

**DISEÑO Y SIMULACIÓN DE  
UNA CORTADORA DE  
MATERIALES DEL TIPO  
WATERJET PARA USO  
INDUSTRIAL**

**DESIGN AND SIMULATION OF  
A WATERJET MATERIAL  
CUTTER FOR INDUSTRIAL USE**

**PROJETO E SIMULAÇÃO DE  
UM CORTADOR DE  
MATERIAL A JATO DE ÁGUA  
PARA USO INDUSTRIAL**

**Juan Felipe Alba Gómez**

Empresa de Soluciones, Servicio e  
Innovación ESSI S.A.S.,  
juan.alba@essisas.com

**Carlos Andrés Aguirre Rodríguez**

Ingeniería Mecánica, Universidad  
Santo Tomás, Seccional Tunja,  
carlos.aguirre@usantoto.edu.co

130

**Fecha de Recepción:** 30 de septiembre de 2019  
**Fecha aprobación:** 06 de marzo de 2020

## Resumen

El corte por chorro de agua abrasivo (AWJ) es una tecnología moderna que tiene la capacidad de cortar cualquier tipo de material sin producir zonas afectadas térmicamente (ZAT) ya que no se genera ningún aporte de calor durante el mismo. Este proyecto muestra y estudia, por medio de la dinámica de fluidos computacional (CFD), el comportamiento del agua y las partículas del abrasivo utilizadas para este tipo de cortes en el diseño de la máquina, con el fin de demostrar la factibilidad del diseño propuesto. Este análisis usa el modelo turbulencia  $k-\epsilon$ , ya que, ante otros modelos, éste se acopla mejor al fenómeno a evaluar y genera un menor consumo de recursos computacionales; así mismo, se realiza la configuración de un fluido mezcla y la creación de una partícula sólida de arrastre y de impacto. Para el diseño de la waterjet se examinaron múltiples piezas comerciales y artículos relacionados con la temática, con el fin de seleccionar las medidas y materiales adecuados, apoyándose en piezas estandarizadas de fácil obtención con proveedores y empresas fabricantes nacionales en su mayoría, con el fin de crear una máquina que responda a las necesidades de las pequeñas y medianas industrias del país. En el presente estudio se demuestra la viabilidad del diseño de la máquina de corte sustentado con diferentes tipos de cálculos hidráulicos específicos para este tipo de máquinas hidráulicas, alcanzando velocidades

del fluido optimas que logren acelerar la partícula lo suficiente según previas investigaciones y un óptimo comportamiento de trabajo durante las simulaciones realizadas bajo una prueba de diferentes variables utilizando las características del material más cercanas al abrasivo utilizado en este tipo de cortes, el granate.

**Palabras clave—** AWJ, corte por chorro de agua, dinámica de fluidos computacional CFD, diseño mecánico.

## Abstract

Abrasive WaterJet Cutting (AWJ) is a modern technology that has the ability to cut any type of material without producing thermally affected areas (ZATs) as no heat input is generated during it. This project shows and studies, through computational fluid dynamics (CFD), the behavior of water and abrasive particles used for this type of cuts in machine design, in order to demonstrate the feasibility of the proposed design. This analysis uses the  $k-\epsilon$  turbulence model, since before other models, it is better coupled to the phenomenon to evaluate and generates a lower consumption of computational resources; as well, the configuration of a mixture fluid and the creation of a solid drag and impact particle is performed. For the design of the waterjet, multiple commercial parts and articles related to the theme were examined, in order to select the appropriate measurements and materials, relying on standardized parts that are easily

obtained with suppliers and companies mostly domestic manufacturers, in order to create a machine that responds to the needs of the country's small and medium-sized industries. This study demonstrates the feasibility of the design of the sustained cutting machine with different types of hydraulic calculations specific to this type of hydraulic machines, reaching optimal fluid speeds that manage to accelerate the particle sufficiently according to previous research and optimal working behavior during simulations performed under a test of different variables using the characteristics of the material closest to the abrasive used in this type of cuts, the granate.

**Keywords—** AWJ, waterjet cutting, COMPUTational fluid dynamics CFD, mechanical design.

## Resumo

O Corte abrasivo do WaterJet (AWJ) é uma tecnologia moderna que tem a capacidade de cortar qualquer tipo de material sem produzir áreas afetadas termicamente (ZATs), já que nenhuma entrada de calor é gerada durante ele. Este projeto mostra e estuda, por meio da dinâmica dos fluidos computacionais (CFD), o comportamento da água e das partículas abrasivas utilizadas para este tipo de cortes no desenho da máquina, a fim de demonstrar a viabilidade do projeto proposto. Esta análise utiliza o modelo de turbulência k- $\epsilon$ , uma vez que, na frente de outros modelos, é melhor acoplado ao fenômeno a ser avaliado e gera um menor consumo de recursos computacionais; também executa a

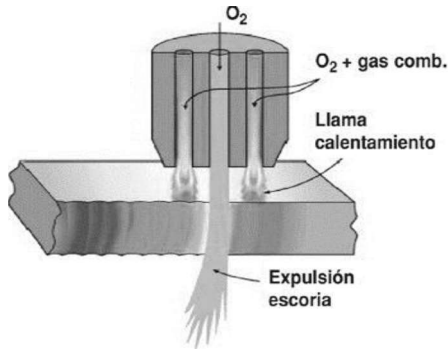
configuração de uma mistura de fluidos e a criação de uma partícula de arrasto sólido e impacto. Para o desenho do jato d'água, foram examinadas várias peças comerciais e artigos relacionados ao tema, a fim de selecionar as medidas e materiais adequados, contando com peças padronizadas que são facilmente obtidas com fornecedores e empresas, em sua maioria fabricantes nacionais, a fim de criar uma máquina que responda às necessidades das pequenas e médias indústrias do país. Este estudo demonstra a viabilidade do desenho da máquina de corte sustentada com diferentes tipos de cálculos hidráulicos específicos para este tipo de máquinas hidráulicas, atingindo velocidades de fluidos ideais que conseguem acelerar a partícula suficientemente de acordo com pesquisas anteriores e comportamento de trabalho ideal durante simulações realizadas sob um teste de diferentes variáveis utilizando as características do material mais próximo ao abrasivo utilizado neste tipo de cortes, o granato.

**Palavras-chave—** AWJ, corte de jato de água, CFD da dinâmica do fluido computacional, design mecânico

## Introducción

En el proceso de elaboración y corte de piezas, ya sea por lote o pedido, las máquinas de corte más tradicionales (como el plasma, laser y oxicorte) usan el aporte de calor para fundir, derretir o evaporar el material, como se muestra en la figura 1.

