



Universidad de San Carlos de Guatemala  
Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería Civil

**MANUAL PARA LOS ENSAYOS DE VISCOSIDAD, CENTROS DE PRESIÓN, LÍNEAS DE CORRIENTE E IMPACTO DE UN CHORRO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS**

**Mario Eduardo Reynoso Revolorio**  
**Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza**

Guatemala, junio de 2010.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**MANUAL PARA LOS ENSAYOS DE VISCOSIDAD, CENTROS DE PRESIÓN, LÍNEAS DE CORRIENTE E IMPACTO DE UN CHORRO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A JUNTA DIRECTIVA DE LA

FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

**MARIO EDUARDO REYNOSO REVOLORIO**

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

**INGENIERO CIVIL**

GUATEMALA, JUNIO DE 2010

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA



**NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA**

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Glenda Patricia García Soria
VOCAL II	Ing. Alba Maritza Guerrero de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortiz de León
VOCAL V	Br. José Alfredo Ortiz Herincx
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

**TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO**

DECANO/A	Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR/A	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
EXAMINADOR/A	Ing. Ronald Estuardo Galindo Cabrera
EXAMINADOR/A	Ing. Pablo Christian De León Rodríguez
SECRETARIO/A	Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

## **HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR**

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

### **MANUAL PARA LOS ENSAYOS DE VISCOSIDAD, CENTROS DE PRESIÓN, LÍNEAS DE CORRIENTE E IMPACTO DE UN CHORRO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS,**

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 11 de mayo de 2007.

Mario Eduardo Reynoso Revolorio

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 24 de Marzo de 2010

Ingeniero

Pedro Antonio Aguilar Polanco

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante Mario Eduardo Reynoso Revoldorio, quien se identifica con carné No. 95-15940, titulado MANUAL PARA LOS ENSAYOS DE VISCOSIDAD, CENTROS DE PRESIÓN, LÍNEAS DE CORRIENTE E IMPACTO DE UN CHORRO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS, después de haber hecho las correcciones necesarias lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

*"ID y Enseñad a Todos"*

Una firma manuscrita en tinta que parece ser la del ingeniero Sandoval Mendoza.

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

**LUIS M. SANDOVAL MENDOZA**  
**INGENIERO CIVIL**  
Colegiado No. 6496

Colegiado No. 6496



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,  
28 de abril de 2010

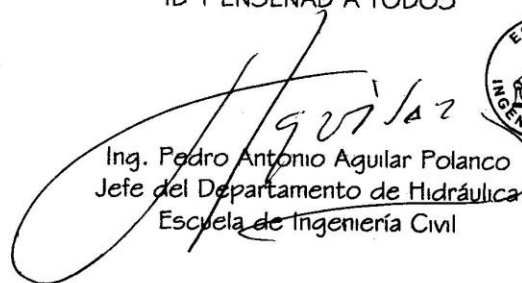
Ingeniero  
Hugo Leonel Montenegro Franco  
Director de la Escuela de Ingeniería Civil  
Facultad de Ingeniería  
Guatemala

Estimado Ingeniero Montenegro.

Atentamente y por este medio, envío a usted, el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante Mario Eduardo Reynoso Revolorio, titulado **MANUAL PARA LOS ENSAYOS DE VISCOSIDAD, CENTROS DE PRESIÓN, LÍNEAS DE CORRIENTE E IMPACTO DE UN CHORRO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS.**

Por lo que, habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos de ley del referido trabajo; y existiendo la **APROBACIÓN DEL MISMO**, por parte del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y habiéndose efectuado todas las *observaciones técnicas*, el suscrito lo da por **APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

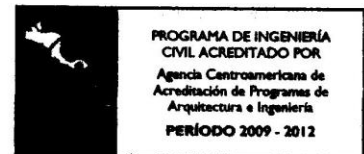
ID Y ENSEÑAD A TODOS

  
Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco  
Jefe del Departamento de Hidráulica  
Escuela de Ingeniería Civil



FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO  
DE  
HIDRAULICA  
USAC

Más de **130** Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
www.ingenieria-usac.edu.gt



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Mario Eduardo Reynoso Revolorio, titulado **MANUAL PARA LOS ENSAYOS DE VISCOSIDAD, CENTROS DE PRESIÓN, LÍNEAS DE CORRIENTE E IMPACTO DE UN CHORRO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS**, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.

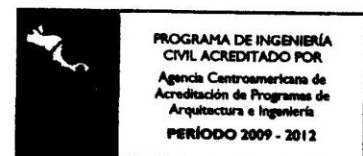
  
Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco

  
UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS  
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL  
DIRECTOR  
FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, junio de 2010

/bbdeb.

Más de **130** Años de Trabajo Académico y Mejora Continua





El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al trabajo de graduación titulado: **MANUAL PARA LOS ENSAYOS DE VISCOSIDAD, CENTROS DE PRESIÓN, LÍNEAS DE CORRIENTE E IMPACTO DE UN CHORRO DEL LABORATORIO DE MECÁNICA DE FLUIDOS**, presentado por el estudiante universitario **Mario Eduardo Reynoso Revolorio**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos  
DECANO

Guatemala, junio de 2010



/gdech



## **AGRADECIMIENTOS A:**

Dios Todopoderoso, por su infinita misericordia, perdón, fidelidad e incondicional amor.

Mi madre, porque sea este logro la satisfacción de sus anhelos, esfuerzos y sacrificios y por ser ella la mujer que me dio la vida.

Mi esposa, por su amor y su apoyo incondicional en la realización de este proyecto, gracias mi amor, te amo.

El Ingeniero Luis Sandoval Mendoza, por su instrucción que fue la base fundamental para la realización de este trabajo de graduación. En él reconozco a un excelente profesional, comprometido con la Academia y con sus principios.

El Ingeniero Carlos Salvador Gordillo, quien con su basta experiencia coadyuvó para que este trabajo se realizara. Siempre le estaré agradecido.

