

Instituto Politécnico Nacional

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN CIENCIA
APLICADA Y TECNOLOGÍA AVANZADA**

UNIDAD QUERÉTARO

POSGRADO EN TECNOLOGÍA AVANZADA

**INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA
BOQUILLA DEL CAÑÓN DE UN EQUIPO DE
PRUEBAS DE EROSIÓN SOBRE LA VELOCIDAD
DE PARTÍCULAS SÓLIDAS PROYECTADAS**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

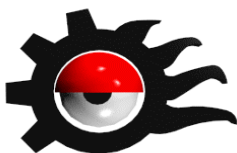
**MAESTRÍA EN TECNOLOGÍA
AVANZADA**

PRESENTA

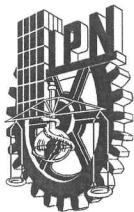
Roberto Alan Yañez Lugo

Director de Tesis:

Dr. J. D. Oscar Barceinas Sánchez



Querétaro, Qro. Julio del 2012.



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de Querétaro siendo las 16:00 horas del día 31 del mes de Mayo del 2012 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CICATA-Querétaro para examinar la tesis titulada:

INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA BOQUILLA DEL CAÑÓN DE UN EQUIPO DE PRUEBAS DE EROSIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE PARTÍCULAS SOLIDAS PROYECTAS.

Presentada por el alumno:

Yañez
Apellido paterno

Lugo
Apellido materno

Roberto Alan
Nombre(s)

Con registro:

A	1	0	0	3	3	7
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones, los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA


Director de tesis


Dr. José Dolores Oscar Barceinas Sánchez


Dr. José Luis Camacho Martínez


Dr. Iván Domínguez López

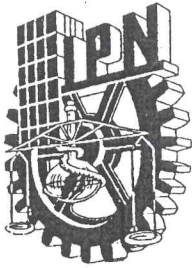

Dr. Francisco Javier Ornelas Rodríguez


Dr. Raúl Alejandro Avalos Zuñiga

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES


Dr. Jorge Adalberto Huerta Ruelas





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de Santiago de Querétaro, Qro. el día 31 del mes de Junio del año 2012, el que suscribe Roberto Alan Yañez Lugo, alumno del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada con número de registro A100337, adscrito a CICATA Querétaro, manifiesta que es autor intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de Dr. José Dolores Oscar Barceinas Sánchez y cede los derechos del trabajo intitulado INFLUENCIA DE LA GEOMETRÍA DE LA BOQUILLA DEL CAÑÓN DE UN EQUIPO DE PRUEBAS DE EROSIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE PARTÍCULAS SÓLIDAS PROYECTAS, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección obarceinas@ipn.mx. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

Roberto Alan Yañez Lugo

Nombre y firma

Dedicatoria

A mi familia por todo su apoyo, la paciencia que me tuvieron durante todo el tiempo que dedique a este trabajo y no pude estar con ustedes muchas ocasiones y por estar siempre conmigo.

Agradecimientos

Agradezco el apoyo al Dr. J. D. Oscar Barceinas Sánchez, Dr. José Luis Camacho Martínez, Dr. Francisco Javier Ornelas, Dr. Iván Domínguez López, Dr. Raúl Avalos, I.Q.M. Perla Bernardino Sánchez, y la Lic. en Ciencias de la Informática Edith Muñoz Olin; a las Instituciones: Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional Unidad Querétaro, CINVESTAV-IPN Unidad Querétaro, Fondo de Becas del CONACYT, Fondo Sectorial CONACYT-CFE, Instituto Politécnico Nacional y COFAA.

RESUMEN

En el presente trabajo se analizó el flujo de un fluido compuesto que contiene aire a presión y partículas sólidas moviéndose a través de un cañón, en cuyo extremo se ubica una boquilla. Se probaron tres diseños de boquilla diferentes a fin de conocer su efecto sobre el patrón de flujo a la salida del cañón. Las partículas se acarrearán por medio de un flujo de aire comprimido. Dentro de la cámara de impacto se encuentra el porta-muestra donde se coloca la muestra en el ángulo y distancia deseada. Con el propósito de evitar alterar la superficie de la muestra cuando sea necesario calentarla, la cámara de impacto puede mantenerse bajo vacío. La cámara también provee condiciones estables de evacuación para lograr velocidades de impacto altas (200 m/s). Este tipo de equipo no es comercial. Los trabajos publicados mencionan que los investigadores diseñan y construyen sus propios aparatos, siendo la mayoría de tipo rotatorio. El propósito de este equipo es evaluar recubrimientos tipo barrera térmica bajo condiciones similares a las de una turbina de vapor. En este estudio las variables que se controlaron son el ángulo de entrada en la boquilla, a través de la cual las partículas se proyectan sobre la muestra, la cantidad de partículas que se incorporaran al flujo, y la presión del flujo de aire comprimido; y se evaluó el patrón de flujo a la salida de la boquilla del cañón de disparo. Con esto puede determinarse la resistencia a la erosión de recubrimientos.

ABSTRACT

In the present work it was analyzed the flow of a fluid containing pressurized air and solid particles moving through a gun, in which end is located a nozzle. Three nozzle designs were tested to determine their effect on the flow pattern at the exit of the gun. Particles were carried by a flow of compressed air. Inside the chamber of impact there is a sample holder where the sample is placed in the desired angle and distance. In order to avoid altering the surface of the sample when its heating is necessary, the impact chamber can be maintained under vacuum. The chamber also provides stable conditions to achieve high impact velocities (200 m/s). This type of equipment is not commercial. Published works mention that researchers design and build their own apparatuses, the majority of rotary type. The purpose of this device is to assess thermal barrier coatings under conditions of erosion similar to those of a turbine. In this study the variables that were controlled are: entry angle of the nozzle, through which the particles are projected onto the sample; amount of particles fed into the flow; and air pressure; and it was evaluated the flow pattern at the nozzle exit of the gun. Thus it can be determined the erosion resistance of coatings.

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
ÍNDICE	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	7
ÍNDICE DE TABLAS.....	8
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. ANTECEDENTES.....	9
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	11
1.3. JUSTIFICACIÓN	12
1.4. HIPÓTESIS.....	12
1.5 OBJETIVO GENERAL	13
1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	14
2.1. TIPOS DE FLUJO	14
2.1.1. FLUJO	14
2.1.2. FLUJO COMPRESIBLE	24
2.1.3 FLUJO BIFÁSICO	24
2.1.4. FLUJO SÓNICO.....	26
2.1.5. FLUJO SUBSÓNICO.....	27
2.1.6. FLUJO SUPERSÓNICO.....	28
2.1.7. FLUJO DIVERGENTE	28
2.2. VELOCIMETRÍA LÁSER.....	30
2.2.1. DESCRIPCIÓN.....	31
2.2.2. MÉTODOS DE MEDICIÓN.....	32
2.2.3. PIV	32
2.2.3.1 PARÁMETROS	33
a) PARTÍCULAS	33
b) ILUMINACIÓN.....	34
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	36

3.1 ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD DEL FLUJO PRIMARIO.....	36
3.2. ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS	37
3.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO PARA PRUEBAS DE EROSIÓN .	38
3.4. PROCEDIMIENTO OBTENCIÓN DE IMÁGENES	45
3.5. PATRÓN DE FLUJO	48
3.6. SIMULACIÓN DE CAMPO DE PRESIONES EN EL CAÑÓN DE DISPARO ...	49
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	55
4.1 SIMULACIÓN.....	55
4.2. ABANICO DEL FLUJO A LA SALIDA	55
4.3. ÁNGULO DE IMPACTO.....	58
4.4. ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD DE PARTÍCULAS	59
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	72
CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXO.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujo viscoso y flujo no viscoso.....	19
Figura 2. Flujo a sobre un perfil	22
Figura 3. Flujo laminar	22
Figura 4. Capas de fluido.....	23
Figura 5. Flujo turbulento.....	23
Figura 6. Interacción de partículas en flujo turbulento	26
Figura 7. Vórtices de Karman	30
Figura 8. Generación de plano láser.....	34
Figura 9. Pulsos de láser.	35
Figura 10. Diagrama de flujo del procedimiento de búsqueda de componente.....	40
Figura 11. Cámara de impacto.	42
Figura 12. Curvas de operación de ventilador.	44
Figura 13. Sistema de extracción.	45
Figura 14. Ubicación de las mirillas en la cámara de impacto.	46
Figura 15. Arreglo para la adquisición de imágenes de partículas	47
Figura 16. Arreglo para iluminar y adquirir imágenes del flujo.	47
Figura 17. Plano de láser dentro de la cámara de impacto.....	48
Figura 18. Ángulo de entrada de la boquilla.	49
Figura 19. Variables a medir del patrón de flujo.	49
Figura 20. Tubo venturi.....	50
Figura 21. Tubo venturi con la boquilla de 3 mm de diámetro en la salida.	52
Figura 22. Boquilla de 3 mm de diámetro en la salida y 10° de ángulo de entrada....	52
Figura 23. Tubo venturi con la boquilla de 3.5 mm de diámetro en la salida.	53
Figura 24. Boquilla de 3.5 mm de diámetro en la salida y 15° de ángulo de entrada..	53
Figura 25. Tubo venturi con la boquilla de 2.5 mm de diámetro en la salida.	54
Figura 26. Boquilla de 2.5 mm de diámetro en la salida y 5° de ángulo de entrada... 54	
Figura 27. a) Ángulo del abanico, y b) patrón de flujo para la boquilla de 15°.	56
Figura 28. a) Ángulo del abanico, y b) patrón de flujo para la boquilla de 10°.	56
Figura 29. a) Ángulo del abanico, y b) patrón de flujo para la boquilla de 5°.	57
Figura 30. Huella sobre una superficie después de una prueba de erosión	59
Figura 31. Trayectoria de partícula para la boquilla de 15°.....	65
Figura 32. Trayectoria de partícula para la boquilla de 10°.....	68
Figura 33. Trayectoria de partícula para la boquilla de 5°.....	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos para estimar el flujo	36
Tabla 2. Datos de desplazamiento de partículas.	37
Tabla 3. Comparación de equipos para pruebas de erosión.....	38
Tabla 4. Cálculo del flujo de aire de la cámara de impacto.....	43
Tabla 5. Valores utilizados en la simulación.	50
Tabla 6. Datos de entrada y estimación de la velocidad de partículas.....	60
Tabla 7. Datos de entrada y estimación de la velocidad de partículas.....	62

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El uso de la energía geotérmica en nuestro país data desde 1956, con la instalación de la primera planta geotérmica en el estado de Hidalgo. Todos los desarrollos geotérmicos en México se encuentran bajo la responsabilidad de la Comisión Federal de Electricidad. Actualmente, México cuenta con una capacidad de producción de 855 MW, de los cuales 753 MW son generados en tres plantas geotérmicas: Cerro Prieto en Baja California, Los Azufres en Michoacán y Los Hornos en Puebla, con lo que se ocupa el tercer lugar mundial después de Filipinas con 1909 MW y USA con 2228 MW.

En Cerro Prieto existen 9 unidades en operación, en las Fases I, II y III. Las plantas se encuentran trabajando al 90%. La construcción de la fase IV comenzó en 1999, basadas en 4 unidades de 25 MW cada una, e iniciaron su operación comercial en Octubre de 2000.

La energía geotérmica representa aproximadamente el 4% del total de la producción eléctrica en México. En la región norte de Baja California, en donde se encuentra Cerro Prieto, el porcentaje es de 70%.

La energía geotérmica es un recurso doméstico de bajo costo, confiable y tiene ventajas ambientales que superan a las formas de producción de energía convencionales. Ésta contribuye a la generación de energía eléctrica y uso directo del calor, lo que reduce la demanda de energía y permite ahorrar en electricidad y gas natural, tanto para calentar como para enfriar edificios. Solo una pequeña fracción de nuestros recursos geotérmicos son explotados hoy en día, muchos más podrían ser activados en el corto plazo con los incentivos apropiados [34].

El elemento central de este tipo de generación de energía eléctrica es la turbina, en la cual se transforma la energía de mecánica, obtenida del vapor, a eléctrica.

De la turbina es de especial interés el estudio de lo que sucede en los álabes durante la operación. Es importante mencionar que el vapor utilizado puede contener agua líquida en forma de gotas y partículas sólidas que impactan sobre varios componentes causando desgaste por erosión; aunque hay otros mecanismos de desgaste que también ocurren.

En turbinas de vapor de centrales termoeléctricas, el daño por erosión es causado por partículas de óxido desprendidas de tuberías de las líneas de transporte de vapor, que combinadas con el flujo de éste causan graves daños por este mecanismo de desgaste de varios componentes. Los componentes que principalmente son afectados por la erosión son: álabes, toberas, sellos de rotor, lanas de sellos, válvulas de control y carcasa.

El desgaste por erosión reduce el período útil e incrementa el costo de operación y mantenimiento de una turbina, por esta razón el mantenimiento es más frecuente, resultando en una reducción de la producción de energía, lo que representa pérdidas económicas

La erosión de superficies sólidas se atribuye al impacto continuo de partículas o gotas de agua. El movimiento de las partículas está definido por el patrón local de flujo, y en caso de que el flujo dentro de un volumen cambie, no es posible predecir el desgaste por erosión, por lo que se requiere conocer el patrón de flujo en zonas de interés.

La forma en que se realizan las pruebas de erosión es a través de aparatos en donde suministra aire a presión a través del cañón de disparo en el cual se acelera el flujo y se proyecta sobre la muestra que se coloca y es impactada por las partículas proyectadas, lo cual produce el desgaste por erosión y deja una huella sobre la muestra la cual describe la forma en cómo ésta es afectada.

De acuerdo a lo descrito anteriormente, este trabajo se concentra en la diferenciación de la divergencia del flujo a la salida del cañón de disparo del equipo de pruebas de erosión de esta manera tener las condiciones más cercanas al desgaste por erosión en los componentes de turbinas de generación de energía eléctrica. Esta investigación es parte de un proyecto financiado por el Fondo CONACYT-CFE, que tiene entre sus objetivos construir un equipo para pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas [35].

1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

De información bibliográfica referente a equipos para realizar pruebas de erosión de componentes de turbinas de avión y para generación de energía eléctrica, se sabe que éstos poseen limitaciones de funcionamiento, pues no han sido diseñados para reproducir las condiciones de operación de dichas turbinas. Uno de los aspectos que se considera importante y que no se menciona es el patrón de flujo. Un patrón de flujo con una divergencia grande implicaría un área de impacto grande sobre la superficie de una muestra, lo que podría conducir a sobre-estimar las propiedades del material que se pruebe; el número de partículas que impactan por unidad de área disminuye con el incremento de la divergencia.

En la presente investigación se analiza la divergencia del flujo de partículas sólidas instalando boquillas con diferentes ángulos de entrada en un cañón de disparo. Este trabajo forma parte de un proyecto de investigación orientado hacia la aplicación y evaluación de recubrimientos en componentes de turbinas de generación de energía eléctrica, financiado por el Fondo CONACYT-CFE.

Actualmente, en el CICATA-IPN Unidad Querétaro se realiza un proyecto de ciencia aplicada y desarrollo tecnológico de interés para CFE, específicamente en el área de desgaste por erosión por impacto de partículas sólidas. Se hace énfasis en el análisis de flujo de partículas sólidas como una función del ángulo de entrada de la boquilla del cañón de un equipo para pruebas de erosión. Se determina el efecto que tiene el ángulo de entrada de una boquilla, que es elemento principal

del cañón, sobre la divergencia del flujo con el objetivo de obtener los parámetros que describan el comportamiento del flujo, a fin de que éste pueda ajustarse según se requiera.

1.3. JUSTIFICACIÓN

La realización de este trabajo de tesis se justifica por la falta de equipos para pruebas de erosión, en el cual las partículas se transportan mediante un flujo de aire a presión a través de un cañón de disparo horizontal. El equipo diseñado y construido tiene un suministro de partículas que aprovecha la caída de presión a la salida de un venturi. Otros grupos de investigación [20, 21, 22] han desarrollado equipos verticales que usan sistemas de alimentación de partículas por gravedad o presurización. El equipo que aquí se presenta tiene la posibilidad de calentar la hasta 200 °C; además, es posible variar la inclinación de la muestra en un rango de 20° a 90°, lo que da la posibilidad de evaluar la resistencia a la erosión de materiales y recubrimientos bajo diferentes condiciones de impacto.

1.4. HIPÓTESIS

El patrón de flujo de partículas sólidas transportadas por aire a presión se modifica a la salida del cañón de disparo debido a la variación del ángulo de entrada de la boquilla ubicada al final de éste. La modificación del patrón de flujo se observa como una variación del ángulo de divergencia del abanico formado por el fluido a la salida del cañón. El ángulo de divergencia se mide entre la línea de centro del cañón y la trayectoria más alejada seguida por el fluido. Esta medición se realiza sobre imágenes adquiridas, mientras el abanico del fluido se ilumina con un plano de luz láser de 400 mW. La captura de imágenes se realiza con una cámara de alta velocidad con capacidad de 60,000 cuadros/segundo. Conforme se incrementa el ángulo de entrada de la boquilla, que se ubica entre la sección recta del cañón (después del venturi) y la sección recta de salida de la boquilla, el ángulo de divergencia del abanico del fluido es mayor. Se considera el uso de partículas de tamaño unimodal.

1.5 OBJETIVO GENERAL

Determinar el efecto del ángulo de entrada de la boquilla sobre el patrón de flujo de partículas sólidas transportadas por aire a presión a la salida del cañón de disparo del equipo para pruebas de erosión.

1.6. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ensamblar el subsistema mecánico del equipo para pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas.
- Diseñar e implementar la boquilla del cañón de disparo del equipo para pruebas de erosión.
- Medir el ángulo del abanico del flujo a la salida del cañón de disparo para tres geometrías de boquilla diferentes sobre imágenes adquiridas mediante una cámara de alta velocidad.
- Estimar la velocidad de partículas sólidas a la salida de la boquilla del cañón de disparo para tres geometrías de boquilla diferentes sobre la secuencia de tomas adquiridas mediante una cámara de alta velocidad.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1. TIPOS DE FLUJO

2.1.1. FLUJO

Un fluido se define como un agregado que se mueve y deforma de manera continua en el tiempo formando un continuo. Esta definición también aplica a otras propiedades físicas como el electromagnetismo y la plasticidad. Dada la definición anterior, un fluido puede dividirse en líquidos y gases. Una característica que diferencia a un líquido de un gas, tiene que ver con la forma cómo las moléculas están asociadas. Para el caso de un líquido, éste está compuesto por moléculas relativamente cercanas que se mantienen unidas mediante enlaces secundarios, por lo que tiende a conservar su volumen. En el gas las moléculas están separadas, por lo que forman una atmósfera que ejerce una presión hidrostática en el volumen que lo contiene [1].

Un fluido se denomina medio continuo cuando la variación de sus propiedades en un volumen es poco significativa, además que puede utilizarse el cálculo diferencial para analizarlo. Las propiedades de los fluidos más importantes son: a) isotropía, la constancia de la igualdad de propiedades en cualquier dirección; b) movilidad, puesto que adoptan la forma de la geometría que los contiene, de aquí que el esfuerzo es inversamente proporcional a la deformación del fluido; c) viscosidad, básicamente es una resistencia a la deformación, la cual no sigue las leyes del rozamiento entre sólidos, siendo los esfuerzos proporcionales, en forma aproximada, a la velocidad de deformación, esta Ley fue realizada por Newton, cuando las capas de un líquido se deslizan entre sí, la resistencia al movimiento depende del gradiente de velocidad dv/dx , y la superficie [2],

$$F = \eta s \frac{dv}{dx} \quad 1$$

Donde η es la constante de viscosidad. La velocidad varía progresivamente de capa en capa. La tensión estará directamente asociada a la velocidad relativa, de tal forma que cuando la velocidad relativa sea cero, por tanto la tensión lo será también; y, d) compresibilidad, según la cual para cualquier esfuerzo a que se someta un fluido su volumen prácticamente no varía. Para los fluidos compresibles, el volumen específico es función de la presión y temperatura, siendo las ecuaciones que las relacionan funciones complejas [3].

La expresión general de la compresibilidad k es,

$$k = - \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \quad 2$$

Los fluidos ideales tienen:

- a) Isotropía perfecta.
- b) Movilidad perfecta.
- c) Fluidez perfecta, es decir, ausencia de viscosidad.
- d) Compresibilidad nula.

Debido a la ausencia de rozamiento en un fluido ideal se tiene que:

- a) Toda la deformación sobre el fluido se efectúa sin trabajo.
- b) Todo elemento de un fluido puede ejercer solamente esfuerzos normales sobre un elemento vecino, o sobre una pared próxima [4].

Fluido continuo

Todos los fluidos están compuestos de moléculas que se encuentran en movimiento constante. Sin embargo, en la mayor parte de las aplicaciones de ingeniería, interesa más conocer el efecto global o promedio (es decir, macroscópico) de todas las moléculas que conforman el fluido. Son estos efectos macroscópicos los que realmente pueden percibirse y medirse. Por lo anterior, se

considera que el fluido está idealmente compuesto de una sustancia infinitamente divisible (es decir, como un continuo), por lo que no interesa el comportamiento de las moléculas individuales [1,5].

El concepto de un continuo es la base de la mecánica de fluidos clásica. La hipótesis de un continuo resulta válida para estudiar el comportamiento de fluidos en condiciones normales. Sin embargo, dicha hipótesis deja de ser válida cuando la trayectoria media libre de las moléculas (aproximadamente 6.3×10^{-5} mm para aire en condiciones normales de presión y temperatura) es del mismo orden de magnitud que la longitud característica más pequeña [4,6].

Una de las consecuencias de la hipótesis del continuo, es que se supone que cada una de las propiedades del fluido tiene un valor definido en cada punto del espacio. De esta manera, propiedades como la densidad, temperatura, velocidad, etc., pueden considerarse como funciones continuas de la posición y del tiempo.

Campo velocidades

En el estudio del movimiento de fluidos necesariamente se tiene que considerar la descripción de un campo de velocidades. La velocidad del fluido en un punto cualquiera se define como la velocidad instantánea del centro de gravedad del volumen dV que en ese momento rodea al punto. Por lo tanto, si se define una partícula de fluido como una masa pequeña de fluido completamente identificada que ocupa el volumen dV , puede definirse la velocidad en un punto como la velocidad instantánea, que en un momento dado, está pasando a través dicho punto. La velocidad en cualquier otro punto del campo de flujo puede definirse de manera semejante. En un instante dado el campo de velocidades, V , es una función de las coordenadas espaciales x, y, z , es decir $V = V(x, y, z)$. La velocidad en cualquier punto del campo de flujo puede cambiar de un instante a otro. Por lo tanto, la representación completa de la velocidad, que es el campo de velocidades [5, 7], que está dado por:

$$V = V(x, y, z, t) \quad 3$$

Si las propiedades de fluido en un punto de un campo no cambian con el tiempo, se dice que el flujo es estacionario. Matemáticamente el flujo estacionario se define como:

$$dn / dt = 0 \qquad 3$$

Donde dn representa cualquier propiedad de fluido. Se concluye entonces que las propiedades de un flujo estacionario pueden variar de un punto a otro del campo, pero deben permanecer constantes respecto al tiempo en cualquiera de los puntos [3].

Fuerzas superficiales y fuerzas volumétricas

En la mecánica de fluidos continuos suelen considerarse dos tipos de fuerzas: superficiales y volumétricas. Las fuerzas superficiales son aquellas que actúan sobre las fronteras del medio a través del contacto directo. Las fuerzas que actúan sin contacto físico, y que se distribuyen en el volumen del fluido, se denominan fuerzas volumétricas. La fuerza gravitacional que actúa sobre un elemento de volumen, dV , está dada por [8]:

$$p (g) dV, \qquad 4$$

donde p es la densidad (masa por unidad de volumen), y g es la aceleración local de la gravedad. Así, la fuerza volumétrica gravitacional por unidad de volumen es $p(g)$ y la fuerza volumétrica gravitacional por unidad de masa es g .

Fluido newtoniano

Se puede definir un fluido como una sustancia que se deforma continuamente bajo un esfuerzo cortante. De manera general, los fluidos se pueden ordenar según la relación que existe entre el esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación resultante. Los fluidos newtonianos son los fluidos en los cuales el esfuerzo cortante es directamente proporcional a la rapidez de deformación. La mayor parte de los fluidos comunes son prácticamente newtonianos bajo condiciones normales. Los fluidos no newtonianos se pueden definir como los fluidos en los cuales el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la rapidez de la deformación. Numerosos fluidos comunes tienen un comportamiento no newtoniano. Dos ejemplos de fluido no newtoniano son la crema dental y la pintura. Esta última es muy "espesa" cuando se encuentra en su recipiente, pero se "adelgaza" cuando se extiende con una brocha. De este modo, se toma una gran cantidad de pintura para no repetir la operación muchas veces. La crema dental se comporta como un "fluido" cuando se presiona el tubo contenedor. Esto es, no fluye por sí misma cuando se deja el recipiente abierto al medio ambiente. [3].

Viscosidad

Si se considera la deformación de dos fluidos newtonianos diferentes, por ejemplo, glicerina y agua, se encontrará que se deforman con diferente rapidez para una misma fuerza cortante. La glicerina ofrece mucha mayor resistencia a la deformación que el agua; se dice entonces que es mucho más viscosa. En la mecánica de fluidos se emplea frecuentemente el cociente de la viscosidad absoluta, μ , entre la densidad ρ . Este cociente recibe el nombre de viscosidad cinemática y se representa con el símbolo ν . Como la densidad tiene dimensiones (M/Lt) , las dimensiones que resultan para ν son (L^2/t) . En el sistema métrico de medición, la unidad para ν recibe el nombre de *Stoke* = cm^2/s . La viscosidad es una manifestación del movimiento molecular dentro del fluido. Las moléculas de regiones con alta velocidad global chocan con moléculas que se mueven con una velocidad global menor, y viceversa. Estos choques permiten transportar cantidad

de movimiento de una región a otra, ya que el movimiento molecular aleatorio es afectado por la temperatura del medio; por lo que la viscosidad resulta ser también una función de la temperatura [1].