Fig. 1. Corte mediante el proceso de Oxicorte



Fuente: tecnologíassoldadura.com

Estas zonas afectadas por el calor presentan procesos o cambios como la oxidación, nitruración, corrosión y corrosión intergranular, fragilización por hidrógeno y temple localizados lo cual hace que sea necesario el uso de operaciones secundarias de mecanizado en muchos casos. ALDAZABAL, J. (2016).

En la historia de las herramientas de corte, la evolución ha sido muy poca hasta la llegada de la revolución industrial, donde se presentaban pocos problemas con respecto a los materiales que se mecanizaban en ese entonces (hierro forjado, bronce y fundición gris). Ahora, en la actualidad, los procesos de corte han incursionado en la industria con un mayor grado de importancia, hasta el punto de ser indispensables en casi todas las actividades diarias de las empresas, y no solo en sectores metalmeccánicos, sino de toda empresa que requiera la transformación de material para diferentes usos. KATZ, J. (1986).

Las máquinas de corte del tipo waterjet incursionan en la industria en 1980 y demuestran que traen beneficios como acabados muy finos y corte en materiales de mayor espesor de los que se podían hacer con anteriores máquinas, gracias a sus diferentes abrasivos. FRANCO, A.

F. V. (2017).

Su mayor ventaja es que no produce calor por fricción o por calentamiento del material, ya que no utilizan un campo conductor o atmósfera ionizada o gas especial para su proceso, cuidando las propiedades mecánicas del material que eran alteradas por el aporte de calor de los anteriores métodos de corte, lo cual evita la creación de las ZAT. KRAR, S. F. (2002).

Adicionalmente, a nivel nacional, las áreas de trabajo donde se encuentran ubicadas las industrias y empresas se ven cada vez más afectados por problemas de presupuesto y/o ubicación, lo cual lleva a la reducción de las máquinas que se pueden emplear dentro de una fábrica, en especial de medianas y pequeñas empresas, resaltando sus restricciones de diseño establecidas por la cantidad de espacio disponible en este tipo de empresas.

Ante este tipo de necesidades, se planteó utilizar el sistema de corte por AWJ, ya que son en su mayoría máquinas pequeñas o de mucho menor tamaño en comparación con otras máquinas de corte, ya que el diseño de la máquina puede ser adaptable, lo cual permite rediseñar y acoplar a diferentes espacios y medidas, según la necesidad, la presión de bomba y el material de corte que se maneje.

La primera fase de investigación, cálculos y recolección de datos busca demostrar la viabilidad de este tipo de máquinas gracias a la obtención de los principales componentes para su fabricación con proveedores a nivel nacional; seguida de una segunda fase de diseño y simulación CFD, la cual permitirá establecer que bajo los materiales, cálculos y diseños realizados se lograran alcanzar velocidades del fluido lo suficientemente altas para acelerar la partícula abrasiva, como lo

indica MOSTOFA, M. G. (2010) , que deformaría plásticamente el material y que, luego de sucesivos impactos, se fracturará.

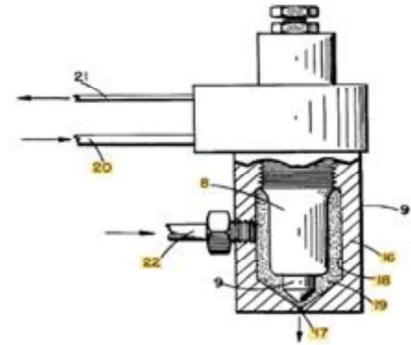
## Antecedentes

En el siglo XIX, se creó el proceso de oxicorte, una técnica que consiste en la fusión misma del material, el cual se funde a medida que avanza el soplete, volviendo complicado su aplicación en las aleaciones de materiales por su gran aporte de calor; en la década de los años 50, ingenieros de la empresa Unión Caribe Corp. crean el corte por plasma, un técnica de corte capaz de cortar en sus inicios placas de acero inoxidable y aluminio de 0,5 pulgadas hasta 6 pulgadas de espesor; en 1965, surge el corte por láser, técnica capaz de enfocar el haz de un láser en un punto del material hasta alcanzar el punto de fusión, como se observa en la figura 2.

La tecnología de corte por chorro de agua a presión data del año 1870, cuando los mineros de oro Californianos encuentran la necesidad de remover capas de arena para realizar sus excavaciones, basándose en una antigua técnica romana de erosión de tierra por gravedad y presión de agua. GAUERT, C. D. (2013).

La primera patente comercial del uso de corte por agua a presión surge en la 1933 cuando Paper Patents Company desarrolla una boquilla de corte por chorro de agua a presión para realizar cortes en diagonal sin detener la producción de hoja de papel, creciendo innovadoramente hasta llegar a 1985, con la patente US2985050A, con la cual se pudo realizar cortes de paneles de extrema dureza para uso aeroespacial, como se observa en la figura 2. INFANTE S. A. (2008).

Fig. 2. Corte líquido para materiales duros.



Fuente:

<https://patents.google.com/patent/US2985050>

En la actualidad, se han desarrollado maquinas más potentes, con mayor precisión y de menor tamaño, hasta el punto de crear la primera waterjet de escritorio, con la suficiente fuerza de cortar espesores como aleaciones de aluminio 6061 hasta 12.5 mm, acero 4130 y 1008 hasta 4.5mm, titanio G5 hasta 4.5 mm fibra de carbono hasta 6 mm y diferentes plásticos y cerámicos hasta 12.5 mm. WAZER (2018).

## Metodología y desarrollo

En el desarrollo de este proceso, se destacó y priorizó las limitaciones y problemáticas de las industrias en Colombia, las cuales son dos esencialmente: innovación en nuevas tecnologías y espacios o áreas de trabajo reducidas.

Teniendo en cuenta las condiciones iniciales, se realizó un estudio de las posibilidades de implementación de las tecnologías de corte por chorro de agua como una opción en innovación tecnológica, haciendo hincapié en la importancia de los cálculos hidráulicos para generar grandes presiones y altas velocidades, así como la consideración de realizar un diseño compacto, el cual podría tener las posibilidades incluso de ser diseñada a medida.

También se estableció el material más usado en las empresas de metal-mecánica para corte de láminas, el cual resulta ser el acero AISI-SAE 1020 recocido como elemento base de la simulación, que presenta un límite de elasticidad de 294 MPa y 500 MPa de resistencia a la tracción, de acuerdo con los datos proporcionados por la Sociedad Americana de Metales.

