



# Universidad Nacional Autónoma de México

---

---



## “DISEÑO DE UNA BOQUILLA PARA CORTE POR CHORRO DE AGUA DE BAJO COSTO”

TESIS

PARA OBTENER EL GRADO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTAN:

JOSÉ LUZ CHÁVEZ GUTIÉRREZ

JOSÉ ROBERTO RODRÍGUEZ PAZ

DIRIGIDA POR:

M. I. ANTONIO ZEPEDA SANCHEZ

CODIRIGIDA POR:

M.I. ROSA ITZEL FLORES LUNA

### Dedicatoria.

Dedico esta tesis a mi mamá Sara Gutiérrez por todo el apoyo incondicional que me dio a lo largo de mi vida, por enseñarme a disfrutar las pequeñas cosas de la vida, por ser como una hermana para mí, por ganarte mi confianza para contarte mis secretos, mis aventuras y locuras, por llenar mi vida de hermosos recuerdos, por forjar a la persona que ahora soy.

Por qué motivaste mis más grandes sueños y anhelos para conseguir mis objetivos y agradezco todo el esfuerzo y sacrificio que hiciste por sacarme adelante.

### Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial a mi padre José Luz Chávez por apoyarme en todo momento, por estar ahí cuando más te necesite, por enseñarme a dar lo mejor de mí y no renunciar, por enseñarme a ser humilde y ser más independiente, por aconsejarme en los momentos más cruciales de mi vida.

Quiero agradecer a mi abuelita Luisa por llevarme a la primaria cuando mamá estaba enferma, por cuidarme cuando mis padres estaban en el trabajo, por enseñarme que primero era la escuela y luego el entretenimiento.

Quiero darle las gracias a mi abuelo León por enseñarme que hasta el trabajo por más pequeño que sea debes de dar lo mejor de ti.

Quiero agradecerle a mis amigos de “La escuadra” Paulina, Sandra, Noemí y Eddy que me aceptaron tal cual soy, por estar en los momentos más locos de mi vida, por esas aventuras que no creía que será capaz de hacerlas, por darme ese apoyo incondicional todos estos años por enseñarme que los amigos se pueden convertir en hermanos.

A mis amigos de la Universidad Pina, Karina, Tania, Andrea, Maricela, Adriana, Karen, Karina D., Dulce, Juan José, Christian, Isaac, Roberto O., Rafael, Miguel, Ricardo, David, Eduardo, Víctor, Ángelo, Jorge, Miguel A., por estar conmigo por explicarme una y otra vez lo que no comprendía, por esas horas de diversión y estrés de los proyectos, por hacer más amenas las clases que compartimos.

También quiero darte las gracias a ti Roberto Rodríguez Paz por ser como el hermano mayor que nunca tuve, por enseñarme a comprender lo dura que puede ser la vida, por enseñarme a no darme por vencido, por extenderme la mano para levantarme y seguir adelante incontables veces, por confiar en mí para lograr esta tesis.

Y un reconocimiento especial a mí Director de tesis M. I. Antonio Zepeda Sánchez y Codirectora de tesis M.I. Rosa Itzel Flores Luna por haberse interesado en este proyecto, por las ideas sugeridas, la supervisión y el seguimiento continuo de este mismo pero sobre todo por el apoyo y la motivación a lo largo de estos años.

Gracias.

## Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres, Elsa Libertar Paz Neri y José Lucio Rodríguez Tapia, por enseñarme a valorar, apreciar y dedicar tiempo a cada una de las etapas de mi vida, mostrándome su apoyo incondicional en cada una de ellas que se presentaron a lo largo de estos 25 años y que jamás perdieron la confianza en mí como persona, alumno y trabajador.

Estoy totalmente agradecido porque el valor más grande que me han dejado en mi vida, que es la educación, siempre con esfuerzo, tiempo y dedicación hacia mí.

También a mi hermana Aranza Fabiola Rodríguez Paz por el cariño, apoyo y ánimos que siempre me dio de forma incondicional, aunque seas menor de edad, igualmente he aprendido cosas valiosas que me han servido en la vida para seguir adelante.

Además de mi familia, quiero dedicar este trabajo a mi tío Roberto Paz Neri, que también es una persona importante en mi formación profesional, siempre enseñándome grandes cosas, entre ellas a superarme y ser mejor cada día.

## Agradecimientos

Quiero hacer un agradecimiento especial a todos y cada uno de mis familiares, pero en particular a mí abuela María del Refugio así como a mi tía Martha por los consejos, experiencias y vivencias compartidas durante los 25 años de vida.

A mis amigos, Georgina Talancón, Wintila Slema, Oscar Eduardo, Abraham Sleman, Rodrigo Charpenel y Alejandro Pineda, por todo consejo, apoyo, vivencia y experiencias realizadas y compartida en todos estos años.

José Luz Chávez, quiero agradecerte de igual manera ya que sin ti, este trabajo no se hubiera realizado jamás. Además quiero darte las gracias por hacerme ver la vida como niño, demostrando siempre una sonrisa ante todo, la cual había olvidado por completo

Mis amigos de la universidad, Miguel Ángel Martínez “Zurdo”, Archundia, Marisela, Andrea y Karina porque de la misma manera en la cual tuvieron la paciencia para explicarme las cosas y realizar grandes trabajos a mi lado, saben que pueden contar de la misma manera conmigo.

Agradezco por completo a mí Director de Tesis, M. I Antonio Zepeda y a mi codirectora M. I Rosa Itzel Flores Luna, debido a su apoyo, compromiso, supervisión y continuo seguimiento de este trabajo, se pudo llevar acabo.

Gracias.

## INDICE

<i>Introducción.....</i>	<i>1</i>
<i>1. Procesos de corte en placas .....</i>	<i>2</i>
<i>2. Planteamiento del problema. ....</i>	<i>18</i>
<i>3. Consideraciones de diseño de una boquilla para corte por chorro de agua. ....</i>	<i>19</i>
<i>4. Diseño de configuración de una boquilla para una cortadora por chorro de agua..</i>	<i>44</i>
<i>5. Diseño de detalle de la boquilla. ....</i>	<i>53</i>
<i>6. Resultados .....</i>	<i>61</i>
<i>7. Conclusiones.....</i>	<i>62</i>
<i>BIBLIOGRAFÍA .....</i>	<i>64</i>
<i>Anexos.....</i>	<i>67</i>

## Introducción

El presente documento se elaboró para obtener el diseño de detalle de una boquilla para una cortadora por chorro de agua. La necesidad surge debido a las necesidades más comunes que existen en la Facultad de Ingeniería, el cortar piezas de aluminio debido a que presenta propiedades mecánicas que son favorables para el mecanizado, el moldeado, en la creación y desarrollo de proyectos.

El diseño es planteado, para que posteriormente se llegue a la fabricación de la boquilla y esta pueda ser utilizada en la cortadora por chorro de agua que se encuentra en el Centro de Ciencias aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), optimizando el costo de la utilización de la cortadora por chorro de agua.

En este trabajo se realizaron investigaciones de los tipos de cortes en placas a utilizar, dando como resultado que el corte por chorro de agua (WJC por sus siglas en inglés), tiene mayores beneficios. Es un proceso de corte energético que consiste en desbastar material, empleando como herramienta un hilo de agua de alta presión y velocidad. Entre las ventajas que tiene el proceso frente a otros procesos de corte, está que es posible cortar cualquier material con alta velocidad de corte y la pieza de trabajo no presenta alteraciones estructurales.

Así mismo se realizaron ensayos de dureza a boquillas previamente utilizadas en una cortadora, analizando a grandes rasgos las propiedades mecánicas que estas deberían tener para la aplicación en los requerimientos del proceso de corte de un material.

El contenido del documento, se desglosa en 4 capítulos. El capítulo 1, describe los procesos de corte en placas, comparación entre ellos y por qué el proceso de WJC es el recomendable a utilizar; en el capítulo 2, se define el problema y se presentan las necesidades para generar un corte adecuado, así mismo se exponen cuáles son los objetivos y alcances de esta tesis. En el capítulo 3 se exponen las consideraciones de diseño que se deben tomar en cuenta para elaborar el diseño de detalle. Por último en el capítulo 4 se describen las especificaciones de diseño de detalle, con los resultados de los estudios previamente realizados y los resultados obtenidos; en función de ellos, se establecen las conclusiones y el trabajo a futuro. Al final se presentan las referencias utilizadas.

# 1. Procesos de corte en placas

## 1.1 Corte por electroerosión

### 1.1.1 *Historia*

Desde que la electricidad comenzó a dar sus primeros pasos se observó el efecto destructivo producido por la chispa eléctrica al saltar entre dos contactos en el momento de su separación. Este efecto incitó a numerosos científicos a profundizar en su investigación, con el fin de evitarlo, y a ello, unido a una necesidad de la época de buscar un método nuevo de mecanizado diferente a los convencionales que utilizaban herramientas mecánicas, llevó a la idea de utilizar el citado efecto destructivo como método de reproducción de formas.

El maquinado por electroerosión o electro-descargas ha estado presente desde hace más de 45 años. En sus inicios se le consideró como un método para maquinado de metales, que en poco tiempo se convertiría en obsoleto. 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 (McGeough, 1988), de 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 maquinado por electroerosión o electro-descargas en 1944 (Rodríguez, 2007).

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 las máquinas descritas por los Lazarenko usaban un soporte para el electrodo que era controlado por un servomotor, 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, como se muestra en la figura 1.1. Todas estas diferencias hicieron al proceso más eficiente y es de hecho sobre ese principio de funcionamiento, el cual desarrolló la tecnología actual de la electroerosión de penetración (Rodríguez, 2007).

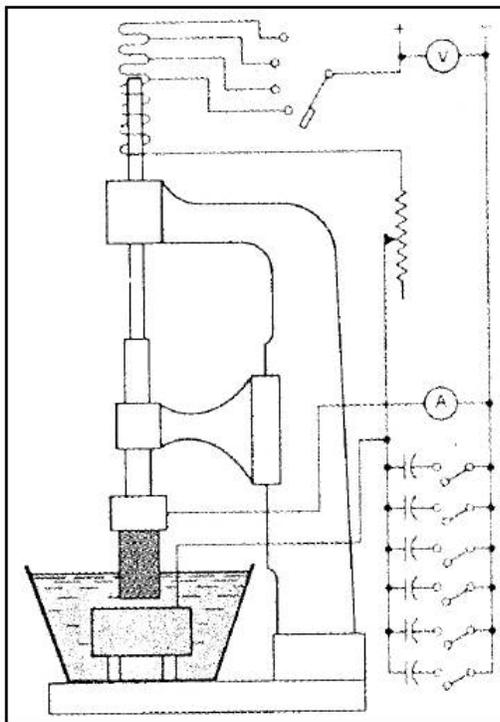


Figura 1.1. Principio del maquinado por electroerosión (Castillo, 2007)

Durante los cinco años posteriores a la invención de los Lazarenko, se desarrolló de manera rápida el proceso de maquinado por electroerosión. La idea de usar corriente directa pulsante se adoptó, ya fuera utilizando un circuito con resistencia-capacitor, línea de corriente alterna rectificadas o, en el último de los casos, usando un alternador manejado por un motor de alta frecuencia.

### 1.1.2 Descripción del proceso de corte por electroerosión

La electroerosión es un proceso de fabricación, también conocido como Mecanizado por Descarga Eléctrica (EDM por sus siglas en inglés). El proceso de electroerosión consiste en la generación de un arco eléctrico entre una pieza y un electrodo en un medio dieléctrico, para arrancar partículas de la pieza hasta conseguir reproducir en ella las formas del electrodo, como se muestra en la figura 1.2. Tanto la pieza como electrodo, deben ser conductores, para que pueda establecerse el arco eléctrico que provoque el arranque de material (McGeough, 1988).

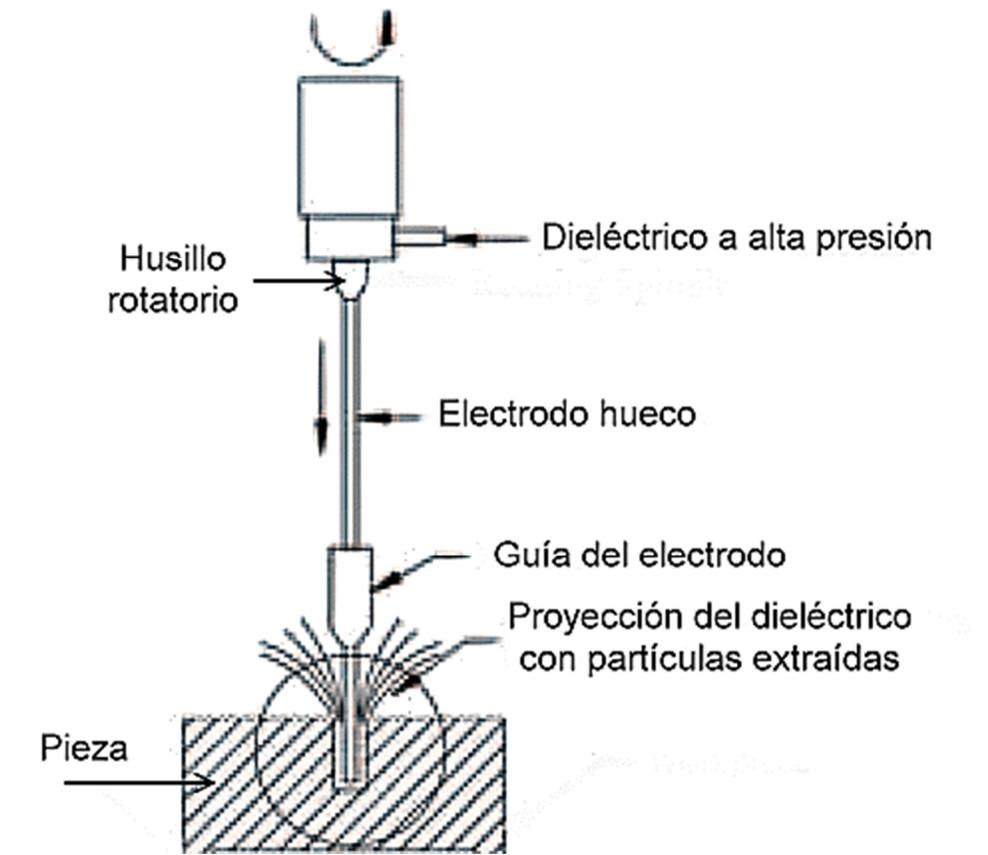


Figura 1.2 Proceso de electroerosión nivel microscópico (herramientas, 2015)

Los elementos básicos de cualquier sistema de electroerosión convencional o de corte por alambre son:

- El dieléctrico.
- Electrodo.
- Fuente de suministro de potencia o fuente de poder y
- Un sistema de control (normalmente servo-controlado).

La figura 1.3 muestra el sistema que sirve para el movimiento del electrodo y es el que determina cuando debe avanzar y cuando debe detenerse el electrodo, de acuerdo a las condiciones de la zona de arco (Rodríguez, 2007).

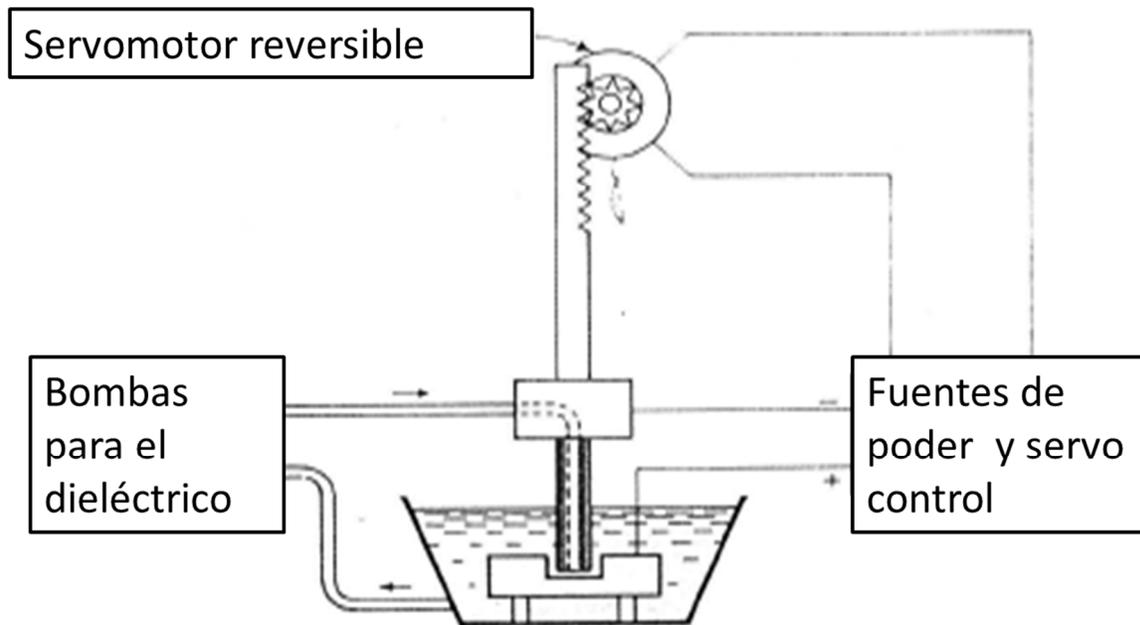


Figura 1.3. Sistema de maquinado por electroerosión (Rodríguez, 2007)

La pieza de trabajo es montada dentro del tanque, conectada a la terminal de la fuente de poder y cubierta con el líquido dieléctrico, usualmente un aceite ligero. El electrodo se aproxima en forma descendente hasta quedar a unas cuantas milésimas de pulgada de separación, entonces se pone en marcha la bomba del dieléctrico así como la fuente de poder y el servomotor. Durante todo el proceso de corte el electrodo es manejado por el servomotor que lo mantiene a una distancia constante de la pieza de trabajo.

La fuente de poder genera una diferencia de potencial entre el electrodo y la pieza de trabajo, cuando esta distancia es la correcta, permite apenas el paso del líquido dieléctrico provocando entonces un arco eléctrico, saltando una chispa iniciándose el proceso de electroerosión. Si no se produce la chispa, el servomecanismo se aproximará más al electrodo para un nuevo intento, si el electrodo toca a la pieza de trabajo, se producirá un corto circuito, el servomotor alejará al electrodo y lo pondrá a la distancia adecuada.

La duración de arco eléctrico es muy corta, ya que suele variar desde 1-2 [ms], según los regímenes de mecanizado, y va acompañada de un gran aumento de temperatura que suele alcanzar hasta decenas de miles de grados centígrados; produciendo una pequeña erosión al fundir parte de la superficie de la pieza de trabajo y formando pequeños cráteres, el metal se solidifica en forma de pequeñas esferas que quedan suspendidas en el líquido y de no ser removidas afectarán la estabilidad del arco, por lo que es necesario eliminarlas, para eso se utiliza una bomba de succión y un filtro.

La erosión de la pieza se da cuando el electrodo va avanzando de posición hacia la pieza de trabajo aunque estos nunca deben tocarse. Normalmente la distancia entre el electrodo y la pieza de trabajo es de algunas milésimas de pulgada dependiendo de los parámetros que se tengan en la fuente de poder (McGeough, 1988).

### *1.1.3 Proceso de electroerosión por hilo*

Es un desarrollo del proceso anteriormente descrito, nacido en los años de la década de los 70's, y por consiguiente, más moderno que el anterior, que sustituye el electrodo por un hilo conductor; además, este proceso tiene mejor movilidad.

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, ya que el acabado que este proceso deja en la pieza, pueda ser mejorado, cuanto más pases semirrepetitivos de corte sobre la misma superficie son ejecutados (Solà, 1989).

En la electroerosión por hilo conductor, Wire Electrical Discharge Machining (WEDM), normalmente de latón, se utiliza como electrodo. El hilo pasa por unas guías imponiéndole la dirección que debe seguir como se muestra en la figura 1.4. Las descargas se producen por la diferencia de potencial existente entre el hilo y la pieza que obviamente debe ser de un material conductor de la electricidad. El hilo circula continuamente, entre el hilo y la pieza existe un canal, llamado de descarga, bañado por un fluido dieléctrico, que generalmente es agua. El dieléctrico (aceite de baja conductividad) es introducido entre el hilo y la pieza con el objetivo de ayudar al salto y calidad de las chispas. El mantener una distancia correcta entre hilo y pieza es el punto más importante para tener un correcto mecanizado y conseguir precisión.

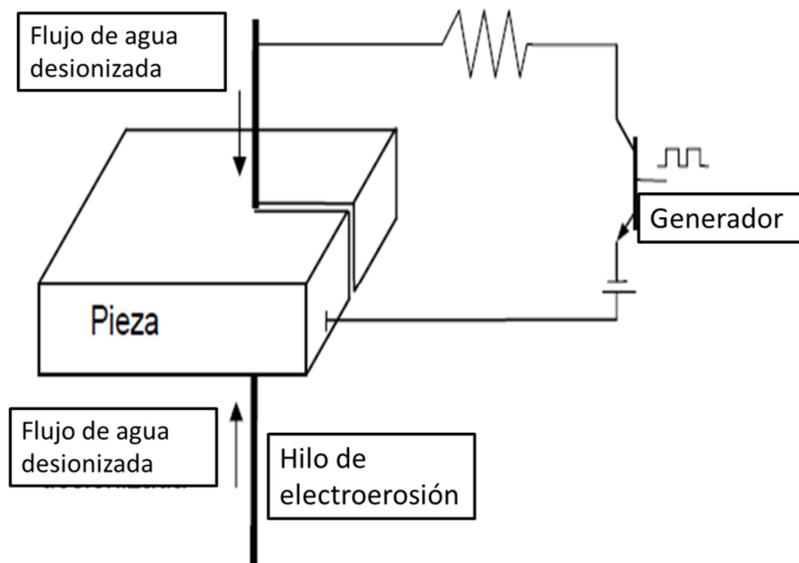


Figura 1.4 Maquinado por electroerosión por hilo (S.J., 2014)

La tensión mecánica a la que está sometido el hilo de corte se puede seleccionar desde un nivel 0 al 31. Entre la boca superior e inferior, con un nivel de tensión de hilo programado de 16 debe existir alrededor de 1 [kg] de tensión mecánica en el hilo, en la zona anterior al freno deben existir alrededor de 300 [gr]. El incremento de la tensión del hilo reduce la resistencia del mismo al desgaste producido por las chispas y aumenta el riesgo de rotura. El valor de la tensión mecánica no tiene influencia sobre la tasa de arranque o la rugosidad. Se recomienda utilizar valores altos de la tensión del hilo en los procesos de repaso en este caso el hilo está poco solicitado y se puede aumentar la tensión mecánica a fin de mejorar la verticalidad de las piezas.

Durante la erosión se produce un desgaste del hilo, debido a las sucesivas chispas que tienen lugar a lo largo de la pieza. Conforme aumenta la altura de la pieza, un mismo tramo de hilo puede chispear un mayor número de veces incrementándose el desgaste y por lo tanto aumentando el riesgo de rotura. En piezas de gran espesor se recomienda aumentar la velocidad de hilo con la finalidad de homogeneizar el desgaste. La velocidad de hilo no tiene influencia sobre la distancia o diferencia excesiva que existe entre los elementos de trabajo conocida como brecha (*gap*), velocidad de erosión ni rugosidad, pero con valores bajos de velocidad de hilo aparecen problemas de conicidad en las piezas y aumenta el riesgo de rotura.

## 1.2 Corte por Láser

### 1.2.1 Historia

En 1917 la descripción de Albert Einstein sobre el principio de la emisión estimulada da origen al teorema del trabajo preliminar para la física láser que aún, hoy en día, es válida. Décadas después en 1960 Theodoro H. Maiman, construyó el láser de rubí, hecho que produjo una inundación de ideas de cómo usar esta tecnología, la mayoría de ellas con poco éxito pues no pudieron ser puestas en práctica (GmbH, 2008).

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 Bázov 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, Bázov y Prójorov 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.

Posteriormente a principios de los años 70's, el láser fue integrado en primera instancia a una máquina herramienta de corte; contribuyendo así a la aceptación de la nueva tecnología; para que a mediados de la década de los 80's se desarrollaran las primeras unidades de láser para corte de alto rendimiento y capacidad para seccionar material grueso a altas velocidades.

Ya en el siglo XXI, científicos de la Universidad de St. Andrews crean un láser que puede cortar 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 (Castillo, 2007).