Flujo viscoso y no viscoso

Los fluidos pueden mostrar flujo viscoso o no viscoso. En un flujo no viscoso se supone que la viscosidad del fluido es cero. Evidentemente, tales fluidos no existen; sin embargo, existen situaciones en las que la afirmación anterior puede simplificar el análisis y al mismo tiempo ofrecer resultados confiables. Si bien, siempre es deseable trabajar con análisis simplificados, los resultados obtenidos deben ser razonablemente exactos para que tengan valor. Dentro de la división de flujo viscoso pueden considerarse dos tipos principales. El primero es fluido incompresible, en el cual las variaciones de densidad son pequeñas cuando se modifica la presión. El segundo, fluido compresible, en el que las variaciones de densidad con la presión son significativas, p. ej., gases a velocidad muy alta. Por otra parte, todos los fluidos poseen viscosidad, por lo que los fluidos con flujo viscoso son importantes en el estudio de mecánica de fluidos [1].

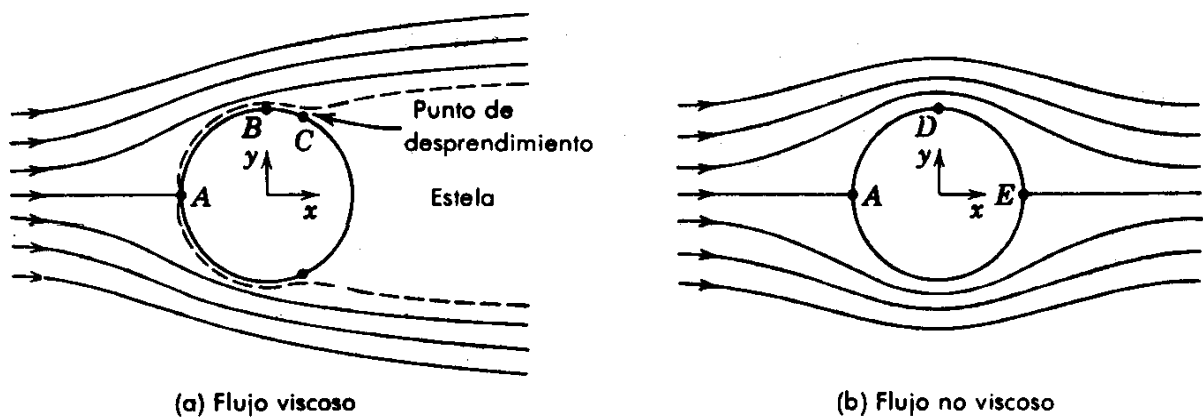


Figura 1. Flujo viscoso y flujo no viscoso [1].

De la Figura 1 puede observarse que las líneas de flujo son simétricas respecto al eje x. El fluido a lo largo de la línea de flujo central se divide y fluye alrededor del cilindro una vez que ha incidido en el punto A. Este punto sobre el cilindro recibe el

nombre de punto de estancamiento. Al igual que en el flujo sobre una placa plana, se desarrolla una capa límite en las cercanías de la pared sólida del cilindro. La distribución de velocidades fuera de la capa límite puede determinarse teniendo en cuenta el espaciamiento entre líneas de flujo. Puesto que no puede haber desplazamiento del fluido a través de una línea de flujo, es de esperarse que la velocidad se incremente en aquellas regiones donde el espaciamiento entre líneas de flujo disminuya. Por el contrario, un incremento en el espaciamiento entre líneas de flujo implica una disminución de la velocidad del fluido [1].

Considérese momentáneamente un fluido incompresible alrededor del cilindro, suponiendo que se trate de un flujo no viscoso, como el mostrado en la Figura 1b. Este flujo resulta simétrico respecto en los ejes x y y . La velocidad alrededor del cilindro crece hasta un valor máximo en el punto D y después disminuye conforme se mueve alrededor del cilindro. Para este tipo de flujo un incremento en la velocidad siempre va acompañado de una disminución de la presión, y viceversa. De esta manera, la presión sobre la superficie del cilindro disminuye conforme se mueve del punto A al D, y después se incrementa al pasar del punto D al E.

Puesto que el flujo es simétrico respecto a los dos ejes coordenados, es de esperarse que la distribución de presiones resulte también simétrica respecto a éstos; así es como sucede en este caso. No existiendo esfuerzos cortantes en un flujo no viscoso, para determinar la fuerza neta que actúa sobre un cilindro solamente se necesita conocer la presión. La simetría en la distribución de presiones conduce a la conclusión de que en un flujo no viscoso no existe una fuerza neta que actúe sobre un cilindro, ya sea en la dirección x o dirección y . La fuerza en la dirección x recibe el nombre de arrastre. Según lo anterior, se concluye que el arrastre para un cilindro en un flujo no viscoso es cero; esta conclusión evidentemente contradice la experiencia, ya que sabemos que todos los cuerpos sumergidos en un fluido real experimentan algún arrastre. Al examinar el flujo no viscoso alrededor de un cuerpo se ha despreciado la presencia de la capa límite, en virtud de la definición de este tipo de flujo.

Para estudiar el caso real de la Figura 1a, se supone que la capa límite es delgada. En tal caso, es razonable suponer además que el campo de presiones es cualitativamente el mismo que en el flujo no viscoso. Puesto que la presión disminuye continuamente entre los puntos A y B, un elemento de fluido dentro de la capa límite experimenta una fuerza en la dirección de flujo. En la región entre A y B, esta fuerza es suficiente para superar el esfuerzo cortante que se opone al movimiento, manteniéndose el movimiento del elemento en la dirección de flujo. Ahora considérese un elemento de fluido dentro de la capa límite en la parte posterior del cilindro, detrás del punto B. Puesto que la presión crece en la dirección de flujo, dicho elemento experimenta una fuerza opuesta a la dirección de movimiento. En algún punto sobre el cilindro, la cantidad de movimiento del fluido dentro de la capa límite resulta insuficiente para empujar al elemento más allá dentro de la región donde crece la presión. Las capas de fluido adyacentes a la superficie del sólido alcanzarán el reposo, y el flujo se separará de la superficie; el punto preciso donde esto ocurre se llama punto de separación o desprendimiento. La separación de la capa límite da como resultado la formación de una región de presión relativamente baja detrás del cuerpo; ésta resulta deficiente también en cantidad de movimiento y se le conoce como estela.

Se tiene que para el fluido que se separa de alrededor de un cuerpo, existe un desbalance neto de las fuerzas en la dirección de flujo, dando como resultado un arrastre debido a la presión sobre el cuerpo. Cuanto mayor sea el tamaño de la estela detrás del cuerpo, el arrastre debido a la presión será mayor. Es lógico preguntarse cómo podría reducirse el tamaño de la estela y, por lo tanto, el arrastre debido a la presión. Conforme una estela surge de la separación de la capa límite debido a un gradiente de presión negativo, un incremento de la presión en la dirección de flujo reducirá este gradiente y retrasará la separación y, por tanto, se reduce el arrastre. El perfil de un cuerpo reduce la magnitud del gradiente de presión negativo al distribuirlo sobre una distancia mayor. Como ejemplo: si se añadiese una sección gradualmente afilada (cuña) en la parte posterior del cilindro de la Figura 1, el flujo sería como el que se muestra en la Figura 2. El perfil de la

forma del cuerpo efectivamente retrasa el punto de separación, por lo tanto, el esfuerzo cortante total que actúa sobre el cuerpo se incrementa y el arrastre total se reduce de manera significativa. La separación del fluido puede presentarse también en ductos como resultado de cambios bruscos de su geometría [1].

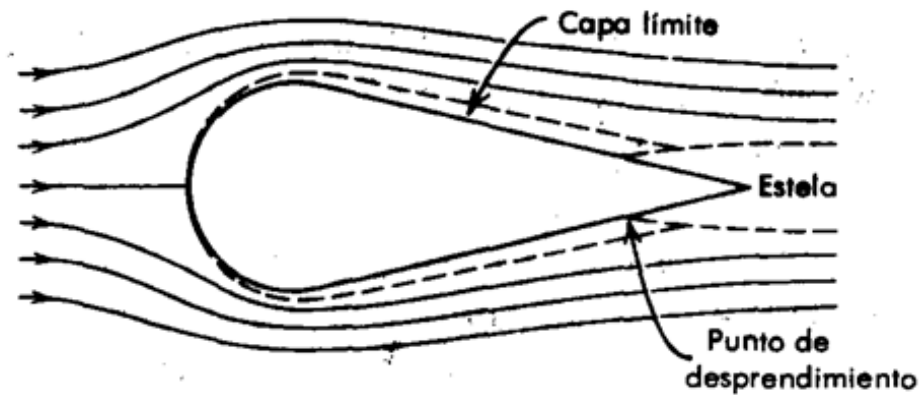


Figura 2. Flujo sobre un perfil [1].

Flujo laminar

El flujo viscoso puede clasificarse en laminar o turbulento, teniendo en cuenta la estructura interna del fluido. En un régimen laminar la estructura se caracteriza por el movimiento de láminas o capas. Los fluidos reales tienen viscosidad que es equivalente a decir que existen fuerzas cortantes entre las distintas capas. Como consecuencia aparecen fuerzas que se oponen al movimiento relativo entre capas contiguas (fuerzas debido a la viscosidad), por lo que se disipa energía y el fluido se calienta [8].

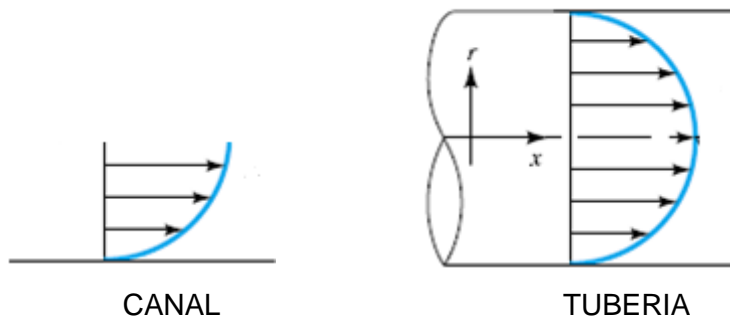


Figura 3. Flujo laminar [9].

Debido a las fuerzas viscosas las velocidades del fluido en una sección transversal a la corriente no son iguales, pues existe un rozamiento interno, CANAL TUBERIA

Figura 3.

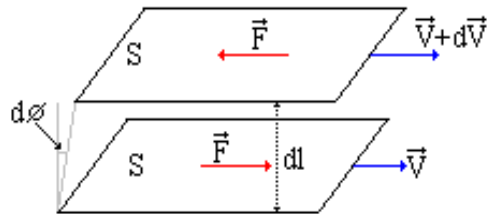


Figura 4. Capas de fluido [9].

Si la capa superior de un fluido se mueve con mayor velocidad que la inferior, Figura 4, la primera ejerce una fuerza tangencial sobre la de abajo, lo que tiende a acelerarla. A su vez, la capa inferior ejerce una fuerza del mismo valor sobre la superior, lo que tiende a frenarla. Como consecuencia de la existencia de fuerzas viscosas se produce una pérdida de energía y, por lo tanto, de presión cuando el fluido se mueve a lo largo de un ducto [2,8].

Flujo turbulento

Debido a la viscosidad, si la diferencia de velocidades entre capas es grande, al deslizar unas sobre otras, las fuerzas viscosas obligan a las capas a girar sobre sí mismas, produciendo remolinos. Debido a ello existe una mayor pérdida de carga por viscosidad, pues se absorbe energía para formar el remolino, Figura 5 [7,9].

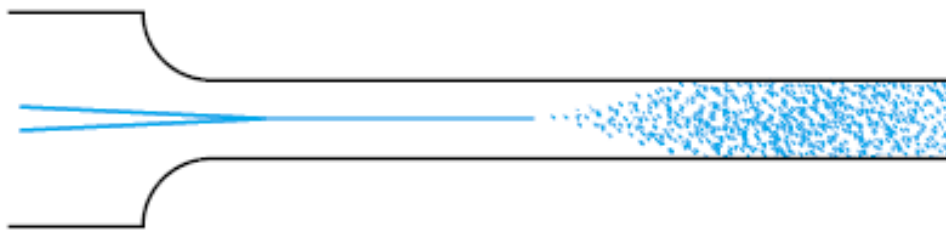


Figura 5. Flujo turbulento [1].

2.1.2. FLUJO COMPRESIBLE

La densidad se utiliza para determinar si un fluido es incompresible o compresible. Si la densidad de un fluido es constante, el fluido es incompresible; esto quiere decir que ni la masa ni el volumen del fluido cambian. Esta generalización es correcta en la mayor parte de los casos prácticos, es decir, casi todos los fluidos líquidos son esencialmente incompresibles. Por otra parte, los gases pueden también considerarse como incompresibles si la velocidad a la que se mueven es pequeña respecto a la velocidad del sonido en este fluido. El cociente de la velocidad del fluido, V , sobre la velocidad del sonido, c , en el fluido recibe el nombre de número de Mach, Ma .

$$Ma = V/c$$

5

Para valores de Ma menores que 0.3 los cambios en densidad son del orden de 2% del valor medio. Así, gases que fluyen con $Ma < 0.3$ pueden considerarse como fluidos incompresibles. Un valor de $Ma = 0.3$ en aire, bajo condiciones normales, corresponde a una velocidad de aproximadamente 100 m/s [10].

2.1.3 FLUJO BIFÁSICO

Por flujo multifásico se entiende todo proceso termomecánico en el que interviene un fluido en el que coexisten varias fases. La palabra fase adquiere aquí un significado generalizado, entendiéndose por tal estado de agregación de la materia, conformada por porciones de materiales o sustancias distinguibles por cambios significativos de sus propiedades. Dicho cambio puede consistir en variaciones, no sólo de composición o estado, sino también de variables particulares: velocidad o vorticidad. Dentro de un flujo multifásico se distingue una fase que se extiende en toda la región de desarrollo del flujo; ésta se llama fase continua. En este sentido, en el fluido, líquido o gas, se encontrarán porciones de

otro material o de la misma sustancia en un estado físico distinto al de la fase continua. La superficie frontera entre las fases se conoce como interfase [10,11].

Si en el flujo pueden distinguirse dos o más fases continuas, nos encontramos ante un flujo con fases separadas, mientras que si las porciones materiales del resto de las fases consisten en elementos aislados, líquidos o sólidos, se habla de flujo con fase dispersa. En el caso de que las fases sean gaseosas o líquidas que puedan mezclarse, la frontera entre ellas será difusa. Las capas de mezcla, ondas de choque y otras discontinuidades pueden considerarse también como interfases.

En el caso particular de que solo haya dos fases distintas, se habla de flujo bifásico. Cualquier flujo que contenga exclusivamente una fase dispersa puede considerarse como bifásico, en la medida en que la distinción entre los elementos de una fase y otras pueda hacerse en virtud de la diferencia que exista entre las propiedades que distinguen a cada una. Por ejemplo, un flujo simultáneo de una fase continua única conteniendo partículas sólidas y líquidas dispersas, que pueden distinguirse entre sí por sus propiedades termodinámicas y/o cinéticas, constituyen en su conjunto la segunda fase.

En la Figura 6 se muestra el movimiento de partículas debido al movimiento de los vórtices en flujo turbulento. Se representa la presencia de diferentes remolinos, que interactúan con partículas de varios tamaños. El transporte de partículas debido a remolinos turbulentos también depende de diferentes propiedades del fluido y las partículas, por ejemplo, viscosidad y densidad del fluido, y densidad de la partícula; aunque también influye la distribución de energía cinética turbulenta. El entendimiento detallado de la naturaleza de la interacción partícula-vórtice es esencial para modelar el problema de la dispersión de partículas [3].

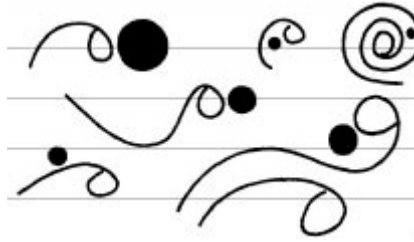


Figura 6. Interacción de partículas en flujo turbulento [3].

Una partícula densa tendrá menos velocidad que la del fluido. Esta reducción de velocidad se conoce como *efecto de inercia*, y se caracteriza por una escala de tiempo llamada tiempo de relajación de la partícula τ_p . El tiempo de relajación de la partícula es la velocidad de respuesta de la aceleración de la partícula a la velocidad relativa entre la partícula y el fluido [12, 13].

2.1.4. FLUJO SÓNICO

Un flujo sónico debe cumplir un valor de Mach definido por un solo valor $Ma = 1.0$, lo cual trae consigo una complejidad, por lo que se estableció el concepto de flujo subsónico, el cual se denomina en un rango de valores de Mach. El rango de flujo transónico corresponde a $0.8 \leq Ma \leq 1.2$. Hay ondas de choque que conducen a un rápido incremento de la fricción, y éstas separan regiones subsónicas de supersónicas dentro del flujo. Debido a que normalmente no pueden distinguirse las partes viscosas y no viscosas, este flujo es difícil de analizar.

La región de la capa límite donde las capas laminares empiezan a mezclarse unas con otras, pero antes de que comiencen a arremolinarse, se conoce como región de transición. Por lo general, esta región es pequeña [14, 15].

Cuando una capa límite turbulenta comienza a arremolinarse, su espesor empieza a crecer aún más rápidamente. Eventualmente, el flujo llega a mezclarse tanto que comienza a fluir al contrario, hacia enfrente de la superficie. Cuando esto sucede, el fluido exterior original se mueve sobre una burbuja creada por la turbulencia. Dentro de la burbuja el flujo se mueve en sentido contrario a lo largo de la superficie. A esto se le llama separación de flujo. En el frente de la burbuja, donde

el fluido ya no puede seguir moviéndose a lo largo de la superficie, hay un punto en el que la corriente cambia bruscamente de dirección, alejándose de la superficie. A este punto se le conoce como punto de separación. En la parte posterior de la burbuja, hay otro punto donde la dirección de la corriente exterior cambia una vez más para continuar nuevamente a lo largo de la superficie. Éste es el punto de reacoplamiento. Si la región de separación del flujo se extiende más allá de la superficie, a esta región se le llama estela [14].

2.1.5. FLUJO SUBSÓNICO

Para el caso del flujo subsónico el número de Mach es menor que 1 en todo el campo de flujo. Los flujos compresibles subsónicos son cualitativamente similares a los incompresibles. En un flujo subsónico la velocidad de la corriente es inferior a la velocidad de propagación de perturbaciones (velocidad del sonido). Para este régimen el fluido puede transmitir información en la misma dirección de flujo. En el caso de un flujo alrededor de un perfil, el fluido en un punto de flujo no sigue la geometría del perfil, de modo que se adapta progresivamente a ésta.

En el caso de un fluido que se desplaza a velocidad subsónica y que se lleva a velocidad supersónica, conforme se acerca a condiciones sónicas, el flujo se inicia en forma convergente en el borde de ataque y finaliza divergente en el borde de estela, lo que resulta en que en alguna parte de la zona divergente empieza el flujo supersónico, en el que pueden generarse ondas de choque que disipan energía. Esto conduce a un incremento brusco del coeficiente de arrastre, por lo que se dé en potencias altas para atravesar la denominada barrera del sonido.

Debido al aumento de temperatura en una onda de choque de poco espesor, los gradientes térmicos son elevados y siempre en el sentido del flujo ($T_2 > T_1$), lo que implica una alta velocidad de transferencia de calor.

En el caso de un avión rompiendo la barrera del sonido, en donde a mitad fuselaje se ha producido una onda de choque normal, que transfiere calor de las partículas

posteriores a la onda de choque hacia las anteriores, lo que hace que se enfríen súbitamente, y como las partículas son de aire húmedo, se provoca la condensación de las partículas de vapor de agua. En el caso de un fluido subsónico el movimiento del fluido está en todas partes mucho más lento que la velocidad del sonido a través del líquido o gas [7].

2.1.6. FLUJO SUPERSÓNICO

El sonido es en realidad una diferencia de presión infinitesimal que se propaga a través de un fluido. Esta diferencia es más evidente cuando un fluido choca con un objeto. Frente al objeto el fluido acumula una presión de estancamiento, pero con el impacto el objeto lleva al fluido a un estado de reposo. La presencia de ondas de choque y compresibilidad de fluidos a alta velocidad, es la diferencia fundamental entre los flujos supersónicos y subsónicos.

Los flujos supersónicos son completamente diferentes a los incompresibles, pues están caracterizados por la existencia de ondas de choque y expansión. Las capas de las ondas de choque son delgadas, con espesor del orden de 10^{-5} cm. El flujo sufre variaciones drásticas a uno y otro lado de la onda, lo que resulta en discontinuidades del flujo.

Un flujo a velocidades supersónicas moviéndose alrededor de un objeto provoca una onda de choque en el borde de ataque; la geometría de la onda de choque es perpendicular (normal) a las líneas de corriente del flujo incidente, lo que provoca una perturbación del flujo [7].

2.1.7. FLUJO DIVERGENTE

Puede definirse como la sección en la que un fluido que aumenta en la dirección de flujo, con lo que por continuidad de la corriente hacia el exterior, su velocidad va disminuyendo:

$$\left. \begin{array}{l} \text{continuidad: } UA = \text{cte} \Rightarrow \frac{dU}{dx} + \frac{dA}{dx} = 0 \\ \text{zona divergente: } \frac{dA}{dx} > 0 \end{array} \right\} \frac{dU}{dx} < 0 \quad 6$$

Como en la región exterior se cumple la Ecuación de Euler, la geometría provoca un gradiente de presión positivo en la dirección de flujo:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Euler: } -\frac{dp}{dx} = \rho U \frac{dU}{dx} \\ \text{zona divergente: } \frac{dU}{dx} < 0 \end{array} \right\} \frac{dp}{dx} > 0 \quad 7$$

En la región viscosa de la capa límite la Ecuación de Prandtl aplicada a la pared, da el signo positivo de la segunda derivada del campo de velocidad:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ec. Prandtl en pared (u = v = 0) - } \frac{dp}{dx} + \mu \left(\frac{d^2 u}{dy^2} \right)_{y=0} \\ \text{zona divergente: } \frac{dp}{dx} > 0 \end{array} \right\} \left(\frac{d^2 u}{dy^2} \right)_{y=0} > 0 \quad 8$$

En el borde de la capa límite, el signo de la segunda derivada es siempre negativa, por la condición de máxima velocidad; es decir esta derivada del perfil de velocidades se inicia en la pared con signo positivo y finaliza en el borde de la capa límite con signo negativo, por lo cual en un punto intermedio ($0 < y < \delta$) debe tener valor nulo, por lo que éste sería un punto de inflexión (PI). Esto demuestra que el perfil de velocidad desde la pared hasta el punto de inflexión, tiene pendiente decreciente, alcanzando su valor máximo en la pared misma. Esto provoca esfuerzos en la pared. Conforme el fluido avanza, la velocidad de la corriente exterior disminuye, el perfil de velocidad en la capa límite se estrecha, y la pendiente en la pared aumenta, pudiendo llegar a la posición en donde se alcanza una pendiente infinita, lo que corresponde a una parada del fluido, no solo en la pared, sino también en puntos próximos. Esta es la posición de separación

de la capa límite (PS), a partir de la cual el gradiente de presión obliga al fluido en las proximidades de la pared, a invertir su sentido de avance, provocando un flujo en sentido contrario al de la corriente exterior, que se extiende desde la pared hasta determinada posición normal, a partir de la cual el flujo retoma su sentido de avance y llega a alcanzar la velocidad de la corriente exterior [16].

En puntos posteriores al de separación de la capa límite, se provoca un flujo rotacional, el cual se caracteriza por una velocidad nula en la pared, retroceso cerca de la pared y avance cerca del borde de la capa límite. Éstos son los denominados vórtices de Karman, Figura 7.

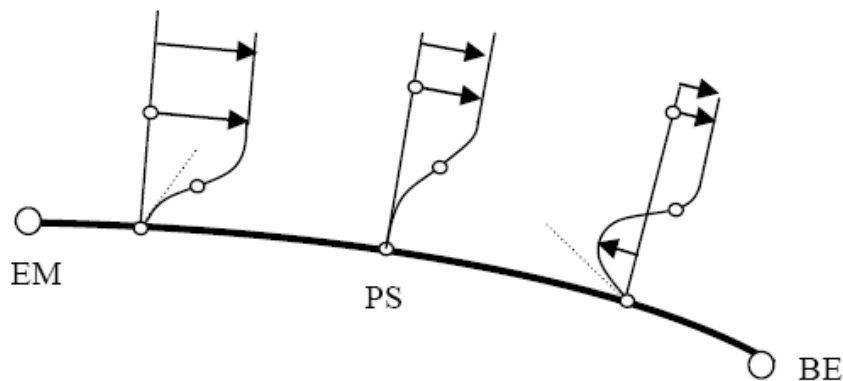


Figura 7. Vórtices de Karman [1].

2.2. VELOCIMETRÍA LÁSER

La velocimetría por imágenes de partículas (PIV), basada en el uso de un plano de luz láser, es una herramienta de medición poderosa en dinámica de fluidos, capaz de medir, con errores pequeños, un campo de velocidades en líquidos, gases y fluidos multifase. Los altos requerimientos computacionales de los algoritmos PIV dificultan su empleo en tiempo real. Puede proporcionar medidas globales del campo de velocidades con un nivel satisfactorio de precisión. Las mediciones en tiempo real del campo de velocidades de un flujo resultarían de gran utilidad experimental, ya que abriría la posibilidad de actuar sobre los parámetros de una prueba fluidodinámica y obtener simultáneamente su respuesta. Otra ventaja de un sistema en tiempo real sería la posibilidad del ajuste de los parámetros propios

de la técnica PIV, como son cantidad de partículas, tipo de partículas y enfoque de la óptica asociada.