La Escuela de Ingeniería Civil, de la grande entre las del mundo, Universidad de San Carlos de Guatemala, al laboratorio de Mecánica de Fluidos, por albergarme durante todo este tiempo, donde he vivido las mejores experiencias a lo largo de mi vida, me empeñaré en ser un digno egresado de esta casa de estudios.

Mis amigos, sincero agradecimiento por su apoyo.

## **ACTO QUE DEDICO A:**

Mi madre, porque con su lección de vida sembró en mí principios que han sido la base fundamental de mi camino. Sirva este logro para recompensar sus múltiples sacrificios.

Mis abuelitos Coronel Rigoberto Revolorio (q.e.p.d.) y Consuelo Díaz Arriola, porque siempre me dieron cariño, amor y buenos consejos.

Mi hermano, porque con este logro ambos hemos cumplido un sueño que compartimos.

Mis tías con respeto y cariño.

Mis primos Luis, Riva, Harold, Susy y Ale, porque siempre nos ha caracterizado el profundo amor y solidaridad.

Todos mis sobrinos, porque con su inocencia y alegría, me han regalado días muy felices.

La Tricentenario Universidad de San Carlos de Guatemala

# ÍNDICE GENERAL

<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES</b>	<b>V</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS</b>	<b>IX</b>
<b>GLOSARIO</b>	<b>XI</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>XIII</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>XV</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>XVII</b>
<b>1. TEORÍA BÁSICA</b>	<b>1</b>
1.1 Propiedades básicas de los fluidos	1
1.1.1 Densidad	2
1.1.2 Peso específico	2
1.2 Viscosidad	4
1.2.1 Viscosidad dinámica y cinemática	4
1.2.2 Métodos para determinar la viscosidad	6
1.2.3 Otros sistemas de medidas de viscosidad	10
1.3 Tensión superficial y capilaridad	10
1.4 Presión hidrostática	15
1.4.1 Definición de presión hidrostática (manométrica) y absoluta	15
1.4.2 Unidades de medidas de presión	18
1.4.3 Presión expresada en columna de líquido	19
1.5 Fuerzas hidrostáticas sobre superficies sumergidas	20
1.6 Centros de presión	25

<b>2. CINEMÁTICA DE LOS FLUIDOS</b>	<b>27</b>
2.1 Definición del flujo de fluidos	27
2.2 Tipos de flujo	28
2.3 Líneas de corriente	33
2.4 Tubos y redes de corriente	34
2.5 Ecuación de continuidad	35
2.6 Dinámica de los fluidos	38
2.6.1 Ecuación de Bernoulli	38
2.6.2 Fuerzas desarrolladas por fluidos en movimiento	45
2.6.3 Conservación de la cantidad de movimiento	48
<b>3. MÉTODOS EXPERIMENTALES</b>	<b>53</b>
3.1 Métodos para determinar la viscosidad	53
3.1.1 Fórmula del esfuerzo cortante-deformación	53
3.1.2 Grados SAE	57
3.1.3 Grados Saybolt	60
3.1.4 Caída de bola	62
3.2 Métodos para determinación de fuerza hidrostáticas	64
3.2.1 Fuerza hidrostática sobre superficies planas inclinadas	68
3.2.2 Fuerza hidrostática sobre superficies curvas	70
3.3 Métodos para determinar fuerzas desarrolladas por fluidos en movimiento	75
3.3.1 Fuerzas en codos	75
3.3.2 Fuerzas en alabes fijos	78
3.3.3 Fuerzas en alabes móviles	81
<b>4. PRÁCTICAS DE LABORATORIO</b>	<b>85</b>
4.1 Fabricación y reconstrucción de los equipos para los ensayos de viscosidad, centros de presión, líneas de corriente	85

e impacto de un chorro	
4.1.1	Equipo para medir la viscosidad de un fluido (Viscosímetro) 85
4.1.2	Equipo para determinar la fuerza hidrostática y el centro de presión de un fluido sobre una superficie plana sumergida 88
4.1.3	Equipo para estudiar el comportamiento de las líneas de corriente a través de una figura 90
4.1.4	Equipo para determinar la fuerza producida por el Impacto de un chorro 93
4.2	Ensayo I. Determinación de la viscosidad de un fluido 96
4.2.1	Objetivos 96
4.2.2	Procedimiento para realizar el ensayo 96
4.2.3	Cálculos 98
4.3	Ensayo II. Determinación de la fuerza hidrostática y centro de presión de un fluido sobre una superficie plana sumergida 102
4.3.1	Objetivos 102
4.3.2	Procedimiento para realizar el ensayo 102
4.3.3	Cálculos 104
4.4	Ensayo III. Estudio del comportamiento de la líneas de flujo a través de una figura 111
4.4.1	Objetivos 111
4.4.2	Procedimiento para realizar el ensayo 111
4.4.3	Cálculos 112
4.4.4	Gráficas 119
4.5	Ensayo IV. Determinación de la fuerza producida por impacto de un chorro 120
4.5.1	Objetivos 120
4.5.2	Procedimiento para realizar el ensayo 123

4.5.3	Cálculos	126
4.5.4	Gráficas	129
<b>CONCLUSIONES</b>		<b>131</b>
<b>RECOMENDACIONES</b>		<b>133</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		<b>135</b>

# ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

## FIGURAS

1	Fluido comprendido entre dos placas paralelas de las cuales la inferior es fija	8
2	Fuerzas de cohesión molecular en un líquido	12
3	Medición de la tensión superficial	13
4	Fenómenos debido a la tensión superficial	14
5	Lectura de manómetros con menisco	15
6	Manómetro sencillo de mercurio	17
7	Fórmula de la presión	20
8	Cálculo de la fuerza total debido a la presión de un fluido sobre una superficie plana $A$ y de su punto de aplicación llamada centro de presión $C$	21
9	Presión hidrostática $F_p$ sobre una superficie curva cilíndrica sumergida	24
10	El vaciado de un depósito por orificio de fondo es un fenómeno de régimen no permanente	29
11	Flujo en un canal. En los tramos $AB$ y $CD$ la corriente es uniforme y no uniforme en el tramo $BC$	30
12	Flujo laminar en una tubería circular	31
13	Corriente de tinta en un flujo laminar	32
14	El flujo turbulento es un movimiento desordenado: (a) Segmentos de trayectorias de diversas partículas en un mismo espacio de tiempo; (b) Trayectoria de una sola partícula	32
15	El tubo de corriente de la figura puede ser sólido (tubería, canal) o formado por una superficie imaginaria que los	33

separa del fluido adyacente. La línea de corriente y la trayectoria de una partícula coinciden en régimen permanente