### 1.2.2 Proceso de corte por láser

El primer paso para el corte de una pieza es, concentrar un rayo del láser en un punto único, cuyo diámetro es usualmente menor a 0.5 [mm]. Así, cuando el centro de éste punto es tocado por el rayo láser, el metal empieza a fundirse de inmediato, quemarse o vaporizarse para dar inicio y de manera continua al corte a lo largo de la pieza. En este proceso el metal fundido y sus residuos son expulsados hacia abajo, dando como resultado un corte que se va abriendo al tiempo en que el rayo pasa. Para calcular el punto de penetración, se debe tener en cuenta que éste se sitúa a una distancia media del contorno de la pieza a cortar, puesto que el agujero que deja el láser tiende a ser más ancho que el grosor de la luz que produce. Después del corte del material, el rayo láser realiza contorno por contorno, de adentro hacia afuera y después de alcanzado el contorno, empieza a darle una forma

específica. Cabe destacar que las secciones de adentro de la pieza son cortadas siempre antes que las externas. A continuación la figura 1.5 muestra el esquema de la cortadora laser.

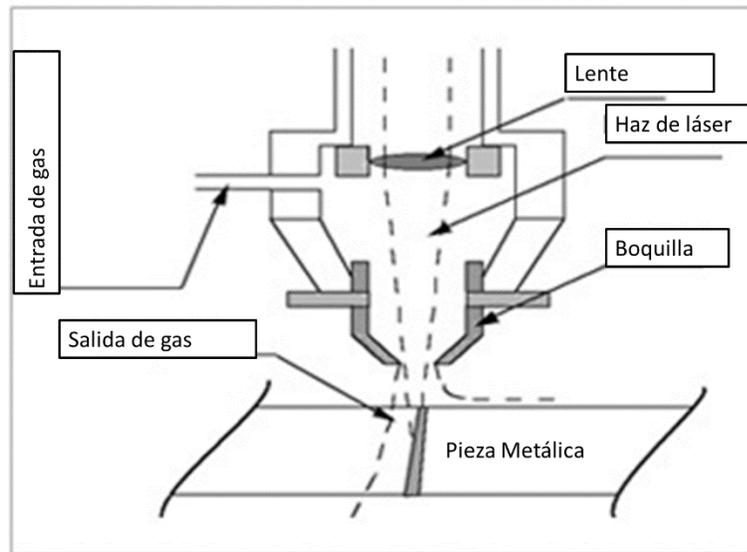


Figura 1.5 esquema de cortadora laser (SAMCA, 2014)

## 1.3 Corte por plasma

### 1.3.1 Historia

En los años 20's los primeros trabajos de laboratorio con plasmas se debieron a Langmuir y Tonks (Langmuir, 1929). Ellos fueron inspirados por la necesidad de desarrollar tubos de vacío que pudieran conducir corrientes elevadas.

Para 1940 la industria de defensa de Estados Unidos descubre un nuevo proceso de soldadura en la investigación de mejores formas para la unión de metales. El proceso, al que normalmente se hace referencia como el proceso de soldadura tungsteno gas inerte (TIG sus siglas en inglés), o soldadura por arco de tungsteno (GTAW sus siglas en inglés), implica alimentar un gas inerte a través de un arco eléctrico (Hypertherm, 2014).

Los científicos en 1954 descubren que aumentando el flujo del gas y reducir la abertura de la boquilla utilizada en TIG, se obtiene un chorro de plasma, capaz de cortar metales, llamándolo proceso de corte por plasma (Guerrero, 2009). Este chorro es capaz de cortar metal, sin embargo, la técnica no llega a usarse ampliamente a causa de un fenómeno denominado doble arco, que daña el electrodo y la boquilla de corte. En un intento por controlar el doble arco, en 1962, se introduce una técnica de flujo doble. La técnica implica agregar un segundo gas de protección alrededor de la boquilla corte. Aunque en menor medida, el doble arco sigue siendo un problema (Hypertherm, 2014).

Se introduce para el año de 1963 el corte por plasma mediante aire. El oxígeno del aire aumenta las velocidades de corte en un 25 por ciento (25%) en relación con el corte por plasma tradicional seco, sin embargo, también conlleva una superficie de corte muy oxidada y una rápida erosión del electrodo que está dentro de la boquilla de corte (Hypertherm, 2014).

En 1972 mejora la seguridad del corte por plasma al desarrollar un silenciador de agua y una mesa de agua que reducen el ruido, el humo y los destellos que se producen en el proceso de corte. Se presenta para el año de 1972 una nueva técnica, que implica la utilización de oxígeno como gas de corte y la introducción de agua por la punta de la boquilla. Este proceso denominado “Corte por plasma con inyección de oxígeno” ayuda a solucionar los problemas del rápido deterioro de los electrodos y la oxidación del metal encontrados (Hypertherm, 2014).

Para 1977 se desarrolla la tecnología de corte bajo agua, lo que permite el corte por plasma debajo de 2 - 3 [in] de agua. En 1990 de igual manera se desarrolla el sistema de corte por plasma, el primero de la industria, que puede cortar con éxito hasta  $4\frac{1}{2}$  [in] de metal bajo 15 [ft] de agua. Este avance ayuda a la industria nuclear a dismantelar antiguas plantas de energía. Los siguientes dos años se introdujo la tecnología HyDefinition, un gran adelanto que ayuda a hacer cortes de mejor calidad a mayores velocidades. Al mismo tiempo, sale al mercado una boquilla ventilada de dos piezas, que estabiliza el arco de plasma precisamente en el centro del electrodo. Como consecuencia, se aumentan la duración de la boquilla y el electrodo (Hypertherm, 2014).

### 1.3.2 *Proceso de corte por plasma*

El corte por plasma, como se muestra en la figura 1.6, 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.

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

Si se reduce la sección por donde pasa la corriente esto genera y aumenta la resistencia, provocando un calentamiento del gas alcanzando temperaturas muy elevadas y velocidades muy altas, aproximadamente a la velocidad del sonido. Este proceso separa metal empleando un arco constreñido para fundir un área localizada de la pieza de trabajo, que al mismo tiempo elimine el material derretido con un chorro de alta velocidad de gas ionizado que sale por el orificio de constricción. El gas ionizado es un plasma, de ahí el nombre del proceso. Los arcos de plasma por lo regular operan a temperaturas de 10,000° a 14,000° [C].

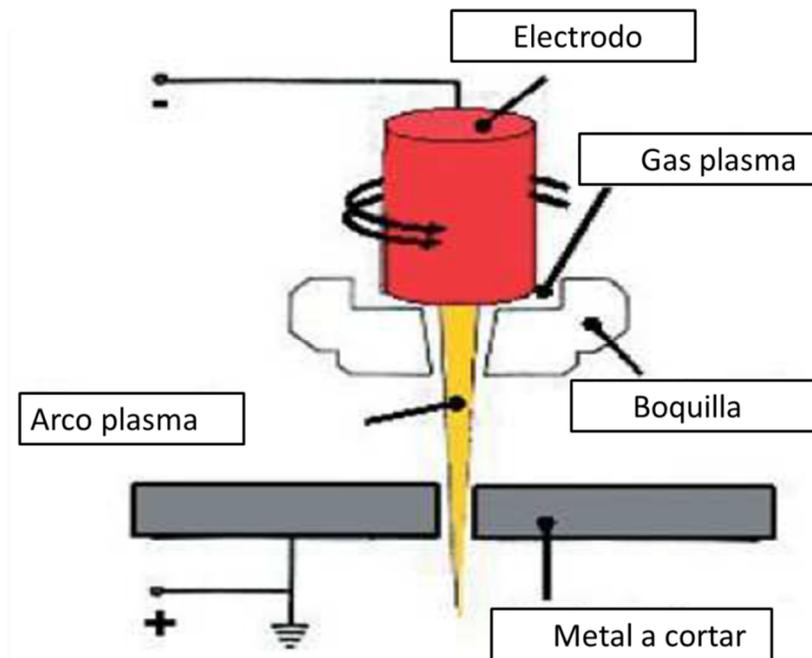


Figura 1.6 Proceso de corte por plasma (Interempresas Metalmecánica, 2003)

Un plasma de arco es un gas que ha sido calentado por un arco hasta alcanzar un estado de por lo menos ionización parcial, lo que le permite conducir una corriente eléctrica. En cualquier arco eléctrico existe un plasma, pero el término arco de plasma se aplica a sopletes que utilizan un arco constreñido. La principal característica que distingue a los sopletes de arco de plasma de otros sopletes de arco es que, para una corriente y tasa de flujo de gases dados, el voltaje del arco es más alto en el soplete de arco constreñido. El arco se constriñe haciéndolo pasar por un orificio situado en el electrodo.

La intensidad y la velocidad del plasma dependen de cierto número de variables, entre las que están el tipo de gas, su presión, el patrón de flujo, la corriente eléctrica, el tamaño y la forma del orificio y la distancia respecto a la pieza de trabajo.

El proceso trabaja con corriente continua, de polaridad recta. El orificio dirige el chorro de plasma sobrecalentado desde el electrodo hasta la pieza de trabajo. Cuando el arco funde la pieza de trabajo, el chorro de alta velocidad expulsa el metal derretido para formar el corte. El arco de corte se conecta o "transfiere" a la pieza de trabajo, por lo que se conoce como arco transferido.

Este proceso permite mecanizar a altas velocidades de corte y produce menos tiempos muertos, (no se necesita precalentamiento para la perforación). Permite espesores de corte de 0.5 a 160 [mm], con unidades de plasma de hasta 1000 [A]. El corte por plasma también posibilita mecanizados en acero estructural con posibilidad de biselados hasta de 30 [mm].

## 1.4 Corte por Chorro de Agua

### 1.4.1 Historia

La tecnología de chorro de agua tiene su origen en la minería hidráulica, en la que una corriente de agua de alta velocidad se utiliza para romper el suelo y la roca, se remonta a finales del siglo XIX. La Minería hidráulica se utiliza en la extracción de oro en California 1853-1886. En la segunda década del siglo XX, estos sistemas se desarrollaron inicialmente para la preparación y limpieza de superficies, la función del agua fue meramente de limpieza: desengrasado de pistas de aterrizaje, lavado de almacenes de carbón, eliminación de aceite, polvo, corrosión o escamas de diversos materiales y otras aplicaciones similares. En aquella época se trabajó a una presión de 10 [MPa]. Sin embargo, la tecnología de chorro de agua moderna puede rastrearse directamente al desarrollo de la bomba de alta presión en la década de 60's (Villar, 2014). De acuerdo con Franz (Summers, 1995), se desarrolló un sistema prototipo para material de corte a presiones de hasta 400 [MPa] y encontraron que los chorros de agua de alta velocidad podrían usarse para cortar a través de los productos de madera relativamente a altas velocidades. Imanaka y Col. en 1972 desarrollaron una bomba de alta presión, llevado a cabo pruebas de corte en diversos materiales con presiones de chorro de hasta 1 [GPa].

Por otra parte, los estudios sobre el mecanismo de eliminación de material por la incidencia de las gotas de agua se iniciaron en la década de 1950 con los estudios de erosión provocada por la lluvia en los componentes de los aviones. Posteriormente se publicó un amplio estudio sobre la erosión asociada con un impacto líquido (Kovacevic, 1998). El desarrollo de la bomba de alta presión y la aclaración de la eliminación del mecanismo de material de gotas de agua trajo un creciente interés y aplicación en el chorro de agua de alta velocidad. Pero fue hasta 1980 donde se presentó en la sexta feria Internacional Simposio sobre Jet Cutting Technology, donde, gracias a la adición de partículas de arena abrasiva al chorro de agua fue posible cortar y perforar las propias barras de hierro y acero (Shimizu, 2011). En 1986, Fairhurst informó de un sistema de chorro de agua abrasivo de un tipo diferente, que ahora se conoce como, chorro abrasivo de suspensión de agua (ASJ, sus siglas en inglés) ha demostrado que tienen una mayor capacidad de perforación y de corte que el chorro de agua abrasivo convencional. Sin embargo, hay un número de problemas que quedan por resolver antes de la aplicación generalizada del sistema de chorro de suspensión abrasiva para poder ser realizado.

Como el corte por chorro de agua se trasladó a las tiendas de fabricación, el control de la cortadora debía ser fiable y preciso en esencia. Sistemas de corte por chorro de agua fueron adaptados a sistemas tradicionales como los pantógrafos mecánicos y sistemas de control numérico basados en los equipos de John Parsons (fresadora NC 1952) y en funcionamiento del código G. Retos inherentes a la tecnología de chorro de agua revelaron las deficiencias del G-Código, como la precisión depende de la variación de la velocidad de la boquilla y cuando se aproxima a esquinas y detalles esta misma era ineficiente. La creación de sistemas de control de movimiento para incorporar esas variables se convirtió en una importante innovación para los principales fabricantes de chorro de agua a principios de 1990, con el Dr. John Olsen de OMAX Corporación de desarrollo de sistemas para posicionar con precisión la boquilla de chorro de agua mientras se especifica con la velocidad en cada punto a lo largo del camino, y también utilizando PCs comunes como un controlador.

El fabricante de chorro de agua más grande, Flow International, reconoce los beneficios de este sistema de licencia y el software OMAX, con el resultado de que la gran mayoría de máquinas de corte por chorro de agua en todo el mundo son simples de usar, rápido y preciso (Franz, 2014).

En la tecnología de chorro de agua, los propósitos de una corriente de agua a alta velocidad se utilizan para la limpieza y corte. Ahora, la tecnología moderna de chorro de agua tiene una historia de más de 40 años y se ha utilizado en una amplia gama de aplicaciones prácticas. Estos incluyen el mecanizado, fabricación, corte de piedra, los trabajos de demolición, preparación de la superficie, la roca, suelo de excavación, minería, agricultura, tratamiento de alimentos y aplicaciones médicas. En un ordinario proceso de corte por chorro de agua, una bomba de alta presión suele estar entre los rangos de 300 hasta 400 [MPa]. La fricción y el desgaste entre el cilindro y el pistón son importantes problemas que tienen una influencia significativa en la eficiencia, la fiabilidad y la vida útil de la bomba de alta presión. La corrosión y erosión en las válvulas y boquillas son problemas graves ya que afecta la fiabilidad del sistema del chorro de agua. El mecanismo de eliminación de material primario de chorros de agua es la erosión generada por el choque de gotas de agua. La erosión por impacto de partículas sólidas es el mecanismo de eliminación de material abrasivo del mecanizado por chorro de agua. Equipos para procesos de inyección de agua y los mecanismos de limpieza y de corte por chorro de agua están directamente relacionados con la tribología (Shimizu, 2011).

#### *1.4.2 Proceso de corte por chorro de agua*

El corte por agua puede ser clasificado como un método mecánico. La energía del movimiento rápido de corte, es utilizada tanto en el corte con agua, como en el corte con abrasivo, y después es aplicada a la pieza de trabajo produciendo micro erosión. El corte por agua trabaja como un agente refrescante en el borde del corte, permitiendo así un corte de muy alta calidad. El único componente sin el cual no se podría dar el corte por chorro de agua, es la bomba de alta presión.

Las bombas de accionamiento directo ofrecen grandes volúmenes de agua a presión. Sus principales áreas de aplicación son aquellas que requieren un corte de gran exactitud. Para aplicaciones de corte se utilizan las llamadas bombas con intensificador. La presión se obtiene a través de un circuito primario de aceite y una bomba de caudal variable. Esta presión se multiplica posteriormente por 20 en el intensificador para transportar el agua a través de tuberías especiales para alta presión, las cuales son parcialmente flexibles permitiendo los movimientos al cabezal de corte. El cabezal consiste en una válvula de aguja pilotada neumáticamente y un tubo colimador, al final del cual, se monta un orificio de forma cónica (normalmente diamante o zafiro) montado con una tuerca con la geometría del zafiro. Es aquí donde se consiguen velocidades Mach 2-3.

Para aplicaciones de abrasivo, debajo del orificio del agua, se utiliza un cabezal especial de Abrasivo para mezclar la arena con el agua de alta presión.

El movimiento del cabezal de corte está normalmente controlado por un control CNC en la mesa de corte. El material se coloca en una reja encima del tanque de agua, que sirve para capturar la energía del corte cuando sale de la pieza de trabajo. En la mayoría de los casos, el agua del grifo puede ser usada como medio de corte. En algunos casos, se aplica agua blanda, no debería usarse el agua

destilada que es extremadamente pura, ya que sin iones disueltos, el agua tiende a reaccionar con los componentes de alta presión (mangueras, boquilla, cilindros), causando excesivo desgaste.

Para aplicaciones con abrasivo, el sistema de transferencia y el alimentador de arena, son parte de la máquina, así como posiblemente un limpiador de arenas y unidad de reciclaje en algunos casos.

La figura 1.7 muestra el esquema del equipo por chorro de agua.

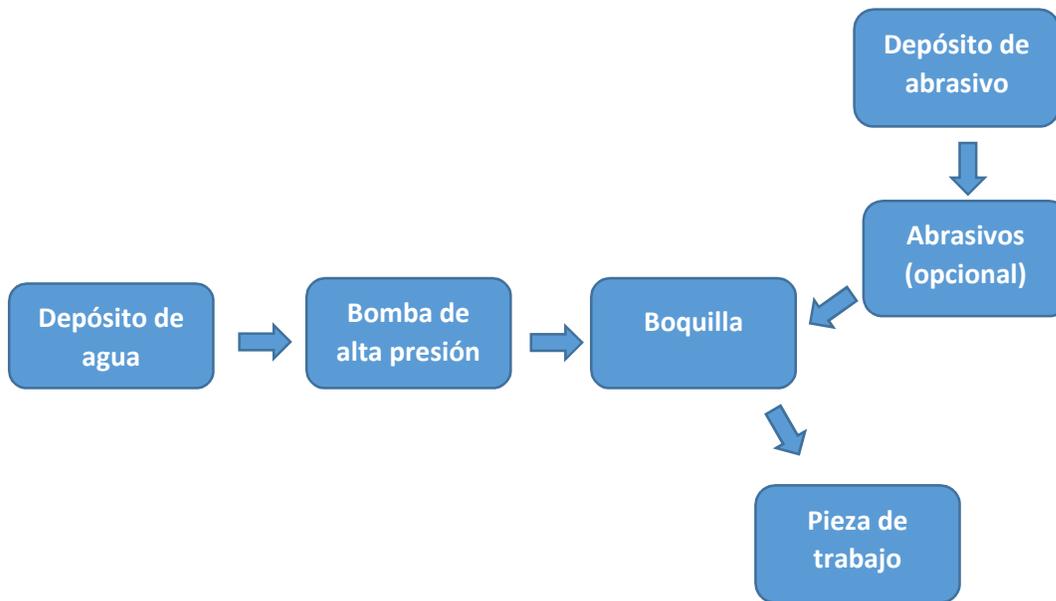


Figura 1.7 Esquema de equipo por chorro de agua

## 1.5 Tabla comparativa y justificación de la cortadora por chorro de agua WJC

A continuación se menciona en la tabla 1.8 las características de cada proceso de corte, sus beneficios y desventajas de cada uno de ellos, dicha tabla fue realizada y comparada con diferentes empresas y equipos. A continuación empresas relevantes:

1. Lincoln Electric (plasma) - Invertec® PC210 - K12038-1
2. KMT Water Jet Cutting (chorro por agua) – Cabezal de Agua AUTOLINE II
3. Flow (chorro por agua) – Cortadora Serie MACH 1 a 3
4. Kaitian laser (láser) – Serie X, Modelo CF0706.
5. Mitsubishi (edm) – MD + PRO III
6. Mitsubishi (láser) – 2D CO2 LASERS, FIVE –AXIS CO2 LASER.

Tabla 1.8 Características de Cortes (Franz, 2014), (KMT Waterjet, 2014), (Electric, 2014), (Flow, 2014), (Hypertherm, 2014), (Laser, 2014), (Systems, 2014)

				
	Corte por agua	Plasma	Láser	EDM
<b>Proceso</b>	Proceso de erosión: líquido de alta velocidad	Proceso de quemar/fusionar con gas arco de alta temperatura ionizada	Proceso de fusión usando luz de láser concentrado	Proceso de erosión usando descarga eléctrica
<b>Materiales</b>	Cualquier tipo de material	Principalmente acero, acero inoxidable y aluminio	Puede cortar una variedad de materiales, cerámicos, no-metálicos	Sólo materiales conductores.
<b>Grosor</b>	Hasta 609.60 milímetros, prácticamente cualquier tipo de material.  El límite vertical (Z) es el único límite de grosor	Hasta 50.80-76.20 milímetros, dependiendo del tipo de material	En general 25.40 milímetros o menos, dependiendo del tipo de material	En general 304.80 milímetros o menos
<b>Precisión de la pieza</b>	Hasta 25.4 $\mu m$	Hasta 254 $\mu m$	Hasta 25.4 $\mu m$	Hasta 2.54 $\mu m$
<b>Configuración de la máquina</b>	Igual para todo tipo de trabajo	Varía dependiendo del tipo de trabajo	Gases y parámetros distintos según el tipo de trabajo	Distintos tipos de alambre para distintos tipos de trabajo

### 1.5.1 *Versatilidad*

Debido a la naturaleza de la corriente de corte se puede modificar fácilmente el chorro de agua, se puede utilizar en casi todas las industrias. Algunos de ellos tienen características únicas que requieren una atención especial durante el corte.

Los materiales comúnmente cortados con un chorro de agua incluyen el caucho, espuma, plástico, cuero, materiales compuestos, piedra, azulejos, metales, alimentos, papel y mucho más. Los materiales que no se pueden cortar con un chorro de agua son de vidrio templado, diamantes y ciertas cerámicas. El agua es capaz de cortar materiales hasta 60 [cm] de espesor.

### 1.5.2 *Disponibilidad*

Los sistemas de corte por chorro de agua comerciales están disponibles de los fabricantes en todo el mundo, en una gama de tamaños, con las bombas de agua capaces de tener una amplia gama de presiones (Artículos Enciclopedicos, 2014).

### 1.5.3 *Beneficios*

Un beneficio importante del chorro de agua es la capacidad de cortar el material sin interferir con su estructura inherente, ya que no hay "zona afectada por el calor". Minimizar los efectos del calor permite cortar los metales sin dañar o cambiar sus propiedades intrínsecas.

Los cortadores por chorro de agua también son capaces de producir cortes intrincados en los materiales. Con software especializado y cabezales de mecanizado 3-D, las formas complejas se pueden producir.

La ranura de corte o anchura del corte se pueden ajustar mediante el intercambio de las piezas en la boquilla, así como cambiar el tipo y tamaño de abrasivo. Cortes abrasivos típicos tienen una ranura de corte en el intervalo de 0.08 a 0.05 [mm], pero puede ser tan estrecho como 0.03 [mm]. Cortes sin abrasivos son normalmente de 0.07 a 0.03 [mm], pero puede ser tan pequeño y llegar a 0.02 [mm]. Estos pequeños chorros pueden permitir pequeños detalles en una amplia gama de aplicaciones.

Debido a su relativamente estrecha ranura de corte, el corte por chorro de agua puede reducir la cantidad de material de desecho producido, al permitir que las partes sin cortar para ser anidados más estrechamente que los métodos tradicionales de corte. Los chorros de agua utilizan aproximadamente da medio galón por minuto, y el agua puede ser reciclada usando un sistema de bucle cerrado. El agua residual es generalmente lo suficientemente limpia para filtrar y eliminar por el desagüe. El abrasivo de granate tipo Almandino, donde se encuentra: óxido de aluminio, olivino, arena sílice, son considerados materiales no tóxicos que pueden ser reciclados para su uso repetido, de lo contrario, por lo general puede ser desechado en un vertedero. Los chorros de agua también producen menos partículas aerotransportadas de polvo, humo, gases y contaminantes, la reducción de la exposición del operador a materiales peligrosos (Artículos Enciclopedicos, 2014).

Como se ha mostrado en la tabla 1.8 y se expresó anteriormente, con la explicación de versatilidad, beneficios y disponibilidad del corte por chorro de agua, se concluye que es el mejor método para cortar cualquier tipo de material, con un grosor de hasta 609.60 [mm] y con una precisión de 0.0254 [mm] en comparación del corte laser, plasma y edm.

## 2. Planteamiento del problema

### 2.1 Definición del problema

Debido a las necesidades de elaborar proyectos, en la Facultad de Ingeniería, los alumnos han requerido llevar a cabo cortes en placas; éstos son realizados fuera y dentro de Ciudad Universitaria con la problemática que el costo de manufactura es elevado, así que el proceso de corte por chorro de agua es considerado el más eficiente, por lo que los alumnos han acudido al CCADET.

En el CCADET se realizó una evaluación con apoyo de M. I. Rigoberto Nava Sandoval, exponiendo que el costo que se les da a los alumnos por utilización de la WJC, es para el mantenimiento y compra de accesorios, haciendo énfasis en la boquilla, que tiene un costo aproximado de 5,000 a 6,000 MXN, con una durabilidad de 300 a 400 [h] de uso, teniendo que cambiarla constantemente debido a la demanda que presenta.

### 2.2 Objetivo

Plantear el diseño de una boquilla para corte por chorro de agua de bajo costo, para su uso en cortes de Aluminio con espesores hasta de 1 [in].