2.2.1. DESCRIPCIÓN

La velocimetría por imágenes de partículas (PIV – Particle Image Velocimetry) puede entenderse como la medición cuantitativa de un campo de velocidades en un gran número de puntos. Cuando se medían campos de velocidades por la técnica de láser speckle (LSV), que en 1977 fue adoptada y evaluada en la mecánica de fluidos, proporcionó mediciones exitosas del perfil parabólico del flujo laminar en un tubo. Básicamente se medían cambios en los patrones de interferencia de la luz que atravesaba una región de interés y se deducía un campo de velocidades que los originaba. En 1984 se incorpora la idea de “sembrar” el fluido con partículas para ser iluminadas, bautizando la técnica como PIV. Originalmente se consideraba el patrón de interferencia generado con la luz dispersada en las partículas, pero pronto tomó relevancia trabajar directamente con las imágenes de partículas obtenidas en tiempos muy cortos de iluminación. Midiendo el desplazamiento en imágenes entre dos capturas permite estimar los movimientos. El láser con pulso doble y tiempo controlado entre pares de pulsos complementó la técnica, por ser una fuente de luz direccional con emisiones muy breves pero intensas. En corto tiempo muchos grupos de investigación en fluidodinámica la adoptaron, mejoraron y diversificaron la técnica; en general motivados por resultar este tipo de velocimetría una herramienta apropiada para los problemas de turbulencia. En una medición por PIV se aporta información del campo de velocidades en varias escalas físicas, y en todas las direcciones, para un instante dado. Y el estudio de turbulencias presta mucha atención a la prueba en forma local y global, considerando obviamente la aleatoriedad en la dirección de las velocidades. Estas cualidades de PIV extienden su aplicación a otros campos de investigación distintos del estudio de turbulencias. La literatura muestra experiencias exitosas en gases y líquidos, con números de Reynolds de todos los órdenes [17].

2.2.2. MÉTODOS DE MEDICIÓN

Algunos de los primeros métodos experimentales cuantitativos para medir velocidades en campos de fluidos se basan en tubos Pitot. Significó un avance la aparición de los anemómetros de filamento por hilo caliente en 1920, especialmente por su mejor respuesta en frecuencia, miniaturización del transductor, y la posibilidad de medir varias componentes de velocidad. Sin embargo, ambas técnicas implicaban fuertes perturbaciones del medio, no despreciables en muchos problemas. El advenimiento del láser en los 60's permitió desarrollar la técnica del anemómetro láser de efecto Doppler. Si bien permitió medir velocidades con alta precisión y despreciable perturbación del medio, no dejaban de ser puntuales. La posibilidad de realizar mediciones globales de velocidad condujo rápidamente a las técnicas basadas en imágenes de partículas, las cuales llegaron a ser muy útiles en el ámbito de la mecánica de fluidos [18].

2.2.3. PIV

La técnica PIV puede proveer medidas instantáneas de velocidad en dominios 2D o 3D con mediana precisión. Frente a las técnicas de visualización directa del flujo, que fueron aplicadas por décadas, puede considerarse a PIV una evolución hacia mayores capacidades cuantitativas y de automatización. De acuerdo a una clasificación propuesta por Hinsh un sistema de medición puede clasificarse según la terna (k, l, m) , donde $k = 1, 2, 3$ indica el número de componentes de velocidad que se miden, $l = 0, 1, 2, 3$ señala la cantidad de dimensiones espaciales del dominio de medición, y $m = 0, 1$ indica si el registro temporal de la medición es instantáneo o continuo. Una cuarta componente podría indicar si diferencia entre gas, líquido y sólido, respectivamente (generalizando a Hinsh). Según esto un sistema de medición puntual puede llegar a la categoría $(3, 0, 1)$ en el mejor de los casos. Por otra parte el sistema PIV más difundido alcanza la clasificación $(2, 2, 0)$ por brindar medidas de dos componentes de velocidad en un plano aunque en tiempos discretos, que también se define como PIV 2D-2C. La mayoría de los sistemas PIV actuales pertenecen a esta categoría. La técnica PIV por holografía

cinemática pertenece al caso (3, 3, 1). Más difundida, aunque también muy difícil y costosa, es la PIV holográfica simple que se cataloga por (3, 3, 0). Otros sistemas son el PIV estereoscópico (3, 2, 1) y PIV traslativo que provee información de velocidad 3D en dominios planos [19].

2.2.3.1 PARÁMETROS

Para la técnica de PIV se debe poner atención en los parámetros que intervienen, partículas que se moverán dentro del fluido e iluminación que se usará para marcar la zona que se medirá; estos dos parámetros son los de mayor importancia.

a) PARTÍCULAS

Las partículas de seguimiento para PIV tienen que satisfacer dos requerimientos: 1) Deben poder seguir las líneas de corriente del flujo sin excesivo resbalamiento (slip), y 2) deben ser buenas dispersoras de la luz láser seleccionada o fluorescer. Esta segunda condición impacta mucho en el sistema de iluminación a elegir y la forma de capturar las imágenes. Partículas con poca capacidad de dispersión demandarán más potencia del láser o cámaras más sensibles o mayores concentraciones que pueden modificar la dinámica del problema; en consecuencia mayores costos y requisitos de seguridad. Para evaluar el primer requerimiento de bajo resbalamiento un modo muy simple de hacerlo es determinando la velocidad terminal μ_{∞} de la partícula bajo gravedad. Suponiendo que el proceso está gobernado por el arrastre de Stokes, esa velocidad μ viene dada por:

$$\mu_{\infty} = \frac{gd^2_p (\rho_p - \rho_f)}{18\mu} \quad 9$$

Donde d_p y ρ_p son el diámetro y densidad de la partícula respectivamente, y μ junto a ρ_f son respectivamente la viscosidad y densidad del fluido. Las partículas son apropiadas cuando μ es despreciable comparado a las velocidades del flujo

real. Para velocidades bajas es preferible usar partículas con densidad próxima a la del fluido. En el caso del agua son buenos materiales candidatos el poliestireno u otro plástico. Siempre debe hacerse valer que d_p sea lo suficientemente pequeña para no alterar el flujo. Desafortunadamente, la mayoría de los materiales con gravedad específica ≈ 1 también poseen un índice de refracción similar al del agua y por ende su capacidad de difractar la luz del láser es escasa. Pueden conseguirse partículas plateadas o recubiertas con material fluorescente como rodamina. Para flujos gaseosos es común encontrar el uso de gotas de aceite. La baja densidad de los gases obliga a concluir de la ec. (7) que las partículas deben ser muy pequeñas (típicamente $< 1 \mu\text{m}$). Sin embargo su centrifugación en vórtices es una conocida dificultad del método. Una posible manera de generar gotas tan pequeñas consiste en burbujear aceite con aire y filtrar con un manojó de pequeños tubos las partículas desprendidas al explotar las burbujas (se conoce como tobera de Laskin) [19].

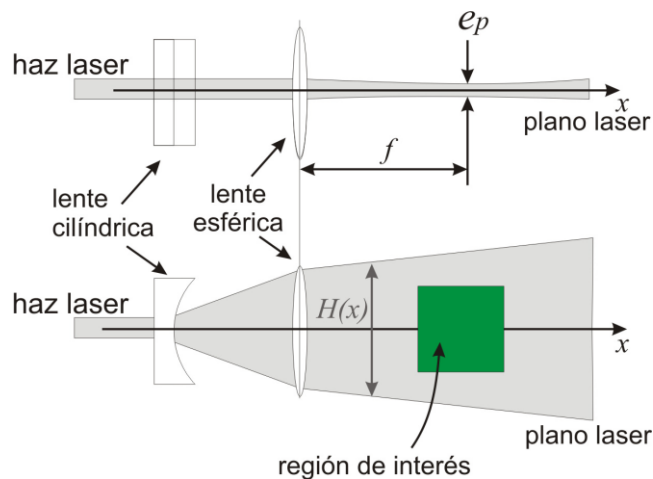


Figura 8. Generación de plano láser [17].

b) ILUMINACIÓN

Láseres continuos y pulsador han sido aplicados en PIV, siendo estos últimos los más utilizados. Entre los láseres continuos es común encontrar los de Helio-Neón y en mayor medida los de iones de argón (por ser más potentes, principalmente) con potencias de algunos vatios. Entre los láseres pulsados son muy utilizados los de Nd^+ : YAG, que pueden producir pulsos de unos 100 mJ (con potencias de

megavatios en cada pulso) con repeticiones a decenas de Hz . A partir de los láseres continuos pueden crearse pulsos de luz haciendo cortes al haz (chopped beam) o empleando un arreglo de espejos que deriven la luz al rotar (produciendo a la vez un plano láser por barrido). Sin embargo, el gran atractivo está en los láseres pulsados por su corta duración de luz (dt de algunos nano-segundos). En términos prácticos una partícula incluso de muy altas velocidades aparecerá “congelada” en la imagen, con niveles altos de intensidad. Los láseres continuos imponen restricciones a la velocidad máxima del fluido. Para conseguir dos pulsos muy cercanos en tiempo (dt del orden de microsegundos a milisegundos) se necesitan dos láseres, que en general permiten separar temporalmente dichos pulsos de manera arbitraria (Figura 9). Una cuestión a resaltar es la alineación de los dos planos láser, ya que existe un nivel de solapamiento espacial ($\approx 50\%$) por debajo del cual los resultados son pobres. Los láseres pueden sincronizarse con una cámara de video y obtener en un cuadro la imagen del primer pulso y en el siguiente la del pulso con lo que la cámara no necesita ser rápida. La información de ambos cuadros se correlaciona para obtener los desplazamientos [18].

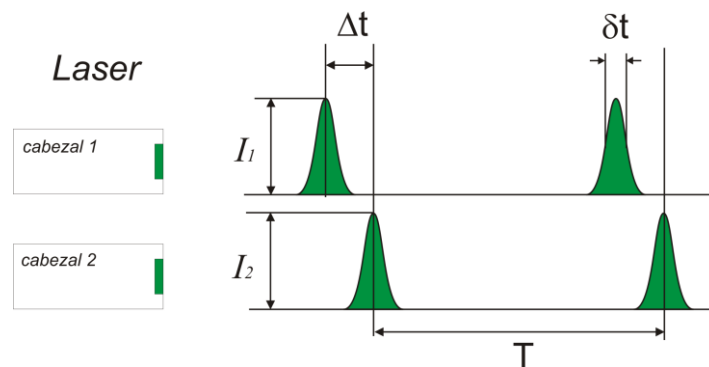


Figura 9. Pulsos de láser. Valores típicos $T = 0.02$ a 0.1 s, $\Delta t =$ micro-segundos a milisegundos, $dt =$ varios nano-segundos [17].

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA

La metodología empleada en este trabajo consta de a) diseño del equipo, y b) instalación del equipo. El diseño se realizó en conjunto con varios compañeros que diseñaron diferentes partes y que no pudieron participar durante la instalación. Durante la instalación se realizaron ajustes en el cañón y sistema de suministro de partículas. El ajuste para el cañón de disparo se realizó con apoyo de la metodología de búsqueda de componentes, los ajustes de los elementos restantes del equipo se realizaron al construirlo y fueron menores.

Las pruebas se realizaron con el arreglo dispuesto mediante iluminación láser y cámara de alta velocidad, posteriormente se realizaron las estimaciones referentes al flujo, velocidad de las partículas dentro del flujo a la salida del cañón de disparo y la estimación del ángulo del abanico formado a la salida del cañón de disparo.

3.1. ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD DEL FLUJO PRIMARIO

La estimación de la velocidad del flujo se realiza con base en el caudal de flujo a la salida del cañón. Este caudal se calculó para un volumen de referencia y tiempo establecido. También se calculó el área de la superficie a través de la cual el caudal se mide. La velocidad del flujo se calcula a partir de la relación $v = Q/A$, donde Q es el caudal y A el área. Los datos empleados y resultados de caudal se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos para estimar el flujo

Tiempo (s)	Volumen (m ³)	Área ducto (m ²)	Caudal (m ³ /s)	Velocidad (m/s)
2.47	0.0023065	1.41372E-05	0.000933	66.0558
2.28	0.0023744	1.41372E-05	0.001041	73.6651
2.81	0.0023881	1.41372E-05	0.000849	60.1164
2.41	0.0019867	1.41372E-05	0.000824	58.3119
2.75	0.0025140	1.41372E-05	0.000914	64.6660

3.2. ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD DE LAS PARTÍCULAS

La estimación de la velocidad de partículas se realiza analizando imágenes tomadas con la cámara de alta velocidad. También se determinó la trayectoria de las partículas. Las imágenes analizadas muestran partículas desde la salida del cañón hasta el final del plano iluminado por el láser. En estas mediciones se obtuvo el promedio de los cuadros considerando una velocidad de toma de imágenes constante de 60000 cuadros por segundo con la que se obtiene el tiempo de recorrido necesario para seguir la trayectoria de una partícula en la distancia mencionada. Las mediciones obtenidas se muestran en la Tabla 2. La velocidad se estima a partir de la relación que existe entre la velocidad de grabación de la cámara de alta velocidad (cuadros /segundo), esto es la distancia recorrida, los cuadros que requiere una partícula para realizar dicho recorrido y el tiempo en el que la partícula recorre el plano, el cálculo del tiempo de recorrido se muestra en la Tabla 6.

Tabla 2. Datos de desplazamiento de partículas.

Corrida	Cuadros o tomas		
	15°	10°	5°
1	15	12	9
2	18	13	7
3	15	12	11
4	17	14	8
5	19	13	10
PROMEDIO	16.8	12.8	9

Los datos empleados para estimar la velocidad de partículas son dos, la velocidad de grabación es 60000 cps y la distancia recorrida por la partícula que es 0.032m.

3.3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE EQUIPO PARA PRUEBAS DE EROSIÓN

La Tabla 3 describe equipos construidos por investigadores de la Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, y la Universidad de Guadalajara, los que se comparan contra el que se diseñó y construyó en este trabajo [20, 21, 22, 33].

Tabla 3. Comparación de equipos para pruebas de erosión.

Parámetros	Equipo de la UTP, cañón horizontal, [20],[21],[22]	Equipo de la U. de G., cañón vertical [33]	Equipo de CICATA Querétaro
Tiempo de prueba (min)	16	10	5
Presión (psi)	-----	10 a 20	20 a 80
Velocidad de impacto (m/s)	20 ± 2	-----	>100
Tamaño medio de partícula (µm)	300	150 a 450	90
Dimensiones de boquilla (mm)	Diámetro: 13	Diámetro: 5	Diámetro: 3
	-----	Long:100	Long:10
Ángulos de impacto	2° - 90°	20° - 90°	20° - 90°
Flujo de partículas (g/min)	18	-----	0.305
Carga de arena sílica (g)	-----	1000	11.77
Diámetro interno de tubería o cámara (mm)	-----	152.4	6.35

Existen en general dos tipos de aparatos para pruebas de erosión, el primero es tipo rotatorio, en el cual básicamente se hace girar la muestra a probar y las partículas son impactadas por gravedad. Una variante en los equipos rotatorios es

que la muestra permanece fija y a través de un sistema con disco giratorio se impulsan las partículas para ser impactadas en la muestra.

En el segundo tipo de equipo para pruebas de erosión, las partículas son proyectadas a través de un cañón de disparo sobre las muestras. El dispositivo implementado para este trabajo pertenece a este tipo de equipos. El arreglo general, está compuesto por un suministro de aire a presión, un cañón de disparo, una cámara de impacto dentro de la cual las partículas se proyectan. El equipo que se construyó cuenta con una entrada para el suministro de aire a presión al cañón de disparo que está ubicado en forma horizontal; existen equipos con el cañón colocado en forma vertical. El suministro de partículas generalmente se realiza dentro de una cámara presurizada, a fin de crear una diferencia de presión suficiente entre el interior del cañón y el dispositivo que suministra las partículas. En equipos que cuentan con sistema de extracción la evacuación se realiza por sobrepresión en la cámara de impacto, es decir la extracción del flujo dentro de la cámara se realiza hasta que la presión llegue al valor de apertura de la válvula que se encuentra en la salida hacia el extractor, lo cual no permite mantener un ambiente de prueba adecuado. El equipo que se implementó cuenta con un sistema de extracción que permite mantener la presión dentro de la cámara de impacto adecuada para la realización de las pruebas y además mantiene el ambiente limpio lo que a su vez permite mantener una adecuada visión de la prueba y que la condición del ambiente sea óptima durante todo el experimento. El equipo que se implementó tiene un porta-muestra que permite variar la inclinación de la muestra y la distancia de la misma con respecto al cañón de disparo.

Para el diseño del equipo para pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas, en particular el cañón de disparo, en un principio se siguió la norma ASTM G76-04. Se maquinaron los componentes y realizaron pruebas para corroborar el funcionamiento correcto de cada uno y en conjunto. Después de estas pruebas se encontró que el elemento del tubo venturi no realizaba el efecto de succión en la sección requerida para el suministro de partículas. Para resolver este problema, se

utilizó el método de búsqueda de componentes que se describe mediante el diagrama de flujo de la Figura 10.

Búsqueda de Componentes

Diagrama de Flujo del Procedimiento

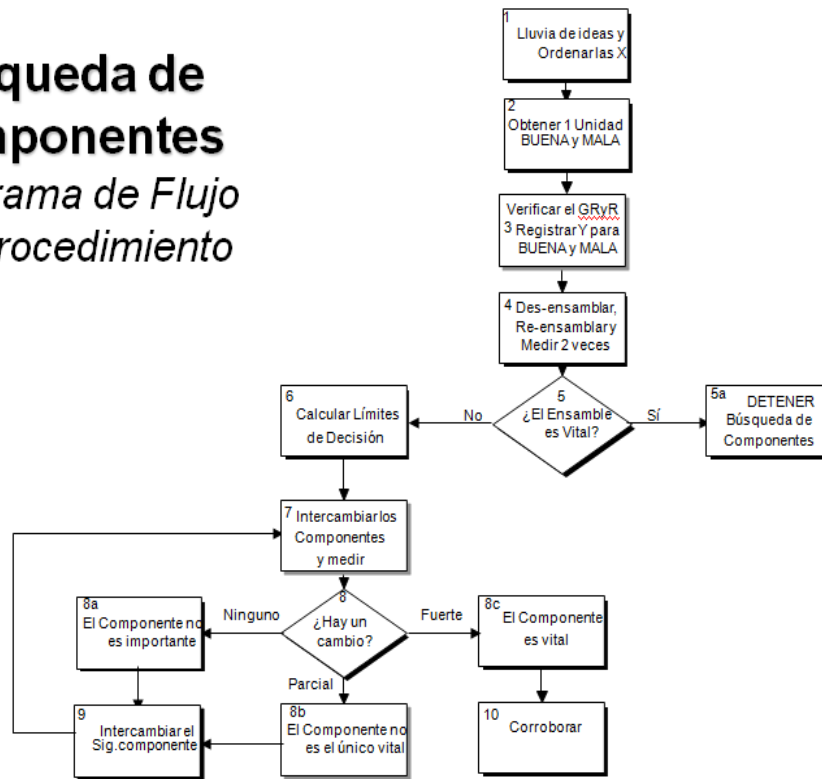


Figura 10. Diagrama de flujo del procedimiento de búsqueda de componente.

Procedimiento de búsqueda de componentes:

- 1) Lluvia de ideas y jerarquización de los componentes llamados X.
- 2) Identificar una unidad con buen desempeño y otra con malo.
- 3) Verificar el sistema de medición de las variables y registrar la respuesta Y para ambos componentes.
- 4) Des-ensamblar, re-ensamblar y volver a medir cada unidad dos veces.
- 5) Determinar si el método de ensamble es una X vital.
 - Si es vital, detener y mejorar el método de ensamble
 - Si no es vital, ir al paso siguiente.
- 6) Cambiar el componente de mayor prioridad del buen ensamble al malo y viceversa. Registrar la "Y" para cada nuevo ensamble.
- 7) Intercambio de componentes.
- 8) Determinar si el componente ocasionó un cambio significativo.

- a) NINGUNO: Si no hay cambio significativo (el bueno permanece en bueno y el otro permanece en malo), el componente no es una X vital.
 - b) PARCIAL: Si existe cambio parcial, el componente es una X vital, pero no es la única variable.
 - c) FUERTE: Si existe un cambio total, el componente que se intercambi6 es una X vital y las otras variables pueden ponerse en segundo t6rmino.
- 9) Regresar los ensambles a su estado original, repetir los pasos 6 al 8, para los siguientes componentes hasta no ver m6s cambios significativos.
- 10) Efectuar la corroboraci6n o etapa "Ganadora" para confirmar resultados.

De esta manera se obtiene la configuraci6n final del ca6n6n de disparo que se mostrara y ser6 descrita en el Cap6tulo 4. Resultados y Discusi6n.

C6mara de impacto

La c6mara de impacto se dise1n6 con el prop6sito de mantener condiciones de vac6o durante el calentamiento de la muestra en caso de ser necesario. Est6 construida en acero inoxidable de $\frac{1}{4}$ " de espesor, cuenta con una tapa en la parte superior, del mismo material, que se sujeta con 24 tornillos y una ceja saliente en el borde en donde se encuentra un empaque de neopreno para garantizar el sello en condiciones de vac6o. En la parte inferior cuenta con una transformaci6n de rectangular a redondo del mismo material, en la parte final de esta transformaci6n se encuentra un v6lvula de mariposa que sirve para el desalojo de part6culas acumuladas durante las pruebas, para as6 mantener el interior de la c6mara de impacto limpio. Tomando como parte frontal de la c6mara de impacto la pared donde se encuentra la entrada del ca6n6n de disparo, donde tambi6n est6 provista una entrada roscada para la bomba de vac6o y una conexi6n roscada para un man6metro de vac6o, este 6ltimo para controlar las condiciones dentro de la c6mara de impacto. La pared lateral izquierda est6 provista con una compuerta para la manipulaci6n de las muestras dentro de la c6mara. En la pared derecha hay una mirilla para observaci6n lateral de las pruebas y que fue usada para colocar la c6mara de alta velocidad. En la pared posterior se encuentra la salida al

sistema de extracción. Dentro de la cámara se cuenta con un porta-muestra, el cual está provisto de un espacio para colocar la muestra sobre material refractario, el que a su vez cuenta con los espacios para colocar dos resistencias de cartucho que permitirán calentar la muestra; también puede variarse la inclinación y distancia entre la muestra y el cañón de disparo, en el caso de este trabajo no se usó el porta-muestra. Cabe mencionar que el equipo ya cuenta con el porta-muestra y la conexiones necesarias para realizar las pruebas con el control necesario, Figura 11.

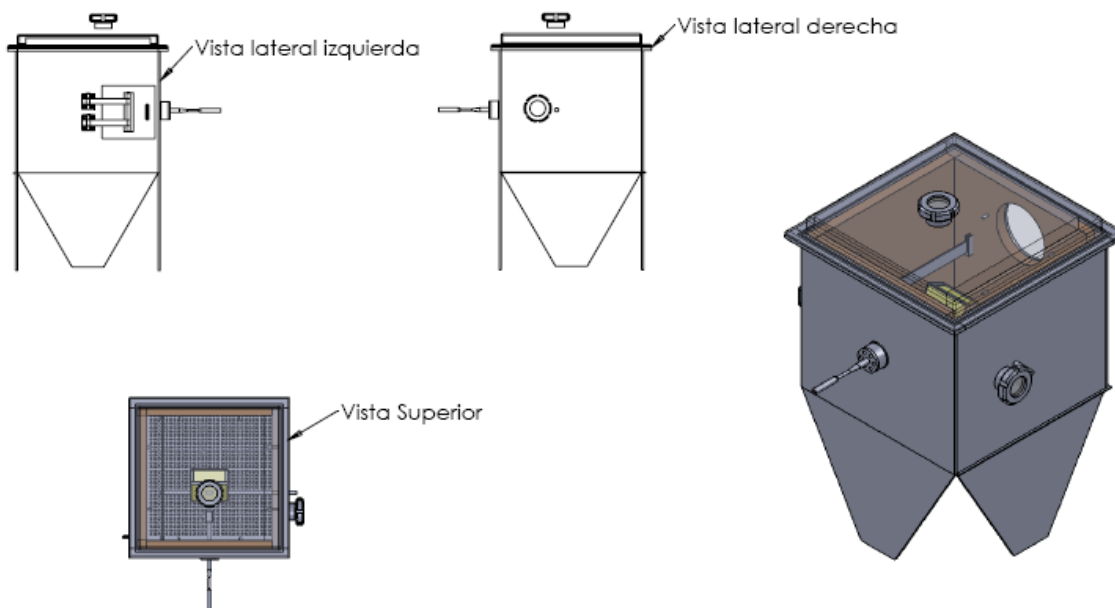


Figura 11. Cámara de impacto.

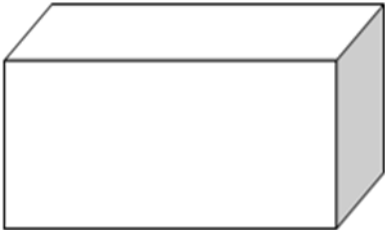
Sistema de extracción

Se diseñó un sistema de extracción para el equipo con el propósito de mantener estable la presión dentro de la cámara de impacto durante una prueba. Este sistema funcionara de manera intermitente, es decir, que se accionará cada vez que se inicie el disparo de partículas. Del cañón saldrá un fluido bifásico gas-sólido, lo cual provocará un aumento de la presión dentro de la cámara. El ducto de salida cuenta con una válvula primaria de cierre, enseguida de ésta está un

filtro para retener las partículas, después del filtro se ubica el ventilador de extracción. El despiece de este sistema puede verse en la Figura 13.