16	Líneas de corriente en torno a un perfil de ala	34
17	Tubo de corriente e hilo de corriente	35
18	Parte de un sistema de distribución de fluidos	36
19	Elemento de fluido en un conducto	38
20	Energía de flujo	40
21	Elementos de fluido utilizados en la ecuación de Bernoulli	42
22	Cabeza de presión, cabeza de elevación, cabeza de velocidad y cabeza total	44
23	Deducción del teorema de impulso	49
24	Deformación resultante de la aplicación de una fuerza cortante constante	54
25	Diagrama reológico	56
26	(a) Aparato para recolectar fluido, (b) Viscosímetro universal de Saybolt, (c) botella de 60ml para colectar la muestra de Saybolt	61
27	Viscosímetro de caída de bola	63
28	Diagrama de cuerpo libre de la bola de un viscosímetro de caída de bola	63
29	Fuerza sobre un área plana sumergida	66
30	Desarrollo del procedimiento general para obtener las fuerzas sobre áreas planas sumergidas	69
31	Tanque con una superficie curva que contiene un fluido estático	71
32	Diagrama de cuerpo libre del volumen de fluido que se encuentra por encima de la superficie curva	72
33	Codo de tubería	75
34	Diagrama de fuerzas del fluido en el codo	76
35	Chorro libre que incide sobre un alabe liso y fijo	79



36	Chorro bidimensional que incide sobre una superficie plana, inclinada y fija	81
37	(a) alabe en movimiento; (b) flujo en alabe visto como problema a régimen permanente por superposición de la velocidad $u$ a la izquierda; (c) diagrama vectorial polar	83
38	Viscosímetro de caída de bola	87
39	Equipo para determinar la fuerza hidrostática y el centro de presión de un fluido sobre una superficie plana sumergida	89
40	Equipo para estudiar el comportamiento de líneas de corriente a través de una figura	91
41	Equipo para determinar la fuerza producida por el impacto de un chorro	95
42	Esquema de cuadrante hidráulico	103
43	Esquema de compuerta vertical totalmente sumergida	107
44	Líneas de corriente alrededor de una figura cuadrada	113
45	Diagrama de líneas de corriente a través de una figura circular	114
46	Gráfico de líneas alrededor de una figura circular	115
47	Diagrama de líneas de corriente de una figura compuesta	115
48	Gráfico de líneas de corriente alrededor de una figura compuesta	116
49	Diagrama de líneas de corriente en torno a un perfil de ala	117
50	<i>Líneas de corriente</i> en torno a un perfil de ala. Entre dos líneas de corriente consecutivas circula el mismo caudal $\Delta Q$ . La velocidad es mayor donde las líneas de corriente se estrechan	118
51	Diagrama de líneas de corriente alrededor de un triángulo	118
52	Trayectoria de línea de corriente	119
53	Trayectoria y ecuación de línea de corriente	119
54	Impacto de chorro en una placa plana	121

55	Impacto de chorro en una placa semiesférica	121
56	Diagrama de velocidades de la desviación del flujo al impactar en una placa plana	122
57	Diagrama de fuerzas que actúan una placa plana	124
58	Gráfica de caudal contra fuerza de una placa plana	129
59	Gráfica de caudal contra fuerza de una placa semiesférica	129
60	Gráfica de fuerza experimental contra caudal de una placa plana y semiesférica	130

### **TABLAS**

I	Densidad y peso específico del agua	3
II	Densidad, viscosidad dinámica y cinemática del agua en función de la temperatura	5
III	Grados de viscosidad SAE de aceites para motor	57
IV	Grados de viscosidad SAE para lubricantes de transmisiones de eje y manuales	59
V	Recolección de datos de una superficie parcialmente sumergida vertical	104
VI	Recolección de datos de una superficie totalmente sumergida vertical	108
VII	Resultados de una superficie parcialmente sumergida vertical	110
VIII	Resultados de una superficie totalmente sumergida vertical	111
IX	Datos de coordenadas de una línea de corriente a través de una figura cuadrada	114
X	Recolección de tiempos placa plana	125
XI	Recolección de tiempos placa semiesférica	125
XII	Resultados del ensayo a una placa plana	128
XIII	Resultados del ensayo a una placa semiesférica	128

## LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\rho$	Densidad
$m$	Masa
$Vol$	Volumen
$W$	Peso
$\gamma$	Peso específico
$N$	Newtons
$SI$	Sistema internacional de medidas
$m^3$	Metros cúbicos
$g$	Gravedad
$^{\circ}C$	Grados Celsius
$kg/m^3$	Kilogramos por metro cúbico
$N/m^3$	Newtons por metro cúbico
$\mu$	Viscosidad
$F$	Fuerza
$A$	Área
$V_0$	Velocidad inicial
$cP$	Centipoise
$s$	Segundos
$cm$	Centímetros
$s$	Tensión superficial
$l$	Longitud
$Pa$	Pascales
$Hg$	Mercurio
$P$	Presión
$h$	Altura

$C$	Centro de presión
$G$	Centro de gravedad
$Z$	Altura geodésica
$\int$	Integral
$Q$	Caudal
$D$	Diámetro
$r$	Radio
$E$	Energía
$t$	Tiempo
$\theta$	Ángulo
$I$	Inercia
$R$	Resultante
$L$	Litros
$v_{lim}$	Velocidad límite
$\emptyset$	Diámetro
$\nu_c$	Viscosidad cinemática
$gr$	Gramos
$M_R$	Momento real
$M_T$	Momento teórico
$h_{cg}$	Altura del centro de gravedad
$y_{cp-exp}$	Altura del centro de presión experimental
$y_{cp-teor}$	Altura del centro de presión teórico
$mm$	Milímetros
$\%$	Porcentaje
$V_f$	Velocidad final

