



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA



**“INVESTIGACIÓN DEL PROCESO DE CORTE POR CHORRO DE AGUA Y
SU APLICACIÓN EN MICROMECAÁNICA”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

ARES ARGELIA GÓMEZ GALLEGOS

DIRIGIDA POR:

DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, MEXICO D. F.

Marzo, 2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

Presidente: DR. ERNST MIKHAILOVICH KUSSUL

Secretario: DR. ALEJANDRO CUAUHTÉMOC RAMÍREZ REIVICH

Vocal: DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA

1er. Suplente: DR. ALBERTO CABALLERO RUIZ

2do. Suplente: DR. GABRIEL ASCANIO GASCA

Lugar donde se realizó la tesis:

*GRUPO DE MICROMECAÁNICA Y MECATRÓNICA
CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO*

***TUTOR DE TESIS:
DR. LEOPOLDO RUIZ HUERTA***

FIRMA

*Este trabajo fue realizado en el
Grupo de Micromecánica y Mecatrónica del
Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico
de la Universidad Nacional Autónoma de México,
apoyado por los proyectos
PAPIME PE105909, CONACYT 50231, SNI 103466*

Agradecimientos.

A mis papás, Héctor y Argelia...

Por todo su apoyo y comprensión durante este proceso, este trabajo también es suyo.

A mi hermana, Airé...

Por ser mi apoyo y ejemplo de vida día a día, gracias por todo tu cariño. Lo logramos.

A la familia Gallegos y a la familia Gómez...

Ustedes han sido mis maestros de vida. Gracias.

A Germán...

Gracias por todo tu apoyo, cariño y comprensión. Eres parte de mi vida, de mi trabajo y de mi corazón. Lo logramos de nuevo.

A Toño...

Por tu amistad y todas tus enseñanzas. Eres un ejemplo a seguir.

A Fernando y Misael...

Por compartir sus sueños conmigo. Vamos por más.

A Ale...

Por tu amistad y ser mi conexión con la realidad.

A mis amigos...

Gracias Angy, Héctor, Ian, Jorge, Patricio, Octavio, Ricardo, Victor, Beto, Ángel, Ío y a aquellos que he omitido, no por descortesía sino por falta de espacio, por su amistad, sonrisas, apoyo y consejos. Sigamos superándonos.

A Polo y a Beto...

Gracias por permitirme entrar en este grupo, por sus enseñanzas, confianza y amistad. Han sido mis mejores maestros.

Al laboratorio de Mecánica...

A mi jefe Raúl, gracias por su apoyo y todas sus aportaciones a este trabajo. A mis compañeros de trabajo, gracias por todas sus sonrisas y alegría por la vida.

A mis sinodales...

Dr. Ernst Mikhailovich Kussul
Dr. Alejandro Cuauhtémoc Ramírez Reivich
Dr. Leopoldo Ruiz Huerta
Dr. Alberto Caballero Ruiz
Dr. Gabriel Ascanio Gasca

Por el tiempo que le dedicaron a este trabajo, sus comentarios y enseñanzas.

*A la Universidad Nacional Autónoma de México,
a la Facultad de Ingeniería y al CCADET...*

Por ser mi segundo hogar y darme la formación profesional que ahora me enorgullezco de tener.

Y finalmente, pero no por ello menos importante,

GRACIAS A DIOS...

*Los científicos exploran lo que es.
Los ingenieros crean lo que nunca ha sido.*

T. von Karman



Índice.

Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes.	
1.1 <i>Un poco de historia.</i>	3
1.2 <i>Procesos de maquinado no convencionales.</i>	6
1.2.1 <i>Corte por chorro de agua.</i>	8
1.2.1.1 <i>¿Cómo funciona el corte por chorro de agua?</i>	8
1.2.1.2 <i>Corte con chorro de agua sin abrasivos.</i>	10
1.2.1.3 <i>Corte con chorro de agua con abrasivos.</i>	11
1.2.1.4 <i>Parámetros importantes en el proceso de corte por chorro de agua.</i>	13
1.2.1.5 <i>Ventajas y desventajas del corte por chorro de agua.</i>	16
Capítulo 2. Planteamiento del problema	
2.1 <i>Micromanufactura.</i>	18
2.2 <i>Definición del problema.</i>	21
2.3 <i>Objetivos.</i>	22
2.3.1 <i>Objetivo general.</i>	22
2.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	22
2.4 <i>Alcances.</i>	22

Capítulo 3. Proceso del corte por chorro de agua y su aplicación en micromecánica.

3.1	Mecanismos de remoción de material.	23
3.1.1	Micromecanismo del corte por WJC.	23
3.1.1.1	Erosión en materiales dúctiles.	24
3.1.1.2	Erosión en materiales frágiles.	25
3.1.2	Macromecanismo del corte por chorro de agua.	26
3.1.2.1	Conicidad en el corte por WJC.	26
3.1.2.2	Zonas de corte	27
3.1.3	Etapas del proceso de corte por WJC.	29
3.2	Generación y características del chorro de agua.	30
3.2.1	Generación del chorro.	30
3.2.2	Características y distribución del chorro	32
3.3	Desempeño del corte por WJC.	32
3.3.1	Parámetros del proceso de WJC.	33
3.3.2	Efectos debido a la presión del agua.	33
3.3.3	Efectos de la distancia entre la boquilla y el material a cortar.	36
3.3.4	Efectos debido a la velocidad de corte.	38
3.3.5	Efectos del flujo másico de abrasivos.	39
3.4	El corte por chorro de agua en la industria.	41
3.5	Corte por chorro de agua en la micromecánica.	42
3.5.1	Desempeño del corte por WJC en la micromanufactura.	42
3.5.1.1	Características del chorro de agua aplicado a microcorte por WJC.	42
3.5.1.2	Profundidad de corte.	43
3.5.1.3	Características de la superficie de corte.	46
3.5.1.4	Geometría Kerf.	47
3.5.2	¿Cómo obtener los parámetros del WJC para una aplicación en micromanufactura?	47
3.5.2.1	Mecanismo de remoción de material.	48

Capítulo 4. Desarrollo de un banco de pruebas.	
4.1 Propuesta de un sistema intensificador de presión para microcorte con WJC.	51
4.1.1 Principio de desplazamiento positivo.	54
4.1.2 Bomba de membrana	54
4.1.3 Bomba de pistón	57
4.1.3.1 Cálculos realizados para el diseño de la bomba de pistón.	57
4.2 Conceptualización del banco de pruebas.	62
4.3 Diseño de detalle y manufactura.	64
4.3.1 Estructura metálica.	64
4.3.2 Transmisión.	65
4.3.3 Leva.	67
4.3.4 Cilindro y pistón.	69
4.3.5 Barreno de salida.	70
4.3.6 Sistema de alimentación de agua.	71
4.4 Ensamble del sistema.	72
4.5 Implementación del banco de pruebas.	73
4.5.1 Evolución del sistema para generar el chorro de agua	74
4.5.2 Chorro de agua generado.	83
4.6 Análisis de resultados	85
4.7 Rediseño del banco de pruebas.	86
Conclusiones y trabajo a futuro.	88
Referencias.	91

Índice de tablas y figuras.

	<i>Página</i>
Tabla 1. Línea del tiempo del corte por chorro de agua.	5
Tabla 2. Aplicaciones del chorro de agua.	5
Figura 1. Mecanizado por arranque de viruta (Torneado convencional).	6
Figura 2. Esquema del funcionamiento del WJC.	9
Figura 3. Diagrama de un sistema de corte por chorro de agua.	11
Figura 4. Máquina de corte por chorro de agua con alimentador de abrasivos.	12
Figura 5. Flujo óptimo de abrasivos.	15
Tabla 3. Valores aproximados de la calidad de agua apropiada.	16
Figura 6. a) Micromanipulador (50 x 50 mm) de BiopacSystems, b) Cadena de Silicio de Sandia National Laboratories, c) <i>iRob-functional MID-demostrator de Fraunhofer IZ</i> , d) <i>Motor ultrasónico de MMECH</i> .	18
Figura 7. Desarrollo de la capacidad del micromaquinado a través del tiempo.	19
Figura 8. Desarrollo de la micromecánica por el GMM.	20
Figura 9. Piezas realizadas con maquinas de corte por chorro de agua suizas.	21
Figura 10. Procesos de erosión.	24
Figura 11. Conicidad o geometría Kerf.	26
Figura 12. Zona superior de corte. Fotografía de una pieza cortada por chorro de agua.	28
Figura 13. Zona inferior de corte. Fotografía de una pieza cortada por chorro de agua.	28
Figura 14. Comportamiento del chorro al impactarse.	29
Figura 15. Zonas del chorro de agua.	30
Figura 16. Comparación entre dos chorros de agua con el mismo número Reynolds.	31
Figura 17. Simulación del chorro de agua que pasa por un barreno capilar corto con lo que se da lugar a la coherencia del flujo.	32
Figura 18. Efecto de la presión contra la profundidad de corte.	34
Figura 19. Ejemplo de corte de un cerámico.	34
Figura 20. Ejemplo del efecto de la presión en la rugosidad de la superficie.	35

Figura 21. Ejemplo del efecto de la presión en la conicidad.	35
Figura 22. Ejemplos del efecto de la distancia de separación en la profundidad.	36
Figura 23. Ejemplo del efecto de la distancia de separación en la rugosidad de la superficie.	37
Figura 24. Ejemplo del efecto de la distancia de separación en la conicidad.	37
Figura 25. Ejemplo del efecto de la velocidad de corte en la profundidad.	38
Figura 26. Ejemplo del efecto de la velocidad de corte en la rugosidad de la superficie.	39
Figura 27. Ejemplo del efecto de velocidad de corte en la conicidad.	39
Figura 28. Ejemplo del efecto del flujo de abrasivos con la profundidad.	40
Tabla 4. Relación entre los parámetros del corte por chorro de agua.	40
Tabla 5. Parámetros involucrados en el corte por chorro de agua.	41
Figura 29. Comparación de los procesos de manufactura para micro y mini escala.	42
Figura 30. Simulación del chorro de agua que pasa por un barreno capilar corto con lo que se da lugar a la contracción del flujo.	43
Figura 31. Ejemplo del efecto de la presión en la profundidad de corte (extrapolación a la micromecánica).	44
Figura 32. Relación entre velocidad de corte y profundidad de corte (extrapolación a la micromecánica).	45
Figura 33. Ejemplos del efecto de la distancia de separación en la profundidad de corte (extrapolación a la micromecánica).	45
Figura 34. Ejemplos del efecto de la distancia de separación en la rugosidad de la superficie (extrapolación a la micromecánica).	46
Tabla 6. Tabla de propiedades del Acero Inoxidable 316L.	47
Tabla 7. Parámetros involucrados en los procesos de Microcorte con WJC sin abrasivos.	50
Figura 35. Clasificación de los sistemas de bombeo.	53
Figura 36. (a) Diseño de la bomba de membrana, (b) Soporte de la bomba de membrana, (c) Relación entre el radio de la membrana y la deformación necesaria para cumplir con el gasto a 1000 [rpm].	55
Figura 37. Resultados obtenidos del análisis utilizando Algor®: (a) Deformación de la membrana a 60 [MPa], (b) Distribución del esfuerzo aplicado sobre la membrana, (c) Deformación de la membrana al modificar el diámetro y el espesor de la misma.	56
Figura 38. (a) Cálculos de bomba, datos de entrada: Motor, gasto y presión, (b) Cálculos de bomba, datos de entrada: radio del cilindro y vol. desplazado por rev., (c) Cálculos de bomba, resultados obtenidos: Fuerza, torque y energía del fluido.	58
Figura 39. Cálculos de la bomba.	60
Tabla 8. Propiedades del latón.	61

Figura 40. Motor de 745.7 [W] (1 [hp]).	62
Figura 41. Diseño del banco de pruebas para el Corte por Chorro de Agua.	63
Figura 42. Partes del sistema a construir.	64
Figura 43. Estructura del sistema.	64
Figura 44. Centro de masa de la estructura.	65
Figura 45. Estructura del sistema.	65
Figura 46. (a) Construcción de los engranes, (b) Engrane, (c) Verificación del engranaje, (d) Transmisión armada.	66
Figura 47. Ensamble de los engranes.	67
Figura 48. Ensamble Leva – pistón.	67
Figura 49. Gráficas de movimiento de la leva-seguidor.	68
Figura 50. Leva.	69
Figura 51. (a) Pistón, (b) Carcasa de latón.	69
Figura 52. Soporte del intensificador de presión.	70
Figura 53. Broca de 0.1 [mm] de diámetro.	71
Figura 54. Barreno de 0.1 [mm] de diámetro.	71
Figura 55. Ensamble del sistema completo.	73
Figura 56. Ensamble del sistema.	73
Tabla 9. Evolución del sistema generador de chorro de agua según las pruebas realizadas.	75
Figura 57. Bomba rotativa de 372.85 [W] (½ [hp]).	82
Tabla 10. Mediciones del gasto.	82
Figura 58. Puntos de medición del gasto.	83
Figura 59. Chorro de agua.	83
Figura 60. Dispositivo de medición de fuerza de impacto.	84
Tabla 11. Mediciones de fuerza de impacto realizadas.	84
Figura 61. Vista isométrica del rediseño del sistema.	87
Figura 62. Vista superior del rediseño del sistema.	87



INTRODUCCIÓN

Introducción

El Grupo de Micromecánica y Mecatrónica del CCADET-UNAM ha decidido explorar el uso de procesos de corte no convencionales -también conocidos como energéticos- en la Micromanufactura, debido a que los procesos de corte empleados en las micromáquinas herramienta convencionales tienen la limitante del desarrollo de herramientas (cortadores) adecuadas para el tamaño y el material de la pieza a cortar.

El corte por chorro de agua (WJC por sus siglas en inglés) es un proceso de corte energético que consiste en desbastar material empleando como herramienta un hilo de agua a alta presión y velocidad. Entre las ventajas que tiene este proceso de corte frente a los procesos de corte convencionales están el que con esta tecnología es posible cortar casi cualquier tipo de material, la velocidad de corte es alta y la pieza cortada no presenta alteraciones estructurales.

En este trabajo se realizó un estudio del proceso de WJC, se exponen los parámetros involucrados y, debido a que existen estudios que afirman que los beneficios en tiempo, costo y versatilidad que actualmente ofrece esta tecnología a la industria pueden ser aplicados a la micromanufactura [2], se evalúa su aplicación en la misma.

Asimismo, considerando la aplicación del WJC en un caso en particular, se desarrolló un banco de pruebas para generar un chorro de agua con las características apropiadas para realizar microcorte.

El contenido se desglosa en cuatro capítulos. El *capítulo 1* trata de los antecedentes del corte por chorro de agua; en el *capítulo 2*, se presentan las necesidades específicas de la micromanufactura, se define el problema y se expone cuales son los objetivos y alcances de esta tesis. Dentro del *capítulo 3* se expone cómo se realiza el proceso de corte por chorro de agua y se evalúa su aplicación en la micromecánica. En el *capítulo 4* se describe el desarrollo de un banco de pruebas para la generación de un chorro de agua a alta presión, se muestran las pruebas realizadas 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. Antecedentes

1.1 Un poco de historia.

El corte por chorro de agua (WJC) es un proceso de corte que consiste en desbastar material empleando como herramienta un hilo de agua a alta presión y velocidad. Entre las ventajas que tiene este proceso de corte frente a los procesos de corte convencionales están el que con esta tecnología es posible cortar casi cualquier tipo de material, la velocidad de corte es alta y la pieza cortada no presenta alteraciones estructurales.

Las primeras cortadoras de agua de baja presión se emplearon en California, EU, en el periodo de la fiebre del oro (1852-1886), para romper roca y realizar excavación. La idea llegó a Rusia donde se desarrollaron nuevos sistemas, el éxito radicaba en conseguir la presión y flujo necesario para romper la roca. Posteriormente, Japón, China y Canadá también adoptaron este sistema de minería. [9]

Casi 100 años después, en la década de los años 60, Rusia ya contaba con un sistema capaz de producir 697 [MPa] (101,000 [psi]), y para 1970, Estados Unidos había desarrollado algunos capaces de alcanzar 4000 [MPa] (580,000 [psi]). [8]

Simultáneamente, otros grupos de investigación estaban desarrollando aplicaciones distintas a las mineras. En 1960, el profesor Robert Franz de la Universidad de Michigan, EU, desarrolló un sistema de corte por chorro de agua capaz de cortar cartón, presentando la superficie del mismo sólo ligeros daños.

En 1970, McCartney Manufacturing Company desarrolló el primer prototipo comercial para corte por agua, el cual salió a la venta en 1972, su uso principal fue el corte de placa de materiales blandos: madera, cartón y plásticos. Poco tiempo después, la compañía pasó a ser filial de Ingersoll-Rand, quien dio promoción mundial a estas máquinas y en 1979, se empezaron a utilizar las cortadoras por chorro de agua en la industria. Hasta ahora, el mercado que ha comprado más máquinas de corte por agua es la industria pañalera. [9]

En 1985, el profesor Gering Silvia de la Universidad de Rhode Island, EU, desarrolló la idea de introducir partículas de abrasivo dentro del chorro de agua a presión; simultáneamente, British Hydromechanics Research Association llegó a los mismos resultados, desarrollando sistemas de corte por chorro de agua con abrasivos (AWJ), lo cual abrió la gama de tipos de materiales a cortar, logrando así cortar materiales duros o compuestos [9].

A partir de entonces, el objetivo fue diseñar boquillas que mejoraran el perfil del chorro y que no se desgastaran rápidamente, las primeras boquillas presentaron una vida útil promedio de 4 [h], mientras que actualmente duran en promedio 100 [h] sin necesidad de reemplazo.

Las características del agua empleada para este proceso también han presentado cambios, a tal punto que ya existe en el mercado “*Super Water*” de Berckley Chemical Research, el cual es un polímero soluble que actúa como la espina molecular o refuerzo que une las moléculas del agua con lo que se logra obtener un chorro de agua coherente. [32]

En estos últimos quince años, ha existido un progreso substancial en el desarrollo, la optimización y la implementación de las máquinas de corte por chorro de agua, entre otros, se han desarrollado sistemas que trabajan a mayor presión y/o mayor velocidad de corte, así como controladores para estos equipos, se ha aumentado el número de ejes de las máquinas de corte, se ha disminuido la conicidad y se ha mejorado la calidad superficial de los cortes realizados; sin embargo, aún quedan muchas áreas de oportunidad para ser estudiadas.

En la tabla 1 se presenta un resumen del desarrollo de corte por chorro de agua.

Tabla 1. Línea del tiempo del corte por chorro de agua.

Línea del tiempo	
1886	Sistemas de WJC de baja presión aplicados en minería.
1960	Rusia desarrolla un sistema de WJC de alta presión de 679 [MPa] para aplicaciones mineras.
1960	Desarrollo de un sistema de WJC agua para cortar cartón (EU).
1970	Desarrollo de un sistema de 4000 [MPa] para aplicaciones mineras (EU).
1972	Primer prototipo de una máquina de WJC comercial para materiales blandos.
1979	Aplicación de las máquinas de WJC en la industria.
1984	Desarrollo de una máquina de corte por chorro de agua con abrasivos (EU).
1987	Desarrollo de una máquina de WJC de 5 ejes.
1997	Desarrollo de una máquina de WJC de 340 [MPa] para aplicaciones industriales.
2000	Desarrollo de una máquina de WJC capaz de disminuir la conicidad generada en los cortes.
2006	Desarrollo de una máquina de WJC de 600 [MPa].

El corte por chorro de agua actual se hace bajo del agua para evitar salpicaduras y ruido. La mezcla de agua con abrasivos sale de la boquilla a una velocidad de más de 400 [m/s], pero algunas cortadoras pueden cortar con una velocidad de chorro de Mach3 (1020 [m/s] aprox.).

Actualmente, existen diversas aplicaciones del chorro de agua, ya no sólo para corte, sino también para limpieza y fragmentación.

Tabla 2. Aplicaciones del chorro de agua.

Aplicación	Presión [MPa]
Limpieza general	10
Minería del carbón	10
Demolición	10 – 100
Limpieza industrial	20 – 150
Corte y manufactura	200 – 400
Fragmentación	200 - 700
Usos militares	7000

Por otro lado, desde 1990 en países como EU, Inglaterra y China [2] [31], se está estudiando el funcionamiento de las cortadoras por chorro de agua, entre las áreas estudiadas están: la física del proceso, la operación, los parámetros específicos por material y dimensiones, el control del sistema y el desarrollo de nuevas aplicaciones. En esta última, Miller D.S. [2] ha estado investigando el proceso fundamental de la dinámica de fluidos para generar un chorro de agua con abrasivos para micromaquinado y su explotación comercial.

1.2 Procesos de maquinado no convencionales.

El proceso de maquinado de material depende del tipo de material a cortar, las características geométricas de la pieza y las especificaciones del corte, por lo que cuando se quiere cortar materiales muy blandos o muy duros, de geometrías complejas y/o de alta precisión, es necesario utilizar procesos de corte especiales como el oxicorte, corte por láser y el corte por chorro de agua. [11]

Los procesos de maquinado convencionales o por arranque de viruta (por ejemplo: torneado, taladrado y fresado) emplean una herramienta de corte afilada para formar, mediante una deformación cortante, una viruta en la pieza de trabajo. La figura 1 muestra un ejemplo de maquinado por arranque de viruta.



Figura 1. Mecanizado por arranque de viruta (Torneado convencional).

En los procesos de maquinado no convencionales, también llamados métodos energéticos, se emplea energía (mecánica, térmica, eléctrica, química o combinación de ellas) para remover el exceso de material. Estos procesos no emplean un instrumento afilado de corte en el sentido convencional.

Los procesos energéticos se clasifican de acuerdo con la forma principal de energía que ocupan para la remoción de materiales. [11]

1. *Mecánicos*. En estos procesos se emplea energía mecánica de alguna forma diferente a la acción de una herramienta de corte convencional. La forma típica de acción de los procesos mecánicos no convencionales es la erosión de la pieza de trabajo (p. ej. maquinado ultrasónico, corte por chorro de agua, etc.)
2. *Eléctricos*. En estos procesos se ocupa energía electroquímica para la remoción de material (p. ej. Electroerosión por penetración o por hilo).
3. *Térmicos*. En estos procesos se aplica energía térmica a una parte muy pequeña de la superficie de la pieza de trabajo, lo que provoca que esa parte se remueva por fusión o vaporización del material. La energía térmica se genera mediante la conversión de energía eléctrica en energía térmica (p. ej. maquinado con laser, maquinado con haz de electrones, etc.).
4. *Químicos*. En estos procesos se emplean ciertos ácidos y otras sustancias para atacar químicamente la pieza de trabajo y remover material de ciertas porciones, mientras que el resto de la superficie se protege con una máscara (p. ej. decapado, maquinado fotoquímico, etc.).

El desarrollo de nuevos procesos de manufactura, surge como respuesta a las necesidades de manufactura complejas y específicas que no pueden satisfacerse o que no son económicamente viables mediante métodos de manufactura convencionales [31].

Estas necesidades incluyen:

- Maquinar metales y no metales de reciente desarrollo. Con frecuencia, estos materiales nuevos tienen propiedades especiales (por ejemplo: alta resistencia, tenacidad y/o alta dureza) que dificultan o imposibilitan su maquinado mediante métodos convencionales.
- Obtener geometrías de piezas inusuales o complejas que no se obtienen con facilidad y que, en algunos casos, son imposibles de lograr mediante maquinado convencional.
- Evitar daños internos en una pieza, lo cual sucede frecuentemente por los esfuerzos que surgen en el maquinado convencional.

1.2.1 Corte por chorro de agua.

Dentro de los procesos de maquinado por energía mecánica encontramos al corte por chorro de agua (WJC), en el cual se emplea un hilo de agua a muy alta presión y velocidad (mayor a 100 [MPa] y 400 [m/s]), dirigida hacia la superficie de la pieza de trabajo, con lo que se concentra gran cantidad de energía en un área pequeña y así desbasta el material [11].

Una de las ventajas que tiene este proceso de corte frente a otros es que esta tecnología permite cortar casi cualquier tipo de material, desde metales hasta cerámicas, compuestos, y materiales suaves como papel y cartón, o duros como mármol y granito.

Otra ventaja es que el WJC no deja bordes filosos, ni sobrematerial. Corta sin generar humos tóxicos, sin generar alteraciones estructurales en el material debido a calentamiento o a microfracturas, y sin deformación térmica, ya que el proceso se realiza libre de calor y a temperatura ambiente; el acabado superficial que se logran con estas máquinas es bueno, rugosidad de alrededor de +/-0.05 [mm]. Además es amigable con el ambiente debido a que los desperdicios no son dañinos y los abrasivos pueden ser ocupados para rellenos en jardines. Sin embargo, el consumo energético es alto (460 [V]). [32]

El corte por chorro de agua permite cortar espesores que van desde 0.15 [mm] a 254 [mm], sin necesidad de cambiar herramienta, puesto que el corte se realiza con la misma boquilla reduciendo así el tiempo y los gastos en herramientas.

Hoy en día, el corte por chorro de agua ha reducido el tiempo de corte de titanio y de grafito epóxico; este último en más del 1000% comparado con otros métodos [10].

1.2.1.1 ¿Cómo funciona el corte por chorro de agua?

En la figura 2 se presenta un diagrama muy sencillo de cómo funciona una máquina de WJC. Se toma agua de un depósito y se presuriza generalmente con

multiplicadores de presión¹ (a presiones superiores a los 100 [MPa]), después se la hace pasar hacia la boquilla por un pequeño barreno con lo que aumenta su velocidad. De ser necesario, se le añaden abrasivos y luego se conduce esta mezcla por un barreno de salida que genera un hilo de agua de diámetro entre 0.1 – 0.4 [mm], que es el adecuado para realizar el corte en la pieza de trabajo.

