanque de trabajo en el que se apoya la pieza a erosionar y se llena con un liquido dieléctrico.

Un generador produce corriente de hasta 35 A con una frecuencia variable entre 400 y 40000 Hz y la tensión de trabajo es de 80 V

Para las personas con alguna experiencia en soldadura reconocen que por ejemplo el sistema de soldadura TIG funciona también con una tensión similar y una onda de alta frecuencia ioniza el gas conductor formando el plasma, en este caso lo ionizado es el liquido.

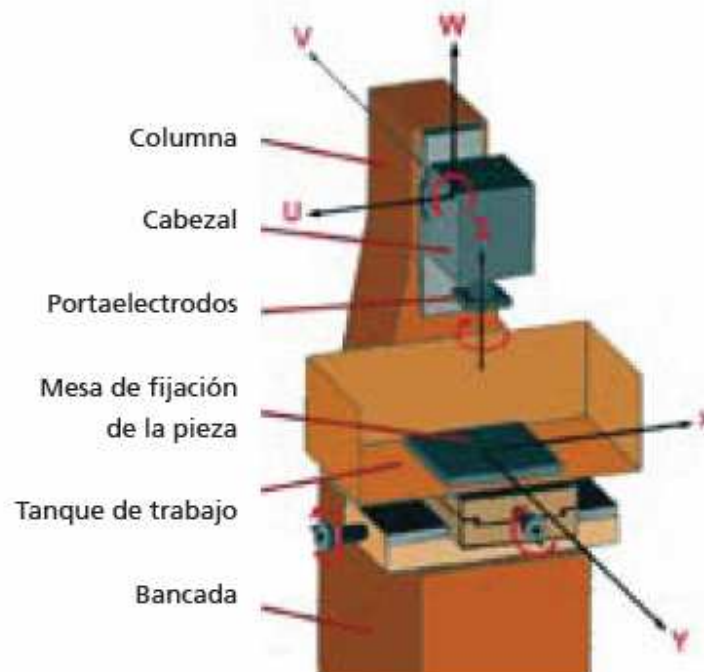


Figura 4.10. Arquitectura de una electroerosionadora de penetración

4.5. ELECTROEROSIÓN POR HILO (WIRE EDM).

Es un desarrollo del proceso anteriormente descrito, nacido en los años de la década de los 70, y por consiguiente, más moderno que el anterior, que sustituye el electrodo por un hilo conductor; además, este proceso tiene mejor movilidad, figura 4.11. Las tasas de arranque de material con hilo rondan los $350 \text{ cm}^3/\text{h}$.

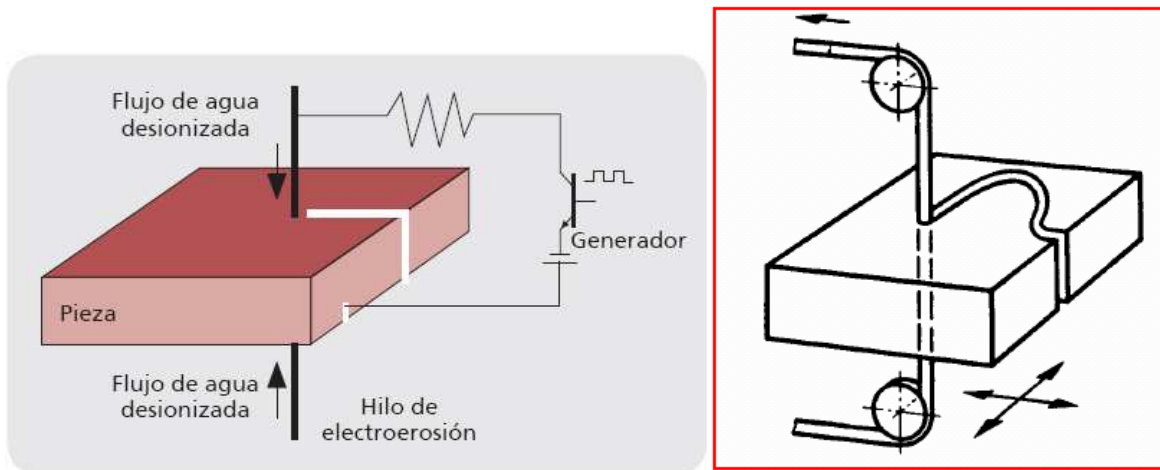


Figura 4.11 . Electroerosión por hilo

La calidad, material y diámetro del hilo, en conjunción al voltaje y amperaje aplicado, son factores que influyen directamente la velocidad con que una pieza pueda ser trabajada. También, el grosor y material de la pieza dictan ajustes para el cumplimiento del corte.