## GLOSARIO

<b>Adyacente</b>	Situado en la inmediación o proximidad de algo.
<b>Álabe</b>	Paleta de rueda hidráulica.
<b>ASTM</b>	American Society for Testing Materials.
<b>Capilaridad</b>	Fenómeno por el cual la superficie de un líquido en contacto con un sólido se eleva o deprime según aquel moje o no a éste.
<b>Caudal másico</b>	Masa de fluido que circula en un conducto por unidad de tiempo.
<b>Coaxial</b>	Figura o cuerpo, compuesto de diferentes partes cilíndricas, que tienen común su eje de simetría.
<b>Cohesión</b>	Fuerza de atracción que mantiene unidas las partículas.
<b>Compresible</b>	Que se puede comprimir.
<b>Diagrama</b>	Representación gráfica que sirve para esquematizar alguna situación o estado en particular.
<b>Fiel de balanza</b>	Es el indicador que marca cuanto pesa el objeto que se está midiendo.

<b>Fluidos no miscibles</b>	Fluidos que no pueden mezclarse.
<b>Gradiente</b>	Razón entre la variación del valor de una magnitud en dos puntos próximos y la distancia que los separa.
<b>Incompresible</b>	Que no se puede comprimir.
<b>Infinitesimal</b>	Perteneciente o relativo a las cantidades infinitamente pequeñas.
<b>Manómetro</b>	Instrumento utilizado para medir presiones.
<b>Menisco</b>	Superficie libre, cóncava o convexa, del líquido contenido en un tubo estrecho. El menisco es cóncavo si el líquido moja las paredes del tubo, y convexo si no las moja.
<b>Número de Reynolds</b>	Magnitud de un número adimensional que sirve para determinar si un flujo es laminar o turbulento.
<b>Pivote</b>	Extremo cilíndrico o puntiagudo de una pieza, donde se apoya o inserta otra, bien con carácter fijo o bien de manera que una de ellas pueda girar u oscilar con facilidad respecto de la otra.
<b>Probeta</b>	Tubo de cristal, con pie o sin él, cerrado por un extremo y destinado a contener líquidos o gases.
<b>Tobera</b>	Abertura tubular, de forma cónica, por donde se expulsan fluidos.

## RESUMEN

El presente trabajo es un manual con toda la información necesaria para la realización de los ensayos para determinar la viscosidad de un fluido, determinar centro de presión en una superficie plana sumergida, visualizar las líneas de flujo a través de objetos y determinación de la fuerza producida por el impacto de un chorro. Todos estos son fenómenos vistos en el curso de Mecánica de Fluidos.

El primer capítulo contiene las definiciones de los fluidos y sus propiedades tales como la densidad, peso específico, viscosidad, tensión superficial, definición de presión hidrostática, medidas de presión, fuerza hidrostática sobre superficies sumergidas y centro de presiones.

En el capítulo dos se presentan los fundamentos del flujo de fluidos, clasificación de los tipos de flujos, su comportamiento, la ecuación de continuidad, la ecuación de la conservación de la energía o ecuación de Bernoulli y sus componentes así como las fuerzas desarrolladas por fluidos en movimiento y la conservación de la cantidad de movimiento.

El capítulo tres contiene la descripción de uno de los métodos para determinar la viscosidad de un fluido que es el “método de caída de bola”, los métodos para determinar fuerzas hidrostáticas que actúan en superficies planas y superficies curvas sumergidas y métodos para determinar fuerzas desarrolladas por los fluidos en movimiento a través de codos, álabes fijos y móviles.

El capítulo cuatro contiene la descripción de los equipos para realizar los ensayos propuestos, contiene también los instructivos en los que se detallan el procedimiento para realizar cada uno de los ensayos así como la forma de procesar los datos para obtener los resultados esperados.



## OBJETIVOS

### **General:**

Implementar nuevas prácticas para el laboratorio de Mecánica de Fluidos.

### **Específicos:**

1. Restaurar los equipos para realizar los ensayos de líneas de corriente e impacto de un chorro.
2. Fabricar los equipos para realizar los ensayos de viscosidad y centros de presión.
3. Elaborar un manual con toda la información necesaria para los nuevos ensayos del laboratorio de Mecánica de Fluidos.



## INTRODUCCIÓN

En las prácticas del laboratorio del curso de Mecánica de Fluidos, se fortalecen los conocimientos que el estudiante de ingeniería adquiere en las clases magistrales, ya que por medio del análisis matemático y pruebas de laboratorio se pueden demostrar y comprobar los teoremas y ecuaciones que rigen el comportamiento de los fluidos, tanto en reposo como en movimiento.

Con el fin de que el estudiante adquiera más conocimiento se pretende desarrollar el presente trabajo de graduación en donde se le da al estudiante un manual por medio del cual se podrán poner en práctica los conocimientos adquiridos en las clases teóricas, en los temas de viscosidad, fuerzas desarrolladas en superficies sumergidas, la observación de las líneas de corriente que se desarrollan a través de diferentes formas geométricas y las fuerzas desarrolladas por el impacto de un chorro en una superficie.

El presente trabajo de graduación contiene cuatro nuevas prácticas con toda la información necesaria para que el estudiante pueda aprender, comprender y ejecutar ensayos sobre los temas de viscosidad, centros de presión, líneas de corriente y cantidad de movimiento.



# 1. TEORÍA BÁSICA

## 1.1. Propiedades básicas de los fluidos

*Fluido* es aquella sustancia que, debido a su poca cohesión intermolecular, carece de forma propia y adopta la forma del recipiente que lo contiene. Los fluidos se clasifican en líquidos y gases.

Los *líquidos* a una presión y temperatura determinada ocupan un volumen determinado. Introducido el líquido en un recipiente, adopta la forma del mismo, pero llenando solo el volumen que le corresponde.

