

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Diseño y Construcción de un Prototipo de Máquina de Bajo
Costo de Corte por Chorro de Agua Abrasivo
Dispositivos Tecnológicos**

Francisco Sebastián Criollo Guallasamín

Ingeniería Mecánica

Trabajo de titulación presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Mecánico

Quito, 22 de diciembre de 2017

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ
COLEGIO DE CIENCIAS E INGENIERÍA

**HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE TITULACIÓN**

**Diseño y Construcción de un Prototipo de Máquina de Bajo Costo de Corte
por Chorro de Agua Abrasivo**

Francisco Sebastián Criollo Guallasamín

Calificación:

Nombre del profesor, Título académico

Michel Vargas, Ph.D.

Firma del profesor

Quito, 22 de diciembre de 2017

Derechos de Autor

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma del estudiante:

Nombres y apellidos:

Francisco Sebastián Criollo Guallasamín

Código:

00112460

Cédula de Identidad:

1721850350

Lugar y fecha:

Quito, 22 de diciembre de 2017

RESUMEN

La tecnología de corte por chorro de agua abrasivo ha demostrado ser un proceso de fabricación útil para los sectores aeroespacial, aeronaves, embarcaciones y automoción debido a sus ventajas específicas al mecanizar, con alta precisión y a baja temperatura, todo tipo de materiales. El presente proyecto desarrolló un prototipo de cortadora de bajo costo por chorro de agua abrasivo, para diferentes materiales de hasta 4 mm de espesor, que pueda ser implementado en estas industrias con una baja inversión. La construcción de la máquina empezó por su diseño y la selección de componentes más viables, se adquirió una bomba de alta presión accionada por un motor HONDA GC190 capaz de generar hasta 22 MPa (3200 PSI) de presión, una boquilla de hidroarenado, adaptada al sistema, que posee una cámara de mezcla para el agua y abrasivo, y por último se seleccionó un abrasivo de tipo Arena de Sílice la cual es insoluble en el agua y de gran dureza. Para el ensamble de la máquina se acopló a los componentes adquiridos a una mesa de control de movimiento diseñada a las medidas de 1.35 m x 1.50 m. El diseño de la mesa de corte de la máquina se desarrolló para que tenga la capacidad de realizar cortes en los ejes X e Y. La máquina de corte por chorro de agua abrasivo se construyó según lo planificado e ilustró el proceso de corte por micro erosión sin presentar errores o contratiempos; el corte final de piezas de los diferentes materiales presentaron precisión y un buen acabado.

ABSTRACT

The abrasive water jet cutting technology has proven to be a useful manufacturing process for the aerospace, aircraft, boat and automotive sectors due to its specific advantages when machining, with high precision and at low temperature, all kinds of materials. The present project developed a prototype of a low cost cutter by abrasive water jet, for different materials up to 4 mm thick that can be implemented in these industries with a low investment. The construction of the machine began with its design and the selection of more viable components, a high pressure pump was purchased, powered by a HONDA GC190 engine capable of generating up to 22 MPa (3200 PSI) of pressure, a hydro-sanded nozzle, adapted to the system, which has a mixing chamber for water and abrasive, and finally a sand-type silica abrasive which is insoluble in water and of great hardness was selected. For the assembly of the machine, the purchased components were coupled to a motion control table designed to measure 1.35 m x 1.50 m. The design of the cutting table of the machine was developed so that it has the ability to make cuts on the X and Y axes. The abrasive water jet cutting machine was built as planned and illustrated the process of micro erosion cutting without presenting errors or setbacks; the final cut of pieces of different materials presented precision and a good finish.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	11
Objetivo general	12
Objetivos específicos	12
MÉTODOS	14
Especificaciones del Equipo	14
Características del proceso de corte por chorro de agua abrasivo	15
Ejemplo de un modelo de elementos finitos para el mecanizado por chorro de agua abrasivo	16
Proceso de corte por micro erosión	23
Principio de Bernuolli y velocidad aproximada de salida del chorro de agua	23
Velocidad de salida del chorro de agua práctico	24
Velocidad de las partículas abrasivas	24
Potencia hidráulica	26
Potencia cinética	26
Factor de eficiencia abrasivo	27
Volumen erosionado	28
Proceso de mezcla de agua y abrasivo	30
Funcionamiento del sistema motor-bomba	31
DESARROLLO DEL TEMA	32
Diseño, selección de componentes y ensamble del prototipo de máquina	32
Hidrolavadora con motor a gasolina	32
Manguera de alta presión	34
Pistola dosificadora	34
Barra pulverizadora y boquilla pulverizadora	35
Cabezal de corte y cámara de mezcla	36
Sonda con aspiración ajustable	37
Contenedor de abrasivo	39
Abrasivo	39
Mesa de corte	40
Ensamble completo del prototipo de máquina	42
Resultados	43
Corte de madera por chorro de agua abrasivo	44
Corte de latón por chorro de agua abrasivo	45
Corte de aluminio por chorro de agua abrasivo	47
Corte de acero inoxidable por chorro de agua abrasivo	48

Corte de piezas de cemento y de gres porcelánico.....	49
Comparación de resultados	50
Discusión	51
Análisis de los resultados prácticos obtenidos	51
Funcionamiento del prototipo	52
Calidad del corte por chorro de agua abrasivo	53
Medidas de seguridad para operar la máquina	53
Costos	55
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
ANEXOS	61
Manual de operación y mantenimiento preventivo	61
Observaciones generales	61
Lugar de instalación del equipo	62
Instalación	62
Descripción de la máquina	63
Funcionamiento del sistema de alta presión.....	64
Funcionamiento del sistema de corte	64
Mantenimiento General.....	65
Fichas técnicas y manuales de componentes del prototipo	67
Planos de conjunto y de taller del prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo.....	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Especificaciones técnicas del sistema	14
Tabla 2: Datos del material de la pieza de trabajo (Hassan & Kosmol, 1999).....	17
Tabla 3: Datos del material abrasivo (Hassan & Kosmol, 1999).....	18
Tabla 4: Condiciones del maquinado por chorro de agua abrasivo (Hassan & Kosmol, 1999).....	18
Tabla 5: Especificaciones de los elementos de contacto (Hassan & Kosmol, 1999)	19
Tabla 6: Propiedades del Motor HONDA GC190 (HELMUTH, 2017)	33
Tabla 7: Propiedades de pistola dosificadora (KÄRCHER, 2017)	35
Tabla 8: Configuraciones del orificio de la sonda aspirante (Roosembertl, 2017)	38
Tabla 9: Parámetros de velocidad.....	44
Tabla 10: Parámetros para el volumen erosionado por partícula	44
Tabla 11: Propiedades de la Madera	44
Tabla 12: Volumen removido de la madera	45
Tabla 13: Tasas de material removido de la madera	45
Tabla 14: Propiedades del latón	46
Tabla 15: Volumen removido del latón.....	46
Tabla 16: Tasas de material removido del latón.....	46
Tabla 17: Propiedades del aluminio	47
Tabla 18: Volumen removido del aluminio.....	47
Tabla 19: Tasas de material removido del aluminio.....	47
Tabla 20: Propiedades del acero inoxidable	48
Tabla 21: Volumen removido del acero inoxidable	48
Tabla 22: Tasas de material removido del acero inoxidable	48
Tabla 23: Propiedades del cemento y gres porcelánico.....	49
Tabla 24: Costos de elaboración del prototipo de máquina.....	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Maquinado por chorro de agua abrasivo (Singal, 2008).....	16
Figura 2: Modelado en elementos finitos de la pieza de trabajo (Hassan & Kosmol, 1999).....	17
Figura 3: Desplazamientos de la pieza de trabajo en $t = 0.23 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999).....	19
Figura 4: Desplazamientos de la pieza de trabajo en $t = 0.27 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999).....	20
Figura 5: Desplazamientos de la pieza de trabajo en $t = 0.37 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999).....	20
Figura 6: Esfuerzos de Von Mises de la pieza de trabajo en $t = 0.23 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999).....	21
Figura 7: Esfuerzos de Von Mises de la pieza de trabajo en $t = 0.27 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999).....	21
Figura 8: Esfuerzos de Von Mises de la pieza de trabajo en $t = 0.37 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999).....	22
Figura 9: Deformaciones de la pieza de trabajo en $t = 0.23 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999).....	22
Figura 10: Deformaciones de la pieza de trabajo en $t = 0.27 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999).....	23
Figura 11: Deformaciones de la pieza de trabajo en $t = 0.37 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999).....	23
Figura 12: Influencia de la velocidad en erosión de materiales (Goodwin, 1969).....	26
Figura 13: Esquema del rango de erosión en un ángulo de ataque (Ives & Ruff, 1978)	30
Figura 14: Ilustración del sistema de motor-bomba.....	32
Figura 15: Motobomba HONDA GC190 (HELMUTH, 2017).....	33
Figura 16: Manguera convencional.....	33
Figura 17: Manguera de alta presión.....	34
Figura 18: Pistola dosificadora.....	35
Figura 19: Barra pulverizadora.....	36
Figura 20: Boquilla con ángulo pulverizador de 0°	36
Figura 21: Cámara de mezcla del cabezal de corte.....	37
Figura 22: Sonda con aspiración ajustable.....	38
Figura 23: Contenedor de abrasivo.....	39
Figura 24: Abrasivo (Arena sílice).....	39
Figura 25: Estructura de la mesa de corte.....	40
Figura 26: Bandeja contenedora de agua.....	40
Figura 27: Superficie de trabajo de mesa de corte.....	41
Figura 28: Guía corta con soporte para el sistema de corte.....	41
Figura 29: Guía larga.....	41
Figura 30: Guía con rodamientos.....	42
Figura 31: Boquilla de corte.....	43

Figura 32: Prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo ensamblado en INVENTOR.....	43
Figura 33: Prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo ensamblado....	43
Figura 34: Prueba de corte en pieza de madera	45
Figura 35: Prueba de corte en pieza de latón.....	46
Figura 36: Pruebas de corte en piezas de aluminio	47
Figura 37: Prueba de corte en pieza de acero inoxidable	48
Figura 38: Prueba de corte en pieza de cemento	49
Figura 39: Prueba de corte en pieza de gres porcelánico	49
Figura 40: Comparación del volumen removido por una partícula abrasiva en cada material	50
Figura 41: Comparación de tasas de material removido de cada tipo de probeta (a)..	50
Figura 42: Comparación de tasas de material removido de cada tipo de probeta (b)....	51
Figura 43: Elipse cónica formada en la pieza de acero AISI 304.....	52
Figura 44: Tarjeta de seguridad para billetera (The fabricator, 2008).....	54
Figura 45: Manual de usuario de hidrolavadora	67
Figura 46(a): Manual de localización y reparación de averías	68
Figura 46(b): Manual de localización y reparación de averías.....	69
Figura 47:Manual del propietario del motor HONDA GC 190.....	70
Figura 48: Especificaciones del motor HONDA GC 190	71
Figura 49: Programa de mantenimiento del motor HONDA GC 190	72
Figura 50: Diagrama de conexiones del motor HONDA GC 190.....	73

INTRODUCCIÓN

La tecnología de corte por chorro de agua es una de las áreas que más crece en el mundo (Burnham, 2015). No hay ningún material que no pueda ser cortado por este método. El corte por chorro de agua empezó su desarrollo industrial a inicios de la década de 1970, cortando materiales blandos como cartón. A mediados de la década de 1980, el Dr. Mohamed Hashish junto con su equipo desarrolló el corte por chorro de agua abrasivo, ampliando así las capacidades de la herramienta para cortar cualquier tipo de material duro (Burnham, 2015). Este método de corte trabaja forzando a un determinado caudal de agua altamente presurizado a través de un orificio de un diámetro bastante pequeño, formando un delgado chorro de agua de alta velocidad. Este chorro impacta el material con una gran fuerza en un área muy reducida, lo que genera pequeñas grietas que con el continuo impacto erosiona el material permitiendo el corte por micro erosión (Vhymeister & Fuentes, 2004).

En el corte por chorro de agua los materiales blandos se cortan por el proceso de agua pura. Mientras que para materiales más duros se utilizan agua con una adición de productos abrasivos que se incorporan en el cabezal de corte, esta incorporación al flujo de agua supersónico multiplica por mil la potencia de corte. El chorro de agua con abrasivo corta el material de una manera diferente a otros procesos, dado que es un procedimiento en frío. Se elimina una cantidad muy pequeña de material con cada impacto de los granos del abrasivo debido su erosión a velocidades supersónicas (Flow, 2015). Las principales ventajas de un proceso de corte en frío es que los bordes cortados son homogéneos y no existen zonas afectadas por el calor lo cual permite conservar las propiedades mecánicas del material. En el 2015 el Dr. Hashish mencionó que en las pruebas realizadas en Flow junto con Michigan Tech (empresas de maquinaria de corte por chorro de agua abrasivo), se realizaron cortes a través de termopares engarzados en

muestras de aluminio. Los datos demostraron que el aumento de la temperatura local se encuentra en el orden de unas pocas decenas de grados, una magnitud insuficiente para provocar ningún tipo de efecto mecánico, metalúrgico, ni térmico.

Dada la importancia de la precisión y la baja temperatura durante un proceso de corte se ha identificado el corte por chorro de agua abrasivo como una solución viable para ser implementada. Además este método de corte brinda una amplia gama de aplicación en diferentes tipos de materiales (Aich, Banerjee, Bandyopadhyay, & Das, 2014) y sectores.

Objetivo general

En el presente trabajo de titulación se diseñará y construirá un prototipo de máquina de corte de por chorro de agua abrasivo. Con el prototipo se realizarán cortes, en piezas de hasta de 4 mm de espesor, rectos en diferentes materiales como: madera, cemento, gres porcelánico, latón, aluminio y aceros (AISI).

Objetivos específicos

- Diseñar y construir un prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo que ilustre el proceso de corte por micro erosión.
- Adaptar y modificar todos los componentes adquiridos para obtener un equipo funcional de corte.
- Demostrar que los resultados de las ecuaciones postuladas en este proyecto de titulación justifican los resultados prácticos.
- El prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo debe ser capaz de realizar cortes rectos en los materiales propuestos de hasta 4 mm de espesor.
- Optimizar el proceso de corte para reducir costos de operación.
- Demostrar las ventajas del corte por chorro de agua abrasivo como un proceso de mecanizado no convencional.

- El equipo de corte estará en condiciones para ser automatizado posteriormente y realizar cortes programados.

MÉTODOS

Especificaciones del Equipo

Tabla 1: Especificaciones técnicas del sistema

Requerimientos de diseño	-Diseño de un sistema de corte por chorro de agua abrasivo que ilustre el proceso de micro erosión -El costo del prototipo de máquina debe ser inferior al de los ofertados por el mercado industrial
Características de funcionamiento	Sistema motor – bomba, presurizado de agua
Características de seguridad	Pestillo de seguridad en la pistola dosificadora
Pesos máximos	100kg
Dimensiones máximas	1.50 metros de largo, 1.35 metros de ancho y 1.90 metros de altura
Requerimiento de cargas	Pesos de piezas a cortar y de elementos de máquina
Requerimientos ambientales	Decreto N° 1.802 - Políticas básicas ambientales
Requerimientos de pruebas	Funcionamiento apropiado del proceso de corte
Certificaciones que debe aprobar	Ninguno
Planes de pruebas	Pruebas de funcionamiento para garantizar cortes precisos
Requerimientos de pruebas específicas	Correcto ensamble del sistema y calibración del cabezal de corte
Requerimientos de Confiabilidad y Garantía	1 año de garantía
Vida Útil	3 años
Tiempo de trabajo que debe cumplir sin problemas	Un mes (5 horas)
Requerimientos de Mantenimiento	Revisión de filtros de aceite y aire del motor
Costos Máximos de Mantenimiento	USD\$ 25 cada 5 horas de trabajo
Requerimientos Financieros de Producción	Proyecto autofinanciado
Costo Máximo	USD\$ 2500

Características del proceso de corte por chorro de agua abrasivo

El proyecto de titulación a desarrollarse consiste en el diseño y construcción de los componentes para un prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo. Fue necesario realizar una investigación exhaustiva sobre este proceso de corte, para analizar y comprender los elementos que son necesarios para el desarrollo de esta máquina de corte: cabezal de corte, bomba de alta presión, abrasivo, equipo y herramientas a usarse.

El proceso de corte por chorro de agua abrasivo utiliza el principio básico de erosión por agua. En este proceso, se utiliza un chorro de agua concentrado de alta velocidad para cortar cualquier material. Utiliza la energía cinética de la partícula de agua para erosionar al material en la superficie de contacto, la velocidad del chorro de agua es supersónica. Para cortar materiales de mayor dureza hace falta usar partículas abrasivas que ayudan al proceso de erosión (Mech4study, 2014).

El corte por chorro de agua abrasivo posee consideraciones ambientales positivas, ya que al utilizar este proceso de corte se puede evitar un ruido excesivo y también se puede evitar que el abrasivo se eleve. Además la máquina de corte por chorro de agua abrasivo no genera gases nocivos o humo, y no hay contaminación por aceites de corte. El agua residual generado por la máquina de corte contiene pequeñas cantidades de finos sólidos que en caso de ser necesario por las regulaciones locales debe ser filtrada para enviar directamente a un drenaje de aguas residuales (OMAX, 2017).

El maquinado por chorro de agua abrasivo puede cortar un amplio rango de materiales de varias durezas, reflectividad y conductividad. La mayoría de materiales pueden ser cortados hasta de un espesor de 100 mm. La velocidad de corte depende del material que se va a maquinar (Singal, 2008). Un diagrama esquemático del equipo necesario para el corte por chorro de agua abrasivo se muestra en la Figura 1.

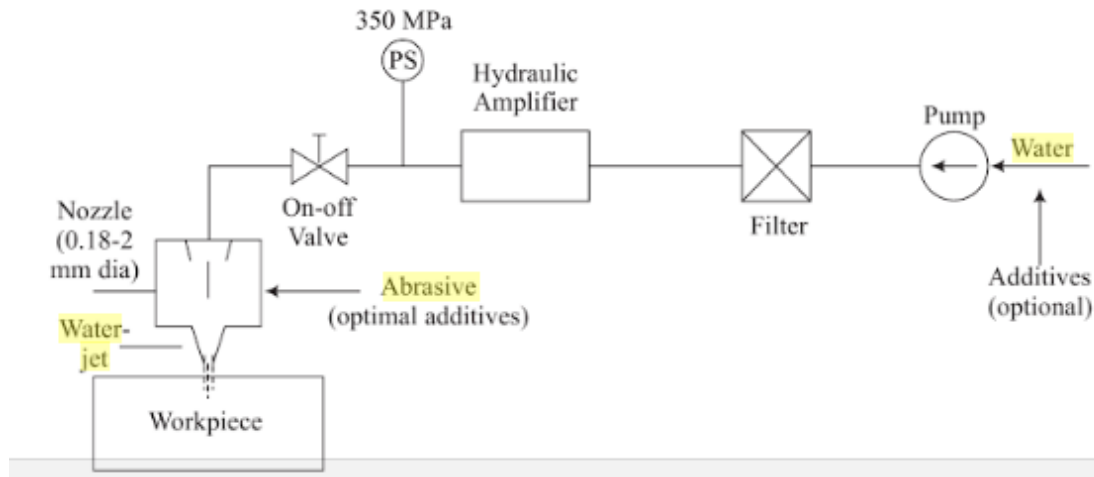


Figura 1: Maquinado por chorro de agua abrasivo (Singal, 2008)

Ejemplo de un modelo de elementos finitos para el mecanizado por chorro de agua abrasivo

Comprender el comportamiento exacto de la erosión de los materiales de una pieza mecanizada por chorro de agua abrasivo continúa siendo complejo. A continuación, se muestra un ejemplo de modelado del proceso de maquinado por chorro de agua abrasivo, desarrollado por Hassan & Kosmol en 1999, utilizando un método de elementos finitos para explicar la interacción entre la partícula abrasiva y la pieza de trabajo. En este modelado se predice el comportamiento del proceso. El principal objetivo de este análisis es desarrollar un modelo de elementos finitos que permita predecir la profundidad de corte. Para este modelo se toman en cuenta diferentes factores que en análisis previos de otros autores se ignoran, como la representación precisa del comportamiento constitutivo del material de la pieza de trabajo en condiciones de carga dinámica (Hassan & Kosmol, 1999).