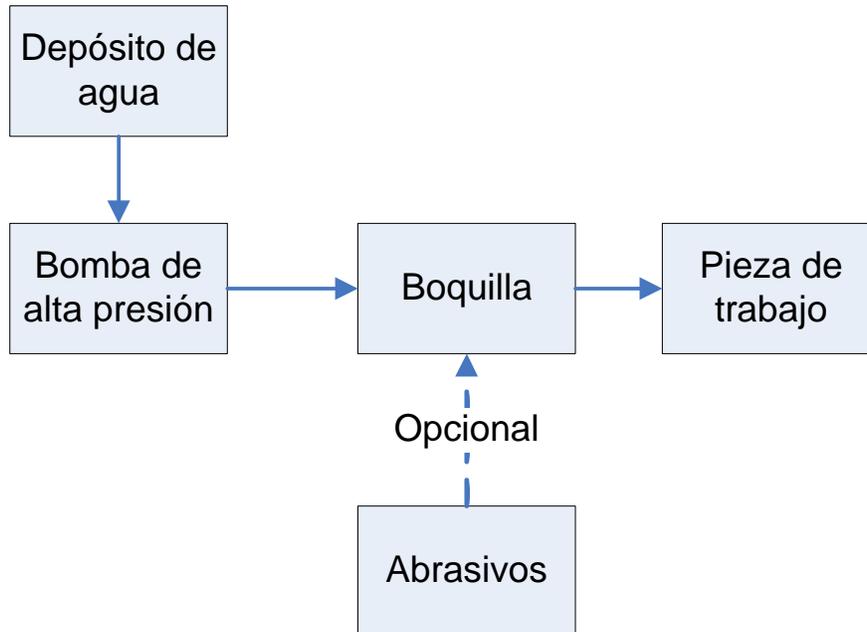


Figura 2. Esquema del funcionamiento del WJC [12]

El corte por chorro de agua ocurre debido a la erosión de las partículas de agua a nivel micrométrico, sobre la superficie de la pieza de trabajo; al añadirle abrasivos, parte del *momentum* de las partículas de agua es transferido a las partículas de abrasivo, con lo que la velocidad aumenta rápidamente (430 – 900 [m/s])[12].

Existen dos tipos de corte por chorro de agua:

- Corte por chorro de agua sin abrasivos.
- Corte por chorro de agua con abrasivos.

Dependiendo del material que se desea cortar es el tipo de WJC que se debe de emplear.

¹ Multiplicador de presión: Sistema compuesto por una bomba hidráulica, un sistema de filtros, un sistema de pistones para intensificar la presión y un atenuador.

El corte con chorro de agua sin abrasivos se emplea para cortar:

- Papel
- Cartón
- Material espumado
- Comestibles
- Pañales
- Caucho
- Materiales compuestos

Y el corte por chorro de agua con abrasivos para:

- Mármol
- Granito
- Piedra
- Metal
- Madera
- Titanio
- Vidrio
- Plásticos

1.2.1.2 Corte con chorro de agua sin abrasivos.

En el corte por chorro de agua sin abrasivos (WJC), se utiliza un hilo de agua que se obtiene al hacer circular una corriente de agua a través de una boquilla con un diámetro de salida de entre 0.1 y 0.4 [mm] (0.004 a 0.016 [pulg]). A fin de que el chorro tenga la energía suficiente para cortar, una bomba hidráulica presuriza el fluido al nivel deseado. Se trabaja con presiones desde 100 [MPa] hasta 400 [MPa] (60,000 [lb/pulg²]), y el chorro alcanza velocidades de hasta 900 [m/seg] (3000 [pies/seg]).

Al agua empleada en este sistema se la añaden soluciones de polímeros, los cuales ayudan a producir un hilo de agua coherente. El agua puede reciclarse pero deben ocuparse sistemas de filtración para separar las virutas producidas durante el proceso.

Los parámetros importantes del proceso de WJC incluyen la distancia de separación entre la boquilla y la pieza de trabajo, el diámetro del barrenado de salida de la boquilla, la presión del agua y la velocidad de avance del corte. La

figura 3 muestra un diagrama de un sistema de corte por chorro de agua sin abrasivos.

La distancia de separación es el claro que existe entre la boquilla y la superficie de trabajo. En general, se prefiere que esta distancia sea pequeña para reducir la dispersión de la corriente del fluido antes de que llegue a la superficie. Una distancia de separación convencional es de aproximadamente 3 [mm] (1/8 [pulg]).

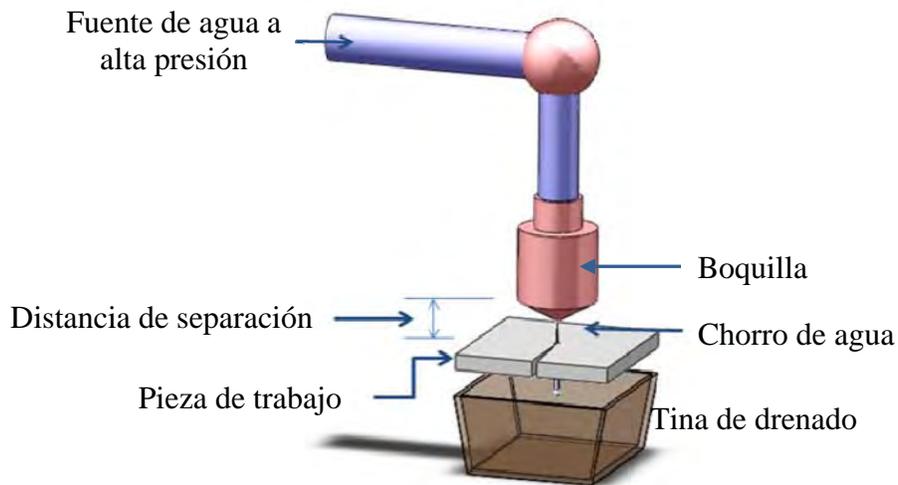


Figura 3. Diagrama de un sistema de corte por chorro de agua.

El tamaño del barreno de salida de la boquilla afecta la presión del corte. Las aberturas más pequeñas se emplean para cortes finos (0.1 - 0.25 [mm] de diámetro) sobre materiales delgados (menores a 25 [mm]). Para cortar materia prima más gruesa, de hasta 250 [mm], se requieren hilos de agua más densos (0.5 - 1.2 [mm] de diámetro). En ambos casos la presión ocupada está entre los 100 y los 400 [MPa].

La velocidad de corte convencional varía desde 5 [mm/seg] (12 [pulg/min]) hasta 500 [mm/seg] (1200 [pulg/min]), dependiendo del material de trabajo y su grosor.

1.2.1.3 Corte con chorro de agua con abrasivos.

Cuando se emplea el WJC para cortar metales, se agregan partículas abrasivas al chorro de agua para facilitar el corte. Por lo tanto, este proceso también se denomina corte con chorro de agua abrasiva (AWJ). Sin embargo, la incorporación

de las partículas abrasivas al flujo complica el proceso, ya que aumenta la cantidad de parámetros que deben controlarse. [17]

Entre los parámetros del AWJ están el tipo de abrasivo, el tamaño del abrasivo y la velocidad de flujo de éste. Los materiales abrasivos comunes son el óxido de aluminio, el dióxido de silicio y el granate (un material de silicato), y su tamaño varía de entre 150 y 250 [μm] (grado 120 – 60). Las partículas abrasivas se agregan a la corriente de agua aproximadamente a 0.23 [kg/min] (0.5 [lb/min]). [17]

Los parámetros del AWJ restantes incluyen algunos que son comunes para el WJC: el diámetro del barreno de salida de la boquilla, la presión del agua y la distancia de separación entre la boquilla y la pieza de trabajo.

Las presiones de agua empleadas en el AWJ son similares a las del WJC. Los diámetros de barreno de salida de la boquilla varían de 0.25 a 0.63 [mm] (0.010 a 0.025 [pulg]), este rango es más grande que en el WJC y permite que el flujo contenga velocidades más altas y mayor energía antes de la inyección de los abrasivos. La distancia de separación está entre una cuarta parte y la mitad de la que se emplean en el WJC (0.8 a 1.6 [mm]) para reducir el efecto de la dispersión del fluido de corte, el cual contiene ahora partículas [11]. La figura 4 muestra una máquina de corte por chorro de agua con abrasivos de la marca OMAX®.

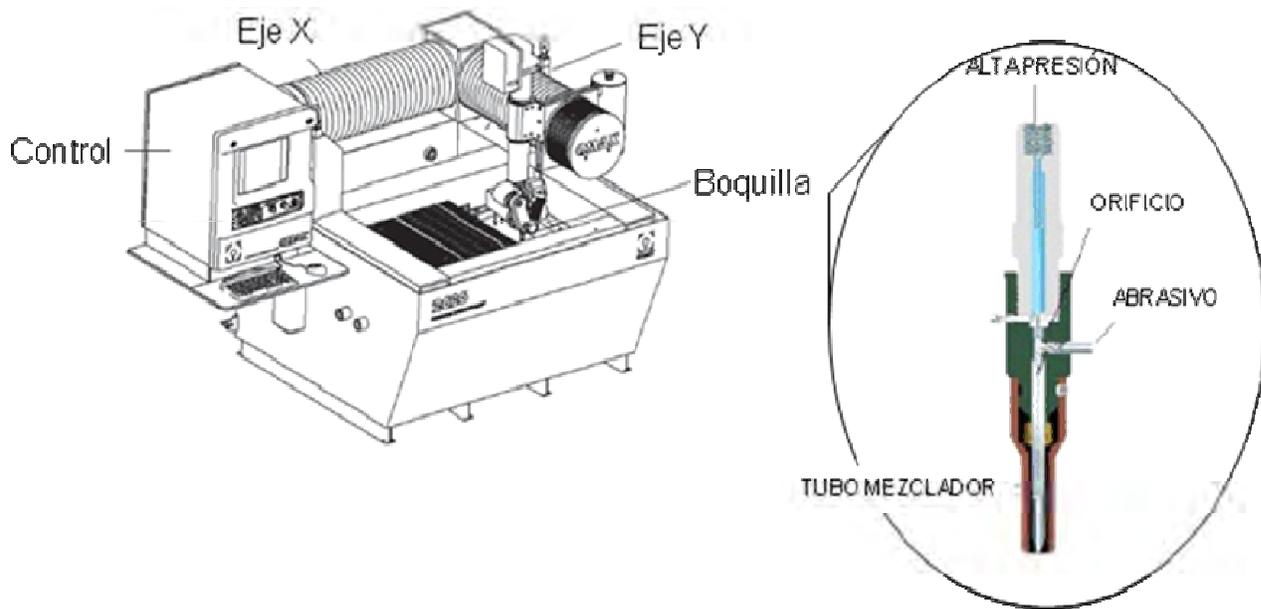


Figura 4. Máquina de corte por chorro de agua con alimentador de abrasivos. [35]

1.2.1.4 Parámetros importantes en el proceso de corte por chorro de agua.

El comportamiento del corte por chorro de agua depende de varios parámetros, los cuales varían según el tipo de corte por chorro de agua que se esté empleando. Algunos de estos factores son:

1. **Presión del chorro de agua.** La presión del chorro de agua y la profundidad de corte siguen una relación lineal después de que se ha alcanzado la presión crítica, la cual depende de las características de erosión del material. Si el material debe ser cortado con agua con abrasivos, la presión será independiente de los abrasivos y de los parámetros de mezclado. [12]
2. **La boquilla.** La unidad de boquilla consiste en un soporte, una cámara de mezclado y una boca de joya. El soporte está hecho de acero inoxidable y la boca de zafiro, rubí o diamante. Este último dura más, pero es el de mayor costo. La cámara de mezclado está fabricada comúnmente de carburo de tungsteno, lo que le da una vida de trabajo de 4 [h] a una presión de operación de 240 [MPa]. [11]

Para el buen funcionamiento de un sistema de corte por chorro de agua se necesita que el chorro sea coherente, por lo que se canaliza el agua por un barreno muy estrecho y perforado con alta precisión [14].

El diámetro del barreno de salida de la boquilla está inversamente relacionado a la velocidad de salida del chorro de agua. A mayor velocidad del chorro de agua, mayor energía cinética aplicada al corte de material. Sin embargo, la presión necesaria para generar el chorro también aumenta.

Para obtener un chorro de agua coherente [14]:

- El barreno debe estar cortado limpiamente.
- El barreno deberá ser preciso para que la superficie superior restrinja el caudal de agua y se asegure la máxima presión de corte.
- Se deberá contar con un corte cónico en la superficie inferior de la boquilla, lo que produce el máximo flujo de aire hacia el chorro, reduciendo así la cantidad de vacío y logrando que el chorro sea estrecho. [13].
- Se deberán cuidar los puntos críticos:
 - Superficie superior alrededor del barreno de salida.

- Diámetro inferior del barreno de salida.
- Cuanto más coherente y potente sea el chorro de agua, más afilado será el corte.

Para mejorar el rendimiento de la boquilla, existe una relación entre la longitud de ésta y el diámetro de salida. La longitud de la boquilla debe ser tal que asegure la suficiente aceleración de las partículas, pero que no se produzca un alto desgaste debido a las partículas que van pasando, lo que resultaría en una pérdida de *momentum*. Así, se requiere que la boquilla tenga una longitud de 2.5 a 5 veces el diámetro del barreno de salida [15].

2. **La velocidad de corte.** Se refiere a la velocidad a la que se mueve la boquilla a lo largo de la trayectoria de corte y depende del material y el grosor de la pieza, cumpliendo con la relación de que a mayor velocidad, la profundidad del corte y el acabado superficial del área de corte disminuye [17].

Por lo general, para mover la unidad de boquilla a lo largo de la trayectoria deseada se ocupan sistemas de control numérico computarizado o robots industriales.

3. **El ángulo de impacto del chorro.** Se refiere al ángulo de inclinación que existe entre el chorro y el eje de la superficie a cortar. A un ángulo de impacto de cero grados, no existe remoción de material. Sin embargo, conforme se va aumentando la profundidad de corte, el ángulo de impacto local, también aumenta.

Para iniciar el proceso de corte, el chorro impacta la superficie a cortar con gran fuerza, las partículas individualmente no pueden seguir el cambio de dirección abrupto que tiene el chorro total al impactarse, con lo que se acumulan muchos impactos en un mismo punto y con ello se forma el primer escalón suficiente para iniciar el corte.

4. **Tamaño de partícula de abrasivo.** La profundidad de corte depende del tamaño de la partícula y su dimensión máxima está limitada por el barreno de salida de la boquilla. Normalmente, se ocupan partículas de abrasivo de un tercio de este diámetro. Está experimentalmente probado que

partículas de abrasivo filosas tienden a generar mejores resultados de corte. [12]

5. **La tasa de flujo de abrasivo.** La tasa de flujo de abrasivo es un factor muy importante en el corte por chorro de agua con abrasivos. En la figura 5 se muestra esta relación.

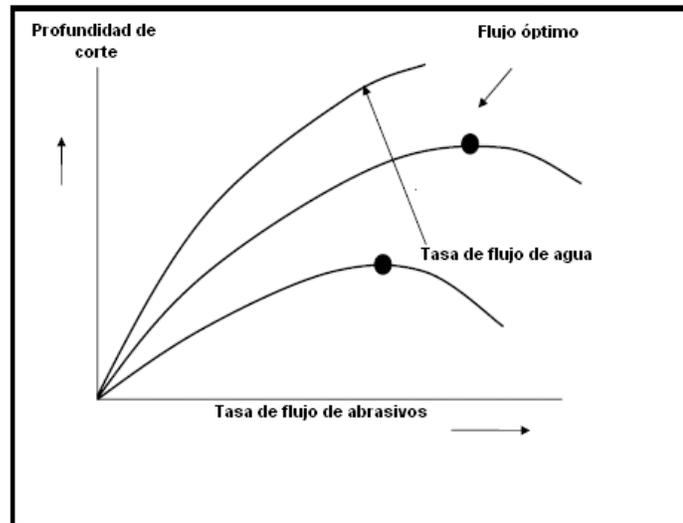


Figura 5. Flujo de abrasivos óptimo [12]

Para muchas aplicaciones, se prefiere emplear arena “garnet” debido a que su dureza es comparable con la del diamante, sin embargo, al igual que cualquier otro abrasivo, los daños que causa al sistema de inyección son desastrosos a lo largo del tiempo [12].

6. **Calidad del agua.** Es necesario controlar la calidad del agua empleada en el corte por chorro de agua, ya que el agua muy limpia o muy sucia, dañaría las tuberías y/o la boquilla de corte.

El agua ordinaria es empleada para alimentar los sistemas de Corte por Chorro de Agua. El 90% de los equipos sólo requieren que el agua pase por filtros de sólidos disueltos en el agua a la entrada del intensificador de presión.

La tabla 3 nos muestra los valores aproximados de la calidad de agua para el WJC.

Tabla 3. Valores aproximados de la calidad de agua apropiada [13].

Dureza	<17 ppm
Hierro (Fe)	<0.1 ppm
Sílice (SiO₃)	<15 ppm
Nivel de pH	6.5-9.5
Sólidos	<100 ppm
Bacterias	<100 ppm
Cloro	<5 ppm

Si el agua no cumple con estas condiciones de calidad, se aconseja tratarla con resinas de intercambio iónico; cuando se emplea osmosis inversa (OI) o desionizadores (De-I), el agua se hace “muy pura”, lo que la convierte en un material “hambriento de iones”, y en consecuencia, el agua tomará iones del medio que lo rodea, tal como los metales en la bomba y en la tubería. Al emplear agua procesada por OI o De-I se alarga considerablemente la vida del barreno de salida del chorro, sin embargo, el daño en las tuberías y el sistema generador de presión es costoso. [32]

2.2.1.1 Ventajas y desventajas del corte por chorro de agua.

Cuando se compara con otros procesos de maquinado convencionales y no convencionales, el WJC ofrece las siguientes ventajas. [32]

- *Versatilidad de maquinado.* El corte por chorro de agua, y principalmente el AWJ, corta prácticamente cualquier material, y es empleado particularmente para cortar muchos de los materiales considerados difíciles de maquinar.
- *Capacidad para producir contornos.* El WJC es excepcionalmente bueno para el maquinado en dos dimensiones.
- *Una mínima o ninguna zona afectada por el calor.* Durante el WJC, el calor generado debido al corte es instantáneamente eliminado por el agua.
- *Fuerzas de corte pequeñas.* Las fuerzas de corte son muy pequeñas y para el maquinado de muchas de las piezas no se requiere sujeción.
- *Versátil.* Es fácil de integrar el sistema a un manipulador mecánico.
- *Disponibilidad.* El agua es el fluido de trabajo y los abrasivos más empleados, garnet y silica, son de bajo costo y fáciles de conseguir.
- *Amigable con el ambiente.* Los abrasivos pueden ser ocupados para composta.

Por lo anterior, el corte por chorro de agua es un proceso de maquinado que puede sustituir muchos otros de los métodos de corte, sin embargo, tiene algunas limitantes [32]:

- Alta inversión inicial y costo de mantenimiento. El mayor costo de operación es el costo del equipo en sí, la primera inversión para un WJC va desde US\$60,000 hasta US\$500,000. El costo de operación y mantenimiento está entre los US\$10 – US\$30 por hora.
- Capacidad limitada de maquinado. La capacidad de maquinado del WJC está limitado en términos del espesor del material que el chorro pueda atravesar.
- Conicidad o geometría Kerf. La conicidad en el corte es también un problema en el WJC cuando se cortan materiales de gran espesor. Esta conicidad se forma cuando el chorro sale de la pieza en un ángulo distinto al que entró, lo cual causa inexactitud dimensional.
- Ruido asociado al WJC. El proceso de corte del WJC involucra ruidos del proceso mecánico y aerodinámico. El ruido mecánico viene del motor, mientras que el ruido aerodinámico viene de la alta velocidad en la que viaja el chorro de agua.
- El desgaste de la boquilla. La boquilla empleada en el WJC, es una de las piezas críticas que influyen el comportamiento de técnico y económico del sistema.



CAPÍTULO 2

2. Planteamiento del problema

2.1 Micromanufactura.

La micromanufactura es una tecnología relativamente nueva e importante en la Mecánica para la producción de componentes de bajas dimensiones (menores a 15 [mm]) [3]. Es un conjunto de procesos para crear estructuras, componentes o sistemas de dimensiones en el orden de los milímetros y los micrómetros (Fig. 6).

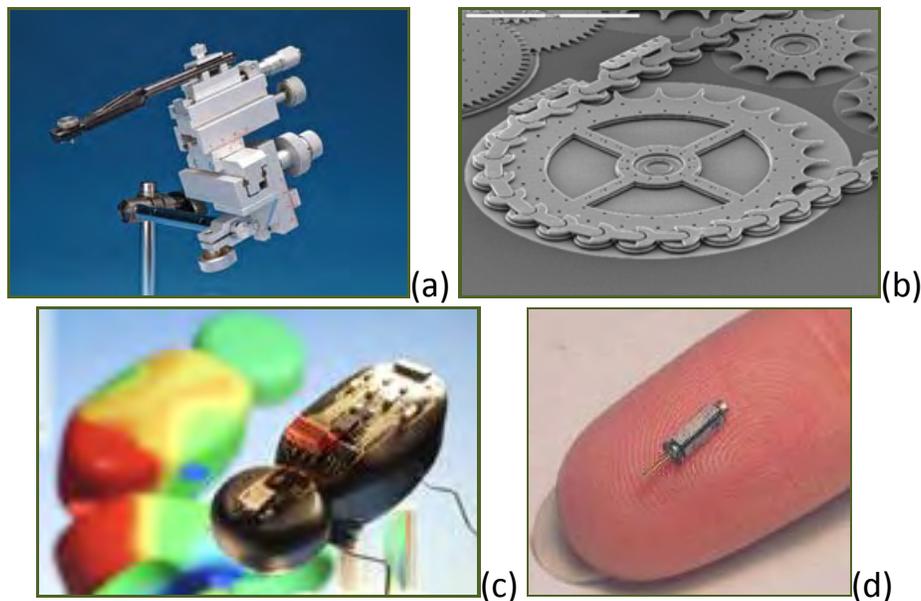


Figura 6. a) Micromanipulador (50 x 50 mm) de BS, b) Cadena de Silicio de SNL, c) iRob-functional MID-demostrator de FIZ, d) Motor ultrasónico de MMECH.[40][41][42][43]

La diferencia que existe entre la micro y la macromanufactura reside principalmente en el mecanismo de corte². La micromanufactura involucra un complicado mecanismo que depende de la microestructura del material, del tamaño de la pieza y de las características del corte, mientras que la macromanufactura depende principalmente del material a cortar y la viruta generada. [1]

La figura 7 muestra los procesos de maquinado empleados para realizar micromanufactura y las tolerancias obtenidas con cada uno de ellos. Así mismo, muestra cómo se ha avanzado en la capacidad de manufactura de los procesos a través de los años.

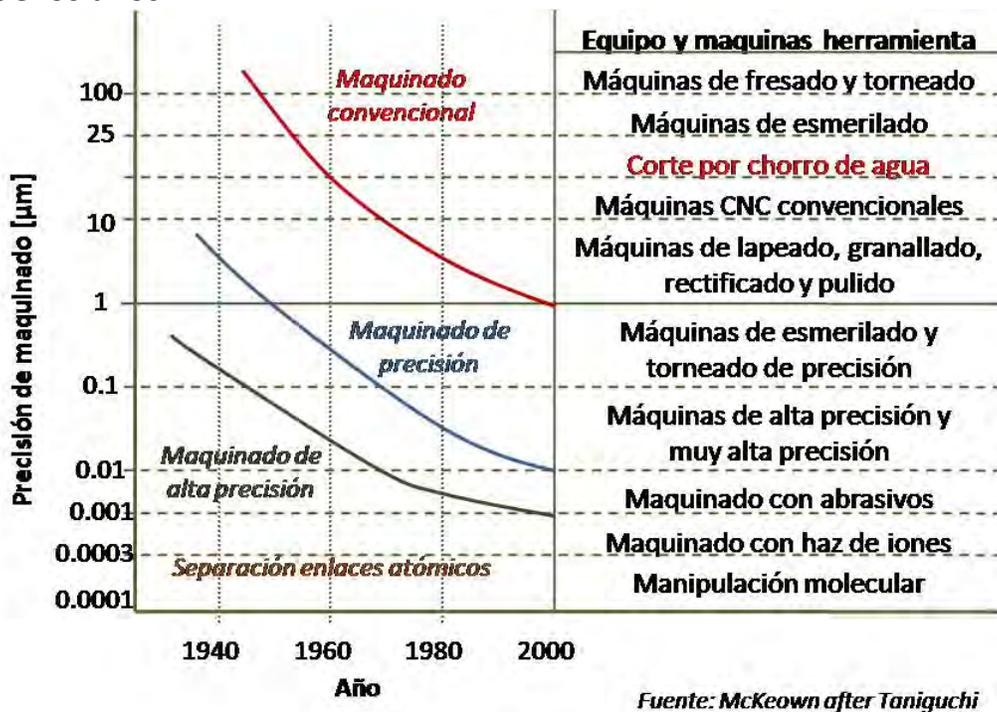


Figura 7. Desarrollo de la capacidad del micromaquinado a través del tiempo [1]

Desde el año de 1999, el Grupo de Micromecánica y Mecatrónica (GMM) del CCADET-UNAM ha fabricado micropiezas utilizando métodos de manufactura por arranque de material; sin embargo, debido a las restricciones que se tienen por el material (dureza, fragilidad, etc.) y la geometría de las piezas a fabricar, así como a la limitante que se tiene en el desarrollo de herramientas (cortadores)

² Mecanismo de corte: modo en que se lleva a cabo el corte, involucra los parámetros de corte, la herramienta utilizada, las fuerzas de corte involucradas, etc.

adecuados a los micromaquinados. Actualmente en el GMM también se está investigando la aplicación algunos métodos energéticos, como el maquinado por electroerosión (EDM) y el corte por chorro de agua, para realizar micromanufactura [4].