Los *gases* a una presión y temperatura determinada tienen también un volumen determinado, pero puestos en libertad se expansionan hasta ocupar el volumen completo del recipiente que lo contiene y no presentan superficie libre.

En resumen: los *sólidos* ofrecen gran resistencia al cambio de forma y volumen; los *líquidos* ofrecen gran resistencia al cambio de volumen, pero no de forma; y los *gases* ofrecen poca resistencia al cambio de forma y de volumen.

Por tanto, el comportamiento de líquidos y gases es análogo en conductos cerrados (tuberías); pero no en conductos abiertos (canales), porque solo los líquidos son capaces de crear una superficie libre.

En general, los sólidos y los líquidos son poco compresibles y los gases muy compresibles; pero ningún cuerpo (sólido, líquido o gaseoso) es estrictamente incompresible.

### 1.1.1.Densidad

La densidad se define como la masa que posee un fluido por unidad de volumen y es significativa en todos los problemas de flujo, en donde la aceleración es importante.

Se calcula por:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde  $m$  = masa en kg., para SI.

$V$  = volumen en  $m^3$ , para SI.

La densidad absoluta es función de la temperatura y de la presión.

### 1.1.2.Peso específico

El peso específico es la cantidad de peso por unidad de volumen que posee un fluido o de una sustancia.

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

donde  $W$  = peso en N, SI.

$V$  = volumen en  $m^3$ , SI

Por otro lado el concepto de peso:

$$\gamma = mg = \rho g$$

Su magnitud depende del número de moléculas que ocupan el espacio de una unidad de volumen y, por supuesto, se determina por el tamaño de las moléculas y por la estructura por la que se enlazan. Esto último depende de la temperatura y de la presión.

El agua alcanza su máxima densidad cerca del punto de congelación, a 3.98°C. La tabla I proporciona la densidad del agua a diferentes temperaturas.

Como se muestra en la tabla I, la densidad del hielo es diferente a la del agua líquida a la misma temperatura, es por esto que el hielo flota en el agua.

Tabla I. Densidad y peso específico del agua

Densidad y peso específico del agua		
<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Densidad, ρ</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Peso específico, γ</i> (N/m <sup>3</sup> )
0 (hielo)	917	8,996
0 (agua)	999	9,800
3.98	1,000	9,810
10	999	9,800
25	997	9,780
100	958	9,397

Fuente: Simon Andrew L. **Hidráulica básica**. Pág. 32

Como el agua de mar contiene sal, su densidad es mayor que la del agua dulce. La densidad del agua de mar se toma generalmente como un 4 por ciento mayor a la del agua dulce.

## 1.2. Viscosidad

Quizá la propiedad física más importante del agua sea su resistencia al cortante o deformación angular. La medida de la resistencia de un fluido a ese movimiento relativo se llama viscosidad. Se define la viscosidad como la capacidad de un fluido para convertir energía cinética (energía en movimiento), a energía de calor.

La energía que se convierte en calor se considera pérdida, porque ya no puede contribuir a más movimiento.

Puede resultar en el calentamiento del fluido o se pierde por disipación en la atmósfera.

La energía requerida para mover una cierta cantidad de agua por una tubería, un canal abierto o una estructura hidráulica se determina por la cantidad de pérdidas por cortante viscosa que se encontrarán en el camino. Por consiguiente, la viscosidad del fluido controla inherentemente su movimiento.

### 1.2.1. Viscosidad dinámica y cinemática

La **viscosidad**  $\mu$ , de un fluido, llamada también **coeficiente de viscosidad** o **viscosidad dinámica**, es una medida de su resistencia a fluir.

La viscosidad, como cualquiera otra propiedad del fluido, depende del estado del fluido caracterizado por la presión y la temperatura. En la tabla II se muestra la viscosidad del agua en función de la temperatura.



Tabla II. Densidad, viscosidad dinámica y cinemática del agua

*DENSIDAD, VISCOSIDAD DINAMICA Y CINEMATICA DEL AGUA EN FUNCION DE LA TEMPERATURA*

<i>Temperatura</i> (°C)	<i>Densidad</i> (kg/m <sup>3</sup> )	<i>Viscosidad</i> <i>dinámica</i> $\eta$ (10 <sup>5</sup> kg/m · s)	<i>Viscosidad</i> <i>cinemática</i> $\nu$ $10^6 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} = \text{cSt}$
0	999,8	178,7	1,787
2	999,9	167,1	1,671
4	1.000	156,2	1,562
6	999,9	146,4	1,464
8	999,8	137,6	1,375
10	999,7	130,5	1,307
12	999,4	122,6	1,227
14	999,2	116,1	1,163
16	998,9	110,4	1,106
18	998,5	105,2	1,053
20	998,2	100,2	1,0038
22	997,7	95,5	0,957
24	997,2	91,1	0,914
26	996,6	87,2	0,875
28	996,1	83,4	0,837
30	995,7	79,7	0,801
32	994,9	76,4	0,768
34	994,2	74,1	0,745
36	993,4	70	0,705
38	992,8	68	0,685
40	992,2	65,3	0,658
45	990,2	59,8	0,604
50	988	54,8	0,554
55	985,7	50,5	0,512
60	983,2	46,7	0,475
65	980,6	43,4	0,443
70	977,8	40,4	0,413
75	974,8	37,8	0,388
80	971,8	35,5	0,365
85	968,6	33,4	0,345
90	965,3	31,5	0,326
95	961,8	29,8	0,310
100	958,4	28,2	0,295
150	916,9	18,6	0,205
200	864,6	13,6	0,161
250	799,2	10,9	0,14
300	712,4	8,91	0,132

Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 17

La viscosidad **cinemática**  $\nu$ , se define como la viscosidad  $\mu$ , dividida entre la densidad  $\rho$ .

Entre las moléculas de un fluido existen fuerzas moleculares que se denominan fuerzas de cohesión. Al desplazarse unas moléculas con relación a las otras se produce a causa de ellas una fricción. El coeficiente de fricción interna del fluido se denomina *viscosidad* y se designa con la letra  $\mu$ .