El acabado deseado en el proceso también es un factor de consideración que afecta el tiempo de ciclo de manufactura, pues el acabado que este proceso deja en la pieza puede ser mejorado cuanto más pases semi-repetitivos de corte sobre la misma superficie son ejecutados.

4.5.1. Hilo conductor

El hilo metálico puede ser fabricado de latón o de zinc (y molibdeno, en caso de máquinas de hilo recirculante). En prácticas de protección al medio ambiente, después del uso y descarte del hilo empleado y sus residuos, el material del hilo, ya sea en forma de hilo o éste pulverizado, es se almacena de manera independiente con el fin de ser reciclado.

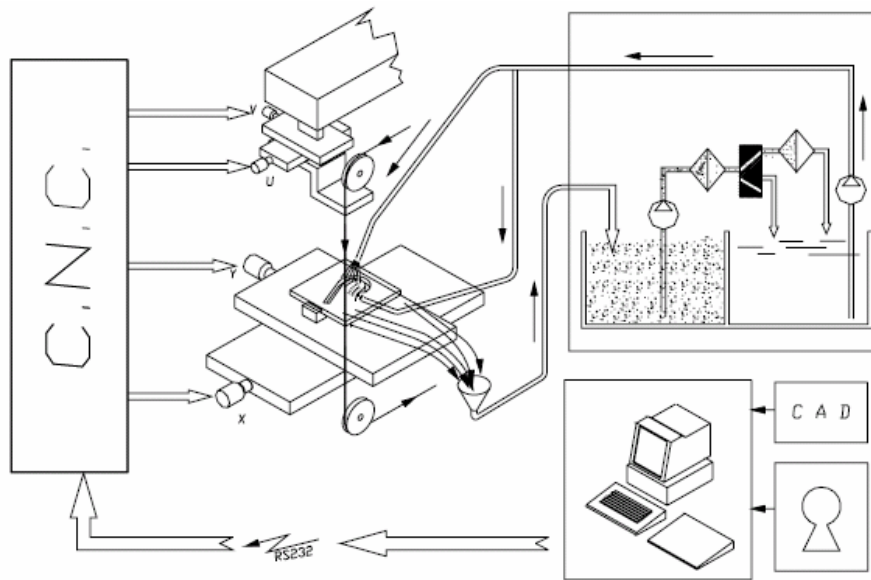
Existen varios diámetros en el mercado, incluyendo 0.010" (0.25mm) y 0.012" (0.30mm). Generalmente el hilo se vende en rollos y por peso, más que por su longitud.

La tensión del hilo es importante para producir un corte efectivo, y por consiguiente una mejor parte; la sobretensión del hilo resulta en que este se rompa cuando no sea deseado. Mas la ruptura del hilo es común durante el proceso, y también es necesaria. En unos talleres, los encendedores comunes se utilizan como una forma práctica de cortar el hilo.

Inicialmente, la posición de una cabeza superior y una cabeza inferior por las cuales pasa el hilo están en un alineamiento vertical y concéntrico una a la otra; el hilo en uso se encuentra entre estos dos componentes mecánicos.

4.5.2. Arquitectura de la máquina de electroerosion por hilo

A diferencia de las máquinas de electroerosión con electrodo de forma a las que la polaridad aplicada puede ser invertida, la polaridad en el proceso de electroerosión con hilo es constante, o sea que la "mesa" o marco donde las piezas son montadas para ser trabajadas es tierra; esto significa que es de polaridad negativa. El hilo, por consiguiente, es el componente mecánico al que la carga positiva es dirigida.



a)



b)

Figura 4.12. Arquitectura de una electroerosionadora de hilo

Todas las máquinas reciben un hilo a modo que éste se tensione en forma vertical (axial "Z"), para producir cortes y movimientos en axiales "X" e "Y". Mas en su mayoría, las máquinas de electroerosión con hilo tienen la capacidad de mover sus componentes para ajustar el hilo vertical y producir un ángulo limitado de corte (axiales "U" y "V"). En maquinaria más

elaborada, la electroerosión con hilo es posible mientras la pieza es rotada (cuarto axial de movimiento), esto significa que mientras la pieza está en un movimiento rotacional, otros movimientos axiales son simultáneamente posibles.