Para el modelado en la pieza que se analizará (Figura 2), se utilizó un total de 250 elementos, con dimensiones de 0.1mm x 0.1mm x 0.1mm. El número total de nodos es de 1566. Las dimensiones de la pieza de trabajo son 0.5mm x 1mm x 0.5mm. Los datos del material de trabajo se muestran en la Tabla 2. En el maquinado por chorro de agua

abrasivo, la pieza de trabajo se comporta sin linealidad geométrica bajo las cargas de impacto aplicadas, por lo que se necesita hacer un análisis no lineal. Para el desarrollo de este caso se utilizó un software de Análisis de tensión dinámica no lineal y simulación de eventos ALGOR Accupak / VE (Hassan & Kosmol, 1999).

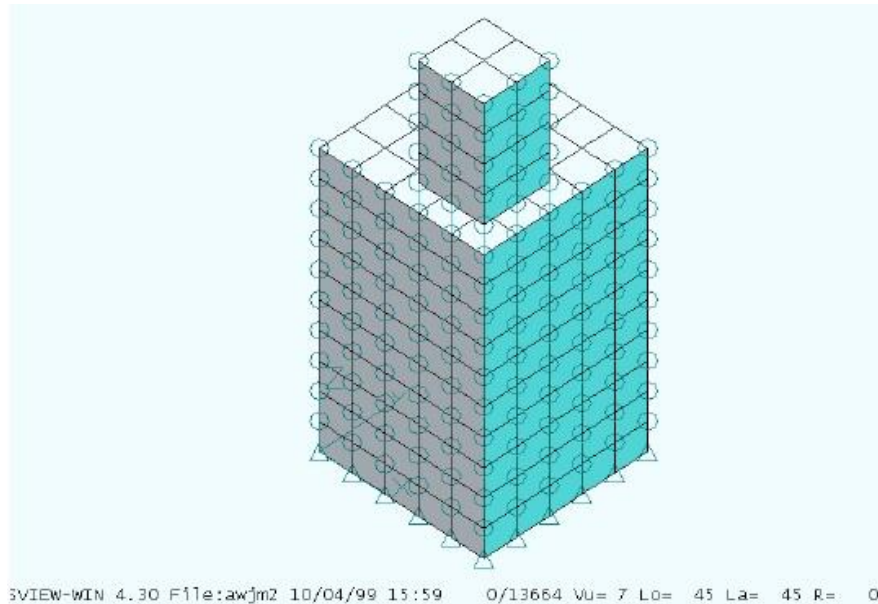


Figura 2: Modelado en elementos finitos de la pieza de trabajo (Hassan & Kosmol, 1999)

Tabla 2: Datos del material de la pieza de trabajo (Hassan & Kosmol, 1999)

Material	Acero al carbono
Módulo de Young	207E3 MPa
Razón de Poisson	0.3
Densidad	7850 kg/m^3
Esfuerzo de fluencia	207 MPa
Módulo de endurecimiento por deformación	34.5E3 MPa

En el modelo constitutivo utilizado para la pieza de trabajo se seleccionó un endurecimiento isotrópico elastoplástico de Von Mises con endurecimiento lineal por deformación. Usando este modelo, la erosión de la pieza de trabajo se observa de forma simultánea en la pantalla (Hassan & Kosmol, 1999).

La partícula abrasiva es modelada usando 16 sólidos con veinte asentimientos. En la Tabla 3 se muestra el modelo elástico lineal que se elige para el material de partículas abrasivas. Las dimensiones de cada elemento son 0.1mm x 0.1mm x 0.1mm. Las condiciones de corte por chorro de agua abrasivo se presentan en la Tabla 4 (Hassan & Kosmol, 1999).

Tabla 3: Datos del material abrasivo (Hassan & Kosmol, 1999)

Material	Garnet
Módulo de Young	248E3 MPa
Razón de Poisson	0.27
Densidad	4325 kg/m ³

Tabla 4: Condiciones del maquinado por chorro de agua abrasivo (Hassan & Kosmol, 1999)

Velocidad de partícula abrasiva	400 m/s
Tamaño de partícula abrasiva	400 μm
Número de malla	60
Soporte de distancia	0.1 mm

En la Tabla 5, se muestran las especificaciones de los elementos en contacto 3D, que se agregan entre la partícula abrasiva y la pieza de trabajo que hacen posible la interacción completa, incluida la transferencia de momento entre la partícula abrasiva y la pieza de trabajo. Los elementos de contacto son característicos por la no linealidad del elemento donde la matriz de rigidez del mismo cambiará en función de alguna variable especificada. Cuando las superficies están en contacto, la matriz de rigidez del elemento de contacto es positiva y las fuerzas de contacto se transfieren a través del elemento de contacto. En cambio, cuando no están en contacto las superficies, la rigidez del elemento de contacto es cero y las fuerzas no se transfieren (Hassan & Kosmol, 1999).

Tabla 5: Especificaciones de los elementos de contacto (Hassan & Kosmol, 1999)

Área de contacto	0.01 mm ²
Distancia de contacto compresivo	0.01
Número de elementos	9
Tipo de análisis no lineal	Formulación Lagrangiana actualizada
Modelo material	Ley de fuerza de contacto bi-lineal

Los resultados obtenidos en el ejemplo anterior son los siguientes.

Para el desplazamiento de la pieza de trabajo, los resultados se pueden observar en la Figura 3, Figura 4 y Figura 5.

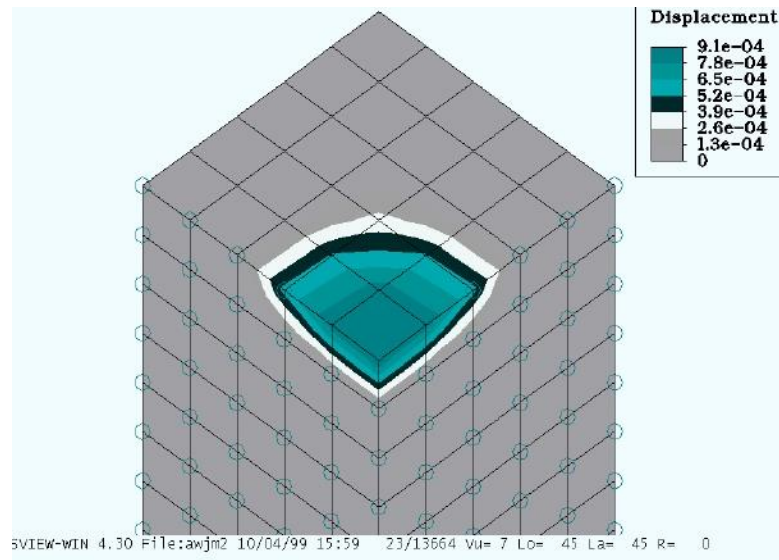


Figura 3: Desplazamientos de la pieza de trabajo en $t = 0.23 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999)

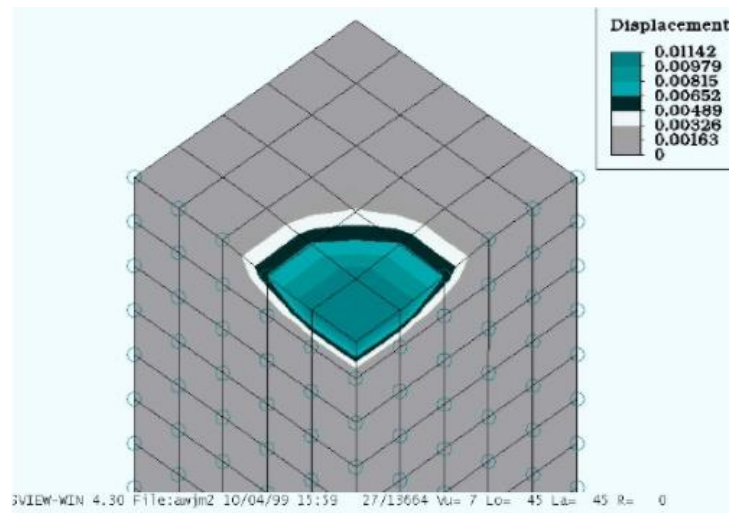


Figura 4: Desplazamientos de la pieza de trabajo en $t = 0.27 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999)

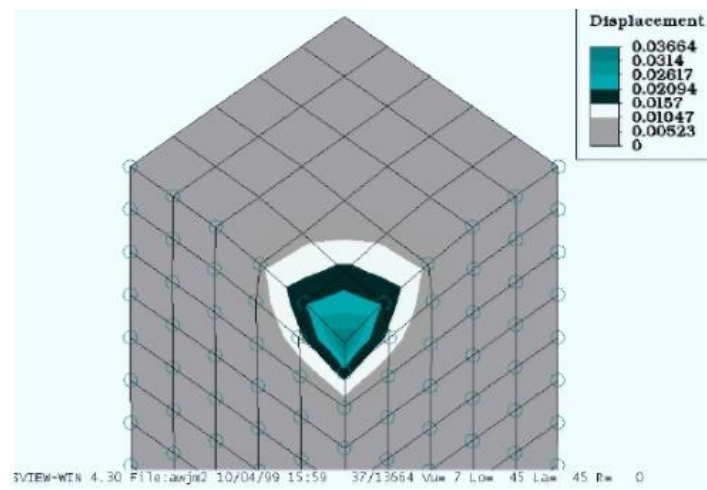


Figura 5: Desplazamientos de la pieza de trabajo en $t = 0.37 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999)

Para los esfuerzos de Von Mises de la pieza de trabajo, los resultados se pueden observar en la Figura 6, Figura 7 y Figura 8.

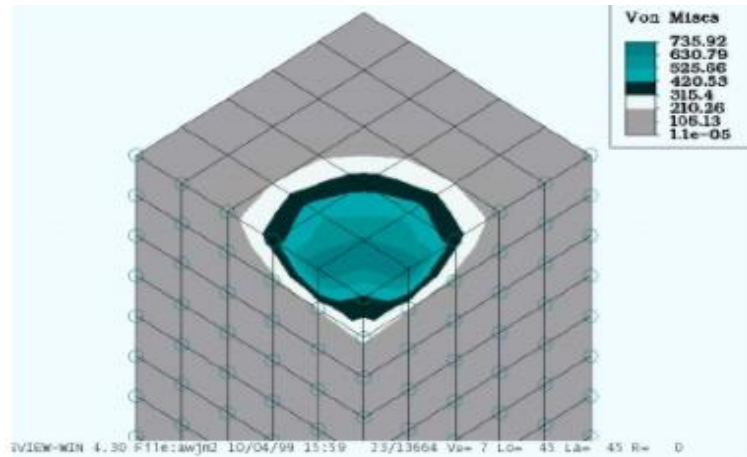


Figura 6: Esfuerzos de Von Mises de la pieza de trabajo en $t = 0.23 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999)

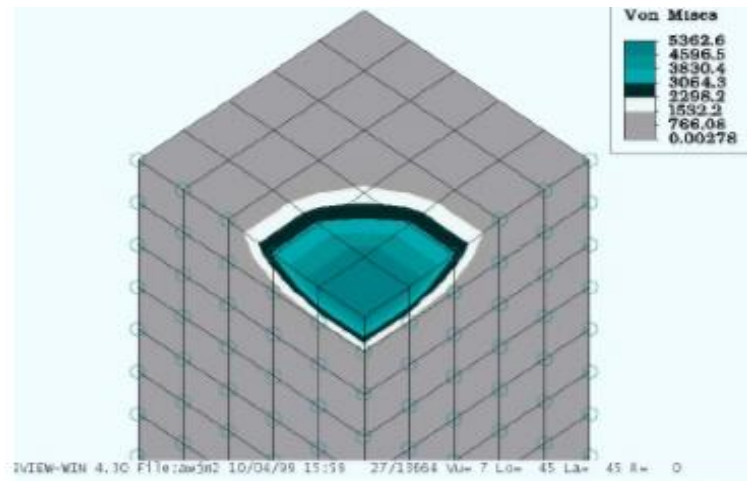


Figura 7: Esfuerzos de Von Mises de la pieza de trabajo en $t = 0.27 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999)

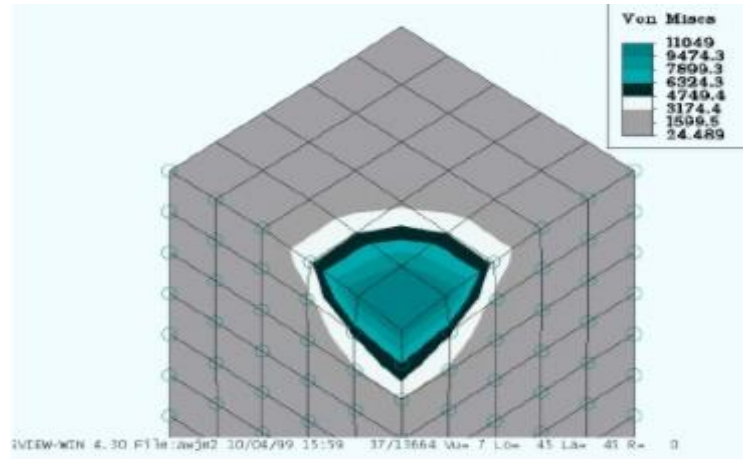


Figura 8: Esfuerzos de Von Mises de la pieza de trabajo en $t = 0.37 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999)

Para las deformaciones de la pieza de trabajo, los resultados se pueden observar en la Figura 9, Figura 10 y Figura 11.

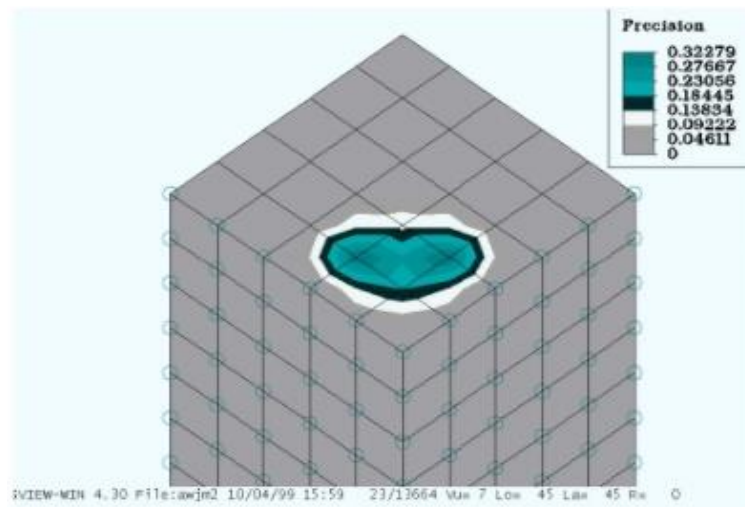


Figura 9: Deformaciones de la pieza de trabajo en $t = 0.23 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999)

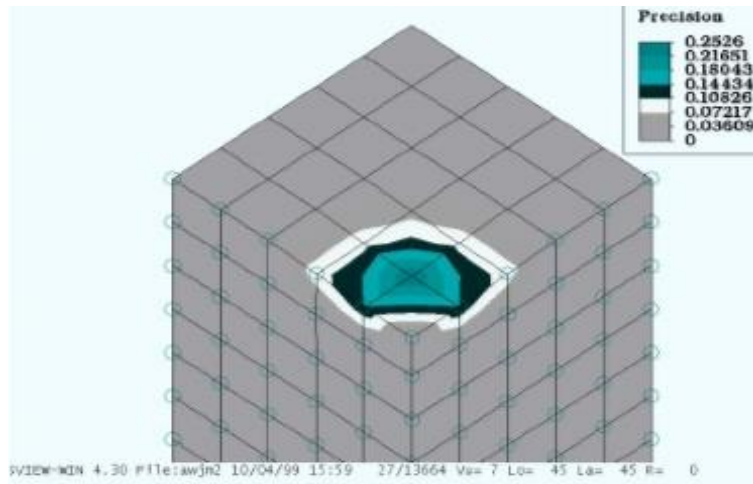


Figura 10: Deformaciones de la pieza de trabajo en $t = 0.27 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999)

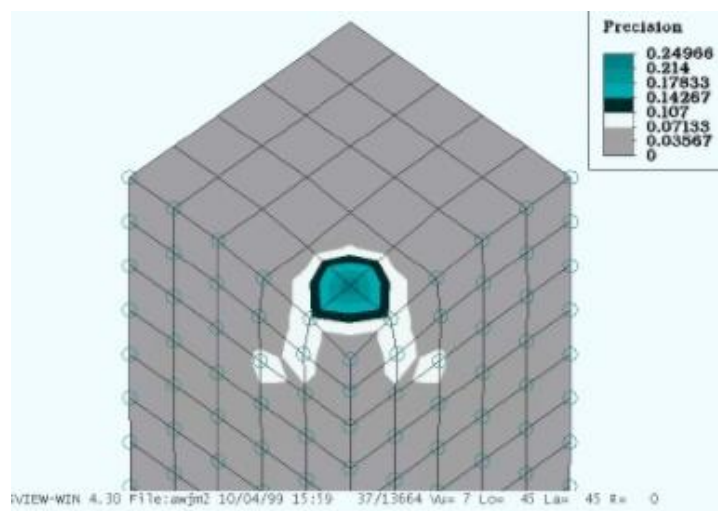


Figura 11: Deformaciones de la pieza de trabajo en $t = 0.37 \mu\text{s}$ (Hassan & Kosmol, 1999)

Proceso de corte por micro erosión

Principio de Bernuolli y velocidad aproximada de salida del chorro de agua

Para lograr generar un chorro de agua apropiado para el corte, es necesaria una alta velocidad del agua. Para esto se utiliza un cabezal de corte que posea un orificio de salida de 0.18 – 0.2 mm de diámetro. Para calcular la velocidad de salida del chorro de

agua se utilizan las siguientes ecuaciones (Momber & Kovacevic, 1998) aplicando el principio de Bernuolli:

$$P_{atm} + \frac{\rho_w}{2} \cdot v_0^2 + \rho_w \cdot g \cdot h_1 = p + \frac{\rho_w}{2} \cdot v_{pipe}^2 + \rho_w \cdot g \cdot h_2 \quad [1]$$

En donde:

P_{atm} es la presión atmosférica.

P es la presión de salida.

ρ_w es la densidad del agua.

g es la gravedad.

h_1 y h_2 son alturas.

v_{pipe} es la velocidad en el tubo.

$h_1 = h_2$, $p_{atm} \ll p$, y $v_0 \gg v_{pipe}$, la velocidad aproximada de salida del chorro de agua v_{0th} es (Momber & Kovacevic, 1998):

$$v_{0th} = \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}} \quad [2]$$

Velocidad de salida del chorro de agua práctico

Por medio de la velocidad aproximada de salida del chorro de agua, v_{0th} , es posible calcular la velocidad de salida del chorro de agua práctico, v_0 , por medio de la siguiente ecuación (Momber & Kovacevic, 1998):

$$v_0 = \mu \cdot v_{0th} = \mu \sqrt{\frac{2 \cdot p}{\rho_w}} \quad [3]$$

En donde μ es el coeficiente de eficiencia, y por lo general tiene un valor de $\mu = 0.85$.

Velocidad de las partículas abrasivas

La velocidad de las partículas abrasivas es una función del abrasivo y del caudal de chorro de agua, la velocidad del chorro de agua de accionamiento, la geometría de la

boquilla y las pérdidas por fricción. La siguiente relación se puede utilizar para estimar la velocidad de las partículas abrasivas, v_{p0} (Henning, Miles & Stang, 2011):

$$v_{p0} = \frac{c_1}{c_1 + R} \cdot v_{w0} \quad [4]$$

En donde:

$R = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_w}$ es una relación entre flujos máxicos de las partículas y el agua.