En la Tabla 4 se muestra el cálculo realizado para la selección del ventilador del sistema de extracción. Para esto se calculó el flujo de aire necesario y la caída de presión que deberá vencer el ventilador centrífugo.

Tabla 4. Cálculo del flujo de aire de la cámara de impacto

Ventilación			
	ALTURA =	0.67	m
	ANCHO =	0.45	m
	LARGO =	0.46	m
AREA =	0.207	m ²	
VOLUMEN=	0.13869	m ³	-
PARÁMETROS UNITARIOS			
	MCH / M ²	20.10	
	CFM / M ²	11.83	

De acuerdo al cálculo (Tabla 4) el flujo necesario para la circulación de la cámara de impacto es bajo, respecto a la capacidad de los equipos comerciales, de los cuales en un caso no cuenta con sistema de extracción y el flujo usado durante la prueba se mantiene contenido del recinto donde se realiza la prueba [20], en otro caso la extracción del flujo suministrado durante la prueba se realiza mediante un sistema de sobrepresión, es decir, que la extracción en este caso se realiza hasta que se alcanza la presión necesaria dentro del recinto donde se realiza la prueba, la falta de un sistema de extracción adecuado lleva a tener un ambiente

inadecuado para realizar la prueba, además del flujo de aire también se determina la caída de presión. Dicha caída, en pulgadas columna de agua, está dada por los siguientes valores:

Válvula: 0.9”

Filtro: 1.2”

Ducto recto (2 tramos): $0.51 \times (2) = 1.02$ ”

Esto da una caída total = 3.12”

De la curva de operación, Figura 12, puede determinarse el caudal del ventilador seleccionado operando con la caída de presión total calculada.

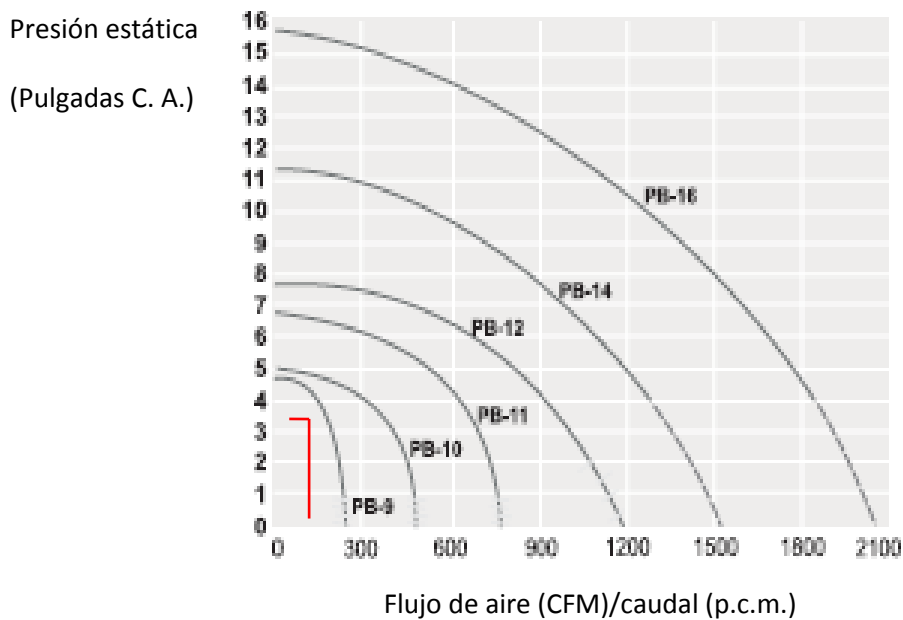


Figura 12. Curvas de operación del ventilador.

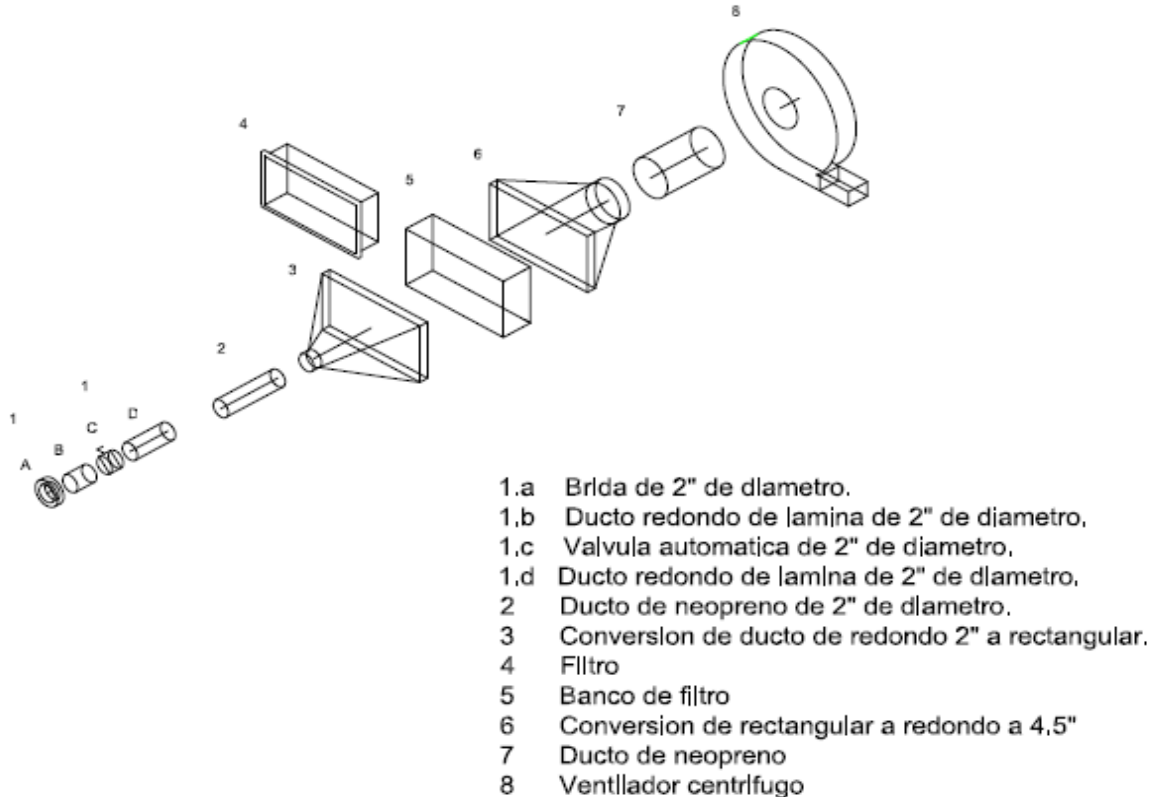


Figura 13. Sistema de extracción.

3.4. PROCEDIMIENTO OBTENCIÓN DE IMÁGENES

Para la realización de las pruebas de este trabajo, aunque no se aplicó la velocimetría láser, esta técnica dio la base para poder realizar las pruebas necesarias. La velocimetría por imagen de partículas (PIV) la cual es una técnica desarrollada para caracterizar el flujo de un fluido, puesto que permite medir el promedio del campo de velocidades, así como el campo de vorticidades, mediante la siembra de partículas trazadoras en el flujo y capturando imágenes. El equipo PIV está compuesto generalmente por dos láseres, una cámara CCD conectada al procesador de datos (dispositivo de carga acoplada), un sincronizador y un procesador de datos.

En el caso de este trabajo que se basa en la técnica PIV se usa una cámara de alta velocidad para la captura de imágenes a una velocidad de 60000 cps, un láser

de 400 mW de potencia y 325 nm de longitud de onda, del cual se obtiene un haz de color verde adecuado para iluminar las partículas de arena que se utilizan. El láser cuenta con un cabezal que hace posible que el haz de luz emitido se convierta en un plano de iluminación.

El arreglo para este experimento se compone de la siguiente manera. El láser se coloca sobre la mirilla de la parte superior de la cámara de impacto. La cámara de alta velocidad se coloca perpendicular al láser, frente a la otra mirilla ubicada sobre una pared lateral. En la Figura 14 se muestra la ubicación de las mirillas en la cámara de impacto.

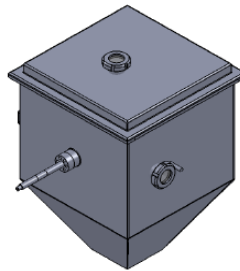


Figura 14. Ubicación de las mirillas en la cámara de impacto.

La cámara de alta velocidad funciona con un programa que permite adquirir imágenes cuadro por cuadro. El arreglo para la adquisición de imágenes del flujo de salida del cañón se muestra en la Figura 15.

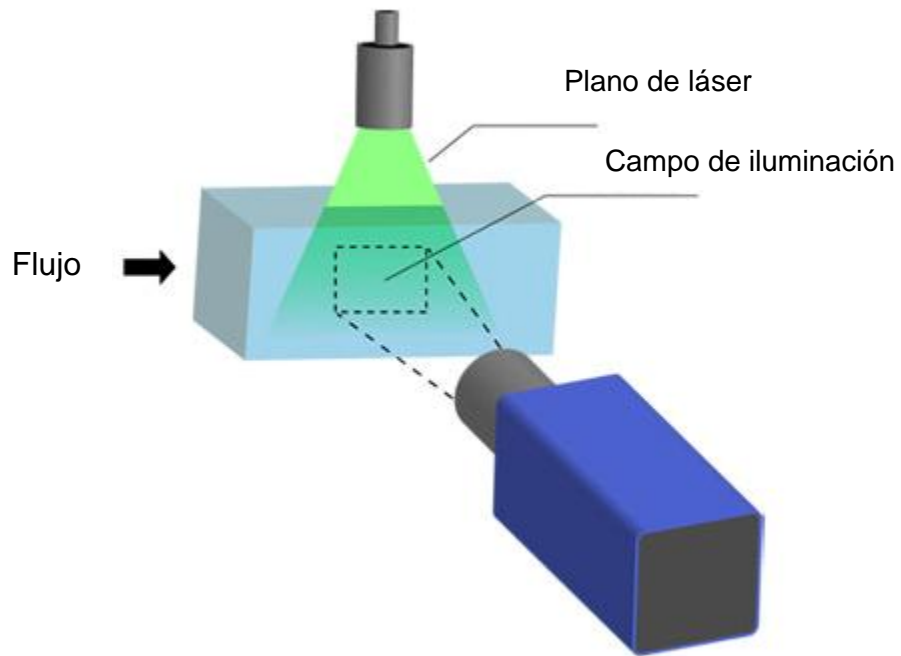


Figura 15. Arreglo para la adquisición de imágenes de partículas [22].

En la Figura 16 (a) se muestra el arreglo para iluminar y adquirir imágenes. A la derecha de esta figura se observa la cámara de alta velocidad, y en la parte superior el láser colocado en un soporte fabricado en perfil de aluminio. En la Figura 16 (b) se observa este arreglo desde otro ángulo.

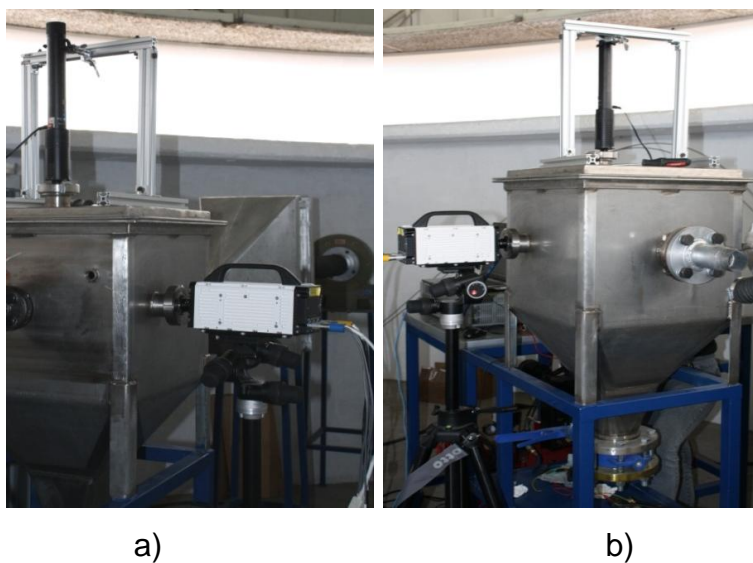


Figura 16. Arreglo para iluminar y adquirir imágenes del flujo.

El plano formado por el láser se muestra en la Figura 17. En ésta se observa la ubicación del plano a través del cual se iluminó el flujo y realizó la captura de las imágenes. También se muestra el cañón de disparo y la mirilla en la que se coloca la cámara de alta velocidad.

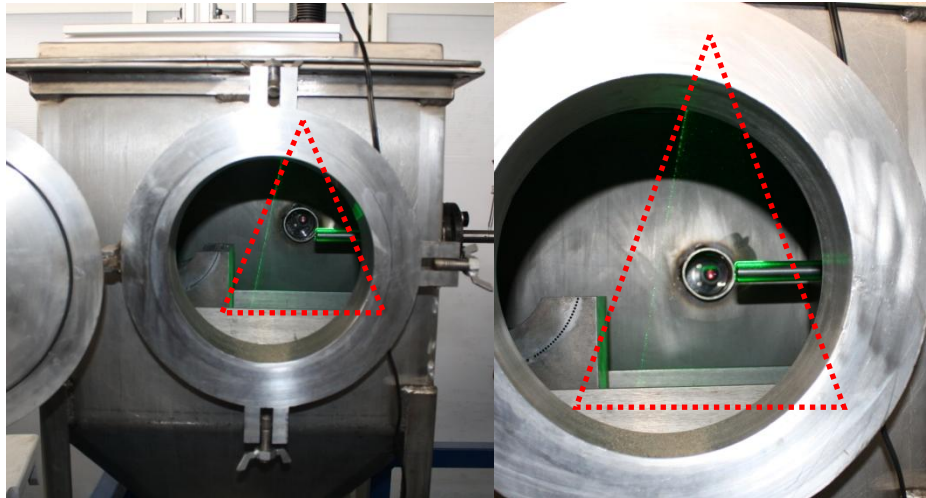


Figura 17. Plano de láser dentro de la cámara de impacto.

3.5. PATRÓN DE FLUJO

Para analizar el patrón de flujo es necesario delimitar las dimensiones del flujo, es decir, saber si el flujo a la salida del cañón de disparo está variando en dos o tres dimensiones. Para determinar el espacio en el que se realizará el análisis del patrón de flujo primero se ilumina el flujo divergente a la salida del cañón de disparo con el láser. La iluminación de éste mostrará que el flujo a la salida del cañón tiene un movimiento recto, no gira alrededor de un eje de referencia. Esto se determinará mediante análisis de imágenes. Si no se muestra un movimiento de giro se garantiza que las variaciones del flujo a la salida del cañón solo son significativas en dos dimensiones; con esto se estima la velocidad del flujo. Las variables a considerar para determinar el patrón de flujo son el ángulo de entrada de la boquilla, Figura 18, y el ángulo de divergencia del flujo salida del cañón de disparo,

Figura 19. Las diferencias en cada prueba permitirán determinar la relación existente entre el ángulo de entrada de la boquilla y el patrón de flujo.

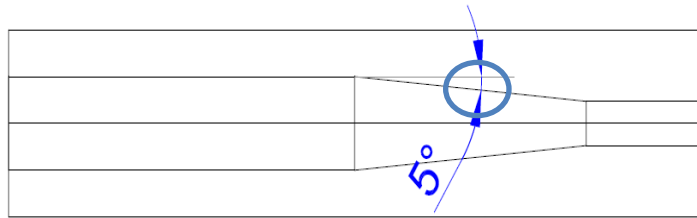


Figura 18. Ángulo de entrada de la boquilla.

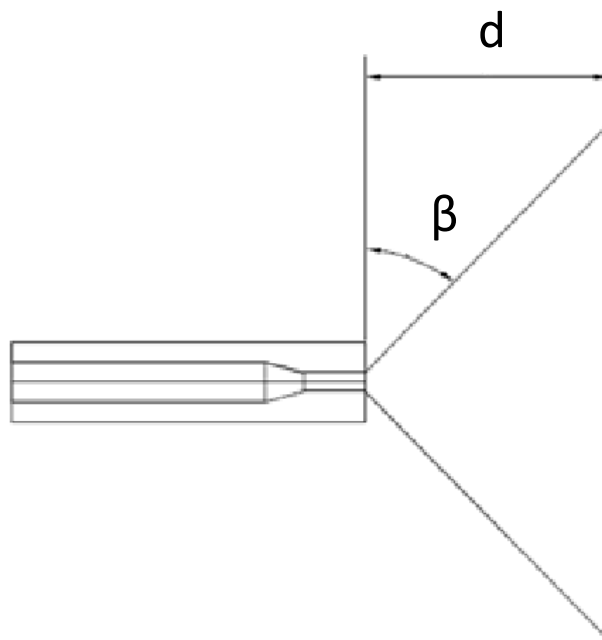


Figura 19. Variables a medir del patrón de flujo.

3.6. SIMULACIÓN DEL CAMPO DE PRESIONES EN EL CAÑÓN DE DISPARO

Se realizó una simulación con las modificaciones propuestas en la configuración de los componentes del cañón y las dimensiones de las boquillas. Ésta se realizó con el software *PRO-Engineer* en las instalaciones de Centro de Desarrollo MABE Querétaro. En la Tabla 6 se muestran los valores de las variables utilizados en la simulación, y en las Figuras 21, 23, 25 las imágenes en las que se ilustra la caída de presión en la zona de suministro de partículas. En la Figura 20 se muestra la simulación del campo de presiones en la totalidad del cañón de disparo, además

se puede observar que la presión a través del cañón es mayor a la presión atmosférica, lo cual indica que el flujo seguirá moviéndose sin restricción alguna del suministro de aire hasta la salida por la boquilla. La sección del venturi se podrá observar a detalle en la Figura 21, 23, 25.

Tabla 5. Valores utilizados en la simulación.

VARIABLE	VALOR
Caudal	0.001413 m ³ /s
Temperatura	300 K
Presión	80 Psi

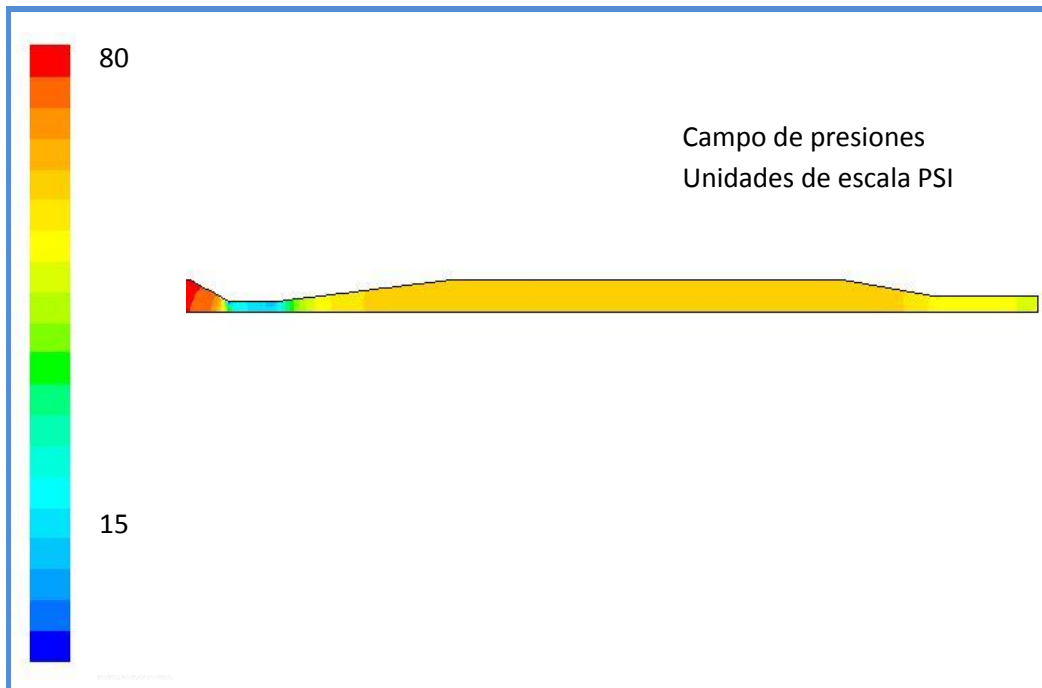


Figura 20. Cañón de disparo.

Para realizar esta simulación fue necesario llevar a cabo el procedimiento de búsqueda de componentes, ya que en la primera versión de los componentes se siguieron recomendaciones de la norma, pero en pruebas preliminares se observó que el flujo no se comportaba de manera que cumpliera el objetivo a la salida del tubo venturi, especialmente en la zona de suministro de partículas. Siguiendo dicho procedimiento se cumplió el punto de tener un dispositivo fácil de ensamblar

y des-ensamblar, lo siguiente fue hacer una comparación con un dispositivo que de la misma manera sea fácil de ensamblar y des-ensamblar, y realizar una sustitución de componentes con funcionamiento correcto. Esta prueba se realizó primero con la eliminación del porta-boquilla para permitir el libre flujo, pero no se encontró una diferencia significativa en su funcionamiento; después se probó el cañón de disparo eliminado la boquilla, quedando solo ensamblado el conector 1 tubo venturi y conector 2, de ésta se encontró que el funcionamiento mejoró aunque no de forma significativa, lo cual indicó que esta variable afecta el funcionamiento sin ser la única. Enseguida se probó el tubo venturi, colocándolo sin ninguna restricción, es decir, la configuración empleó el conector 1, conector 2 y al final el tubo venturi teniéndolo, con su salida al ambiente, lográndose una mejora significativa, pero sin la boquilla instalada. Debido a estos resultados fue necesario realizar otra simulación modificando el diámetro de salida de la boquilla y la distancia del conducto recto al final de ésta. De esta manera se obtuvo un comportamiento mejor de flujo dentro del cañón, además de que se logró la caída de presión en la zona de suministro de partículas en el venturi.

En la Figura 21 se muestra el campo de presiones dentro del venturi con las condiciones anteriormente descritas y su escala a la izquierda. En esta figura se muestra la sección final de la parte recta que es donde se sitúa la zona de suministro de partículas. La modificación de la boquilla empleada fue el diámetro de salida de 3 mm, conservando el ángulo de entrada en 10°. Con este arreglo se logró un flujo correcto. Las Figura 21 y Figura 22 muestran la simulación para diferentes diámetros de salida de 2.5 mm, 3.0mm y 3.5 mm.

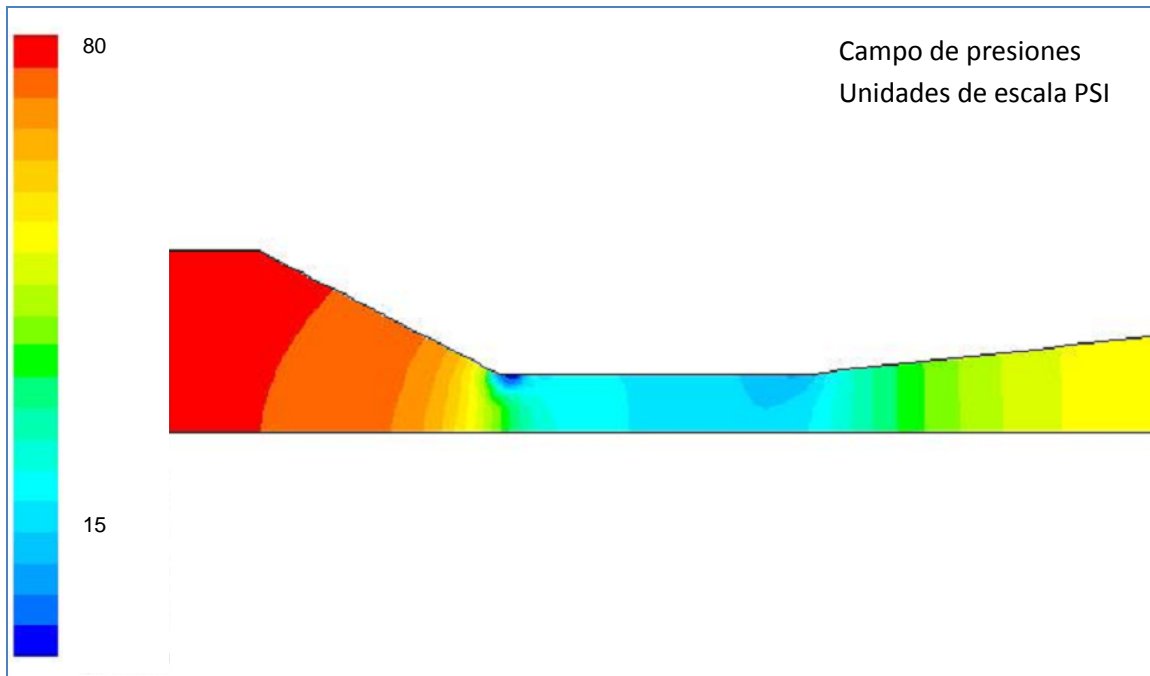


Figura 21. Tubo venturi con la boquilla de 3 mm de diámetro en la salida.

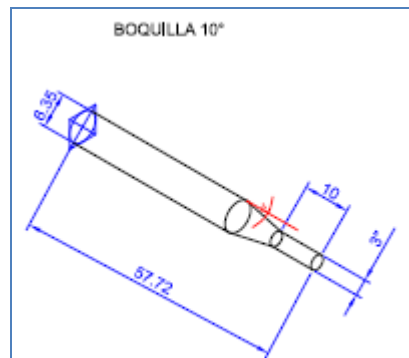


Figura 22. Boquilla de 3 mm de diámetro en la salida y 10° de ángulo de entrada.