La eficiencia, exactitud y complejidad con que la pieza ha de ser trabajada es afectada por la calidad, condición y funcionalidad de la máquina a ser utilizada.

El tamaño del recipiente, contenedor del líquido, puede ser un factor determinante a cuantas piezas y tamaño de las piezas que pueden ser preparadas para el proceso.

4.5.3. Corte interno y externo

En el corte interno el hilo, sujeto por sus extremos comenzando por un agujero previamente taladrado y mediante un movimiento de vaivén, como el de una sierra, va socavando la pieza hasta obtener la geometría deseada.

En el corte externo el hilo puede empezar el movimiento desde el exterior del perímetro de la pieza hasta entablar el arco; continúa su movimiento hasta que consigue la periferia deseada.

4.6. VENTAJAS DE LA ELECTROEROSIÓN

A continuación se describen algunas de las principales ventajas de la electroerosión:

1.- No hay desviación de medidas



Cotas de la pieza nº 100



Cotas de la pieza nº 1000

MECANIZADO CONVENCIONAL



MECANIZADO CON EDM

2.- Ausencia de esfuerzos de mecanizado → Amarre sencillo



MECANIZADO CONVENCIONAL

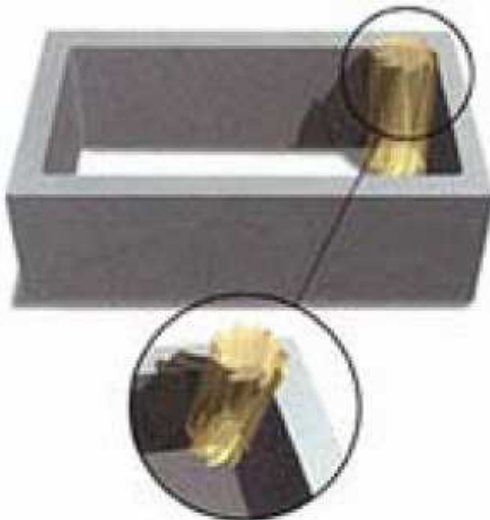


MECANIZADO CON EDM

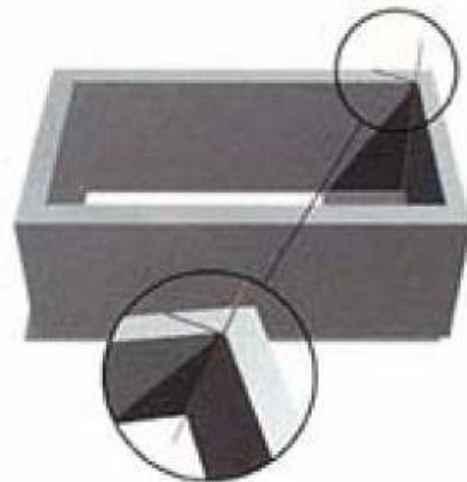
3.- Fácil mecanizado de materiales duros



4.- Mecanizado fácil de orificios cuadrados



MECANIZADO CONVENCIONAL



MECANIZADO CON EDM

5.- Menos tiempo de fabricación

MECANIZADO CON EDM

① 
Programación del perfil 15'

② 
Taladrado previo 5'

③ 
Mecanizado de desbaste y 2 acabados: 1 h 45'

④ 
Mecanizado del cuello: 10'

Tiempo de mecanizado: 2h
Tiempo de preparación: 15'
Tiempo total: 2 h 30'

MECANIZADO CONVENCIONAL

① 
Fresado de 2 caras.
Desbaste y acabado: 12'

② 
Desbaste del perfil exterior: 15'

③ 
Acabado del perfil exterior: 10'

④ 
Taladrado: 3'

⑤ 
Desbaste a $\varnothing 72$: 5'

⑥ 
Fresado de la ranura: 14'

⑦ 
Fresado de semiacabado a $\varnothing 73,5$ del agujero de $\varnothing 74$: 5'

⑧ 
Fresado de acabado a $\varnothing 74$: 5'

⑨ 
Ranurado nervaduras ("chaveteros"): 20'

⑩ 
Fresado de ranura de 3 mm : 15'

⑪ 
Acabado a espesor 25 mm : 3'

⑫ 
Eliminar rebabas de las aristas: 4'

Tiempo de mecanizado: 1 h 51'
Tiempo de preparación: 4h
Tiempo total: 5 h 51'

4.7. APLICACIONES

Algunas aplicaciones de este proceso son:

Moldes de plástico

– De precisión y alto volumen (mecheros, nebulizadores, móviles...)