$v_{w0} = v_0$ es la velocidad ideal de salida del chorro de agua.

$c_1 < 1$ está dado por la geometría de la boquilla y las relaciones de eficiencia de aceleración.

Tomando en cuenta las pérdidas por fricción en la boquilla de corte, y el momento que se transfiere a las partículas abrasivas, la velocidad de salida puede ser definida como $v_w = \eta_w \cdot v_{w0}$, donde $\eta_w < 1$ y es una función de la velocidad inicial del chorro de agua. Entonces la velocidad de las partículas abrasivas puede ser representada como (Henning, Miles & Stang, 2011):

$$v_p = \frac{c_1}{c_1 + R} \cdot \eta_w \cdot v_{w0} \quad [5]$$

En la figura 12 se aprecia la influencia e importancia que tiene la velocidad en el proceso de corte por medio de un chorro de agua abrasivo.

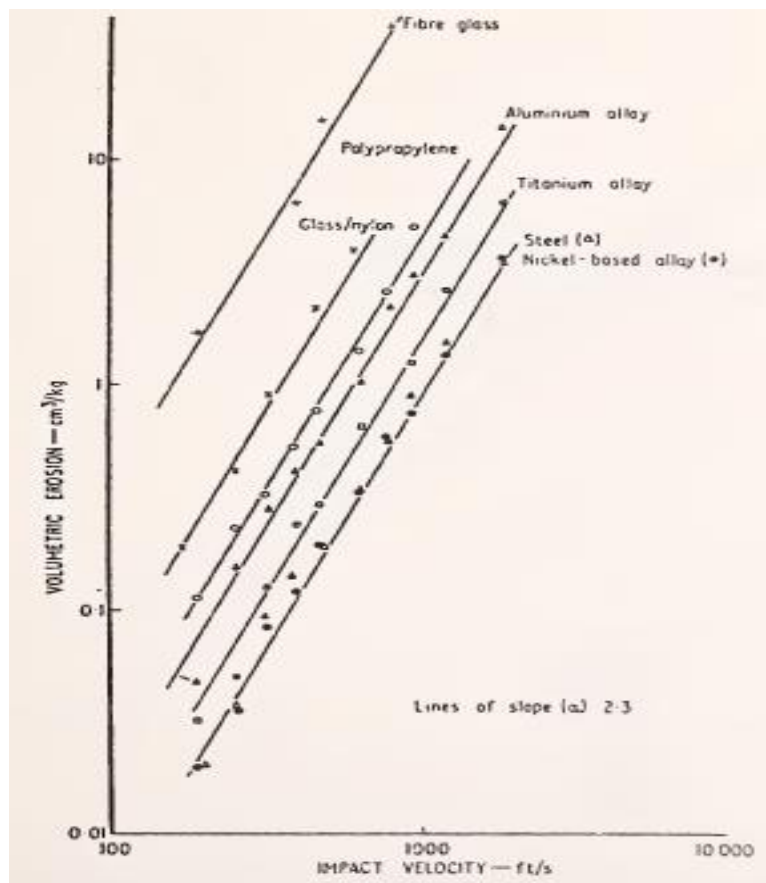


Figura 12: Influencia de la velocidad en erosión de materiales (Goodwin, 1969)

Potencia hidráulica

Conocer la potencia necesaria para llevar a cabo el proceso de corte es importante para la selección de equipos. La potencia hidráulica, P_{hyd} , del chorro puede ser calculada por la siguiente ecuación (Henning, Miles & Stang, 2011):

$$P_{hyd} = p \cdot \dot{V}_w = \frac{p \cdot \dot{m}_w}{\rho_w} \quad [6]$$

En donde \dot{V}_w es el caudal del agua.

Potencia cinética

La potencia cinética $P_{p,kin}$ de las partículas abrasivas se puede expresar con la siguiente fórmula (Henning, Miles & Stang, 2011):

$$P_{p,kin} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m}_p \cdot v_p^2 \quad [7]$$

Definiendo una razón de la velocidad de abrasivo, ψ_P , como la relación entre la velocidad media de las partículas abrasivas y la velocidad inicial del chorro de agua en el orificio (Henning, Miles & Stang, 2011).

$$\psi_P = \frac{v_p}{v_{w0}} \quad [8]$$

Introduciendo la ecuación [8] en la ecuación [5] se obtiene la siguiente expresión:

$$\psi_P = \frac{c_1}{c_1+R} \cdot \eta_w \quad [9]$$

Los datos experimentales que se pueden encontrar con las ecuaciones antes mencionadas pueden utilizarse para analizar su efecto sobre la potencia cinética del chorro como se describe en la ecuación [7] y se obtiene la siguiente fórmula (Henning, Miles & Stang, 2011):

$$P_{P,kin} = 0.5 \cdot v_{w0}^2 \cdot \psi_p^2 \cdot \dot{m}_w \cdot R \quad [10]$$

La velocidad del agua, v_{w0} , en el orificio es gobernada por la presión p y la densidad ρ_w , da como resultado $v_{w0}^2 = \frac{2p}{\rho_w}$ reemplazando en la ecuación [10] se obtiene (Henning, Miles & Stang, 2011):

$$P_{P,kin} = \frac{p \cdot \dot{m}_w}{\rho_w} \cdot R \cdot \psi_p^2 \quad [11]$$

$$P_{P,kin} = P_{hyd} \cdot R \cdot \psi_p^2 \quad [12]$$

Con la ecuación [9] se puede conseguir la siguiente expresión:

$$P_{P,kin} = \frac{\eta_w^2 \cdot c_1^2 \cdot R}{(c_1+R)^2} \cdot P_{hyd} \quad [13]$$

Factor de eficiencia abrasivo

De la ecuación [8] se puede calcular el factor de eficiencia abrasivo Ω_A , que representa la capacidad del chorro de agua para transformar la potencia hidráulica en

potencia cinética de las partículas. Puede ser derivado (Henning, Miles & Stang, 2011) así:

$$\Omega_A = \frac{\eta^2 w \cdot c_1^2 \cdot R}{(c_1 + R)^2} \quad [14]$$

Volumen erosionado

El chorro de agua realiza un corte muy estrecho y posee fuerzas de corte muy bajas, esto permite realizar diseños de piezas con partes intrincadas que serían imposibles de realizar con otros procesos de fabricación convencionales (OMAX, 2017).

Para cortar por medio del chorro de agua abrasivo es necesario el contacto con el material en un área muy reducida y con una gran fuerza de impacto, para generar pequeñas grietas que con la continuidad del impacto del chorro erosiona el material.

En 1960 se consideró a los procesos dúctiles de erosión como un mecanismo de micro-mecanizado. Se trató al problema como un caso de carácter plástico de respuesta al material a través de una tensión de flujo, σ_f . Se calculó la trayectoria de una partícula de corte y material removido, y el volumen erosionado, V , fue determinado por la siguiente expresión (Finnie, 1960):

$$V = \frac{m \cdot v_0^2}{\sigma_f \cdot k \cdot d} g(\alpha) \quad [15]$$

En donde:

m es la masa de la partícula.

v_0 es la velocidad de impacto.

k es la razón de la fuerza vertical a la fuerza horizontal en la partícula.

$g(\alpha)$ es una función que describe el efecto del ángulo de ataque (α).

La ecuación [15] se aproxima bastante a las características de erosión de partículas sólidas, pero posee discrepancias cuantitativas en relación con el efecto del estrés de flujo,

el exponencial de la velocidad y aplicabilidad del propio modelo para ángulos de ataque cercanos a $\alpha = 90^\circ$.

En 1972 se desarrolló un método para describir las acciones de deformación y mecanizado observados utilizando la teoría de indentación y una ecuación de balance de energía (Sheldon & Kanhere, 1972). Los resultados que obtuvieron difieren a los de la ecuación [14], dando el volumen de erosión, V , como:

$$V = k \frac{d^3 v_0^3 (\rho_p)^{\frac{3}{2}}}{H^{\frac{3}{2}}} \quad [16]$$

En donde:

d es el diámetro de la partícula.

ρ_p es la densidad de la partícula.

H es el valor de la dureza Vickers del material.

Los avances tecnológicos involucran el análisis del impacto de múltiples partículas, generalmente que se mantienen con un comportamiento estable a largo plazo. Hay varios efectos que alteran al problema básico de erosión. Estos efectos son los impactos de partículas dentro del flujo incidente, una amplia gama de ángulos de ataque simultáneos, fragmentación de partículas, blindaje de superficie debido a las partículas de rebote y efectos de incrustación de partículas, entre otros. Es necesario realizar varios análisis a la erosión de partículas para medir las tasas significativas de erosión de los materiales (Ruff & Wiederhorn, 1979).

Un modelo más viable desarrollado por un grupo que trabaja en TU Delft, Países Bajos, demuestra una manera simple pero confiable para predecir la profundidad de penetración. La potencia de la fase abrasiva del chorro de agua abrasiva puede estimarse como (IIT Kharagpur, 2017):

$$P_{abr} = \frac{1}{2} \dot{m}_{abr} v_p^2 \quad [17]$$

En donde:

$$\dot{m}_{abr} = \dot{m}_p$$

Con la ecuación [17] se puede determinar la tasa de remoción de material con la siguiente expresión:

$$MRR = \frac{P_{abr}}{u_{job}} [18]$$

En donde:

u_{job} Es el requisito de energía específica en maquinar un material en corte por chorro de agua abrasivo.

El ángulo de ataque tiene una gran influencia en el corte por chorro de agua abrasivo, esto se puede observar en la Figura 13.

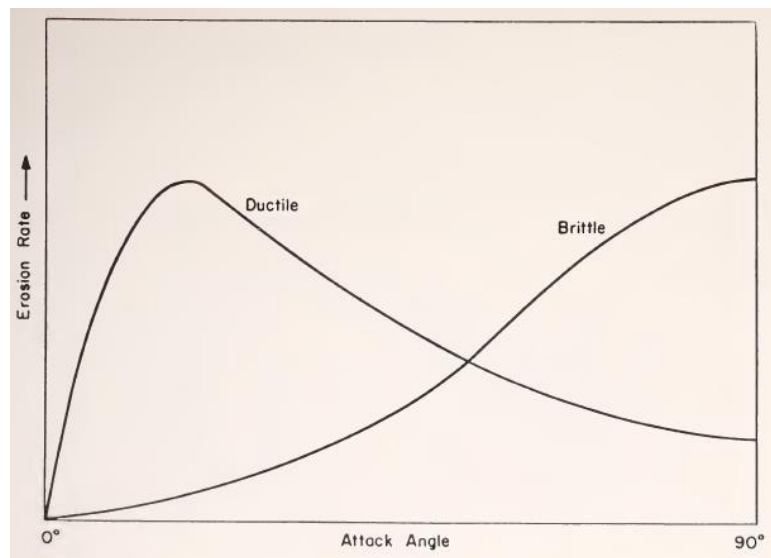


Figura 13: Esquema del rango de erosión en un ángulo de ataque (Ives & Ruff, 1978)

Proceso de mezcla de agua y abrasivo

Por lo general en el proceso de corte por chorro de agua abrasivo se utilizan tolvas automatizadas para la distribución del material abrasivo. Para la construcción del

prototipo de máquina de este proyecto se evitó el uso de una tolva. En lugar de ésta, se acopló un sistema de succión por medio de una sonda de aspiración que utiliza el efecto Venturi.

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\gamma} + z_1 = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} + z_2 \quad [19]$$

En donde:

V es velocidad del fluido en la sección considerada.

g es la aceleración gravitatoria.

P es la presión en cada punto de la línea de corriente.

γ es el peso específico

z es la altura, en vertical, sobre una cota de referencia.

Funcionamiento del sistema motor-bomba

Conocidos los factores necesarios para llevar a cabo el corte de materiales por chorro de agua abrasivo se procede a seleccionar los equipos necesarios. La bomba es el núcleo del sistema de corte de agua abrasivo, debido a que se aplica una presión al agua de miles de kilogramos por centímetro cuadrado. Debe cumplir altas exigencias de uso y precisión.

El motor se encarga del sistema de bombeo (componente 1, Figura 14). Para que las bombas puedan funcionar correctamente, necesitan un caudal de agua adecuado (componente 2, Figura 14). Antes de ser presurizada, el agua fluye hacia un estuche de doble pared alrededor del motor, para enfriarlo (componente 3, Figura 14). Esto reduce el ruido y a la vez extiende el tiempo de uso del equipo. El motor acciona un plato tambaleante, que mueve los tres pistones arriba y abajo (componente 4, Figura 14). El equipo adquirido tiene posee un total de tres pistones. Cada uno de ellos trabaja con una válvula de succión y una de presión. El movimiento descendente de los pistones (componente 6, Figura 14) lleva el agua a través de una válvula de succión (componente

5, Figura 14) y hasta el cilindro o cámara del pistón. Cuando el pistón se eleva de nuevo, empuja el agua fuera de la cámara del pistón y a una válvula de presión (componente 7, Figura 14) hacia el inyector (componente 8, Figura 14). El agua entonces fluye fuera de la bomba (componente 9, Figura 14) hacia la pistola de alta presión (Kärcher, 2017).

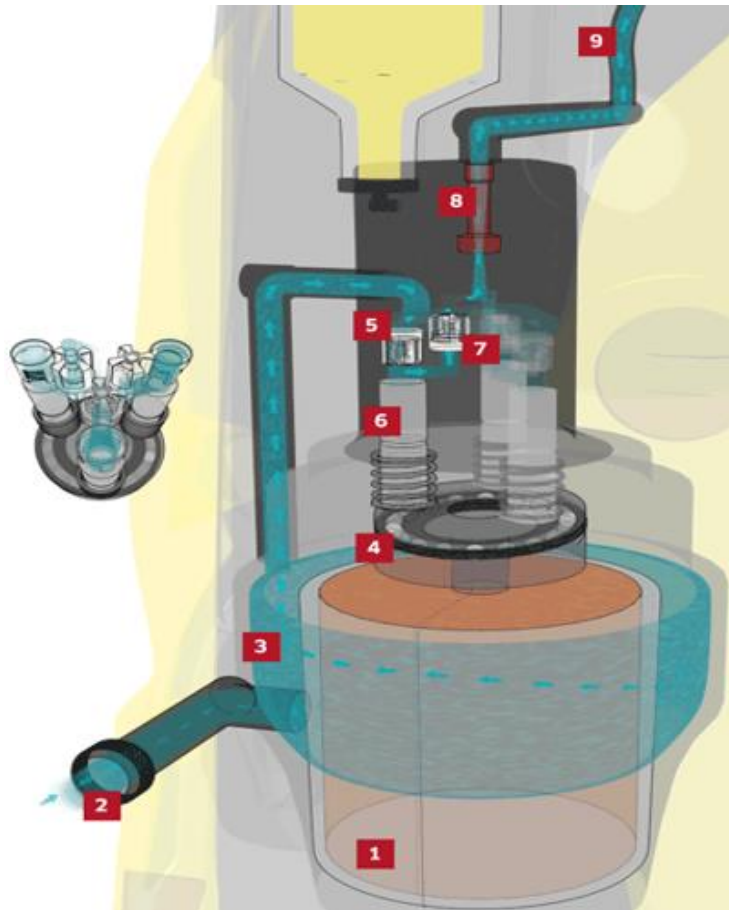


Figura 14: Ilustración del sistema de motor-bomba

DESARROLLO DEL TEMA

Diseño, selección de componentes y ensamble del prototipo de máquina

Hidrolavadora con motor a gasolina

El motor utilizado para accionar la bomba que presuriza el agua es un equipo HONDA GC190 (ver Figura 15) que puede generar hasta 22 MPa (3200 PSI).



Figura 15: Motobomba HONDA GC190 (HELMUTH, 2017)

En la Tabla 6 se encuentran las características de la motobomba seleccionada.

Tabla 6: Propiedades del Motor HONDA GC190 (HELMUTH, 2017)

Grado del Motor	4kw/6hp
Presión de Trabajo	22MPa/3200 psi
Volumen de Agua	9.5 LPM/2.5 GPM
Tipo de Motor	4 tiempos

Para brindar el caudal y el flujo másico (20 kg/min) necesario que la motobomba necesita para trabajar hace falta usar una manguera multipropósito de diámetro interno de $\frac{1}{2}$ "", con una presión de trabajo de 2 MPa (300 PSI) y un pulso máximo de presión de 6 MPa (900 PSI). En la Figura 16, se puede ver la manguera convencional utilizada.



Figura 16: Manguera convencional

Manguera de alta presión

Para transportar el agua que fluye fuera de la bomba hacia la pistola dosificadora, hace falta utilizar una manguera de alta presión que trabaja hasta con 24.8 MPa (3600 PSI) y soporta hasta 60°C (140 °F). En la Figura 17 se observa la manguera utilizada.



Figura 17: Manguera de alta presión

Pistola dosificadora

La manguera de alta presión se conecta a una pistola dosificadora, Figura 18, que permite controlar la aplicación de agua (al aplastar el gatillo) sobre la superficie de trabajo (Máquinas y herramientas, 2014). Para el uso de la misma, se modificó el sistema, añadiéndole un pestillo que sujeta el gatillo para que la pistola siempre trabaje a su máxima capacidad. La pistola dosificadora de KÄRCHER posee propiedades que se presentan en la Tabla 7.



Figura 18: Pistola dosificadora

Tabla 7: Propiedades de pistola dosificadora (KÄRCHER, 2017)

Máxima Presión	27 MPa - 4000PSI
Máximo Caudal	20 L/min – 5.3 GPM
Máxima Temperatura	60 °C – 140 °F
Gatillos	2

Barra pulverizadora y boquilla pulverizadora

La pistola dosificadora se debe conectar a una barra pulverizadora, ver Figura 19. En el otro extremo de esta barra se inserta una boquilla que posee un ángulo pulverizador de 0°, Figura 20, con las características apropiadas para después ser acoplada eficientemente a la cámara de mezcla del sistema de corte por chorro de agua abrasivo.



Figura 19: Barra pulverizadora



Figura 20: Boquilla con ángulo pulverizador de 0°

Cabezal de corte y cámara de mezcla

Para seleccionar un cabezal de corte para chorro de agua abrasivo se deben tener en cuenta diferentes factores como la eficiencia de mezcla, desgaste, tamaño del orificio de salida de mezcla, entre otros. Siendo uno de los más importantes, el que se provea un sistema ajustable para la alineación del chorro de agua en la boquilla, con el fin de obtener precisión en el corte. Un diseño correcto de la estructura garantiza que la mezcla de agua

y abrasivo salga del centro de la boquilla a máxima velocidad, además hace fácil detectar y solucionar los daños en la tubería de la boquilla. (KMT, 2017).

El cabezal de corte seleccionado es una cámara de mezcla utilizada para hidroarenado. Este tipo de boquillas permiten la proyección de arena u otro material abrasivo contra una superficie de trabajo, impulsándola con agua a presión (Italpresion, 2013).

En la Figura 21, se puede observar la cámara de mezcla del cabezal de corte que, está constituida por un sistema a presión (tubo Venturi) que aspira el abrasivo mediante una tubería indeformable y lo introduce en el chorro de agua a alta presión (Italpresion, 2013). La boquilla de hidroarenado fue modificada para reducir el diámetro del orificio de salida, de esta manera se obtiene más velocidad y un proceso de corte más eficiente.



Figura 21: Cámara de mezcla del cabezal de corte

Sonda con aspiración ajustable

El abrasivo entra a la cámara de mezcla del cabezal de corte por medio de una sonda con aspiración ajustable que permite aspirar el abrasivo de un contenedor. En este caso la sonda está ajustada para que aspire al abrasivo con un flujo másico de 9 kg/min. En la Figura 22 se puede observar a la sonda con aspiración ajustable (Italpresion, 2013).



Figura 22: Sonda con aspiración ajustable

Las configuraciones para ajustar la abertura del orificio de la sonda aspirante se presentan en la Tabla 8. Estas configuraciones solamente aplican para equipos compatibles con las propiedades mencionadas en la Tabla 6.