### A. Cálculos numéricos

Se analizó la posibilidad de realizar cortes de materiales únicamente con agua (WJC), utilizando la analogía de que la fuerza de corte necesaria para perforar un material sería igual a la fuerza necesaria que debería de tener el agua al impactar con ese dicho material, con el fin de encontrar las velocidades que requeriría el fluido y las presiones de bomba necesarias para el corte, como se muestra de la ecuación 1 a la 3.

$$F_{\text{Agua}} = F_{\text{corte}} = \tau_{\text{corte}} * A_s \quad (1)$$

La fuerza de corte  $F_{\text{corte}}$  necesaria para perforar una plancha está dada en función del área superficial  $A_s$  y el esfuerzo cortante máximo  $\tau_{\text{corte}}$  del material a analizar

$$V_{\text{Agua}} = \sqrt{\frac{F_{\text{Agua}}}{A * \rho}} \quad (2)$$

Con la fuerza del agua  $F_{\text{Agua}}$  podemos encontrar la velocidad del agua  $V_{\text{Agua}}$  necesaria para el trabajo, donde  $A$  es el área del chorro o hilo de agua y  $\rho$  la densidad del fluido.

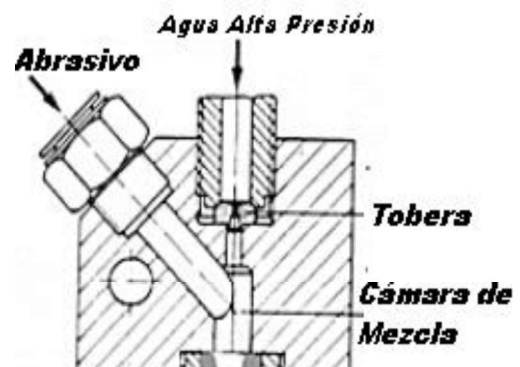
$$P_1 = \gamma * \left( \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} \right) \quad (3)$$

La presión inicial  $P_1$  hace referencia a la presión nominal de bomba que se requeriría para dicha posibilidad, donde  $\gamma$  es el peso específico del agua y  $g$  la gravedad de la tierra.

Sin embargo, bajo la investigación, para materiales de mayor dureza o alta dureza se requiere la utilización de un abrasivo en el corte (AWJC), como lo expone OSTILLA, M. B en su estudio de prefactibilidad para cortar láminas de acero inoxidable de  $\frac{1}{2}$ " con esta tecnología.

El principio de esta tecnología consta en la aceleración de una partícula abrasiva mediante el fluido de trabajo. Al salir el agua de la tobera, sólo permanece estable un corto tramo, ya que luego su forma y diámetro dejan de ser uniformes. El ingreso del abrasivo se realiza en ese momento dentro de la cámara de mezcla, como se muestra en la figura 3.

Fig. 3. Inyección de abrasivo en un chorro de agua



Fuente: FlowTech Energy.

Basados en los cálculos de la primera fase del proyecto se seleccionó la bomba hidráulica intensificadora KMT SL-V 15 PLUS de 60000 PSI y 15 HP debido a la necesidad de utilizar presiones extremadamente altas para este tipo de máquinas con dimensiones reducidas. Con la presión hidráulica de la bomba es posible conocer la velocidad teórica del agua, al ser despejada de la ecuación de Bernoulli como se muestra en la ecuación 4.

$$V_{th} = \sqrt{\frac{2p}{\rho}} \quad (4)$$

Siendo la velocidad del agua  $V_{th}$  únicamente dependiente de la presión  $P$  y de la densidad del fluido  $\rho$  es fácil obtener un valor teórico de la misma, sin embargo, en máquinas hidráulicas de tan alta presión es necesario utilizar la compresibilidad del agua, como se muestra en la ecuación 5.

$$V_j = \sqrt{\frac{2L}{(1-n)\rho_0} * \left[ \left( 1 + \frac{P}{L} \right)^{1-n} - 1 \right]} \quad (5)$$

La velocidad del chorro de agua  $V_j$  está dada por una relación de densidades en la cual, bajo tablas y estudios previos, con agua a 25°C se obtienen valores de  $L=300$  MPa y  $n=0,1368$ , como lo presenta MOSTOFA, M. G (2010) en sus estudios de análisis computacional de fluidos en boquillas de AWJC.

Con las diferentes velocidades encontradas es posible calcular un factor de compresibilidad para estas máquinas como lo expresa AHMADI-BROOGHANI, S. Y. (2010) y como se puede evidenciar en las ecuaciones 6.

$$\varphi = \frac{V_j}{V_{th}} = \sqrt{\frac{L}{P(1-n)} \left[ \left( 1 + \frac{P}{L} \right)^{1-n} - 1 \right]} \quad (6)$$

Ahora, el coeficiente de descarga  $C_d$  para este tipo de máquinas hidráulicas es de 0.8, con el cual, se puede determinar la velocidad real que podría lograrse obtener con la bomba seleccionada y las propuestas de diseño utilizada, como se explica en la ecuación 7.

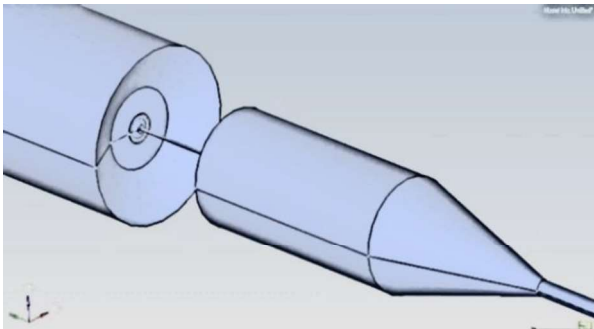
$$V_j = C_d * \varphi * V_{th} \quad (7)$$

Finalmente, para la terminación de los cálculos numéricos se encontró la energía de impacto de la partícula, como se muestra en la ecuación 8, al imprimirle un 45% de la velocidad real del fluido ya que, según los últimos dos autores nombrados, la velocidad que podría alcanzar la partícula se encuentra entre un 40% y un 50% de la velocidad real generada por el agua a la salida de la boquilla.

$$E_I = \frac{m * v^2}{2} \quad (8)$$

## B. Simulación del fluido

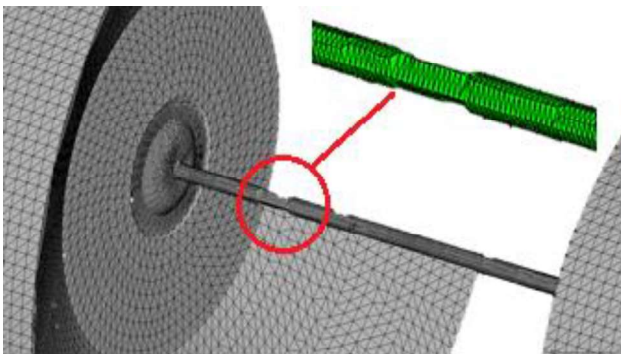
Se realizó un dibujo CAD del volumen de control en el software Inventor, como se observa en la figura 4