- Matrices de corte
- Hileras de extrusión
- Estampas de forja
- Herramientas
- Matrices de sinterización

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

• Aplicaciones especiales

- Aplicaciones de producción
- Aviación
- Nuclear
- Etc.

4.8. PRECAUCIONES Y CONSIDERACIONES PREVENTIVAS

- El uso de corriente eléctrica, agua y alto voltaje presentan un peligro de electrocución.
- Es factible que chispas salten fuera del contenedor.
- Derrames durante el llenado y vaciado de tanque o el uso de líquido a presión.

Siempre se debe observar precauciones y consideraciones preventivas, y regulaciones dictadas por las buenas prácticas, por instructivos y manuales de las máquinas y demás equipo, y por el taller o fábrica de trabajo donde el proceso de electroerosión sea practicado

CAPÍTULO 5

COMPARACIÓN FINAL

Corte con plasma:

Hablando del proceso de alta densidad, también conocidos como sistema de alta definición, el corte por plasma puede brindar una variedad de velocidades y calidad de corte, dependiendo del material que se vaya a cortar, del espesor, de la calidad deseada del corte y de la velocidad de corte requerida que depende de la capacidad para ajustar el amperaje de la máquina

Una sencilla regla de dedo: mientras más potencia proporcione la máquina, más rápido cortará el metal. La velocidad de corte resulta menos afectada por el espesor del material que en otros procesos, de hecho el corte por plasma es efectivo para aluminio, particularmente aluminio grueso.

Debido a que el corte con plasma no es tan preciso como otras tecnologías de corte de metal, puede ser no capaz de entregar una serie de agujeros funcionales. El ancho mayor de la muesca afecta la definición de la parte, es por eso que la tecnología con frecuencia se equipara con el herramental de punzonado. Sin embargo, el corte con plasma de alta densidad puede proporcionar tolerancias de ± 0.010 pulg a ± 0.015 pulgadas en procesos estrechamente monitoreados.

Maquinado Láser

La mayoría de las máquinas de corte por láser encontradas en los talleres de fabricación en metal son impulsadas por un resonador de CO₂ y su potencia va de 1.5 kW a 6 kW.

En algún momento, los láseres se limitaron a cortar espesores pequeños, sin embargo, debido al surgimiento de resonadores láser más poderosos ahora se pueden utilizar para cortar aceros más gruesos, normalmente hasta de 1.5 pulg.

Las máquinas de corte láser son opciones populares en los talleres de fabricación porque estas cambian de un metal a otro realmente rápido y pueden manejar varios espesores con un simple cambio en el ajuste del foco. Los láseres tienen además una zona afectada por el calor muy pequeña debida a que rayo láser puede enfocarse muy estrechamente.

La tecnología de control del corte láser ha mejorado, haciendo el manejo del proceso de corte mucho más simple.

Los cabezales de corte se ajustan para mantener una altura constante mientras cortan. El foco cambia automáticamente cuando se introduce un nuevo material. Una longitud constante del rayo se mantiene en algunas máquinas con óptica volante, ayudando a brindar desempeños consistentes del corte. La entrega de gas auxiliar se ajusta conforme el láser se mueve a la siguiente estación. La mayoría de los sistemas vienen con cambiadores de estación básicos, que permiten a los operadores montar la siguiente hoja mientras que el corte continúa en otra.

Las máquinas de corte láser son herramientas de fabricación muy flexibles, capaces de entregar corte a tolerancias muy altas, pero también son dispositivos muy complejos. eso resulta en precios para las máquinas de \$400,000.00 a mas de \$1 millón. Con esa etiqueta de precio, no muchos talleres de fabricación estarían considerando una renta de dos años.

Corte con chorro de agua.

El corte con chorro de agua es adecuado para aquellos talleres que desear cortar una variedad de materiales, no sólo metales. El chorro de agua puede utilizarse para cortar materiales tan diversos como vidrio y hule.