### 3. Consideraciones de diseño de una boquilla para corte por chorro de agua

#### 3.1 Boquilla (tubo enfoque)

La boquilla es la parte final del cabezal de la cortadora por chorro de agua, por donde sale el flujo de agua y ésta se posiciona a cierta distancia de la pieza a cortar. La boquilla tiene dos modalidades, corte con agua, para materiales blandos (papel, cartón, caucho, etc.) o una mezcla de agua abrasivo, para materiales duros (aceros, cobre, aluminio, etc.). En la figura 3.1, muestra el esquema de cabezal donde se coloca la boquilla.

1. Capa de ensamble
2. Tubo de alimentación del abrasivo
3. Mango
4. Dado de diamante
5. Inserción de desgaste
6. Cuerpo de boquilla
7. Enfoque tubo retenedor
8. Tubo enfoque
9. Protector

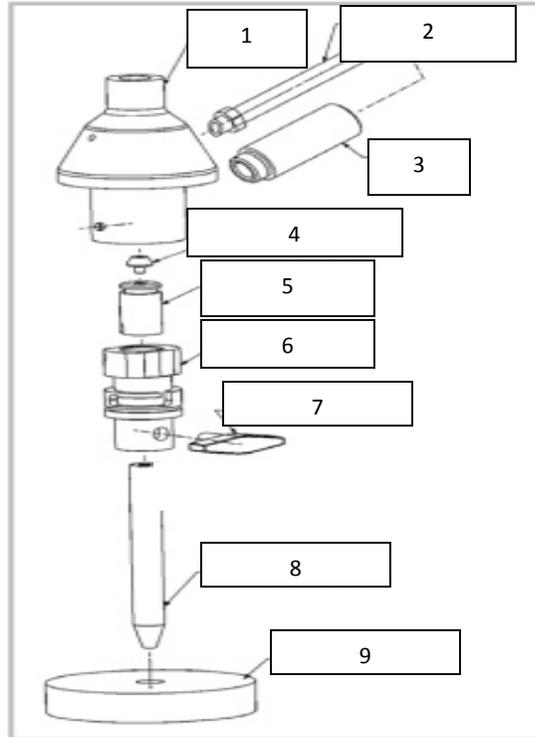


Figura 3.1 Partes de un cabezal de una cortadora, serie Abrasiva Autoline II (KMT Waterjet, 2014)

### 3.1.2 *Funcionamiento de Boquilla*

El agua entra a presión a 50,000 [psi] (350 [MPa]) o mayor en el cabezal de corte a una velocidad relativamente lenta, en el orden de metros por segundo.

El agua es forzada a través de un orificio que tiene un pequeño diámetro, que varía de 0.004 a 0.045 [in] (0.1 a 1.15 [mm]) dependiendo de la aplicación. Estos orificios de enfoque son de un material extremadamente duro, como el diamante, zafiro o rubí. Esta etapa convierte la corriente de agua de una corriente de alta presión a una corriente de alta velocidad. En este punto el agua se mueve en exceso de 2.200 [mph] (3657 [kmph]).

La alta velocidad del chorro crea un efecto Venturi o vacío en la cámara de mezcla situado inmediatamente debajo del orificio. Abrasivo, normalmente granate (arena sílice  $SiO_2$ ), se dosifica de una mini-tolva a través de un tubo de plástico a la cabeza de corte y es aspirado dentro de la corriente de chorro de agua en la cámara de mezcla. La velocidad de corte aumentará con más abrasivo hasta que se alcanza un punto de saturación, donde la velocidad empieza a disminuir. Si la cantidad de abrasivo se aumenta, en última instancia, el tubo donde se encuentra la cámara mezcla se va obstruir. Uno de los avances emocionantes en el corte por chorro de agua en los últimos años es la aparición de sistemas de dosificación de abrasivo controlados por CNC. Estos sistemas controlan con precisión la cantidad de abrasivo que se permite fluir a la cabeza de corte. Durante el proceso de perforación, la presión de corte y la cantidad de abrasivo se reducen y el cabezal de corte hace pequeños movimientos circulares en los ejes X y Y. Este procedimiento de perforación permite aplicaciones difíciles, tales como la perforación de vidrio y piedra, para ser procesado con relativa facilidad.

El abrasivo es completamente mezclado en la corriente de chorro de agua y se acelera a aproximadamente la velocidad de la corriente de chorro de agua. Este paso hace disminuir energía de la corriente de chorro de agua.

Dependiendo de la localización del abrasivo este puede ser antes o después del de la boquilla, en el primero de ellos se mezcla el abrasivo con el chorro de agua para después pasarlo por la boquilla, en el segundo proceso se pasa el chorro de agua por la boquilla pasando este se genera un vacío para poder obtener el abrasivo y después mezclarlos por el tubo de enfoque como se muestra a continuación en la figura 3.2.

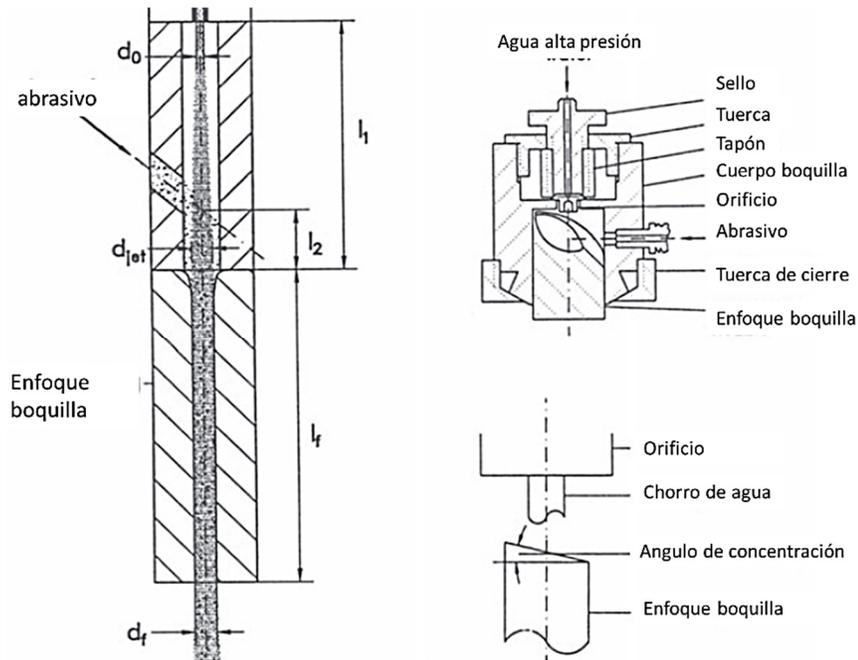


Figura 3.2 Tipos de inyección de abrasivo (Kovacevic, 1998)

La corriente de chorro de agua abrasivo sale del tubo de mezcla con una velocidad extrema. El abrasivo erosiona el material a cortar. El proceso se conoce como "corte por chorro de agua abrasivo" porque es el abrasivo que en realidad está haciendo el corte. El papel del agua es simplemente para dar velocidad y potencia a la abrasión. En el corte por chorro de agua pura, que se utiliza para materiales blandos como la espuma y los alimentos, la fuerza de la corriente de chorro de agua es suficiente para cortar el material.

### 3.2 Tipo de boquillas (tubo mezclador)

#### 3.1.2 Sistema de chorro circulares

La figura 3.3 muestra una boquilla que está diseñada con una salida circular conectada a un cilindro cónico. La salida provee la alta velocidad del agua que pasa a través del cilindro cónico y se deforma en un flujo de espiral. Existe una entrada en la parte superior de la boquilla que se alimenta del abrasivo. El agua entra y las partículas de abrasivo se concentran en el eje central del chorro de agua. La turbulencia y el desgaste del tubo mezclador se reducen sin embargo la velocidad reportada es alrededor de  $V_0 = 35$  [m/s].

La figura 3.4 muestra un principio similar. En este caso, el abrasivo se mezcla en un chorro de aire circular a través de un tubo de acero. El chorro de agua a alta velocidad entra en el tubo mezclador a través de una entrada lateral que acelera la mezcla. Experimentos antes hechos por Galeck Y Mazurkiewicz quienes definieron el radio de transmisión de presión ( $p/p(l_1)$ ) como un parámetro de evaluación, investigando la influencia de la distancia entre el orificio del chorro de agua de salida y el

orificio de entrada ( $l_1$ ), mostrando la capacidad de corte con el chorro de agua abrasivo que mejoraba en un 80% seleccionando una distancia apropiada entre el orificio de salida- entrada. Para este caso de boquilla el sistema puede operar con una bomba de baja presión alrededor de  $P= 14$  [MPa].

### 3.2.2 Sistema de vórtices de flujo

La figura 3.5 muestra otra alternativa de mezclado. El flujo de agua que entra en el centro de la cámara de mezcla se volvió directamente en un flujo de vórtice que fluye a través de la boquilla y forma un vórtice de chorro de agua. El movimiento rotativo de chorro de agua mejora la capacidad de succión de abrasivo y eficiencia de mezclado. Este sistema es limitado requiere bombas de presión cerca de  $P=10$  [MPa] y se requiere un orificio ( $d_o= 3$  [mm]) y enfoque ( $d_f= 7$  [mm]) largo.

### 3.2.3 Sistema múltiple de chorro de agua

Respecto a los reportes que muestra el investigador Yie (Kovacevic, 1998) en un cabezal de corte para inyección de chorro de agua abrasivo que está diseñado para múltiples chorros, el chorro de agua paralelo se ordena a un patrón circular. El chorro de agua converge axialmente para formar un solo flujo que crea condiciones favorables para la entrada de partículas abrasivas como se muestra en la figura 3.6. En este diseño, el espacio de chorro de agua se encuentra en la región cerca del orificio cónico permitiendo que las partículas de abrasivo se introduzcan fácilmente a través de dos chorros de agua adyacentes. Estos cabezales de corte trabajan con bombas de presión alrededor de  $P= 100$  [MPa].

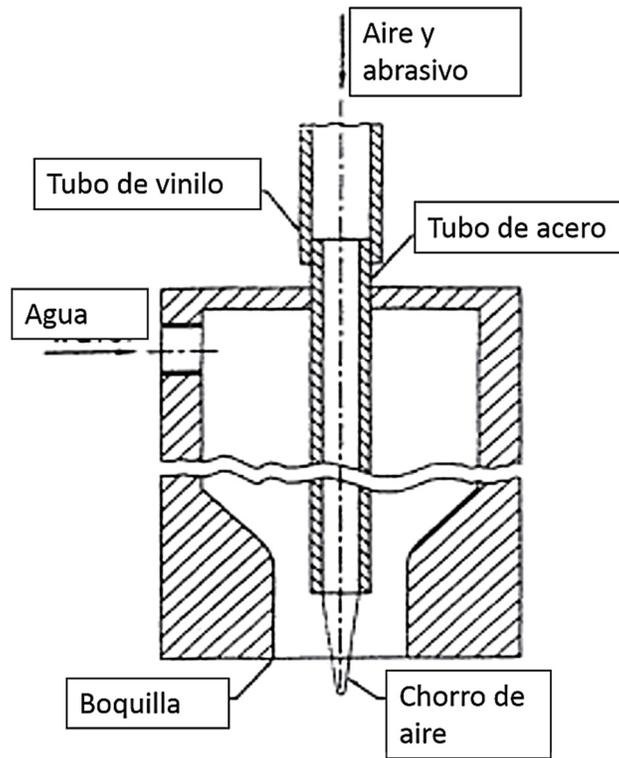


Figura 3.3 Chorro de agua circular central (Kovacevic, 1998)

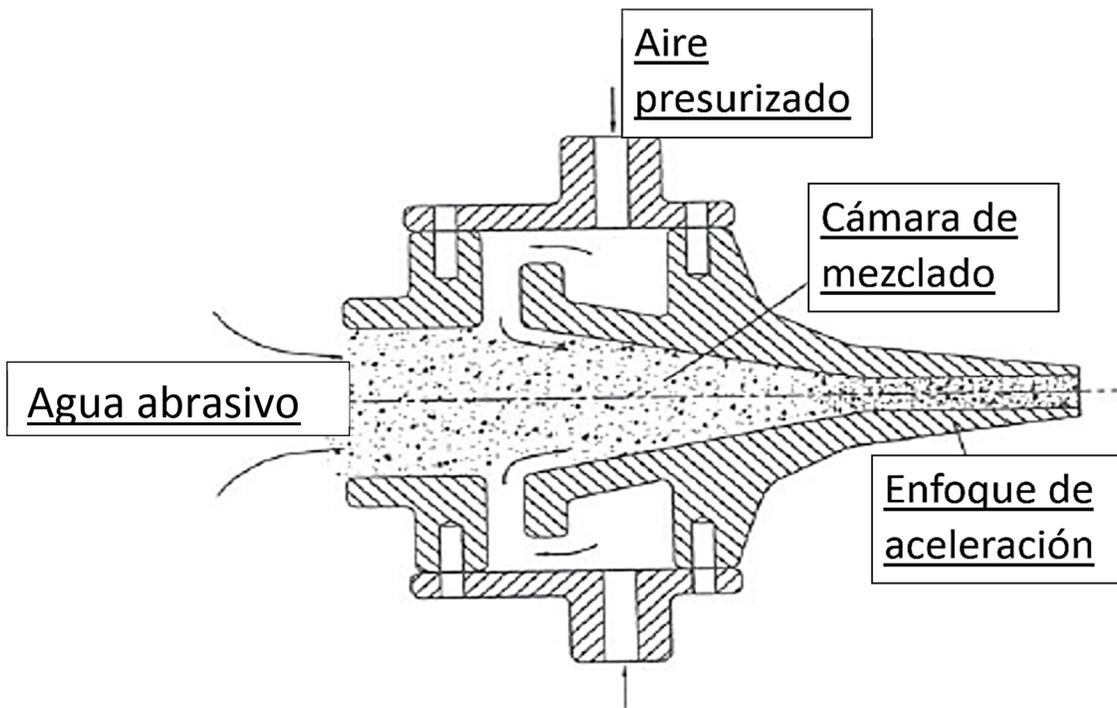


Figura 3.4 Chorro de aire circular central(Kovacevic, 1998)

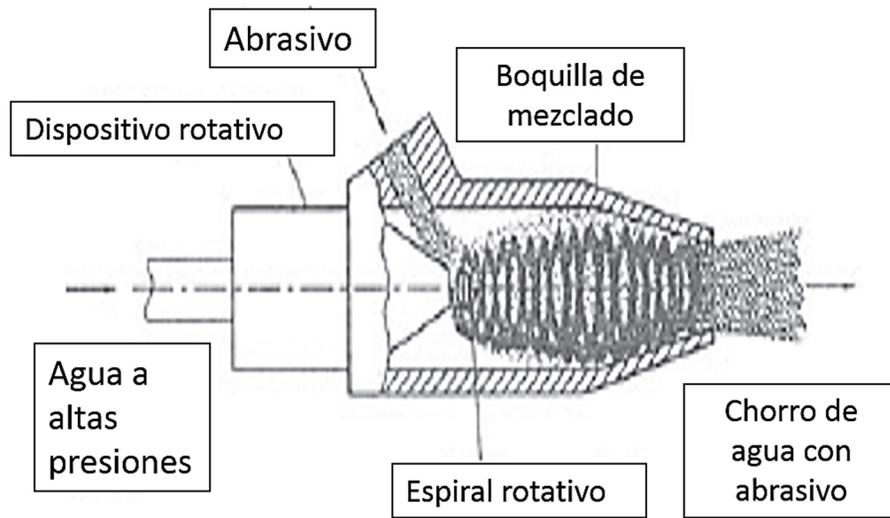


Figura 3.5 Chorro de agua rotativo central (Kovacevic, 1998)

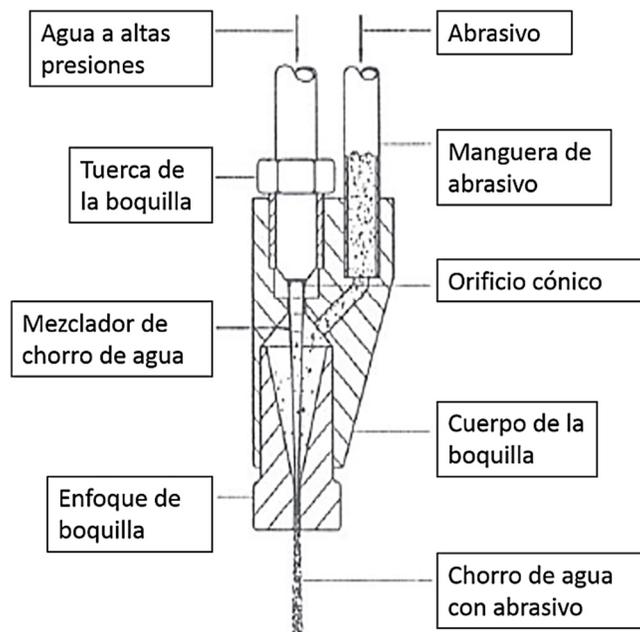


Figura 3.6 Chorro de agua múltiple (Kovacevic, 1998)

### 3.3 Factores que afectan mediante la boquilla (tubo de enfoque)

Para un corte exitoso de la cortadora, se necesita una boquilla de alta precisión como se muestra en la figura 3.7 y 3.8. Existen diferentes factores en el cabezal de corte que determina la precisión y calidad de la corriente de chorro de agua que afectara en la pieza a cortar con abrasivo o sin él.

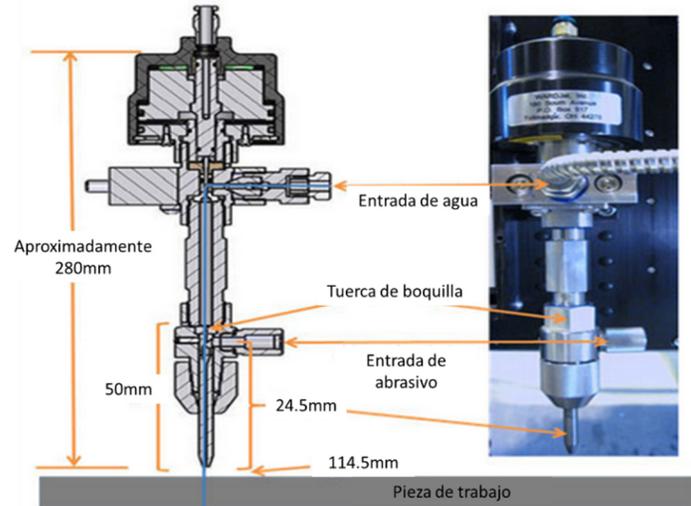


Figura 3.7 Boquilla entrada lateral de agua y abrasivo (WARDjet, 2014)

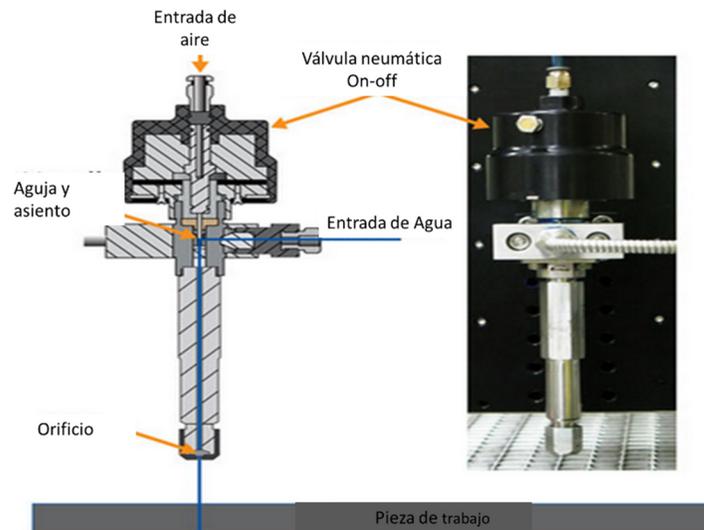


Figura 3.8 Boquilla con entrada de agua sin abrasivo (WARDjet, 2014)

### 3.3.1 *Longitud de tubo enfoque (mezcla abrasivo)*

Un tubo largo de mezcla abrasivo produce mayor corriente de agua. El largo del tubo mezclador debe ser de 3 a 4 [in] (75- 100[mm]).

### 3.3.2 *Alineación de los componentes*

El orificio, cámara de mezcla y boquilla deben ser de preciso maquinado y el ensamblaje de tolerancias de alta precisión ya que estos deben encajar uno en otro para evitar el daño de los consumibles por la corriente de chorro de agua.

### 3.3.3 *Orificio preciso*

El interior de la boquilla de abrasivo debe ser mecanizado para asegurar una alineación perfecta con la corriente de chorro de agua.

### 3.3.4 *Diámetro de corriente*

A menor diámetro de corriente de chorro de agua, produce un flujo eficiente y de alta calidad.

### 3.3.5 *Distancia a la pieza de trabajo*

El mantenimiento de una estrecha distancia entre la boquilla y la pieza de trabajo, entre 0.040 a 0.060 [in] (1.0 – 1.5 [mm]), es crítico para la producción de piezas precisas mientras que también consigue la máxima eficiencia del chorro de agua. Mientras más cercano esté el corte de la materia, limita la cantidad de atmósfera que el chorro tiene que viajar a través antes de llegar a la pieza de trabajo. Esto limita la expansión de la corriente de chorro de agua, ya que como el chorro se expande, la potencia efectiva del chorro se reduce. Las velocidades de corte tendrán que ser reducidas para compensar. Si la distancia entre la boquilla y la pieza de trabajo se incrementa en un ¼ [in], las velocidades de corte que deben reducirse es de un veinte por ciento (20%) para lograr resultados similares con respecto a la tolerancia y la calidad de los bordes. Con control de altura CNC permitirá el control final de la corriente de chorro de agua.

### 3.3.6 *Efecto cónico de velocidad en el corte*

El ángulo Kerf o cónico, se refiere a la diferencia dimensional entre la parte superior e inferior de la sección transversal de corte. Si el corte es demasiado rápido, mayor a 30 [s], dará lugar a una anchura de la incisión más ancha en la parte superior de la sección transversal de corte y una anchura de la incisión más estrecha en la parte inferior de la zona.

### 3.3.7 *Efecto de distancia de la boquilla*

Para obtener la mejor calidad de corte, se debe mantener una distancia entre la boquilla y la pieza de trabajo. Por lo general, entre 0.040 a 0.060 [in] (1.0 – 1.5 [mm]) es la altura óptima para el corte por chorro de agua abrasivo. Como resultará la distancia aumenta por encima de 0.060 [in] de redondeo en el borde superior del corte. Esto se debe a que la corriente de chorro de agua pierde fuerza a medida que viaja a través del aire libre. Mayor altura de la boquilla también se traducirá en un aumento de ángulo de corte. Si la distancia entre la boquilla y la pieza de trabajo se incrementa en un  $\frac{1}{4}$  [in], la velocidad de corte se debe reducir en aproximadamente un veinte por ciento (20%) para lograr resultados similares con respecto a la tolerancia y la calidad de los bordes. Control automático de altura es la forma más confiable y precisa para mantener la distancia de separación adecuada (WARDjet, 2014).

### 3.4 Principios generales del diseño

En el cabezal de corte se forman las fases de inyección de abrasivo e inyección de agua. Estas dos fases son mezcladas, las partículas de abrasivo y el aire son aceleradas. Como resultado se forma un chorro de agua abrasivo en el cabezal de corte.

Existen diferentes demandas que deben ser cubiertas por el sistema de generación para el chorro de agua abrasivo.

1. Óptima aceleración de las partículas abrasivo.
2. Alta densidad de energía del chorro de agua abrasivo generado.
3. Bajo desgaste en las partes del sistema, específicamente en el tubo mezclador.
4. Funcionamiento adecuado.
5. Simple funcionamiento.

Recordando la localización de la entrada de abrasivo, dos principios se distinguen entre mezclar abrasivo con el agua antes del orificio o después de él. Nos enfocaremos en el segundo concepto que el abrasivo entra después del orificio de rubí, esto se debe a las especificaciones de la máquina de trabajo que se encuentre en el Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico (CCADET), como se muestran en las figuras 3.9, 3.10, 3.11.