De la misma forma que para el anterior arreglo en la Figura 23 y Figura 24 se muestran el campo de presiones en el tubo venturi para la boquilla con diámetro de salida de 3.5 mm de diámetro y ángulo de salida de 15°. En este caso la diferencia de presiones en la zona del suministro de partículas no es suficiente para lograr un funcionamiento correcto, además de que se observa un cambio brusco de presiones, lo que produciría turbulencia que afectaría de manera indeseable el flujo en el interior del cañón.

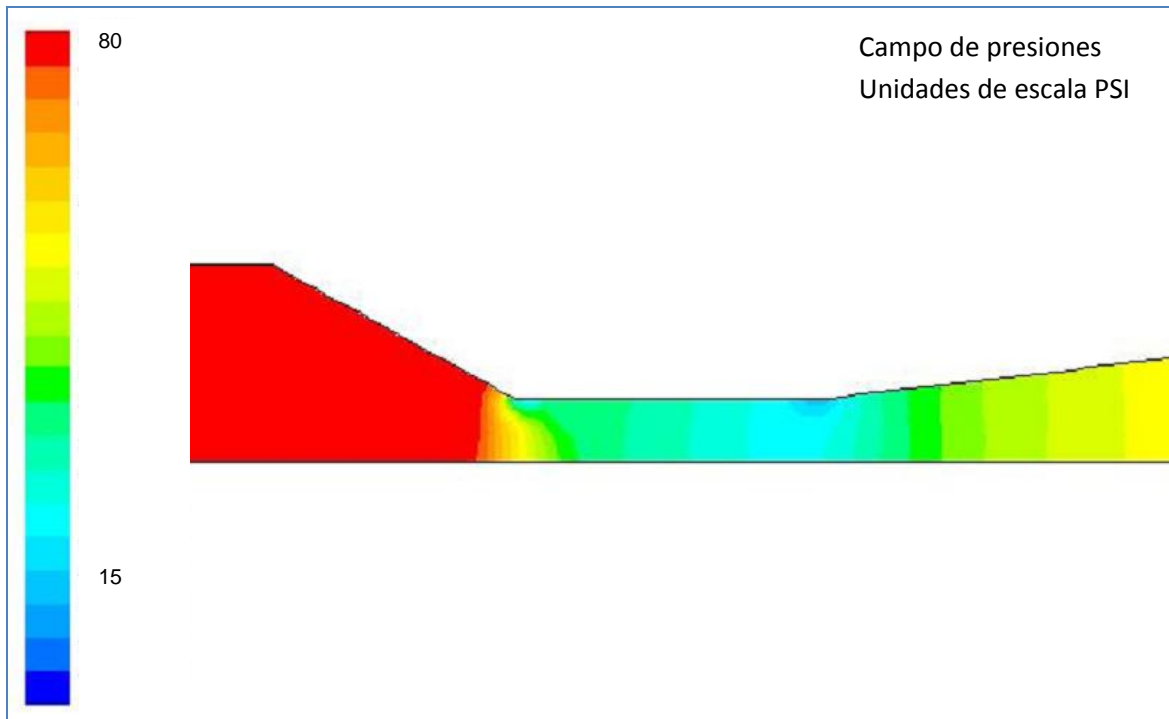


Figura 23. Tubo venturi con la boquilla de 3.5 mm de diámetro en la salida.

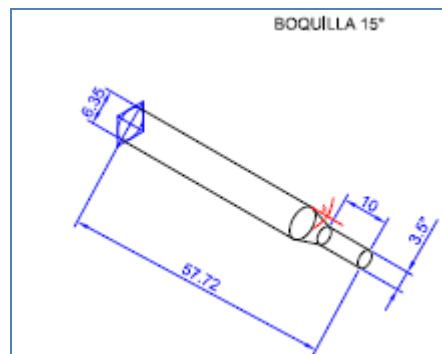


Figura 24. Boquilla de 3.5 mm de diámetro en la salida y 15° de ángulo de entrada.

Una tercera simulación que se realizó es la que se muestra en la Figura 25 y Figura 26. En esta se observa que la caída de presión se aleja más de la sección de suministro de partículas, en comparación con los dos casos anteriores. Con estos resultados se eligió el arreglo mostrado en la Figura 21 y Figura 22. En este arreglo se empleó una boquilla con diámetro de salida de 2.5 mm y ángulo de entrada de 5°.

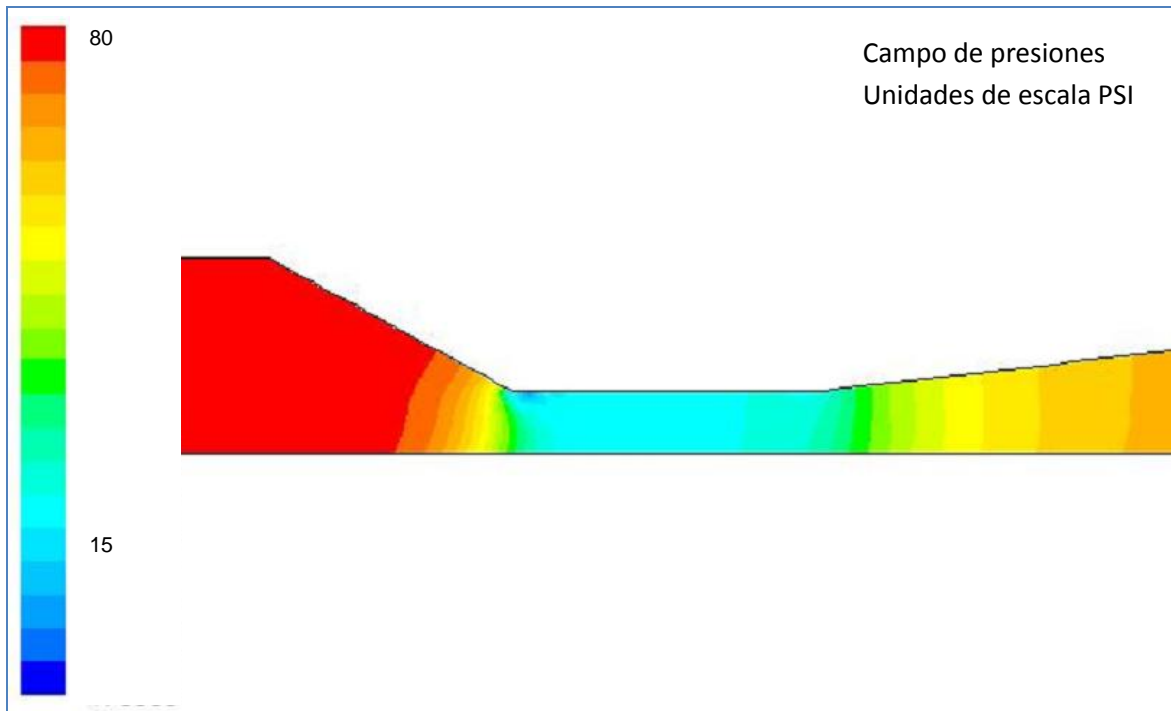


Figura 25. Tubo venturi con la boquilla de 2.5 mm de diámetro en la salida.

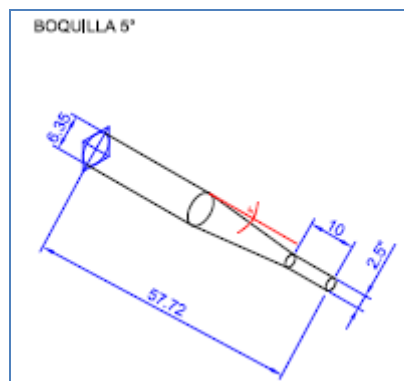


Figura 26. Boquilla de 2.5 mm de diámetro en la salida y 5° de ángulo de entrada.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. SIMULACIÓN

De la simulación de los campos de presiones dentro del cañón de disparo, más específicamente en la sección del tubo venturi, realizada y que se menciona en la sección de simulación del capítulo anterior, resulta que las dimensiones de la boquilla, diámetro de salida y longitud de la sección recta de la salida más adecuadas para obtener la caída de presión requerida para el suministro de las partículas en el orificio dispuesto para esto, fueron 3 mm y 10 mm de diámetro y longitud, respectivamente, Figura 21 y Figura 22.

La caída de presión mencionada se refiere a que se buscó y obtuvo de manera correcta que la presión dentro del cañón en la sección del tubo venturi fuera menor que la presión atmosférica. Con esta diferencia de presión se obtiene el efecto de succión en la entrada de las partículas, lo cual permite realizar el suministro de partículas de manera sencilla y continua, de lo contrario hubiera sido necesario implementar un suministro de partículas mediante una tolva presurizada. Esto evitó agregar dispositivos adicionales al equipo, resultando en un aparato menos complejo que otros reportados en la bibliografía [20, 21, 22, 23].

4.2. ABANICO DEL FLUJO A LA SALIDA

Boquilla de 15°

Del abanico formado por el flujo a la salida del cañón de disparo, se esperaba que cambiara de acuerdo con la boquilla instalada en el cañón de disparo, como se observa en la Figura 27 a). En este caso, empleando la boquilla de 15°, el abanico forma un ángulo de 34° entre la línea del centro del cañón de disparo y la línea de la trayectoria más alejada; aquí solo se señala la parte superior del abanico. Se observa la mayor parte del flujo de partículas se concentra en el centro del abanico, y otras fracciones menores se mueven hacia los extremos. El propósito de este equipo es evaluar el comportamiento de materiales expuestos a erosión provocada por un flujo bifásico. Un abanico amplio conduce a sobreestimar la

resistencia a la erosión de un material, ya que las partículas sólidas impactan sobre un área mayor. Más adelante se muestra que las partículas más alejadas de la línea de centro del cañón poseen una velocidad menor.

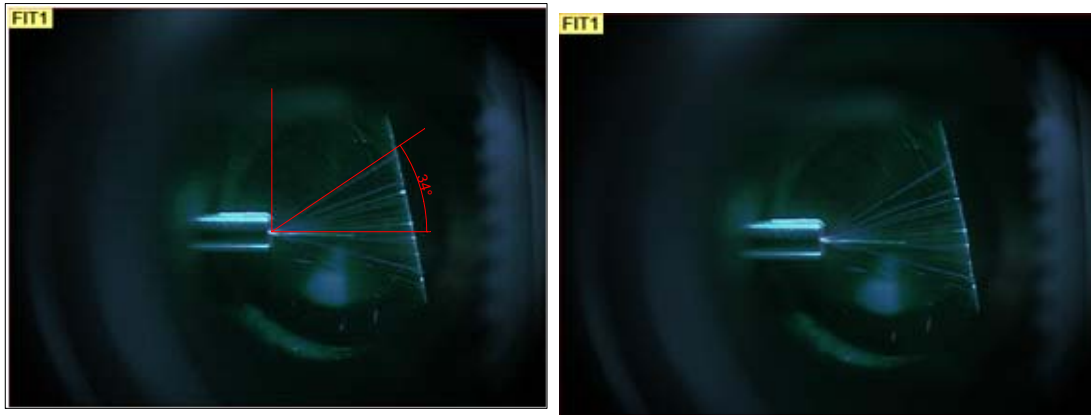


Figura 27. a) Ángulo del abanico, y b) patrón de flujo para la boquilla de 15°.

Boquilla de 10°

Para la boquilla con ángulo de entrada de 10° se obtiene un abanico con un ángulo de divergencia de 15°, lo que significa una reducción del área de impacto, Figura 28 a). También se observó una menor turbulencia, por lo que puede suponerse que la influencia de la presión exterior fue menor que en el caso anterior.

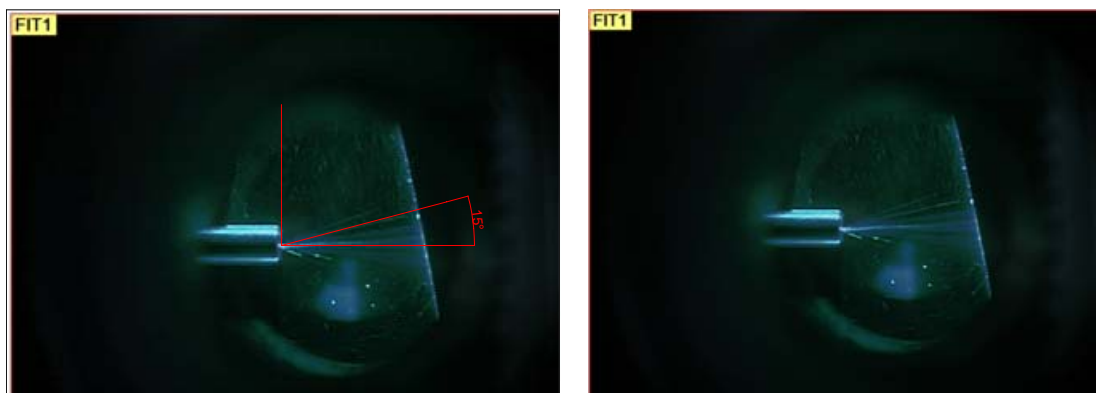


Figura 28. a) Ángulo del abanico, y b) patrón de flujo para la boquilla de 10°.

Boquilla de 5°

Para la boquilla de 5° se nota una mejora significativa del flujo con respecto a las otras boquillas. En este caso el abanico tiene un divergencia de 7°, Figura 29 a). La mayor concentración de partículas se ubica en el centro del abanico, Figura 29 b), lo cual proporcionará datos más confiables de las pruebas, y así determinar de manera más objetiva la resistencia a la erosión de un material.

Analizando imágenes de vídeo de las pruebas realizadas con las diferentes boquillas, pueden percibirse claramente las partículas que se desvían demasiado del abanico. Estas desviaciones de la trayectoria general del flujo son causadas por colisiones entre las partículas, debidas a la existencia de turbulencia.

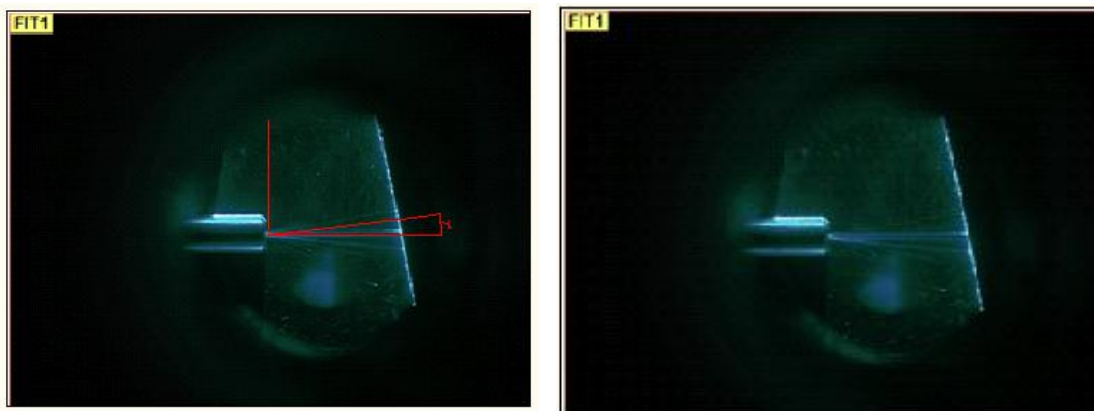


Figura 29. a) Ángulo del abanico, y b) patrón de flujo para la boquilla de 5°.

Aunque el cañón de disparo tiene dispuesto un elemento recto después del tubo venturi, es en el tubo venturi donde se suministran las partículas sólidas. Esto supondría una estabilización del flujo después de haber pasado a través de un cambio de sección. Este cambio de sección fue construido para el suministro de las partículas. Resulta que a la salida del cañón existe turbulencia y que el abanico que se forma tiene un ángulo de divergencia mayor o menor, dependiendo de la boquilla. Dicho efecto se debe a la diferencia de presión existente entre el interior del cañón y el exterior. Además, el flujo dentro del cañón se encuentra confinado y direccionado, y al salir a la cámara de impacto éste se encuentra en un espacio sin restricciones, por lo que el fluido se expande.

El abanico de flujo formado durante las pruebas con las diferentes boquillas muestra diferencias perceptibles a la vista, las cuales se midieron para determinar el ángulo de divergencia en cada caso. La relación existente entre el ángulo de entrada de la boquilla y la divergencia del abanico está regida por la forma en la que el diámetro del conducto en la entrada de la boquilla cambia; para la boquilla de 15° el cambio de sección es más abrupto, lo que provoca una mayor turbulencia, en contraste con un cambio de sección menos súbito. Un cambio de sección súbito provoca un fenómeno llamada reflujo, que consiste en la generación de una recirculación del flujo, el que después se irá reincorporando al flujo del conducto en forma gradual provocando un incremento en la turbulencia. El reflujo se genera en el vértice formado entre la sección con pendiente y la sección recta. Un cambio menos abrupto de sección disminuirá el reflujo, pero no lo podrá eliminar completamente. El usar la boquilla de 5° disminuyó la influencia del reflujo, por lo que podría pensarse en usar una boquilla con un ángulo menor, pero esto equivaldría a tener un cañón con conducto recto, por lo que la velocidad a la salida del cañón de disparo sería igual a la velocidad dentro de éste, es decir, que la razón por la que se tiene el cambio de sección, que es provocar un incremento en la velocidad del flujo a la salida del cañón no se lograría.

4.3. ÁNGULO DE IMPACTO

El resultado de desgaste por erosión es la diferencia de peso de la muestra antes y después de la prueba; de esta manera solo se conoce la cantidad de material removido. Esta pérdida de material depende del ángulo de inclinación de la muestra, con respecto a la línea de centro del cañón. Pueden obtenerse diferentes tipos de huellas en la zona de impacto. Si la muestra se ubica perpendicular al cañón, la huella tendrá una forma circular, pero si se inclina la huella tiende a ser elíptica, Figura 30. Evidentemente la forma de la huella también depende del patrón de flujo a la salida del cañón; entre mayor sea la divergencia del abanico la huella aparecerá como un círculo con una densidad de impactos menor, lo que conduciría a sobreestimar la resistencia del material, además de que el ángulo al que la prueba se realizó sería “ficticio”, ya que en realidad se tendría un rango de

ángulo de impacto. Para un abanico con un ángulo de divergencia grande impactando una superficie inclinada, daría una huella elíptica presumiblemente muy alargada.

Por otra parte, los materiales exhiben un cambio en su resistencia al desgaste por erosión cuando el ángulo de impacto cambia. Los materiales duros tienen una resistencia mayor cuando el ángulo de impacto es bajo, pero sucede lo contrario a ángulos altos ($\sim 90^\circ$). En cambio, los materiales dúctiles exhiben una resistencia mayor a ángulos altos, pero disminuye conforme el ángulo disminuye. Esta transición en algunos no es gradual, por lo que hay un ángulo o rango de ángulos a la que ésta ocurre. Entonces, si se tiene una divergencia grande no podrá determinarse con precisión el punto o zona de transición.

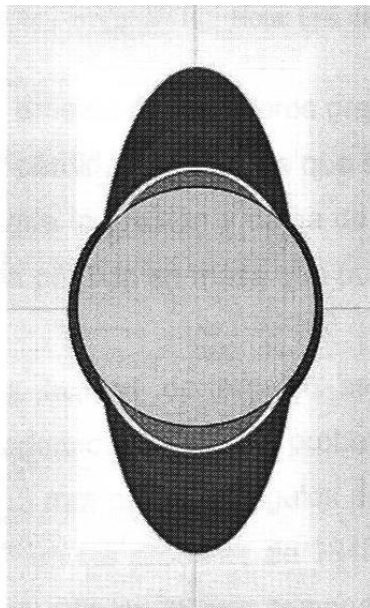


Figura 30. Huella sobre una superficie después de una prueba de erosión [20].

4.4. ESTIMACIÓN DE VELOCIDAD DE PARTÍCULAS

En la Tabla 6 se muestran los datos y estimación de la velocidad de partículas a la salida del cañón. Se observa que para la boquilla con el ángulo de entrada más pequeño la velocidad es mayor comparada contra las boquillas con un ángulo mayor.

Tabla 6. Datos de entrada y estimación de la velocidad de partículas.

Boquilla de 15°	
Para el caso de la boquilla de 15° del análisis de las imágenes se obtiene que la partícula recorre la distancia en 16.8 cps	
	$F = 1/60\ 000 = 1.6667E-5$
Tiempo de recorrido	
$T=F*\text{cps}$	$T = 0.00028\ \text{s}$
$V=d/T$	$V = 114.3\ \text{m/s}$
Boquilla de 10°	
Para el caso de la boquilla de 10° del análisis de las imágenes se obtiene que la partícula recorre la distancia en 12.8 cps	
	$F = 1/60\ 000 = 1.6667E-5$
Tiempo de recorrido	
$T=F*\text{cps}$	$T = 0.000213333\ \text{s}$
$V=d/T$	$V = 150.0\ \text{m/s}$
Boquilla de 5°	
Para el caso de la boquilla de 5° del análisis de las imágenes se obtiene que la partícula recorre la distancia en 9 cps	
	$F = 1/60\ 000 = 1.6667E-5$
Tiempo de recorrido	
$T=F*\text{cps}$	$T = 0.00015\ \text{s}$
$V=d/T$	$V = 213.3\ \text{m/s}$

De la Tabla 6 F es la frecuencia, T es el tiempo de recorrido, cps cuadros por segundo, V velocidad, d distancia de recorrido.

La velocidad mayor se obtuvo al implementar la boquilla con una inclinación de 5° a la entrada de ésta, como se puede observar en la Tabla 6. El número de Mach obtenido es de 0.33, lo cual nos sitúa en el régimen subsónico, por lo que se asume como uno en el que no existen cambios notables en la densidad del flujo, el valor de compresibilidad del aire es de 1.01×10^5 Pa, lo cual nos permite considerarlo como un fluido incompresible, de lo cual aunque tengamos variaciones de presión grandes, las variaciones de densidad que se producen serán pequeñas.

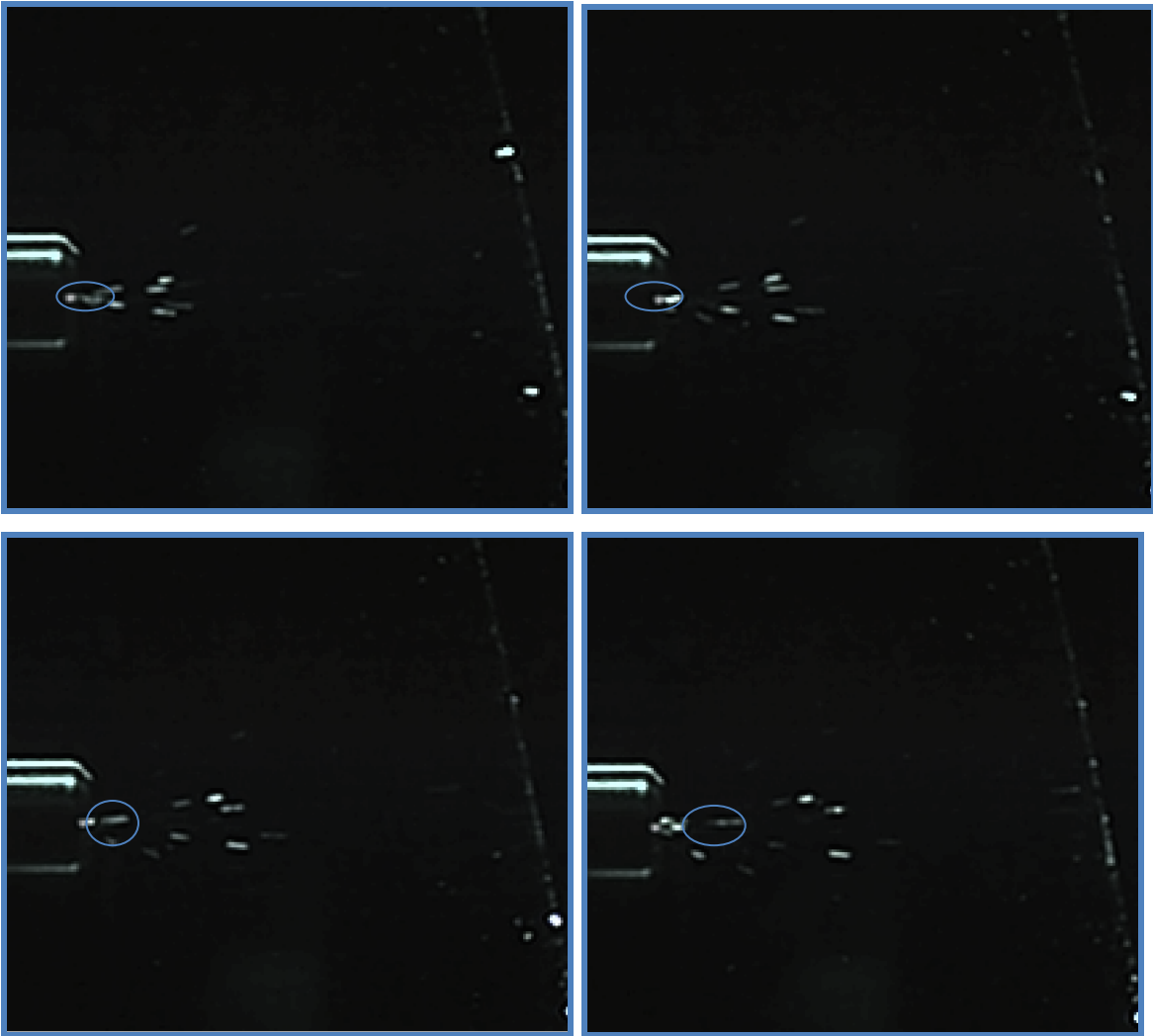
La estimación que se presenta en la Tabla 6 se obtuvo en base al concepto de frecuencia, es decir el inverso de la velocidad de captura. El tiempo que tarda la partícula en hacer el recorrido completo en el plano fijado se obtiene multiplicando la frecuencia por el número de cuadros ocupados por la partícula, durante su trayectoria. Por tanto, al sustituir la distancia y el tiempo en $V = d/T$, se obtiene la velocidad.