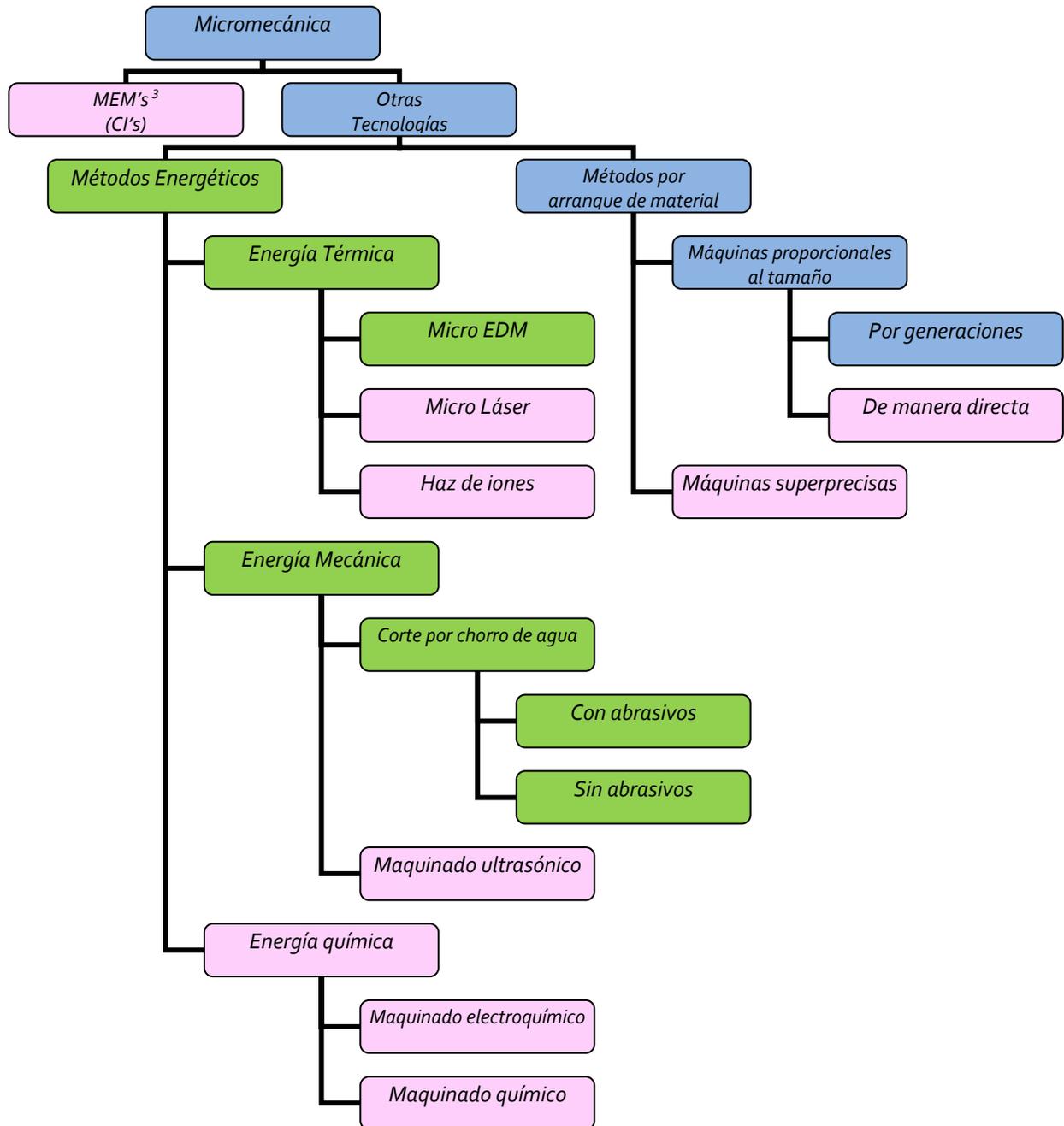


Figura 8. Desarrollo de la micromecánica en el GMM [7].

³ MEM's: Sistemas Microelectromecánicos (Microelectromechanical Systems).

En la figura 8 se observa el camino que ha seguido el GMM para el desarrollo de micropiezas, en azul, utilizando métodos por arranque de material, y en verde, la investigación realizada para la fabricación de micropiezas por métodos energéticos.

Según la capacidad del proceso para obtener la precisión requerida, ver figura 7, se cataloga al corte por chorro de agua como un proceso de maquinado “convencional”, que alcanza precisiones similares a las obtenidas con las máquinas CNC comunes, pero sin las limitantes que se tienen al emplear herramientas convencionales. [1]

En 2009, empresas manufactureras de máquinas de corte por chorro de agua (Finecut AB y Sweden AB) desarrollaron máquinas de corte por chorro de agua con abrasivos para microaplicaciones (Fine Abrasive Waterjet). Estas máquinas alcanzan conicidad de 0.3mm, tienen diámetros de corte entre 0.05 y 0.3 mm y alcanzan una precisión de posicionamiento de $\pm 0.01\text{mm}/300\text{mm}$ [45]. La figura 9 muestra algunas piezas realizadas con estos equipos.

Se tiene pronosticado que para la década 2010-2020, el resultado obtenido para el microcorte con el corte con chorro de agua será similar al obtenido con máquinas de corte con laser. [2]



Figura 9. Piezas realizadas con máquinas de corte por chorro de agua suizas. [45]

2.2 Definición del problema.

El principal interés en la investigación de procesos de manufactura no convencionales o energéticos para la fabricación de microsistemas, obedece a las

restricciones que se tienen en el laboratorio para el desarrollo de herramientas adecuadas a la geometría de la micropieza y los materiales empleados, por lo que se requieren procesos en los que no sea necesario generar dichas herramientas. Uno de estos procesos es el corte por chorro de agua, el cual se aplica en la industria para realizar cortes a nivel macrométrico utilizando un hilo de agua como herramienta de corte.

Con el fin de aplicar esta tecnología al microcorte, es necesario identificar los parámetros involucrados, y encontrar su relación entre sí y con el corte realizado. Y apoyándose en esto, se puede verificar la factibilidad de aplicar el WJC sin abrasivos para el micromaquinado y establecer los parámetros adecuados para este propósito.

2.3 Objetivos.

2.3.1 Objetivo general

- Investigar el proceso de corte por chorro de agua y determinar sus características de aplicación en procesos de micromanufactura.

2.3.2 Objetivos específicos

- Investigación del proceso de corte por chorro de agua.
- Determinar los parámetros involucrados en el proceso de corte por chorro de agua.
- Obtener y determinar los parámetros para el microcorte por WJC.
- Desarrollar un banco de pruebas con el fin de generar un chorro de agua para realizar microcorte.

2.4 Alcances.

- Analizar la información referente al proceso de WJC.
- Analizar la posible aplicación del WJC en procesos de micromanufactura.
- Obtener la correlación de los parámetros necesarios para el corte por chorro de agua aplicado a microcorte.



3. Proceso del corte por chorro de agua y su aplicación en micromecánica

3.1 Mecanismos de remoción de material [16].

El corte por chorro de agua es un proceso en el cual la remoción de material se lleva a cabo debido a la erosión⁴ que provocan las partículas de agua al impactarse a alta velocidad en la superficie de un material.

El mecanismo de remoción de material del corte por chorro de agua es estudiado en dos aspectos: el micromecanismo y el macromecanismo. El primero se refiere al material removido por el impacto de las partículas individuales, mientras que el segundo se refiere al proceso de formación de zonas de corte y conicidad, también llamadas geometrías de Kerf.

3.1.1 Micromecanismo del corte por WJC.

Ludema y Meng [20] definieron cuatro submecanismos por los cuales se separan partículas sólidas del material a maquinar con WJC. Estos mecanismos son: corte, fatiga, fusión y fractura frágil, pero estos submecanismos no trabajan solos, sino en combinación (ver figura 10).

⁴ Erosión: Desprendimiento y arrastre de las partículas sólidas desde la superficie del material.

La importancia de cada uno de éstos en el proceso de erosión depende de factores como el ángulo del chorro, las propiedades del material a cortar y las condiciones del entorno. Como el mecanismo de microerosión se ve afectado en gran medida por las características del material a cortar, en la literatura dividen el proceso en micromecanismos asociados a materiales dúctiles y a materiales frágiles.

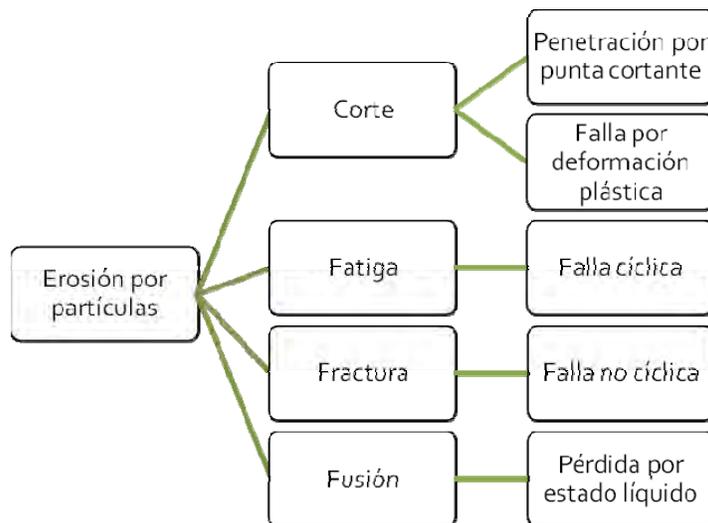


Figura 10. Procesos de erosión. [20]

3.1.1.1 Erosión en materiales dúctiles.

La mayoría de los modelos de erosión de material están basados en el “modelo de microcorte” de Finnie. En él se propone que el proceso de erosión sucede debido a la deformación plástica del material. Más adelante, Finnie y McFadden redefinieron esta teoría al hacer nuevas consideraciones sobre las fuerzas presentes cuando interactúan la partícula y la superficie. [16]

Bitter [33] dirigió un estudio más profundo de la colisión de esferas elásticas con un plano al cual deforma tanto elásticamente como plásticamente. Se dividió todo el proceso de remoción de material en dos modos: la erosión debido al corte, que ocurre a bajos ángulos de impacto, y la erosión por deformación, que ocurre a altos ángulos de impacto, con lo que desarrolló el “modelo de corte-deformación”.

La erosión por corte es causada por la acción de las partículas libres en movimiento, mientras que la erosión por deformación es resultado de la deformación repetida causada por la colisión de las partículas. Bitter [33] propuso

que estos dos procesos ocurren simultáneamente. La erosión total en cualquier ángulo se debe a la combinación del efecto de erosión por corte y por deformación.

3.1.1.2 Erosión en materiales frágiles.

Existen muchos modelos que describen el mecanismo de remoción de material para materiales frágiles, pero la mayoría de ellos están aplicados a materiales específicos. A pesar de la diversidad, la mayoría de ellos concuerda en que la erosión de los materiales frágiles se da por el proceso de fractura, en donde el material es removido por la propagación y la intersección de las fracturas por encima de y alrededor de la partícula abrasiva. De hecho, el corte por chorro de agua de cualquier material se da por la combinación de mecanismos de erosión frágil y dúctil, pero uno u otro puede dominar el proceso de corte. [16]

Zeng y Kim [36] establecieron que el proceso de remoción de material se da por la formación, propagación e interacción de microfisuras producidas por el impacto de las partículas. Basados en esta observación, la erosión de materiales frágiles está clasificada en tres tipos: modelo de fractura cónica, modelo de fractura lateral y modelo de fractura intergranular.

El modelo de fractura cónica fue propuesto por Sheldon and Finnie [37] con la aseveración de que la erosión ocurre completamente debido por la propagación de la fractura, y la viruta es el resultado de los esfuerzos de contacto durante el impacto.

El modelo de fractura lateral fue establecido por Evans *et al* [38], considerando el proceso de formación de fractura lateral durante el impacto de una sola partícula como el factor principal en el establecimiento del modelo de pérdida o remoción de material. Esta teoría asume que la tasa de remoción de material es proporcional a la cantidad de material que es removida por el impacto de cada una de las partículas.

En el modelo de fractura intergranular se asume que el daño producido por una partícula impactada se presenta en la fractura de la frontera de grano. Bajo este modelo, una fracción de la energía cinética de la partícula, es empleada en la

fractura de la frontera de grano y el tamaño del cráter es proporcional a la energía de cinética de la partícula. [16]

Por otro lado, Chi *et al* dirigieron estudios de erosión de material desde el punto de vista de la fuerza que aplica la partícula de agua en la superficie del material a cortar. Sus estudios concluyen en que existen dos modelos de remoción de material: el primero establece que si la fuerza con la que la partícula impacta el material está por debajo del límite de fractura de este, como en un material dúctil, el mecanismo de remoción de material que predomina es el de deformación. Sin embargo, si esta fuerza es suficiente para causar una fractura en el material, el mecanismo de remoción de material se basa en la propagación de microfisuras, como en un material frágil. [16]

3.1.2 Macromecanismo del corte por WJC

3.1.2.1 Conicidad en el corte por WJC

Cuando se refiere la geometría Kerf, usualmente se está hablando del diámetro superior e inferior del corte y de la conicidad del mismo. El corte generado por el chorro de agua se caracteriza por un ancho mayor en la parte superior (W_s) que en la parte inferior (W_i). La conicidad del corte está dada por la proporción entre el ancho superior y el ancho inferior.

$$T_R = \frac{W_s}{W_i}$$

O alternativamente:

$$T_R = \frac{W_s - W_i}{2t}$$

Donde t es la profundidad a la cual se midió el mínimo ancho de corte.

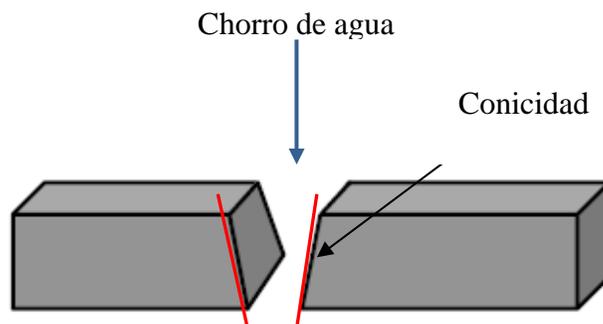


Figura 11. Conicidad o geometría Kerf [27]

Existen dos categorías del proceso de formación de conicidad o geometrías Kerf: la que ocurre cuando se hacen cortes atravesados, y cuando se hacen cortes ciegos.

Cuando el chorro tiene la energía suficiente, el corte traspasa el material, y su geometría se caracteriza por una entrada ancha y una reducción gradual a la salida, con lo que se forma la geometría de Kerf.

En la superficie superior, se forma un borde redondeado que es generado debido a la deformación plástica del material causada por el golpe del fluido. Entre más tiempo el material esté expuesto al chorro de agua, más evidente será esta deformación. Si se están cortando materiales dúctiles, se puede producir sobrematerial al salir de la pieza el chorro de agua, ya que el material deformado plásticamente es arrastrado a la parte inferior del Kerf.

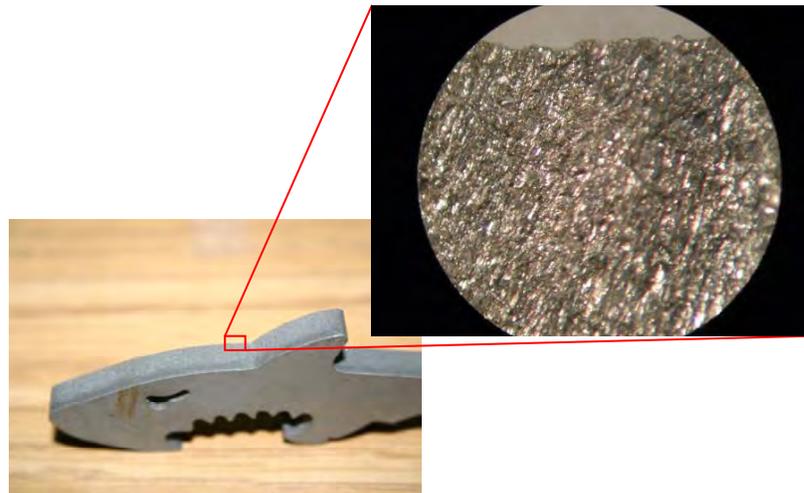
Cuando el chorro de agua no tiene la energía para traspasar la pieza, se genera un corte ciego. La geometría Kerf para este tipo de corte en cerámicos presenta tres zonas, las dos superiores presentan un corte pasado limpio pero la de abajo, presenta una superficie irregular, con estrías e indentaciones. La zona superior es la que presente un mejor acabado, suave y sin fracturas visibles y mientras que la zona media presenta algunas estrías pero no indentaciones, y marca la transición entre la zona superior y la zona inferior [17].

3.1.2.2 Zonas de corte.

Hashish [39] condujo en una investigación del proceso de corte por chorro de agua, empleando una cámara de alta velocidad para grabar el proceso de remoción de material en una muestra de plexiglass. Él encontró que el proceso de remoción de material es un proceso de penetración cíclica que consiste en dos regímenes de corte o dos zonas de corte: zona de erosión por corte y la zona de erosión por deformación, lo cual concuerda con la teoría de Bitter [33].

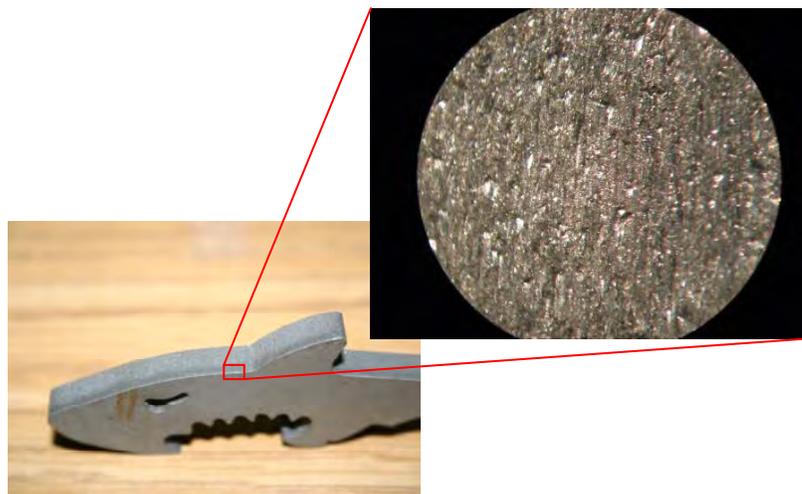
La **zona superior** es la zona de erosión por corte. En esta zona, la remoción de material ocurre primeramente por el microcorte ocasionado por el impacto de las partículas a ángulos determinados. Este proceso establece que la tasa de material removido es igual a la tasa de material desplazado en el chorro transversalmente.

La superficie de la pared Kerf producto de esta erosión por corte se caracteriza por ser rugosa (ver figura 12).



*Figura 12. Zona superior de corte.
Fotografía de una pieza cortada por chorro de agua.⁵*

La **zona inferior** es la zona de erosión por deformación, donde la remoción de material es causada por los impactos de las partículas en ángulos grandes. En esta zona, el material es removido por un proceso de erosión asociado al múltiple bombardeo, endurecimiento de la superficie por deformación plástica y la formación de fracturas. La superficie de la pared Kerf de esta zona es estriada (ver figura 13).



*Figura 13. Zona inferior de corte
Fotografía de una pieza cortada por chorro de agua.³*

⁵ Fotografías realizadas dentro del GMM con un microscopio Iroscope® a una pieza cortada por una máquina de corte por chorro de agua con abrasivos de Mitsubishi®.

3.1.3 Etapas del proceso de corte por WJC.

Hashish [39] reportó que el proceso de corte por WJC en la dirección transversal sucede en tres etapas llamadas: **etapa de entrada**, **etapa de corte** y **etapa de salida**.

En la **etapa de entrada**, los mecanismos de corte se desarrollan hasta que la máxima profundidad de corte es alcanzada. Durante esta etapa, el chorro entra en la pieza de trabajo y resulta en el incremento de la profundidad. En un inicio, el corte está dado por la erosión del material debido al ángulo con el que impactan las partículas; con el incremento de la profundidad de corte, el ángulo también se incrementa hasta que la superficie es tal que permite la deflexión del chorro sin que exista un impacto de las partículas individuales. [16]

Después de la etapa de entrada, está la **etapa de corte**. En esta etapa se realiza un proceso cíclico de corte, hasta que el chorro alcanza el borde inferior de la pieza de trabajo. La geometría Kerf cambia de repente y marca la transición de un modo de remoción de material al otro.

La **etapa de salida** es cuando el proceso de corte llega a su fin. Conforme el chorro se aproxima al borde de salida de la pieza de trabajo, un triángulo no cortado es observado, el cual es asociado con la deflexión que sufre el chorro. (ver figura 14). Este fenómeno muestra que el proceso de corte es estable a determinados espesores.

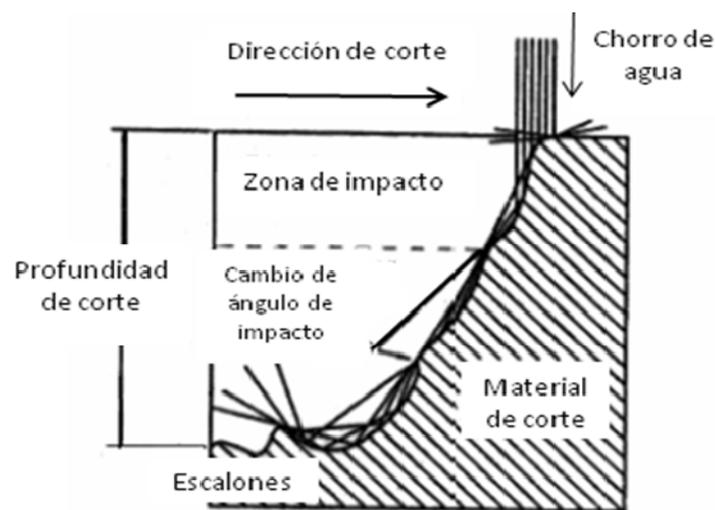


Figura 14. Comportamiento del chorro al impactarse.[16]

3.2 Generación y características del chorro.

Dentro del proceso de corte por chorro de agua, el chorro de agua juega un papel muy importante para la generación del corte.

3.2.1 Generación del chorro.

Yanaida y Ohashi determinaron que el chorro de agua que sale por la boquilla se divide axialmente en tres zonas: la **zona central**, la **zona de transición** y la **zona final**. [16]

En la parte cónica de la **zona central**, las propiedades del flujo son constantes a lo largo del eje de chorro. La longitud de esta zona está relacionada al diámetro de la boquilla de salida, a la presión del agua y a la velocidad de chorro.

En la **zona de transición**, la velocidad del agua es función del radio del chorro. El comportamiento radial de la velocidad del agua de la zona de transición indica que el chorro de agua se dispersará de forma radial conforme se incrementa la distancia recorrida. La influencia del aire que interactúa con el chorro de agua se vuelve más significativa en la zona de transición.

Entre la zona central y la zona final, la presión del agua a lo largo del eje del chorro disminuye en una tasa pequeña, en contraste, en la zona final, la presión a decrece abruptamente.

En la **zona final**, el chorro oscila tanto en la dirección axial como en la dirección radial. Las oscilaciones crecen hasta que el chorro se hace discontinuo. [16]

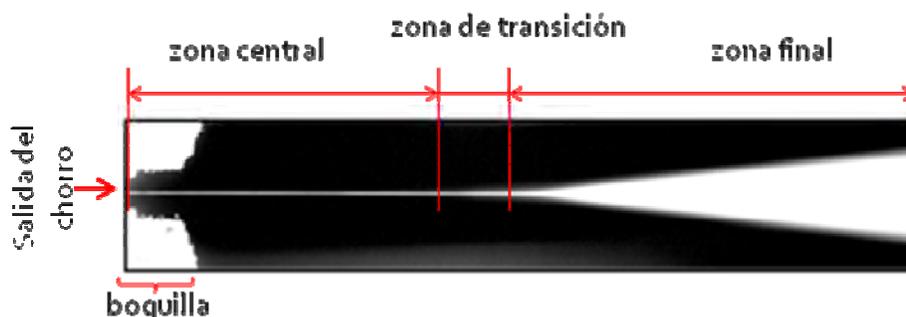


Figura 15. Zonas del chorro de agua. [28]

Para obtener un chorro coherente y a mayor velocidad, es necesario cuidar la parte superior del barreno de salida de la boquilla. La forma de la entrada del

agua tiene una influencia directa a las propiedades del líquido que es conducido a través de él.

Una vez que un líquido presurizado entra en un barreno capilar de entrada recta, el flujo se separa de las paredes de entrada dejando una zona de recirculación que se llena de aire o de agua (Ver figura 16).

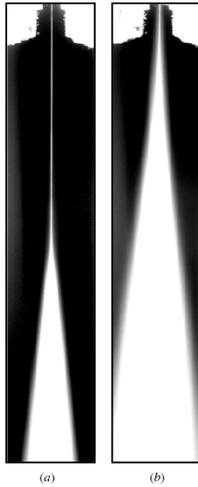


Figura 16. Comparación entre dos chorros de agua con el mismo número Reynolds. El diámetro de salida del barreno es de $128 \mu\text{m}$. (a) El diámetro del chorro a la salida del chorro es de $100 \mu\text{m}$ con un ángulo de entrada recto. (b) El barreno de salida del chorro tiene un diámetro igual al anterior pero tiene un chaflán a 45° en la entrada. [28]

Si al inicio, el barreno se llena de líquido, la baja presión de la zona de recirculación causa que el líquido empiece a evaporarse. Este fenómeno (conocido como cavitación) causa turbulencia e inestabilidad y como consecuencia acelera la ruptura del chorro. Mientras que a nivel intermedio la cavitación acelera la ruptura del chorro, una cavitación intensa es deseable en barrenos capilares cortos ya que esto ayuda a generar que el chorro de agua sea coherente. [28]

La intensa cavitación en los barrenos capilares cortos genera un fenómeno llamado contracción hidráulica (hydraulic flip), donde una nube de cavitación crece y alcanza la salida del barreno, dándole oportunidad al aire del ambiente fluya hacia arriba y llene la región de recirculación. Una vez que ocurre la contracción hidráulica, el flujo se separa de la pared del barreno por un gap⁶ de aire y se forma el chorro de agua coherente. [28]

Así mismo, para propiciar este fenómeno, en la superficie inferior del barreno se realiza un corte cónico que produce el máximo flujo de aire hacia el chorro, aumentando el gap de aire que contracta al chorro de agua.

⁶ Gap: Espacio que existe entre la pared del barreno y el chorro de agua que circula por él.