### **1.2.2. Métodos para determinar la viscosidad**

El estudio de la viscosidad y de sus unidades se hace convenientemente mediante la ley de Newton, que cumplen los fluidos llamados newtonianos (entre los cuales se encuentra muchos de los fluidos técnicamente más importantes como el agua, aire, etc.).

Suponiendo una capa de fluido newtoniano de espesor  $y_0$  comprendido entre dos placas planas paralelas, la inferior fija y la superior libre (ver figura 1). Sobre la placa superior actúa una fuerza tangencial constante  $F$ . La experiencia enseña que la placa se desplaza paralelamente a sí misma con una velocidad  $v_0$ .

Si se divide mentalmente la película del fluido en capas infinitesimales paralelas a las placas de espesor  $dy$ , la experiencia confirma que en virtud de la adherencia, la capa de fluido contigua a la placa inferior fija se mantiene en reposo, y la capa de fluido en contacto con la placa superior móvil se pone en movimiento con la misma velocidad  $v_0$  que la placa.

Las capas intermedias se deslizan unas sobre otras como se deslizan las hojas de un libro colocado horizontalmente sobre la mesa al aplicar sobre la hoja superior una fuerza también horizontal. Para mantener fija la placa inferior es necesario aplicar una fuerza  $F$ .

La ley experimental descubierta por Newton que rige este fenómeno afirma que la fuerza  $F$  es proporcional a la superficie  $A$  de la placa en movimiento, al gradiente de velocidad y a un coeficiente  $\mu$ , que se denomina *viscosidad absoluta* o *viscosidad dinámica*:

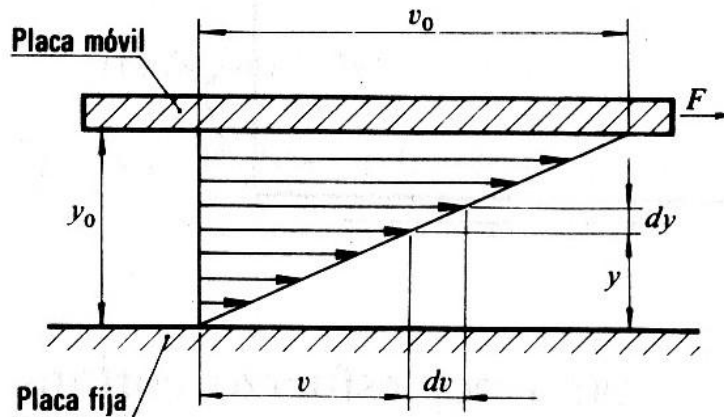
$$F = A\mu\left(\frac{dv}{dy}\right)$$

o bien siendo, por definición  $F/A$  el esfuerzo unitario cortante, que se llama  $\tau$ :

$$\tau = \left(\frac{dv}{dy}\right)$$

La ecuación anterior se cumple en todos los fluidos newtonianos. En algunos fluidos, como en la Fig. 1  $dv/dy$  es constante a lo largo de  $y$ , o lo que es lo mismo se da una distribución lineal de velocidades (los extremos de los vectores velocidad se encuentran en línea recta).

Figura 1. Fluido comprendido entre dos placas paralelas de las cuales la inferior es fija.



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 22

La placa superior se mueve al estar sometida a una fuerza  $F$  paralela a las placas, por pequeña que sea la fuerza. El fluido, en contraposición con el sólido, no puede soportar esfuerzo tangencial alguno.

En el caso particular de la figura 1  $v_0/y_0 = dv/dy$ , con lo que de la ecuación de  $F$  se obtiene:

$$\mu = \frac{Fy_0}{Av_0}$$

En esta ecuación se advierte que:

- En un mismo fluido ( $\mu = \text{cte.}$ ) si la fuerza aumenta, aumenta la velocidad con que se mueve la placa.
- Una fuerza por pequeña que sea, produce siempre un gradiente de velocidad.

Un fluido no ofrece resistencia a la deformación por esfuerzo cortante. Esta es la característica que distingue esencialmente un fluido de un sólido.

Fluido newtoniano es aquel fluido cuya viscosidad dinámica  $\mu$  depende de la presión y de la temperatura, pero no del gradiente de velocidad  $dv/dy$ .

Ejemplos de fluidos newtonianos son el agua, el aire, la mayor parte de los gases y en general los fluidos de pequeña viscosidad.

La ciencia de los fluidos no newtonianos, a los cuales pertenecen las grasas, materiales plásticos, metales líquidos, suspensiones, la sangre, etc, se llama *reología*.

Es muy corriente expresar la viscosidad dinámica en el *sistema cegesimal* (C.G.S.)

$$1 \mu = 1 (\text{dina} \cdot \text{s}) / \text{cm}^2 = 1 \text{ g} / (\text{cm} \cdot \text{s}) = 1 \text{ Poise (C.G.S.)}$$

**Poise:** nombre derivado del físico Poiseuille y usada como unidad de la viscosidad dinámica en su honor.

También se emplea el submúltiplo 1 cP (léase centipoise) =  $10^{-2}$  Poise

En hidrodinámica intervienen, junto con las fuerzas debidas a la viscosidad, las fuerzas de inercia, que dependen de la densidad. Por eso tiene un significado importante la viscosidad dinámica referida a la densidad, o sea la relación de la viscosidad dinámica  $\mu$  a la densidad  $\rho$ , que se denomina **viscosidad cinemática**.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

La viscosidad dinámica de los fluidos varía mucho con la temperatura, aumentando con la temperatura para los gases y disminuyendo para los líquidos; pero en unos y otros prácticamente es independiente de la presión. Por el contrario, la viscosidad cinemática de los gases varía mucho con la presión y la temperatura.