**Fig. 4. Volumen de control del cabezal en CAD**

Fuente: Autores

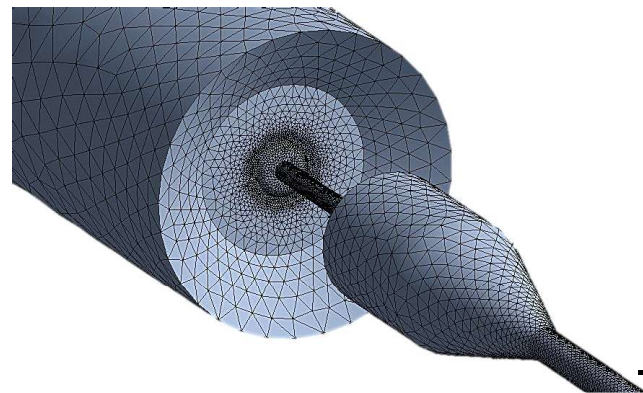
El sólido 3D del volumen de control se importó en formato STEP a un programa de refinamiento manual de malla (mesh), ya que se debe definir un tamaño de malla que genere resultados más precisos reduciendo el tamaño del error en la solución numérica debido a los diminutos diámetros que manejan los orificios de estrangulación en las diferentes simulaciones.

Los refinamientos de malla de 0,1 mm, 0,01 mm y 0,001 mm presentaron geometrías no consolidadas, como se muestra en la figura 5, por lo cual se desestimó el uso del método de refinamiento malla manual ya que no era posible controlar la formación y transición de elementos en esta región y se utilizó el mallado automático del software de simulación

**Fig.5. Geometría de malla no consolidada de 0,001 mm**

Fuente: Autores

La simulación generación de la malla del caso y posterior simulación se efectuaron en el software CFD de ANSYS®. Los resultados de la herramienta de generación y refinamiento automático de malla automáticos se muestran en la figura 6, donde ya no se presentan volúmenes fuera de control o con volúmenes negativos.

**Fig. 6. Mallado automático del CAD mediante ANSYS®**

Fuente: Autores

Para las condiciones de frontera de la simulación Computer Fluid Dynamics CFD se investigó y calculo los promedios de trabajo de los abrasivos utilizados, así como los caudales de fluido, aire y abrasivos de máquinas AWJC del mercado, establecidas a continuación en la Tabla 1.



**Tabla 1. Condiciones iniciales y de frontera de la simulación**

PARAMETROS	
Geometría	Diámetro de Orificio: 0,18 mm Diámetro cámara de mezcla = 4 mm Longitud cámara de mezcla = 10 mm Diámetro del tubo de enfoque = 4 mm Longitud del tubo de enfoque = 76,2 mm Diámetro salida tubo mezclador = entre 0,18 mm y 0,96 mm. Diámetro de entrada abrasivo = 1,358 mm
Condiciones de Frontera	Coeficiente de descarga, Cd = 0,8 Caudal másico abrasivo = 6 g / s Densidad abrasiva = 4250 kg / m <sup>3</sup> Factor de forma abrasiva = 1 Presión de agua = 344,7 MPa Densidad del agua = 1000 kg / m <sup>3</sup> Paredes = Adiabáticas

Fuente: autores

El número de interacciones realizadas en las simulaciones fue de un mínimo de 500 por cada prueba realizada y máximo 1000 para la simulación del fluido (agua) únicamente.

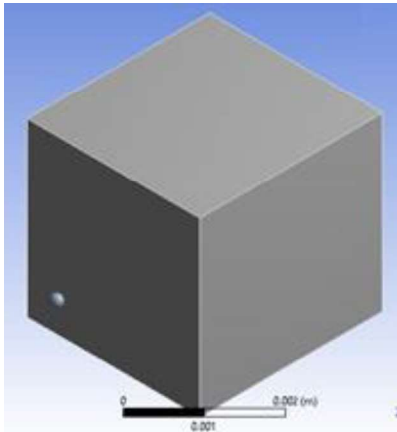
Para observar el comportamiento del abrasivo y el arrastre generada por el fluido se crea la configuración de partícula sólida, donde se realizó igualmente la creación de malla por curvatura y proximidad con un total de 24278 nodos y 111361 elementos

En el Setup se crea un material de partícula solida con las propiedades del granate (abrasivo) y una mezcla de agua, aire y granate, como lo indica la guía de ANSYS® para creación y edición de materiales. En la entrada del fluido (Inlet) la mezcla lleva un factor porcentual de 1.0 para el agua y 0% para los demás componentes, añadiendo la velocidad de entrada que se generaban en las anteriores simulaciones.

Para la entrada del abrasivo (Inlet abrass) se introduce la mezcla de nuevo con factores porcentuales de 0.7 para el abrasivo y 0.3 para el aire. El caudal de abrasivo es de 8 g/s y la velocidad del aire 2 m/s, como se encontró durante la investigación en algunas pruebas realizadas con variables y resultados similares en la literatura, para la configuración del pre-proceso. MOSTOFA, M. G. (2010).

En el caso de la simulación de impacto o Explicit Dynamics, se crea en Inventor la partícula del material abrasivo y del material base, como se muestra en la figura 7, dentro del mismo archivo, ya que, al momento de importar el archivo al software de elementos finitos, se han preestablecido unas condiciones respecto a la separación o distancia entre los materiales. Por lo anterior, se deben generar mallas independientes ya que el tamaño y geometría de ambos materiales son muy diferentes

Fig. 7. Partícula y material a cortar ANSYS®



Fuente: Autores

## Resultados y discusión

Los valores obtenidos matemáticamente para una presión de 50000 psi son, para la velocidad teórica del agua obtenida mediante la ecuación de Bernoulli,  $V_{th} = 830 \frac{m}{s}$  y para un chorro o hilo de agua, teniendo en cuenta la relación de densidades,  $V_j = 806,33 \frac{m}{s}$ . Sin embargo, teniendo en cuenta un coeficiente de descarga o pérdidas del 20%, más el factor de compresibilidad de  $\varphi = 0,97$ , se obtiene que el valor real del agua a la salida del orificio de estrangulación logra alcanzar  $V_j = 645,06 \frac{m}{s}$ , con una velocidad del abrasivo igual a  $V_{par} = 264,47 \frac{m}{s}$ .