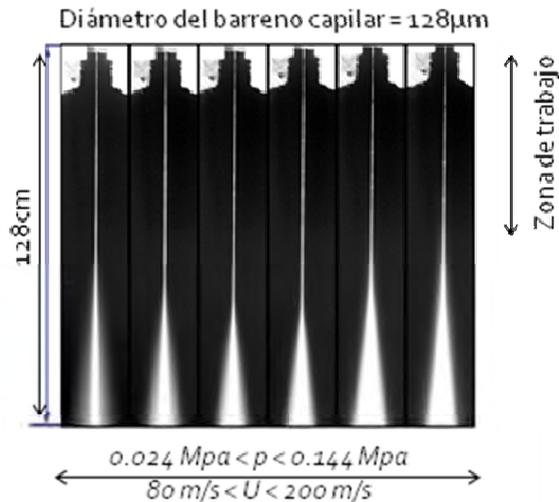


Figura 17. Simulación del chorro de agua que pasa por un barreno capilar corto con lo que se da lugar a la coherencia del flujo.[28]

3.2.2 Características y distribución del chorro.

Davies y Jackson [16] encontraron que bajo ciertas condiciones experimentales, la presión dinámica tiene un decaimiento mínimo cuando el chorro recorre 100 veces el diámetro de la boquilla. Sin embargo, después de esta distancia, la presión decae conforme aumenta la distancia axial del chorro.

Neusen *et al* [16] encontraron que la velocidad del chorro se mantiene casi constante cuando recorre entre 48 y 125 veces el diámetro de la boquilla. Después de esta distancia, la velocidad del chorro decrece en la dirección del flujo, es decir, está en función de la distancia en separación entre la boquilla y la pieza de trabajo. La razón por la que decrece se cree que es la dispersión de la energía del chorro de agua conforme va cayendo. El diámetro de la boquilla también es una gran influencia para la velocidad del chorro. Cuando la proporción diámetro/largo de la boquilla es grande se observa que la velocidad es mayor que cuando se tiene una proporción menor.

3.3 Desempeño del corte por WJC.

Se han hecho muchos estudios para investigar el efecto que tienen las variables en el desarrollo del corte [11, 12, 16, 17, 27, 31, 33, 36, 37, 38, 39], con el fin de realizar mediciones y optimizar los parámetros de corte.

3.3.1 Parámetros del proceso de WJC.

Momber y Kovacevic [22] clasificaron los parámetros involucrados en el corte por chorro de agua en dos categorías:

Parámetros de entrada:

- Parámetros hidráulicos: presión del agua y diámetro del chorro de agua.
- Parámetros de corte: Velocidad de corte, distancia entre la boquilla y la pieza de corte, el ángulo de corte y número de pasadas.
- Parámetros de los abrasivos: Tasa de flujo de los abrasivos, diámetro del abrasivo, distribución del tamaño de la partícula de abrasivo, forma y dureza de la partícula de abrasivo.
- Parámetros del material a cortar: Esfuerzo de fractura, esfuerzo de fluencia, dureza y ductilidad.

Parámetros de salida:

- Profundidad de corte.
- Geometría Kerf: Ancho superior, ancho inferior y conicidad.
- Topografía Kerf: Rugosidad y textura de la superficie.
- Tasa de remoción de material.

Los parámetros de entrada interactúan entre sí y afectan a los parámetros de salida, lo que resulta en las características de la pieza obtenida.

3.3.2 Efectos debido a la presión del agua.

Los estudios realizados en este campo indican que la profundidad de corte se incrementa conforme se incrementa la presión del agua. Hashish [39] notó que existe una presión crítica (P_c) debajo de la cual no ocurre corte. Después de dicha presión, la profundidad de corte se incrementa linealmente conforme se va aumentando la presión del agua. La presión es independiente de los otros parámetros de entrada (ver figura 18).

La presión crítica depende de las características de erosión del material y es la mínima presión necesaria para cortar el material, esta presión se incrementa conforme se incrementan las propiedades de esfuerzo de fractura del material.

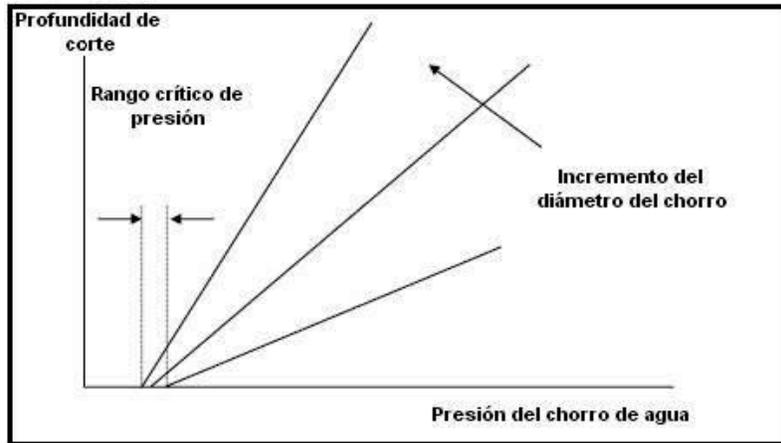


Figura 18. Efecto de la presión contra la profundidad de corte [12]

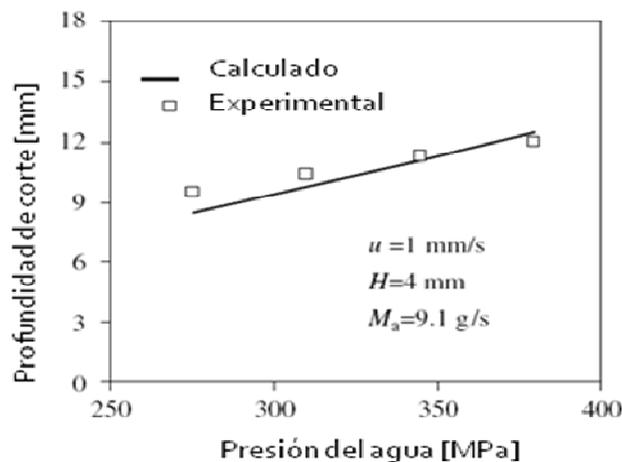


Figura 19. Ejemplo de corte de un cerámico. [17]

Kovacevic [31] observó que la influencia de la presión del agua en la rugosidad de zona superior del corte es insignificante; sin embargo, conforme la profundidad de corte aumenta, la influencia en la rugosidad de la presión del agua se incrementa.

Generalmente, conforme aumenta la presión del agua, la rugosidad de la superficie decrece. Esto es porque un incremento en la presión del agua, resulta en un incremento en la velocidad de las partículas, lo que causa un efecto positivo en la calidad de la superficie. Pero si la presión del agua es muy elevada, esto

generará que las partículas pierdan la habilidad de corte, ya que éstas se fragmentarán al impactarse, generando así un efecto negativo en la calidad de la superficie.

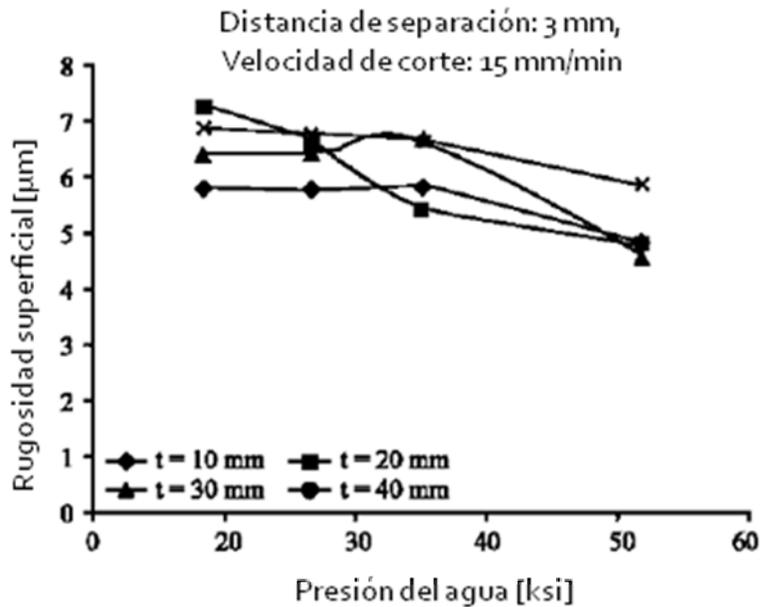


Figura 20. Ejemplo del efecto de la presión en la rugosidad de la superficie. [29]

Cuando la presión se incrementa, la conicidad se incrementa hasta un máximo. Pero después, la conicidad se reduce conforme la presión sigue aumentando. Esto se debe a que la fuerza de impacto del chorro aumenta a mayor presión del agua. [29]

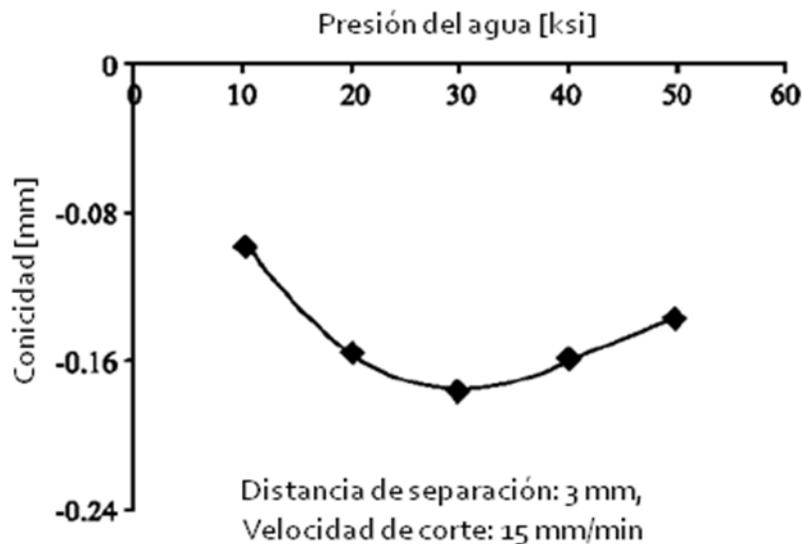


Figura 21. Ejemplo del efecto de la presión en la conicidad. [29]

3.3.3 Efectos de la distancia entre la boquilla y el material a cortar.

Conforme se aumenta la distancia entre la boquilla y el material a cortar, la profundidad de corte decrece casi linealmente. Esto se debe a que conforme el chorro de agua se aleja de la boquilla, éste va perdiendo energía hasta que se llega al punto en que al golpear el material, el chorro ya no cuenta con la energía suficiente para realizar el corte. Sin embargo, si esta distancia es muy pequeña, las partículas que rebotan pueden causar daños en la boquilla. [16]

Otra explicación a esto fue dada por Ramulu y Arola [28], que relacionaron esta pérdida de energía a la forma del chorro de agua. Conforme el chorro de agua se aleja del barreno de salida, éste pasa de la zona central a la zona de transición donde va aumentando el diámetro del chorro, con lo que se reduce la densidad de energía en el impacto, y consecuentemente se genera una penetración menor en el material. Hashish y Go [31] sugieren que la distancia ideal es de 2.00 mm.

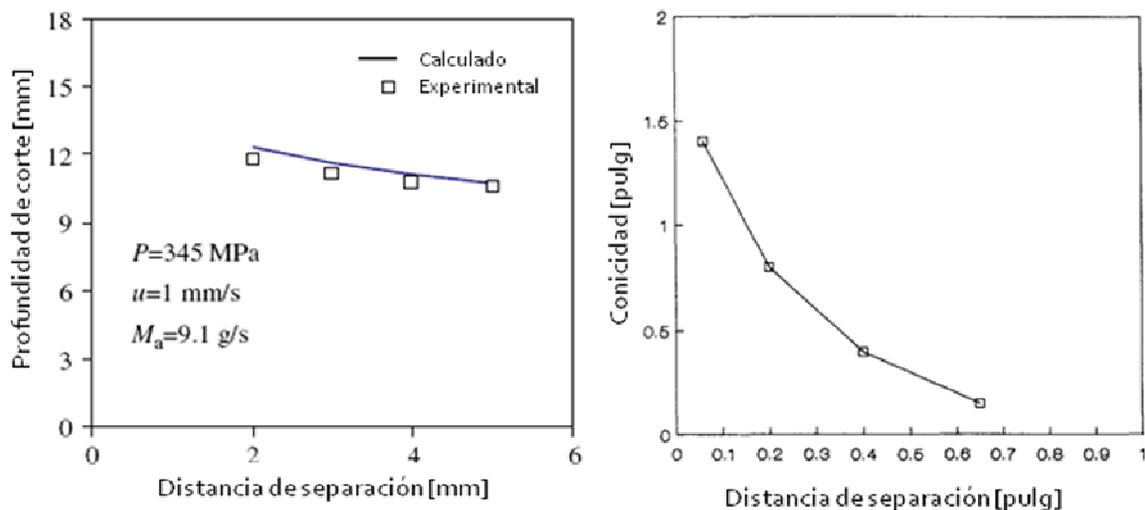


Figura 22. Ejemplos del efecto de la distancia de separación en la profundidad. [17] [30]

Además, el incremento de la distancia entre la boquilla y el material de corte resulta en un incremento en la rugosidad de la superficie. Esto se atribuye a que el chorro de agua se va dispersando conforme se va alejando de la boquilla y decrece la densidad de impactos, lo que genera una superficie más rugosa. Ver figura 23.

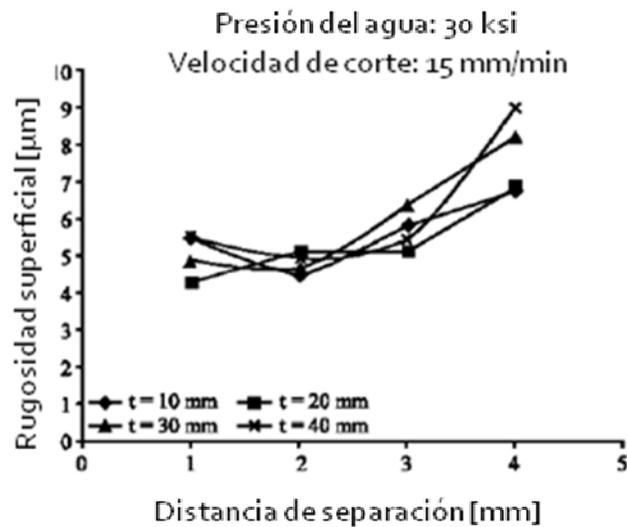


Figura 23. Ejemplo del efecto de la distancia de separación en la rugosidad de la superficie. [29]

La conicidad del corte se reduce gradualmente a un mínimo valor conforme se disminuye la distancia que existe entre la boquilla y el material de corte. A una distancia pequeña, el chorro es potente y tiene una forma divergente. Esto provoca que la parte superior del corte sea más angosta que la parte inferior. Cuando la distancia crece, el chorro se vuelve más débil y a la salida del corte este ya ha perdido energía cinética, con lo que el ancho del corte se vuelve más pequeño en la parte inferior que en la parte superior. [29]

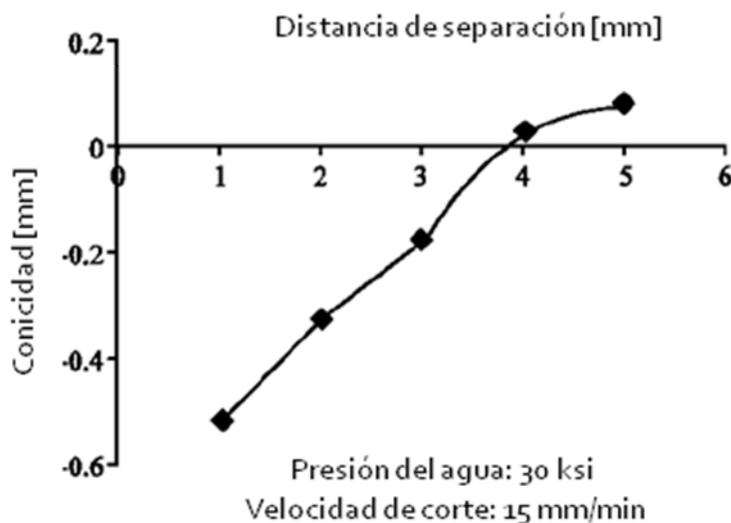


Figura 24. Ejemplo del efecto de la distancia de separación en la conicidad. [29]

3.3.4 Efectos debido a la velocidad de corte

La relación que existe entre la profundidad de corte y la velocidad de corte es una curva no lineal que indica que conforme la velocidad de corte aumenta la profundidad de corte decrece.

Momber y Kovacevic [25,31] encontraron que esta dependencia es muy significativa para bajas velocidades, pero cuando la velocidad aumenta, se llega a un estado de saturación. Esto se debe a que conforme la velocidad de corte aumenta, la densidad de partículas impactadas en el material disminuye y los impactos no son suficientes para penetrar el material.

Esto se observa en las gráficas de la figura 25:

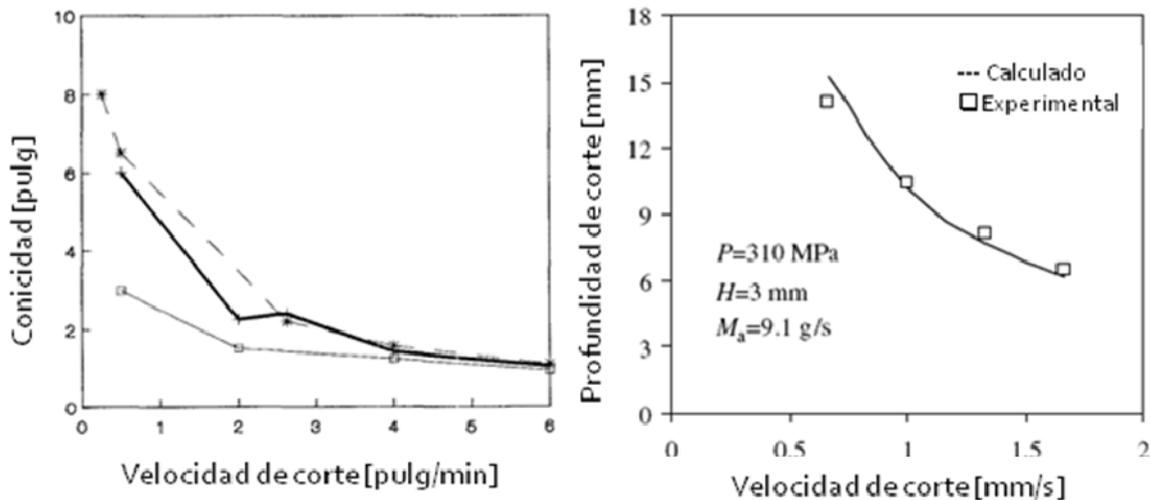


Figura 25. Ejemplo del efecto de la velocidad de corte en la profundidad. [17] [30]

Sin embargo, las bajas velocidades de corte afectan otras características del corte, como la calidad superficial del corte.

Al incrementarse la velocidad de corte se incrementa la rugosidad de la superficie. La razón de esta relación es que el incremento de la velocidad de corte causa que menos cantidad de partículas impacten en el mismo punto de la superficie, lo cual resulta en un aumento en la rugosidad. Se busca encontrar un equilibrio donde a determinada velocidad de corte se pueda alcanzar la máxima profundidad sin sacrificar la calidad de la superficie.

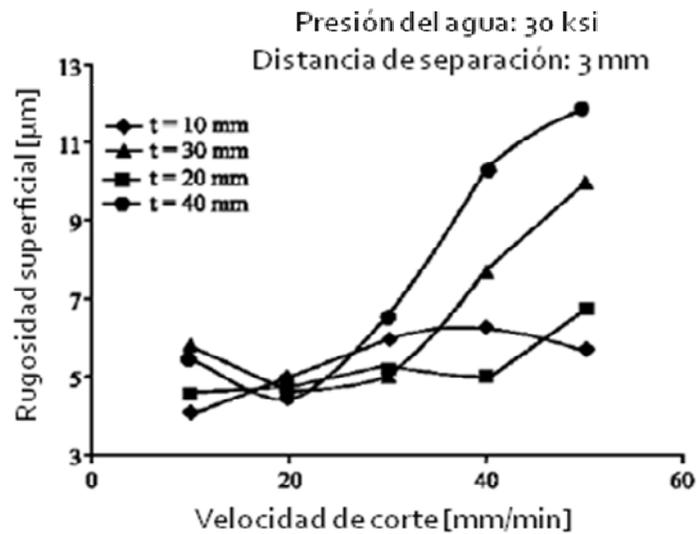


Figura 26. Ejemplo del efecto de la velocidad de corte en la rugosidad de la superficie. [29]

Así mismo, los estudios indican que cuando se incrementa la velocidad de corte también se incrementa la conicidad, como se muestra en la figura 27 [29].

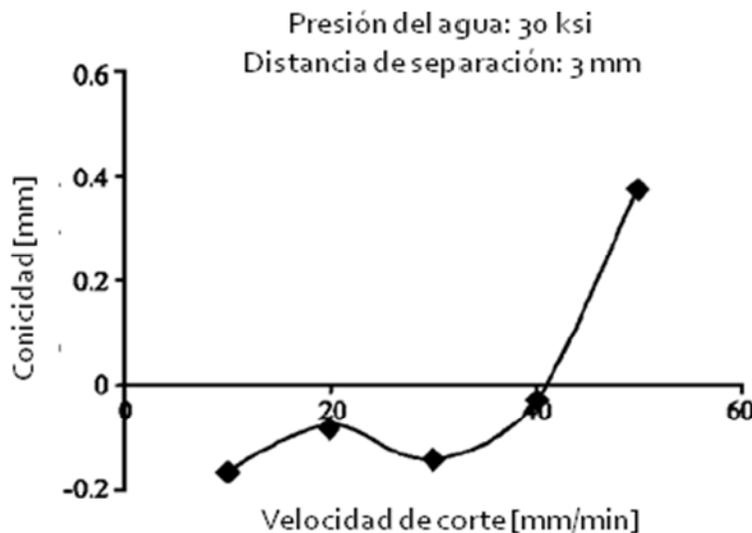


Figura 27. Ejemplo del efecto de velocidad de corte en la conicidad. [29]

3.3.5 Efectos del flujo másico de abrasivos

La relación que existe entre el flujo másico de abrasivos y la profundidad de corte es relativamente pequeña en comparación con la influencia que tiene la presión del agua y la velocidad de corte. La relación entre la profundidad de corte y el flujo de abrasivos es en un inicio lineal, sin embargo, se llega a un punto a partir del cual la profundidad de corte empieza a declinar. [16]

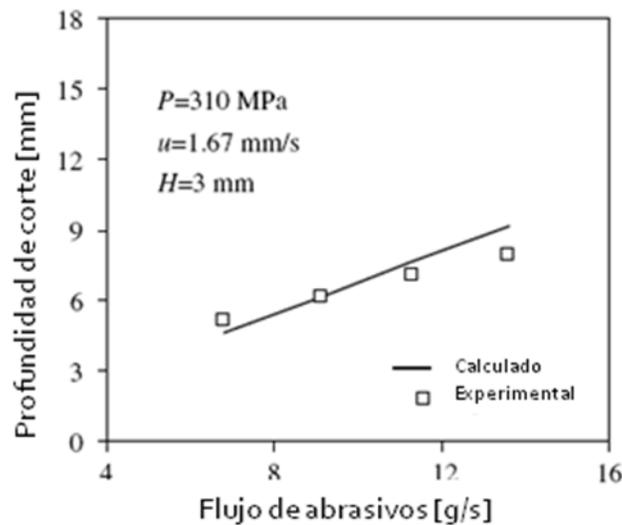


Figura 28. Ejemplo del efecto del flujo de abrasivos con la profundidad. [17]

Así mismo, muchos estudios indican que al aumentar el flujo de abrasivos se reduce la rugosidad de la superficie. Esto se atribuye a que aumenta la densidad de impactos en el mismo punto del material, lo que genera un mejor acabado. Conforme va aumentando la profundidad de corte, la influencia del flujo de abrasivos se va volviendo más significativa. [16]

En resumen:

La tabla 4 presenta un resumen de cómo interactúan entre sí los parámetros del corte por chorro de agua.

Tabla 4. Relación entre los parámetros del corte por chorro de agua

	Profundidad de corte	Rugosidad	Conicidad
Presión	<i>A mayor presión, mayor profundidad</i>	<i>A mayor presión, menor rugosidad</i>	<i>A mayor presión, mayor conicidad</i>
Velocidad de corte	<i>A mayor velocidad, menor profundidad</i>	<i>A mayor velocidad, mayor rugosidad</i>	<i>A mayor velocidad, mayor conicidad</i>
Distancia de separación	<i>A mayor distancia, menor profundidad</i>	<i>A mayor distancia, mayor rugosidad</i>	<i>A mayor distancia, mayor conicidad</i>
Flujo de abrasivos	<i>A mayor flujo, mayor profundidad</i>	<i>A mayor flujo, menor rugosidad</i>	<i>A mayor flujo, menor conicidad</i>

3.4 El corte por chorro de agua en la industria.

En la década de los años 70 se empezaron a utilizar máquinas de corte por chorro de agua en la industria para cortar principalmente cartón y materiales suaves, desde entonces, las aplicaciones se han ampliado a un sinnúmero de materiales y procesos, teniéndose que ajustar los parámetros del sistema a estas nuevas aplicaciones.

En la tabla 3 se muestran los parámetros con los que se trabaja comercialmente en el proceso de corte por chorro de agua sin abrasivos y con abrasivos. Estos parámetros se obtuvieron a partir de tablas de referencia proporcionadas comercialmente.

Tabla 5. Parámetros involucrados en el corte por chorro de agua

Parámetro	WJC sin abrasivos	WJC con abrasivos
Presión [MPa]	100 – 400	100 – 400
Diámetro del barreno de salida de la boquilla [mm]	0.1 – 0.4	0.25 – 0.65
Velocidad del hilo de agua [m/seg]	900	900
Velocidad de corte [mm/seg]	5 – 500	5 – 500
Separación entre la boquilla y la pieza de trabajo [mm]	3.2	0.8 – 1.6
Material de la boquilla	Zafiro, rubí	Diamante
Tipo de abrasivo		Óxido de aluminio, Dióxido de silicio, Granate
Tamaño de abrasivo		60 – 120
Flujo de abrasivos [kg/min]		0.23

3.5 El corte por chorro de agua en la micromecánica.

El comportamiento del corte por chorro de agua depende de muchos parámetros, los cuales varían según el tipo de WJC que se esté empleando. Algunos de estos factores son: la presión del agua, el diámetro del barreno de salida en la boquilla, la distancia de separación entre la boquilla y el material a cortar, el tamaño de partícula, el flujo de abrasivo y la velocidad de avance del corte.