### **1.2.3. Otros sistemas de medidas de viscosidad**

Los procedimientos y el equipo para medir la viscosidad son numerosos. Algunos emplean los principios fundamentales de la Mecánica de Fluidos para tener la viscosidad en sus unidades básicas. Otros indican exclusivamente valores relativos de la viscosidad que se pueden utilizar para comparar diferentes fluidos. Entre los métodos existentes se pueden mencionar:

- Viscosímetro de tambor giratorio
- Viscosímetro de tubo capilar
- Viscosímetro de capilar de vidrio
- Viscosímetro de caída de bola

### **1.3. Tensión superficial y capilaridad**

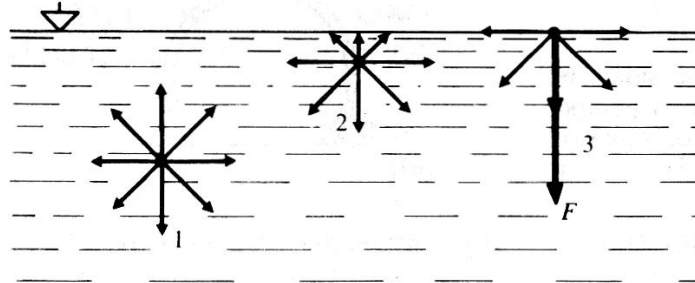
La *tensión superficial* es una fuerza que, como su nombre indica, produce efectos de tensión en la superficie de los líquidos, allí donde el fluido entra en contacto con otro fluido no miscible, particularmente un líquido con un gas o con

un contorno sólido (vasija, tubo, etc.). Es origen de esta fuerza de *cohesión* intermolecular y la fuerza de *adhesión* del fluido al sólido.

En la superficie libre de un líquido, que es por tanto la superficie de contacto entre dos fluidos, líquido y aire, la tensión superficial se manifiesta como si el líquido creara allí una fina membrana. Así se explica, por ejemplo, que una aguja de acero colocada cuidadosamente sobre la superficie del agua no se hunda.

El origen de la tensión superficial puede explicarse de la siguiente manera: una molécula situada en el interior del fluido, como la molécula 1 en la figura 2, es atraída por igual en todas direcciones por las moléculas circundantes y se encuentra en equilibrio: las fuerzas de cohesión molecular no producen efecto resultante alguno. Por el contrario, las moléculas 2 y 3 se encuentran cerca de (o sea a una distancia menor que el radio de la esfera de acción de la cohesión molecular, que es del orden de  $10^{-6}$  mm) o en la misma superficie libre, respectivamente, en cuyo caso el equilibrio se rompe porque las moléculas del líquido ejercen una atracción mucho mayor que las del gas (aire) de la superficie libre. En este caso hay una resultante  $F$  de las fuerzas de cohesión dirigida hacia el interior del líquido. Esta fuerza origina una tensión tangencial en la superficie libre, que la convierte en algo semejante a una membrana elástica.

Figura 2. Fuerzas de cohesión molecular en un líquido



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 28

Si sobre la superficie libre del líquido se traza una línea cualquiera, la tensión superficial  $\sigma$  es la fuerza superficial normal a dicha línea por unidad de longitud. Sus dimensiones son, por tanto,  $[\sigma] = [F] [L]^{-1}$ . La fuerza debida a la tensión superficial es igual a  $\sigma L$ .

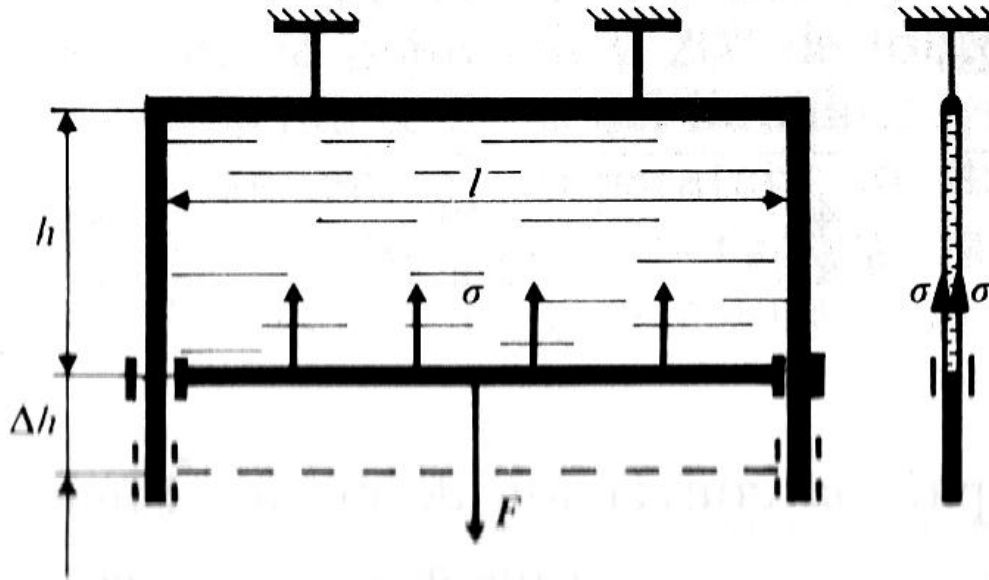
Esta fuerza suele ser muy pequeña, disminuyendo además al aumentar la temperatura. Así, por ejemplo, en la superficie libre del agua en contacto con el aire a lo largo de una línea de 60 m, la fuerza total debida a la tensión superficial es del orden de 5 N.

En la figura 3 puede verse el método clásico para investigar la tensión superficial. A fin de aumentar la superficie de la membrana líquida encuadrada en el marco de la figura desplazando la barra móvil inferior un  $\Delta h$  es preciso aplicar una fuerza  $F$  tal que

$$\sigma = \frac{F}{2l}$$



Figura 3. Medición de la tensión superficial.



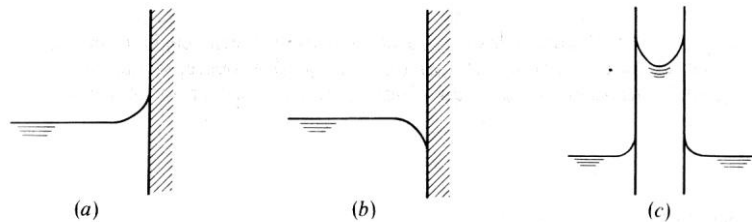
Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 28.