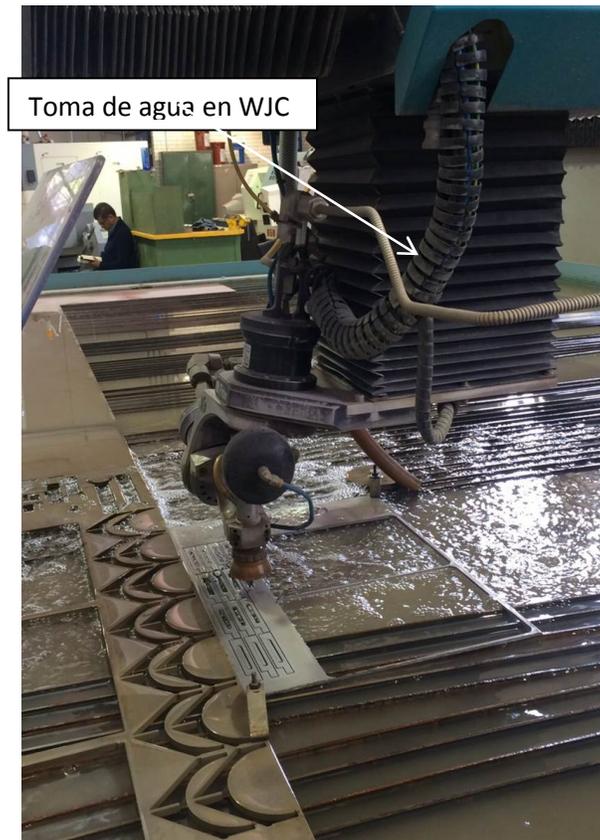


Figura 3.9 Toma de agua para generar corte en la WJC (Cortadora ubicada en CCADET)



Figura 3.10 Toma de agua para generar el corte en la WJC (Cortadora ubicada en CCADET)

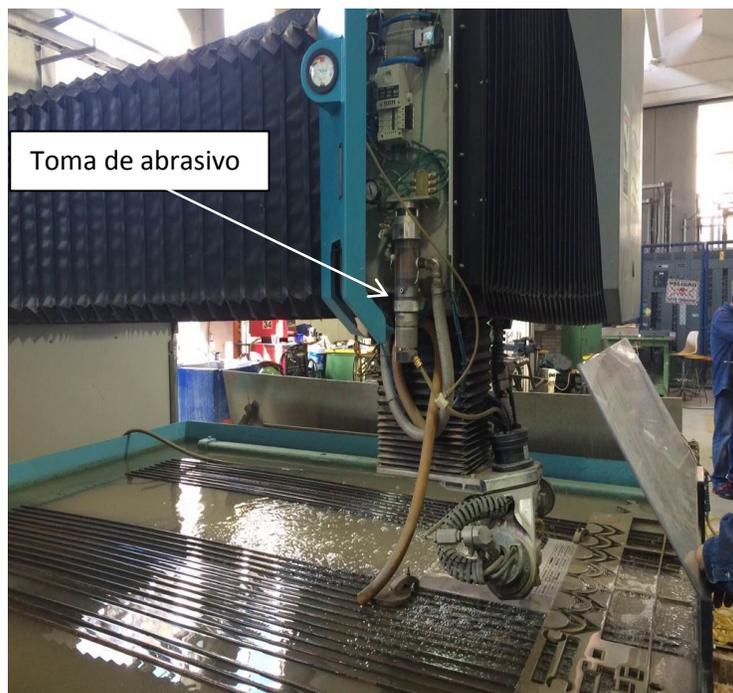


Figura 3.11 Toma de abrasivo para generar corte en la WJC (Cortadora ubicada en CCADET)



Figura 3.12 Toma de abrasivo para generar corte en la WJC (Cortadora ubicada en CCADET)

El sistema de mezclar y acelerar para la inyección de chorro de agua abrasivo consiste en tres partes. Primero hay entradas para la alta presión de agua y para las partículas de abrasivo. En segundo plano, generación de succión por presión para las partículas de abrasión y aire. En tercer lugar, el abrasivo es acelerado y las tres partes son mezcladas.

A la entrada del chorro de agua, el diseño clásico es la entrada central en la parte superior del cabezal de corte. El abrasivo y el aire presurizado entran en la cámara de mezclado, por lo general a través de un puerto de entrada de un solo lado. En el caso de la cortadora que se encuentra en el CCADET, se encuentra una opuesta a la otra.

### 3.5 Parámetros internos de diseño

#### 3.5.1 Distancia entre el orificio de salida y el tubo de enfoque

Li Z en 1994, desarrolló la mezcla de partículas en agua en la formación del chorro de agua, resultado de los experimentos dieron el uso para entender la profundidad de corte generado así un criterio de optimización, Galecki y Mazirkiewicz quienes definen la relación de transmisión de presión como  $\frac{p}{p(l_1)} = \frac{1}{l_1}$  como un evaluación de parámetros, investigando la influencia de la distancia entre el orificio de salida y el foco de entrada del chorro de agua ( $l_1$ ) en la capacidad de corte de un cabezal de corte. Como se muestra en la figura 3.13 existen diferentes distancias óptimas con un máximo de profundidad de corte correspondiente. La capacidad de corte del chorro abrasivo de agua mejora un ochenta por ciento (80%) seleccionando la distancia adecuada entre el orificio y el foco. La distancia óptima es independiente de la forma cónica de la entrada de enfoque, así como en el diámetro del orificio (Kovacevic, 1998).

#### 3.5.2 Distancia entre la entrada del abrasivo y de enfoque

Mazurkiewicz llevó a cabo experimentos de perforación para optimizar la distancia entre el nivel de entrada de abrasivo y la entrada de enfoque ( $l_2$ ). Como se muestra en la figura 3.14, el rendimiento de un chorro de agua abrasivo aumenta conforme la distancia lo hace. Este efecto es muy sonado en enfoques de diámetro largos ( $d_f= 3.175$  [mm]). En este caso el tiempo de perforación se reduce hasta un treinta por ciento (30%). Enfoques de diámetro pequeño son menos sensibles a los cambios entre la distancia de entrada de abrasivo y la entrada de enfoque. Para el enfoques pequeños ( $d_f= 0.75$  [mm]) el tiempo de perforación no sufre cambio alguno.

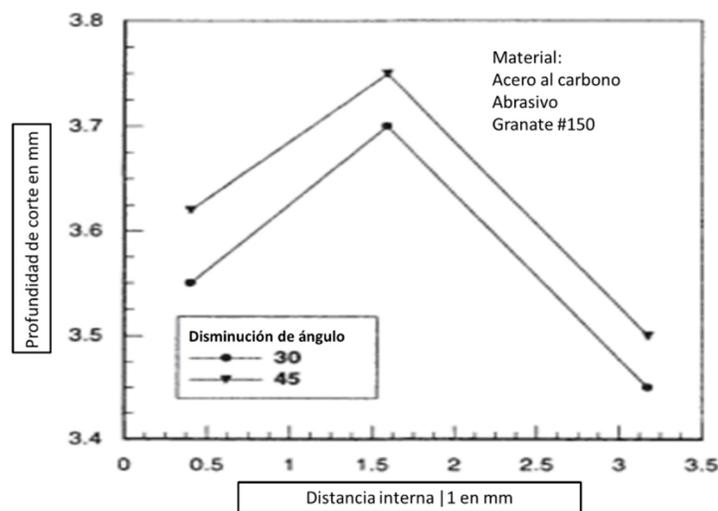


Figura 3.13 Distancia entre el orificio de salida y el foco de entrada del chorro de agua ( $l_1$ ) (Kovacevic, 1998)

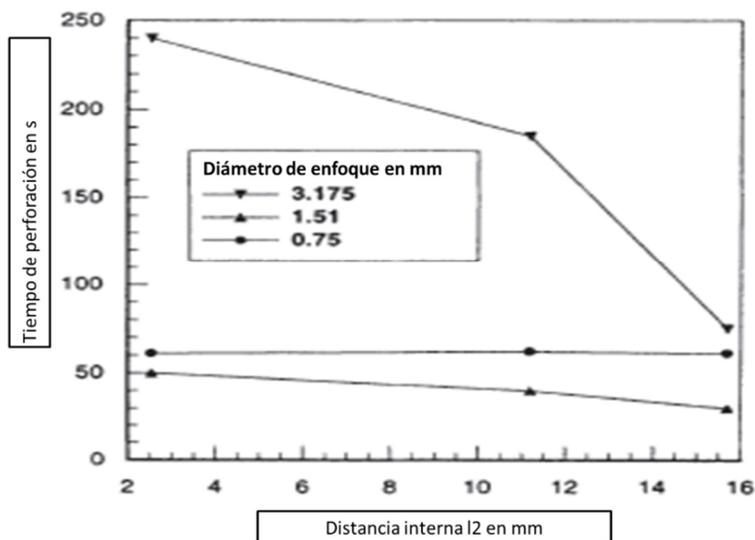


Figura 3.14 Distancia entre el nivel de entrada de abrasivo y la entrada de enfoque ( $l_2$ ) (Kovacevic, 1998)

### 3.5.3 Alineamiento entre orificio y enfoque

Un aspecto esencial en la eficiencia de los cabezales de corte por inyección de chorro de agua-abrasivo es el alineamiento entre el orificio y el enfoque. En un estado ideal, el enfoque y orificio están perfectamente alineados. En la práctica existen dos tipos de desalineación, lineal y angular como se muestra en la figura 3.15.

La desalineación lineal, dos ejes están paralelos pero no colineales. Galecki y Mazurkiewicz muestran que existe gran influencia en la transmisión de la presión entre el orificio de chorro de agua y el enfoque en el desfaseamiento lineal. Estos defectos pueden ser controlados por medio de pequeñas tolerancias en el orificio y los sujetadores de enfoque. Dichas tolerancias resultan en una desalineación lineal máxima de  $\Delta y = 51 \text{ } [\mu\text{m}]$ , generalmente se indica en el equipo actual (Kovacevic, 1998).

Desalineación angular no necesita ser muy grande para afectar seriamente la eficacia de un cabezal de corte, así como del proceso de corte. Para un enfoque típico con  $l_F = 51 \text{ } [\text{mm}]$ , incluso un  $1^\circ$ -desalineamiento del orificio fuerza al chorro de impactar la pared con el enfoque primero antes de salir. Este desajuste se traduce en un acelerado, desgaste de enfoque no simétrico, una desigual distribución de las partículas abrasivas, y un deterioro de corte gradual.

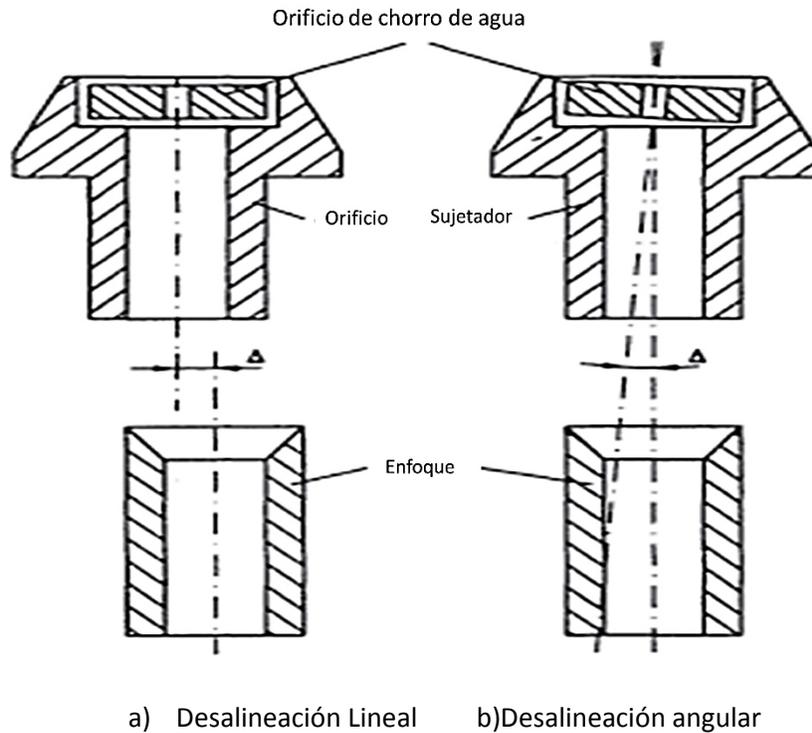


Figura 3.15 Desalineación entre el orificio y el enfoque en un cabezal de corte para chorro de agua-abrasivo (Kovacevic, 1998)

#### 3.4.5 Longitud de la cámara de mezclado (tubo de enfoque)

La apropiada longitud en la cámara de mezclado es una propiedad importante para obtener un corte eficiente que disminuye la eliminación de masa o el corte disminuye su profundidad cuando la cámara de mezclado su longitud aproximada es de 20 [mm]. Cuando la cámara excede en longitud la eliminación de materia se mantiene en un nivel estable. Para incrementar la eliminación de materia un quince por ciento (15%) se debe escoger la longitud apropiada, esto va ligado al tipo de material que se va a cortar usualmente. En la figura 3.16 se muestra en dos materiales la influencia de la longitud de la cámara de mezclado en la eliminación de materia.

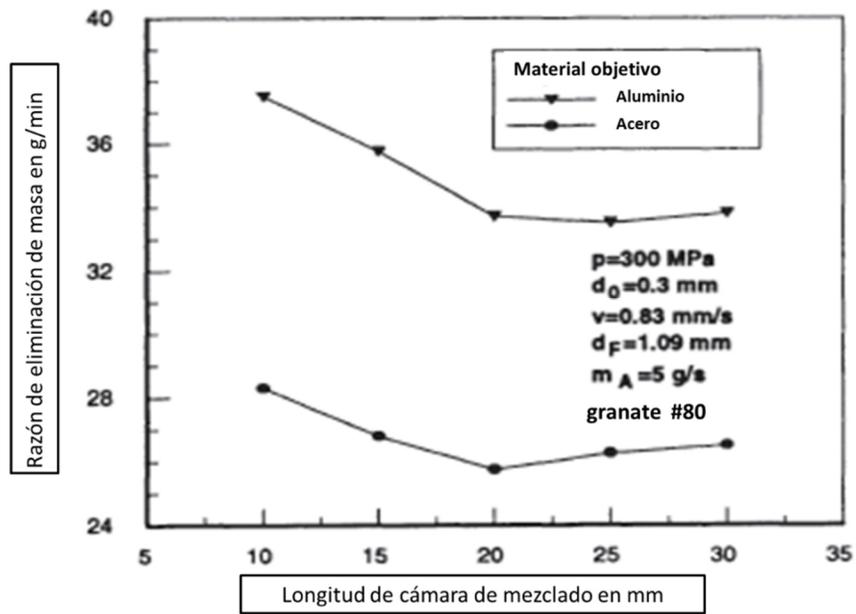


Figura 3.16 Influencia de la longitud de la cámara de mezclado (Kovacevic, 1998)

### 3.4.6 Flujo de aire

El flujo de volumen de aire dependerá de varios parámetros del proceso, incluyendo la presión de la bomba, la cantidad de abrasivo, el tubo mezclador, el diámetro del tubo, y el diámetro del orificio de succión. En las siguientes figuras muestran la influencia de la presión, la bomba y el diámetro del tubo, Both Himmlreich y Tazibt muestran en la figura 3.17 y 3.18, el flujo de volumen de aire en un incremento *cuadrático* con relación a la presión de la bomba. Este resultado lo podemos obtener con o sin el abrasivo en cuestión.

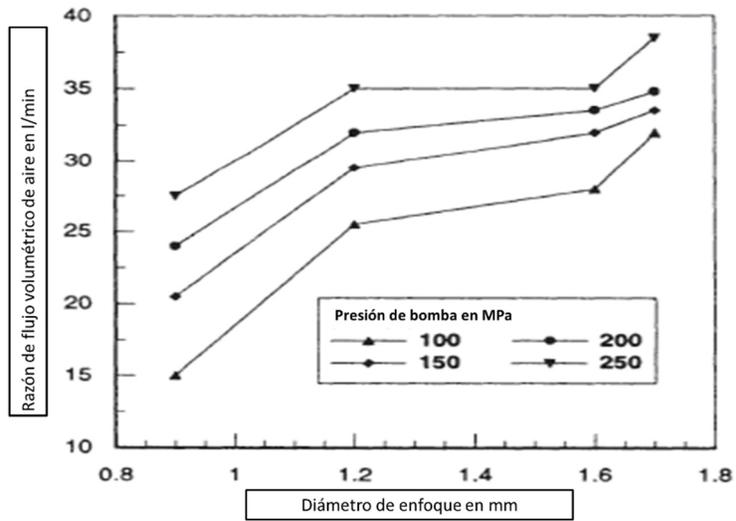


Figura 3.17 Diámetro de la boquilla y presión de la bomba (Kovacevic, 1998)

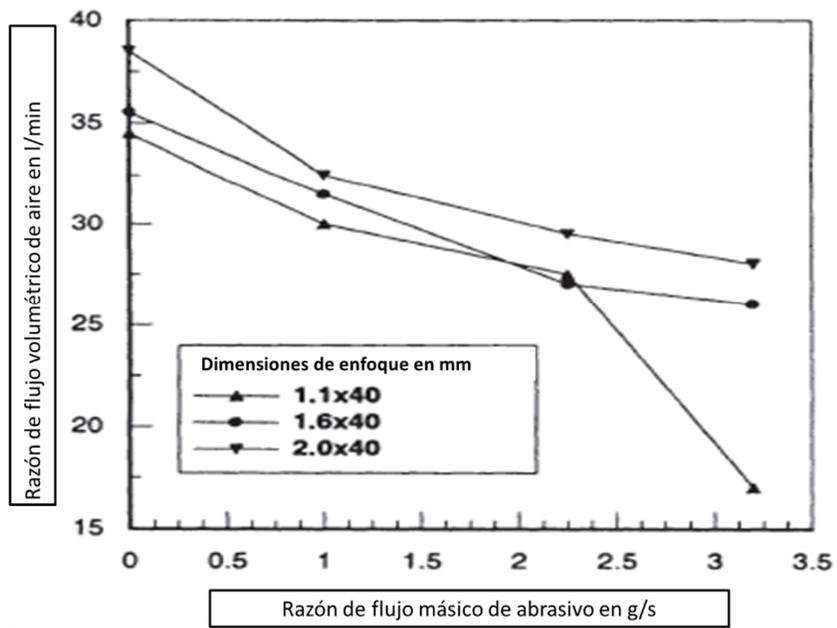


Figura 3.18 Flujo de abrasivo y geometría de la boquilla (Kovacevic, 1998)

La siguiente ecuación 1, y en la figura 3.18, muestra el flujo de aire succionado, que decrece significativamente en comparación con el flujo de aire-abrasivo con un flujo de 3.2 [s], en conclusión tuvimos una reducción del cincuenta por ciento (50%) suponiendo que la diferencia de presión y el flujo de aire expresa “*las características de la bomba*” del chorro de agua, la figura 3.19 nos muestra el proceso de succión de la bomba

$$Q = a_3 \cdot \sqrt{p} \quad (\text{Eq. 1})$$

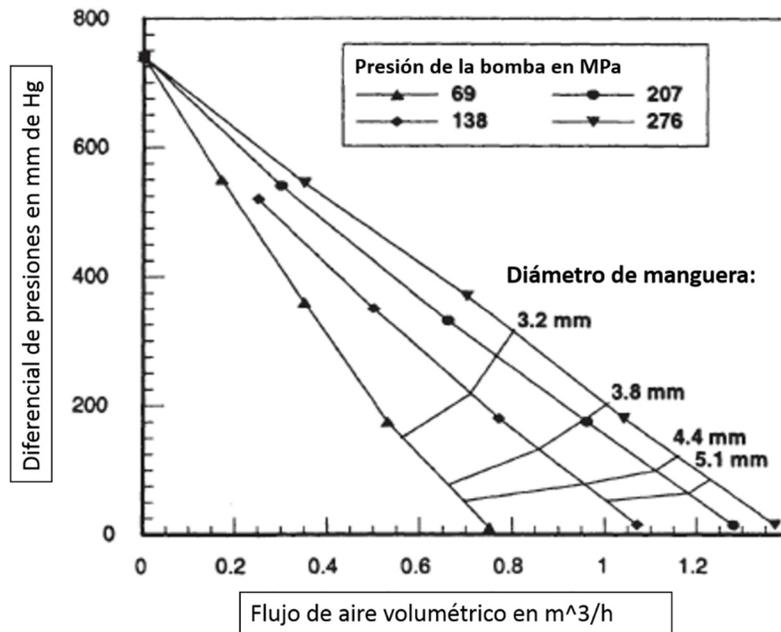


Figura 3.19 “Características de la bomba” de chorro de agua a altas velocidades (Kovacevic, 1998)

### 3.5 Desgaste del tubo enfoque en sistemas de inyección

#### 3.5.1 Características principales del desgaste en el tubo de enfoque

Las razones principales por las cuales se desechan los tubos de enfoque son porque están desgastados (85%) o rotos (13%) (Kovacevic, 1998). El criterio es válido por la alta resistencia de los materiales del tubo de enfoque, es una característica significativa en el chorro abrasivo. También como fue mencionada por Hulsley (Kovacevic, 1998) la edad de un enfoque influye en la geometría de corte, así como la calidad de la superficie.

El término desgaste de enfoque considera varios fenómenos tales como.

1. El incremento del diámetro en la salida.
2. Generación de patrones en la superficie interna del enfoque.
3. Cambio de geometría en el enfoque.

El desgaste del tubo de enfoque puede ser tolerado en ciertos criterios. Estos criterios dependen de la cantidad y calidad de demanda en los procesos de mecanizado.

### 3.5.2 *Diámetro de salida del enfoque*

El método más común para estimar el desgaste del enfoque es midiendo el diámetro de salida del enfoque después de un periodo de tiempo. En una investigación reciente sobre el desgaste, Nakaya encontró la variación de diámetro  $df/df(t)$  que depende de la combinación del material de enfoque y material abrasivo (Kovacevic, 1998). Se sabe que las boquillas de cerámicos muestran mayor desgaste con granos de acero comparado con el óxido de aluminio a pesar que la dureza es mucho menor de los granos acero. Este estudio muestra la complejidad del proceso de desgaste del enfoque que no es una simple relación entre el material del enfoque y el material abrasivo.

### 3.5.3 *Tasa del desgaste del enfoque.*

La figura 3.20 muestra las grafica entre el tiempo de trabajo y el diámetro del enfoque. Donde se muestra la relación general lineal y la relativa dureza de los materiales del enfoque para un amplio rango de las condiciones del proceso. Por lo tanto.

$$d_F = W_F * t \quad (\text{Eq. 2})$$

La mejora de la función,  $W_F$ , es la tasa de desgaste.

$$W_F = \frac{\Delta d_F}{\Delta t} \quad (\text{Eq. 3})$$

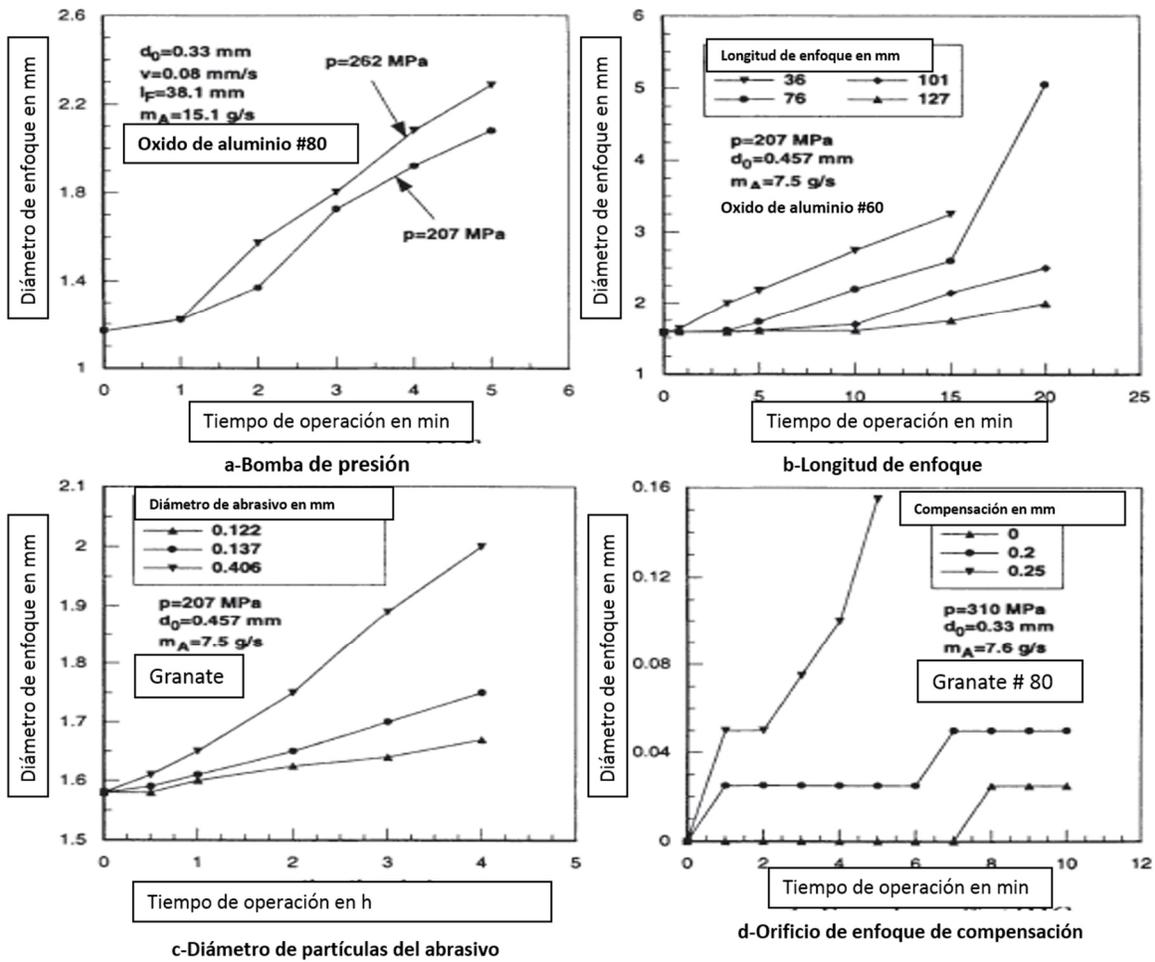


Figura 3.20 Influencia de los parámetros en la salida del diámetro de enfoque (Kovacevic, 1998)

La influencia del diámetro de la partícula abrasivo en el desgaste del enfoque muestra Hashish que una herramienta de acero suave no es sensitiva a el tamaño de la partícula sin embargo un enfoque de carburo de tungsteno muestra una gran dependencia. En el caso de la tasa de desgaste es significativamente reducido con el diámetro de la partícula. Estos resultados muestran la idea que enfoques de materiales suaves son más sensitivos a las condiciones de flujo del chorro de agua.