Considerando la clasificación hecha por Kim [19], y según los estudios realizados en este trabajo, se considera al corte por chorro de agua como un proceso de adecuado para cortes a nivel milimétrico, ver figura 29.

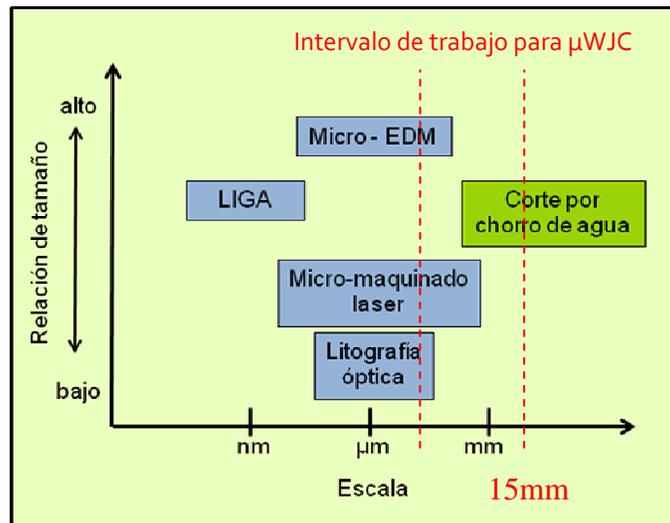


Figura 29. Comparación de los procesos de manufactura para micro y mini escala [18]

3.5.1 Desempeño del corte por WJC en la micromanufactura.

En la sección 1.2.1.4, se muestra la relación que existe entre el diámetro del barreno de la boquilla y el hilo de agua que se genera; así como entre la distancia que existe entre la boquilla y la pieza, y el corte que el hilo de agua produce.

3.5.1.1 Características del chorro de agua aplicado en microcorte por WJC.

Para micromecánica, es necesario obtener un chorro de agua coherente y delgado, con el fin de concentrar la mayor cantidad de energía posible en un

punto y cortar. Para ello es necesario emplear un barreno de pequeñas dimensiones, “capilar” de entrada recta, con el fin de que el flujo se separe de las paredes de entrada y se genere el fenómeno de cavitación, este efecto se puede observar en la figura 30. Una cavitación intensa es deseable en barrenos capilares cortos ya que esto ayuda a generar que el chorro de agua sea coherente. [28]

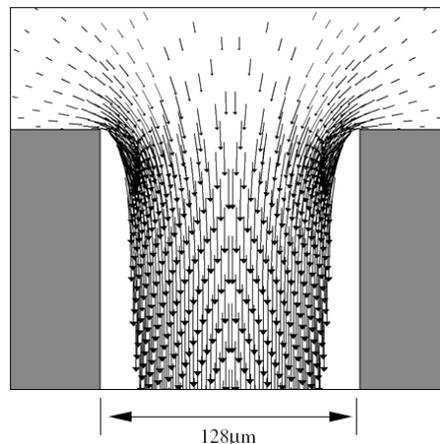


Figura 30. Simulación del chorro de agua que pasa por un barreno capilar corto con lo que se da lugar a la contracción del flujo. [28]

Para aprovechar al máximo la presión y la velocidad del chorro, los estudios indican que la distancia que recorra este no debe exceder las 125 veces el diámetro de la boquilla, pero debe ser mayor a 48 veces este diámetro para evitar que se dañe la boquilla.

Así mismo, cuando se busca aplicar el corte por chorro de agua en microcorte, la energía cinética que requieren las partículas de agua al impactarse para fracturar la pieza debe ser la óptima, es decir, se buscará que la proporción diámetro/largo de la boquilla sea grande.

3.5.1.2 Profundidad de corte.

Las piezas empleadas en micromecánica van de los micrómetros a unos cuantos milímetros; por lo que la profundidad de corte buscada no excede dichas dimensiones.

La profundidad de corte se incrementa linealmente conforme se va aumentando la presión del agua una vez que se ha superado la presión crítica (P_c). Como dicha

presión depende de las propiedades de esfuerzo de fractura del material, la P_c no se ve afectada por el tamaño de la pieza a cortar.

El tamaño del barreno de la boquilla también afecta la presión del corte. Para el corte a nivel micrométrico, es posible ocupar barrenos de hasta 0.4 mm de diámetro, generando un ancho de corte de hasta 1.5 veces el diámetro del barreno empleado [2]. Sin embargo, conforme el diámetro de chorro disminuye, la presión necesaria para generarlo se incrementa, haciendo que sea necesario encontrar el equilibrio entre estos parámetros.

A partir de los estudios realizados en la sección 3.3.2 y por J. Wang [17], se concluye que la presión empleada para microcorte estaría entre los 50 y los 250 [MPa], ver figura 31.



Figura 31. Ejemplo del efecto de la presión en la profundidad de corte (extrapolación a la micromecánica).

En la sección 3.4.4 se muestra la relación que existe entre la profundidad de corte y la velocidad de corte, la cual indica que a mayor velocidad, la profundidad del corte y el acabado superficial del área de corte disminuye [11]. La figura 32 muestra esta relación. Sin embargo, se tiene reportado que para cortes de dimensiones milimétricas la velocidad decrece significativamente a unos 0.25 [mm/s]. Esto es con el fin de no afectar la calidad superficial de la pieza.

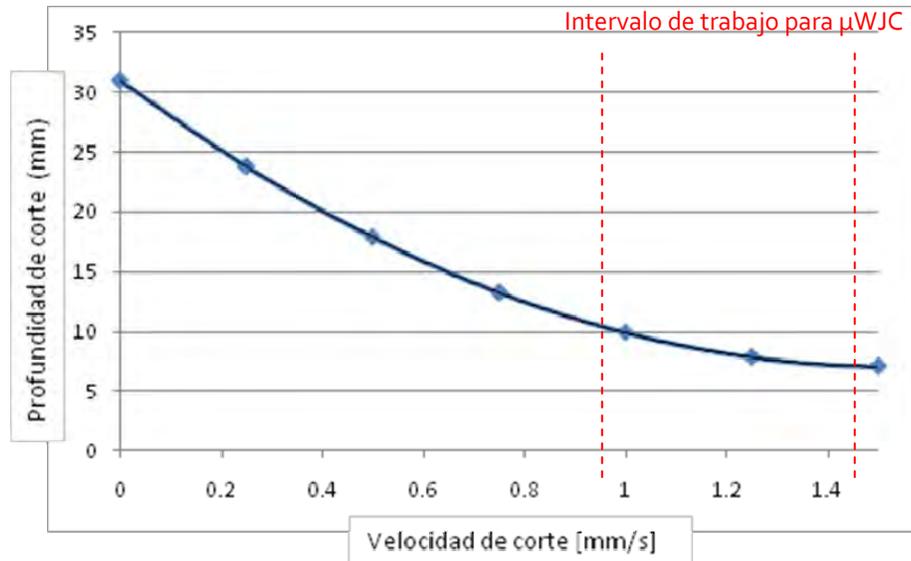


Figura 32. Relación entre velocidad de corte y profundidad de corte [18].
(extrapolación a la micromecánica).

En general, se busca que la distancia de separación entre la abertura la boquilla y la superficie de trabajo sea pequeña, para reducir la dispersión de la corriente del fluido antes de que golpee la superficie. La figura 33 muestra la distancia de separación adecuada para el microcorte por WJC.

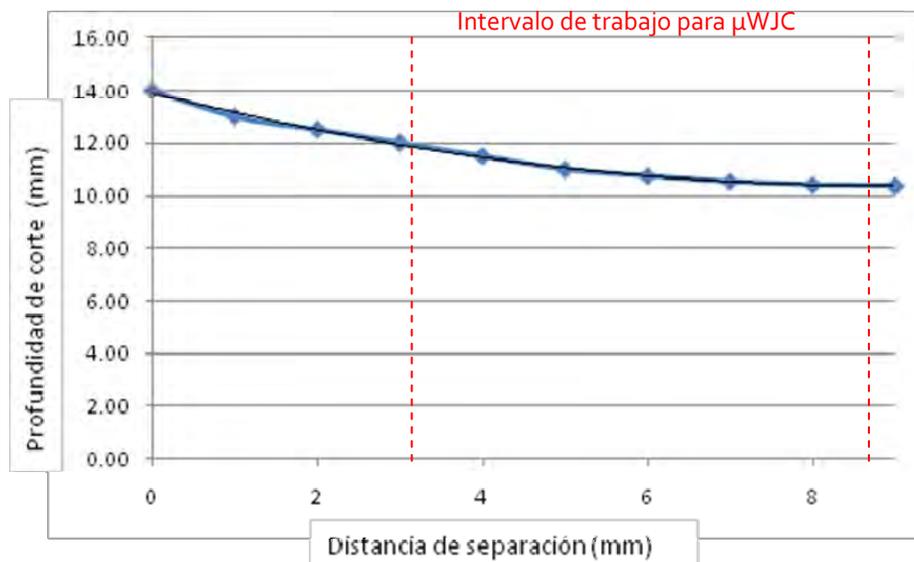


Figura 33. Ejemplo del efecto de la distancia de separación en la profundidad de corte.
(extrapolación a la micromecánica).

No existe una definición clara del tamaño de partícula de abrasivo que genere cortes más profundos para un material dado, pero para microcorte, el tamaño de la partícula determinará la dimensión mínima de corte.

Para realizar microcortes, D.S. Miller (2004) generó un hilo de agua de 50 [μm] de diámetro con partículas de óxido de aluminio, cuyo tamaño va desde 0.05 a 0.3 [μm], con lo que se puede realizar un corte de 75 [μm] en una placa con espesor máximo de 9 [mm]. [2]

3.5.1.3 Características de la superficie de corte.

Para microcorte, las características de la superficie de corte son importantes, ya que se busca que no sea necesario otro proceso para darle un acabado adecuado a la pieza.

Debido a que la influencia de la presión del agua en la calidad superficial del corte se incrementa conforme la profundidad de corte aumenta, para el microcorte, esta presión no debe elevarse demasiado para obtener buenos resultados.

Como se puede observar en la figura 34, al igual que a nivel macro, en microcorte, el incremento de la distancia entre la boquilla y el material de corte resulta en un incremento en la rugosidad de la superficie.

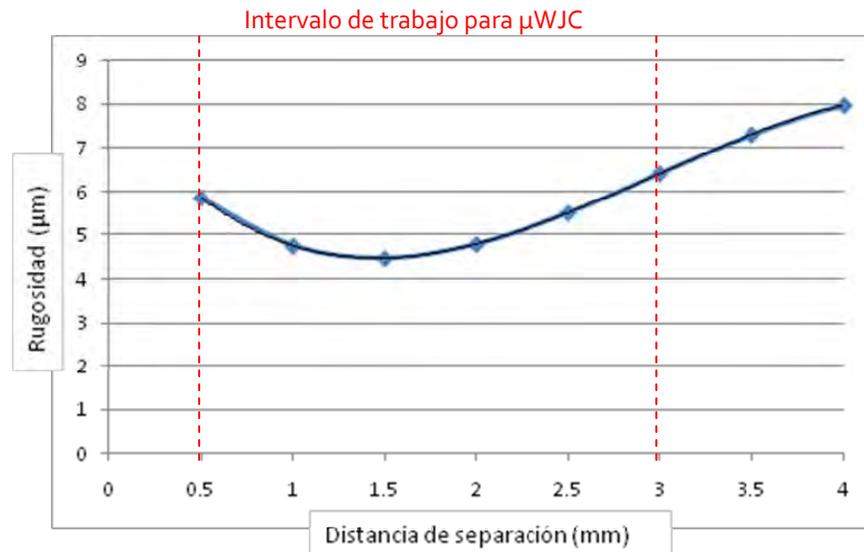


Figura 34. Ejemplo del efecto de la distancia de separación en la rugosidad de la superficie. (extrapolación a la micromecánica).

Al aumentar el flujo de abrasivos se reduce la rugosidad de la superficie; sin embargo, al igual que con la presión del agua, conforme va aumentando la profundidad de corte, la influencia del flujo de abrasivos se va volviendo más importante, por lo que en microcorte, el flujo no debe elevarse demasiado para obtener buenos resultados.

3.5.1.4 Geometría Kerf.

En general, la conicidad en los cortes está muy influenciada por la profundidad de corte. Cuando la pieza a cortar es ancha, la conicidad se hace más notoria; sin embargo, para microcorte, la conicidad no es tan evidente.

Los efectos en la conicidad debido a la presión del agua, a la velocidad de corte, a la distancia entre la boquilla y el material de corte, así como los del flujo de abrasivos son los mismos que se presentan a nivel macro; sin embargo, como la pérdida de energía de corte es la principal responsable de la conicidad y esta pérdida aumenta conforme se incrementa la profundidad de corte, la pérdida no es significativa cuando se trata de cortes de bajas dimensiones.

3.5.2 ¿Cómo obtener los parámetros del WJC para una aplicación en micromanufactura?

Empleando las ecuaciones que describen los mecanismos de remoción de material, es posible determinar los parámetros de operación necesarios de un sistema de corte por chorro de agua. Como ejemplo, se aplicarán dichas ecuaciones a un caso de estudio que considera un elemento de acero inoxidable 316L de 1.2 [mm] y un proceso de remoción de material sin abrasivos. La selección de este material obedece a que cumple con las características de ser un material de alta dureza y de estar a disposición en el laboratorio.

Las propiedades del Acero Inoxidable 316L son [21]:

Tabla 6. Tabla de propiedades del Acero Inoxidable 316L.

Propiedades	
Densidad	8.00 g/cc
Dureza Rockwell B	79
Esfuerzo último de tensión	560 MPa
Esfuerzo cedencia a tensión	290 MPa
Elongación al corte	50.0%
Modulo de elasticidad	193 GPa
Impacto Charpy	103 J
Impacto Izod	150 J

3.5.2.1 Mecanismo de remoción de material.

Considerando la teoría de Evans *et al* [38] y Momber [22], la masa removida por el chorro de agua es linealmente proporcional a la energía cinética del chorro de agua que impacta en ella. La energía necesaria para remover por impacto una determinada masa (G_F) está dada por la Ec. (1):

$$G_F = \frac{L_C \sigma_T^2}{E_M} \quad (1)$$

En donde se relaciona el Módulo de Young (E_M), el Esfuerzo de Cedencia (σ_T) del material y el largo de la fractura (profundidad de corte) (L_C). Sustituyendo valores en la Ec. (1):

$$G_F = \frac{(0.0012[m])(560 \times 10^6 [Pa])^2}{(193 \times 10^9 [Pa])}$$

Para el caso de estudio, la energía G_F necesaria es de 860×10^{-6} [J].

Por otro lado, la energía cinética del chorro de agua (E_j) está dada por la Ec. (2) [25]:

$$E_j = \frac{m_w}{2} V_j^2 \quad (2)$$

donde V_j es la velocidad del chorro de agua y la masa de agua (m_w) está dada por la Ec. (3):

$$m_w = \dot{m}_w t_E \alpha \quad (3)$$

donde, t_E el tiempo de exposición de la muestra y α es un factor del agua que impacta. Se considera un $\alpha=0.5$, ya que no toda el agua que se inyecta, impacta en la superficie de la pieza con la misma energía cinética. La masa de agua m_w utilizada en este caso, se obtiene considerando la Ec. (4):

$$\dot{m}_w = A \rho_w V_j \quad (4)$$

Donde A es el área del barreno de salida, ρ_w es la densidad del agua y V_j es la velocidad de salida del chorro de agua.

Sustituyendo las Ec. (3) y (4) en la Ec. (3), la energía cinética del chorro de agua se obtiene con:

$$E_j = \frac{1}{2} A \rho_w t_E V_j^3 \quad (5)$$

Así mismo, la energía cinética del chorro de agua ocupada para cortar el material se divide en dos: la energía cinética del chorro después de salir de la pieza (E_{EX}) y la energía disipada por las partículas de material removidas (E_{DISS})[25], ver Ec. (6).

$$E_j = E_{DISS} + E_{EX} \quad (6)$$

Donde se consideró que:

$$E_{DISS} = G_F \quad (7)$$

$$E_{EX} = \frac{m_M}{2} V_M^2 \quad (8)$$

Considerando que la masa de las partículas desplazadas (m_M) es mucho menor que la masa del chorro de agua (m_w), su velocidad es igual a la velocidad de las partículas de agua que impactan con ellas.

$$\begin{aligned} m_M &\ll m_w \\ \therefore V_M &= V_j \end{aligned} \quad (9)$$

Sustituyendo la Ec. (7) y (8) en la Ec. (6):

$$E_j = G_F + \frac{m_w}{2} V_j^2 \quad (10)$$

igualándola a la Ec. (5):

$$\frac{1}{2} A \rho_w t_E V_j^3 = G_F + \frac{m_w}{2} V_j^2 \quad (11)$$

Se despeja V_j y sustituyendo la densidad del agua ($\rho_w=999 \text{ [kg/m}^3\text{]}$) y el área del barreno de salida utilizado en este caso ($A=125 \times 10^{-9} \text{ [m}^2\text{]}$), se determinó que la velocidad necesaria del chorro de agua para obtener la energía de corte del material es de 340[m/s].

De la Ecuación de Bernoulli se obtuvo la Ec. (12), con la que se obtiene la presión que se requiere tener dentro del pistón para generar dicha velocidad [25]:

$$P = \frac{\rho_w}{2} V_j^2 \quad (12)$$

Sustituyendo la densidad del agua y la velocidad obtenida ($340[m/s]$), se obtuvo que la presión necesaria dentro del pistón es de 60 [MPa]. Este valor está dentro de los rangos especificados en la sección 3.5.1.2.

En la tabla 6, se presentan los parámetros bajo los cuales se trabajará en este proyecto y con ellos se propone el diseño de un banco de pruebas, que tenga la capacidad de generar dichos valores. El objeto principal del desarrollo de este banco obedece a la necesidad de verificar que dichos datos son correctos para el corte del material seleccionado y que es viable el desarrollo de un sistema con dichas características.

Tabla 6. Parámetros involucrados en los procesos de Microcorte con WJC sin abrasivos.

Parámetro	WJC sin abrasivos para microcorte
<i>Presión [MPa]</i>	60
<i>Diámetro de abertura de la boquilla [mm]</i>	0.1 – 0.4
<i>Velocidad del hilo de agua [m/seg]</i>	340
<i>Separación entre la boquilla y la pieza de trabajo [mm]</i>	5



CAPÍTULO 4

4. Desarrollo de un banco de pruebas.

Para validar los resultados mostrados en la tabla 6, se propuso el diseño de un banco de pruebas. Dado que se aprecia que la presión de agua empleada en el proceso de WJC es independiente a los demás parámetros del proceso, como son la separación entre la boquilla y la pieza a cortar, las velocidades de avance, el diámetro del orificio de salida de la boquilla o el uso de abrasivos, se inicia este diseño con el dato de 60 [MPa].

4.1 Propuesta de un sistema intensificador de presión para microcorte con WJC.

Bomba. Un equipo de bombeo es un transformador de energía. Recibe energía mecánica, de un motor eléctrico, térmico, etc., y la convierte en energía que el fluido adquiere en forma de presión, de posición o de velocidad [23] [24].

Lo primero es determinar qué tipo de bomba es la que nos permitiría cumplir con nuestro objetivo: Generar un chorro de agua a 60 [MPa] de presión.

Los factores principales para determinar qué tipo de bomba emplear son: presión, gasto y las siguientes características del líquido:

- a) pH
- b) Condiciones de viscosidad
- c) Temperatura
- d) Presión de vaporización del líquido a temperatura de bombeo
- e) Densidad
- f) Materiales en suspensión, tamaño, naturaleza, etc.
- g) Condiciones de abrasión
- h) Contenido de impurezas

Así, dependiendo de condiciones de operación se aplica el tipo de bomba:

- Bombas de desplazamiento positivo reciprocantes son aplicables para:
 - Gastos pequeños
 - Presiones altas
 - Líquidos limpios
- Bombas de desplazamiento positivo rotatorias son aplicables para:
 - Gastos pequeños y medianos
 - Presiones altas
 - Líquidos viscosos
- Bombas dinámicas son aplicables para:
 - Gastos grandes
 - Presiones reducidas o medianas
 - Líquidos de no viscosos

En la figura 35 se presenta una tabla con los tipos de bombas. Clasificación de los sistemas de bombeo según el “Hydraulic Institute”. [23]

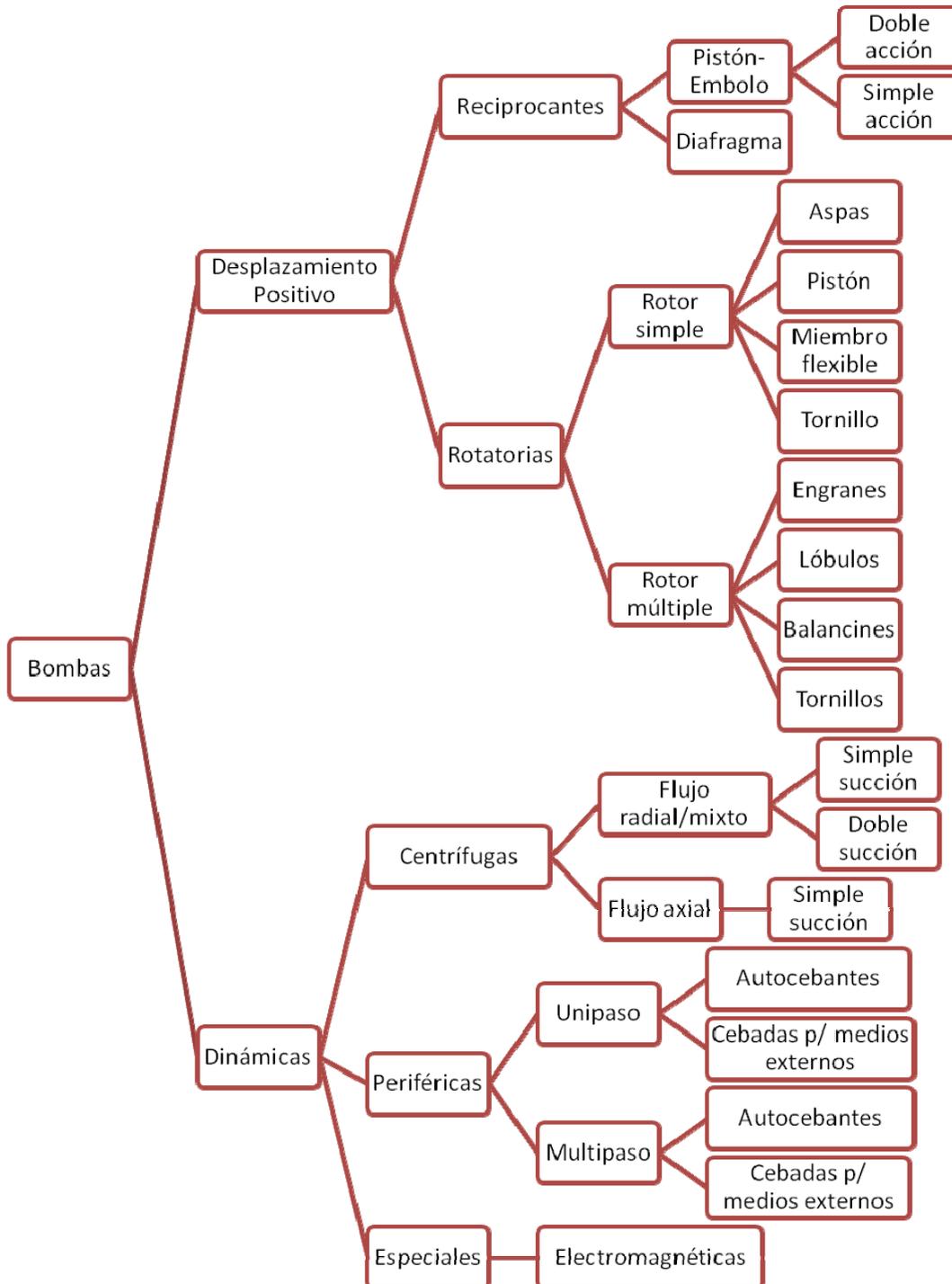


Figura 35. Clasificación de los sistemas de bombeo [23].

Debido a que el gasto para este proyecto es pequeño, y la presión necesaria es alta, se optó por emplear una bomba de desplazamiento positivo.

4.1.1 Principio de desplazamiento positivo [23] [24].

Consiste en el movimiento de un fluido causado por la disminución del volumen de una cámara. Por tanto, en una máquina de desplazamiento positivo, el elemento que origina el intercambio de energía no necesariamente tiene movimiento alternativo (émbolo), sino que puede tener un movimiento rotatorio (rotor). Sin embargo, en estas máquinas, tanto reciprocantes como rotatorias, siempre hay una cámara que aumenta de volumen (succión) y disminuye de volumen (impulsión). Por ello estas máquinas también son llamadas volumétricas.

Se optó por las bombas reciprocantes, debido a que el uso de las rotatorias está especificado para líquidos viscosos. Con base en la figura 35, se tiene la siguiente clasificación de las bombas de desplazamiento positivo reciprocantes.

Bombas Reciprocantes:

- Membrana o diafragma
- Pistón-Embolo
 - Doble acción
 - Simple
 - Dobles
 - Simple/doble acción
 - Simple
 - Doble
 - Triple
 - Múltiple

Para este trabajo se analizó la posibilidad de emplear tanto una bomba de membrana como una bomba pistón-embolo para generar los 60 [MPa] necesarios.

4.1.2 Bomba de membrana.

Como primera propuesta se analizó el diseño de una bomba recíprocante de membrana. Este tipo de bomba posee la ventaja de no necesitar cierres mecánicos o empaques, que son las principales causas de fallas; otra ventaja es que este tipo de bombas son autocebantes y la velocidad de las mismas es controlada por la velocidad del motor, que es el que mueve el embolo para hacer funcionar la membrana.

Las membranas pueden ser de materiales como neopreno, hule, acero inoxidable, aluminio, nickel, inconel®, monel®, etc.

Se propuso el diseño de una bomba que nos permitiera desplazar 2 [lpm], esto se lograría con una cavidad de 80 [mm] de diámetro y una deformación de la membrana de 1 [mm] a 1000 [rpm]. Se decidió emplear aluminio 6061 T4, ya que es un material que presenta buenos resultados en el maquinado y buena resistencia a la corrosión. Además, se contaba con este material en el laboratorio, con lo que en caso de ser viable la propuesta, se podrían realizar pruebas con prontitud. En la figura 36 se presenta este diseño de la bomba.