El diseño de las piezas que conforman la boquilla y el cabezal de la máquina muestran un sistema de corte eficaz y seguro para su trabajo. La selección de piezas estandarizadas como mangueras, rodamientos, perfiles para la estructura se basó en el manejo hidráulico de altas presiones y el peso que genera la sección móvil sobre la guía y el eje motriz, encargadas de darle movimiento al cabezal de corte. En la

figura 8 se puede visualizar el diseño final de la máquina de corte AWJ.

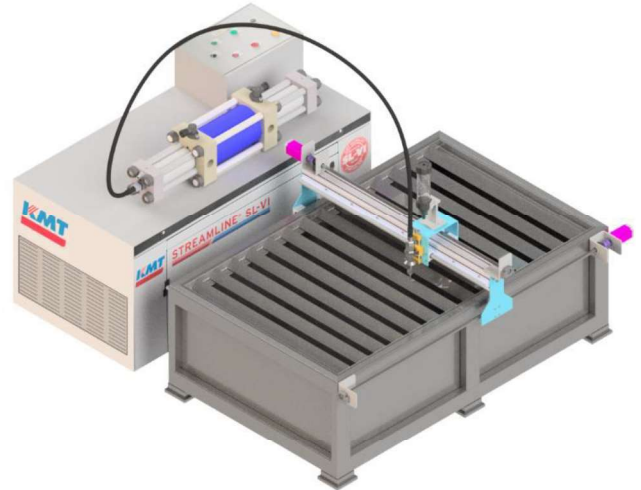


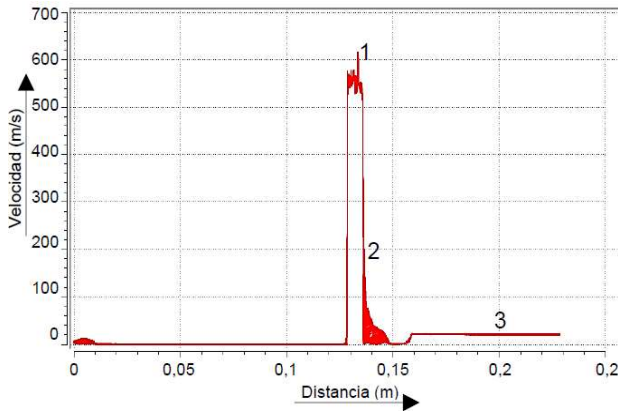
Fig. 8. Diseño final de la AWJ

Fuente: Autores

Dentro de las simulaciones realizadas del fluido, se puede observar de la figura 8 a la 11, los resultados obtenidos respecto a las velocidades creadas y alcanzadas por los diferentes tipos de boquillas utilizados versus la pérdida de la misma a través de la distancia de la cámara de expansión o mezcla. Lo diferentes puntos numéricos ubicados en las gráficas muestran el comportamiento de la velocidad a través del recorrido del fluido.

Para la prueba del diámetro de estrangulación de 0,18 mm, el punto 1 de la figura 8 muestra la velocidad máxima alcanzada; el punto 2 la caída de la velocidad por el cambio de diámetro y el punto 3 la velocidad estabilizada en la boquilla colectora de salida.

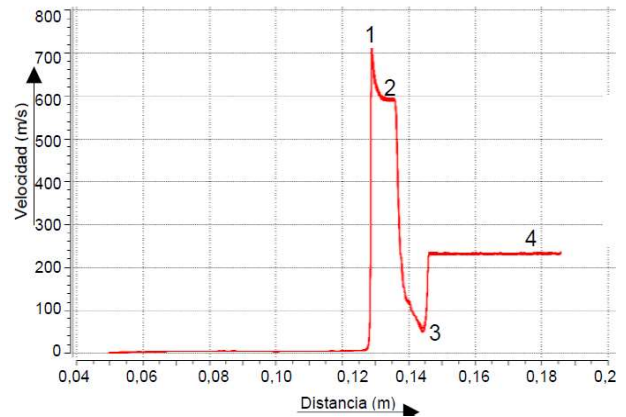
**Fig.8. Velocidades logradas por la boquilla de 0,18 mm**



Fuente: Autores

A comparación con la figura 8, la figura 9 mostrada a continuación muestra una gráfica mejor definida. El punto 1 muestra una mayor velocidad máxima alcanzada a la salida de la boquilla de estrangulación; el punto 2 la velocidad a la salida de boquilla por el cambio de diámetro; en el punto 3 la velocidad baja debido al cambio de diámetro en la sección de la cámara de mezcla; el punto 4 muestra la velocidad después de la boquilla de recolección, mucho mayor en comparación con la figura 8, resultados que demuestran concordancia y correlación con la gráfica 12 del diagrama de colores del fluido.

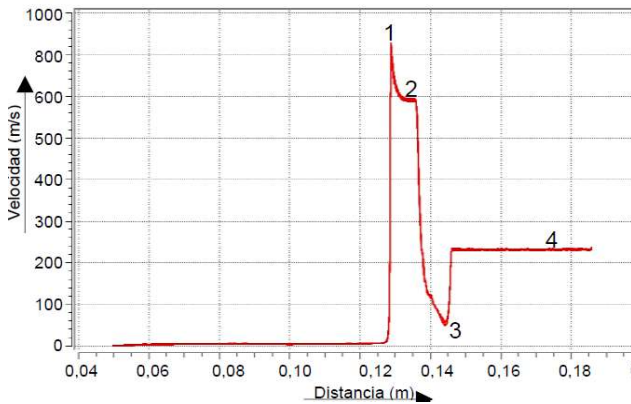
**Fig.9. Velocidades logradas por la boquilla de 0,375 mm**



Fuentes: Autores

La figura 10 representa la variación de presión del fluido de trabajo. Esta grafica tiene un comportamiento idéntico para los casos de las boquillas 0,35, 0,6 y 0,96 mm. El punto 1 representa la presión manométrica generada por la bomba hasta el momento antes de la salida de la boquilla estranguladora; el punto 2 la caída de presión a la salida del diminuto diámetro de la tobera; el punto 3 simboliza un aumento de la presión debido a la acumulación de la geometría de la boquilla recolectora; finalmente el punto 4 representa la caída total de la presión del cabezal de corte debido a la salida del fluido de trabajo al ambiente después de la aceleración por la boquilla.