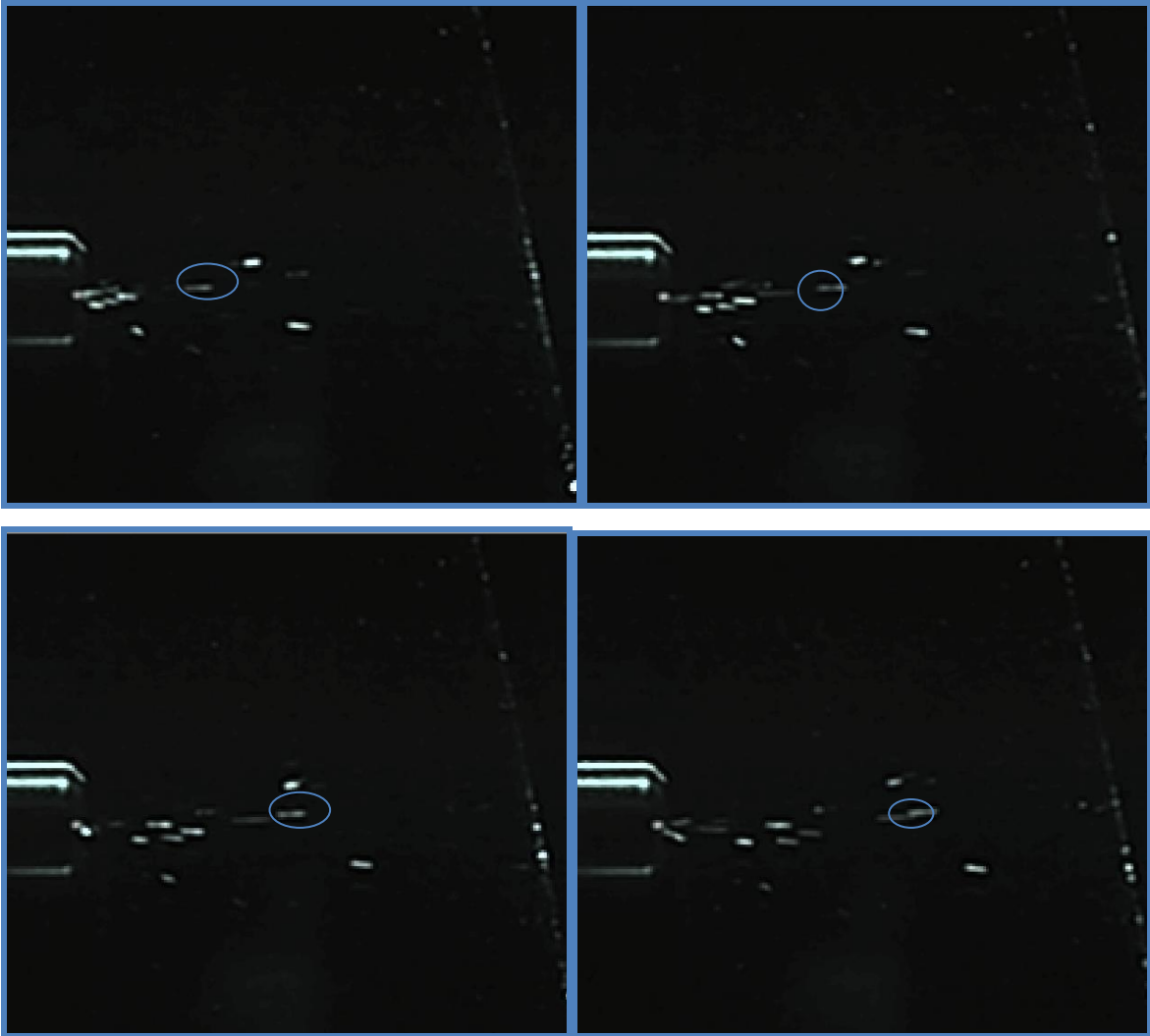
En la Tabla 7 se muestran los datos y estimaciones que corresponden a partículas más alejadas del centro del flujo. Se puede observar que la velocidad de flujo en la parte externa del abanico es menor con respecto a la velocidad de flujo en la parte central del abanico, lo que significa que la parte externa del abanico tiene una perturbación mayor del medio hacia las partículas y el flujo.

Tabla 7. Datos de entrada y estimación de la velocidad de partículas alejadas del centro del flujo.

<p>Boquilla de 15°</p> <p>Para el caso de la boquilla de 15° del análisis de las imágenes se obtiene que la partícula recorre la distancia en 26.2 cps</p>	
	$F = J/60\ 000 \quad 1.6667E-05$
<p>Tiempo de recorrido</p>	
T=F*cps	$T = 0.00043667 \text{ s}$
V=d/T	$V = 73.3 \text{ m/s}$
<p>Boquilla de 10°</p> <p>Para el caso de la boquilla de 10° del análisis de las imágenes se obtiene que la partícula recorre la distancia en 18.6 cps</p>	
	$F = J/60\ 000 \quad 1.6667E-05$
<p>Tiempo de recorrido</p>	
T=F*cps	$T = 0.00031 \text{ s}$
V=d/T	$V = 103.2 \text{ m/s}$
<p>Boquilla de 5°</p> <p>Para el caso de la boquilla de 5° del análisis de las imágenes se obtiene que la partícula recorre la distancia en 13.6 cps</p>	
	$F = J/60\ 000 \quad 1.6667E-05$
<p>Tiempo de recorrido</p>	
T=F*cps	$T = 0.00022667 \text{ s}$
V=d/T	$V = 141.2 \text{ m/s}$

En las imágenes de la Figura 31 se muestra el seguimiento de la trayectoria de una de las partículas que se mueve a través del plano formado por el láser desde la salida del cañón. El seguimiento que se muestra es cuadro a cuadro para de esta manera tener la trayectoria completa de la partícula con la cual se realizó la estimación de la velocidad. En este caso se utilizó la boquilla con el ángulo de entrada de 15° .





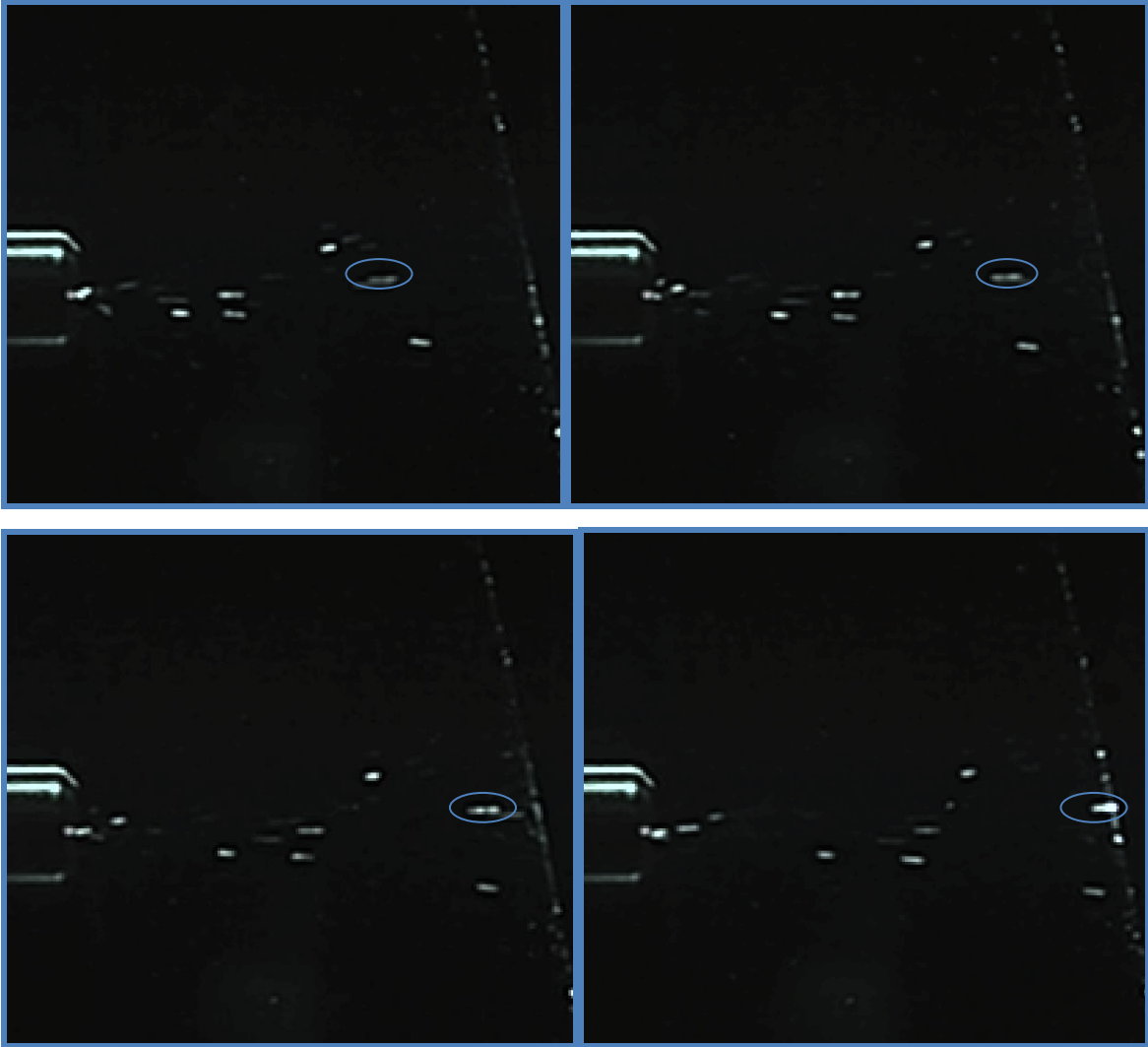
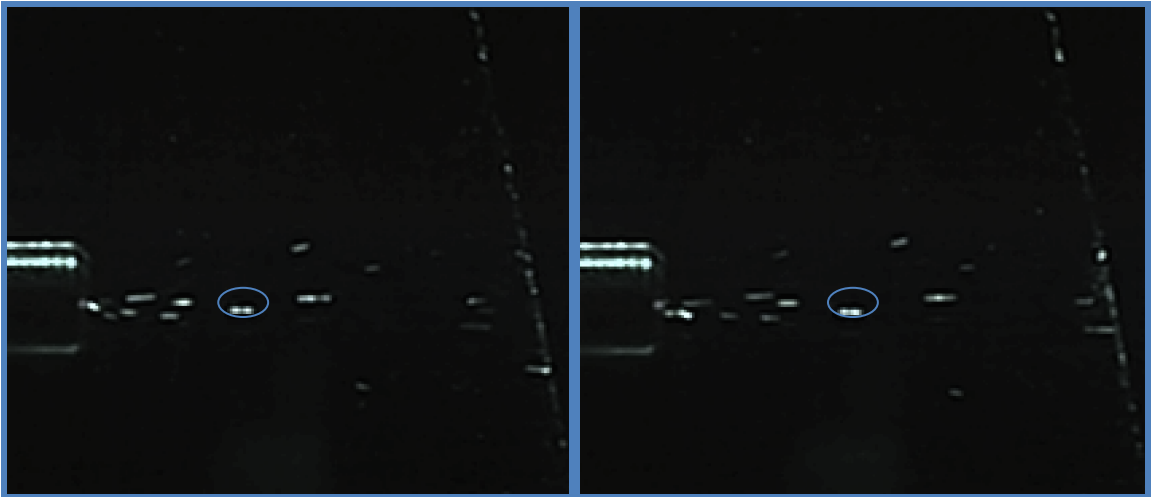
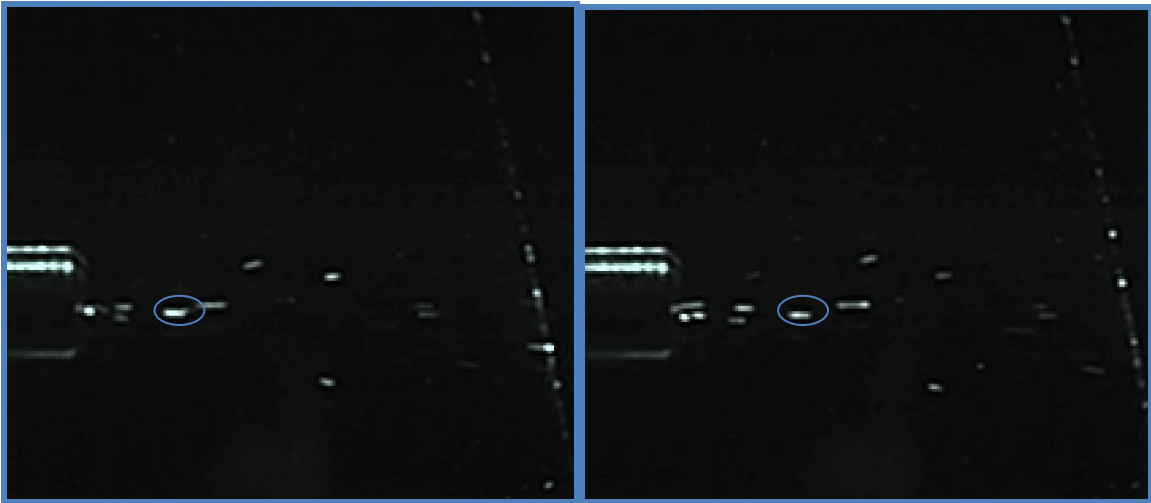
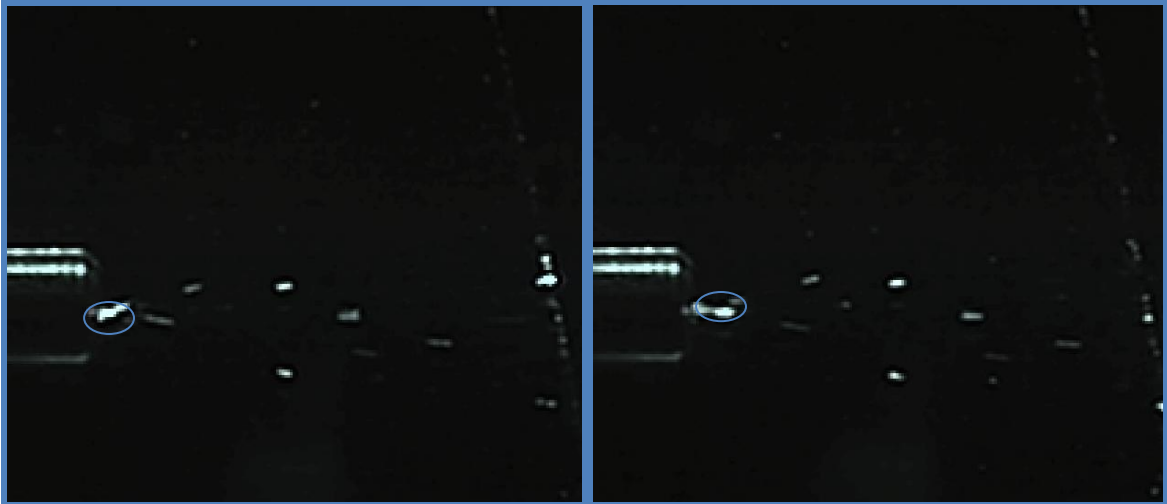
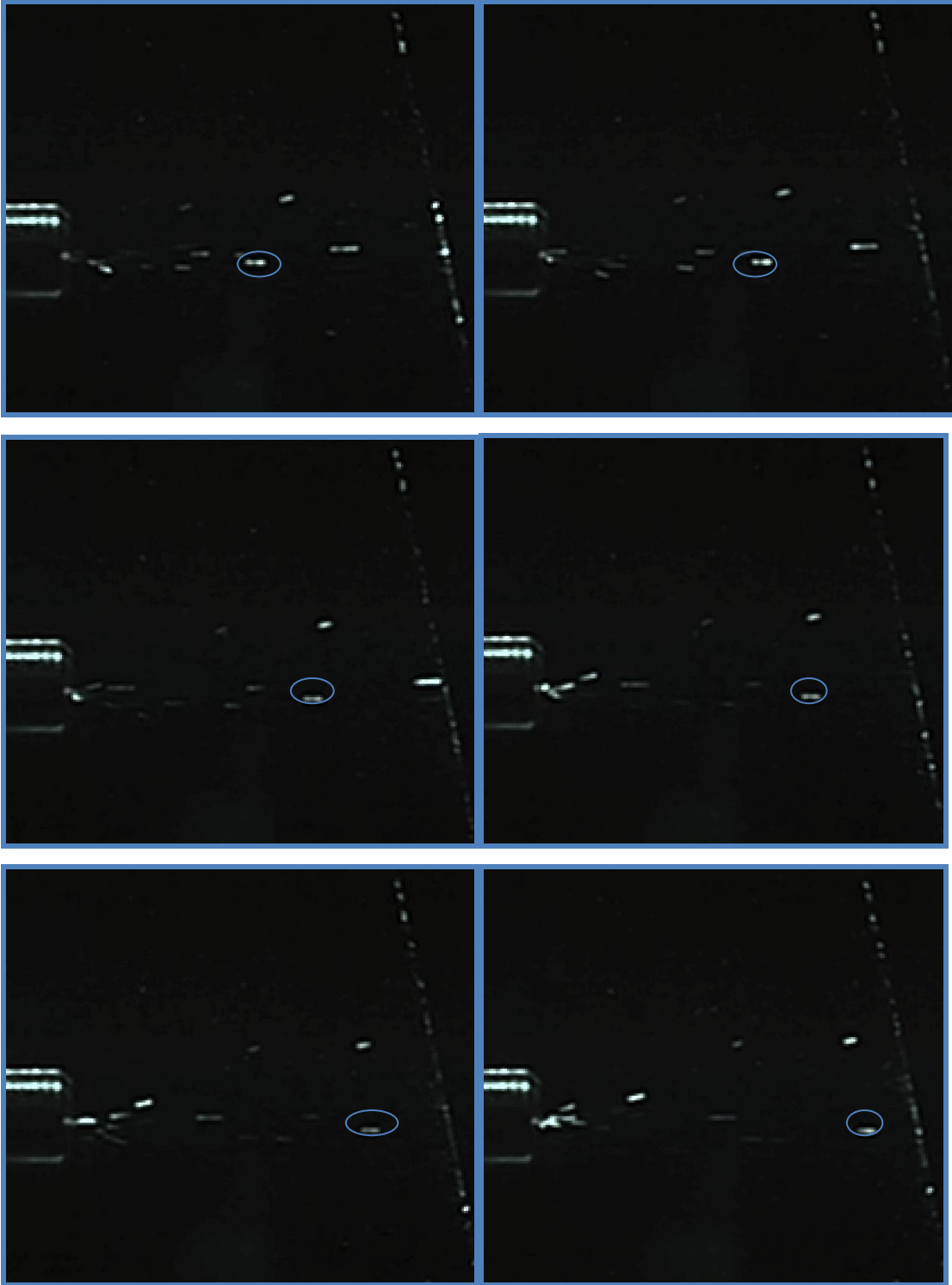


Figura 31. Trayectoria de partícula para la boquilla de 15° .

En la Figura 32 se muestra la trayectoria de una de las partículas usada para estimar la velocidad de las partículas para la boquilla con ángulo de entrada de 10° . Al igual que en la anterior figura se muestra la trayectoria desde la salida del cañón a través del plano formado por el láser.





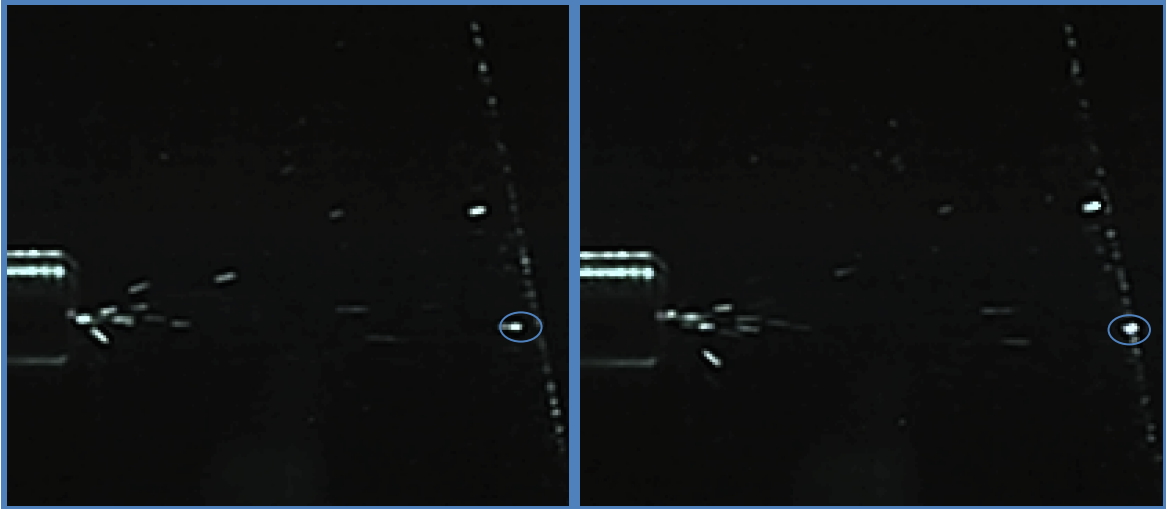
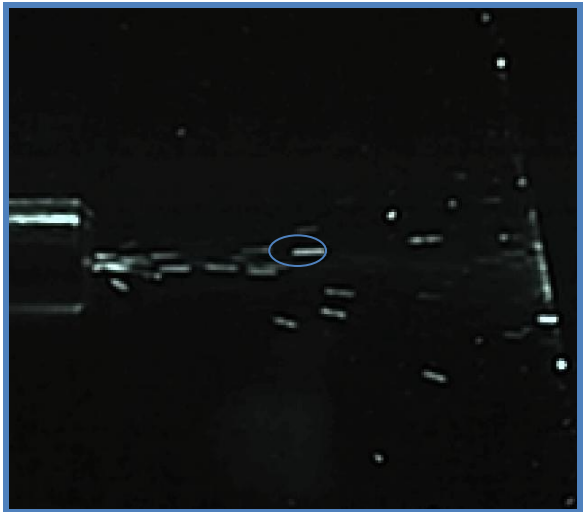
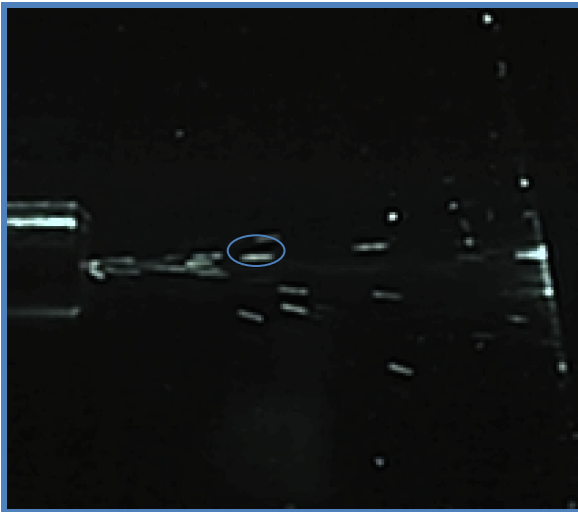
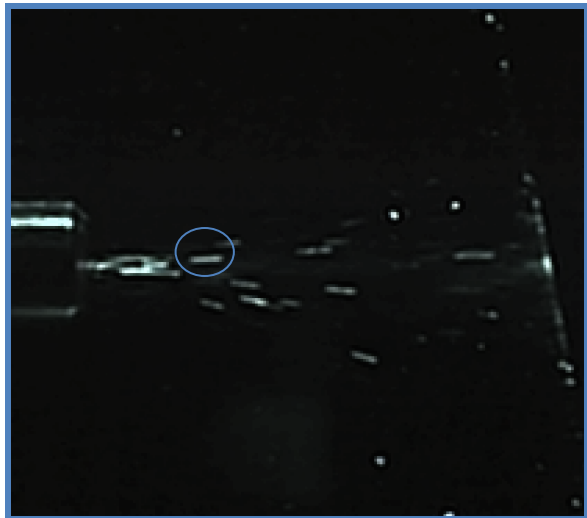
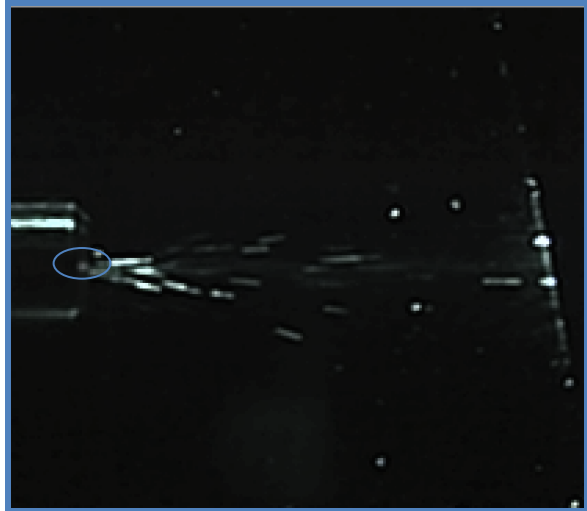
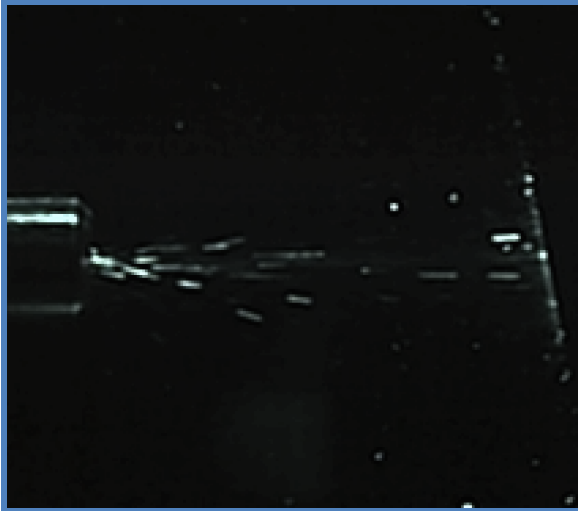


Figura 32. Trayectoria de partícula para la boquilla de 10°.