Tabla 8: Configuraciones del orificio de la sonda aspirante (Roosebertl, 2017)

Abertura del orificio	Diámetros de abrasivo empleado (mm)	Consumo de abrasivo (kg/min)
1/4	0.6 – 1.2 (abrasivo fino)	9
1/2	0.7 – 1.5 (abrasivo mediano)	6
1/1	1.5 – 2.5 (abrasivo grueso)	5.5

Contenedor de abrasivo

El recipiente que contiene el abrasivo posee un volumen de 15.000 cm³ (Figura 23) y debe poseer características que se acoplen al de la sonda con aspiración ajustable de la Figura 22. La manguera que transporta el abrasivo es una manguera convencional.

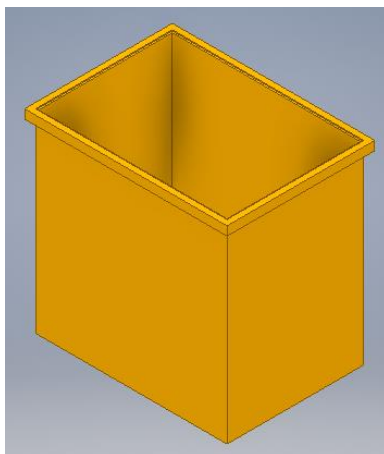


Figura 23: Contenedor de abrasivo

Abrasivo

El abrasivo utilizado para el proceso de corte propuesto es la arena sílice (Figura 24). Los usos industriales de la arena de sílice derivan de sus importantes propiedades físicas y químicas, destacándose especialmente su dureza, resistencia química y alto punto de fusión (CAMIMEX, 2012).

Este es un abrasivo que tiene una temperatura de fusión del orden de 1713°C y su densidad varía entre 2,5 y 2,8 g/cm³ (Taller de fundición, 2015).



Figura 24: Abrasivo (Arena sílice)

Mesa de corte

La mesa construida para el prototipo posee un diseño que permite trabajar cortes horizontales en los ejes X e Y. La mesa de corte permite ingresar piezas de trabajo hasta de 1.20m x 1.40m de diferentes materiales. Las piezas, son sujetadas por mordazas en la parte superior de la superficie de trabajo de la mesa. Además posee una bandeja en la parte inferior para almacenar el agua utilizada en el proceso y un desagüe con un filtro apropiado para retener al abrasivo y al material erosionado en el proceso.

La mesa está constituida por diferentes componentes: estructura (Figura 25), bandeja contenedora de agua (Figura 26), superficie de trabajo (Figura 27), guía corta con soporte para el sistema de corte (Figura 28) y guía larga (Figura 29).

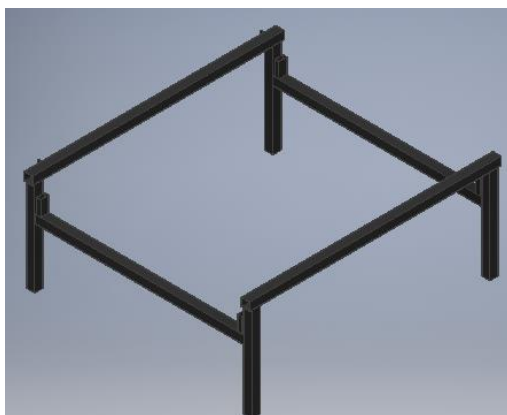


Figura 25: Estructura de la mesa de corte

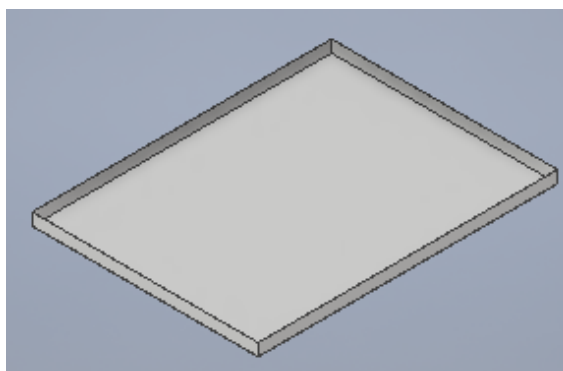


Figura 26: Bandeja contenedora de agua

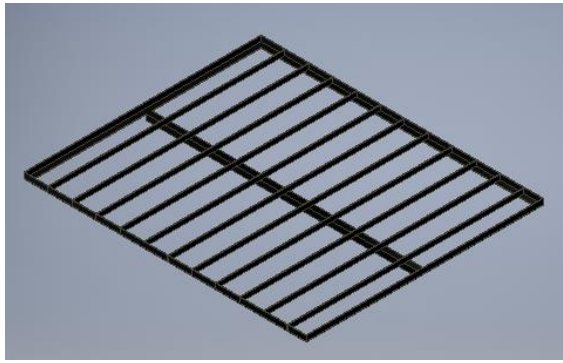


Figura 27: Superficie de trabajo de mesa de corte

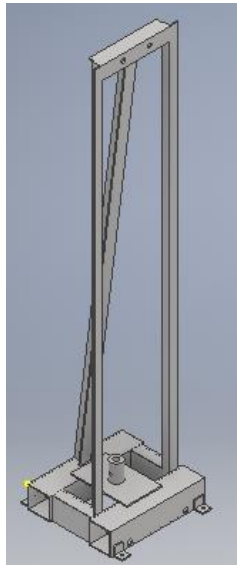


Figura 28: Guía corta con soporte para el sistema de corte

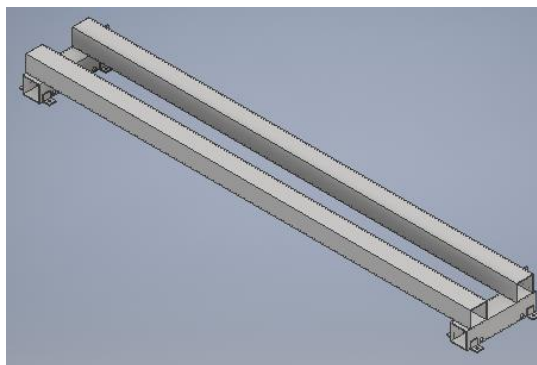


Figura 29: Guía larga

Los movimientos son posibles gracias al diseño de guía con rodamientos, Figura 30.



Figura 30: Guía con rodamientos

Ensamble completo del prototipo de máquina

El ensamblado del prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo, se llevó a cabo por medio de los materiales y equipo adquirido. La bomba utilizada para el ensamble de la máquina posee una potencia de 4 kw (6 hp) y un rango de presión de hasta 22 MPa (3200 PSI). Al cabezal del sistema se le adaptó una boquilla de corte con un diámetro de salida de 3 mm (Figura 31) y en su cámara de mezcla ingresa un abrasivo de tipo arena de sílice, proveniente del contenedor de distribución. En la Figura 32 y Figura 33 se muestra el ensamble completo del prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo.



Figura 31: Boquilla de corte

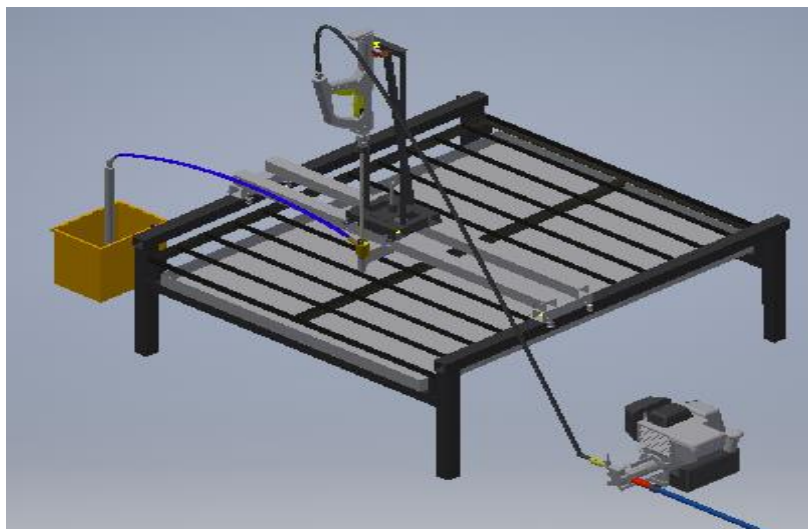


Figura 32: Prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo ensamblado en INVENTOR



Figura 33: Prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo ensamblado

Resultados

Los parámetros utilizados para el análisis de corte de cada material (Tabla 9 y Tabla 10) se obtuvieron por medio de las ecuaciones de la sección de proceso de corte por micro erosión, asumiendo que no hay pérdidas.

Los flujos máxicos utilizados durante el proceso de corte son los siguientes:

$$\dot{m}_w = 20 \frac{kg}{min}$$

$$\dot{m}_{abr} = 9 \frac{kg}{min}$$

Tabla 9: Parámetros de velocidad

Coefficiente de velocidad	0.85
Velocidad aproximada de salida	210.1 m/s
Velocidad de salida práctica	178.5 m/s

Tabla 10: Parámetros para el volumen erosionado por partícula

Parámetros	Valores
Razón de las fuerzas vertical a la horizontal en la partícula; (k)	1
Diámetro de la partícula de abrasivo (d)	0.6 mm
Densidad de la partícula de abrasivo (ρ)	2.7 g/cm ³

Corte de madera por chorro de agua abrasivo

Tabla 11: Propiedades de la Madera

Nombre	Quebracho colorado (Schinopsis balansae)
Densidad	1.22 g/cm ³
Dureza	21HV
Espesor	9 mm

Tabla 12: Volumen removido de la madera

	Volumen (mm^3)	Tiempo (s)
Removido por partícula	57.7E-5	-
Total removido	150.6	14.8

Tabla 13: Tasas de material removido de la madera

	Tasa	Unidades
Volumen	610.3	mm^3/min
Masa	0.75	g/min

En la Figura 34 se puede observar la perforación que el corte por chorro de agua abrasivo hizo en la pieza de madera.



Figura 34: Prueba de corte en pieza de madera

Corte de latón por chorro de agua abrasivo

Tabla 14: Propiedades del latón

Nombre	Latón semiduro
Densidad	8.6 g/cm ³
Dureza	75 HV
Espesor	0.7 mm

Tabla 15: Volumen removido del latón

	Volumen (mm³)	Tiempo (s)
Removido por partícula	8.8E-5	-
Total removido	5.7	10.79

Tabla 16: Tasas de material removido del latón

	Tasa	Unidades
Volumen	31.8	mm ³ /min
Masa	0.27	g/min

En la Figura 35 se puede observar la perforación que el corte por chorro de agua abrasivo hizo en la pieza de latón.



Figura 35: Prueba de corte en pieza de latón

Corte de aluminio por chorro de agua abrasivo

Tabla 17: Propiedades del aluminio

Nombre	Aluminio
Densidad	2.7 g/cm^3
Dureza	52 HV
Espesor	1.5 mm

Tabla 18: Volumen removido del aluminio

	Volumen (mm^3)	Tiempo (s)
Removido por partícula	15.2E-4	-
Total removido	21.9	9.29

Tabla 19: Tasas de material removido del aluminio

	Tasa	Unidades
Volumen	141.4	mm^3/min
Masa	0.38	g/min

En la Figura 36 se puede observar la perforación que el corte por chorro de agua abrasivo hizo en la pieza de aluminio.

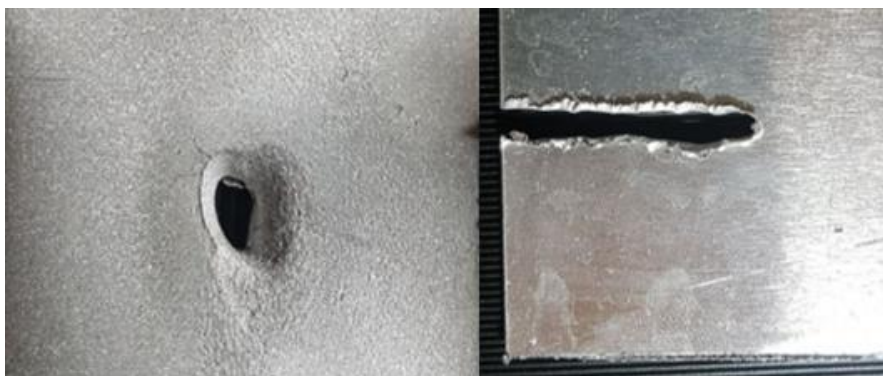


Figura 36: Pruebas de corte en piezas de aluminio

Corte de acero inoxidable por chorro de agua abrasivo

Tabla 20: Propiedades del acero inoxidable

Nombre	Acero inoxidable AISI 304
Densidad	7.9 g/cm^3
Dureza	158 HV
Espesor	0.7 mm

Tabla 21: Volumen removido del acero inoxidable

	Volumen (mm^3)	Tiempo (s)
Removido por partícula	2.9E-5	-
Total removido	5.6	12.9

Tabla 22: Tasas de material removido del acero inoxidable

	Tasa	Unidades
Volumen	25.8	mm^3/min
Masa	0.21	g/min

En la Figura 37 se puede observar la perforación que el corte por chorro de agua abrasivo hizo en la pieza de acero inoxidable.



Figura 37: Prueba de corte en pieza de acero inoxidable

Corte de piezas de cemento y de gres porcelánico

Tabla 23: Propiedades del cemento y gres porcelánico

Material	Densidad (g/cm^3)	Espesor (mm)
Concreto 100% cemento	2.3	5
Gres porcelánico	1.9	8

En el corte de la pieza de cemento de 5 mm de espesor se cronometró un tiempo de 6 segundos, la distancia que recorrió la boquilla es de una longitud de 15 cm. En la Figura 38 se puede observar la pieza de cemento cortada.



Figura 38: Prueba de corte en pieza de cemento

En la prueba de corte del gres porcelánico se cronometró un tiempo de 4.4 segundos, la distancia que recorrió la boquilla es de una longitud de 9 cm. En la Figura 39 se puede observar la pieza de gres porcelánico cortada.



Figura 39: Prueba de corte en pieza de gres porcelánico

Comparación de resultados

En la Figura 40 se puede observar una comparación del volumen removido, en cada tipo de material, por una partícula abrasiva.

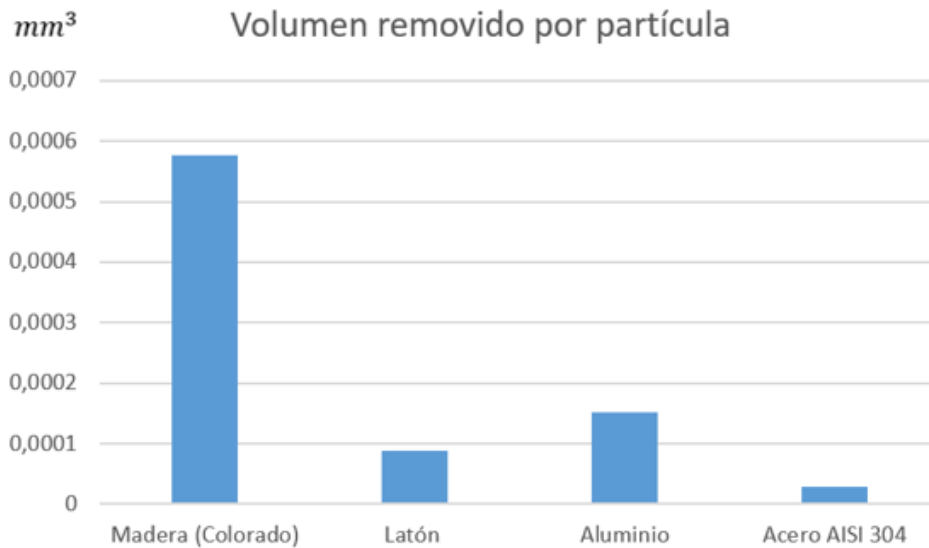


Figura 40: Comparación del volumen removido por una partícula abrasiva en cada material

En la Figura 41 se puede observar una comparación de las tasas de material removido de cada tipo de probeta.

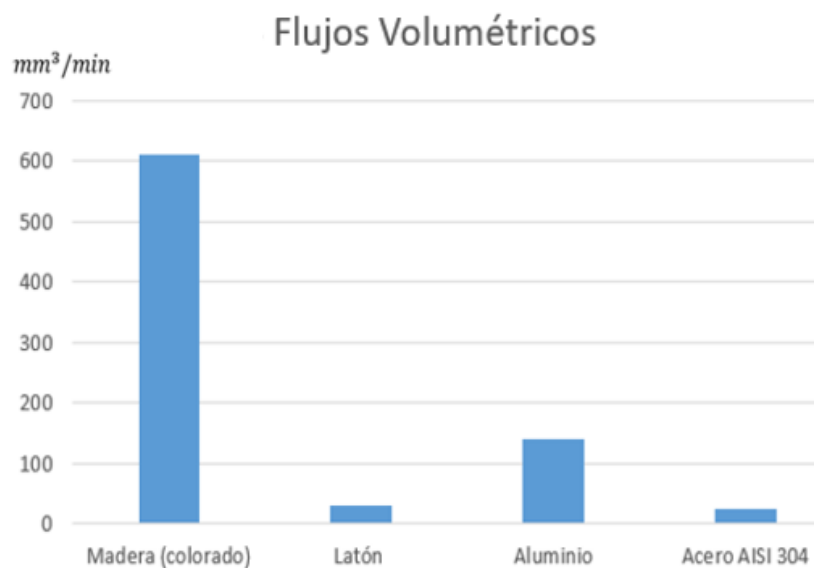


Figura 41: Comparación de tasas de material removido de cada tipo de probeta (a)

En la Figura 42 se puede observar una comparación de las tasas de material removido de cada tipo de probeta.

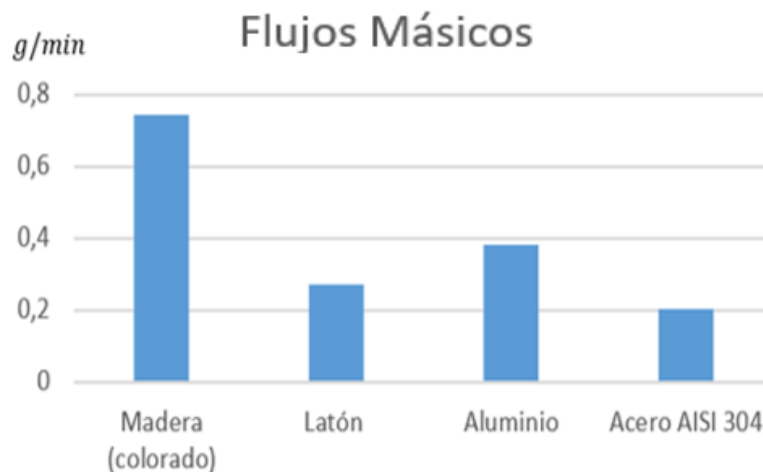


Figura 42: Comparación de tasas de material removido de cada tipo de probeta (b)

Discusión

Análisis de los resultados prácticos obtenidos

En la Figura 40, Figura 41 y Figura 42 se pueden observar gráficos que comparan los distintos resultados para cada material. Los resultados obtenidos por medio de pruebas prácticas coinciden con los obtenidos teóricamente por medio de las ecuaciones de la sección de proceso de corte por micro erosión. En los gráficos de columnas agrupadas es posible comparar los valores de volumen removido por partícula, y tasas de material removido en volumen y en masa.

Para el resultado teórico de volumen removido por partícula se puede observar que la madera es el material más fácil de erosionar. Este resultado es consistente, ya que es el material con menor dureza. En cuanto al acero AISI 304, es el material con el menor valor de volumen erosionado por partícula. Esto se debe a que posee el valor de dureza más grande de todos los materiales utilizados para las pruebas de funcionamiento.