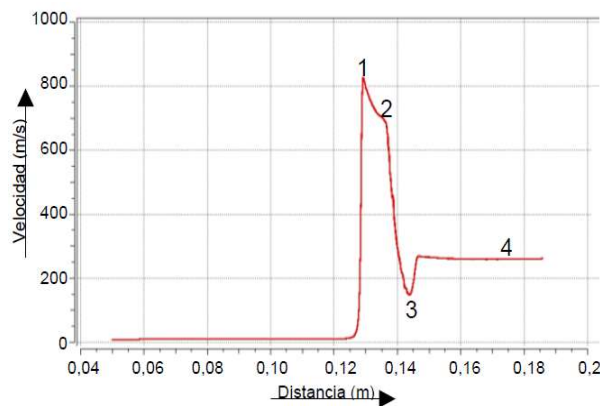
**Fig. 10. Velocidades logradas por la boquilla de 0,6 mm**



Fuente: Autores

La Figura 11 muestra un comportamiento en las relaciones de velocidades, aunque muy similar a la de la Figura 9 y a la boquilla de 0,6 mm., sin embargo, en la figura 14 se puede observar como el comportamiento de fluido para este mismo diámetro de boquilla es mejor respecto a otros diámetros utilizados en estas simulaciones.

**Fig. 11. Velocidades logradas por la boquilla de 0,96 mm**

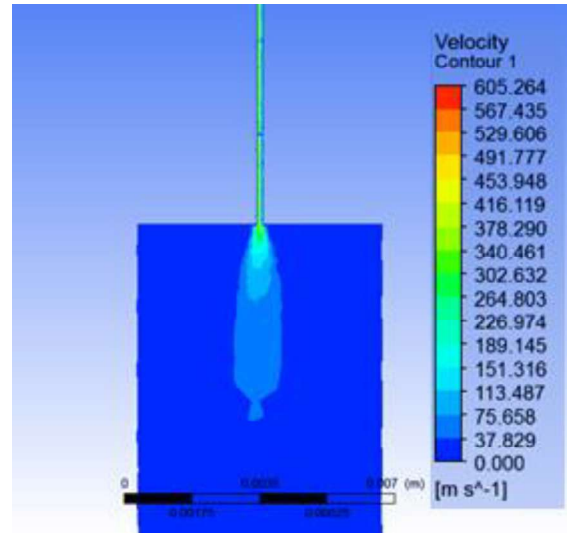


Fuente: Autores

A pesar de que el diagrama de colores muestra velocidades de hasta 600 m/s, el hilo de agua es aproximadamente 200 veces más pequeño que la cámara de mezcla, por lo cual, al momento de entrar en ella, se pierde el total de

la velocidad, expandiéndose dentro de la misma, obteniendo velocidades de salida de solo 22 m/s, muy lejano a los más de 200 m/s requeridos, como se observa en la figura 12.

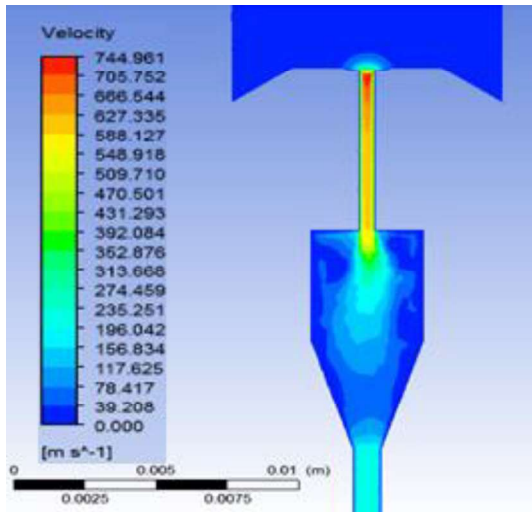
**Fig. 12. Comportamiento de la velocidad en 0.18 mm**



Fuente: Autores

La velocidad con diámetro de orificio de 0,375 mm, uno de los más usados en la industria, tiene un comportamiento aceptable respecto a la velocidad máxima generada de  $744 \frac{m}{s}$  y una velocidad de salida de la boquilla de mezcla cercana a los  $240 \frac{m}{s}$ , aunque, se expande en la cámara de mezcla más de lo recomendado según la investigación, creando demasiadas zonas con pérdidas de velocidad., como se ve en la figura 13.

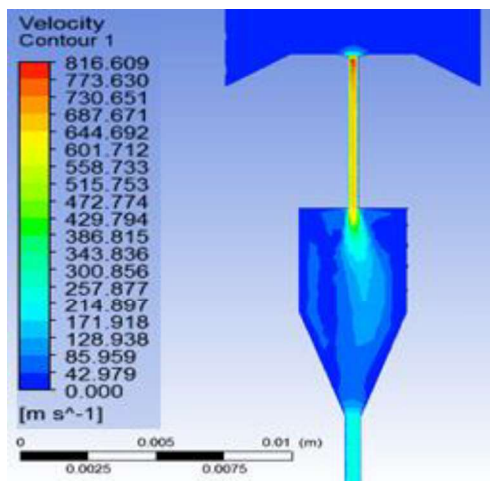
**Fig. 13. Comportamiento de la velocidad en 0.375 mm**



Fuente: Autores

La velocidad del agua, para un orificio de estrangulación de 0,6 mm, logra alcanzar una velocidad superior a los 800 m/s y velocidades de salida de la boquilla de mezcla de alrededor de 230 m/s. Su expansión en la cámara de mezcla es menor a la del orificio de 0,375 mm, como se ve en la figura 14, haciendo que la continuidad de la velocidad sea más adecuada, ofrecido menos pérdidas.

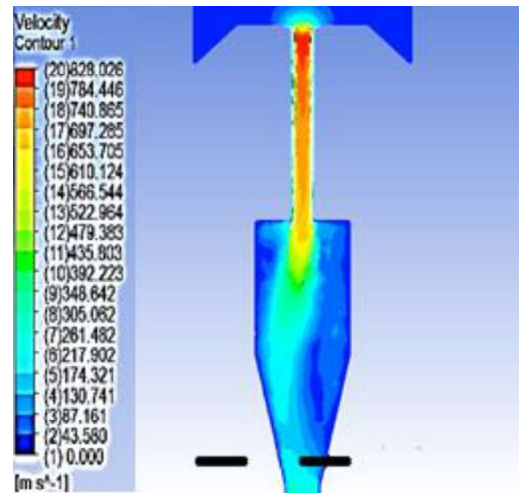
**Fig. 14. Comportamiento de la velocidad en 0.6 mm**



Fuente: Autores

En el caso del diámetro del orificio de 0.96 mm (ver figura 15), utilizado en investigaciones similares presenta el mejor comportamiento en la velocidad ya que en la cámara de mezcla mantiene una mayor uniformidad en las velocidades, favoreciendo la entrada y mezcla del abrasivo, alcanzando velocidades de salida cercanas a los 250 m/s.