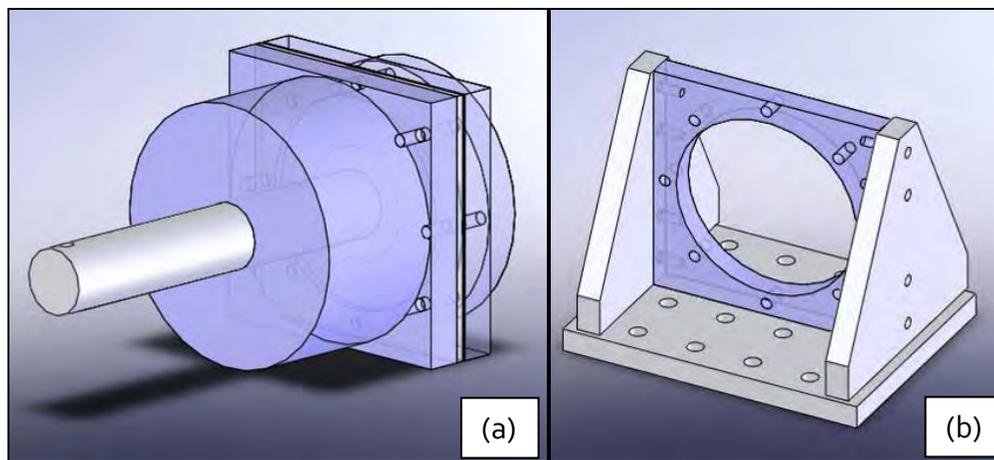


Figura 36. (a) Diseño de la bomba de membrana, (b) Soporte de la bomba de membrana, (c) Relación entre el radio de la membrana y la deformación necesaria para cumplir con el gasto.

Como parte del diseño, se realizaron simulaciones por elemento finito ocupando el software Algor® para evaluar la resistencia del material de la membrana a la

presión de 60 [MPa] y a la deformación dada. En la figura 37 se presentan algunos resultados del análisis de la membrana propuesta para este diseño.

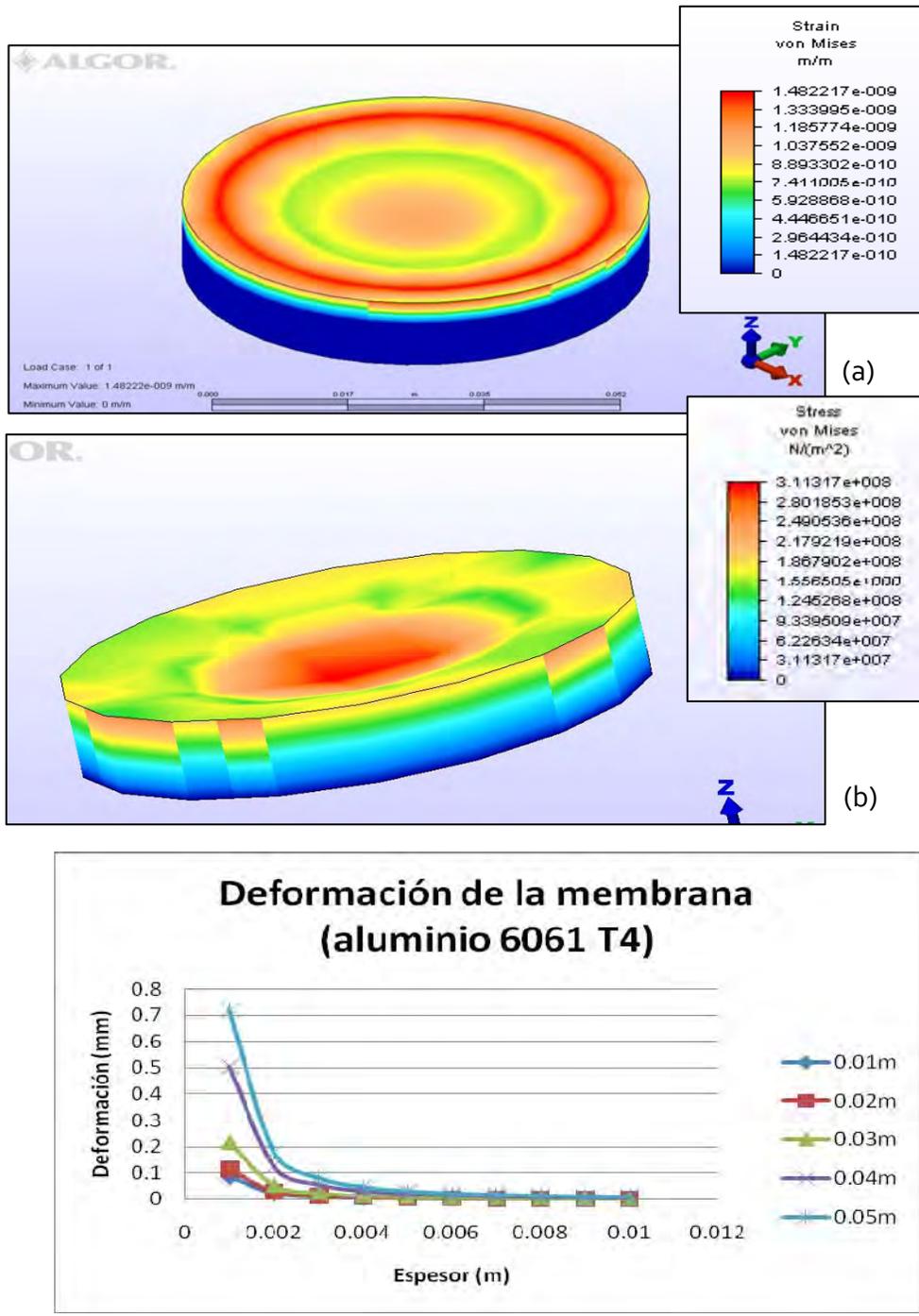


Figura 37. Resultados obtenidos del análisis ocupando Algor®, (a) Deformación de la membrana a 60MPa. (b) Distribución del esfuerzo aplicado sobre la membrana, (c) Deformación de la membrana al modificar el diámetro y el espesor de la misma.

Según los resultados del análisis para una membrana de aluminio, el espesor adecuado para soportar la presión requerida es de 25 [mm], y la fuerza necesaria para deformarlo excede los 300 [kN].

Lo anterior muestra algunas dificultades a las que nos tendríamos que enfrentar al desarrollar este tipo de bomba, ya que la presión con la que se trabaja está muy por arriba de lo que soportan los materiales para las membranas con los que se cuenta en el laboratorio, y la fuerza necesaria para deformar una membrana con las características adecuadas es muy elevada.

4.1.3 Bomba de pistón.

Como segunda propuesta, se analizó y se realizó el diseño de una bomba de pistones axiales. Las bombas de émbolo tienen la ventaja de una mayor eficiencia y de tener una mayor altura de aspiración [24].

4.1.3.1 Cálculos realizados para el diseño de la bomba de pistón [24].

En una bomba de pistón, el gasto depende del área, el desplazamiento y de la velocidad del émbolo.

Gasto teórico para una bomba de pistón axial, Ec (13):

$$Q_T = \frac{\pi}{4} D^2 \frac{N}{60} (D_{leva} \tan \theta) \left[\frac{mm^3}{s} \right] \quad (13)$$

donde:

D: diámetro del émbolo [mm]

N: velocidad del cigüeñal en [rpm]

D_{leva} : diámetro de la leva axial [m]

θ : ángulo de inclinación de la leva [°]

Dado que el gasto considerado es de 2 [lpm], se obtuvo el volumen del líquido que se debe desplazar en cada revolución, lo cual está en función de la velocidad del motor.

$$v = \frac{\pi}{4} D^2 (D_{leva} \tan \theta) [mm^3] \quad (14)$$

donde v es el volumen desplazado en cada carrera.

La potencia transmitida al líquido depende del gasto, del desplazamiento y de la velocidad del émbolo, así como de la fuerza aplicada al mismo, dicha fuerza depende, a su vez, de su área transversal.

Para incrementar esta fuerza y cumplir con las características de funcionamiento de una bomba de pistones, se consideró necesario implementar una reducción mecánica 25:1, con el fin de disminuir la velocidad e incrementar la fuerza que se aplica al pistón, que es de 7.5[kN].

Dicha fuerza depende del área del émbolo, sabiendo que a menor área, la fuerza que se necesita aplicar disminuye, ver Ec. (15) [34].

$$P = \frac{F}{A} \text{ [Pa]} \quad (15)$$

Se elaboró una hoja de cálculo que para determinar las dimensiones de la bomba (ver figuras 38 y 39), en esta tabla se incluyen las características del motor empleado, el gasto y la presión necesaria.

Características		B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Características del motor	Características del Motor	60.0	Hz									
		120.0	V									
		60.0	rpm	6.2831853	rad/s							
Gasto	Qnecesario	0.050	gpm	0.189	lpm	0.001	lps	3153.583	mm ³ /s	189220.298	mm ³ /min	
Presión	Presión	600.0	bar	8700.000	PSI	60000000.0	Pa					
	Pot motor	1.0	HP	745.700	Watt							

Figura 38. a) Cálculos de bomba, datos de entrada: Motor, gasto y presión.

Utilizando las Ec. (13) y (14) se colocaron las dimensiones del cilindro a emplear, con el fin de obtener el gasto requerido, y el volumen desplazado en cada revolución.

Vol. desplazado por revolución	VolDespl	0.001	gal/rev	0.003	l/rev	3153.672	mm ³ /rev
Características del cilindro		l	r	r2	# Cil	Vol p/Cil	
	Cilindro	24.895	6.35	40.323	1	3153.672	mm ³
	Cilindro	12.448	6.35	40.323	2	1576.836	mm ³

Figura 38. b) Cálculos de bomba, datos de entrada: radio del cilindro y vol. desplazado por rev.

A partir de los datos introducidos en la tabla, se obtuvo la fuerza que se debe ejercer sobre el pistón, Ec. (15), y torque que debe tener el elemento actuador, para este caso una leva axial. Así mismo se obtuvo la energía transmitida al líquido.

Fuerza y torque obtenido	Vel Piston	24.895	mm/s	0.025	m/s				
	Torque	118.682	Nm			ω	61.4656	rad/s	
Energía transmitida al líquido	F	7600.612	N			Torque	36.423	Nm	
	d	0.016	m	15.875	mm	F	7600.612	N	
	Pot hidraulica	180.215	Watt	0.2537415	HP	d	0.005	m	4.792

Figura 38. c) Cálculos de bomba, resultados obtenidos: Fuerza, torque y energía del fluido.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Características del motor	Características del Motor	60.0	Hz								
		120.0	V								
		60.0	rpm	6.2831853	rad/s						
Gasto	Qnecesario	0.050	gpm	0.589	lpm	0.003	ips	3151.543	mm ³ /s	18920.296	mm ³ /rev
Presión	Presión	600.0	bar	8700.000	PSI	60000000.0	Pa				
	Pot motor	1.0	HP	745.700	Watt						
Vol. desplazado por revolución	VolDesplz	0.001	gal/rev	00.003	l/rev	31533072	mm ³ /rev				
Características del cilindro			r	r2	# Cil		Volp/Cil				
	Vcilindro	24.895	6.35	40.323	1		3253.672	mm ³			
	Vcilindro	12.448	6.35	40.323	2		1575.836	mm ³			
Fuerza y torque obtenido	Area	126.677	mm ²								
	Vel Piston	24.895	mm/s	0.025	m/s						
Energía transmitida al líquido	Torque	118.682	Nm								
	F	7600.612	N								
	d	0.016	m	15.825	mm						
	Pot hidraulica	189.215	Watt	0.2537415	HP						

Figura 29. Cálculo de la bomba

Se propone construir la bomba en latón, debido a sus propiedades físicas, características de maquinado y su resistencia a la corrosión.

Propiedades del latón [21]:

Tabla 8. Propiedades del latón.

Propiedades	
Densidad	8.75 g/cc
Dureza Rockwell B	56
Esfuerzo último de tensión	270 MPa
Esfuerzo cedencia a tensión	69 MPa
Elongación al corte	48.0%
Modulo de elasticidad	115 GPa
Impacto Charpy	69 J
Impacto Izod	43 J
Maquinabilidad	30%

Las paredes del cilindro deben tener al menos 3[mm] de espesor para soportar la presión del fluido. Este espesor depende del esfuerzo de cedencia del material (debe soportar 1.5 veces la presión máxima) y está regido por la norma NRF-028 de Pemex [26] para tanques a alta presión.

La bomba consta de un cilindro que desplaza un volumen de 1646 [mm³/rev]. Por lo que la cámara tendrá 12.7 [mm] de diámetro y 13 [mm] de carrera.

Considerando las condiciones de trabajo del sistema y las herramientas necesarias para la manufactura de las piezas, se decidió que el diámetro del seguidor será de 9.5 [mm].

Al igual que en la propuesta anterior, se utilizó el *software* Algor® para verificar que los elementos empleados soportan las cargas a las que estarán sometidos (Presión de 60 [MPa] y fuerza de 7.5 [kN]).

4.2 Conceptualización del banco de pruebas.

Una vez determinada la bomba a emplear, se buscó una configuración adecuada del banco de pruebas con el fin de generar un chorro de agua con las características establecidas y con ello visualizar el proceso de WJC aplicado a microcorte.

Para este diseño se propone el uso de un motor de 745 [W] (1 [Hp]) montado sobre una estructura metálica de PTR de 25.4 [mm] (1 [pulg]); el sistema está basado en un mecanismo de accionamiento del pistón (leva y seguidor axial), e incorpora una bomba de baja presión para el llenado continuo del cilindro.



Figura 40. Motor de 1 [Hp]

El diámetro de salida del chorro de agua será de 0.1 [mm], y se colocará a una altura de 5 [mm] sobre la pieza de trabajo. En la parte inferior se tendrá una tina de drenado que reciba el agua ocupada durante el corte.

En la figura 41 se muestra el diseño del sistema propuesto.

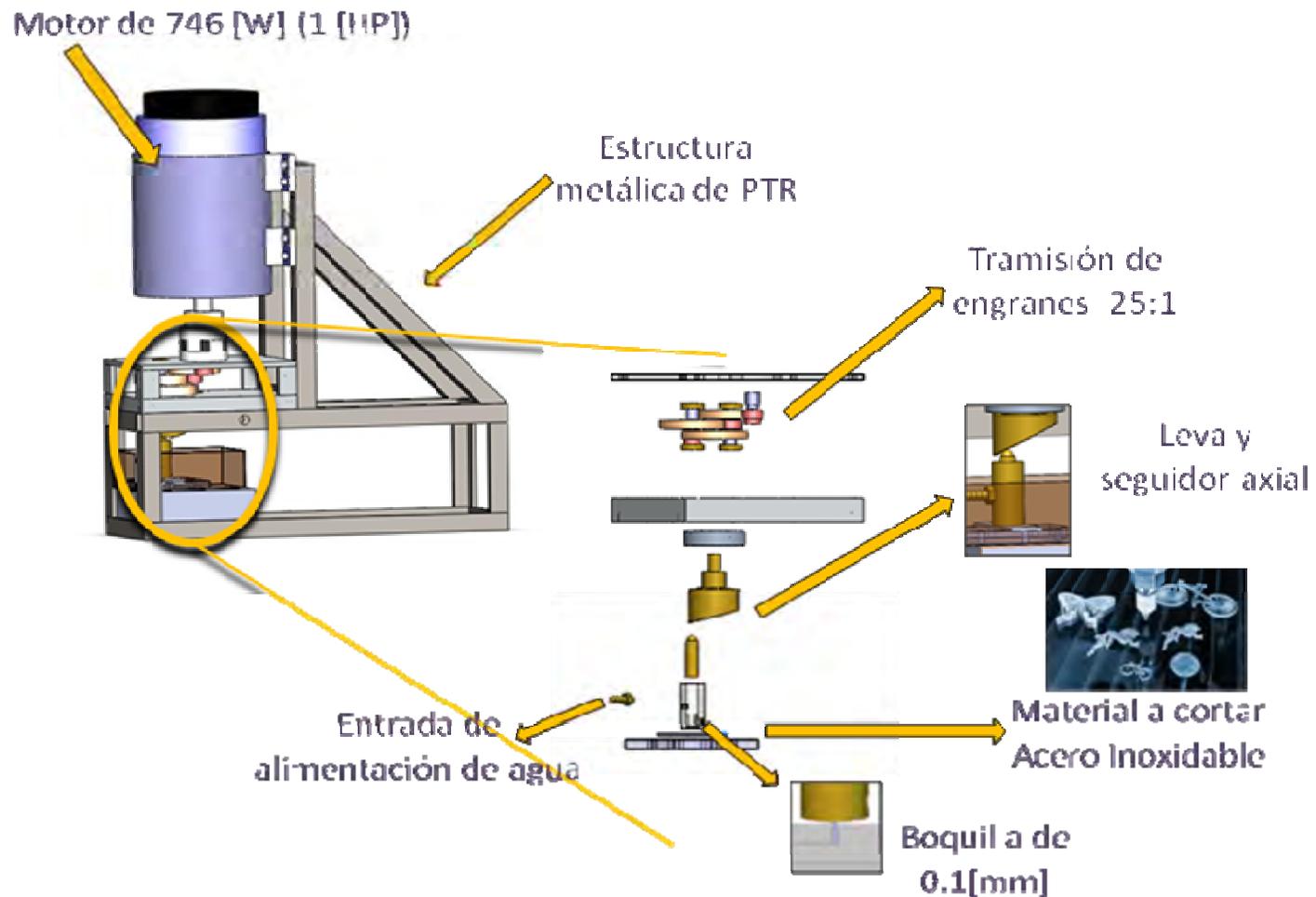


Figura 41. Diseño del banco de pruebas para el Corte por Chorro de Agua.

4.3 Diseño de detalle y manufactura.

Una vez que se tiene el diseño del sistema, lo siguiente es realizar el diseño de detalle, evaluar el comportamiento de los elementos propuestos, la caracterización de los mismos y la manufactura del prototipo.

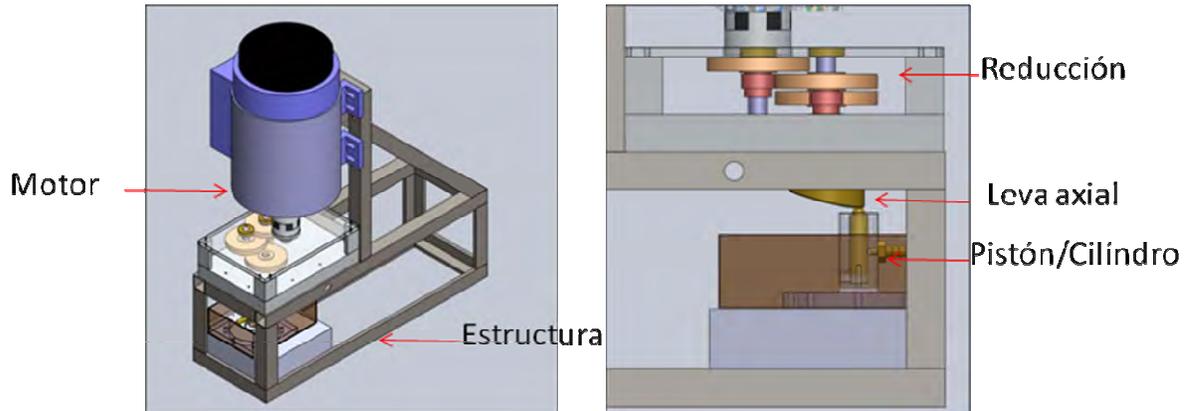


Figura 42. Partes del sistema a construir.

4.3.1 Estructura metálica.

La estructura se fabricó con PTR de 25.4 [mm] (1 [pulg]), el cual se cortó y soldó con el fin de que el sistema tuviera el soporte adecuado.

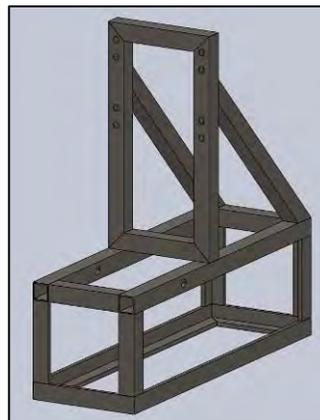


Figura 43. Estructura del sistema.

Antes de fabricar la estructura, se utilizó el *software* SolidWorks® para verificar que fuera estable. La figura 44 muestra el donde se encuentra ubicado el centro de masa tanto de la estructura sola, como del sistema completo. Se puede observa que el centro de masa está colocado al centro de la estructura con lo que

se puede asegurar que el sistema no volcará bajo condiciones de trabajo normales.

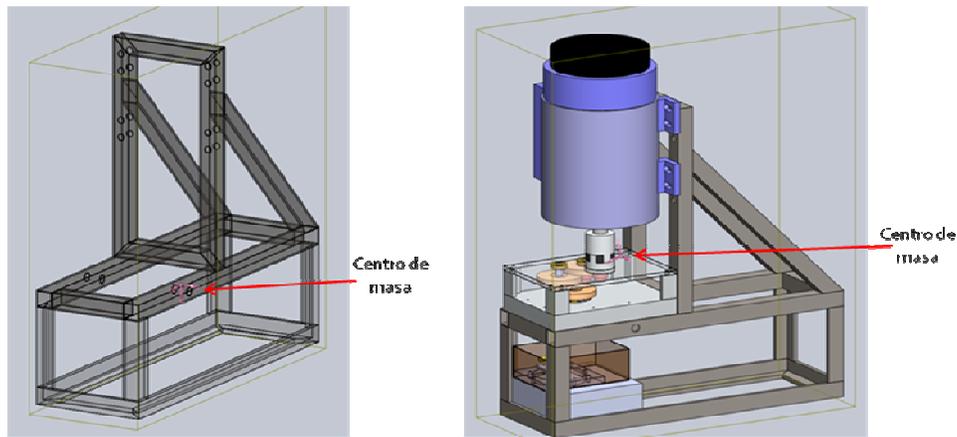


Figura 44. Centro de masa de la estructura.

Como resultado se obtuvo una estructura metálica fabricada en PTR de 25.4 [mm] (1 [pulg]), la cual es estable y soporta las cargas de trabajo a las que está sometida. La figura 45 muestra esta estructura.



Figura 45. Estructura del sistema.

4.3.2 Transmisión.

Para obtener la fuerza necesaria en el sistema, se requiere una transmisión 25:1, por lo que la transmisión construida es un arreglo de tres pares de engranes: tres engranes de 48 dientes y diámetro de paso de 67.73 [mm], y tres de 16 dientes y diámetro de paso de 25.4 [mm], obteniendo así una transmisión de 27:1. Estos engranes se fabricaron a partir de dos barras de acero ANSI 1020 (una de 25.4

[mm] y otra de 76.2 [mm]). La figura 46 muestra como se realizó la fabricación y los engranes obtenidos.

Con esta transmisión, la velocidad nominal del motor de 1711 [rpm], se reduce a 63.37 [rpm], y el torque aumenta de 4.16 [Nm] a 112.32 [Nm]. Estos resultados son adecuados para este trabajo, donde se desea una velocidad de 60 [rpm] y un torque superior a las 105 [Nm] (Estos valores se obtuvieron empleando la tabla de cálculo de la figura 39).

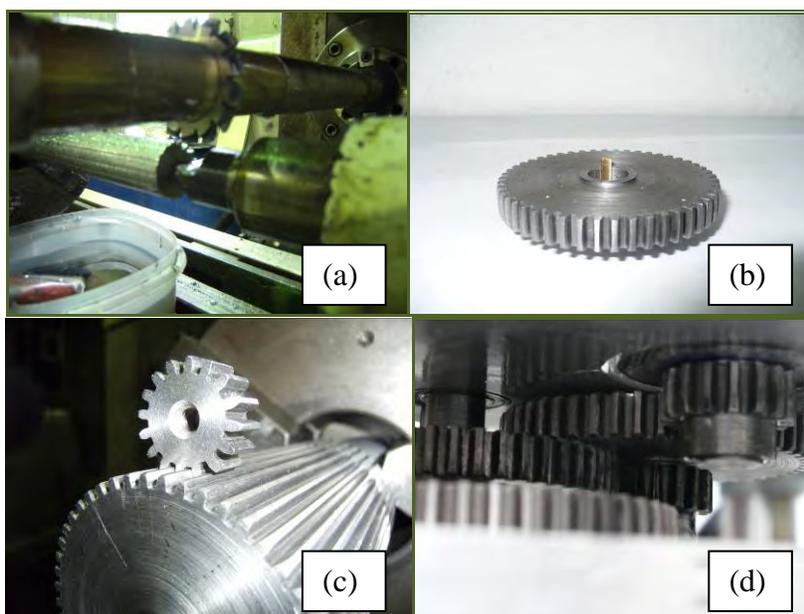


Figura 46. (a) Construcción de los engranes, (b) Engrane, (c) Verificación del engranaje, (d) Transmisión armada.

Fue necesario asegurarse de que el engranaje fuera correcto, y se utilizó una mezcla de grasa y polvo de abrasivo para que los dientes se acoplaran entre sí. Para ello se dejó la transmisión en funcionamiento por 3 [h] hasta que el movimiento fue suave y el ruido se redujo.

Como resultado se obtuvo un arreglo 27:1 de 6 engranes que embonan correctamente, trabajan a 63.37 [rpm], transmiten un torque de 112.32 [Nm] y el ruido de trabajo es relativamente bajo. En la figura 47 muestra el ensamble final de los engranes.



Figura 47. Ensamble de los engranes.

4.3.3 Leva.

Se decidió emplear una leva axial para transmitir la fuerza de motor a los pistones. Esta leva debe de tener un ángulo de inclinación menor a $28 [^\circ]$ con el fin de que las características de velocidad, aceleración y $jerk^7$ sean las adecuadas.

Para el diseño de la leva, se realizó una simulación del movimiento ocupando el *software* VisualNastran®.