Los resultados prácticos de las tasas de material removido en volumen y masa coinciden con los resultados teóricos, como se puede observar en todos los gráficos de las

columnas agrupadas. Esto permite concluir que el volumen erosionado es inversamente proporcional a la dureza del material. Es decir, mientras más grande sea el valor de la dureza menor será el volumen erosionado.

Los datos prácticos de los volúmenes fueron posibles calcular, debido a que la perforación por chorro de agua abrasivo generó un volumen geométrico similar en todos los materiales, una elipse cónica. En la Figura 43 se puede observar un volumen modelado en INVENTOR de una elipse cónica que se formó en la pieza de acero AISI 304.

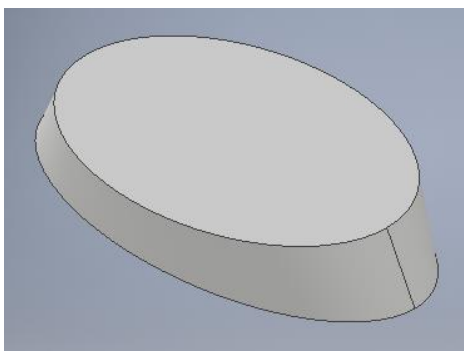


Figura 43: Elipse cónica formada en la pieza de acero AISI 304

Funcionamiento del prototipo

El funcionamiento de la máquina fue satisfactorio. Sin embargo, al no ser una máquina automatizada resulta complicado determinar con exactitud las velocidades que deben aplicarse para cada material para obtener una buena calidad superficial del corte en un tiempo reducido. Es importante empezar a trabajar con el prototipo, una vez que se encuentre estabilizado el chorro de agua. Es decir, se debe dejar que la pistola dosificadora funcione en vacío por al menos 30 segundos para que se estabilice y trabaje con la presión máxima. Es importante asegurarse que la sonda de aspiración del abrasivo esté trabajando correctamente, ya que una falla de este componente puede hacer variar los resultados y demorar el proceso de corte.

Calidad del corte por chorro de agua abrasivo

La calidad del corte en los distintos materiales depende de la velocidad de avance aplicada al proceso. En las figuras de la sección de resultados se pueden observar las distintas calidades de las perforaciones que el corte por chorro de agua abrasivo realizó para cada material. La calidad superficial que deja el corte por chorro de agua abrasivo va desde una superficie rugosa hasta una superficie fina. Mientras menor sea la calidad superficial deseada más rápido será el proceso de corte. Si se desea una calidad de superficie fina es necesario aplicar velocidades más bajas. Esto implica más costo en el proceso, debido a que se utiliza más energía y material abrasivo. Al tratarse de una máquina construida con fines académicos es aconsejable trabajar con velocidades que optimicen el proceso y reduzcan el costo de uso de la misma.

Medidas de seguridad para operar la máquina

Las máquinas de corte por chorro de agua abrasivo poseen ciertos peligros inherentes. El conocimiento de estos peligros y las medidas de protección apropiadas son necesarios para una operación segura. Todas las máquinas de corte poseen herramientas que pueden ser peligrosas para el operario. En el caso de corte por chorro de agua abrasivo, el chorro de agua en sí mismo es el principal peligro. Sin embargo, hay otros peligros que son comunes a la gama de maquinaria industrial a la que pertenece este proceso (The fabricator, 2008).

Los distintos peligros que hay al trabajar con una máquina de corte de chorro de agua abrasivo son:

- Heridas por chorro de agua: este tipo de heridas tienen características inusuales. Es por eso que resulta necesario que el médico que trate este tipo de heridas, conozca el origen del daño corporal. Para ello hace, falta que los operadores de

este tipo de maquinaria lleven consigo siempre un tipo de tarjeta como el de la Figura 44.

- Más allá de cortes: en el caso de no utilizar una delgada capa de agua para realizar el corte, se pueden producir ruidos (hasta de 135 dBa) que pueden generar peligro auditivo. Por lo tanto, es obligatorio el uso de protección auditiva. El uso de abrasivos tóxico puede generar enfermedades pulmonares, por cuanto es importante utilizar equipo de protección personal respiratorio adecuado.
- Riesgos relacionados con la presión: este tipo de maquinaria trabaja con presiones altas. Por ende, es obligatorio el mantenimiento constante de la bomba de presión.
- Es necesario llevar siempre gafas de seguridad industrial para evitar cualquier daño en los ojos por parte de las partículas abrasivas.

Todos los peligros antes mencionados pueden ser evitados cumpliendo las normas de seguridad establecidas.



Figura 44: Tarjeta de seguridad para billetera (The fabricator, 2008)

Costos

Al finalizar el ensamblaje completo del prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo se procedió a sumar todos los gastos incurridos en equipos y materiales utilizados. En la Tabla 24 se puede observar este detalle.

Tabla 24: Costos de elaboración del prototipo de máquina

Componente	Cantidad	Costo (USD)
Cabezal de corte y sonda de aspiración de abrasivo	1	350
Equipo de hidrolavadora	1	1300
Contenedor de abrasivo	1	20
Abrasivo arena de sílice	-	70
Mesa de corte y estructura	1	300
Accesorios y herramientas	-	50
Varios	-	150
	TOTAL	USD 2240

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Al finalizar con el diseño y construcción del prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo, se cumplieron con los objetivos planteados.

- Se diseñó, adquirió y construyó los componentes y herramientas necesarias para el ensamble de un prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo para cortar espesores de hasta 4mm de los materiales propuestos: madera, cemento, gres porcelánico, latón, aluminio y acero.
- Los resultados prácticos obtenidos son consistentes con los obtenidos por medio de las ecuaciones postuladas en este proyecto de titulación.
- Se logró hacer cortes rectos en piezas de los distintos materiales de hasta 4 mm de espesor, con velocidades de corte que dejan un acabado superficial rugoso.
- Para la reducción de costos en el proceso de corte se recomienda trabajar con una velocidad de avance lo más grande posible, sacrificando la calidad superficial de la superficie cortada.
- Para evitar daños en la superficie en la que se asientan los materiales que serán cortados se recomienda realizar modificaciones en la misma, una solución es colocar pequeños ejes perpendiculares, en la estructura actual, para asentar el material de trabajo, esto reducirá el área de contacto del chorro de agua abrasivo con la superficie en la cual se coloca la pieza que será cortada.
- El corte por chorro de agua abrasivo es un corte en frío que a diferencia de otros métodos de corte no genera deformaciones ni cambios en la microestructura de los materiales maquinados por este método.
- El prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo está listo para ser automatizado y lograr cortes de mayor precisión y complejidad.

- Para la seguridad del operador se recomienda ser muy cuidadoso durante el proceso y utilizar el equipo apropiado de seguridad personal al momento de cortar cualquier pieza con la máquina.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alberdi, A., Suárez, A., Artaza, T., Escobar-Palafox, G. A., & Ridgway, K. (2013). Composite Cutting with Abrasive Water Jet. *Procedia Engineering*, 63, 421–429. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.08.217>

Burnham, Chip. (2015). *La guía definitiva Del corte por chorro de agua*. Flow Waterjet. Extraído el 26 de marzo del 2017 de: http://www.flowwaterjet.es/FlowWaterjet/media/Flow/8_Footer/Resources/Downloads/ebooks/The-Ultimate-Guide-Waterjet_SP.pdf

Vhymeister, A., Fuentes, M. (2004). CORTE MEDIANTE CHORRO DE AGUA - ABRASIVO. *Sínt. tecnol.*, no.1, p.36-38. ISSN 0718-025X.

OMAX. (2017). *ABRASIVE WATERJETS*. Extraído el 15 de abril del 2017 de: <https://www.omax.com/learn/what-to-consider-before-buying>

FLOW. (2015). The Ultimate Guide Waterjet. Extraído el 12 de marzo de 2017 de: http://www.flowwaterjet.es/FlowWaterjet/media/Flow/8_Footer/Resources/Downloads/ebooks/The-Ultimate-Guide-Waterjet_SP.pdf

Aich, U., Banerjee, S., Bandyopadhyay, A., & Das, P. K. (2014). Abrasive Water Jet Cutting of Borosilicate Glass. *Procedia Materials Science*, 6, 775–785. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2014.07.094>

Mech4study. (2014). *Water Jet and Abrasive Water Jet Machining: Principle, Working, Equipment's, Application, Advantages and Disadvantages*. Extraído el 20 de noviembre del 2017 de: <http://www.mech4study.com/2017/04/water-jet-and-abrasive-water-jet-machining-principle-working-equipment-application-advantages-and-disadvantages.html>

Singal, R., Singal, M., Singal, Rishi. (2008). *Fundamentals of Machining and Machine Tools*. New Delhi: I.K International.

Hassan, I., Kosmol, J. (1999). A FINITE ELEMENT MODEL FOR ABRASIVE WATERJET MACHINING (AWJM). Gliwice: Department of Machine Technology.

Momber, A., Kovacevic, R. (1998). *Principles of Abrasive Water Jet machining (1st edition)*. London: Library of Congress Catalogin -in- Publication data.

Henning, A., Miles, P., Stang, D. (2011). *Efficient Operation of Abrasive Waterjet Cutting in Industrial Applications*. <https://www.wjta.org/images/wjta/Proceedings/Papers/2011/A1%20-%20PM%20-%20Efficient.pdf>

Goodwin, J., Sage, W., & Tilly, G. (1969). *Proc. Inst. Mech. Engrs.* 184, 279-292. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir78-1575.pdf>

Finnie, I. (1960). *Wear*. 3, 87-103. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir78-1575.pdf>

Version 2 ME, IIT Kharagpur. (2017). Non conventional Machining. Extraído el 14 de noviembre de 2017 de:
http://www.academia.edu/5395280/Version_2_ME_IIT_Kharagpur

Sheldon, G. L., Kanhere, A. (1972). *Wear*. 21, 195-208.
<http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir78-1575.pdf>

Ruff, W., Wiederhorn, S. (1979). *Erosion by Solid Particle Impact*. Virginia: National Measurement Laboratory Center for Materials Science National Bureau of Standards.

Ives, L., Ruff, A. (1978). *Proceedings of the ASTM Symposium "Erosion: Prevention and Useful Applications"*, STP 664. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir78-1575.pdf>

KÄRCHER. (2017). *¿CÓMO FUNCIONA UNA HIDROLAVADORA DE ALTA PRESIÓN?* Extraído el 14 de noviembre del 2017 de:
<https://www.kaercher.com/mx/inside-kaercher/sala-de-prensa/historias-kaercher/como-funciona-una-hidrolavadora-de-alta-presion.html>

HELMUTH. (2017). *Honda GC190*. Extraído el 14 de noviembre del 2017 de:
<http://helmuthrepair.com/honda-gc190-qhaf-3-4-shaft-recoil-start-6-hp-engine.html>

HONDA. (2015). *Manual de propietario*. U.S.A: American Honda Motor Co.

KÄRCHER. (2017). *VERSAGRIP TRIGGER GUN*. Extraído el 18 de noviembre del 2017 de: <https://www.kaercher.com/us/accessory/versagrip-trigger-gun-87552030.html>

KMT. (2017). *Waterjet Cutting Technology*. Extraído el 15 de abril del 2017 de:
<https://www.kmtwaterjet.com/waterjet-technology.aspx>

Italpresion Hawk. (2013). *Hidro-Arenado*. Extraído el 18 de noviembre del 2017 de:
<http://italpresion.com/?p=4853>

Roosebertl Hidrolavados. (2017). *Hidroarenado*. Extraído el 18 de noviembre del 2017 de:
http://hidrolavados.com/wp-content/uploads/2012/11/Equipo_de_Hidroarenado_completo_RH.pdf

De máquinas y herramientas. (2014). *Cómo funciona la Hidrolavadora?* Extraído el 18 de noviembre del 2017 de:
<http://www.demaquinasyherramientas.com/maquinas/hidrolavadoras-tipos-y-usos>

CAMIMEX. (2012). *Arena Sílica (Si O2)*. Extraído el 18 de noviembre del 2017 de:
<https://www.camimex.org.mx/index.php/secciones1/sala-de-prensa/uso-de-los-metales/arena-silica/>

Ruff, W., Wiederhorn, S. (1979). *Erosion by Solid Particle Impact*. <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/IR/nbsir78-1575.pdf>

The Fabricator. (2008). *Safety in jet cutting*. Extraído el 15 de abril del 2017 de: <http://www.thefabricator.com/article/waterjetcutting/safety-in-jet-cutting>

TECHNI Waterjet. (2017). *Waterjet Cutting – How it Works*. Extraído el 30 de abril del 2017 de: <http://www.techniwaterjet.com/how-it-works/>

Arena Silice. (2016). *Silice*. . Extraído el 14 de noviembre del 2017 de: <http://arenasilice.cl/silice.html>

INTI – CITEMA. 2003. Densidad de maderas (Kg/m³) ordenadas por nombre común. Extraído el 10 de diciembre de 2017 de: http://www.inti.gob.ar/maderaymuebles/pdf/densidad_comun.pdf

LENNTECH. (2017). Elementos químicos ordenados por su densidad. Extraído el 14 de noviembre del 2017 de: <https://www.lenntech.es/tabla-peiodica/densidad.html>

UGINOX. (2014). El acero inoxidable con acabado brillante. Extraído el 10 de diciembre de 2017 de: <http://www.aperam.com/uploads/stainlesseurope/TechnicalDataSheet/Fiches%20Aspect%20s/Espagnol/1.%20FICHE-UGINOX%20Bright%20ES.pdf>

RM. (2016). Propiedades del latón. Extraído el 10 de diciembre de 2017 de: <http://www.rmmcia.es/blog/laton-y-cobre/propiedades-del-laton>

Arquitectura21. (2010). Cuánto pesa el concreto. Extraído el 10 de diciembre de 2017 de: <http://www.arquitectura21.com/2010/12/cuanto-pesa-el-concreto.html>

ParkSinta. (2014). Escala de la dureza de las maderas – Escala Brinell. Extraído el 11 de diciembre de 2017 de: <https://www.parksinta.com/blog/escala-de-la-dureza-de-las-maderas-escala-brinell-2/>

ANEXOS

Manual de operación y mantenimiento preventivo

El operador de la máquina deberá leer y regirse al contenido de este manual.

Observaciones generales

Previo al uso de la máquina, revisar y verificar que los siguientes puntos se cumplan.

- La estructura de la máquina debe estar en una superficie plana para que el equipo se mantenga estable.
- El combustible suministrado al tanque del motor debe ser el adecuado, gasolina de 81 a 92 octanos.
- Comprobar el nivel de aceite del motor sea el adecuado. Insertar y remover la varilla medidora sin enroscarla en la toma de aceite para conocer el nivel de aceite del motor.
- Revisar las mangueras de uso convencional que suministran agua al sistema motor-bomba, para evitar fugas de agua.
- Verificar que las mangueras de alta presión estén adecuadamente conectadas en la toma de alta presión.
- Comprobar que las guías con rodamientos de la mesa de corte tengan una buena movilidad.
- Adaptarse al cumplimiento de las normas de seguridad que implica utilizar esta máquina.
- Leer las instrucciones del uso del equipo antes de instalarlo y operarlo.
- Cerciorarse que no existan fugas de aceite ni de combustible en el sistema motor-bomba.

- Mantener al contenedor del abrasivo en un lugar libre de humedad.
- Limpiar el cabezal de corte después de trabajar para evitar taponamientos por el abrasivo.
- Evitar que las mangueras del sistema estén cerca al motor o a cualquier superficie caliente.

Lugar de instalación del equipo

Antes de instalar al prototipo de máquina es necesario tener en cuenta los siguientes puntos para el lugar de operación:

- El lugar debe poseer un sistema de extracción de gases, drenaje con filtro y acceso a la red pública de agua.
- El espacio de operación debe ser amplio para operar el sistema de corte sin dificultades y para brindar un mantenimiento adecuado a la máquina.
- Para evitar adhesión del abrasivo a contenedor es importante que este alejado de zonas húmedas.
- Con el fin de tener una buena precisión de trabajo, el lugar de instalación debe ser nivelado y plano.

Instalación

Es importante que la máquina esté correctamente ensamblada sobre una superficie nivelada, plana y firme, para garantizar una buena operatividad.

No es necesario que la mesa de corte esté anclada al piso, ya que tiene suficiente peso para mantenerse fija por sí misma. Es importante que el prototipo de máquina este cerca de un suministro de agua de la red pública y a una red de drenaje para evacuar el agua después de su uso. La máquina opera con gasolina, puede ser de 81 a 92 octanos.

Verificar siempre el nivel de aceite del motor, nivel del abrasivo y asegurarse que la boquilla de corte no se encuentre tapada por sobrantes de abrasivo.

Descripción de la máquina

Las características de la máquina y sus componentes son:

Sistema de alta presión:

- Hidrolavadora

Marca: KÄRCHER

Modelo: G 3200 OH

- Motobomba

Marca: HONDA

Numeración: GC190

- Mangueras del sistema

Tipo: Manguera de uso convencional (6 MPa)

Tipo: Manguera de alta presión (24.8 MPa)

Sistema de corte:

- Pistola dosificadora

Marca: VersaGRIP™

- Barra pulverizadora

Boquilla con ángulo pulverizador de 0° Cabezal de corte

Boquilla con orificio de salida de 3mm

Cámara de mezcla de agua y abrasivo

- Distribución de abrasivo

Abrasivo: Arena de sílice

Capacidad del contenedor: 50 lb

Sonda de aspiración autoajustable

- Mesa de corte

Guías con rodamientos de una pulgada

Rejillas transversales (área de trabajo)

Bandeja contenedora de agua

Funcionamiento del sistema de alta presión

1. Verificar que el tanque del equipo contenga combustible para arrancar y que el nivel de aceite sea el adecuado.
2. Verificar que la manguera de uso convencional de suministro de agua (fría) de la red pública esté bien conectada a la motobomba.
3. Cerciorarse que el collar con resorte en la toma de alta presión posea un acople preciso con la manguera de alta presión.
4. Encender la motobomba por medio del arrancador manual.
5. Activar el sistema de extracción de gases del lugar.

Funcionamiento del sistema de corte

1. Verificar que la guía con rodamientos de la mesa de corte no tenga ninguna obstrucción para su recorrido.
2. Cerciorarse que el contenedor del abrasivo este abastecido y libre de humedad.
3. Asegurarse que la boquilla de salida del cabezal de corte no posea ningún taponamiento.
4. Desbloquear el pestillo de seguridad de la pistola dosificadora.
5. Accionar la pistola dosificadora para eliminar el aire aprisionado.
6. Esperar hasta que salga un caudal de agua constante de la boquilla y poder realizar cortes (aproximadamente 30 segundos después de encender el equipo).

Mantenimiento General

Mantenimiento diario

- Realizar una inspección visual de rutina de la bomba a presión. Si se observa que hay pérdidas de aceite en las juntas de la bomba, es necesario dar servicio técnico.
- Antes de cada uso revisar el nivel de aceite del motor y el filtro de aire.
- Limpiar el cabezal de corte después de cada trabajo para evitar taponamientos.
- Verificar que el contenedor del abrasivo esté abastecido y libre de humedad.

Mantenimiento primer mes o 5 horas de trabajo

- Cambiar el aceite de motor, se recomienda aceite SAE 10W-30 para uso general, o cualquier otro aceite para motores de 4 tiempos que cumpla con los requisitos de API.
- Verificar la boquilla de salida del cabezal de corte y cambiarla si es necesario.
- Abastecer el contenedor de abrasivo con arena de sílice.
- Verificar que todas las uniones del prototipo de máquina se encuentren en buen estado.

Mantenimiento cada 3 meses o 25 horas de trabajo

- Continuar con el mantenimiento de meses anteriores, adicionando: limpieza del filtro de aire Hacerlo con más frecuencia si el motor se encuentra en zonas polvorientas.

Mantenimiento cada 6 meses o 50 horas de trabajo

- Continuar con el mantenimiento de meses anteriores adicionando: verificar el cabezal de corte y su cámara de mezcla. Si es necesario reemplazarlo. Realizar el cambio de aceite del motor cada 25 horas cuando se usa con cargas pesadas o en temperaturas ambientales elevadas.