Cuando se trata de metales, el corte por chorro de agua es popular porque produce un corte sin zona afectada por el calor. El material no se distorsiona alrededor del corte, por lo que el resultado final es un muy buen acabado superficial.

Una máquina de corte por chorro de agua puede cortar fácilmente chapa metálica delgada y hasta de 12 pulgadas de espesor, de ser necesario. Obviamente, conforme el chorro de agua corta materiales mas gruesos, las tolerancias bajan mientras que los tiempos de corte aumentan. La capacidad para hacer corte precisos es otro atractivo benéfico del corte por chorro de agua. Los fabricantes pueden cortar partes pequeñas con una tolerancia de ± 0.001 pulgadas o mejor, y partes grandes con una tolerancia de ± 0.003 pulgadas a ± 0.005 pulgadas.

la bomba del chorro de agua esta en el corazón del sistema de corte. Básicamente, mientras más pueda aumentar un fabricante la presión del chorro de agua, más rápido puede hacer el corte. Las bombas de accionamiento directo tienen una eficiencia de alrededor del 90% y pueden

producir hasta 55,000 psi. Las bombas intensificadoras más grandes tienen una eficiencia del 60% y pueden producir hasta 95000 psi.

Los avances en bombas y otras áreas, como la tecnología que permite que una boquilla se ajuste automáticamente durante el corte para una precisión mayor de la parte, han ayudado a hacer el corte por chorro de agua una tecnología mucho más competitiva. Cabezales múltiples de corte y preparación automatizada del material ayudan hacerla todavía más competitiva.

El precio de los sistemas estándar va de \$60,000 a \$300,000.

Electroerosión:

El rendimiento mecánico con electroerosión (EDM) es indudablemente bajo, necesiándose de 2 a 4kW para remover 1cm³ de material en 1 minuto, mientras que en un proceso de corte son suficientes 0.05kW.

No importa la dureza del material a elaborar, es suficiente que el material sea conductor de la electricidad. También. se pueden obtener formas muy complejas. La ausencia de esfuerzos mecánicos sobre la pieza que permiten elaborar trabajos delicados sin peligros de ruptura. Sin embargo, este proceso muestra los inconvenientes siguientes: La pieza debe conducir la electricidad. El proceso EDM es lento confrontado con los métodos mecánicos de otras máquinas herramientas. No es posible obtener ángulos absolutamente vivos. La electroerosión de fundición puede crear problemas en presencia de inclusiones de tierra.

Se pueden obtener errores de perfil inferiores a 0.003 mm

Para concluir, para seleccionar un proceso de corte, debe tomarse en cuenta lo siguiente:

1. El costo por parte y calidad de la parte cortada
2. El cliente o usuario final va a ser el juez de la calidad de la parte.

BIBLIOGRAFÍA

- Momber A. and Kovacevic R. “Principles of Water jet Machining” Springer-Verlang, Berlin 1998.
- Carl Olsen, Water jet Web reference, USA. www.waterjet.org
- Water as a tool for a clean environment, Alemania. www.woma.de
- Centro de investigación en manufactura avanzada, Southern Methodist University, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Richardson-Texas, USA.
www.engr.smu.edu/rcam/research/waterjet.
- http://www.carbueros.com/productos_sectores/metalfabricacion_laser.html
- Flow International Corporation, USA. www.flow.com.
- http://www.waterjet.se/es/product_technology.asp
- <http://ing-instalar.com.ar/procesos/plasma.html>
- <http://www.vier-electronica.com/amp/mas.pdf>
- <http://www.upmlaser.upm.es/videos/matriceria.mpg>
<http://www.youtube.com/watch?v=t5cg-7dJ0pM>
- Harry C. Moser. When do you need EDM? - electrical discharge machining - Emphasis: Electrical Discharge Machining. Modern Machine Shop. FindArticles.com. 30 Mar. 2008. http://findarticles.com/p/articles/mi_m3101/is_n9_v67/ai_16564321
- C. Diver et. al. Micro-EDM drilling of tapered holes for industrial applications. Journal of Materials Processing Technology 149, pp. 296–303. Elsevier, 2004.
- <http://www.tecnun.es/asignaturas/labfabricacion/LCSF/pdfs/Practica%20WEDM.pdf>