En la Figura 33 se observa la trayectoria de una partícula, que al igual que la Figura 31 y Figura 32, se usaron para estimar la velocidad de partículas en el flujo. En este caso se observa el flujo para la boquilla de 5°, Figura 33. Puede observarse que aunque las partículas son casi esféricas, en el seguimiento de la trayectoria éstas aparecen en forma alargada debido a la velocidad que alcanzan, Figura 31, Figura 32 y Figura 33.



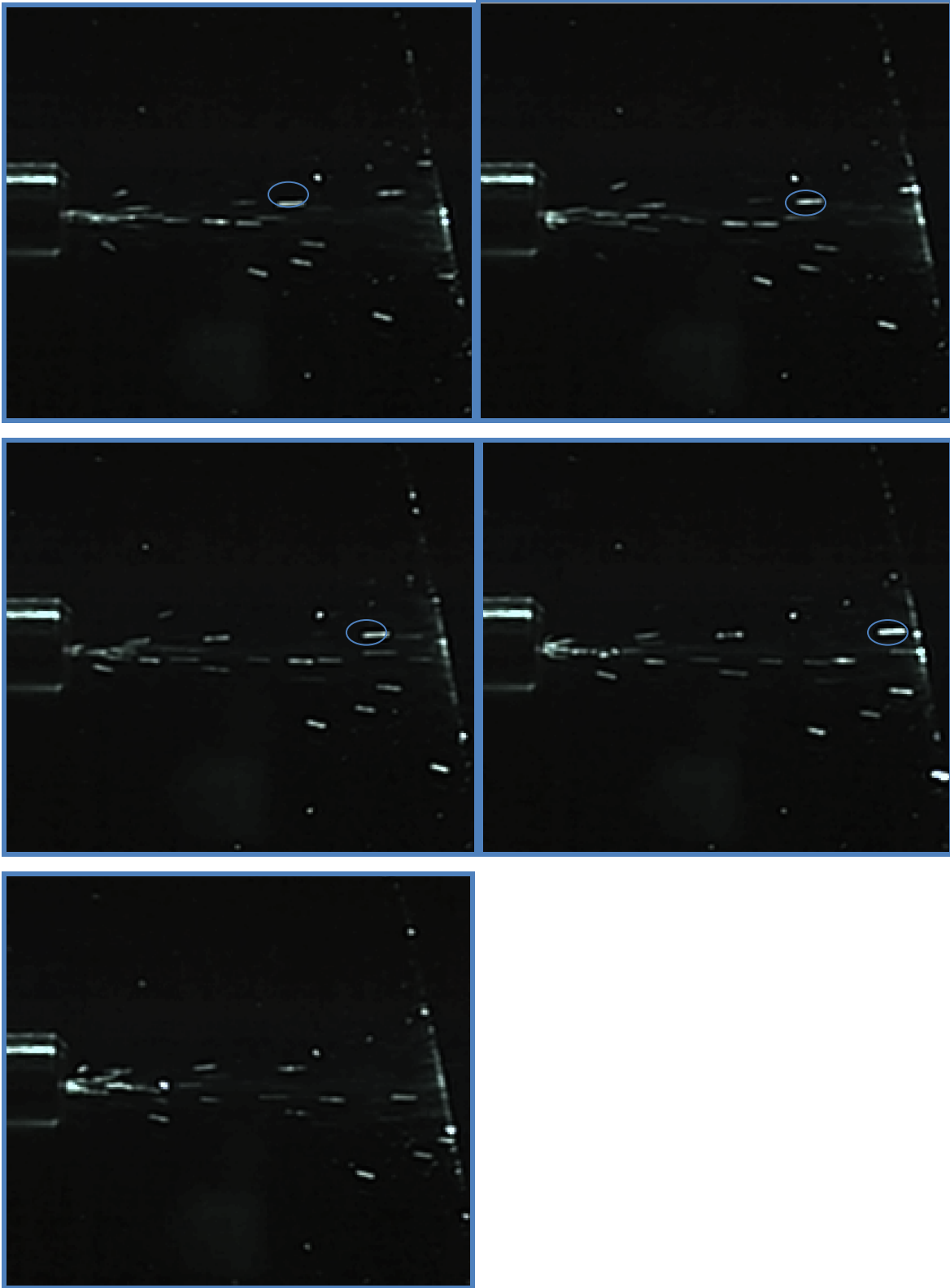


Figura 33. Trayectoria de partícula para la boquilla de 5°.

El proceso mediante el cual se estimó la velocidad de las partículas tiene las siguientes fuentes de error:

- Procesamiento de las imágenes adquiridas por la cámara de alta velocidad. En esta etapa del proceso el error posible proviene del procesamiento que sufre la imagen a partir de que es capturada y puede verse a través del software.
- Reproducción de las imágenes a través del software propio de la cámara. El error de esta fuente viene de la suma de imágenes que se realiza en la reproducción de las imágenes capturadas.
- Tratamiento de las imágenes al ser analizadas a baja velocidad de reproducción mediante el software de la cámara. Esta fuente de error tiene que ver con el procesamiento de las imágenes a reproducirse toma por toma y no ser en tiempo real. Esta fuente de error y las asociadas con el tratamiento de las imágenes son asumidas como no significativas.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Del presente trabajo puede concluirse lo siguiente:

- Se diseñó y construyó un cañón de disparo de partículas, el cual forma parte de un equipo para pruebas de erosión por impacto de partículas sólidas.
- Se diseñaron, analizaron, fabricaron y probaron tres boquillas con ángulos de entrada de 5, 10 y 15°. Éstas forman parte del cañón de disparo del equipo para pruebas de erosión.
- Las dimensiones de la boquilla afectan significativamente el comportamiento del flujo a la salida del cañón.
- Conforme el ángulo a la entrada de la boquilla disminuye la divergencia del abanico del flujo disminuye y la velocidad de las partículas aumenta.
- La velocidad de las partículas que se desplazan en el centro del abanico a la salida del cañón de disparo es mayor que las partículas que se encuentran en la parte exterior del abanico.
- El equipo para pruebas de erosión diseñado y construido, permite variar las condiciones experimentales como presión y caudal de aire, ángulo y distancia de impacto, razón de alimentación de partículas, y velocidad de partícula.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

1. **White** Frank M. Fluid Mechanics, edit. McGraw Hill, fourth edition, year 1997.
2. **Rodríguez** Jorge A., Introducción a la termodinámica, edit. UTN, primera edición, año 2004.
3. **Daily James** W., Dinámica de fluidos, edit. Trillas, tercera edición, año 1985.
4. **Vázquez** Juan Luis, Fundamentos de mecánica de fluidos, edit. Universidad Autónoma de Madrid, Primera Edición, año 2003
5. **Pasinato** Hugo Dario, Fundamentos de mecánica de fluidos, edit. Universidad Tecnológica Nacional, Primera Edición, año 2008.
6. **Fernández** Diez Pedro, Mecánica de fluidos, edit. Universidad de Cantabria, primera edición, año 2003.
7. **Grubelnik** V., Marhl M, Dinámica de fluidos., 2005, Journal Phys, pp 710-714
8. **Mott** Robert L., Mecánica de fluidos, edit. Pearson, sexta edición, año 2006
9. **Mataix** Claudio, Mecánica de fluidos, edit. Castillo, segunda edición, año 1985.
10. **Grillo** López Christian A., Dispersión de partículas sólidas en flujos bifásicos turbulentos de interés industrial, 2005, Ingeniería y Desarrollo, Universidad del Norte, 17: 87-114.
11. **Leber** Laciari Eric, Campos Jané Raimon, Detección y Análisis de Potenciales Tardíos Ventriculares Mediante Mapas Espectro-Temporales, 2007, Quinto Congreso de Cardiología, Federación Argentina de Cardiología.

12. **Alarcón** Roca Guillermo, Método de diferencias finitas en la evaluación de las pérdidas de presión en codos durante el flujo bifásico gas-sólido, 2000, Tecnología Química, Vol. 20, No3.
13. **Rosales** W., Estudio mecánico e hidrodinámico de un reactor de gasificación de lecho fluidizado, 2008, Revista de Ingeniería Mecánica, Vol. 11, No. 1, pp 63-67.
14. **Li** C.H., Influence of diffuser angle on discharge coefficient of sonic nozzles for flow-rate measurements, 2010, Journal flow Measurement and Instrumentation, Vol. 21, pp 531-532.
15. **Cheng** Yi, Inlet and outlet effects on flow patterns in gas-solid risers, 1998, Journal Powder Technology, Vol. 98, pp. 151-156.
16. **Martínez de la calle**, Julian, Flujo externo, año 2008, edit. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Gijón, pp 35-42.
17. **Iriarte** Muñoz Jose Miguel, Velocimetría PIV en tiempo real basada en lógica programable, edit. Universidad Nacional de Cuyo, 2008, Revista la Ingeniería, No. 110, pp. 481-501
18. **Guerrero** Viramontes J. Ascención, Detección de las tres componentes de velocidad en flujos con fibras ópticas usando el efecto doppler, 2004 Encuentro de Investigación en Ingeniería, Vol. 4, pp. 72-80
19. **Cano** Rodas José Ricardo. Medellín, Colombia, 2004, Estudio de la resistencia al desgaste erosivo en seco de materiales de ingeniería, 2004, Revista DYNA, Vol. 7, No 144, pp. 89-99

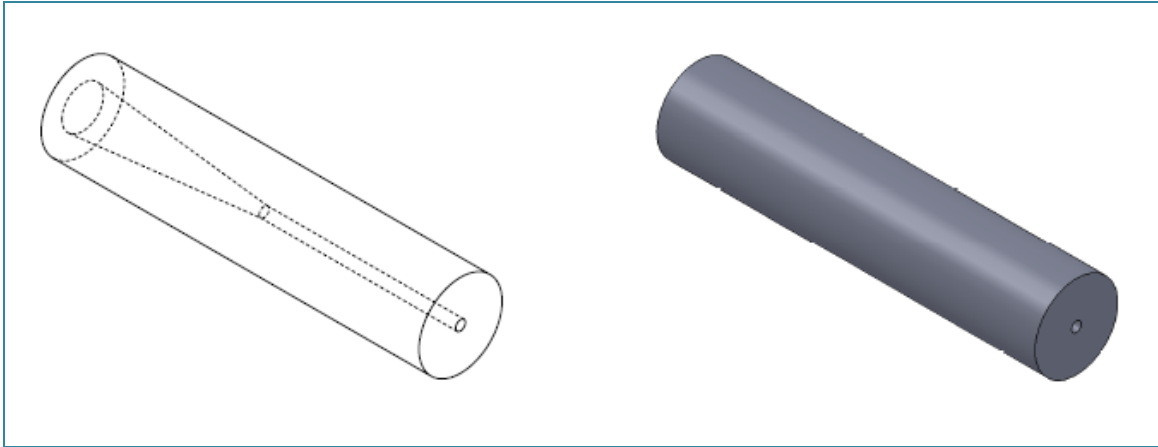
20. **Congote** García Juan Pable. Medellín, Colombia, Efecto de la velocidad y ángulo de impacto en la resistencia a corrosión-erosión de aceros inoxidables recubiertos con Ti, 2004, Revista Facultad de Minas, Vol. 71, pág. 80-95
23. **García** Velázquez Johnny. Perea, Colombia, Construcción de dispositivo para evaluación del desgaste erosivo en seco de materiales, 2004, Revista de la Facultad de Minas, Vol. 71 pág. 49-59
24. **Parra** Elizabeth. Venezuela, Evaluación de recubrimientos delgados por la técnica de cavitación erosión, 2009, Revista Colombiana de Física, Vol. 32, pp. 95-99
25. **Lin**, Win-Ti, journal Flow Measurement and Instrumentation, Performance test of KOH-etched silicon sonic nozzles, 2009, Journal Flow Measurement and Instrumentation, vol. 20, pp. 122-126.
26. **Bhusarapu**, Satisch, Solids flow mapping in a gas–solid riser: Mean holdup and velocity fields, 2006, Journal Powder Technology, Vol. 163, pp. 98-123.
27. **Hawthorn**, H. M., A new Coriolis slurry erosion tester design for improved slurry dynamics, 2003, Journal Wear, Vol. 255, pp. 170-180.
28. **Stevenson**, A. N. J., The influence of nozzle length on the divergence of the erodent particle stream in a gas-blast erosion ring, 1995, Journal Wear, Vol. 21, pp. 531-537.
29. **Wood**, R. J. J., Design a performance of a high velocity air-sand jet impingement erosion facility, 1997, Journal of Wear, Vol. 220, pp. 95-112.

30. **Lin** W. T., Measurement and Instrumentation, Discharge characteristics of small sonic nozzle in the shape of pyramidal convergent and conical divergent, 2011, Journal Flow Measurement and Instrumentation, Vol. 25, pp. 26-31
31. **Treviño** Acevedo, Álvaro Manuel, Tesis de maestría, Desarrollo de metodología para pruebas de erosión, Universidad Autónoma de Nuevo León, año 2004.
32. **Muñoz** Juan Esteban, Universidad de Ingeniería de Antioquia, Revista de la facultad de minas, 1997, Vol. 71, pág. 173-181, Medellín, Colombia
33. **Foster** D J, Livingston W R, J Wells, J Williamson, W H Gibb & D Bailey, Particle Impact Erosion and Abrasion Wear – Predictive Methods and Remedial Measures, year 2004, Publish Mitsui Babcock, Report No. 24, .
34. <http://csmateriales.cucei.udg.mx/laboratorios.php>, año 2011, Universidad de Guadalajara
35. <http://www.cfe.gob.mx>, año 2011, CFE

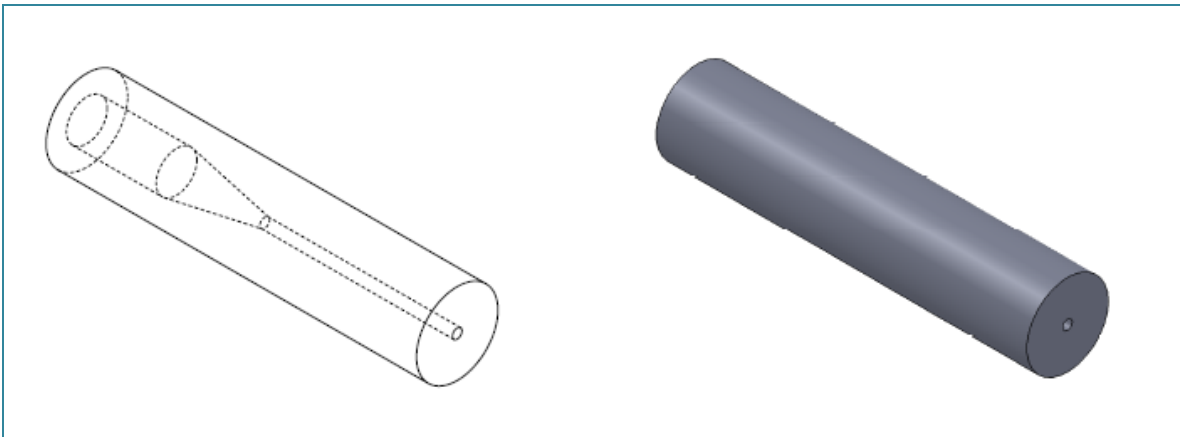
ANEXO

A. BOQUILLAS PRIMERA VERSIÓN

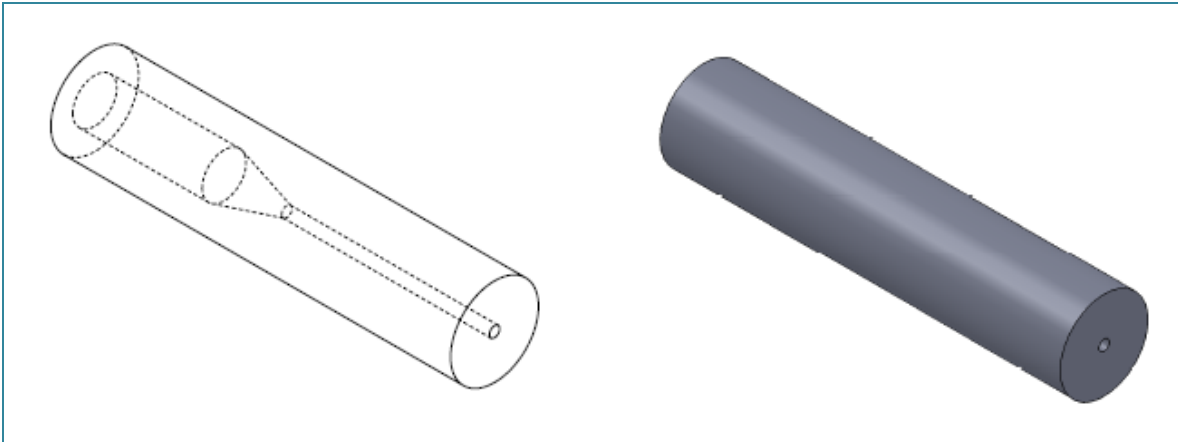
Boquilla 5°



Boquilla 10°

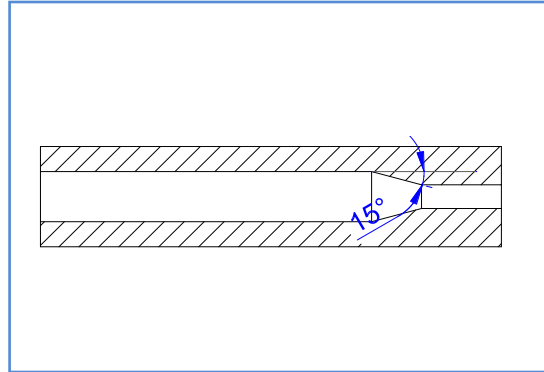
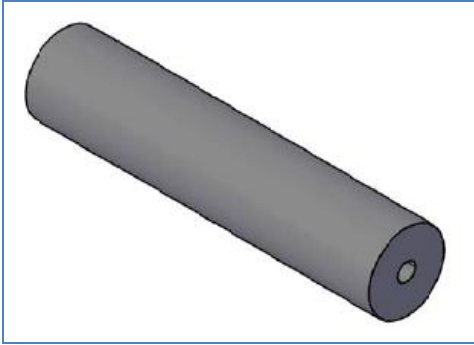


Boquilla 15°

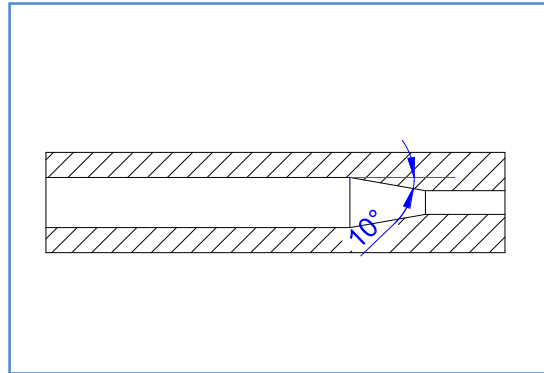
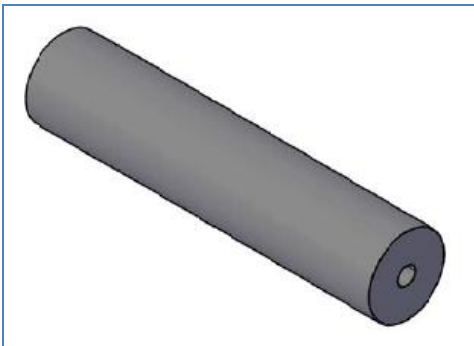


B. BOQUILLAS DEFINITIVAS

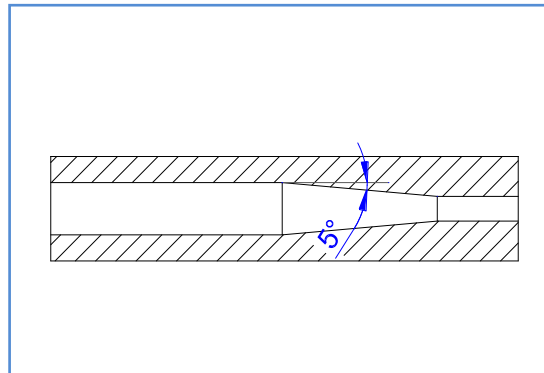
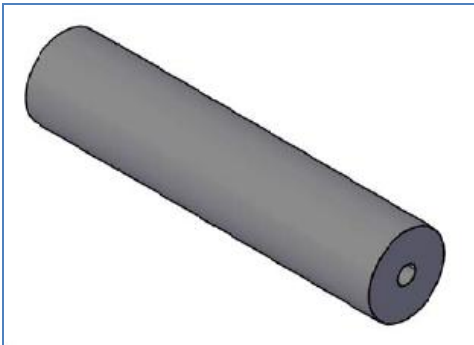
BOQUILLA 15°



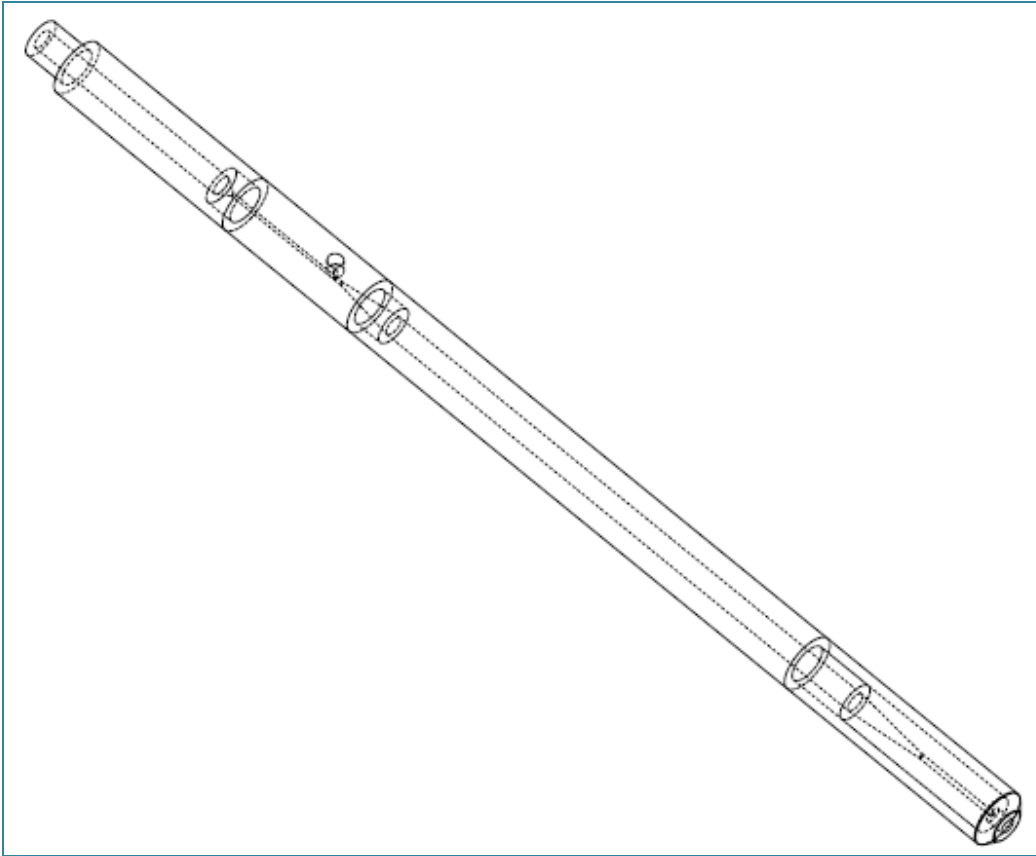
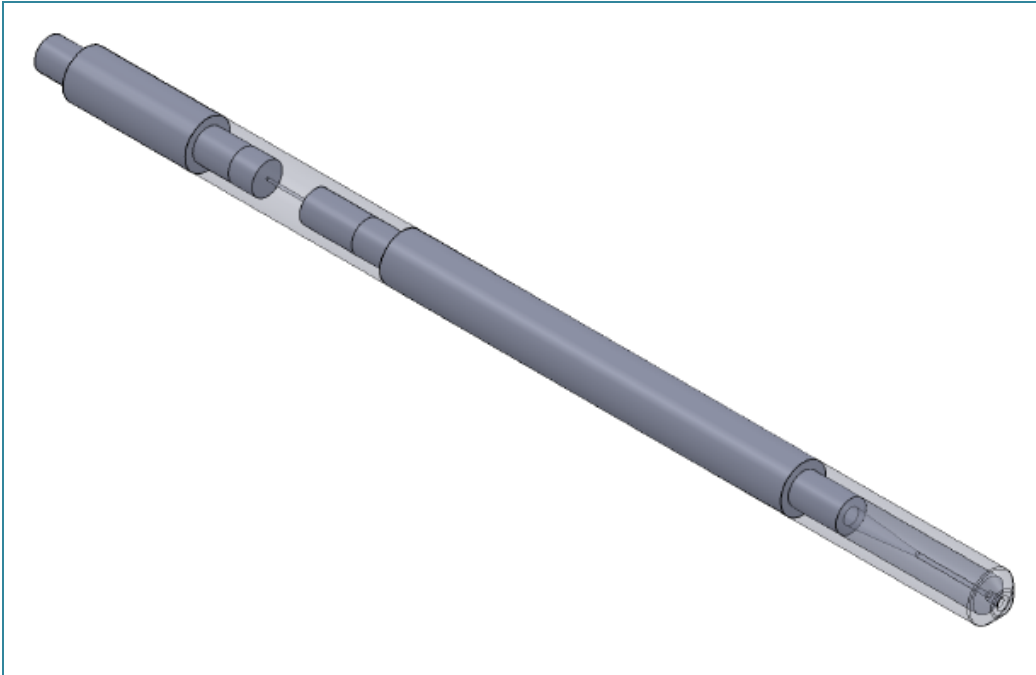
BOQUILLA 10°