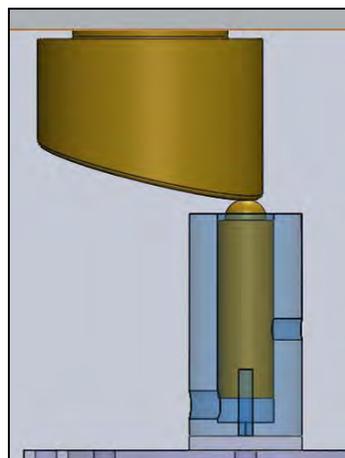
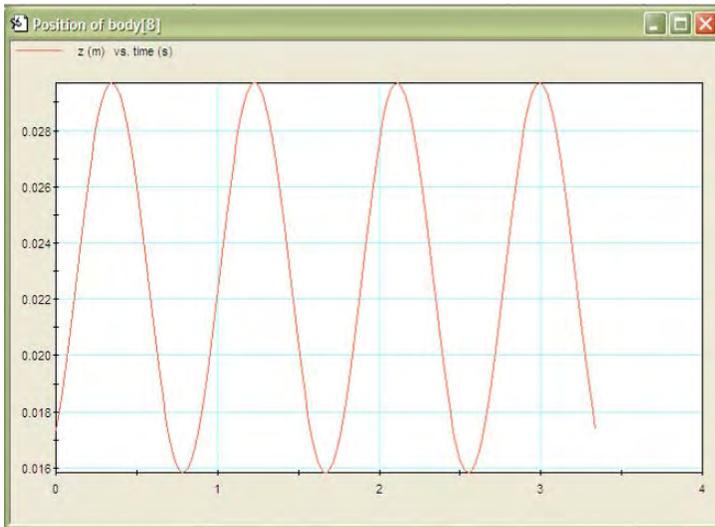


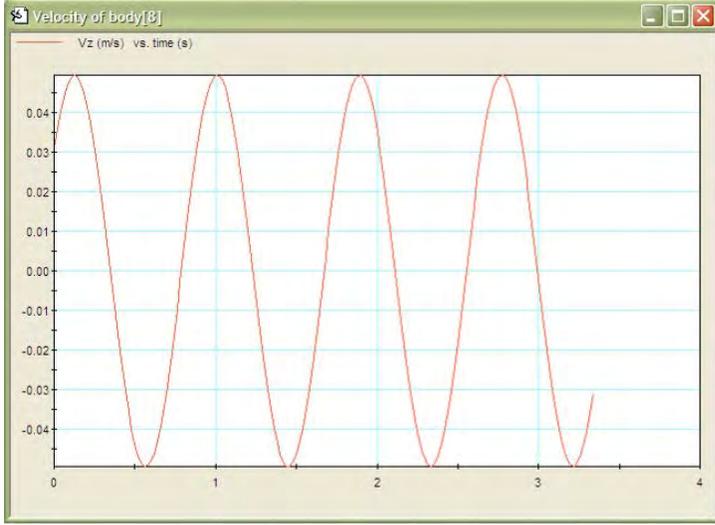
Figura 48. Ensamble Leva - pistón.

Como se muestra en la figura 49, las gráficas asociadas al movimiento de la leva son continuas y finitas, por lo que se asegura que el movimiento del seguidor no presentará irregularidades ni cambios bruscos en su velocidad o su aceleración.

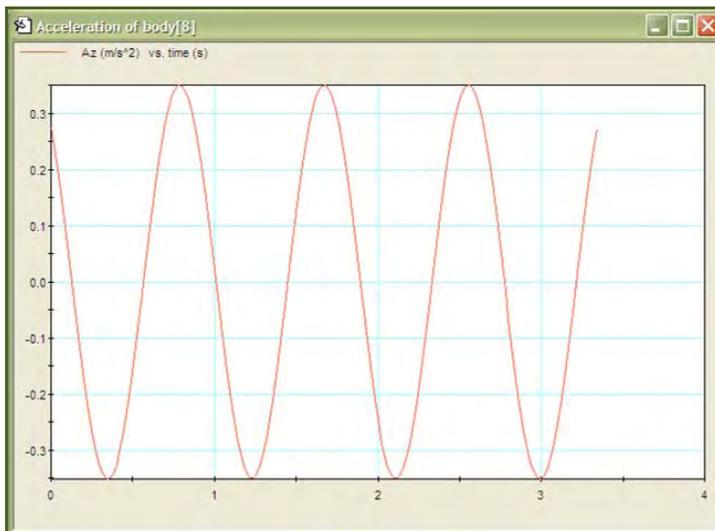
⁷ *Jerk*: Variación de la aceleración en función del tiempo.



(a) Gráfica de posición- tiempo.



(b) Gráfica de velocidad-tiempo.



(c) Gráfica de aceleración-tiempo.

Figura 49. Gráficas de movimiento de la leva-seguidor.

Aunque el *software* no nos permite obtener la gráfica del *jerk*, el comportamiento del movimiento presentado en las gráficas nos indica que el *jerk*, al ser la derivada de la aceleración, tiene un comportamiento sinusoidal igual a las otras gráficas.

En la figura 50, se muestra la leva fabricada en latón, con un ángulo de inclinación de $14[^\circ]$ y un diámetro de $50.8 [mm]$.



Figura 50. Leva

4.3.4 Cilindro y pistón.

La parte central de este diseño se basa en el pistón y el cilindro. Se desea evitar los sellos, debido a que estos son principalmente los elementos que fallan en un sistema de pistones. Para ello, se busca tener una relación entre la longitud del cilindro y acabado superficial de está y del pistón, con el fin de tener un sello adecuado.

Este objetivo se cumplió fabricando las piezas en un torno convencional y ocupando lijas de agua para darle el acabado superficial necesario.

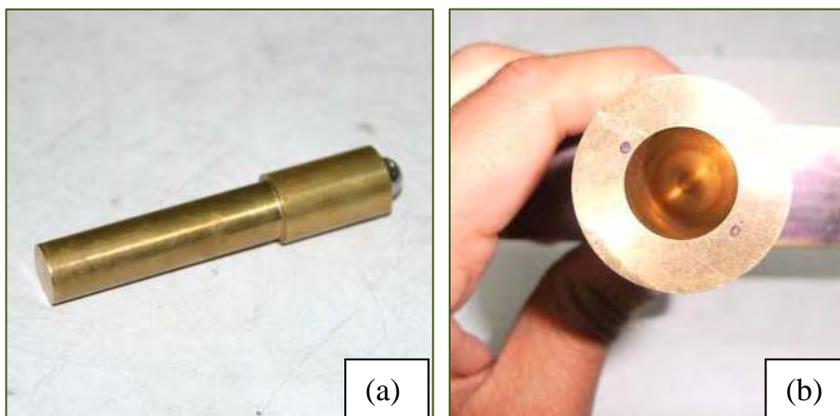


Figura 51.
(a) Pistón,
(b) Cilindro de latón

Además, se diseñó una pieza para sostener el cilindro con el fin de que estuviera estable, pero que también nos permitiera observar el chorro de agua obtenido.

La figura 52 muestra el ensamble del pistón, el cilindro y el soporte, este último se fijó a la estructura del sistema utilizando tornillos, con lo que el cilindro quedó fijo y se mantuvo estable bajo las condiciones de trabajo del sistema.

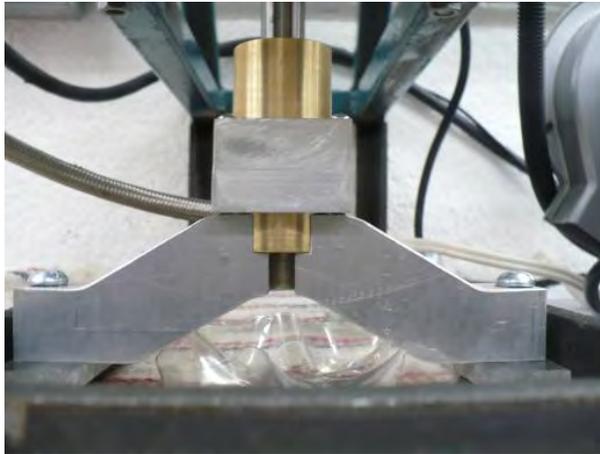


Figura 52. Soporte del cilindro.

4.3.5 Barreno de salida.

El barreno de salida se realizó cuidando los parámetros establecidos en la sección 3.2 para obtener un chorro de agua coherente con la mayor energía cinética posible:

- Entrada recta.
- Largo de 1 [mm].
- Diámetro pequeño (0.1 [mm] de diámetro).

La entrada recta del barreno se maquinó montando la pieza en un torno convencional y con un cortador recto para fresado con punta plana. El barreno se realizó en una máquina CNC de alta velocidad (15000 [rpm]) empleado una broca de acero rápido de 0.1 [mm] de diámetro y 1.2 [mm] de largo, (ver figura 53 y 54).

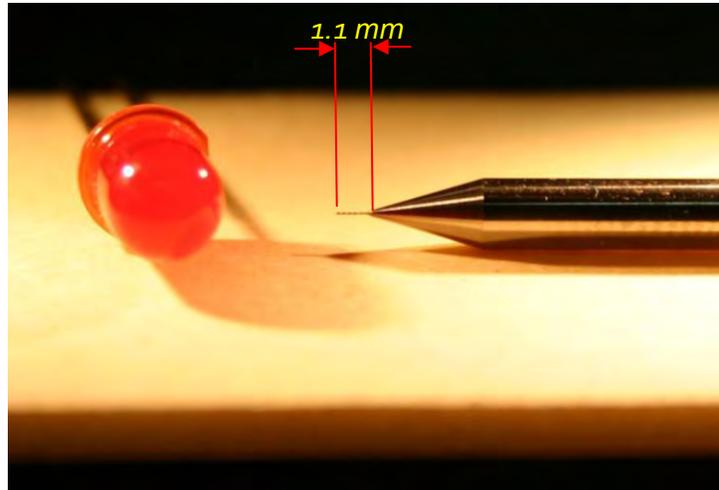


Figura 53. Broca de 0.1 [mm] de diámetro.

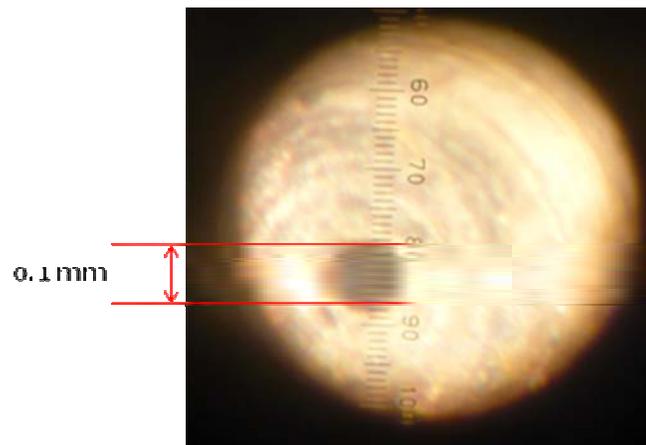


Figura 54. Barreno de 0.1 [mm] de diámetro sobre la parte inferior de la cámara.

Al realizar pruebas con el barreno de 0.1 [mm] se presentó una saturación de materia a la salida del chorro (partículas de corrosión, polvo, etc.), lo que no permitió que el chorro saliera adecuadamente o que se tapara el barreno. Una solución propuesta para esto fue realizar un barreno de mayor diámetro (0.35 [mm]) lo que se obtuvieron mejores resultados.

4.3.6 Sistema de alimentación de agua.

El sistema intensificador de presión requiere un sistema de alimentación que le proporcione un flujo continuo de agua de 2 [lpm], para ello se le adicionó al sistema una bomba dinámica de baja presión.

La bomba de baja presión toma el agua de un depósito y la conduce hasta el cilindro utilizando tubería flexible. En la entrada al cilindro se cuenta con una válvula *check* que protege a la bomba dinámica de retrocesos en la presión generada dentro del cilindro.

Al realizar pruebas del sistema, se observó que el flujo entregado por la primera bomba propuesta, bomba de pecera con gasto teórico de 2 [lpm], no fue suficiente para el llenado del cilindro, por lo se tuvo la necesidad de ir incrementando la capacidad de la bomba de alimentación utilizada. En el prototipo final, esta bomba de de 373 [W] ($\frac{1}{2}$ HP) y tiene una gasto teórico de 92 [lpm].

4.4 Ensamble del sistema.

El sistema consta de una bomba rotativa de 373 [W] ($\frac{1}{2}$ HP), la cual está conectada al cilindro por tubería de hierro fundido y un conector flexible para agua. A la entrada del cilindro se colocó una válvula *check* formada por un balín y un resorte que permite la entrada del líquido al cilindro pero evita el retroceso de agua a la bomba rotativa.

La presión dentro del cilindro se obtiene con el uso de un motor de 746 [W] (1 [HP]) montado verticalmente sobre una estructura metálica de PTR de 25.4 [mm] (1[pulg]); para cumplir con las especificaciones de torque y velocidad, el motor está conectado a una transmisión de 27:1 formada por 6 engranes de acero *cold rolled*.

El sistema está basado en un mecanismo de accionamiento de un pistón (leva y seguidor axial); cuenta con un resorte interno para ayudar al retroceso del pistón y que éste siempre esté en contacto con la leva axial.

El cilindro se encuentra soportado sobre una pieza de aluminio que permite la caracterización del chorro de agua generado.

La figura 55 muestra el ensamble final del sistema.

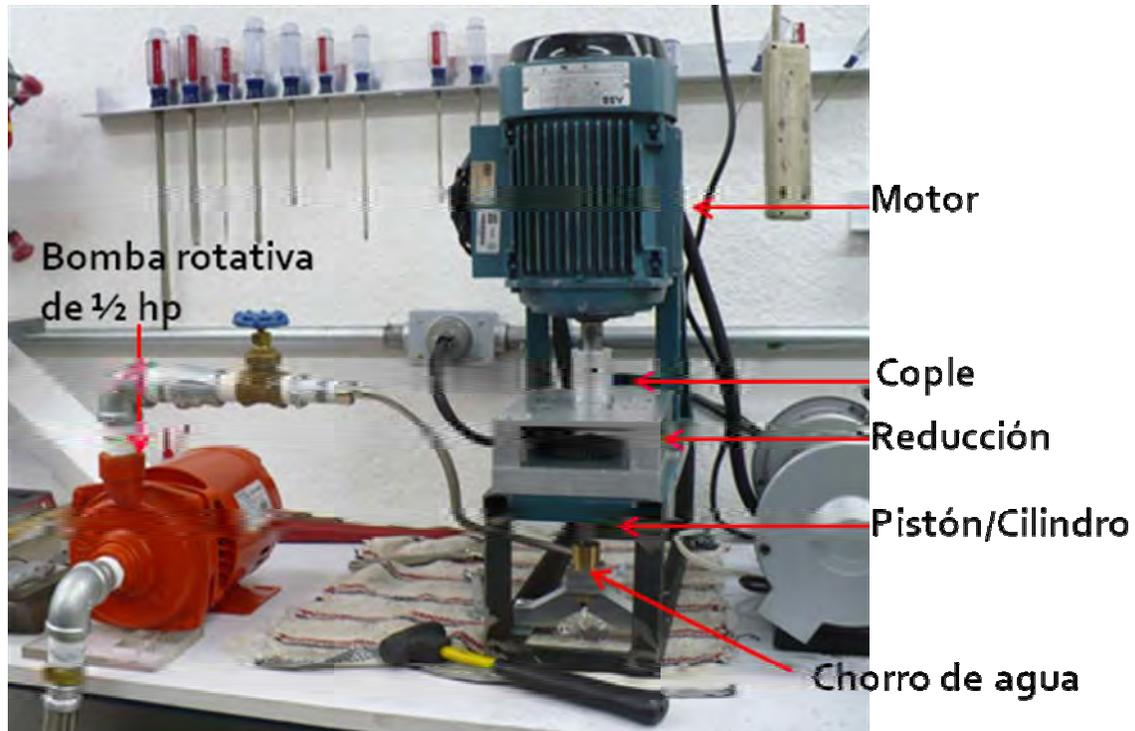


Figura 55. Ensamble del sistema completo.

4.5 Implementación del banco de pruebas.

Una vez que se tuvo el sistema ensamblado, se realizaron varias pruebas con el fin de generar un chorro de agua de 0.35 [mm] de diámetro, a una presión de 60 [MPa] y una velocidad de 340 [m/s]. En la figura 56 se observa el ensamble del cilindro, el pistón y la leva con el cual se realizaron las pruebas.

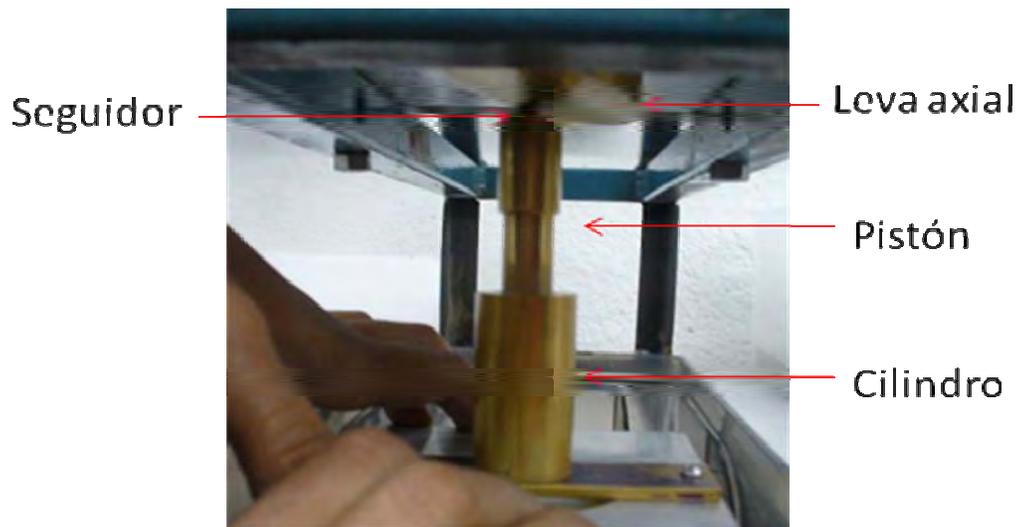


Figura 56. Ensamble del sistema.

4.5.1 Evolución del sistema para generar el chorro de agua.

En la tabla 9 se presenta la evolución del banco de pruebas conforme se fueron realizando pruebas de su funcionamiento, se establecen los parámetros de trabajo empleados en cada iteración y se presentan los resultados obtenidos en cada caso. Así mismo se presentan las modificaciones hechas a algunas de las piezas y configuraciones empleadas en el sistema propuesto, éstas se realizaron basándose en los resultados obtenidos en las pruebas anteriores y en una propuesta de solución a cada uno de los problemas encontrados. Las modificaciones más significativas se presentaron en el sistema de alimentación, en la configuración de la entrada del agua y en el tipo de sello empleado.

Las modificaciones 2, 4, 5, 10, 13 y 16 se basaron en el sistema de alimentación del agua, tanto en el equipo utilizado como en el lugar de entrada. Los mejores resultados se obtuvieron con la entrada por la parte inferior y con una bomba de 373 [W] (1/2 [HP]).

En las pruebas 3, 13 y 16 se realizaron modificaciones en el pistón, y en las pruebas 9 y 13, las modificaciones fueron en la válvula *check* utilizada, estas modificaciones fueron en diseño y material.

Las modificaciones 8, 14, 15 y 16 se enfocaron al tipo de sello utilizado, los mejores resultados se obtuvieron utilizando como sello la relación longitud – acabado superficial entre el pistón y el cilindro.

Tabla 9. Evolución del sistema generador de chorro de agua según las pruebas realizadas.

	Cilindro	Pistón	Ø barreno salida [mm]	Acción	Llenado	Sello	Fugas	Válvula	Resultados	Observaciones
1	Latón 1/2" 	Latón 	0.35	Manual	Manual	Longitud / Acabado Superficial	No	No	Genera chorro hasta que el líquido se termina. Buen alcance del chorro	El sistema tiene capacidad para cortar hasta 3 hojas de papel. Es necesario el llenado continuo del cilindro.
2	Latón 1/2"	Latón	0.35	Manual	Bomba de pecera de 2 [Imp].  Llenado por la parte superior 	Longitud / Acabado Superficial	No	No	Genera un chorro continuo. Chorro con buenas características visibles	Presión interior perceptible. Es necesario el funcionamiento continuo y automático del sistema.
3	Latón 1/2"	Barra Gorton 	0.35	Leva axial 	Bomba de pecera de 2 [Imp]. Llenado por la parte superior	Longitud / Acabado Superficial	Fuga pequeña	No	Genera chorro una vez, no vuelve a generar chorro	Se observan burbujas después del primer ciclo. Es necesario asegurar el llenado del cilindro, se cambiará la entrada de agua a la parte inferior del cilindro.

	Cilindro	Pistón	Ø barreno salida [mm]	Acción	Llenado	Sello	Fugas	Válvula	Resultados	Observaciones
4	Latón 1/2"	Barra Gorton	0.35	Leva axial	Bomba de pecera de 2 [Imp]. Llenado por la parte inferior 	Longitud / Acabado Superficial	Fuga pequeña	No	Genera chorro una vez, no vuelve a generar chorro	Se observan burbujas después del primer ciclo. Es necesario emplear una bomba con mayor gasto para el llenado del cilindro.
5	Latón 1/2"	Barra Gorton	0.35	Leva axial	Bomba de pecera de 11.3 [lpm]. Llenado por la parte inferior 	Longitud / Acabado Superficial	Fuga pequeña	No	Genera chorro una vez, no vuelve a generar chorro	Se observan burbujas después del primer ciclo. Se decide emplear un cilindro de acrílico para visualizar lo que está sucediendo dentro del cilindro.
6	Acrílico 1/2" 	Barra Gorton	0.5	Manual	Manual	Longitud / Acabado Superficial	No	No	Genera chorro una vez, no vuelve a generar chorro	Se observa cavitación en el interior del cilindro. Es necesario sumergir la salida de la boquilla con el fin de que el este no succione aire.

	Cilindro	Pistón	Ø barreno salida [mm]	Acción	Llenado	Sello	Fugas	Válvula	Resultados	Observaciones
7	Latón 1/2"	Barra Gorton	0.35	Leva axial	Bomba de pecera de 11.3 [lpm]. Llenado por la parte inferior	Longitud / Acabado Superficial	Fuga pequeña	No	No genera chorro, salen burbujas	Se sumerge la boquilla en agua. Es necesario sumergir el cilindro completamente con el fin de que el este no succione aire por la salida de la boquilla ni por las paredes del pistón.
8	Latón 1/2"	Barra Gorton	0.35	Leva axial	Bomba de pecera de 11.3 [lpm]. Llenado por la parte inferior	Longitud / Acabado Superficial Agua circundante	No es apreciable	No	No genera chorro, salen burbujas	Se sumerge todo el cilindro en agua. No se observan cambios significativos en el funcionamiento. Se le añade una válvula <i>check</i> para asegurar que se tenga una cámara cerrada al generarse la presión.
9	Latón 1/2"	Barra Gorton	0.35	Leva axial	Bomba de pecera de 11.3 [lpm]. Llenado por la parte inferior	Longitud / Acabado Superficial	Fuga pequeña	<p><i>Check</i> con un balín y un resorte</p> 	Genera chorro una vez, no vuelve a generar chorro	Se observan burbujas después del primer ciclo. Se aumenta la presión de la bomba de llenado con el fin de asegurar que el gasto entregado es el adecuado.

	Cilindro	Pistón	Ø barreno salida [mm]	Acción	Llenado	Sello	Fugas	Válvula	Resultados	Observaciones
10	Latón 1/2"	Barra Gorton	0.35	Leva axial	Bomba rotatoria de 373 [W] (1/2 HP), 92 [lpm] 	Longitud / Acabado Superficial	Fuga pequeña	Check con un balín y un resorte	Genera un chorro continuo, Chorro con buenas características visibles. La presión y velocidad del chorro es baja	Se reduce el diámetro de salida de la boquilla con el fin de aumentar la velocidad de salida del chorro de agua.
11	Latón 1/2"	Barra Gorton	0.1	Leva axial	Bomba rotatoria de 373 [W] (1/2 HP), 92 [lpm]	Longitud / Acabado Superficial	Fuga pequeña	Check con un balín y un resorte	Se genera un chorro de agua con buenas características visibles en el primer ciclo de trabajo, después no genera chorro, el barreno de salida se tapa	No es posible trabajar con el chorro debido a que se tapa. Se regresa al diámetro de salida de 0.35 [mm] con el fin de tener un chorro de agua con el cual trabajar y evaluar los otros factores que afectan la generación del chorro de agua. Se retiro la válvula <i>check</i> para descartar que el llenado del sistema sea el factor que impide la obtención de un chorro de las características necesarias.

	Cilindro	Pistón	Ø barreno salida [mm]	Acción	Llenado	Sello	Fugas	Válvula	Resultados	Observaciones
12	Latón 1/2"	Barra Gorton	0.35	Leva axial	Bomba rotatoria de 373 [W] (1/2 HP), 92 [lpm]	Longitud / Acabado Superficial	Fuga pequeña	No	Genera un chorro continuo, con buenas características visibles. La presión y velocidad del chorro es baja.	Se verifica que el gasto que entrega la bomba rotativa es el adecuado. Se implementa el llenado del cilindro por el pistón, empleando un balín como válvula <i>check</i> .
13	Latón 1/2"	Latón	0.35	Leva axial	Bomba rotatoria de 373 [W] (1/2 HP), 92 [lpm]. El llenado se hace por un barreno en el pistón 	Longitud / Acabado Superficial	Fuga pequeña	<i>Check</i> con un balín y pistón	Genera un chorro continuo, con buenas características visibles. La presión y velocidad del chorro es baja.	El llenado del sistema por el pistón asegura un buen llenado del cilindro y disminuye el número de elementos empleados

	Cilindro	Pistón	Ø barreno salida [mm]	Acción	Llenado	Sello	Fugas	Válvula	Resultados	Observaciones
14	Latón 1/2"	Latón	0.35	Leva axial	Bomba rotatoria de 373 [W] (1/2 HP), 92 [lpm]	Sello de PVC 	Si	Check con un balón y pistón	Genera un chorro continuo, con buenas características visibles. La presión y velocidad del chorro es baja.	La fuga en el sistema aumenta, esto puede ser debido a la falta de ajuste entre el sello y el cilindro. Se fabrican sellos de silicón para asegurar un buen ajuste entre el pistón y las paredes el cilindro.
15	Latón 1/2"	Latón	0.35	Leva axial	Bomba rotatoria de 373 [W] (1/2 HP), 92 [lpm]	Sello de silicón	No	Check con un balón y pistón	Genera un chorro continuo, Chorro con buenas características visibles. La presión y velocidad del chorro es baja.	El pistón se fractura. Esto indica que existen fuerzas axiales que provocan la flexión del pistón. Se emplea agua para generar el sellado 

	Cilindro	Pistón	Ø barreno salida [mm]	Acción	Llenado	Sello	Fugas	Válvula	Resultados	Observaciones
16	Latón 1/2"	<p>Latón</p> 	0.35	Leva axial	<p>Bomba rotatoria de 373 [W] (1/2 HP), 92 [lpm], entrada de agua por la parte superior e inferior del cilindro</p> 	Longitud / Acabado Superficial. Agua en la cámara superior del cilindro	No	Check con un balín y un resorte	<p>Genera un chorro continuo, Chorro con buenas características visibles. La presión y velocidad del chorro es baja.</p>	<p>Al tener agua en la cámara superior del cilindro, esta sirve como sello. No se tienen fugas; sin embargo, la presión y la velocidad del chorro de agua no es la esperada. Se propone realizar simulaciones de lo que sucede en el interior de cilindro.</p>

Se obtuvieron resultados que verifican que la relación: largo del cilindro-acabado superficial es adecuada para evitar el uso de sellos mecánicos en el sistema cilindro-pistón.