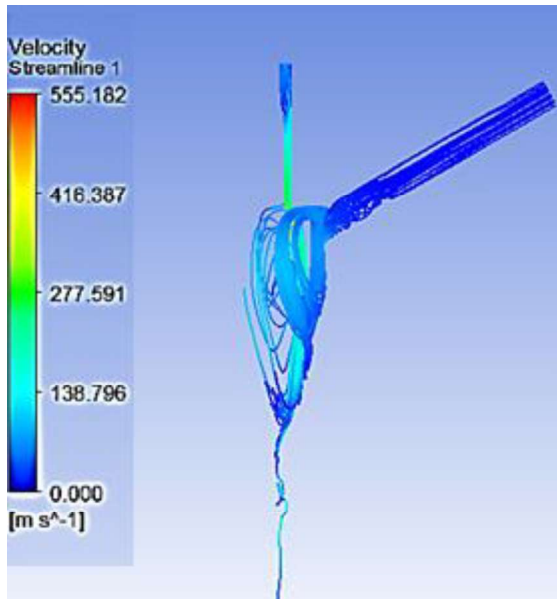
**Fig. 15. Comportamiento de la velocidad en 0.96 mm**



Fuente: Autores

La entrada de la mezcla a la cámara muestra remolinos dentro de la misma, como se observa en la figura 16. El fluido entra de forma tan abrupta y veloz que se generan vórtices al momento de entrar la partícula sólida dentro de la cámara de mezcla antes de canalizarse dentro de la boquilla colectora, alcanzando velocidades de más de 200 m/s.

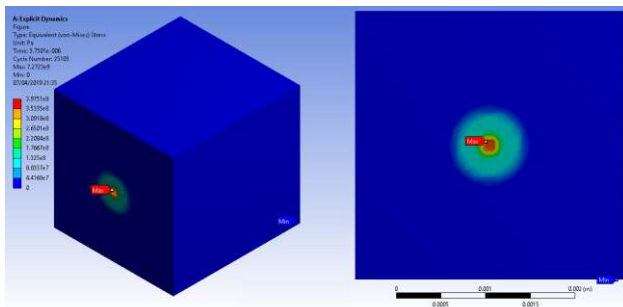
Fig. 16. Comportamiento de la velocidad en 0.6 mm



Fuente: Autores

Durante la simulación del impacto se analizó la deformación que sufría el material AISI 1020 y se verificó si el material superaba el límite de elasticidad alcanzando la zona de endurecimiento y deformación permanente del material como se muestra en la figura 17.

Fig. 17. Zona de afectación del material por la partícula

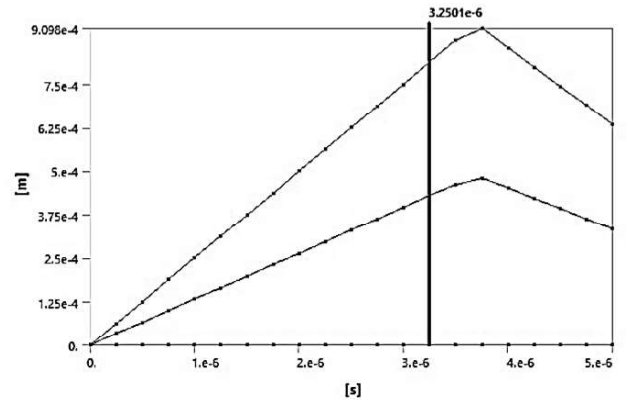


Fuente: Autores

Las simulaciones también presentaron los valores numéricos de las máximas deformaciones, como se muestra en la figura 18, donde llega a  $9.09 \times 10^{-4}$  m, estableciendo que la deformación dada por un solo elemento

abrasivo es mínima pero acumulativa y tienen una relación directamente proporcional a la cantidad de elementos abrasivos que golpean la pieza.

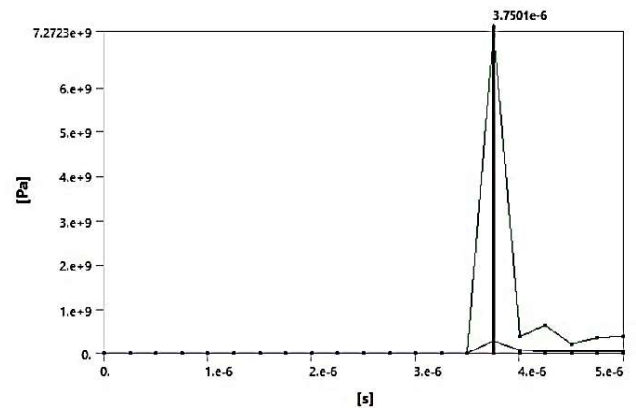
Fig.18. Deformación máxima del conjunto.



Fuente: Autores

La figura 18 presenta el esfuerzo equivalente máximo en función del tiempo, donde se puede evidenciar que alcanza los 7.27 GPa superando el límite de elasticidad del material seleccionado.

Fig. 19. Esfuerzo máximo del conjunto.



Fuente: Autores

## Conclusiones

Con la revisión bibliográfica se pudo concluir que el proceso de corte por chorro de agua a presión (AWJC) cuenta con mejores prestaciones que otros métodos como el oxicorte y el plasma ya que el aporte de calor al material es nulo y el acabado del corte es de gran calidad.

El diseño seleccionado de tamaño compacto (2 x 2 m) se acomoda a espacios reducidos de pequeñas y medianas industrias, con características semejantes a máquinas que se encuentran comercialmente en la actualidad con las mismas funcionalidades. Su estructura inferior rectangular en acero y acero inoxidable les da estabilidad y resistencia a las condiciones de trabajo, mientras que la estructura superior en perfil extruido de aluminio y placas de aluminio (7075) le proporciona un bajo peso, pero firmeza durante el corte, como se puede observar en máquinas ya diseñadas y fabricadas en otros proyectos. La estructura de la máquina, la manguera y accesorios hidráulicos y los sistemas de movimiento pueden ser comprados en empresas distribuidoras nacionales,

Los cálculos físicos demostraron que el uso exclusivo de agua para este tipo de cortes requiere de presiones extremadamente altas (15000 MPa), las cuales no pueden ser logradas en máquinas y/o bombas de desplazamiento positivo ni bombas intensificadoras de este tipo, por lo cual es necesario el uso de abrasivos para cortar materiales como lo son los aceros y otros metales de alta dureza o dureza extrema.