Mantenimiento cada año o 100 horas de trabajo

- Continuar con el mantenimiento de meses anteriores, adicionando: revisión de bujía, limpiar parachispas, revisar velocidad en vacío, revisar tolerancia de válvula, limpiar tanque y filtro de combustible.

Mantenimiento cada dos años o 200 horas de trabajo

- Continuar con el mantenimiento anual anterior adicionando: cambio de filtro de aire, remplazo de bujía y revisión de tubo de combustible (Reemplazar si hace falta).

Fichas técnicas y manuales de componentes del prototipo

MANUAL DE USUARIO DE LA HIDROLAVADORA

Vista general del modelo	17
Instrucciones importantes de seguridad	18
Instrucciones de montaje	19
Instrucciones de funcionamiento	21
Utilización de los accesorios	23
Trabajar con detergentes	23
Tomarse un descanso	24
Apagado y limpieza	24
Protección en el invierno y almacenaje prolongado	25
Instrucciones de mantenimiento	25
Consejos de limpieza	25
Localización y reparación de averías	27

Especificaciones

G 3200 OH	
Presión de trabajo	3200 PSI
Volumen de agua	2.5 GPM
Absorción de detergente	0.15 - 0.20 GPM
Motor	Honda GC190
No. de parte	1.107-267.0
No. de serie	

Símbolos de aviso de seguridad

⚠ PELIGRO
Indica "una situación de peligro inminente que, si no se evita, puede causar lesiones graves e incluso la muerte".

⚠ ADVERTENCIA
Indica "una situación de peligro potencial que, si no se evita, puede causar lesiones e incluso la muerte".

⚠ ATENCIÓN
Indica "una situación de peligro potencial que, si no se evita, puede causar lesiones de poca importancia o leves", o daños materiales.

Responsabilidades del propietario/usuario

El propietario y/o el usuario deben comprender bien las instrucciones de servicio y advertencias del fabricante antes de empezar a utilizar este limpiador de alta presión. Debe prestarse especial atención y tener muy claras las advertencias. Si el operador no habla bien el español, el propietario/comprador debe responsabilizarse de leer y comentar las instrucciones y las advertencias en su lengua natal, y asegurarse de que entienda a la perfección su contenido. El propietario y/o el usuario deben leer y guardar como referencia para el futuro las instrucciones del fabricante.

Servicio de asistencia al cliente de Kärcher USA/Canada

Llame al: **1-800-537-4129** si necesita ayuda o visite nuestra página Web:

karcher.com/us

Por favor, dedique unos minutos a registrar su aparato de lavado a presión en

www.karcher-register.com

Soporte Kärcher México

Llame al: **01-800-024-13-13** si necesita ayuda o visite nuestra página Web:

www.karcher.com.mx

Figura 45: Manual de usuario de hidrolavadora

LOCALIZACIÓN Y REPARACIÓN DE AVERÍAS		
<p>⚠ ATENCIÓN Quitar el cable de enchufe de chispas para evitar que el motor se encienda de forma involuntaria antes de realizar cualquier reparación.</p>		
Síntoma	Causa	Solución
EL MOTOR NO ARRANCA	No hay gasolina	Llenar el depósito de gasolina
	El estrangulador no está en la posición correcta	Deslizar la palanca del estrangulador de la posición de cerrado
	Presión de agua formada en la máquina.	Apretar el gatillo para liberar presión
	Si tiene más problemas con el motor consulte el manual del motor.	
LA UNIDAD NO LLEGA A LA ALTA PRESIÓN.	El diámetro de la manguera de jardín es demasiado pequeño.	Sustituir con una manguera de jardín de 5/8 pulgadas o más.
	El suministro de agua está restringido.	Compruebe si la manguera de jardín tiene grietas, fugas o si está obstruida
	El suministro de agua de entrada no es suficiente.	Abra el grifo de agua del todo. Compruebe si la manguera de jardín tiene grietas, fugas o si está obstruida
	El filtro de entrada de agua está obstruido.	Quite el filtro y enjuáguelo en agua caliente
	La boquilla de detergente negra está conectada.	Quitar la boquilla de detergente negra y colocar la boquilla para alta presión.
LA PRESIÓN DE SALIDA VARÍA ENTRE ALTA Y BAJA PRESIÓN.	El suministro de agua de entrada no es suficiente.	Abra el grifo de agua del todo. Compruebe si la manguera de jardín tiene grietas, fugas o si está obstruida.
	La bomba está succionando aire	Compruebe que las mangueras y conectores están bien apretados. Apague el aparato y purgue la bomba apretando la pistola de disparo hasta que salga un caudal constante de la boquilla
	El filtro de entrada de agua está obstruido.	Remueva el filtro y enjuáguelo en agua caliente
	La boquilla pulverizadora está obstruida	Limpie con aire comprimido o quite la suciedad con una aguja fina.
	Pistola, manguera o barra pulverizadora calcificados	Vierta vinagre destilado por el tubo de succión de detergente


Figura 46(a): Manual de localización y reparación de averías

Síntoma	Causa	Solución
NO ENTRA DETERGENTE.	El tubo de succión de detergente no está correctamente conectado al aparato.	Compruebe la conexión
	El detergente está demasiado espeso	Diluya el detergente. Para obtener mejores resultados utilice detergente Kärcher
	El filtro del tubo de succión de detergente está obstruido	Deje correr agua caliente por el filtro para quitar la suciedad
	El tubo de succión de detergente está dañado u obstruido	Quite la obstrucción o reemplace el tubo de succión de detergente
	Está colocada una boquilla de alta presión	Sustituir por una boquilla de detergente negra.
	La boquilla pulverizadora está atascada.	Limpie con aire comprimido o quite la suciedad con una aguja fina.
LA CONEXIÓN DE LA MANGUERA DE JARDÍN FUGA.	Las conexiones están sueltas	Apriete las conexiones.
	No hay arandela de caucho o está desgastada	Inserte una arandela nueva
LA BARRA PULVERIZADORA FUGA	La barra pulverizadora no está montado correctamente	Girar la ranura giratoria de la pistola en el sentido de las agujas del reloj hasta ajustar la conexión.
	Anillo tórico o inserción de plástico rotos.	Visite www.karcher-help.com o localice un centro de servicio en www.karcher-service.com
LA BOMBA HACE RUIDO.	La bomba está succionando aire	Compruebe que las mangueras y conectores están bien apretados. Apague el aparato y purgue la bomba apretando la pistola de disparo hasta que salga un caudal constante de la boquilla
FUGA AGUA DE LA BOMBA (HASTA 10 GOTAS POR MINUTO ES PERMISIBLE).	Las conexiones están sueltas.	Compruebe las conexiones
	Las juntas de estanqueidad de agua están dañadas o desgastadas	Visite www.karcher-help.com o localice un centro de servicio en www.karcher-service.com
	La protección térmica del dispositivo está activada.	La protección térmica del dispositivo se reestablecerá automáticamente. No poner la bomba en funcionamiento durante más de 5 minutos sin pulverizar
GOTEO DE ACEITE	La juntas de estanqueidad de aceite están dañadas o desgastadas.	Visite www.karcher-help.com o localice un centro de servicio en www.karcher-service.com

Si el síntoma que usted esta experimentando no esta en la lista de arriba, o si las soluciones aportadas no resuelven su problema, por favor visite nuestra extensa base de datos en linea de solución de problemas en: www.karcher-help.com

Figura 47(b): Manual de localización y reparación de averías

MANUAL DEL PROPIETARIO
GC160 • GC190



⚠ WARNING

Gasoline is highly flammable and explosive.
Turn engine off and let cool before refueling.

The engine emits toxic carbon monoxide.
Do not run in an enclosed area.

Read Owner's Manual before operation.

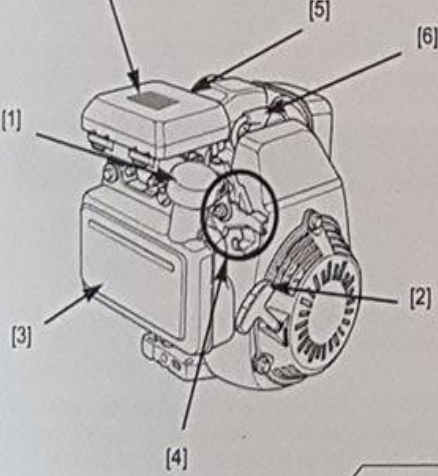
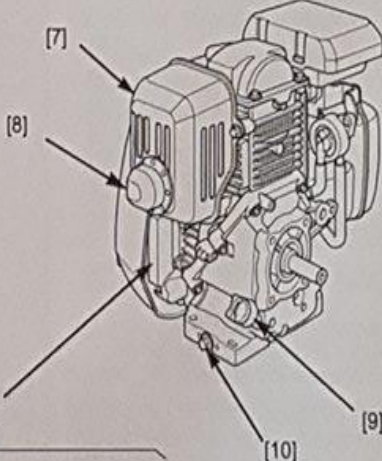
Honda Motor Co., Ltd.

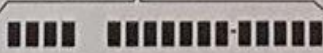
⚠ ADVERTENCIA ⚠

Los gases de escape del motor de este equipo contienen productos químicos que el Estado de California sabe que pueden producir cáncer, defectos de nacimientos y otras anomalías de la reproducción.

Proposición 65 de California

Este producto contienen o emite agentes químicos que, según el Estado de California, causan cáncer, defectos de nacimiento u otros efectos perjudiciales reproductivos.



UBICACIÓN DE COMPONENTES Y CONTROLES

1	Tapa de llenado del combustible
2	Arrancador
3	Tanque de combustible
4	Etiqos de control del motor *
5	Filtro de aire
6	Bujía

7	Tubo de escape
8	Deflector del tubo de escape (optativo)
9	Tapa de llenado/varilla de medición del aceite
10	Tapón de drenaje del aceite
11	Ubicación del número de serie

* El área de control del motor varía según el tipo de motor. Refiérase a las figuras individuales en la página 2 para determinar el tipo de control del motor cuando lea la sección de Operación y otras secciones en este manual.

Figura 48: Manual del propietario del motor HONDA GC 190

GC190	
Largo x ancho x alto	345 x 369 x 331 mm
Peso en seco	13,2 kg
Tipo de motor	4 tiempos, árbol de levas superior, monocilíndrico
Desplazamiento [diámetro x recorrido]	187 cm ³ [69 x 50 mm]
Capacidad aceite para motores	0,58 L
Capacidad del tanque de combustible	1,8 L
Sistema de enfriamiento	Aire forzado
Sistema de encendido	Magneto transistorizado
Rotación del eje de la PTO (toma de fuerza)	Sentido contrario al de las agujas del reloj

Especificaciones del reglaje		
ITEM	ESPECIFICACIÓN	MANTENIMIENTO
Luz de bujía	0,7-0,8 mm	Consultar la página 38.
Tolerancia de válvulas (en frío)	ADM: 0,15 ± 0,04 mm ESC: 0,20 ± 0,04 mm	Consulte su distribuidor de Honda autorizado.
Otras especificaciones	No hacen falta ajustes adicionales.	

Información de referencia rápida		
Combustible	Tipo	Gasolina sin plomo con octanaje de 86 o más (página 37)
Aceite para motores	Tipo	SAE 10W-30, API SJ, para uso general. Consultar la página 37.
Carburador	Velocidad en vacío	1.400 ± 150 rpm
Bujía	Tipo	BPR6ES (NGK)
Mantenimiento	Antes de cada uso	Revisar nivel de aceite del motor. Consultar la página 37. Revisar el filtro de aire. Consultar la página 38.
	Primeras 5 horas	Cambiar el aceite del motor. Consultar la página 37.
	Después	Consultar el programa de mantenimiento en la página 36.

Figura 49: Especificaciones del motor HONDA GC 190

PROGRAMA DE MANTENIMIENTO		
Realizar cada mes o intervalo de horas de funcionamiento indicado, según cuál ocurra primero. ⁽¹⁾		
Período de servicio normal	Ítem	Página
Antes de cada uso	Revisar: Aceite de motor Revisar: Filtro de aire	página 37 página 38
Primer mes o 5 horas	Cambiar: Aceite de motore	página 37
Cada 3 meses o 25 horas	Limpiar: Filtro de aire ⁽²⁾	página 38
Cada 6 meses o 50 horas	Cambiar: Aceite de motore ⁽³⁾ Limpiar: Filtro de aire ⁽²⁾	página 37 página 38
Cada año o 100 horas	6 artículos mes anterior, más: Revisar-ajustar: Bujía Limpiar: Parachispas (equipo optativo) Revisar-ajustar: Velocidad en vacío ⁽⁴⁾ Limpiar: Tanque y filtro de combustible ⁽⁴⁾ Revisar-ajustar: Tolerancia de válvula ⁽⁴⁾	página 38 página 38
Cada dos años o 200 horas	Elementos anual anterior más: Reemplazar: Filtro de aire Reemplazar: Bujía	página 38 página 38
Cada dos años	Revisar: Tubo de combustible ⁽⁴⁾ (reemplazar si hace falta)	

(1) Realizar el servicio más frecuentemente cuando se usa en zonas polvorientas.

(2) Servicio con más frecuencia cuando se utiliza en zonas polvorientas.

(3) Cambiar el aceite del motor cada 25 horas cuando se usa con cargas pesadas o en temperaturas ambientes elevadas.

(4) Estos ítems deben ser realizados por un concesionario autorizado de servicios de Honda, a menos que usted tenga las herramientas apropiadas y sea experto en la mecánica. Consulte el manual del taller de Honda para averiguar los procedimientos de servicio.

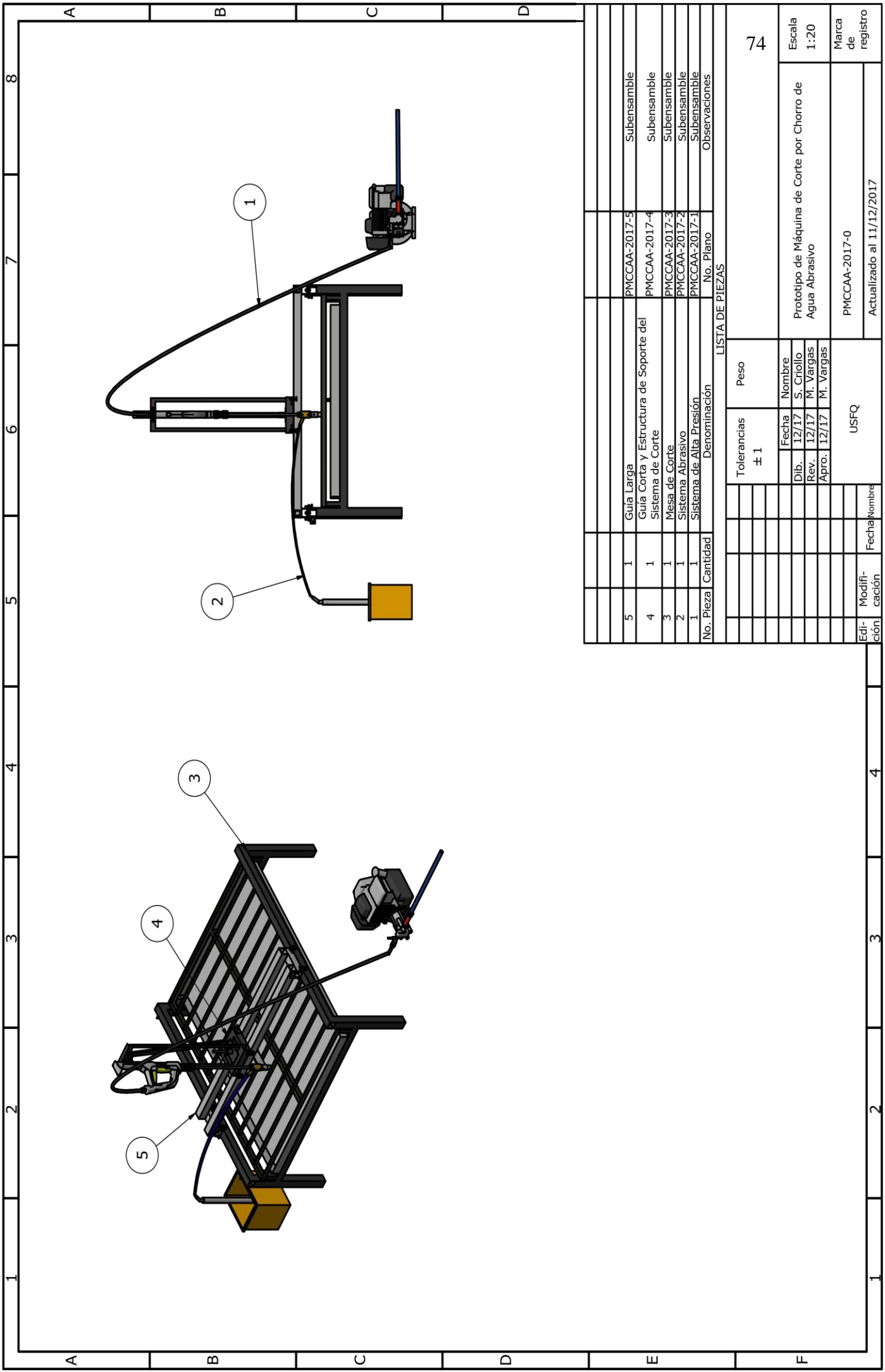
Si no sigue este programa de mantenimiento pueden producirse fallas que no entran en la garantía.