### 3.5.4 Influencia de la dureza

Neuss presenta la discusión entre la influencia de la dureza en el material abrasivo y el tubo de enfoque del material (Kovacevic, 1998). La figura 3.14 muestra razonablemente que:

$$\log d_F = C_1 \cdot \log \left( \frac{H_P}{H_F} \right) - C_2 \quad (\text{Eq. 4})$$

En la ecuación 4, el valor de la dureza está dado en Vickers. La constante  $C_1$  y  $C_2$  consideran otros parámetros como efectos. La figura 3.21 muestra que los valores de carburo de boro no entran en la regresión. Esta discrepancia es el resultado de la alta dureza de este material comparado con los otros materiales del enfoque. Por lo tanto, la validación de la fórmula antes mencionada está restringida por las variaciones de dureza entre  $H_P/H_F = 0.7-1.2$  (Kovacevic, 1998).

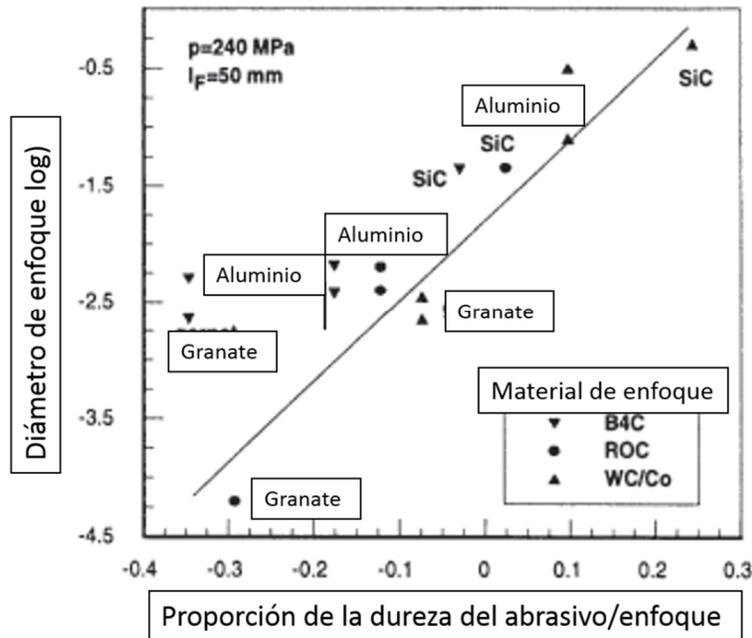


Figura 3.21 Influencia del enfoque/ dureza abrasivo-tasa del desgaste en enfoque (Kovacevic, 1998)

### 3.6 Otras características del desgaste en enfoque

#### 3.6.1 Aspectos generales

La tasa de desgaste basada en el diámetro de salida del enfoque y como la ecuación 4 descrita anteriormente no es una caracterización definitiva sobre la condición del desgaste. Se ha encontrado que materiales con la misma similitud de tasas de desgaste pueden mostrar diferentes patrones. También se ha observado aunque el diámetro de salida no muestra ningún cambio después de varios minutos, la eficiencia de corte disminuye. Esto nos afirma que el desgaste de material del enfoque no solo es en el diámetro de salida, sino en otras áreas.

#### 3.6.2 Pérdida de masa y patrón de desgaste en enfoque.

El caso típico muestra que la pérdida de masa se incrementa respecto al tiempo. Existe otro caso que la pérdida de masa no es uniforme y se distribuye a lo largo del enfoque como lo muestra la figura 3.22.

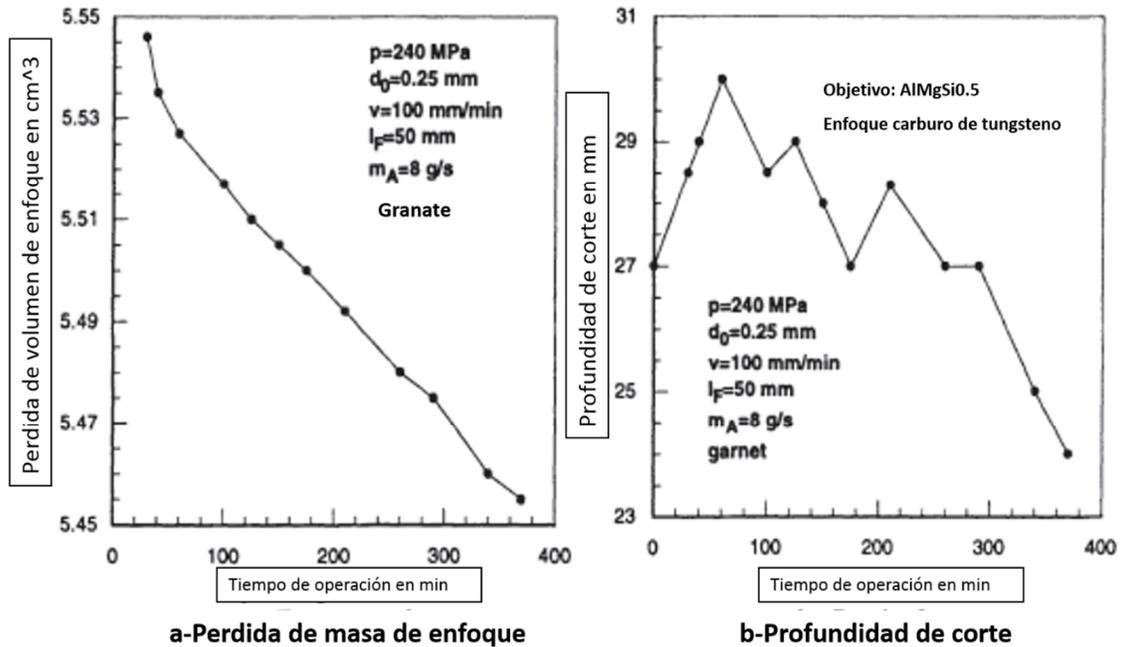


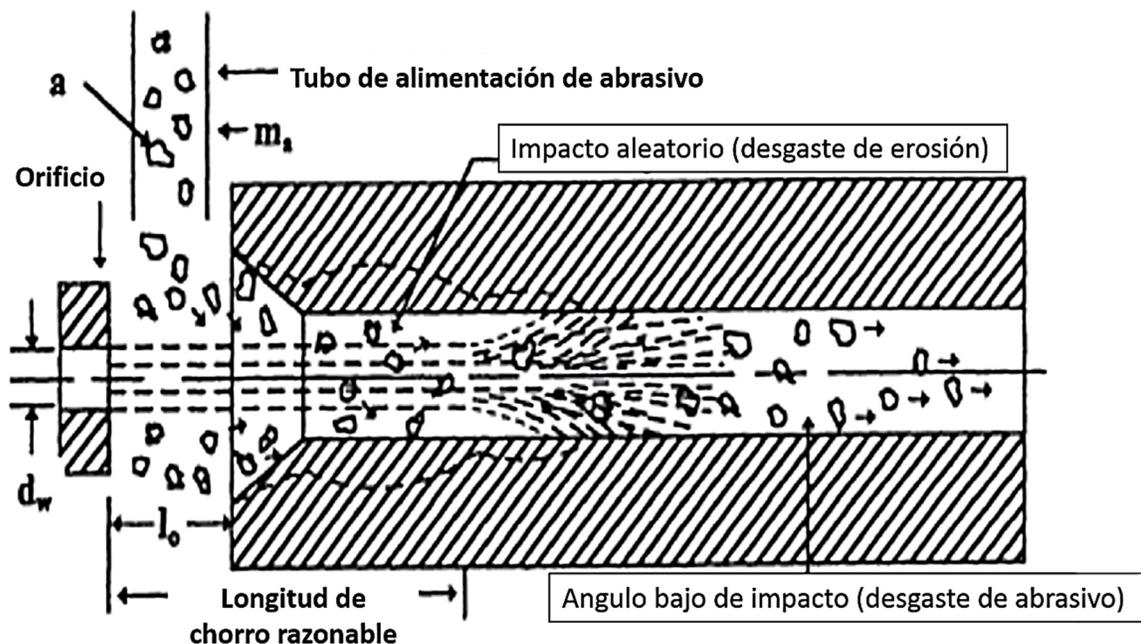
Figura 3.22 Relación entre tiempo y rendimiento del enfoque (Kovacevic, 1998)

### 3.6.3 Excentricidad de salida del enfoque

Un aspecto importante es la excentricidad de desgaste en la salida. Las boquillas desgastadas muestran formas elípticas más que circulares. La excentricidad está definida como el radio de dimensión más pequeña y más larga del área de salida. Los científicos Wightman and Dixon junto con Singh y Munoz probaron que el desgaste del enfoque es más consistente con una apropiada alineación entre los enfoques de la boquilla y el orificio del chorro de agua. Por supuesto evitando los incrementos de desalineamiento, esto hace que la vida del enfoque aumente a un cuarenta por ciento (40%) (Kovacevic, 1998).

### 3.6.4 Desgaste fenomenológico de enfoque

Como Hashish y Naduri mencionan en su modelo (Kovacevic, 1998), en la entrada, partículas abrasivas entran e impactan relativamente a diferentes ángulos. Cuando el enfoque tiene la suficiente distancia, el abrasivo tiende eventualmente a viajar en paralelo a la pared como se muestra en la figura 3.23. Por otro lado Bell y Rogers sugieren que la tenacidad de fractura es la propiedad predominante durante el ángulo mayor erosionando y desgastando materiales frágiles, mientras que a un impacto de ángulo pequeño la dureza no es la propiedad más importante. El desgaste de un enfoque de material cerámico se asume que es la combinación entre la ductilidad y la fragilidad de este. El mecanismo dominante de eliminación es el micro-arado y microfisuración.



3.23 Modelo fenomenológico del desgaste del enfoque (Kovacevic, 1998)

### 3.6.5 Tiempo estimado de vida del Modelo

La vida útil de los enfoques comerciales de las boquillas de materiales de alta resistencia se estima que tengan un trabajo de 100 horas, mientras que para las boquillas de carburo de tungsteno es de 10 horas. Pero como ya se ha señalado el tiempo estimado de vida está definido por diferentes condiciones. La tabla y la figura 3.24 en lista definiciones provenientes de la información de referencia.

Referencia	Diámetro crítico de enfoque
Hashish [110]	$1.25 \cdot d_F(t=0)$
Kovacevic and Beardsley [114]	$1.70 \cdot d_F(t=0)$
Mort [111]	20 mm
Nanduri et al. [116]	$(1.1-1.15) \cdot d_F(t=0)$

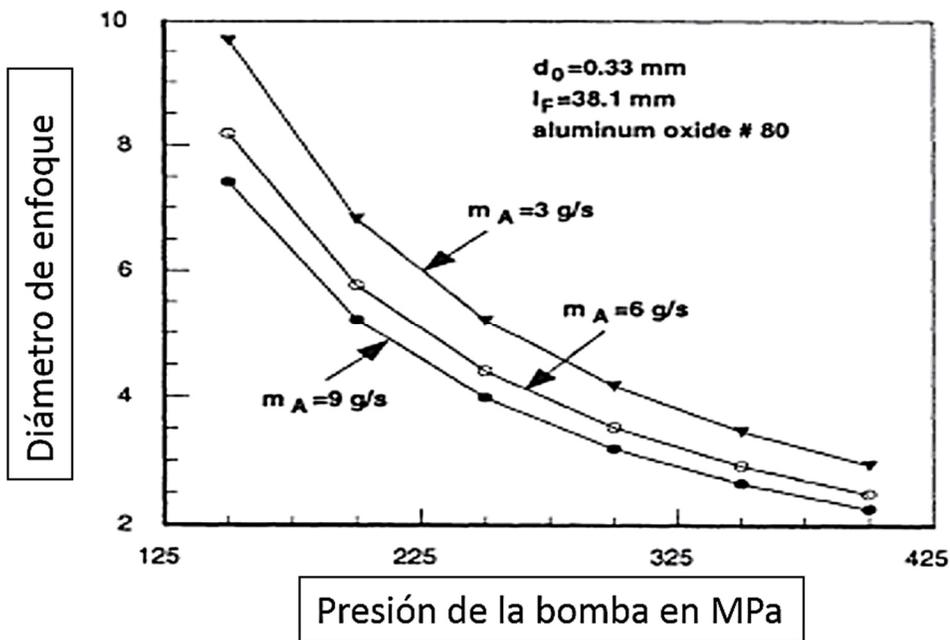


Figura 3.24 Estimación del tiempo de vida del enfoque (Kovacevic, 1998)

Kovacevic y Beardsley desarrollaron el modelo de tiempo de vida para el enfoque de la boquilla, basado en una regresión de análisis múltiple, en la cual se deriva la siguiente relación.

$$t_{TL} = \frac{5\,587}{p^{1.215} \cdot m_A^{0.245}} \quad (\text{Eq. 5})$$

La definición de tiempo de vida es  $t_{TL} = t(1.7 \cdot d_F)$ . La presión de la bomba está dado en [MPa] y la tasa de flujo abrasivo está en [g/s] que esto da el tiempo de vida en minutos. La figura 3.20 muestra gráficamente la expresión de la ecuación 5.

## 4. Diseño de configuración de una boquilla para una cortadora por chorro de agua

### 4.1 Información de cortadora por chorro de agua (WJC) a implementar

Se investigaron los parámetros requeridos en la industria para una cortadora por chorro de agua, en la siguiente tabla 4.1, muestra los resultados posibles para cada relación de los parámetros.

Tabla 4.1 Relación de parámetros en una cortadora por chorro de agua (Jones, 2008)

Parámetro	Profundidad	Rugosidad	Conicidad
Presión	Mayor presión, mayor profundidad de corte	Mayor presión, menor rugosidad	Mayor presión, mayor conicidad
Velocidad	Mayor velocidad, menor profundidad	Mayor velocidad, mayor rugosidad	Mayor velocidad, mayor conicidad
Distancia	Mayor distancia, menor profundidad	Mayor distancia, mayor rugosidad	Mayor distancia, mayor conicidad
Abrasivo	Mayor flujo, mayor profundidad	Mayor flujo, menor rugosidad	Mayor flujo, menor conicidad

La tabla 4.2, muestra los tipos materiales a cortar de acuerdo al tipo de chorro de agua (con o sin abrasivo).

Tabla 4.2. Posibles materiales a cortar en la industria mediante una cortadora por chorro de agua.

Corte por chorro de agua sin abrasivo	Corte por chorro de agua con abrasivo
Papel	Plásticos
Cartón	Granito
Material espumado	Piedra
Comestibles	Mármol
Caucho	Metal
	Madera
	Titanio
	Vidrio

#### 4.1.1 Propiedades mecánicas del Aluminio

Se definen los parámetros para cortar una pieza de aluminio el cual se considera como de uso común en los proyectos que se realizan en la Facultad de Ingeniería. Para este caso en la tabla 4.3 y 4.4 se proponen los diferentes tipos de aluminio, sus características y sus propiedades mecánicas.

Tabla 4.3 Tipos de Aluminio y sus aleaciones (Jones, 2008)

Metal	Composición típica (%peso)	Aplicaciones Típicas.
<b>Serie 1000 Al puro</b>	>99 % Al	Poco resistente, pero dúctil y buen conductor eléctrico
<b>Serie 2000 Aditivo principal Cu.</b>	Al + 4 Cu + Mg, Si, Mn	Endurecibles por precipitación
<b>Serie 3000 aditivos principal Mn</b>	Al + 1 Mn	Resistencia moderada, dúctil, excelente resistencia a la corrosión
<b>Serie 5000 aditivo principal Mg.</b>	Al + 3 Mg 0.5 Mn	Endurecibles por trabajo en frío, soldables.
<b>Serie 6000 aditivos principales Mg + Si</b>	Al + 0.5 Mg 0.5 Si	Resistencia moderada por precipitación
<b>Serie 7000 aditivos principales Zn + Mg</b>	Al+ 6 Zn + Mg, Cu, Mn	Endurecibles por precipitación
<b>Aleaciones de Moldeo.</b>	Al + 11 Si	Moldeo en arena y en coquilla
<b>Aleaciones Aluminio-Litio</b>	Al + 3 Li	Baja densidad y buena resistencia. Endurecibles por precipitación

Tabla 4.4 Intervalo de propiedades mecánicas del aluminio (Jones, 2008)

	Limite elástico (MPa)	Resistencia a la tracción (MPa)	Alargamiento
<b>Aluminio</b>	30-500	58-550	0.5
<b>Kf mm<sup>-2</sup></b>	3.05- 50.98	5.91- 56.08	

Respecto a las propiedades mecánicas antes mostradas, tomaremos los datos del aluminio puro para poder clasificar las solicitaciones requeridas en el corte y en la boquilla.

#### 4.1.2 Energía de corte

La respuesta de un material a una tensión es el esfuerzo. La energía de deformación es el aumento de energía interna acumulado en el interior de un sólido deformable como resultado del trabajo realizado por las fuerzas que provocan la deformación.

Para este caso la energía de corte se puede expresar como:

$$\mathbf{Energía\ de\ corte = F_{corte} * e} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde

F- Fuerza necesaria para generar el corte.

e- espesor de la lámina del material a cortar.

Para cualquier tipo de metal, se cuenta con un esfuerzo de resistencia a la tracción, que nos indicará la carga máxima que soporta el material antes de fracturarse. Para este caso se utilizó el Aluminio.

$$\mathbf{\tau_{corte} = 56.08 \frac{KgF}{mm^2}}$$

Teniendo la resistencia de tracción podemos decir que:

$$\mathbf{\tau_{corte} = \frac{F_{corte}}{A_s}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Donde

A<sub>s</sub>- área de la superficie del material a ser removida por el chorro.

$$\mathbf{A_s = \pi(\emptyset)(e) = 39.89\ mm^2}$$

Definiendo el valor de A<sub>s</sub>, se sustituye en la Ec. 7 para obtener la Fuerza de corte.

$$\mathbf{F_{corte} = \tau_{corte} (A_s) = 50.98 \frac{KgF}{mm^2} (39.89\ mm^2) = 2,235.6351\ N}$$

Obteniendo el valor de Fuerza de corte, se sustituye el valor en la  $\tau_{corte}$  para saber la energía necesaria que se necesita para cortar 1[in] de Aluminio.

$$E \text{ deformación} = F_{corte} (e) = 2,235.635 \text{ N} (25.4 \text{ mm}) = 56,785.131 \text{ N} * \text{mm}$$

#### 4.1.3 Presión de agua necesaria

La aceleración de cierto volumen de agua presurizada en un orificio genera altas velocidades. En este caso se utiliza la ley de Bernoulli.

$$P_{at} + \frac{P_w}{2} \cdot V_0^2 + P_w \cdot g \cdot h_1 = P + \frac{P_w}{2} \cdot V_{tuberia}^2 + P_w \cdot g \cdot h_2 \quad (\text{Ec. 8})$$

Sustituyendo los valores anteriores en la Ecuación 8, se anexa la tabla A1 donde se muestra el resultado de las magnitudes de corte que se necesita para los materiales que se pueden llegar a utilizar en la Facultad de Ingeniería. Como fue mencionado anteriormente, el material a utilizar será el aluminio, a continuación se muestra las solicitudes que se presentan en un corte por chorro de agua.

Tabla 4.5. Aluminio (Presión 2 para cortar 25.4 mm)<sup>1</sup>

Metales	Resistencia a la tracción.	Fuerza de Corte [N]	Energía Deformación	Velocidad Chorro [m/s]	Presión 2
Aluminio	56.0450	1,788.8443	45,436.6455	19,015.3622	180.7E+6

Con la información anteriormente dada, podemos observar que la fuerza, resistencia y desgaste que se lleva a cabo en la boquilla de la cortadora por chorro de agua es de gran magnitud; con una presión aproximada de 180 [MPa], conforme a esto se visualiza que el material de la boquilla por corte por chorro de agua, debe tener como característica principal, gran dureza y gran resistencia al desgaste contra el agua.

<sup>1</sup> Anexo 2 Tabla de cálculos en diferentes materiales

## 4.2 Ensayo Dureza Rockwell a la boquilla

El ensayo de dureza Rockwell es usado para el estudio de dureza en materiales. Para el caso de la boquilla y corroborando con los datos de la tabla de Ashby, se llega a una Dureza Rockwell de 70 RC, pero dado que el estudio resultó con mucha inexactitud ya que la boquilla es de material conocido como carburo de tungsteno, presentaba una gran fragilidad, por lo tanto se prefirió llevar un ensayo más profundizado, como es la micro-dureza.

## 4.3 Ensayo de Microdureza-Vickers a la boquilla

Este ensayo y como su nombre lo indica, se hace estudio de microdureza, este se realiza en intervalos de distancia específica a la pieza. De los ensayos de microdureza realizados a la boquilla enfoque se obtuvieron los siguientes resultados como se muestran en la tabla 4.5

Tabla 4.5 Resultados de ensayo microdureza<sup>2</sup>

Eventos	HV
1	4455.88
2	4121.88
3	3919.66
4	4121.43
5	4174.17
6	4096.46
7	3968.01
8	4121.28
9	4121.36
10	4174.25

El estudio muestra que la boquilla proporcionada por el CCADET, tiene una dureza de 4174 HV, ya que sus requerimientos son mayores y su límite máximo a cortar son placas de acero inoxidable de 5[in] (127 [mm]). Para el presente documento y de acuerdo al objetivo, los requerimientos son menores y se plantea que la dureza de la boquilla debe estar entre los valores 2000-2500 [HV] dado que solo se ocupara para cortar placas de aluminio de 24.5 mm de espesor.

---

<sup>2</sup> Encontrar en Anexo 10, el estudio del Dr. Ignacio Figueroa del Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.

## 4.4 Gráficas Ashby

Se utilizó el método Ashby para la facilidad de selección del material, así como el proceso de fabricación correspondiente al diseño que se pretende obtener para generar uno económico, y que pueda responder a todas las solicitudes que se mencionan a continuación.

### 4.4.1 Costo de procesos para piezas herramientas contra dureza

En la gráfica que se muestra en el Anexo 2, nos proporciona los procesos de manufactura idóneos y los capaces de realizar el diseño que se tiene planeado, obteniendo el costo más bajo respecto a la dureza que se necesita tener en la boquilla. Para este caso, se mencionan a continuación los de mayor importancia, y posibles de realizar en la industria;

1. Electrolítico
2. Borurado
3. Proceso CVD

Observando e investigando cada uno de los procesos proporcionados por las gráficas de Ashby, dos de ellos no existen en la industria Mexicana, (i) Borurado y (ii) Proceso CVD, por lo que el costo llegaría a ser elevado y en conclusión se descartan estos dos procesos de manufactura.

### 4.4.2 Costo relativo de manufactura contra rango de espesor

La gráfica mostrada en el Anexo 3, demuestra cuales procesos de manufactura son adecuados para tener un bajo costo, pero teniendo en cuenta que el diseño de la boquilla en su espesor de dimensiones 0.1 – 10 [mm];

1. Fundición.
2. Inyección de Metal.
3. Compresión por molde.

### 4.2.3 Precio de material contra dureza

En la gráfica del Anexo 4, se demuestra cuál sería el material específico o idóneo a utilizar en el diseño de la boquilla para tener un menor costo, pero una alta dureza en la pieza y resistencia en el diseño.