Al concluir las simulaciones realizadas, se demuestra que los datos obtenidos a partir de los cálculos analíticos son semejantes a los obtenidos numéricamente y que las velocidades alcanzadas por las boquillas de 0,375 mm, 0,6 mm y 0,96 mm cumplen con los

requerimientos necesarios para lograr fragilizar (por deformación plástica) y cortar el material, sin embargo, la boquilla comercial de 0,96 mm posee mejor comportamiento y un ligero aumento de la velocidad final del fluido de boquilla. La energía de impacto del abrasivo encontrada en el software logra superar el límite elástico varios materiales, como metales y aceros utilizados en la industria.

El abrasivo recomendado para este tipo de máquinas (granate) no se encuentra caracterizado en estos softwares o en artículos relacionados según la investigación (esfuerzos de fluencia, módulo de Young, módulo de compresibilidad, coeficiente de Poisson y el módulo de rigidez) por lo cual, se recomienda el estudio de este para obtener resultados más cercanos a la realidad.

Se recomienda realizar un análisis de independencias de malla que logre adaptarse mejor a las geometrías usadas, ya que en ella radica la exactitud de los resultados y los problemas encontrados durante el pre-proceso y proceso de simulación.

## Referencias

- [1] AHMADI-BROOGHANI, S. Y., HASSANZADEH, H., & KAHHAL, P. (2007). Modeling of single-particle impact in abrasive waterjet machining. *Int J Mech Sys Sci Eng*,
- [2] ALDAZABAL, J., MARTÍN-MEIZOSO, A., BANNISTER, A., CICERO GONZÁLEZ, S., & KLIMPEL, A. (2016). Propiedades mecánicas de las zonas afectadas por un corte láser, corte por plasma y oxicorte de una chapa de acero S460M de 15 mm de espesor.
- [3] ANCCA QUIROZ, E. M., & HUAMANI, R. H. (2017). Evaluación y determinación de la zona afectada por el calor en el acero

- A36 por efecto del corte térmico entre los procesos oxiacetilénicos y plasma.
- [4] ARCOS VILLACÍS, P. A., & FIALLOS ORTIZ, J. D. (2010). Análisis comparativo de los procesos de corte por plasma, oxicorte y arc air aplicados a metales (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2010).
- [5] CHAVEZ J., & RODRIGUEZ, J. (2016). Diseño de una Boquilla para corte por chorro de agua de bajo costo. (Tesis UNAM, Ciudad universitaria, Ciudad de México)
- CRISTANCHO SANCHEZ, L. D. (2018). Efecto de la Redondez de la Arena Sobre el Desgaste Abrasivo A 3 Cuerpos Según la Norma Astm G65.
- [6] D., GARCÍA, T., CICERO, S., LACALLE, R., ÁLVAREZ, J. A., MARTÍN-MEIZOSO, A., & ALDAZÁBAL, J. (2015). Evaluación de las propiedades de tracción mediante ensayos Small Punch en la zona afectada por los cortes térmicos. In *Anales de Mecánica de la Fractura* (Vol. 32, pp. 593-598).
- [7] FRANCO, A. F. V., & PAREDES, M. F. (2017). Corte mediante chorro de agua-abrasivo. *Síntesis Tecnológica*, (1), 36-38.
- [8] GAUERT, C. D. K., VAN DER WESTHUIZEN, W. A., CLAASEN, J. O., VILJOEN, S., & GROBLER, J. (2013). A progress report on ultra-high-pressure waterjet cutting underground: the future of narrow reef gold and PGE mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 113(6), 0-0.
- [9] GROOVER, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación.
- [10] INFANTE, S. A., DOMÍNGUEZ, A. B., SÁNCHEZ, M. C., LÓPEZ, R. L., MAÑAS, J. N., & HOLGUERAS, R. S. Herramientas de corte: desarrollo histórico y futuro.
- [11] KATZ, J. (1986). Desarrollo y crisis de la capacidad tecnológica Latinoamericana: el caso de la industria metalmeccánica.
- [12] KRAR, S. F., CHECK, A. F., & SMID, P. (2002). Tecnología de las máquinas-herramienta. Alfaomega. LEVIN, I., & BRANDON, D. (1998). Metastable alumina polymorphs: crystal structures and transition sequences. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(8), 1995-2012.
- [13] MARTÍN-MEIZOSO, A., ALDAZABAL, J., PEDREJÓN, J. L., & MORENO, S. (2014). Caracterización de la Zona Afectada por un Oxicorte. In *Anales de Mecánica de la Fractura* (Vol. 31, No. 04, p. 04).
- [14] MATAIX, C. (1982). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Oxford University Press. MÉNDEZ, M. V. (1995). *Tuberías a presión en los sistemas de abastecimiento de agua*. Universidad Católica Andrés Bello.
- [15] MEURLING, F., MELANDER, A., LINDER, J., LARSSON, M., "The influence of mechanical and laser cutting on the fatigue strengths of carbon and stainless sheet steels" *Scand J Metall*, vol. 30, no. 5, pp. 309-319.
- [16] MOSTOFA, M. G., KIL, K. Y., & HWAN, A. J. (2010). Computational fluid analysis of abrasive waterjet cutting head. *Journal of mechanical science and technology*, 24(1), 249-252.
- [17] OSTILLA, M. B., BALDO, P. J. R., & MARINO, J. M. Estudio de prefactibilidad para la construcción de una máquina de corte con agua para láminas de acero inoxidable de ½" de espesor.
- [18] PADILLA, E. D. (1999). Aplicaciones de los aceros inoxidables. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 2(3), 11-22. PAGLIA, G. (2004). Determination of the structure of  $\gamma$ -alumina using empirical and first principle calculations combined with supporting experiments (Doctoral dissertation, Curtin University).
- [19] PEMAN, T. P. G. (2015). Comportamiento en fatiga de componentes estructurales



obtenidos mediante oxicorte, corte por plasma y corte por láser: comparativa y definición de curvas SN de diseño (Doctoral dissertation, Universidad de Cantabria).

[20] RAMÓN, H., & JAVIER, F. (2014). Diseño y construcción de una máquina de control numérico por corte CO2 láser de 40 watts para acrílico de hasta 4 mm (Bachelor's thesis, Quito/UIDE/2014).

[21] REAL SALADRIGAS, E. (2001). Aportaciones al estudio del comportamiento a flexión de

estructuras de acero inoxidable. Universitat Politècnica de Catalunya. REYES-ORTIZ, Ó. J., & MILLÁN-MONTEJO, S. (2009). Influencia de la temperatura, la granulometría y el agua en la cohesión de mezclas asfálticas. *Ingeniería y Universidad*, 13(2), 309-324.

SHAMES, I. H., MONEVA, J. M., & CRUSELLS, S. P. (1967). *La mecánica de los fluidos* (Vol. 2). McGraw-Hill