Figura 50: Programa de mantenimiento del motor HONDA GC 190

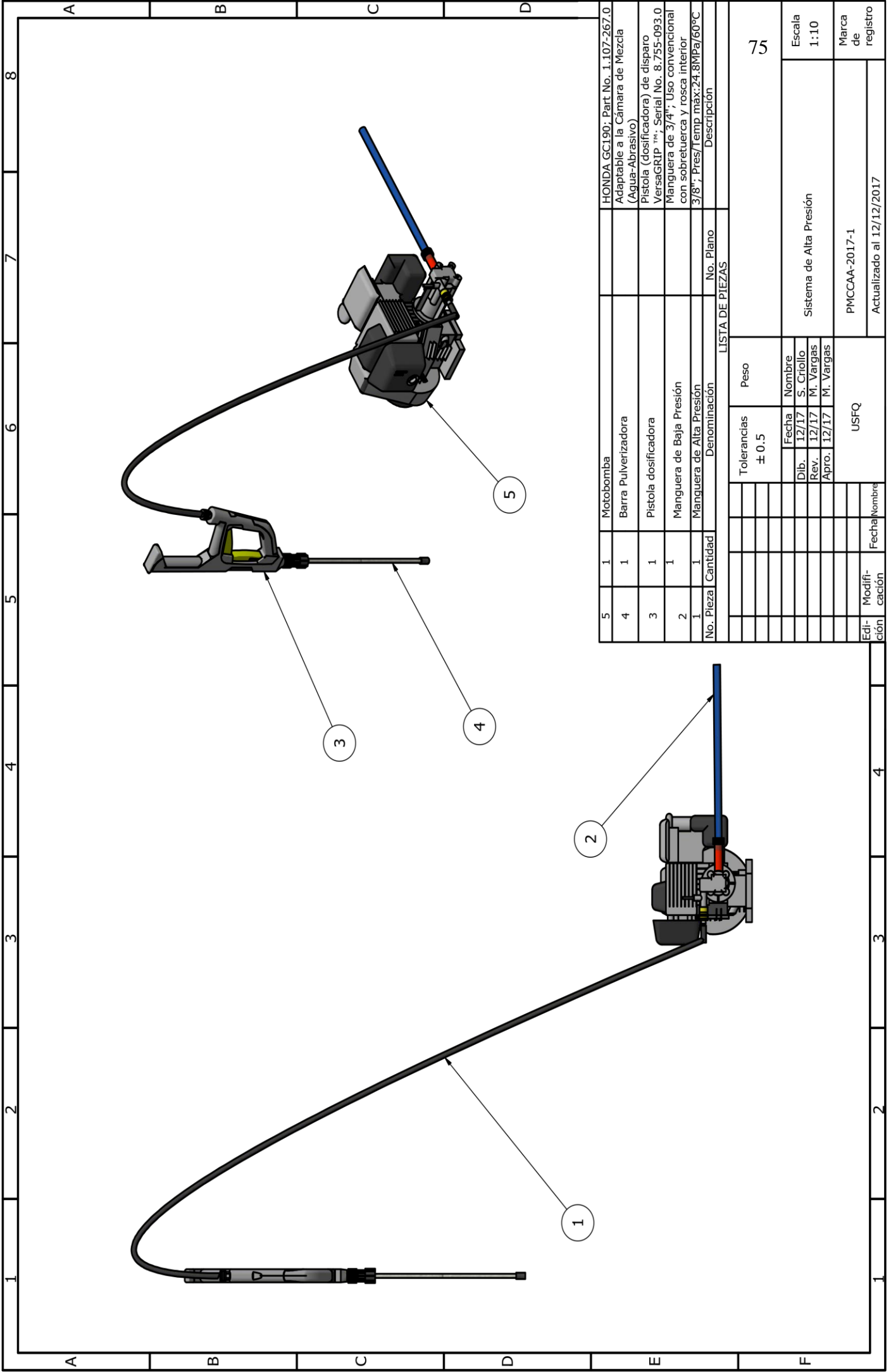


Figura 51: Diagrama de conexiones del motor HONDA GC 190

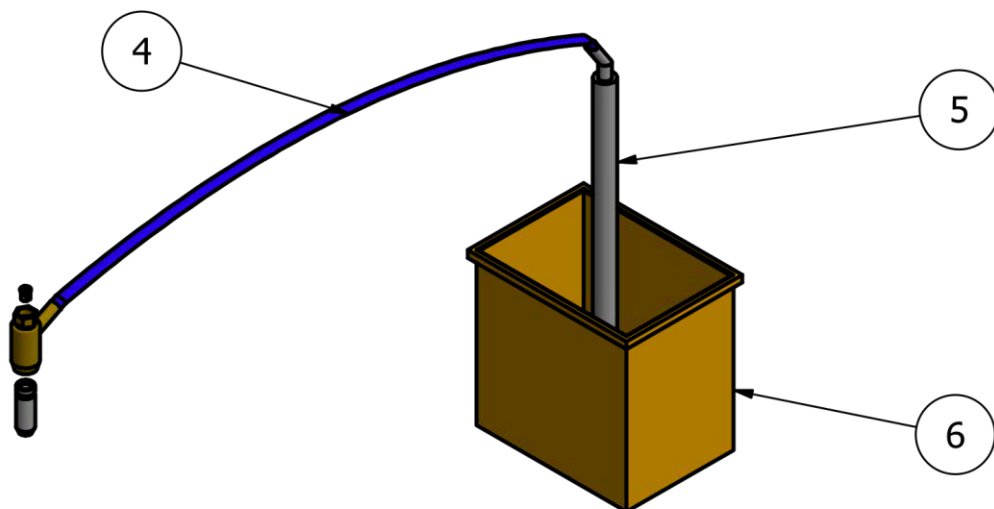
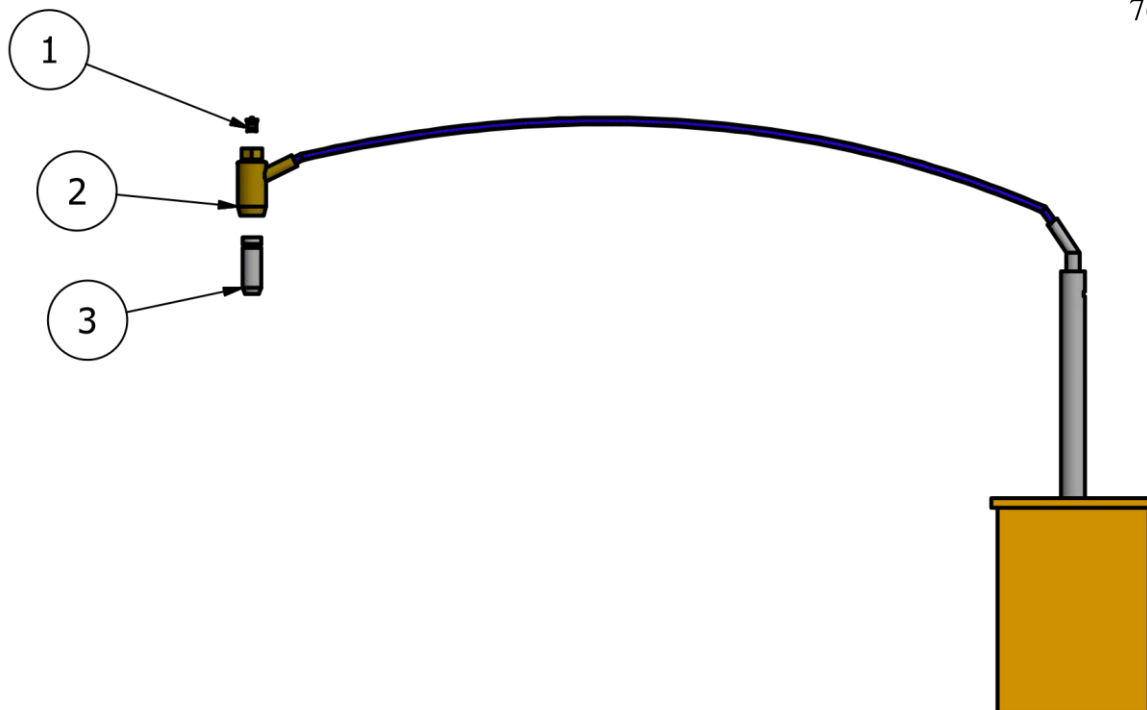
Planos de conjunto y de taller del prototipo de máquina de corte por chorro de agua abrasivo



No. Pieza	Cantidad	Denominación	No. Plano	Observaciones
5	1	Guía Larga	PMCCAA-2017-5	Subensamble
4	1	Guía Corta y Estructura de Soporte del Sistema de Corte	PMCCAA-2017-4	Subensamble
3	1	Mesa de Corte	PMCCAA-2017-3	Subensamble
2	1	Sistema Abrasivo	PMCCAA-2017-2	Subensamble
1	1	Sistema de Alta Presión	PMCCAA-2017-1	Subensamble
LISTA DE PIEZAS				
		Tolerancias	Peso	74
		± 1		
		Fecha	Nombre	
		Dib. 12/17	S. Criollo	
		Rev. 12/17	M. Vargas	
		Apro. 12/17	M. Vargas	
		USFQ		
Edi- ción	Modifi- cación	Fecha	Nombre	
				Prototipo de Máquina de Corte por Chorro de Agua Abrasivo
				Escala 1:20
				Marca de registro
				PMCCAA-2017-0
				Actualizado al 11/12/2017



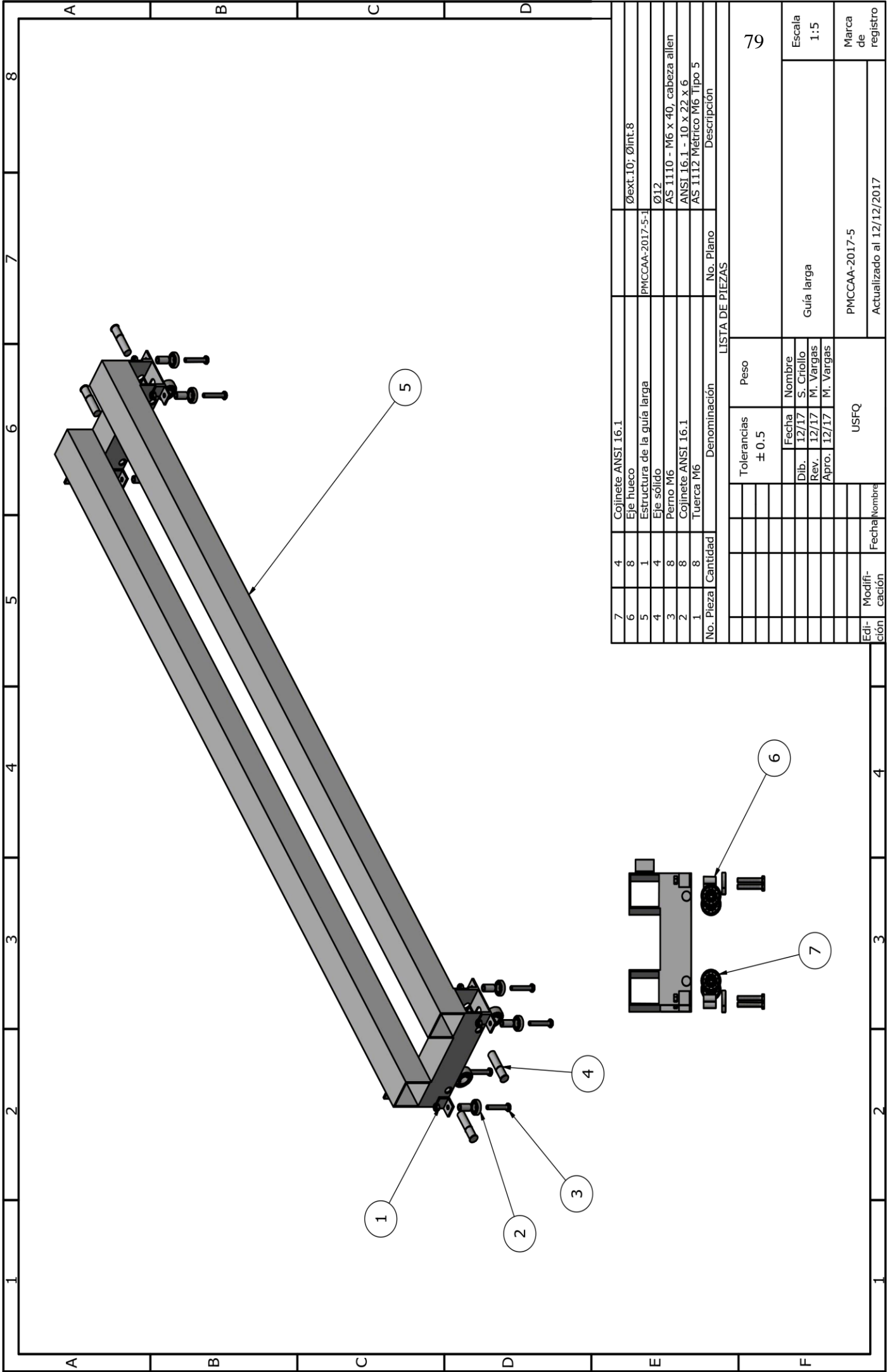
No. Pieza	Cantidad	Denominación	No. Plano	Descripción
5	1	Motobomba		HONDA GC190; Part No. 1.107-267.0
4	1	Barra Pulverizadora		Adaptable a la Cámara de Mezcla (Agua-Abrasivo)
3	1	Pistola dosificadora		Pistola (dosificadora) de disparo VersaGRIP™; Serial No. 8.755-093.0
2	1	Manguera de Baja Presión		Manguera de 3/4"; Uso convencional con sobretuerca y rosca interior
1	1	Manguera de Alta Presión		3/8"; Pres./Temp.máx:24.8MPa/60°C
LISTA DE PIEZAS				
		Tolerancias	Peso	75
		± 0.5		
		Fecha	Nombre	
		Dib. 12/17	S. Criollo	
		Rev. 12/17	M. Vargas	
		Apro. 12/17	M. Vargas	
		USFQ		Escala 1:10
				Sistema de Alta Presión
				Marca de registro
				PMCAA-2017-1
				Actualizado al 12/12/2017



No. Pieza	Cantidad	Denominación	No. Plano	Descripción
6	1	Contenedor de Abrasivo		Volumen de 15 120 cm ³
5	1	Sonda de Aspiración		Aspiración Regulable
4	1	Manguera de Transporte de Abrasivo		Manguera de 3/4" de diámetro
3	1	Boquilla de Corte	PMCCAA-2017-2-1	
2	1	Cámara de Mezcla		Sistema de Hidroarenado
1	1	Boquilla de 0° para la barra pulverizadora		Kärcher; No. Serie 0.081-874.0

LISTA DE PIEZAS

				Tolerancias ± 1		Peso		
					Fecha	Nombre		
				Dib.	12/17	S. Criollo	Sistema de Abrasivo	Escala 1:10
				Rev.	12/17	M. Vargas		
				Apro.	12/17	M. Vargas		
				USFQ			PMCCAA-2017-2	Marca de registro
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				Actualizado al 12/12/2017	



No. Pieza	Cantidad	Denominación	No. Plano	Descripción
4		Cojinete ANSI 16.1		Øext:10; ØInt:8
6	8	Eje hueco		
5	1	Estructura de la guía larga	PMCCAA-2017-5-1	
4	4	Eje sólido		Ø12
3	8	Perno M6		AS 1110 - M6 x 40, cabeza allen
2	8	Cojinete ANSI 16.1		ANSI 16.1 - 10 x 22 x 6
1	8	Tuerca M6		AS 1112 Métrico M6, Tipo 5

LISTA DE PIEZAS			
Tolerancias	Peso	Fecha	Nombre
± 0.5		12/17	S. Criollo
		12/17	M. Vargas
		12/17	M. Vargas

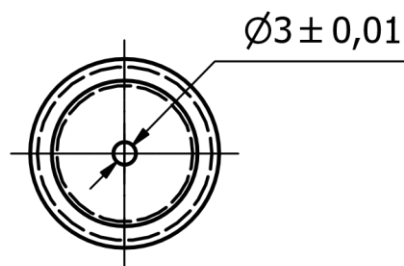
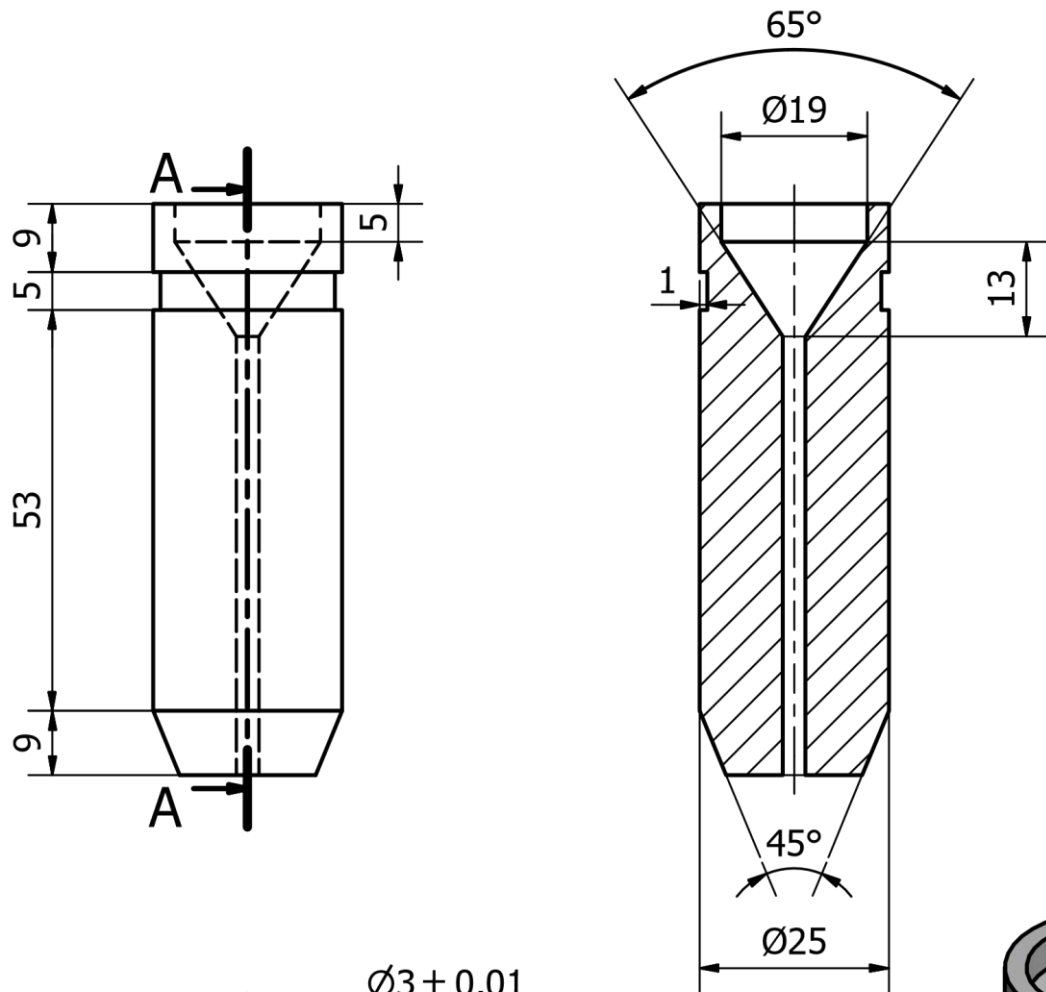
Edición	Modificación	Fecha	Nombre

USFQ		PMCCAA-2017-5	
Actualizado al 12/12/2017		Actualizado al 12/12/2017	

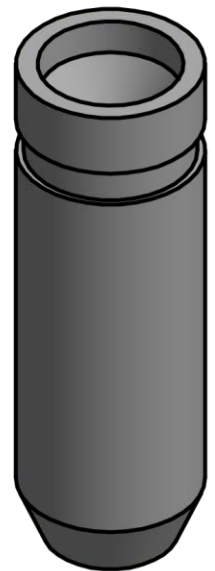
79		Guía larga	
Escala 1:5		Escala 1:5	
Marca de registro		Marca de registro	

CORTE
A-A
(1 : 1)

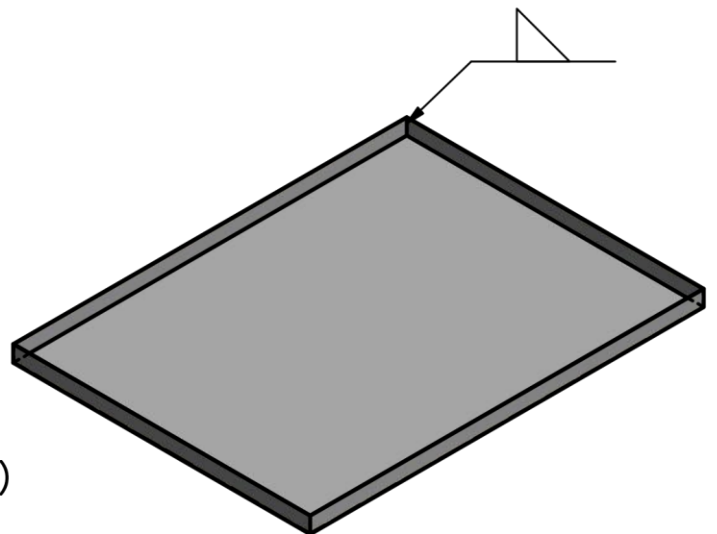
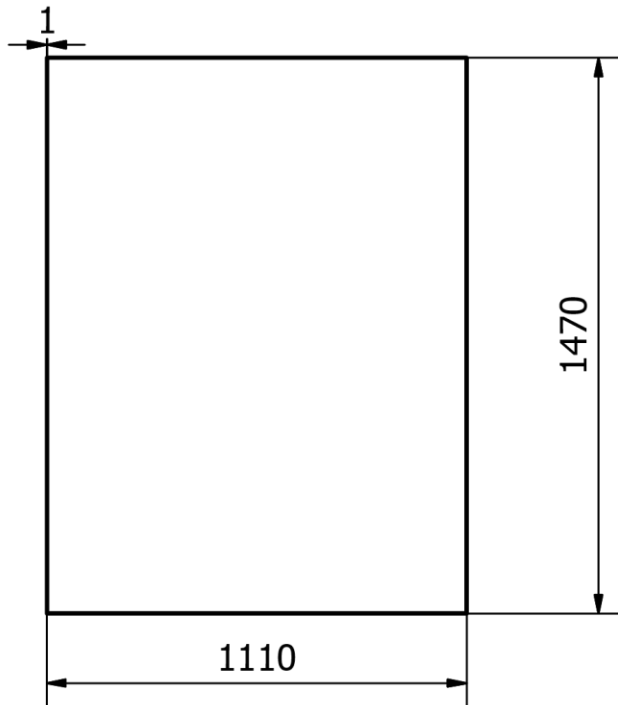
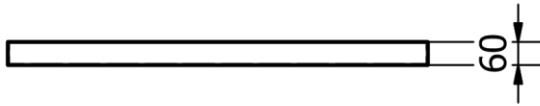
80 N6