Por otro lado, se presentaron en un inicio problemas de llenado de la cámara de presión, se optó por emplear una bomba rotativa de 373 [W] (1/2 HP), 92 [lpm]. (ver figura 57) para llevar el agua al cilindro.



Figura 57. Bomba rotativa de ½ hp.

Conforme se van agregando elementos al sistema el gasto va disminuyendo, esto provoca una disminución en la presión del agua. Se realizaron mediciones de gasto para verificar que el llenado del cilindro fuera correcto. Para ello se utilizó un cronómetro y un contenedor graduado que nos permitiera medir el volumen de agua. En la figura 58 se muestran los puntos donde se midieron los gastos y se presentan los resultados en la tabla 10.

Tabla 10. Mediciones del gasto.

Condiciones	Gasto [l/s]
(1) Bomba sola	1.5
(2) Manguera sin válvula conectada a la bomba	0.170
(3) Bomba y cilindro conectado a la válvula	0.05
(4) Sistema cerrado, salida por la boquilla	0.0017
(5) Sistema cerrado, motor en movimiento	0.0013

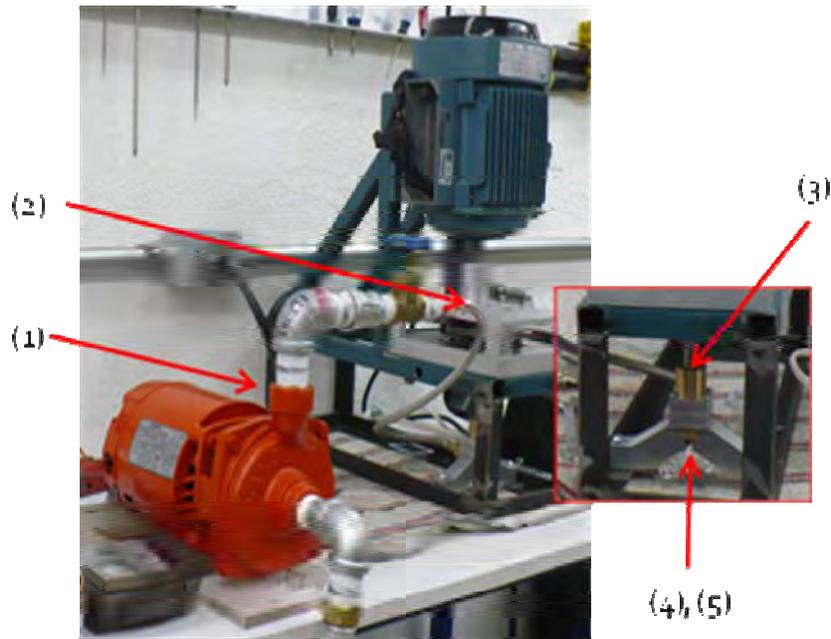


Figura 58. Puntos de medición del gasto.

4.5.2 Chorro de agua generado.

En la figura 59 se muestra una foto de un chorro de agua coherente y de bajas dimensiones generado en el banco de pruebas; éste se obtuvo aplicando los parámetros de la prueba 10 (ver tabla 9).

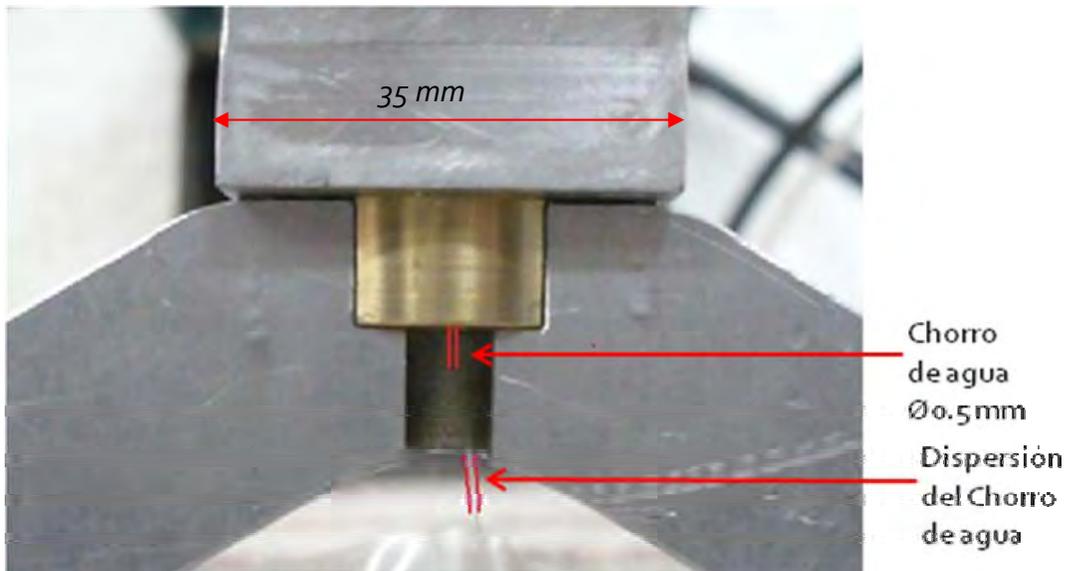


Figura 59. Chorro de agua.

Con el fin de determinar la presión del chorro de agua obtenido, se utilizó un dispositivo que nos permitiera registrar la fuerza con la que el chorro impacta al material (ver figura 60).

Este dispositivo está formado por un sensor de impacto colocado en cantilever sobre una balanza electrónica. Al impactarse el chorro de agua en el sensor, la balanza registra la fuerza generada, y empleado la ley de Pascal, se obtiene la presión del chorro generado. Estos resultados se presentan en la tabla 11.

La figura 60 muestra este dispositivo.

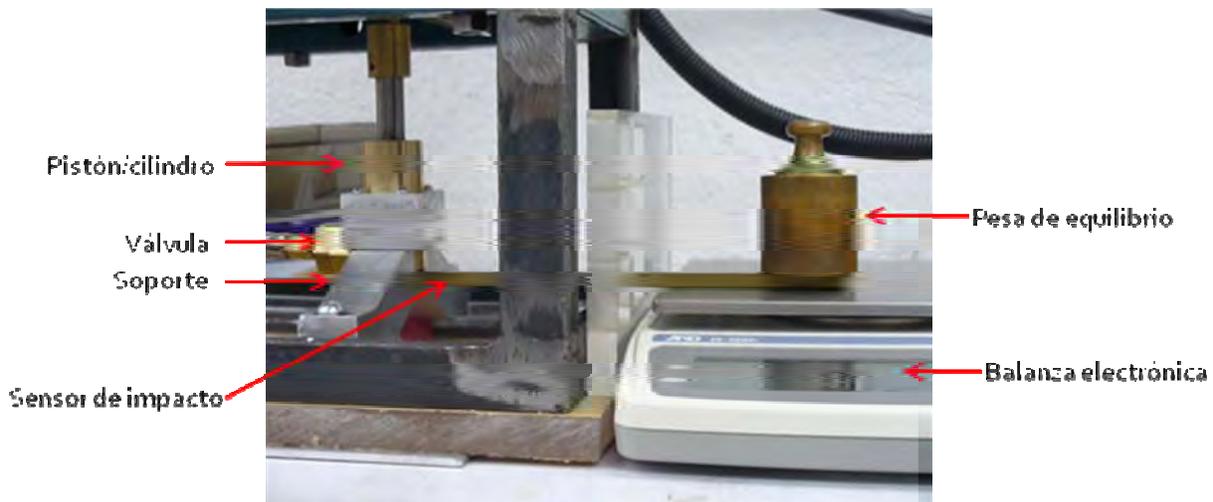


Figura 60. Dispositivo de medición de fuerza de impacto.

Tabla 11. Mediciones de fuerza de impacto realizadas.

D_{barreno}	F_{impacto}	P_{chorro}	Observaciones
0.35 [mm]	1.8 [gf]	140 [kPa]	Sin motor
0.35 [mm]	3.8 [gf]	295 [kPa]	Con motor

Se observa que la fuerza de impacto aumenta cuando el sistema está en funcionamiento. Sin embargo, la presión obtenida está por debajo de los parámetros buscados en este trabajo.

4.6 Análisis de resultados

Los resultados muestran que se obtuvo un chorro coherente con un diámetro de 0.5 [mm]. Considerando que el barreno de salida es de 0.35 [mm], podemos concluir el chorro de agua debe estar tocando las paredes del barreno; es necesario verificar que la entrada del barreno sea recta y con ello propiciar que el chorro se separe de las paredes y con ello obtener un chorro de agua más delgado.

La fuerza de impacto del chorro de agua obtenido, está entre los 1.8 y los 3.8 [gf], lo cual está por debajo de lo deseado. Considerando las pruebas realizadas e investigaciones hechas con el fin de obtener el porqué de estos resultados, se concluye que la falta de fuerza en el chorro de agua de debe a las siguientes causas:

- La presión dentro del cilindro no es la especificada (60[MPa]) debido a que existen fugas en el sello hecho por la relación longitud-acabado superficial entre el pistón y el cilindro.
- La leva utilizada ejerce una fuerza axial que desvía al pistón de su eje de movimiento, por lo que la fuerza aplicada al líquido no es la adecuada y se produce una fuga debido a esta desviación, con lo que se pierde presión.
- El gasto real suministrado al sistema es de 0.0013 [l/s], este gasto no es suficiente para mantener siempre con agua el cilindro. Al disminuir la cantidad de agua dentro del sistema, la presión disminuye.
- Existe un fenómeno denominado “cuello de botella” que establece que cuando se tienen cambios bruscos de diámetro, la velocidad de salida del chorro aumenta hasta determinado punto, a partir del cual, esta se estabiliza. En el sistema utilizado para generar la presión, el cambio de diámetro va de 12.7 [mm] a 0.35 [mm] por lo que podría ser que se esté produciendo este fenómeno.

4.7 Rediseño del banco de pruebas.

Los resultados obtenidos en este trabajo nos permitieron encontrar cuáles son los puntos críticos, tanto en manufactura, como en la generación de un chorro de agua con las características adecuadas para realizar microcortes.

El primer punto a enfocarse es la bomba de alimentación, ya que se debe asegurar un gasto suficiente y continuo durante todo el ciclo de trabajo del pistón, para ello se utilizará la bomba rotativa de 373 [W] (1/2 HP), 92 [lpm] para alimentar al sistema; sin embargo se realizarán modificaciones en la configuración de la entrada del líquido. Esta se hará por un barreno realizado a lo largo del pistón, lo que nos permitirá a la vez, que la válvula *check* esté dentro del cilindro y se forme con un balín, un resorte y el mismo pistón, reduciendo así el número de piezas empleadas.

Debido a que se observó que existe un esfuerzo axial que desvía al pistón de su eje vertical, lo que provoca fugas y pérdida de presión, en este nuevo diseño se propone emplear rodamientos lineales que limiten el movimiento axial del pistón. Así mismo, con el fin de disminuir este esfuerzo axial, facilitar el ensamble de los pistones, y tener una mayor área de trabajo, se propone cambiar la configuración del sistema: se colocará el motor de manera horizontal y se cambiará la leva axial por dos levas radiales que impulsen dos pistones de forma independiente.

Al final de este trabajo se encontró que dentro del cilindro propuesto podría estar sucediendo el fenómeno de “cuello de botella” [44], el cual establece que cuando se tienen contracciones bruscas de un fluido, la velocidad del chorro de agua tiende a estabilizarse, lo que impediría obtener las velocidades del chorro de agua que se necesitan para este trabajo. Para evitar este efecto, se propone primero presurizar el agua a la presión requerida y luego conducirla y concentrarla en un barreno para generar un chorro de las características adecuadas de velocidad. En esta propuesta, se contempla una tubería para almacenar y conducir el agua a presión y con ello evitar el efecto cuello de botella.

Las figuras 61 y 62 muestran la vista isométrica y superior del rediseño propuesto.

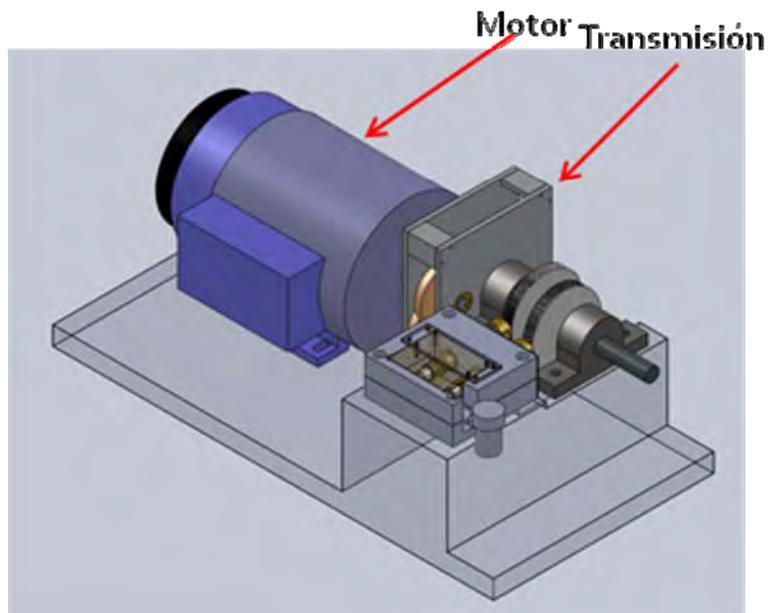


Figura 61. Vista isométrica del rediseño del sistema.

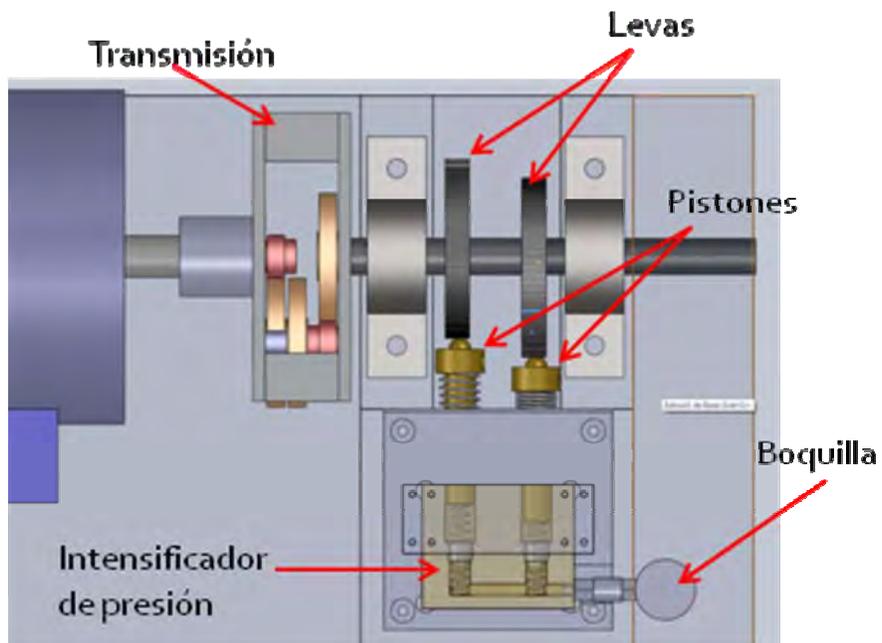


Figura 62. Vista superior del rediseño del sistema.



CONCLUSIONES

Conclusiones.

En este trabajo se realizó una revisión del proceso de corte por chorro de agua (WJC), de los parámetros involucrados y de cómo se relacionan estos entre sí.

Se puede concluir que las ventajas que presenta el corte por chorro de agua frente a otros procesos, lo hace ser un proceso adecuado para emplearse en el micromaquinado. Algunas de estas ventajas son:

- El diámetro del chorro de agua oscila entre 0.1 a 0.4 mm, con lo que es posible hacer micromaquinados.
- Las fuerzas de corte involucradas en el proceso son relativamente bajas, por lo que la pieza no se afecta mecánica ni térmicamente la zona cercana al corte (muy importante cuando se trata de micropiezas)
- El sobrematerial generado disminuye significativamente y se tiene un mejor acabado superficial en comparación de lo obtenido con procesos de corte por arranque de material.

Además, al no emplear herramientas de corte, la complejidad de fabricación de éstas y el factor de desgaste de la herramienta, dejan de estar presentes en el proceso de micromanufactura. Sin embargo, se tiene la desventaja de que con esta tecnología es muy difícil controlar la profundidad de corte, por lo que las geometrías que se fabrican están dentro del 2D y no el 3D como con una fresadora convencional o de tipo CNC.

Considerando la influencia que tienen los parámetros de corte, como la presión del agua, la velocidad de corte, la distancia entre la boquilla y la pieza, etc., en la profundidad de corte, la rugosidad de la superficie y la conicidad del corte obtenido, se determinaron los parámetros adecuados para la aplicación del WJC en la micromanufactura, destacando la importancia de las características del chorro de agua (coherencia y alta velocidad) para la generación del microcorte.

Se propuso un caso en particular para realizar micro corte en un elemento de acero inoxidable de 1.2 [mm]. Con estas características de corte se requiere una presión de agua de 60 [MPa] y una velocidad del chorro de agua de 340 [m/s], utilizando un barreno de salida del chorro de agua de 0.1 [mm] de diámetro.

Con la intención de verificar los valores de corte por chorro de agua aplicado a la micromanufactura determinados en este trabajo, se desarrolló un banco de pruebas. Con este sistema se buscó generar un chorro de agua a alta presión, y establecer cuáles son los puntos críticos, tanto en manufactura, como en la generación del chorro de agua con las características adecuadas para realizar microcortes.

Con este banco se obtuvo un chorro de agua coherente de 0.5 [mm] de diámetro, el cual tiene las características de coherencia y dimensiones adecuadas para generar microcorte, pero la fuerza de impacto del chorro está por debajo de la necesaria para este fin.

Los resultados obtenidos nos impulsan a seguir con el estudio de esta tecnología para su aplicación en micromecánica; sin embargo, la complejidad que implica generar las presiones adecuadas para realizar corte, es una limitante para el desarrollo de sistemas dentro del laboratorio.

Trabajo a futuro

Apoyándose en la investigación realizada y los resultados obtenidos, se confirma que es viable aplicar el corte por chorro de agua para realizar microcorte, sin embargo es necesario realizar investigaciones específicas de cada uno de los parámetros significativos del proceso establecidos en la sección 1.2.1.4 de ese trabajo, con el fin de encontrar un sistema óptimo para este propósito.

Del mismo modo, la complejidad que implica generar las presiones de agua necesarias, nos invita a seguir con su estudio a fin de encontrar un sistema de bajas dimensiones que adecuado para obtener altas presiones.

Se propone la fabricación del rediseño del sistema intensificador de presión, con el fin de corregir los problemas que se presentaron en el actual, como fugas, cavitaciones y pérdidas de presión, también se observó la necesidad de tener puntos de referencia en el ensamble, con el fin de asegurar que la carrera de los pistones y la fuerza aplicada a ellos, siempre sea la misma.



REFERENCIAS

Referencias.

1. Xiaoxia, *et al*, *Current State and Prospect of Micro-Machining*, International Conference on Automation and Logistics, China Agosto 2007.
2. Miller D.S., *Micromachining with abrasive waterjets*. Journal of Materials Processing Technology, 2004
3. Ruiz Huerta, Leopoldo. *Desarrollo de microequipo para células de manufactura*. Tesis de doctorado, área mecánica. Abril 2005.
4. Ruiz Huerta, Leopoldo. *Diseño y construcción de un microcentro de maquinado de bajo costo*. Tesis de maestría, área mecánica. 2000.
5. Ruiz-Huerta L. Caballero-Ruiz A. Herrera-Granados G. *Avances en el desarrollo de una micromáquina herramienta aplicando sistemas CAD y CAM*. 8° Congreso Internacional de Ingeniería Mecánica, Octubre 2007.
6. Weck, Manfred. *Handbook of Machine Tools*. Vol. 1. John Wiley & Sons. 1984.
7. Ruiz Huerta, Leopoldo, Caballero Ruiz, Alberto. *Presentación del GMM. 2006-2007*. CCADET, UNAM.
8. Summers, David A. *Waterjetting Technology*. E&FN SPON, U.K. 1995.
9. Espinosa Gayosso, Iván. *Diseño de una máquina de corte por chorro de agua*. Tesis de maestría, área mecánica. Marzo 2001.
10. Brown, James. *Modern Manufacturing Processes*. Industrial Press Inc. N.Y. 1991.
11. Groover, Mikell. *Fundamentos de manufactura moderna*. Tercera edición. Ed. McGraw Hill. México 2007.

12. Kumar Manish. *Controlled high pressure slurry injection in waterjetting applications- A new approach*. Tesis de maestría. Ingeniería Petrolera, India 2005.
13. www.howstuffworks.com, Octubre 2007.
14. <http://iink.brightcove.com/services/link>, Octubre 2008.
15. Lemma, E., et al. *Optimising the Abrasive Water Jet cutting process of ductile material using nozzle oscillation technology*.
16. Xu, Shunli. *Modelling the cutting process and cutting performance in abrasive waterjet machining with controlled nozzle oscillation*. Tesis de doctorado. School of Engineering Systems. Queensland University of Technology. Australia, 2005.
17. J.Wang. *Predictive depth of jet penetration models for abrasive waterjet cutting of alumina ceramics*. International Journal of Mechanical Sciences 49 (2007) 3006-316.
18. Jáuregui, Ana Laura et al, *Fabricación y prototipado de canales para dispositivos microfluidicos del sector salud*. Memorias del 14 Congreso Internacional Anual de la SOMIM, Puebla, México, 2008.
19. Kim, J., *Replication of microchannel structures in polymers using laser fabricated glass-ceramic stamp*. Department of Mechanical Engineering, Seoul National University of Technology. (2007)
20. Ludema, K.C. and Meng H.C., *Wear models and predictive equations: Their form and content*. Wear, 1995.
21. <http://www.matweb.com>, Mayo 2008.
22. Momber, A.W. *Hidro-abrasive erosion of refractory ceramics*. Journal of Materials Science 38. (2003).
23. Mataix, Claudio. *Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas*. 2ª Edición. Alfaomega. México, 1982.
24. Viejo Zubicaray & Álvarez Fernández. *Bombas. Teoría, diseño y aplicaciones*. 3ª Edición. Limusa. México, 2008.
25. Momber, A.W. *The kinetic energy of wear particles generated by abrasive-water-jet erosion*. Journal of Materials Processing Technology 83 (1998).
26. Norma NRF-028 de Pemex. Mayo 2008.
27. *Waterjet Seminar*. Flow international Corporation. 2002.
28. Anantharamaiah N. Vahedi Tafreshi H, Pourdeyhimi B; *A simple expression for predicting the inlet roundness of micro-nozzles*. Journal of micromechanics and microengineering. 17 (2007) N31-N39.

29. Ahsan Ali Khan, et al.; *A study on abrasive water jet machining of aluminum with garnet abrasives*. Journal of Applied Sciences 5 (9): 1650-1654, 2005 ISSN 1812-5654.
30. Echert Douglas C., et al. *Underwater cutting by abrasive-waterjet*. Flow Research, Inc. Paper.
31. Kovacevic R. et al. *State of the art of research and development in abrasive waterjet machining*. Journal of Manufacturing Science and Engineering. ASME. November 1997, vol 119 / 776-7785.
32. www.waterjets.org, Octubre 2007.
33. Bitter, J. G. A., *A study of erosion phenomena*. Wear, vol.6, 1963. pp. 5-21 and 169-190.
34. Aragón González, et al. *Hidráulica industrial*. UAM Azcapotzalco – Schrader Bellows Parker, Cleveland, Ohio. Agosto 1991.
35. www.omax.com, Octubre 2007.
36. Zeng, J. and Kim, T. J. *An erosion model of polycrystalline ceramics in abrasive waterjet cutting*, Wear, 1996, 193(2), pp.207-217.
37. Sheldon, G.L. y Finnie, I., *The mechanism of material removal in the erosive cutting of brittle material*, J. Eng. Indust. ASME, 1966, pp. 393-400.
38. Evans, A. G. Gulden, W.E. y Rosenblatt, M., *Impact damage in brittle materials in the elastic-plastic response regime*, Prop. R. Soc. Lond. Ser. A. 1978.
39. Hashish M., *Characteristics of surfaces machined with abrasive-waterjets*. Journal of Engineering Materials and Technology. Transactions of the ASME, 1991, 113(3), pp. 354-362.
40. <http://www.biopac.com/>, enero 2010.
41. <http://www.mems.sandia.gov/>, enero 2010.
42. <http://www.izm.fraunhofer.de/>, enero 2010.
43. <http://www.micromechatronicsinc.com/>, enero 2010.
44. Burriel Patricia, et al., *Bottleneck effect” in two-dimentional microfluidics*, Physical Review Letters, PRL 100, 134503 (2008).
45. <http://www.micromanufacturing.com/showthread.php?p=729>, enero 2010.