1. Aceros rápidos con designación AISI M41, M43, M44, M46 y M47.

#### 4.2.4 Precio contra resistencia al agua

En la gráfica del Anexo 5, se mencionan los aceros para herramienta (aceros rápidos) de designación AISI a utilizar en el diseño de la boquilla ya que este sufre de gran desgaste en las paredes por lo tanto se tiene que obtener resistencia al desgaste por agua pero de igual manera que su costo sea relativamente bajo a comparación de la boquilla del CECADET. A continuación se mencionan los aceros para herramienta (aceros rápidos)

1. Tungsteno AISI T2, T5.
2. Molibdeno AISI M3, M4, M7.

#### 4.2.5 Dureza contra costo relativo del utillaje

La gráfica del Anexo 6, muestra los materiales y las tecnologías de superficie que mejor se acoplan a los requerimientos que necesita cumplir el diseño de la boquilla para la cortadora por chorro de agua y a su vez que el costo del material sea realmente bajo, los materiales que cumplen estas características se mencionan a continuación;

1. Carburación y carbonitruración.
2. Deposición física de vapor.
3. Nitruración.
4. Electrodeposición.

#### 4.2.6 3D contra rango de espesor

La gráfica del Anexo 7, muestra la concordancia y el material adecuado a utilizar para poder generar un sólido pero de pequeñas dimensiones que requiere el diseño de la boquilla para la cortadora por chorro de agua y teniendo en cuenta que el diseño es de dimensiones pequeñas aproximadamente 0.01 – 1 [mm].

1. Inyección de metal.
2. Fundición.
3. Impresión 3D.
4. Deposición de partículas del material mediante inyección.

Con la información anteriormente dada y analizando los resultados dados en los estudios de microdureza, llegamos a la conclusión de que los posibles procesos a utilizar por su costo de manufactura y factibilidad de generar sólidos 3D de dimensiones pequeñas (0.1-1mm) para la salida del chorro de agua y así como las posibles industrias que posiblemente se encuentran en México que utilizan los procesos se describen a continuación.<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Anexos 2 -7 Graficas Ashby

## 4.5 Elección de Tolerancias de fabricación

### 4.5.1 Estructura del sistema de tolerancia ISO

Las condiciones de funcionamiento de una pieza obligan a establecer ajustes y tolerancias entre ella y aquellos elementos sobre los que se montan. La estructura de sistema de tolerancia ISO, está basada en la posición de la zona de tolerancia respecto a la línea cero o de referencia y el valor de la tolerancia se hace depender de la magnitud de la medida nominal, las posiciones consideradas se designan por letras mayúsculas para agujeros y minúsculas para ejes, en la figura 4.1, muestra las establecidas (Santiago, 2014).

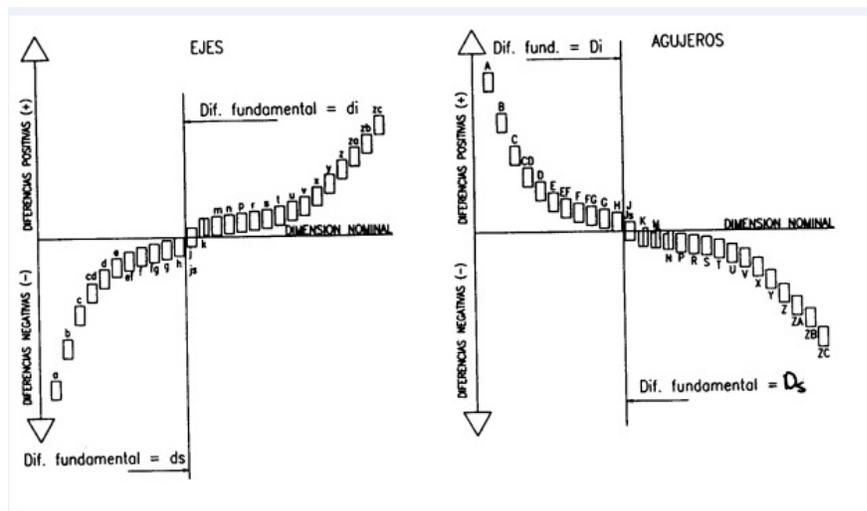


Figura 4.1 Estructura del sistema de tolerancia ISO (Santiago, 2014)

Las magnitudes de las tolerancias se hacen depender para un mismo grupo de medidas nominales de una escala con 18 escalones denominada calidad IT y designada por los números 01, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15 y 16. Los valores de las tolerancias IT son función de la magnitud de los diámetros.

De esta forma la designación de una tolerancia se realiza con letras y números, correspondiendo las primeras a la posición de la tolerancia y su magnitud por las cifras IT (Santiago, 2014).<sup>4</sup>

Como conclusión de la Figura 4.2, es de utilidad para determinar la tolerancia que se debe de cumplir para el diseño de la boquilla por chorro de agua, debe ser de IT 01, considerando el diseño como una herramienta de corte y de alta precisión.

<sup>4</sup> Anexo 8. Valor de las tolerancias para calidad de fabricación

#### 4.5.2 Sistema de eje base o único.

Se denomina así dentro del sistema de tolerancia ISO, a un sistema de ajustes en las que las diferencias superiores para todos los ejes son nulas para la posición h.<sup>5</sup> La figura 4.2, muestra un claro ejemplo de un eje base.

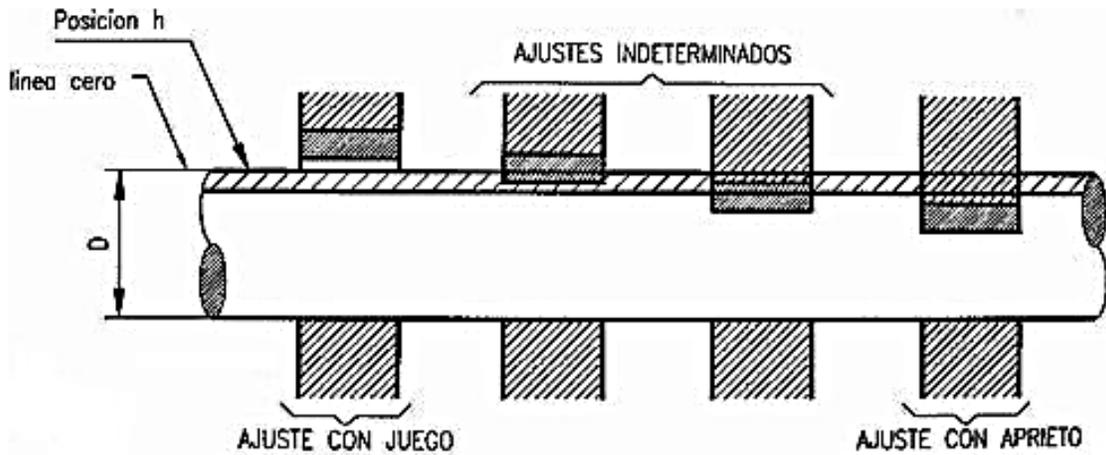


Figura 4.2. Sistema de eje base o único (U.P.V.E.H.U, 2014)

<sup>5</sup> Anexo 9 Sistema de eje Base o único

## 5. Diseño de detalle de la boquilla

### 5.1 Características para el diseño de detalle de la boquilla

En este capítulo se establecen las especificaciones del diseño de la boquilla para una cortadora por chorro de agua, como anteriormente se mencionó. El diseño de detalle, se basó en la WJC que se encuentra en el CCADET, para lograr mayor facilidad de montaje y uso de la misma. En la figura 5.1, se puede ver el cabezal completo, donde también se muestra la boquilla (enfoque) y el lugar donde debe estar posicionada.

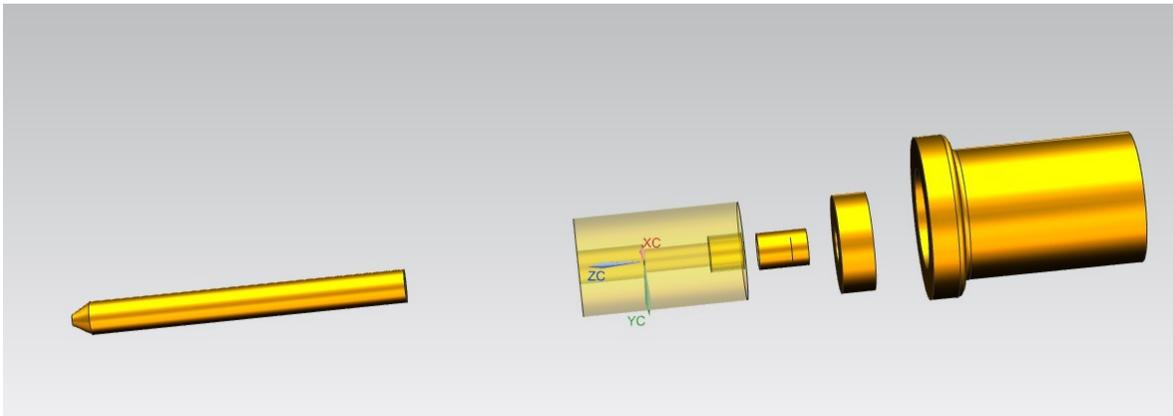


Figura 5.1 Explosivo de ensamble de la boquilla con el cabezal

### 5.2 Detalle del sistema de boquilla

El sistema de boquilla que mejor se acopla a las solicitaciones que se presentan en un corte de Aluminio de 1 [in] (25.4 [mm]) es el sistema múltiple de chorro de agua, mencionado anteriormente. Estos sistemas son ideales ya que pueden trabajar con bombas de presión que generen alrededor de  $P= 100[\text{MPa}]$ .

La característica principal del sistema múltiple de chorro de agua, es que está diseñada para soportar múltiples chorros, ya que a lo largo de éste, los flujos se alinean dando como resultado un flujo de gran calidad para generar un corte y para el caso presentado de una magnitud aproximada a 25.4 [mm].

La figura 5.2 Muestra el prototipo de la boquilla y la figura 5.3 muestra el interior de la boquilla (sistema múltiple de chorro de agua).

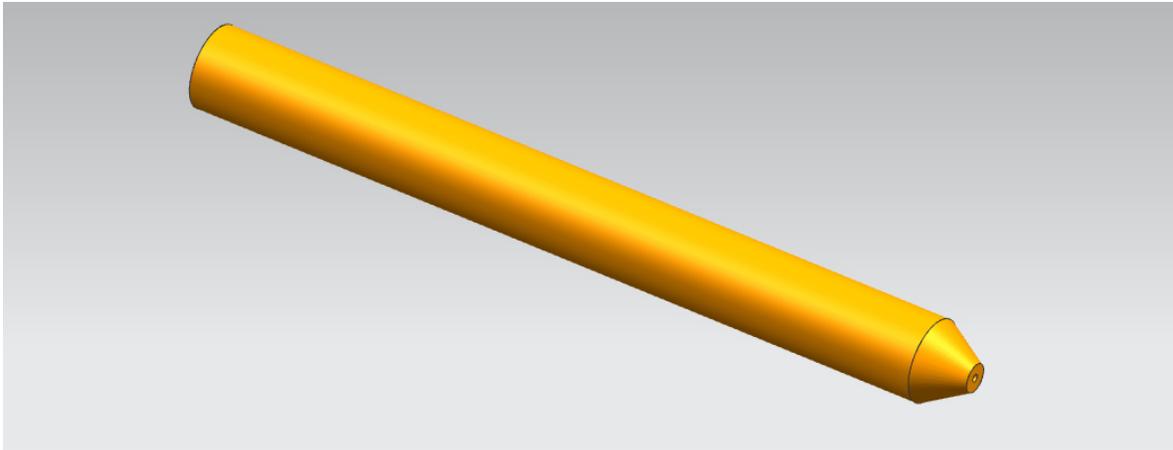


Figura 5.2 Boquilla realizada en NX



Figura 5.3 Corte transversal de la boquilla

### 5.3 Eje Base

Se realizó la investigación sobre el sistema de eje a utilizar, así como calidad y tipo de sistema ISO. El anexo 8 muestra, que la boquilla debe tener una alineación de tipo eje base. Derivado de un sistema de ajustes en las que las diferencias superiores para todos los ejes son nulas para la posición “h”.

Aunado a lo anterior, el eje base da las características de forzado duro, con posicionamiento de precisión con un compromiso entre juego e interferencia, mostrando aplicaciones para casquillos de guías de herramientas de corte, como se muestra en el anexo 9.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Anexo 9. Tabla de eje base

## 5.4 Materiales a utilizar en la manufactura de la boquilla para una cortadora por chorro de agua

Los materiales a utilizar según la previa investigación que se realizó con las gráficas Ashby, y que cumplen con los siguientes criterios; (i) dureza y (ii) resistencia a la corrosión son los siguientes aceros al:

1. Tungsteno
2. Molibdeno

La tabla 5.1 muestra los costos de los posibles materiales a utilizar

Tabla 5.1 Costos de materiales a utilizar

Material	Precio (MXN/Kg)
<b>Tungsteno</b>	200 – 300
<b>Molibdeno</b>	130 – 180

## 5.5 Aceros a utilizar por recomendación de especialistas

Debido al costo que implica la utilización de tungsteno para la fabricación de la boquilla se planteó materiales alternos a este. Por recomendación de la Dra. Sandra Rodil se buscaron las propiedades de los aceros D2 y M2, que aproximan a la dureza que requiere la boquilla para las solicitudes que se presentan al cortar 1 [in] de aluminio.

### 5.5.1 Acero M2

Acero rápido aleado al tungsteno y molibdeno, particularmente satisfactorio para herramientas de corte en las que se requiere mantenimiento de filo y gran tenacidad con buena resistencia al desgaste y mantenimiento de dureza al rojo. Las tablas 5.2 y 5.3 muestran la composición química y propiedades mecánicas del acero M2, respectivamente.

Tabla 5.2 Composición química del acero M2 (SISA, 2012)

<b>COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO</b>						
<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>W</b>
0.85	0.30	0.30	4.15	5.00	1.95	6.40
<b>NORMAS</b>						
<b>SAE / AISI</b>		<b>DIN</b>		<b>JIS</b>		
M2		1.3343		SKH 51		

Tabla 5.3 Propiedades mecánicas del acero M2 (SISA, 2012)

## PROPIEDADES MECÁNICAS

Temperatura de Temple		Temperatura de Revenido		Dureza	Charpy C Resistencia al Impacto	
°C	°F	°C	°F	HRC	ft.-lb.	(J)
1190	2175	550	1025	64	17	(23)
1175	2150	565	1050	63	19	(26)
1150	2100	580	1075	61	21	(28)

### 5.5.2 Acero D2

Acero al alto carbono y alto cromo. Dimensionalmente estable de excelente rendimiento de corte y resistencia al desgaste. Especialmente apto para el temple al aire<sup>7</sup>. Las tablas 5.4 y 5.5, muestran la composición química y propiedades mecánicas del acero D2, respectivamente.

Tabla 5.4 Composición química del acero D2 (SISA, 2012)

### COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
1.55	0.35	0.35	11.80	0.85	0.85

### NORMAS

SAE / AISI	DIN	JIS
D2	1.2379	SKD 11

<sup>7</sup> Anexos 11-12 Propiedades de las aleaciones

Tabla 5.5 Propiedades mecánicas del acero D2 (SISA, 2012)

### PROPIEDADES MECÁNICAS

	Temperatura <sup>(1)</sup> de Temple		Dureza HRC	Resistencia <sup>(2)</sup> al Impacto		Resistencia <sup>(3)</sup> al Desgaste Adhesivo
	°C	°F		ft.-lb.	(J)	
<b>D2</b>	1010	1850	60	21	(28)	3-4
<b>S7</b>	955	1750	57	125	(165)	1
<b>A2</b>	955	1750	60	40	(53)	2-3
<b>SISA-CR8</b>	1065	1950	62	30	(40)	5-6
<b>SISA-MET CR8</b>	1065	1950	62	70	(95)	5-6
<b>M2</b>	1120	2050	62	20	(27)	8-10
<b>SISA-MET M4</b>	1120	2050	62	32	(43)	20-25
<b>SISA-MET A11</b>	1175	2150	63	14	(19)	90

(1) Tratamiento Térmico: Templado según se indica con revenido a la dureza.

(2) Prueba de impacto Entalla Charpy C.

(3) Valores relativos.

(el número mayor representa resistencia al desgaste superior).

#### 5.5.3 Precios relativos de los aceros a utilizar

La tabla 5.6 muestra los precios de los aceros en la industria.

Tabla 5.6 Precios de los aceros a utilizar

Acero	Precio por 1 [in] x 1 [in] x 20 [in]
<b>D2</b>	730 MXN
<b>M2</b>	810 MXN

Relativamente los precios son accesibles, teniendo en cuenta que de la barra de acero pueden llegar a salir más de un prototipo de la cortadora por chorro de agua. Sin embargo se observa un punto desfavorable, que sus características mecánicas son menores a las que se requieren en la boquilla. Para ello se necesitaría realizar un recubrimiento y poder llegar a tener una dureza Vickers entre 2000-2500 [HV], teniendo en cuenta que las horas de uso serán menores a las usuales en el CCADET y que el aluminio será el requerimiento máximo a cortar.

#### 5.6 Procesos de recubrimiento a utilizar en la boquilla para cortadora por chorro de agua

Los posibles recubrimientos a utilizar y por recomendaciones del Dr. Arturo Barba Pingarrón, en los aceros M2 y D2, tomando en cuenta la geometría de la boquilla, así como las dimensiones de ellas, son:

1. Deposición física en fase vapor.
2. Nitruración gaseosa.

#### 5.6.1 *Proceso de deposición física en fase vapor (PVD)*

Las técnicas PVD están basadas en la formación de un vapor del material a depositar con objeto de que se condense sobre la superficie de un sustrato para formar una o varias capas ultra delgadas que lo recubran y protejan. El proceso se realiza en atmósferas controladas en alto vacío (10<sup>-5</sup> [bar]) para evitar la interacción del material en estado gaseoso con el aire así como la absorción, por parte del sustrato de gases contaminantes de la atmósfera además se efectúa a temperaturas de entre 150 y 500 [°C] dependiendo de las características a obtener en el recubrimiento.

En la mayoría de los casos se recubren aceros previamente endurecidos, por tratamiento térmico con películas delgadas de uno o más materiales duros.

#### 5.6.2 *Nitruración gaseosa*

El proceso de nitruración gaseosa es una técnica industrial que básicamente ha sido utilizada para obtener un endurecimiento superficial en las aleaciones férricas, mediante el cual se consigue la formación de una capa dura por absorción y difusión de nitrógeno, sin la necesidad de un tratamiento posterior alguno para que dicha capa alcance su máxima dureza. Con la ventaja de que tiende a ser más económico y más adaptable a la geometría de las piezas a tratar.

#### 5.6.3 *Precios relativos de los procesos de recubrimiento*

La tabla 5.7 muestra los precios relativos de los procesos de recubrimiento a utilizar en los aceros M2 y D2.

Tabla 5.7 Precios relativos de recubrimientos

Proceso de Recubrimiento	Precio de Recubrimiento
<b>PVD</b>	Blanco de Tungsteno 3,000 MXN
<b>Nitruración</b>	No es viable, dureza por debajo de los requerimientos

Se tomaron en cuenta dos procesos de recubrimiento, dando como resultado que la nitruración no es viable debido a que no cumple con requerimientos de dureza y desgaste al agua. Por otra parte por recomendaciones del Dr. Alejandro Esparza, menciona que un recubrimiento por PVD de tungsteno es viable, pero genera un costo de aproximadamente 3,000 pesos, por lo que se debe tener un pieza de 3 [in] de diámetro y 1/8 [in] de ancho, para ser utilizada como blanco para depositar partículas de

tungsteno en la boquilla. Sin embargo existe una complicación de este proceso, debido a la geometría de la boquilla, impidiendo que el recubrimiento sea del todo homogéneo en la pieza, resultando acumulación de partículas en los ángulos de conicidad de entrada de la boquilla impidiendo el paso a lo largo de la sección transversal de 1[mm].

### 5.7 Proceso de mayor factibilidad a utilizar para la manufactura de la boquilla de la cortadora por chorro de agua (tubo enfoque)

Los procesos de mayor factibilidad a utilizar para la manufactura de la boquilla y correspondiente a la previa investigación mediante las gráficas Ashby, son; (i) fundición, (ii) inyección de metales y (iii) compresión por molde. Estos no son de gran utilidad, muchos de estos procesos no están desarrollados en México, en otras palabras la geometría y dimensiones de la boquilla necesitan tener alta precisión, debe cumplir con un diámetro interno de 1 [mm] y tener una calidad tipo N7, forjado duro, por lo cual la industria Mexicana no cumple.

### 5.8 Precios relativos ideales de procesos de manufactura.

La tabla 5.8 muestra los precios relativos de los posibles procesos a utilizar en la manufactura de la boquilla

Tabla 5.8 Precios relativos de manufactura

Proceso de manufactura	Precio (MXN)
<b>Fundición</b>	4,000-7,000
<b>Inyección de metal</b>	No es viable el proceso, materiales no presentan las propiedades mecánicas para llevar a cabo el proceso
<b>Compresión por molde</b>	20,000-30,000 (por la elaboración del molde)

Como el objetivo del presente trabajo es obtener el diseño de una boquilla para una cortadora por chorro de agua de bajo costo, los materiales antes mencionados, se observa que su precio no es elevado (tabla 5.1), sin embargo, los procesos para manufacturarlo son elevados excediendo el costo de la boquilla de tungsteno, esto se debe a que es un primer ensayo y prototipo y se necesitaría un inversión inicial de aproximadamente 35,000 MXN.

### 5.9 Planos de la boquilla para una cortadora por chorro de agua

Los planos de la boquilla para una cortadora por chorro de agua, considera tres parámetros importantes, uno de ellos, es la longitud de la cámara de mezclado, dado que es un factor

determinante para obtener un corte eficiente, en este caso de 25.4 [mm]. Se disminuye la eliminación de masa o el corte disminuye su profundidad cuando la cámara de mezclado se aproxima a los 20 [mm] de longitud, pero si ésta excede los 20 [mm], el flujo se mantiene estable aumentando la eliminación de masa a un 15%.

Por lo tanto y en conclusión, la longitud total de la cámara de mezclado, se plantea que sea de 96 [mm], como se muestra en la figura 5.4.

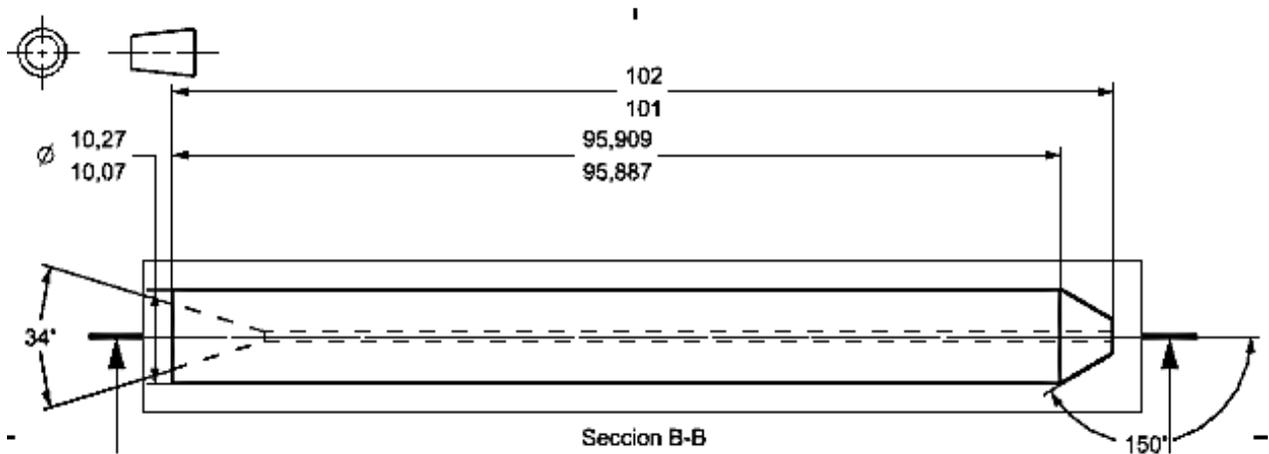


Figura 5.4 Plano de detalle de boquilla para cortadora por chorro de agua<sup>8</sup>

El segundo parámetro a considerar, es la inclinación y el diámetro de entrada del agua y el abrasivo. Se menciona anteriormente que el diámetro de entrada no debe exceder los 8 [mm], haciendo de ella una conicidad donde el mínimo diámetro de salida sea de 1[mm], tomando de igual manera las especificaciones de la cortadora del CCADET. Para el ángulo de inclinación, este no debe exceder los 45° así se evita el rebote innecesario del flujo a lo largo del tubo enfoque.

Por último, la sección por donde saldrá el flujo combinado de agua y abrasivo, habiendo pasado a lo largo del enfoque, dando como resultado un flujo estable y homogéneo de agua-abrasivo, las dimensiones de diámetro deben ser de 1 [mm], como se muestra en la figura 5.5. Llegando a ser menor el diámetro, éste provocaría obstrucción debido a las partículas de abrasivo que contiene el flujo de agua, pudiendo generar acumulación de presión y a su vez una falla en la boquilla, resultando el desgaste del tubo enfoque o en el peor de los casos fractura en el interior de ella.