NOTA:
- Torneado de ranura, cónico y refrentado
- Taladrado
- Temple después de maquinado



TRAT. TÉRMICO	Temple al aceite; Temp: 800 °C, Dureza 60 HRC	USFQ	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO			DIB.	Sebastián Criollo
MATERIAL: Acero AISI O1	TOL. GRAL. ± 0.1	Escala 1:1	DIS.	Sebastián Criollo
			REV.	Michel Vargas PhD.
			Boquilla de Corte	

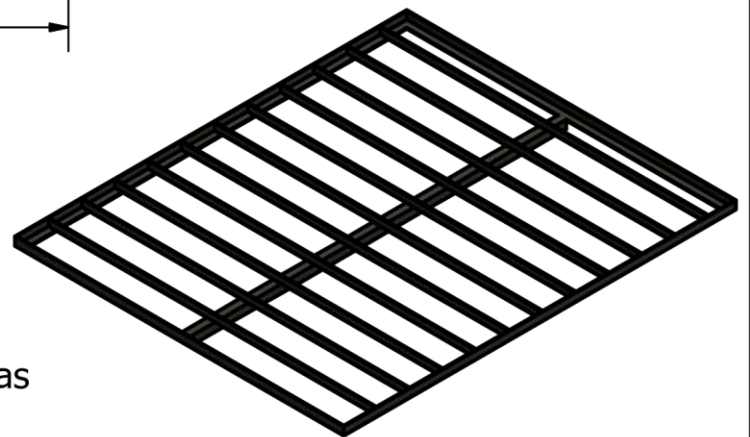
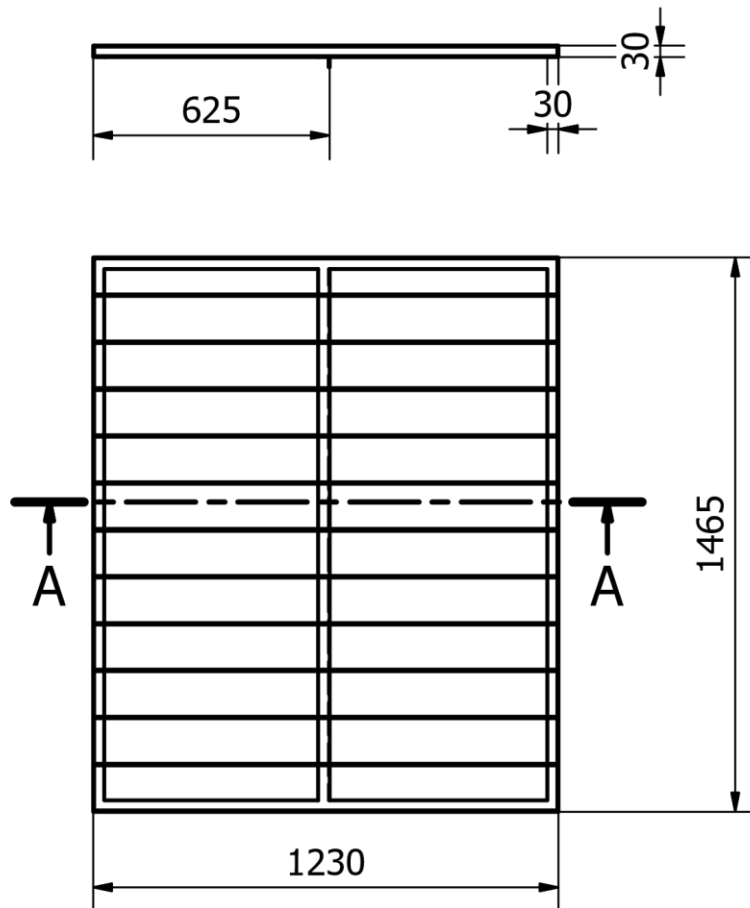


NOTA: Doblado y soldadura
por arco eléctrico (electrodo 6011)

TRAT. TÉRMICO		USFQ	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA		
RECUBRIMIENTO			DIB.	Sebastián Criollo	
MATERIAL: Lámina de Hierro Galvanizada de 1 mm de espesor		TOL. GRAL. ± 1	Escala 1:20	DIS.	Sebastián Criollo
				REV.	Michel Vargas PhD.
Bandeja de mesa de corte		PMCAA-2017-3-1		FECHA 12/12/17	

N7

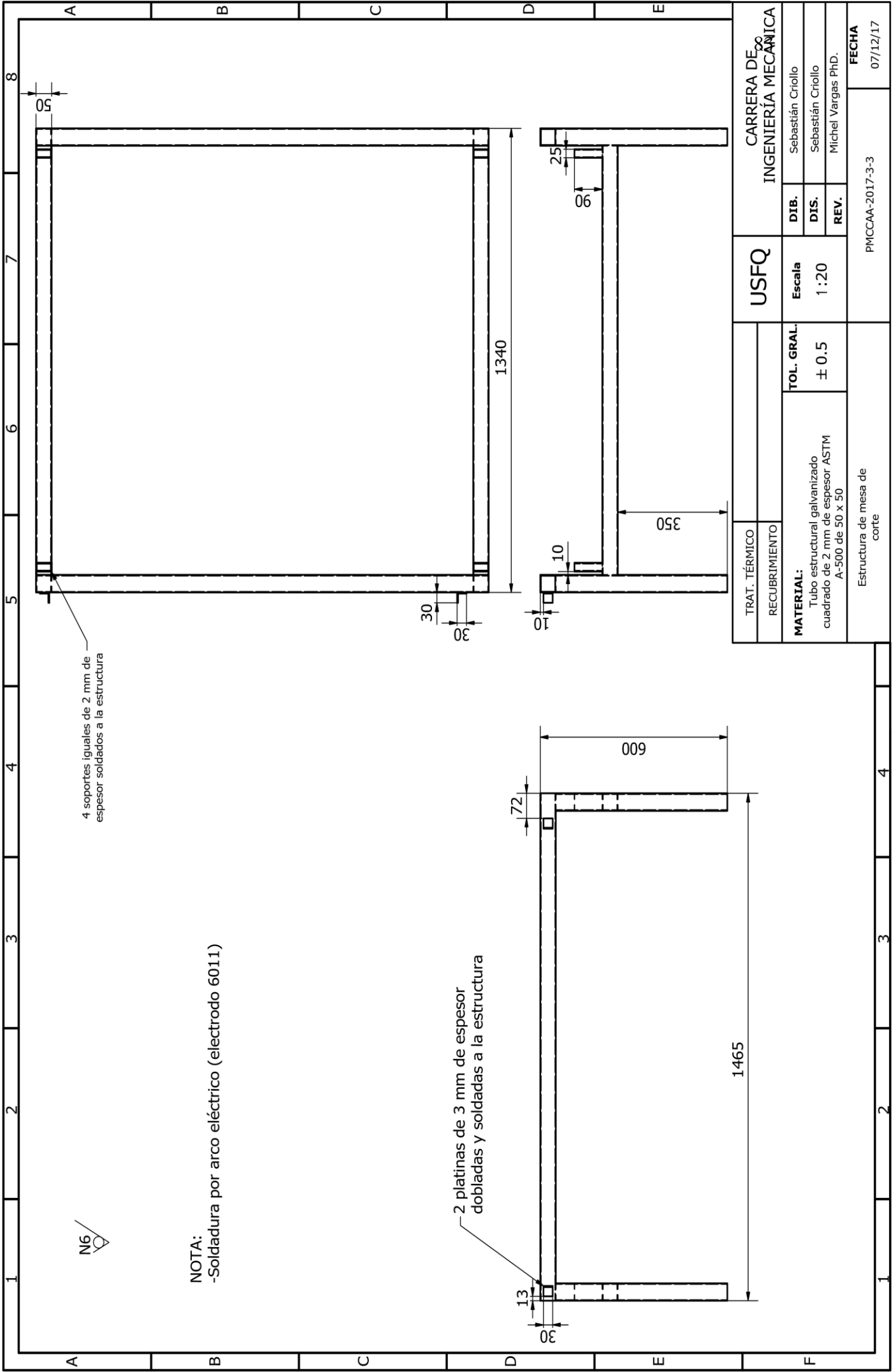
CORTE
A-A
(1 : 20)



NOTA:

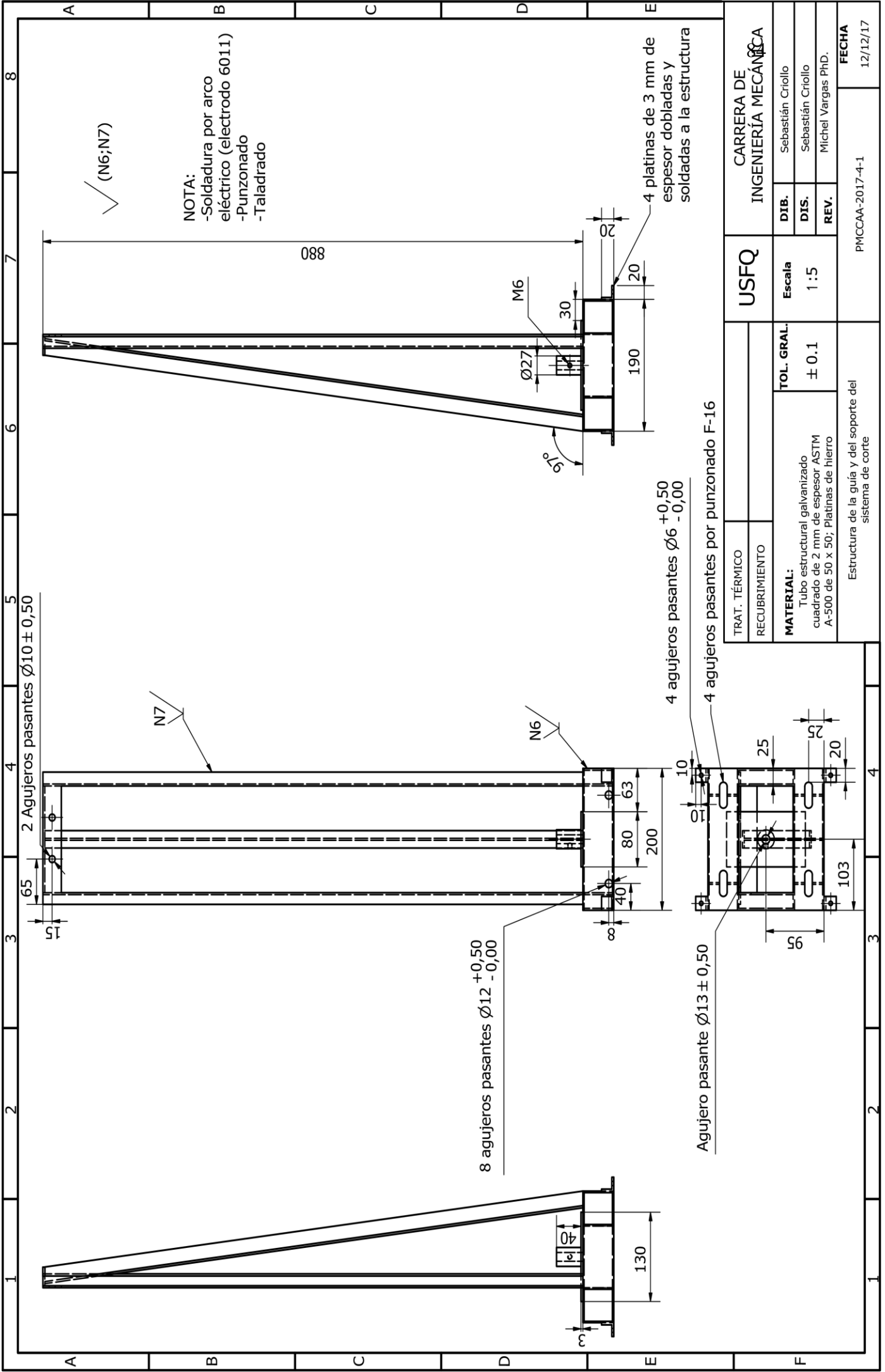
- 11 platinas de 1224x25x3 mm soldadas equidistantes a 120 mm de distancia
- Soldadura por arco eléctrico (electrodo 6011)

TRAT. TÉRMICO		USFQ	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO			DIB.	Sebastián Criollo
MATERIAL: Platinas y ángulos de hierro de 3 mm de espesor	TOL. GRAL. ± 1	Escala 1:20	DIS.	Sebastián Criollo
			REV.	Michel Vargas PhD.
			Superficie de trabajo de mesa de corte	



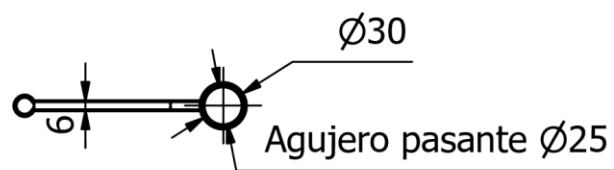
NOTA:
-Soldadura por arco eléctrico (electrodo 6011)

TRAT. TÉRMICO		USFQ	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO				
MATERIAL: Tubo estructural galvanizado cuadrado de 2 mm de espesor ASTM A-500 de 50 x 50	TOL. GRAL.	± 0.5	DIB.	Sebastián Criollo
	ESCALA	1:20	DIS.	Sebastián Criollo
			REV.	Michel Vargas PhD.
Estructura de mesa de corte		PMCCAA-2017-3-3	FECHA	
			07/12/17	

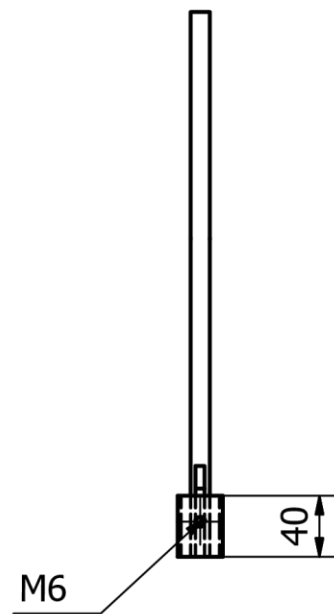
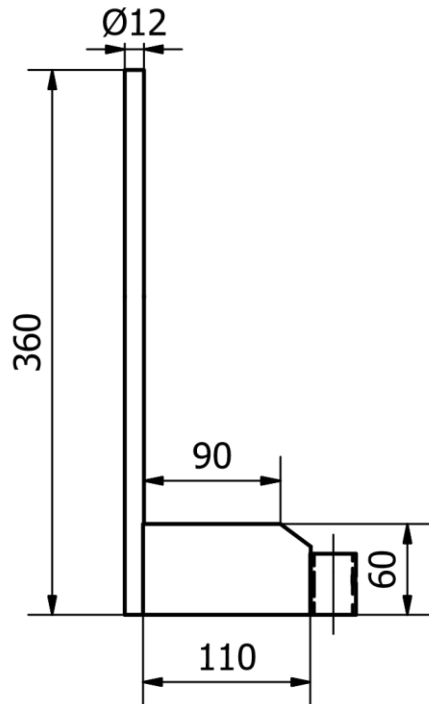


TRAT. TÉRMICO		USFQ	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
RECUBRIMIENTO			
MATERIAL: Tubo estructural galvanizado cuadrado de 2 mm de espesor ASTM A-500 de 50 x 50; Platinas de hierro	TOL. GRAL.	Escala	DIB.
	Estructura de la guía y del soporte del sistema de corte	$\pm 0,1$	DIS.
			REV.
PMCCAA-2017-4-1	12/12/17		

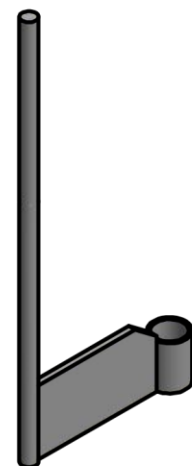
Sebastián Criollo
Sebastián Criollo
Michel Vargas PhD.



N6



NOTA:
-Soldadura por arco
eléctrico (electrodo 6011)

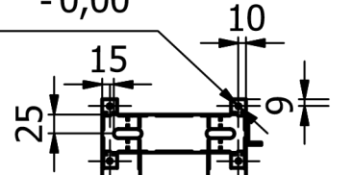


TRAT. TÉRMICO		USFQ	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO			DIB.	Sebastián Criollo
MATERIAL: Acero AISI 1018	TOL. GRAL. ± 0.5	Escala 1:5	DIS.	Sebastián Criollo
			REV.	Michel Vargas PhD.
			Soporte de la boquilla de corte	

N6

NOTA:
 -Soldadura por arco
 eléctrico (electrodo 6011)
 -Punzonado

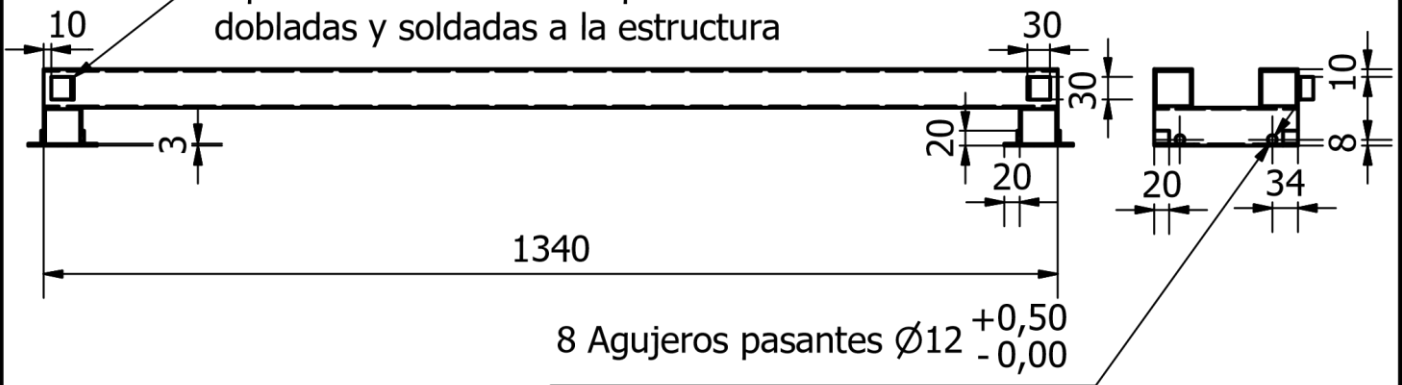
8 Agujeros pasantes $\varnothing 6^{+0,50}_{-0,00}$ ⁸⁶



4 agujeros pasantes por punzonado F-16

8 platinas de 3 mm de espesor dobladas y soldadas a la estructura

2 platinas de 3 mm de espesor dobladas y soldadas a la estructura



8 Agujeros pasantes $\varnothing 12^{+0,50}_{-0,00}$

TRAT. TÉRMICO		USFQ	CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA	
RECUBRIMIENTO			DIB.	Sebastián Criollo
MATERIAL: Tubo estructural galvanizado cuadrado de 2 mm de espesor ASTM A-500 de 50 x 50; Platinas de hierro	TOL. GRAL. ± 0.5	Escala 1:10	DIS.	Sebastián Criollo
			REV.	Michel Vargas PhD.
			FECHA 12/12/17	
Estructura de la guía larga		PMCCAA-2017-5-1		