BOQUILLA 5°



C. CONFIGURACIÓN DE CAÑÓN DE DISPARO



D. CÁMARA DE IMPACTO

Vista lateral izquierda

Vista lateral derecha

Vista Superior

		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:	NAME	DATE	TITLE: Camara de Impacto SIZE: A DWG. NO. REV SCALE: 1:15 WEIGHT: SHEET 6 OF 6
		DIMENSIONS ARE IN INCHES	DRAWN		
		TOLERANCES:	CHECKED		
		FRACTIONAL ±	ENG APPR.		
		ANGULAR: MACH ± BEND ±	MFG APPR.		
		TWO PLACE DECIMAL ±	G.A.		
		THREE PLACE DECIMAL ±	COMMENTS:		
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:			
		MATERIAL			
		FINISH			
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF DR. OSCAR BARCENAS SANCHEZ. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF DR. OSCAR BARCENAS SANCHEZ IS PROHIBITED.	NEXT ASSY	USED ON			
	APPLICATION	DO NOT SCALE DRAWING			

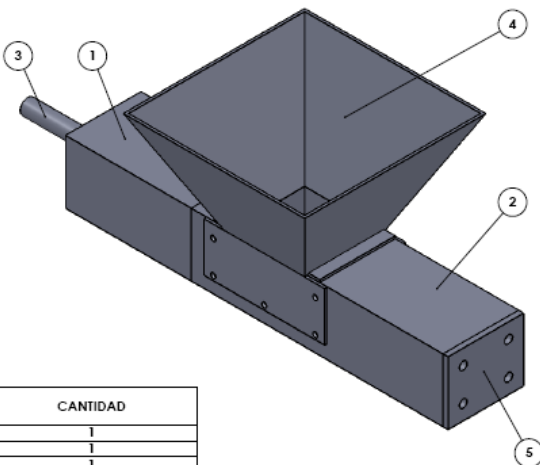
Vista lateral izquierda

Vista lateral derecha

Vista Superior

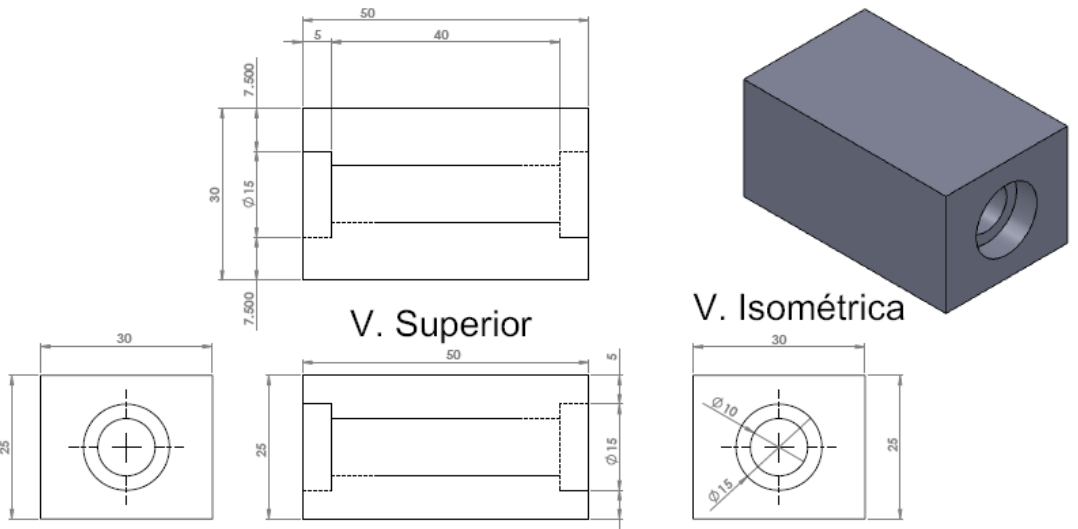
		UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:	NAME	DATE	TITLE: Camara de Impacto SIZE: A DWG. NO. REV SCALE: 1:15 WEIGHT: SHEET 6 OF 6
		DIMENSIONS ARE IN INCHES	DRAWN		
		TOLERANCES:	CHECKED		
		FRACTIONAL ±	ENG APPR.		
		ANGULAR: MACH ± BEND ±	MFG APPR.		
		TWO PLACE DECIMAL ±	G.A.		
		THREE PLACE DECIMAL ±	COMMENTS:		
		INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER:			
		MATERIAL			
		FINISH			
PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF DR. OSCAR BARCENAS SANCHEZ. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF DR. OSCAR BARCENAS SANCHEZ IS PROHIBITED.	NEXT ASSY	USED ON			
	APPLICATION	DO NOT SCALE DRAWING			

E. DOSIFICADOR DE PARTÍCULAS



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Miembro 1	Sujeción del tornillo helicoidal	1
2	Miembro 2	Carcasa	1
3	Tornillo- 6mm		1
4	Tolva A		1
5	TAPA A		1

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE ENTENDEN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TO: LACADO AN: ANILADO			ACABADO	BARRERA Y SENSIBILIDAD VELOC.	NO CAMBIA LA ESCALA	REVISIÓN ESTADO Ensamblaje conceptual
NOMBRE DISEÑO VERB. APROB. FIRM. FECHA	NOMBRE DISEÑO VERB. APROB. FIRM. FECHA	NOMBRE DISEÑO VERB. APROB. FIRM. FECHA	MATERIAL: PREC.	Nº DE DISEÑO Dosificador A	ESCALA 1:1 NCHA 1:1	A3



V. Superior

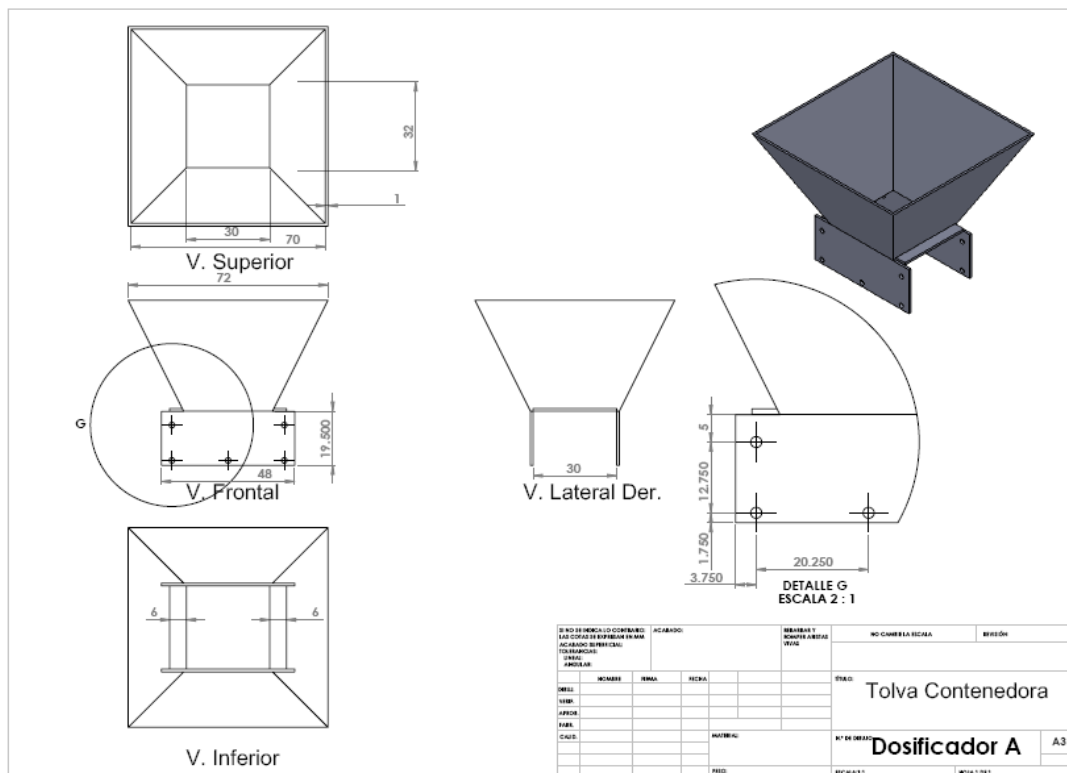
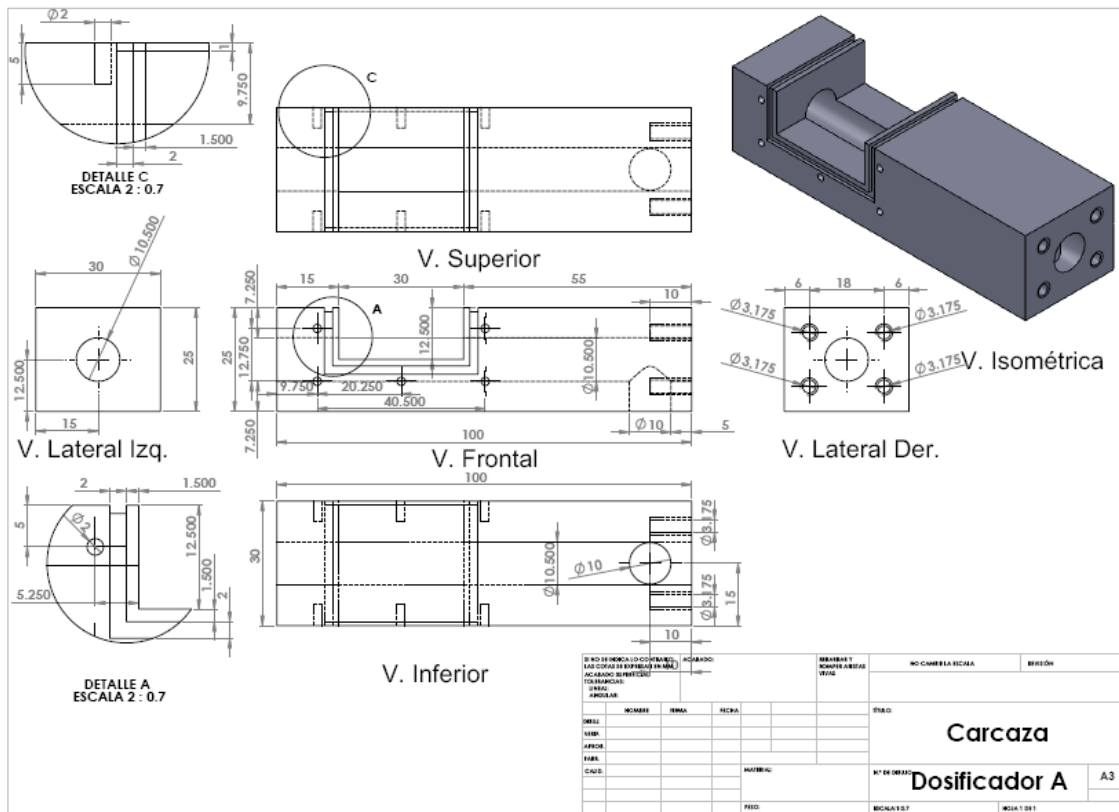
V. Isométrica

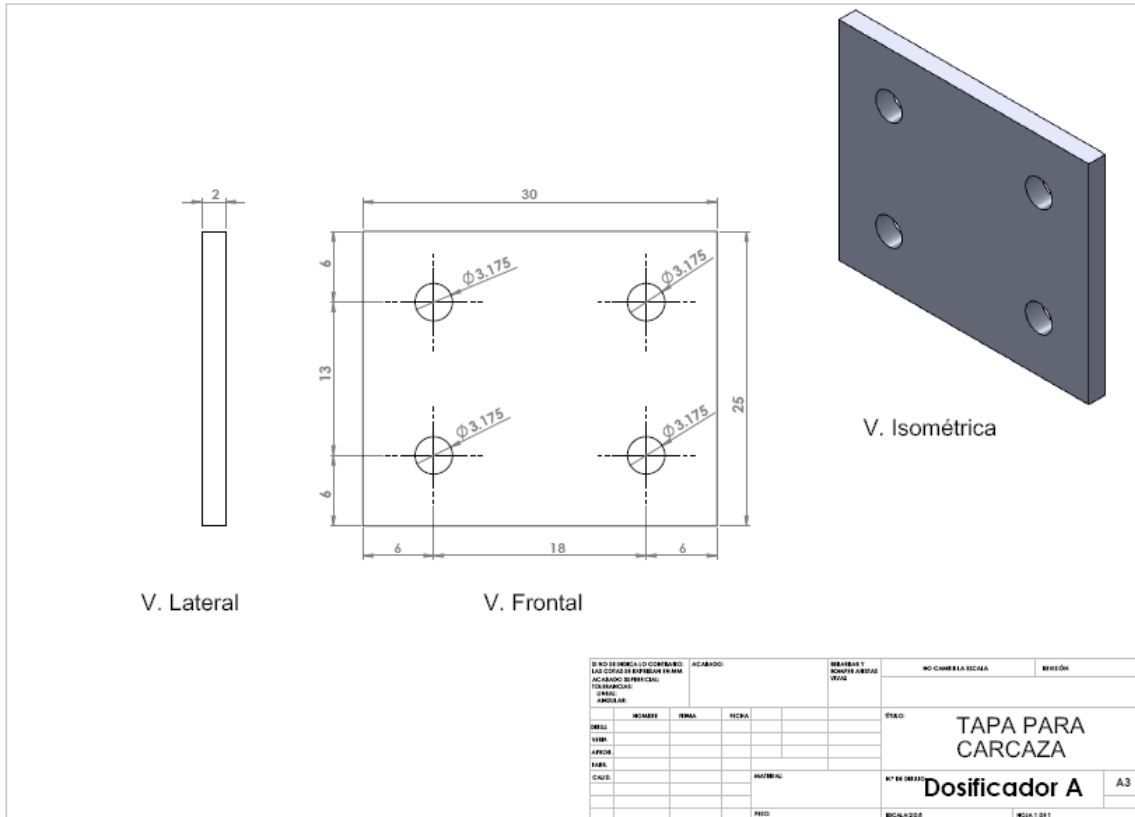
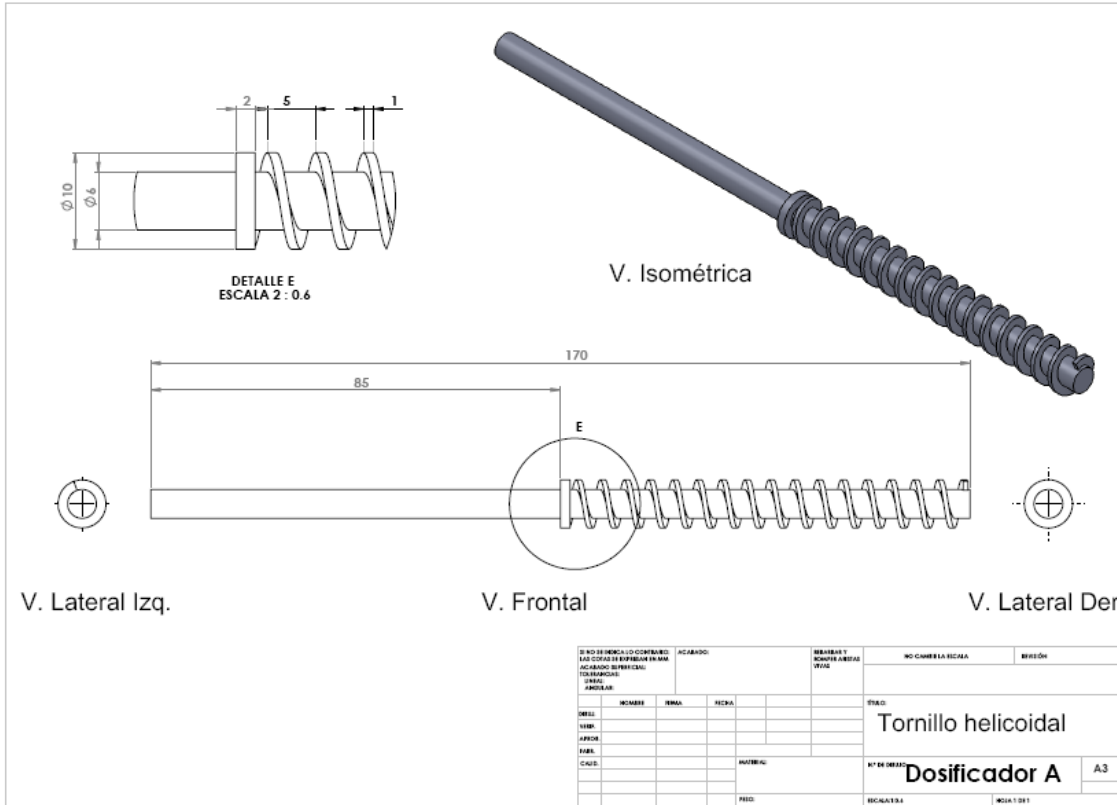
V. Lateral Izq.

V. Frontal

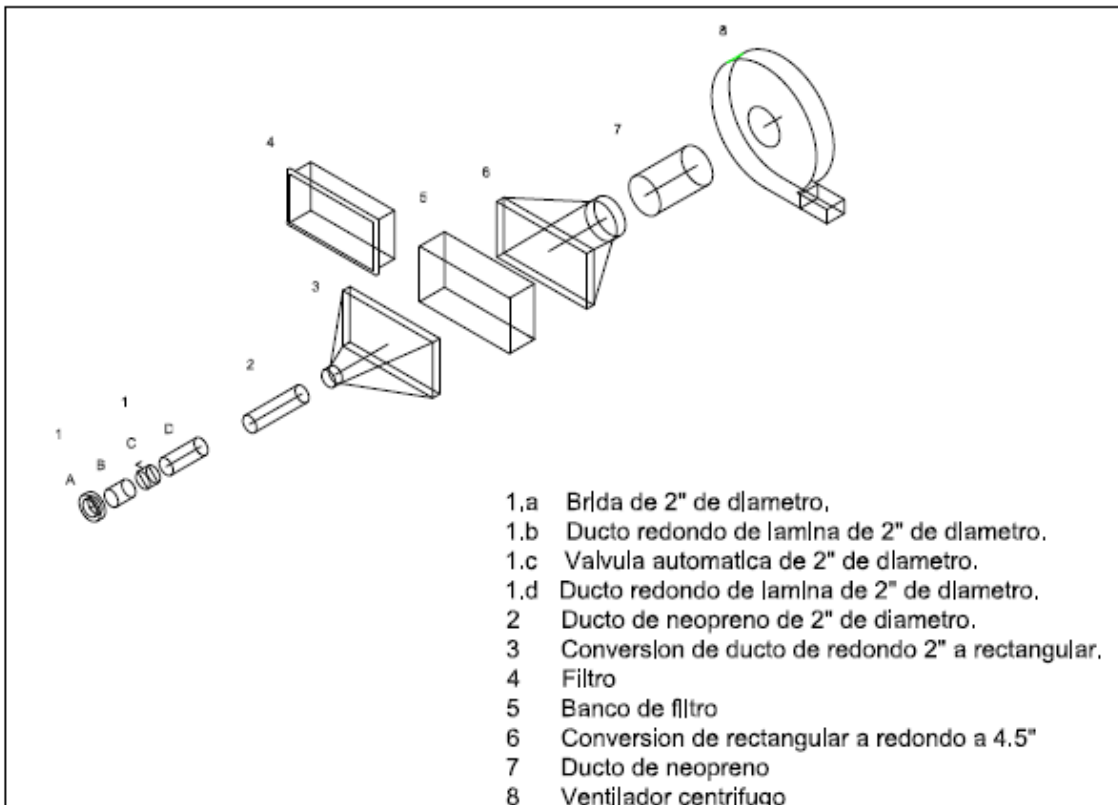
V. Lateral D.

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE ENTENDEN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TO: LACADO AN: ANILADO			ACABADO	BARRERA Y SENSIBILIDAD VELOC.	NO CAMBIA LA ESCALA	REVISIÓN ESTADO Sujeción del tornillo helicoidal
NOMBRE DISEÑO VERB. APROB. FIRM. FECHA	NOMBRE DISEÑO VERB. APROB. FIRM. FECHA	NOMBRE DISEÑO VERB. APROB. FIRM. FECHA	MATERIAL: PREC.	Nº DE DISEÑO Dosificador A	ESCALA 1:1 NCHA 1:1	A3





F. SISTEMA DE EXTRACCIÓN



- 1.a Brda de 2" de diametro.
- 1.b Ducto redondo de lamina de 2" de diametro.
- 1.c Valvula automatica de 2" de diametro.
- 1.d Ducto redondo de lamina de 2" de diametro.
- 2 Ducto de neopreno de 2" de diametro.
- 3 Conversion de ducto de redondo 2" a rectangular.
- 4 Filtro
- 5 Banco de filtro
- 6 Conversion de rectangular a redondo a 4.5"
- 7 Ducto de neopreno
- 8 Ventilador centrifugo

LISTA DE PARTES

- 1.a Brda de 2" de diametro.
- 1.b Ducto redondo de lamina de 2" de diametro.
- 1.c Valvula automatica de 2" de diametro.
- 1.d Ducto redondo de lamina de 2" de diametro.
- 2 Ducto de neopreno de 2" de diametro.
- 3 Conversion de ducto de redondo 2" a rectangular.
- 4 Filtro
- 5 Banco de filtro
- 6 Conversion de rectangular a redondo a 4.5"
- 7 Ducto de neopreno
- 8 Ventilador centrifugo

LISTA DE PARTES

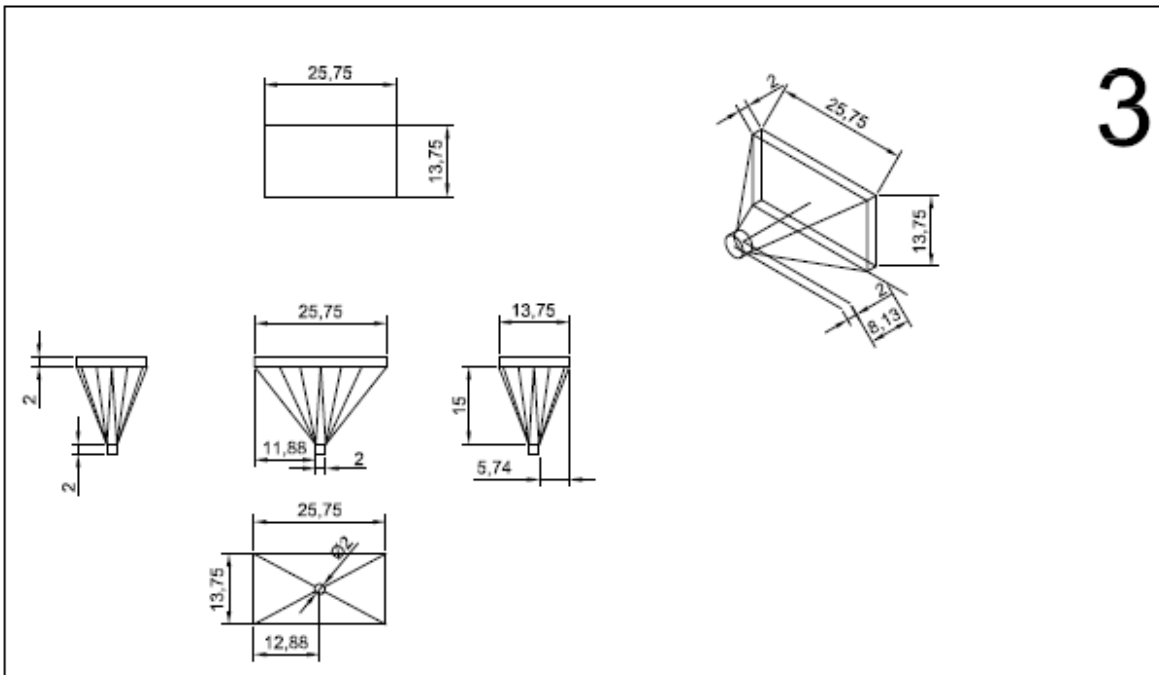
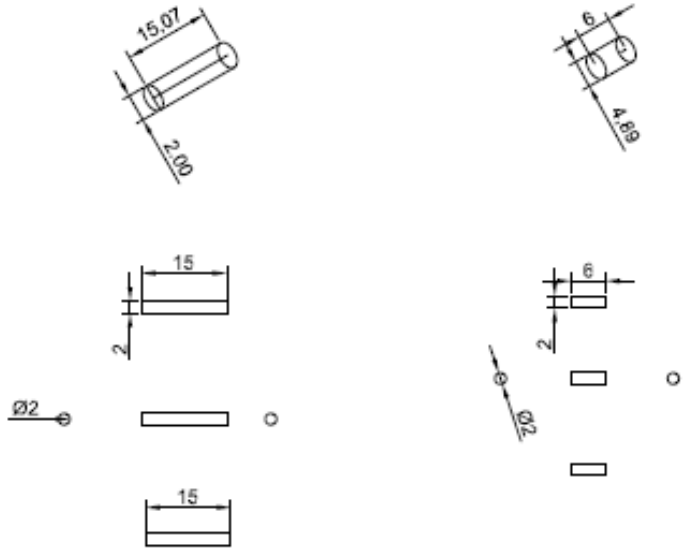
CICATA
 QURETARO

ACOT: IN

FECHA:
 ABRIL 18 DEL 2011

1-D

1-B



3