<sup>8</sup> Anexo 13 planos de detalle de la boquilla

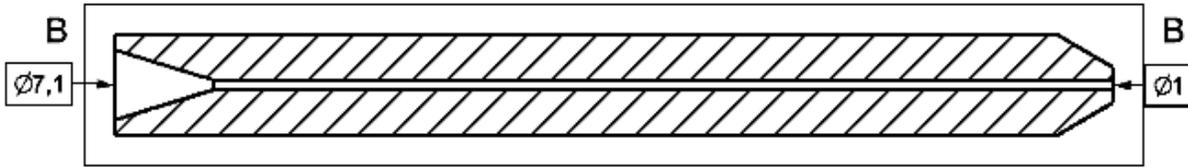


Figura 5.5 Planos de corte transversal de boquilla para cortadora por chorro de agua<sup>9</sup>

## 6 Resultados

La geometría de la boquilla propuesta para su óptimo funcionamiento debe ser de un diámetro crítico interno de entrada de 4.06 [mm] y la desviación del orificio de rubí a la de entrada no debe exceder a 51 [ $\mu\text{m}$ ]. También se propone que del diámetro crítico interno a la salida debe ser menor o igual a 1 [mm] pero nunca menor a 0.5 [mm] ya que esto obstruiría el paso del agua con el abrasivo, ocasionando mayor desgaste en las paredes de la boquilla debido a que se obstruye el paso de salida si se va a requerir abrasivo.

La longitud establecida en el diseño de la boquilla para una cortadora por chorro de agua, es de 102 [mm]. De la totalidad del conducto se consideró que de 5 a 10 [mm] debe de tener una conocida a la entrada de la boquilla, por lo tanto la longitud de la tobera de 1 [mm] debe ser de 96 [mm], se debe enfatizar que el conducto que va de la entrada de la boquilla a la salida debe de ser un tubo recto, para facilidad de manufactura y generación del molde de la pieza.

Por otra parte, el interior del tubo recto debe de tener una tolerancia de calidades IT 01, evita tener turbulencias y que el desgaste sea menor. Para la fabricación de la boquilla para una cortadora por chorro de agua, se debe considerar un eje base de características h6 con un agujero N7 dando como característica primordial que sea una clase de forzado duro, característico de posicionamientos precisos.

El material que se va a utilizar en la fabricación de la boquilla es el Acero D2 ya que este cuenta con una aleación de tungsteno y molibdeno y asemejan la dureza requerida que debe ser de 2000 HV

La fabricación de la boquilla se llevara a cabo a través del proceso de manufactura de compresión por molde.

Posteriormente se pasara por un proceso de recubrimiento por PVD de tungsteno.

<sup>9</sup> Anexo 13 planos de detalle de la boquilla

## 7. Conclusiones

Se cumplió con el objetivo del trabajo de generar la propuesta de diseño de una boquilla para corte por chorro de agua, donde se verificó que en la práctica industrial se tienen requerimientos de presiones aproximadamente de 350 [MPa]. Nuestro diseño está basado en los requerimientos de la Facultad de Ingeniería, donde se presenta corte de Aluminio de máximo de una pulgada. Conociendo lo anterior, se realizaron los cálculos pertinentes, utilizando el principio de Vernulli, con lo cual se concluye que la solicitud máxima que se puede presentar en el corte de aluminio es de 180 [MPa].

Conforme al análisis realizado y con la prueba de dureza que se realizó a una boquilla de tungsteno, se concluye que los requerimientos a cumplir de dureza en la boquilla debe ser mayor a 2000 [HV] y menor o igual a 2500 [HV], ya que el grosor máximo a cortar es de 1 [in] de Aluminio. Se define que el material que cumple con los requisitos solicitados es el Tungsteno (AISI T2, AISI T5) y Molibdeno (AISI M3, AISI M4, AISI M7). Estos materiales cumplen con el objetivo de dureza, pero presentan un conflicto económico, el precio de manufactura es excesivo, debido a que en la industria Mexicana no cuenta con dichos procesos o en el caso de que lo tenga, el costo es elevado.

Por lo anterior el estudio requirió de una evaluación exhaustiva de otros materiales, resultado de ello los aceros D2 y M2 asemejan la dureza requerida para el proceso de corte por chorro de agua, dado que uno de ellos es aleación de tungsteno con molibdeno y el otro una aleación de acero alto carbono (1.55% promedio) y alto cromo (11.88% promedio), bajando el costo de manufactura.

Conforme a la selección de materiales, tres procesos de manufactura surgen como opción viable para generar la geometría requerida de la boquilla. El primero de ellos, la fundición, con un costo entre 4,000 y 7,000 pesos MXN resultando que el precio de la boquilla se aproxima con el que se cuenta en la industria. Para el segundo caso, se concluye que no es viable, el proceso de inyección de acero, ya que el material no presenta las propiedades mecánicas adecuadas para someterlo al proceso. Por último la compresión por molde, se necesita la creación del molde con un costo de 20,000 pesos MXN. Se determina que el objetivo económico, no es posible alcanzarlo debido a que es un prototipo y en la creación de un nuevo proyecto la inversión inicial siempre será en costo superior al producto con el que se cuenta en la industria, se requiere de un estudio económico profundizado para determinar el tiempo que tardaría en recuperar la inversión y de igual manera que el costo de producción sea inferior a la boquilla que se encuentra en el mercado actual (tungsteno).

Una vez que los procesos de manufactura fueron definidos junto con el material, surge una nueva necesidad en la boquilla para corte por chorro de agua, la dureza. Los materiales presentan una dureza inicial de 800 a 1300 [HV], con lo cual no cumple a los requerimientos conforme a los análisis previamente vistos en el capítulo 4. Para lograr los requerimientos de dureza en la pieza, es necesario realizar un recubrimiento. Analizando los posibles casos de recubrimiento, la opción considerada es el proceso PVD, el cual permite generar homogéneamente un recubrimiento sobre toda la pieza pero teniendo una incertidumbre de posible acumulación en partes esquinadas del zona cónica de la boquilla.

Definidos los parámetros de gran relevancia para la boquilla por cortadora por chorro de agua, que son: (i) longitud del tubo, (ii) diámetro crítico interno de entrada, (iii) diámetro crítico interno de salida, (iv) recubrimientos, (v) materiales, (vi) manufactura, (vii) industria y (viii) requerimientos del cliente o usuario. Se puede llegar al prototipo en físico de la boquilla, para que posteriormente seguir con las pruebas pertinentes para poder visualizar si la aleación y el recubrimiento cumplen con las expectativas anteriormente mencionadas.

El documento presente dio una mayor claridad de la industria. A partir de éste se concluye que no necesariamente la industria se necesita adaptar a un solo producto donde el rango de trabajo excede las necesidades de la misma, dando la posibilidad que la industria podría tener una gama de boquillas las cuales cumplan con necesidades específicas haciendo de ello el decremento de la inversión.

Un punto a recalcar y de gran importancia, por el cual no pudo determinarse el costo real, es que los procesos de manufactura que se necesitan, son de alta tecnología y no se cuentan todavía en la industria de México. Para la investigación de estos procedimientos y costos se determinó con las técnicas F. Ashby. Otro punto desfavorable tanto para los alumnos de la facultad y para la industria son los apoyos entre ellos, por un lado el alumno no cuenta con el capital necesario para desarrollar cualquier prototipo de gran inversión (superior a \$20,000 MXN), por lo que la industria no muestra gran interés. Desde el punto industrial, los procesos que existen hoy en día no son del todo públicos, por lo que al alumno se dificulta el desarrollo del prototipo o producto aun teniendo el capital para el desarrollo de este.

El presente trabajo, deja planteado el diseño de la boquilla para una cortadora por chorro de agua, planteando diferentes trabajos a futuro como son: (i) realizar el prototipo y verificar las horas de trabajo conforme a los materiales previamente seleccionados, (ii) llevar a cabo un estudio económico donde se justifique que el costo de manufactura de una gama de boquillas para diferentes materiales a cortar en la cortadora por chorro de agua sea remunerable o el costo de inversión se recupere en un tiempo adecuado no mayor a un año, (iii) estudio de PVD en geometrías complejas de dimensiones menores a 10 [mm] verificando la deposición del blanco (placa de tungsteno) y (iv) evaluar el apoyo y si mejora la calidad de los trabajos donde sean requeridos cortes de precisión para los alumnos de la Facultad de ingeniería.

## BIBLIOGRAFÍA

- Articulos Enciclopedicos*. (s.f.). Obtenido de [http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article\\_90733.html](http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article_90733.html)
- Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in MEchanical Design*. MA, Burlington, USA: Elsevier Ltd.
- Castillo, M. e. (s.f.). *Lecturas de ingeniería*. Distrito Federal , Cuautitlán Izcalli, México.
- Franz, D. N. (s.f.). *Flow*. Obtenido de <http://www.flowwaterjet.com/es-MX/waterjet-technology/history.aspx>
- GmbH, T. (s.f.). *Metal actual* . Obtenido de [http://www.metalactual.com/revista/6/procesos\\_corte.pdf](http://www.metalactual.com/revista/6/procesos_corte.pdf)
- Guerrero, G. (s.f.). “Corte por plasma” . Universidad Don Bosco, Facultad de Estudios Tecnológicos .
- Hypertherm*. (s.f.). Obtenido de [http://www.hypertherm.com/es/Training\\_and\\_education/Intro\\_to\\_plasma/What\\_is\\_plasma/plasma\\_timeline.jsp](http://www.hypertherm.com/es/Training_and_education/Intro_to_plasma/What_is_plasma/plasma_timeline.jsp)
- Interempresas Metalmecánica*. (s.f.). Obtenido de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/12110-Tecnologias-de-corte-de-chapa.html>
- Jones, M. F. (2008). “Materiales para Ingeniería 1, Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño” . Barcelona, España.: Reverté.
- Kinslow, D. G. (1976). *Pressure Due to High-velocity Impact of Water Jet*. Springer.
- KMT Waterjet*. (s.f.). Obtenido de <http://www.kmtwaterjet.com.mx/>
- Kovacevic, A. W. (1998). *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. London: Springer.
- Langmuir, L. T. (Febrero de 1929). *Physical review . Oscilations in ionized gases* .
- McGeough, J. (30 de 9 de 1988). *Advance Methods of Machining* . London, New Fetter Lane, London: Chapman and Hall.
- Rodriguez, F. D. (2007). *Lecturas de ingenieria . Electroerosion* . Cuautitlan Izcalli , Estado de mexico , Mexico .
- S.J., J. B. (s.f.). “Mecanizados especiales” . Liceo Industrial San Miguel Agustín Edwards Ross.
- SAMCA, G. (s.f.). *estamode Stamping Motion* . Obtenido de [http://www.estamode.com/tecnologias/corte\\_por\\_laser.html](http://www.estamode.com/tecnologias/corte_por_laser.html)
- Santiago, P. M. (s.f.). *Lecturas Complementarias Tolerancias de fabricación*. Obtenido de [http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA\\_COMPLEMENTARIA/TOLERANCIAS/tolerancias.pdf](http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA_COMPLEMENTARIA/TOLERANCIAS/tolerancias.pdf)
- Shimizu, S. (2011). *Tribology in Water Jet Processes*. *Nihon University, College of Engineering*.

- Solà, P. M. (1989). *Electromecanizado. electroerosión y mecanizado electroquímico*. España: A.G Portavella, S.A.
- Summers, D. A. (1995). *Waterjetting Technology*. London: E & FN Spon.
- Villar, C. M. (s.f.). "Equipos de Corte por Chorro de agua" . Metal Actual.
- WARDjet . (s.f.). Obtenido de <http://www.wardjet.com/waterjet-university.html>
- Articulos Enciclopedicos*. (2014). Obtenido de [http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article\\_90733.html](http://centrodeartigos.com/articulos-enciclopedicos/article_90733.html)
- Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in MEchanical Design*. MA, Burlington, USA: Elsevier Ltd.
- Castillo, M. e. (2007). *Lecturas de ingeniería*. Distrito Federal, Cuautitlán Izcalli, México.
- Electric, L. (Mayo de 2014). Obtenido de <http://www.lincolnelectric.com/es-es/equipment/plasma-cutters/Pages/plasma-cutters.aspx>
- Flow. (2014). *Flow water jet cutting*. Retrieved from <http://www.flowwaterjet.com/en/waterjet-cutting/cutting-systems.aspx>
- Franz, D. N. (12 de 2014). *Flow*. Obtenido de <http://www.flowwaterjet.com/es-MX/waterjet-technology/history.aspx>
- GmbH, T. (2008). *Metal actual*. Obtenido de [http://www.metalactual.com/revista/6/procesos\\_corte.pdf](http://www.metalactual.com/revista/6/procesos_corte.pdf)
- Guerrero, G. (2009). "Corte por plasma". Universidad Don Bosco, Facultad de Estudios Tecnológicos.
- Hypertherm*. (2014). Obtenido de [http://www.hypertherm.com/es/Training\\_and\\_education/Intro\\_to\\_plasma/What\\_is\\_plasma/plasma\\_timeline.jsp](http://www.hypertherm.com/es/Training_and_education/Intro_to_plasma/What_is_plasma/plasma_timeline.jsp)
- Interempresas Metalmecánica*. (2003). Obtenido de <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/12110-Tecnologias-de-corte-de-chapa.html>
- Jones, M. F. (2008). "Materiales para Ingeniería 1, Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño" . Barcelona, España.: Reverté.
- Kinslow, D. G. (1976). *Pressure Due to High-velocity Impact of Water Jet*. Springer.
- KMT Waterjet*. (2014). Obtenido de <http://www.kmtwaterjet.com.mx/>
- Kovacevic, A. W. (1998). *Principles of Abrasive Water Jet Machining*. London: Springer.
- Langmuir, L. T. (Febrero de 1929). *Physical review* . *Oscilations in ionized gases* .
- Laser, K. (2014). *Kaitian Laser Porfessional Laser Equipment Manufacturer*. Obtenido de <http://www.kaitianlaser.net/2-cutting-machine-1.html>

- McGeough, J. (30 de 9 de 1988). *Advance Methods of Machining* . London, New Fetter Lane, London: Chapman and Hall.
- Rodriguez, F. D. (2007). *Lecturas de ingeniería . Electroerosion* . Cuautitlan Izcalli , Estado de Mexico , Mexico .
- S.J., J. B. (2014). “Mecanizados especiales” . Liceo Industrial San Miguel Agustín Edwards Ross.
- SAMCA, G. (2014). *estamode Stamping Motion*. Obtenido de [http://www.estamode.com/tecnologias/corte\\_por\\_laser.html](http://www.estamode.com/tecnologias/corte_por_laser.html)
- Santiago, P. M. (2014). *Lecturas Complementarias Tolerancias de fabricación*. Obtenido de [http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA\\_COMPLEMENTARIA/TOLERANCIAS/tolerancias.pdf](http://ocw.upm.es/expresion-grafica-en-la-ingenieria/ingenieria-grafica-metodologias-de-diseno-para-proyectos/Teoria/LECTURA_COMPLEMENTARIA/TOLERANCIAS/tolerancias.pdf)
- Shimizu, S. (2011). *Tribology in Water Jet Processes*. *Nihon University, College of Engineering*.
- SISA. (2012). Servicio Industrial, S.A DE C.V . *ACEROS SISA, 2*.
- Solà, P. M. (1989). *Electromecanizado. electroerosión y mecanizado electroquímico*. España: A.G Portavella, S.A.
- Summers, D. A. (1995). *Waterjetting Technology*. London: E & FN Spon.
- Systems, M. M. (2014). *Mitsubishi Machinery Systems, INC*. Obtenido de <http://www.mcmachinery.com/products-and-solutions/category/laser/>
- U.P.V.E.H.U. (2014). Obtenido de <http://www.vc.ehu.es/Dtecnico/Temario.htm>
- Villar, C. M. (2014). “Equipos de Corte por Chorro de agua” . España: Metal Actual.
- WARDjet. (2014). Obtenido de <http://www.wardjet.com/waterjet-university.html>

## Anexos

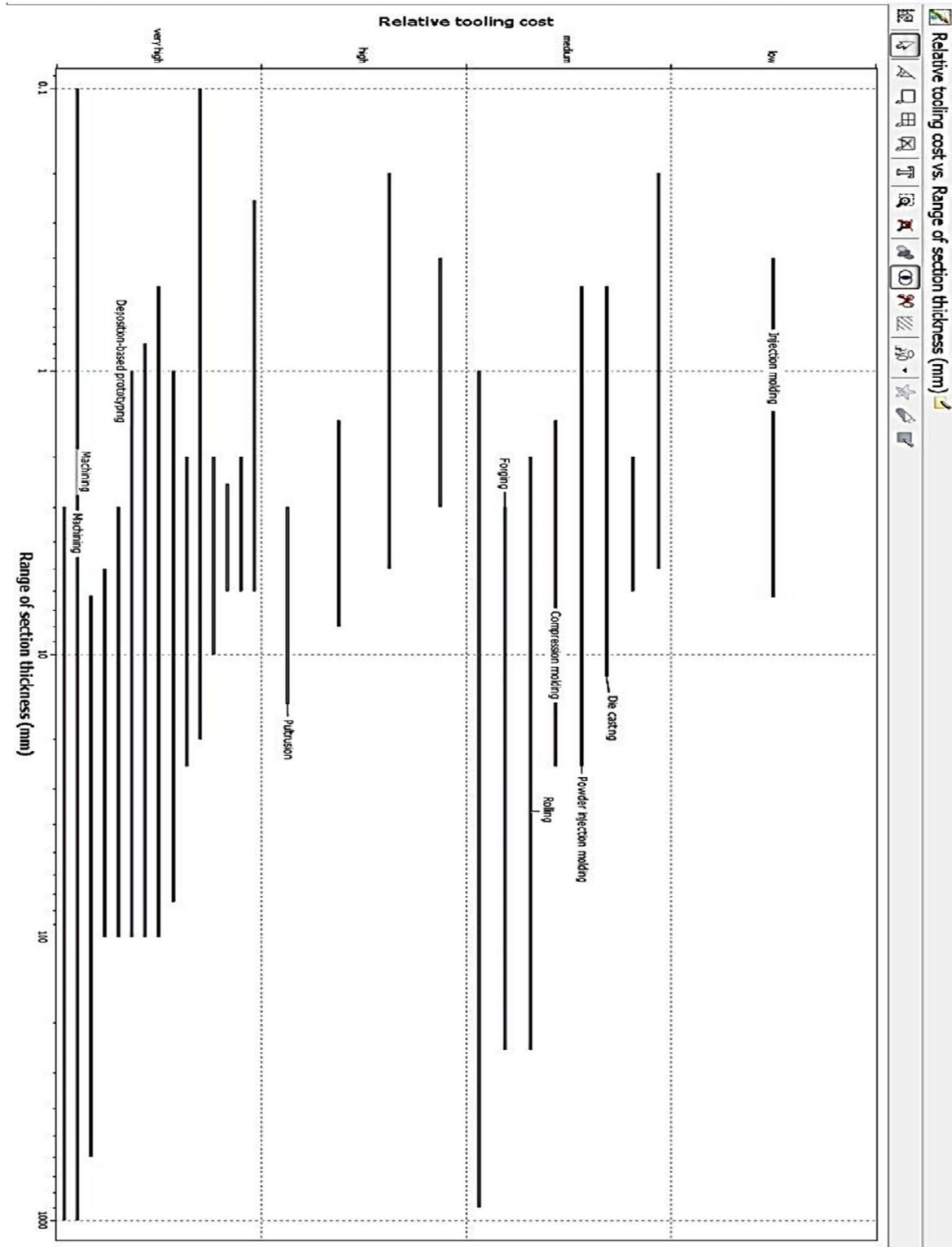
Anexo 1. Tabla con los valores de las solicitudes de los diferentes materiales más utilizados en la industria.

Calculos para cortadora de agua										
Metales	Resistencia a la tracción.	Fuerza de Corte [N]	Energía Deformación	Velocidad Chorro [m/s]	Presion 2	Area [m2]	Area [mm2]	Espesor [mm]	Area para chorro [mm2]	y agua [kg/m3]
Aluminio	56.0450	2,235.6351	56,785.1303	21,257.8229	225.9E+6	1.26E-07	39.8900	25.4000	0.1257	9.8060
Cobre	10.19	406.4791	10,324.5691	9,064.3662	41.1E+6	1.26E-07	39.8900	25.4000	0.1257	9.8060
Acero de alto contenido de carbono	169.154	6,747.5531	171,387.8477	36,931.0355	681.7E+6	1.26E-07	39.8900	25.4000	0.1257	9.8060
Acero de medio contenido de carbono	41.779	1,666.5643	42,330.7335	18,353.9426	168.4E+6	1.26E-07	39.8900	25.4000	0.1257	9.8060
Acero inoxidable	48.912	1,951.0997	49,557.9319	1,258,771.4695	32.0E+6	1.26E-07	39.8900	25.4000	0.1257	9.8060
<b>Cerámicos</b>										
Vidrio de sílice	2.2418	89.4254	2,271.4052	57,693.6924	1.5E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Ladrillo	0.7133	28.4535	722.7198	18,357.0839	466.3E+3	1.26E-07	39.8900	25.4000	0.1257	9.8060
Concreto	0.2038	8.1296	206.4914	5,244.8811	133.2E+3	1.26E-07	39.8900	25.4000	0.1257	9.8060
<b>Natural</b>										
Bamboo	3.6684	146.3325	3,716.8449	94,407.8602	2.4E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Corcho	0.05095	2.0324	51.6228	1,311.2203	33.3E+3	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Piel	2.038	81.2958	2,064.9138	52,448.8112	1.3E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Madera longitudinal	6.114	243.8875	6,194.7415	157,346.4337	4.0E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Madera transversal	0.4076	16.2592	412.9828	10,489.7622	266.4E+3	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
<b>Polimeros</b>										
Nylon	9.171	365.8312	9,292.1122	236,019.6505	6.0E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Policarbonato	6.114	243.8875	6,194.7415	157,346.4337	4.0E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Polietileno	2.10933	84.1412	2,137.1858	54,284.5196	1.4E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
PET	4.92177	196.3294	4,986.7669	126,663.8791	3.2E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Acrilico	4.92177	196.3294	4,986.7669	126,663.8791	3.2E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Polipropileno	2.82263	112.5947	2,859.9057	72,641.6036	1.8E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
Poliestierno	3.65821	145.9260	3,706.5203	94,145.6162	2.4E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806
PVC	4.14733	165.4370	4,202.0996	106,733.3309	2.7E+6	1.26E-07	39.89	25.4	0.12566	9.806

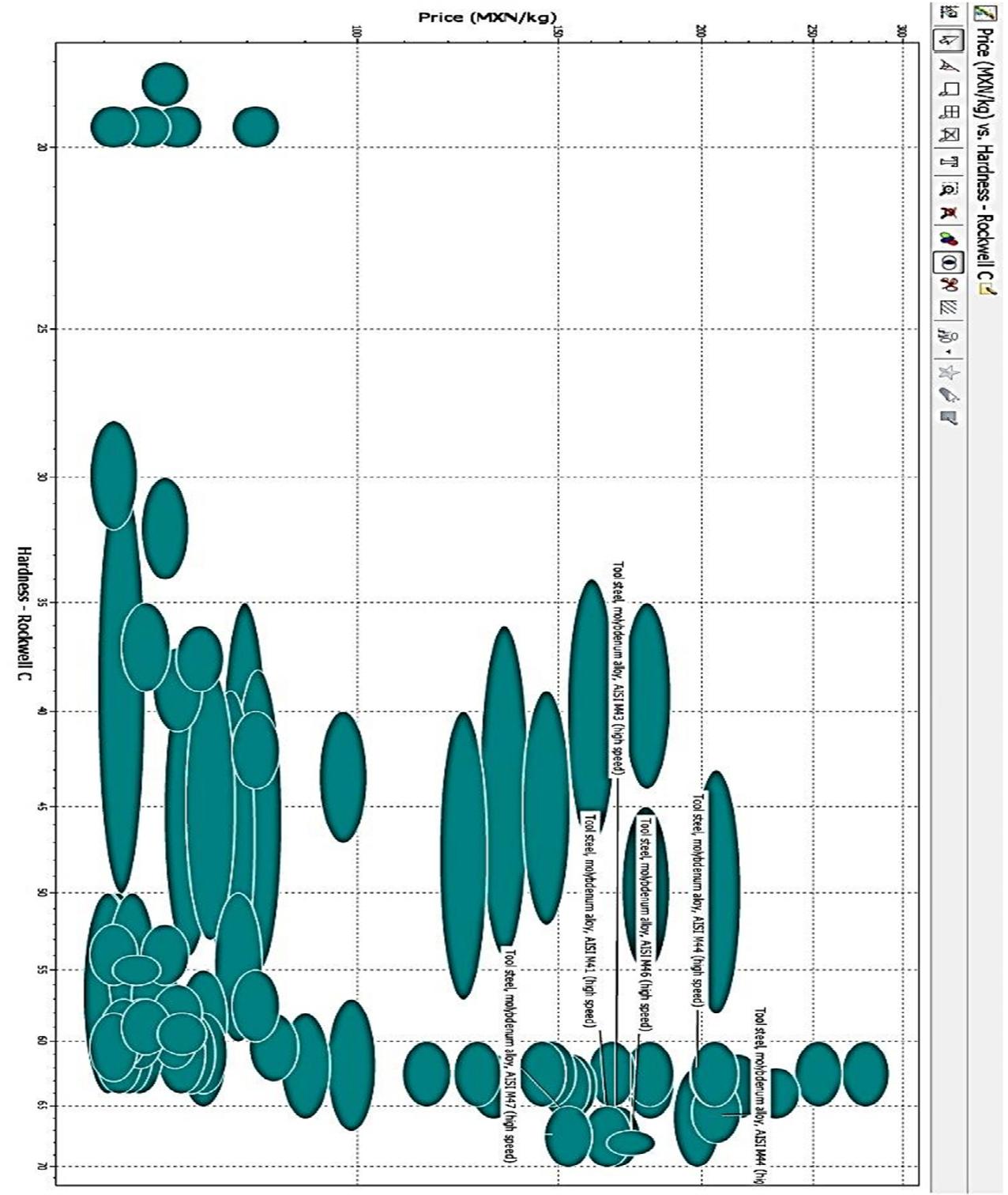
Anexo 2. Tabla muestra los procesos de manufactura que existen en la industria, una comparación de ellos y de cuales serían viables para la fabricación de la boquilla para una cortadora por chorro de agua, teniendo en cuenta que los procesos sean económicos y que cumplan con las especificaciones antes mencionadas.

Relative tooling cost vs. Hardness	
Relative tooling cost	Hardness
very high	True
0	<p>Name</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Microblasting (manual)</li> </ul>
0	<p>Name</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Grinding</li> <li><input type="checkbox"/> Induction and flame hardening</li> <li><input type="checkbox"/> Ion implantation</li> <li><input type="checkbox"/> Laser and plasma arc cladding</li> <li><input type="checkbox"/> Laser surface hardening and melting</li> <li><input type="checkbox"/> Mechanical polishing and burnishing</li> </ul>
0	<p>Name</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Abruzzing</li> <li><input type="checkbox"/> Anodizing</li> <li><input type="checkbox"/> Bonding</li> <li><input type="checkbox"/> Carburing and carbonitriding</li> <li><input type="checkbox"/> Cryotreating and shocktreating</li> <li><input type="checkbox"/> Oxoronizing and plasma chemistry</li> <li><input type="checkbox"/> CVD processing</li> <li><input type="checkbox"/> Electric wire arc spraying</li> <li><input type="checkbox"/> Electro-plating</li> </ul>
low	<p>Name</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> Electrolases (electrochemical) plating</li> <li><input type="checkbox"/> Flame spraying</li> <li><input type="checkbox"/> Nitriding</li> <li><input type="checkbox"/> Powder spraying</li> <li><input type="checkbox"/> PVD plating</li> <li><input type="checkbox"/> PVD sputtering</li> <li><input type="checkbox"/> Roll bonding and explosive cladding</li> <li><input type="checkbox"/> Shot peening and laser peening</li> <li><input type="checkbox"/> Viscous etching</li> </ul>
	False

Anexo 3. Tabla muestra los posibles procesos de fabricación que acerque más al diámetro de 1 mm así como el proceso más económico para poder elaborarla.



Anexo 4. Tabla proporciona los posibles materiales con una alta dureza y con un menor precio, para cumplir los requerimientos de la boquilla para cortadora por chorro de agua.

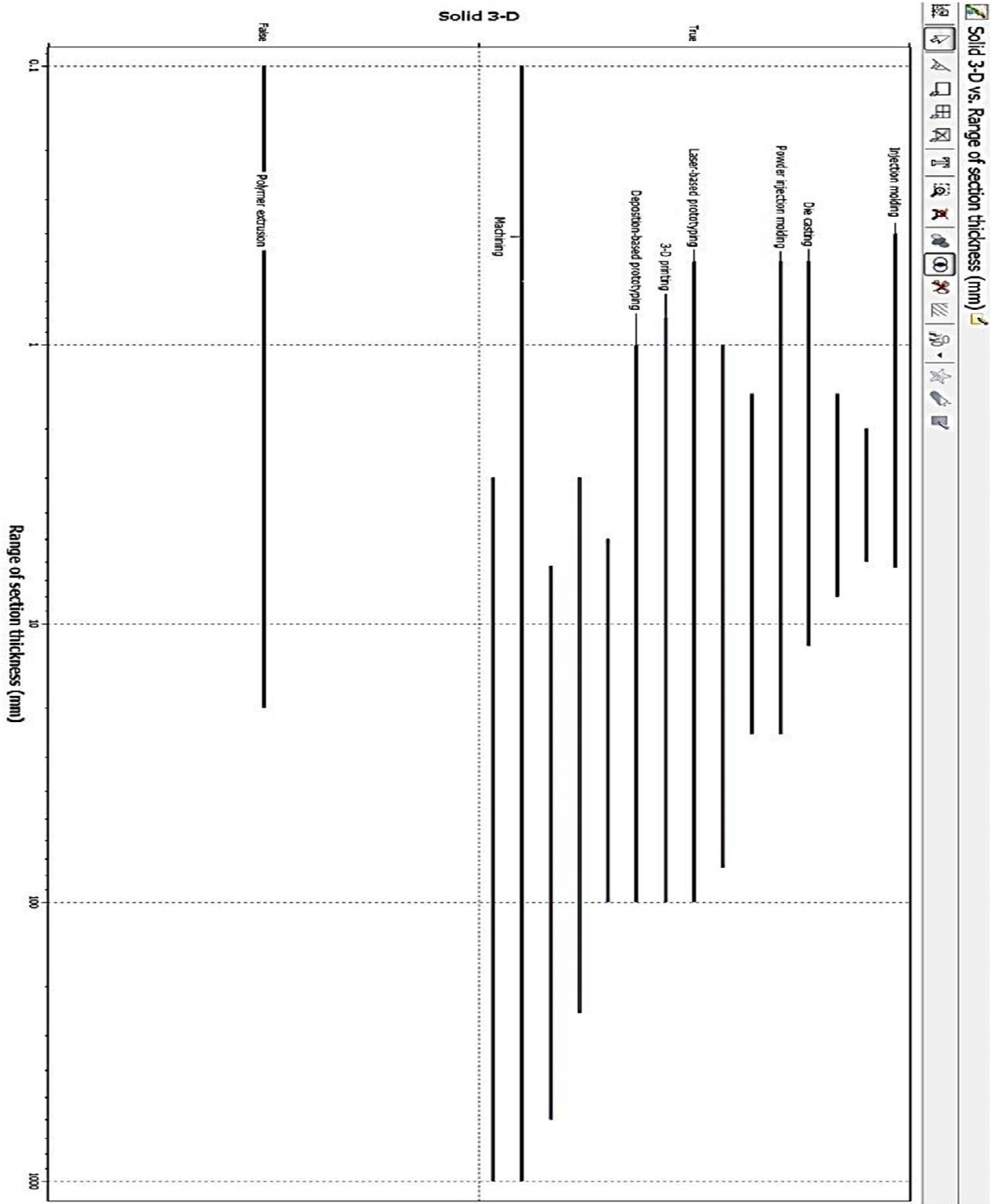




Anexo 6. Tabla muestra el recubrimiento con el que podría alcanzar la dureza requerida en la boquilla para la cortadora por chorro de agua.

		Dureza			
		Muy alto	Alto	Medio	Bajo
Folice	Twee	Coste relativo del utillaje			
		0	0	0	0
				Name <input type="text" value="Spray en lana de metal"/>	Name <input type="text" value="Anodizado"/> <input type="checkbox"/> Carbonación y carbonitruración <input type="checkbox"/> Deposición física de vapor <input type="checkbox"/> Deposición libre de electrolitos <input type="checkbox"/> Electrodposición <input type="checkbox"/> Endurecimiento por inducción y a la llama <input type="checkbox"/> Nitruración

Anexo 7. Tabla muestra el proceso viable por el cual se pudiera realizar la boquilla en 3D y alcanzara el diámetro de 1 mm



Anexo 8. Tabla para establecer los valores de las tolerancias para la calidad de fabricación

CALIDADES																		
IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT	IT
01	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
0,3	0,5	0,8	1,2	2	3	4	6	10	14	25	40	60	100	140	250	400	600	
0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	5	8	12	18	30	48	75	120	180	300	480	750	
0,4	0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	15	22	36	58	90	150	220	360	580	900	
0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	11	18	27	43	70	110	180	270	430	700	1100	
0,6	1	1,5	2,5	4	6	9	13	21	33	52	84	130	210	330	520	840	1300	
0,6	1	1,5	2,5	4	7	11	16	25	39	62	100	160	250	390	620	1000	1600	
0,8	1,2	2	3	5	8	13	19	30	46	74	120	190	300	460	740	1200	1900	
1	1,5	2,5	4	6	10	15	22	35	54	87	140	220	350	540	870	1400	2200	
1,2	2	3,5	5	8	12	18	25	40	63	100	160	250	400	630	1000	1600	2500	
2	3	4,5	7	10	14	20	29	46	72	115	185	290	460	720	1150	1850	2900	
2,5	4	6	8	12	16	23	32	52	81	130	210	320	520	810	1300	2100	3200	
3	5	7	9	13	18	25	36	57	89	140	230	360	570	890	1400	2300	3600	
4	6	8	10	15	20	27	40	63	97	155	250	400	630	970	1550	2500	4000	
Itiraprecisión	Calibre y piezas de gran precisión			Piezas o elementos destinados a ajustar									Piezas o elementos que no han de ajustar					

Anexo 9. Especificaciones del tipo de eje base a utilizar en la boquilla para cortadora por chorro de agua.

EJE BASE						
TIPO	EJE	AGUJERO	CLASE	CARACTERISTICAS	APLICACIONES	ACABADO
FINO	h6	S7/R7	Prensado	Montaje a prensa, necesita seguro de giro para pares muy fuertes, para adherencia sobre hierro fundido	Casquillos y coronas de bronce, acoplamiento de pistones y engranajes en ejes no desmontables, no utilizar sobre piezas de paredes finas	N6/N7
		N7	Forzado duro	Montaje a martillo, de empleo cuando se requieren posicionamientos precisos con interferencia	Casquillos de bronce, manguitos en cubos, fijas para posicionado, casquillos guías de broca.	N6/N7
		K7	Forzado medio	Montaje a martillo, posicionado de precisión con un compromiso entre juego e interferencia	Rodamiento de bolas, discos de levas, poleas y volantes, manivelas	N6/N7
		J7	Forzado ligero	Montaje ligero	Rodamiento de bolas, piezas de máquinas desmontables con frecuencia	N6/N7
		H7	Deslizante con lubricación	Proporciona un acoplamiento ajustado por la situación de piezas estacionarias con montaje y desmontaje libre	Engranajes, piezas importantes de máquinas herramientas, ejes de lira	
		G7	Giratorio	Juego pequeño, no para girar con velocidad, pero si para giros libres y deslizamiento con posicionado preciso	Émbolos, bridas, anillos de rodamiento	N6/N7
		F8	Holgado	Juego mediano, para giros con velocidad en máquinas de precisión y para posicionamiento preciso con velocidades moderadas y presiones de apoyos de ejes	Cojinetes de bielas, ruedas dentadas, cajas de cambio	N6/N7
Medio	h9	H9	Deslizante		Poleas fijas, manivelas y acoplamiento deslizantes sobre el eje, ejes de contrapunto	N7/N8
		E9	Giratorio	Juego mediano	Piezas de motores, bombas ventiladores	N7/N8
		D10	Holgado	Juego amplio, no de uso cuando es esencial la precisión pero bueno para grandes de variaciones de temperaturas con gran velocidad de giro y precisión de apoyo de los ejes	Soportes de ejes, poleas locas	N7/N8
Basto	h11	H11	Deslizante		Piezas de maquinaria agrícola	N9/N10
		D10	Giratorio	Juego mediano	Ejes de movimiento longitudinal, aros, palancas, manivelas desmontables	N9/N10
		E11	Holgado	Juego amplio	Cojinetes de máquinas domésticas, pasadores, ejes	N9/N10
		A11	Muy holgado	Ajustes muy amplios para tolerancia de miembros externos	Locomotoras, cojinetes de cajas de freno, alojamientos de cabezas de tornillos	N9/N10

*Anexo 10. Estudio de microdureza a la pieza proporcionada por el CCADET, presentando fallo, realizado en Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM.*

HMV-WIN,Ver1.05

[File Information]

Decimal Point=.

List Separator=,

Date of Test,2014/09/11 09:33:54

Hardness Tester Type,HMV-G21D

Indenter Type,Vickers

Number of Reading,2

Hardness Mark,HRC

Fracture Toughness,None

Elastic Modulus,0

Sample Name,'Arturo Barba

Sample No.,'1

Memorandum,'

Test Load,HV0.5 (4.903 N)

Duration Time,16

Number of Tests,10

Shape of Test Piece,Cylindrical,Convex,45,7,mm

Hardness Value of Max and Min

Max Setting,None

Min Setting,None

Digital Micrometer,Not Use

Hardening depth judging mode,None

Regression, None

Regression Depth Limit, Auto

Degree, 2

No., Mask, X, Y, Distance, Test Load, Duration time, Lens, H Length, V Length, Average Length, Hardness(HV), Conversion hardness(HRC),,,,,

1,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,13.5752,15.2744,14.4248,4455.88,'---',,,,,,
2,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,13.9576,16.0381,14.9979,4121.88,'---',,,,,,
3,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,14.1488,16.6109,15.3799,3919.66,'---',,,,,,
4,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,15.1048,14.8925,14.9987,4121.43,'---',,,,,,
5,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,15.6784,14.1288,14.9036,4174.17,'---',,,,,,
6,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,15.1048,15.0835,15.0941,4069.46,'---',,,,,,
7,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,16.252,14.3197,15.2859,3968.01,'---',,,,,,
8,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,15.4872,14.5107,14.9989,4121.28,'---',,,,,,
9,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,15.296,14.7016,14.9988,4121.36,'---',,,,,,
10,0,0,0,0,HV0.5 (4.903 N),16,No entry,15.4872,14.3197,14.9035,4174.25,'---',,,,,,

Max.,,,,,,,4455.88,,,,,

Min.,,,,,,,3919.66,,,,,

Mean.,,,,,,,4124.74,,,,,

S.t.d.,,,,,,,143.087,,,,,

C.V.,,,,,,,3.46901,,,,,

Anexo 11. Propiedades de la aleación M2

**Acero SISA M2**  
acero rápido

ACEROS  
**SISA**  
desde 1941

---

**SERVICIO INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.**

Color de distinción  azul  blanco  rojo

**CARACTERÍSTICAS**

Acero rápido aleado al tungsteno y molibdeno, particularmente satisfactorio para herramientas de corte en las que se requiere mantenimiento de filo y gran tenacidad con buena resistencia al desgaste y mantenimiento de dureza al rojo.

**APLICACIONES TÍPICAS**

- |            |                                    |
|------------|------------------------------------|
| Cortadores | Peines de roscar                   |
| Buriles    | Fresas                             |
| Brocas     | Herramienta de Corte               |
| Brochas    | Herramientas para trabajar en frío |
| Punzones   |                                    |
| Matrices   |                                    |

**COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO**

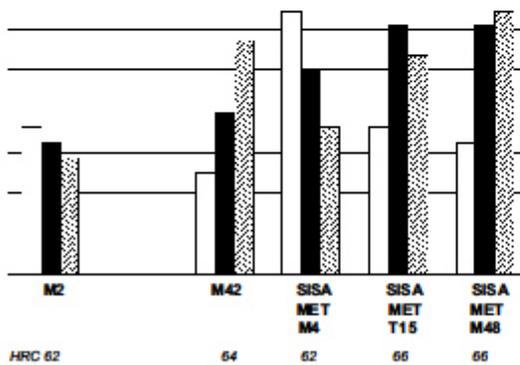
C	Mn	Si	Cr	Mo	V	W
0.85	0.30	0.30	4.15	5.00	1.95	6.40

**NORMAS**

SAE / AISI	DIN	JIS
M2	1.3343	SKH 51

**COMPARACIÓN DE PROPIEDADES**

□ Tenacidad ■ Resistencia al Desgaste ▨ Dureza al Rojo



**SISA M2**

**PROPIEDADES FÍSICAS**

**Módulo de Elasticidad** 30 psi x 10<sup>6</sup> (207 GPa)  
**Peso Específico** 8.14  
**Densidad** 8144 kg/m<sup>3</sup> (0.294 lb/in<sup>3</sup>)  
**Coefficiente de Dilatación Térmica**

°C	°F	mm/mm°C	in/in°F
20-260	70-500	11.5x10 <sup>-6</sup>	6.40x10 <sup>-6</sup>
20-425	70-800	11.8x10 <sup>-6</sup>	6.56x10 <sup>-6</sup>
20-540	70-1000	12.1x10 <sup>-6</sup>	6.72x10 <sup>-6</sup>

**PROPIEDADES MECÁNICAS**

Temperatura de Temple		Temperatura de Revenido		Dureza	Charpy C Resistencia al Impacto	
°C	°F	°C	°F	HRC	ft.-lb.	(J)
1190	2175	550	1025	64	17	(23)
1175	2150	565	1050	63	19	(26)
1150	2100	580	1075	61	21	(28)

**CAMBIO DIMENSIONAL DURANTE TRATAMIENTO TÉRMICO**

Temperatura de Temple		Temperatura de Revenido		Dureza	Cambio Longitudinal en Medida
°C	°F	°C	°F	HRC	%
1200	2200	550	1025	65	+22

**TRATAMIENTOS SUPERFICIALES**

El Acero SISA M2 puede ser nitrurado o recubierto con TiN (nitruro de titanio). Cuando se utilizan recubrimientos superficiales, templar al rango de temperaturas altas de austenización y revenir a la misma temperatura o superior a la del tratamiento superficial.

**MAQUINABILIDAD Y RECTIFICABILIDAD**

La maquinabilidad y rectificabilidad en estado recocido es aproximadamente un 45% de un acero tipo W1 (1% C).

**TRATAMIENTO TÉRMICO**

**Forjar**

1150-950°C (2100-1740°F)  
 No forjar por debajo de 925°C (1700°F), enfriamiento lento en homo o material termoaislante.

**Recocer**

850-870°C (1560-1600°F)  
 Mantener 2 horas, enfriamiento lento 15°C (25°F) por hora máx. hasta 540°C (1000°F), posterior enfriamiento en homo o al aire.

**Dureza en Estado Recocido BHN 217/255**

Nota: Las propiedades indicadas en esta hoja técnica son valores típicos. Variaciones normales en la química, tamaño y condiciones de tratamiento térmico pueden producir desviaciones de estos valores. Las aplicaciones indicadas son típicas. No se debe intentar su aplicación específica sin un estudio independiente y una evaluación de funcionalidad. Para datos adicionales o asistencia en ingeniería metalúrgica y aplicaciones, acudir al departamento técnico de SISA.

Anexo 12. Propiedades de la aleación D2

**Acero SISA D2**  
 acero para trabajo en frío

ACEROS



desde 1941

---

**SERVICIO INDUSTRIAL, S.A. DE C.V.**

---

Color de distinción

**CARACTERÍSTICAS**  
 Acero al alto carbón y alto cromo. Dimensionalmente estable de excelente rendimiento al corte y resistencia al desgaste. Especialmente apto para temple al aire.

**APLICACIONES TÍPICAS**

Estampado y Formado	Partes de Desgaste
Matrices y Punzones	Dados de Laminación
Troquelado y Perforado	Insertos para Moldes
Rodillos	Cuchillas, Slitters y Cizallas
Troquelado Fino	Husillos y Puntas para Inyección de Plástico
Dados para Acuñaado	Cuchillas para Molino de Plástico
Herramientas de Roscado	
Trituradoras de Llantas	
Herramientas para Rebabeear	

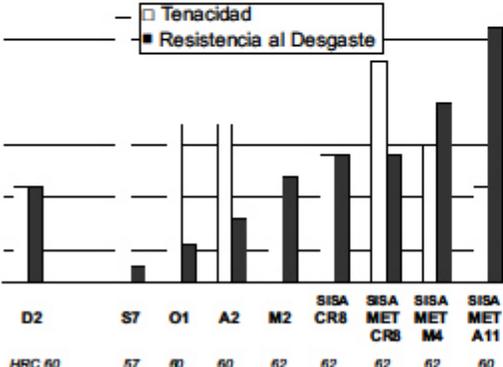
**COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO**

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
1.55	0.35	0.35	11.80	0.85	0.85

**NORMAS**

SAE / AISI	DIN	JIS
D2	1.2379	SKD 11

**COMPARACIÓN DE PROPIEDADES**



Grado	Tenacidad	Resistencia al Desgaste
D2	HRC 60	HRC 60
S7	HRC 57	HRC 57
O1	HRC 60	HRC 60
A2	HRC 60	HRC 60
M2	HRC 62	HRC 62
SISA CR8	HRC 62	HRC 62
SISA MET CR8	HRC 62	HRC 62
SISA MET M4	HRC 62	HRC 62
SISA MET A11	HRC 60	HRC 60

**SISA D2**

**PROPIEDADES FÍSICAS**

**Módulo de Elasticidad** 30 psi x 10<sup>6</sup> (207 GPa)  
**Densidad** 7695 kg/m<sup>3</sup> (0.278 lb/in<sup>3</sup>)

**Conductibilidad Térmica<sup>1</sup>**

	BTU/hr-ft <sup>2</sup> -F	W/m <sup>2</sup> -K	cal/cm-s-°C
a 95°C (200°F)	12.1	20.9	0.0500
a 205°C (400°F)	13.0	22.5	0.0538
a 315°C (600°F)	14.0	24.2	0.0579
a 425°C (800°F)	14.6	25.3	0.0604
a 540°C (1000°F)	14.8	25.6	0.0612

<sup>1</sup> Temple a 1010°C / 1 hr. - Revenido 205°C / 3 hr.

**Coefficiente de Dilatación Térmica**

°C	°F	mm/mm/°C	in/in/°F
20-95	70-200	10.4x10 <sup>-6</sup>	5.8x10 <sup>-6</sup>
20-205	70-400	11.3x10 <sup>-6</sup>	6.3x10 <sup>-6</sup>
20-315	70-600	11.8x10 <sup>-6</sup>	6.6x10 <sup>-6</sup>
20-425	70-800	12.2x10 <sup>-6</sup>	6.8x10 <sup>-6</sup>
20-540	70-1000	12.6x10 <sup>-6</sup>	7.0x10 <sup>-6</sup>

**PROPIEDADES MECÁNICAS**

	Temperatura <sup>(1)</sup> de Temple °C	Temperatura <sup>(1)</sup> de Temple °F	Dureza HRC	Resistencia <sup>(2)</sup> al Impacto ft.-lb. (J)	Resistencia <sup>(3)</sup> al Desgaste Adhesivo
<b>D2</b>	1010	1850	60	21 (28)	3-4
S7	955	1750	57	125 (165)	1
A2	955	1750	60	40 (53)	2-3
SISA-CR8	1065	1950	62	30 (40)	5-6
SISA-MET CR8	1065	1950	62	70 (95)	5-6
M2	1120	2050	62	20 (27)	8-10
SISA-MET M4	1120	2050	62	32 (43)	20-25
SISA-MET A11	1175	2150	63	14 (19)	90

(1) Tratamiento Térmico: Templado según se indica con revenido a la dureza.  
 (2) Prueba de Impacto Entalla Charpy C.  
 (3) Valores relativos.  
 (el número mayor representa resistencia al desgaste superior).

**CAMBIO DIMENSIONAL DURANTE TRATAMIENTO TÉRMICO**

Temperatura de Temple		Temperatura de Revenido		Dureza	Cambio Longitudinal en Medida %
°C	°F	°C	°F	HRC	
1010	1850	205	400	61	+0.025
1010	1850	315	600	59	-0.010
1010	1850	425	800	58	-0.017
1010	1850	540	1000	55	-0.006

**TRATAMIENTOS SUPERFICIALES**  
 El Acero SISA D2 puede ser nitrado, recubierto con TiN (nitruro de titanio) o cromo duro. Cuando se utilizan recubrimientos superficiales, templar a rango de temperaturas altas de austenización (1070°C) y revenir de acuerdo a la gráfica de revenido (>510°C).

Nota: Las propiedades indicadas en esta hoja técnica son valores típicos. Variaciones normales en la química, tamaño y condiciones de tratamiento térmico pueden producir desviaciones de estos valores. Las aplicaciones indicadas son típicas. No se debe intentar su aplicación específica sin un estudio independiente y una evaluación de funcionalidad. Para datos adicionales o asistencia en ingeniería metalúrgica y aplicaciones, acudir al departamento técnico de SISA.

Anexo 13. Planos de detalle de la boquilla