La tensión superficial explica la formación de las gotas en un líquido. En un líquido que se pulveriza las fuerzas de cohesión predominantes dirigidas siempre hacia el interior tienden a la formación de superficies de área mínima, originando las gotas esféricas, ya que para un volumen determinado la esfera es el cuerpo que posee área mínima.

La tensión superficial explica también los fenómenos de formación de *menisco* y el de la elevación del líquido en *tubos capilares*. En la figura 4 (a) se muestra la forma de la superficie libre que adopta el agua en contacto con vidrio y en la figura 4 (b) la que adopta el mercurio en contacto con el vidrio también. En el mercurio la fuerza de *cohesión* entre sus moléculas es mayor que la de *adhesión* del mercurio al vidrio y lo contrario ocurre en el agua. La figura 4 (c)

ilustra el fenómeno de la elevación capilar, que encuentra su explicación también en la tensión superficial.

Figura 4. Fenómenos debido a la tensión superficial: (a) contacto entre agua y vidrio; (b) contacto entre mercurio y vidrio; (c) elevación capilar.

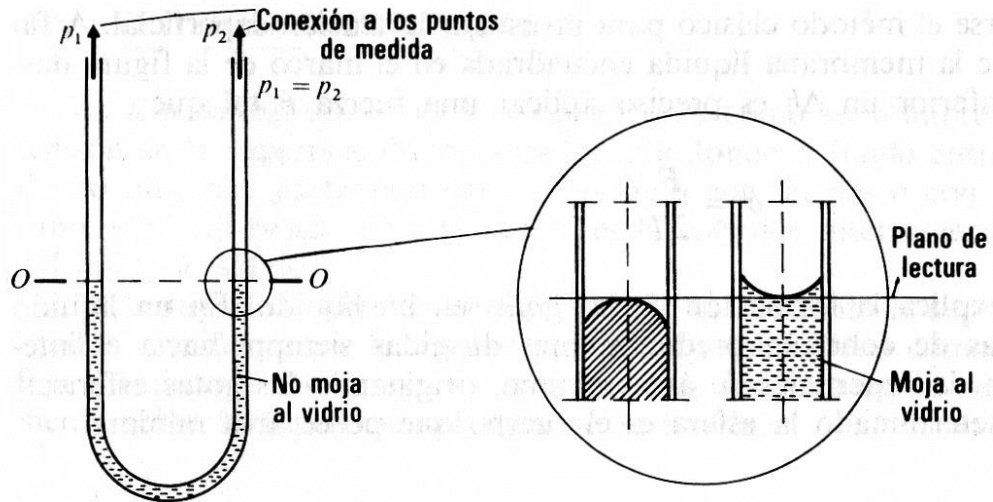


Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 29

La formación del menisco cóncavo hacia abajo, en el caso del mercurio y de los líquidos que no mojen al vidrio, o cóncavo hacia arriba en el caso del agua y de los líquidos que mojen al vidrio, y el fenómeno de capilaridad puede producir un error en la lectura de los manómetros de líquido, que se evita leyendo el manómetro como se indica en la figura 5.

En efecto, si las dos ramas del manómetro en U tienen la misma sección transversal, el ascenso capilar en una rama es igual al descenso capilar en la otra. De esta manera, utilizando una lente y un Nonio, se pueden leer los manómetros líquidos con un error menor de 0.1 mm.

Figura 5. Lectura de manómetros con menisco.



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 30

## 1.4. Presión hidrostática

Cuando un fluido está en reposo, solamente recibe la influencia de la aceleración de la gravedad. No importa cuál sea su viscosidad, todos los fluidos se comportan de la misma manera bajo condiciones estáticas. Esto se debe a que las fuerzas de cortante viscoso únicamente hacen su aparición cuando hay movimiento, de acuerdo con la ley de viscosidad de Newton.

### 1.4.1. Definición de presión hidrostática (manométrica) y absoluta

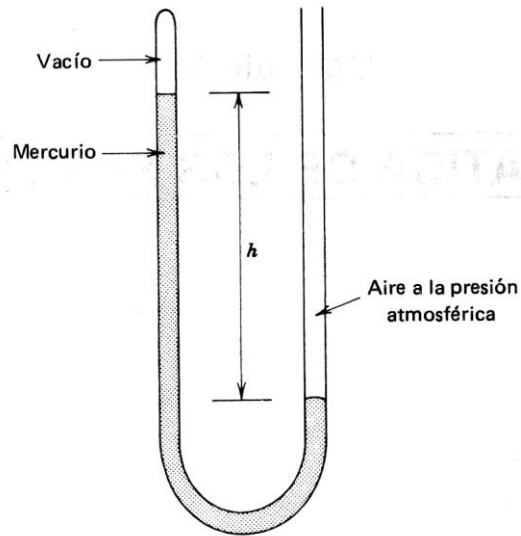
La presión atmosférica es la presión debida al peso del aire sobre la superficie de la tierra.

La presión manométrica ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) es la presión superior o inferior a la atmosférica. La presión manométrica es positiva cuando es mayor que la atmosférica y negativa cuando es menor. La presión absoluta ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) es la presión total que incluye la presión atmosférica.

En la superficie de un líquido en un recipiente abierto, ya sea la superficie de un vaso de agua o de un lago, la única presión que existirá será la del aire por encima de ella. La presión atmosférica depende de la temperatura y de la elevación sobre el nivel del mar. La presión atmosférica varía continuamente, dependiendo de las condiciones meteorológicas.

Los reportes del estado del tiempo incluyen dicha información bajo el nombre de presión barométrica. Se presenta en términos de pulgadas de mercurio al nivel del mar. El barómetro es un instrumento sencillo formado por un tubo en U, con un extremo sellado y el otro abierto al aire exterior. El fondo del tubo está lleno de mercurio que actúa como fluido indicador. Con el extremo del tubo sellado protegido de la presión atmosférica, el mercurio actúa como el fiel de una balanza. El peso de la atmósfera sobre uno de sus extremos se indica por la diferencia de altura de la columna de mercurio en los dos tubos interconectados, como se muestra en la figura 6.

Figura 6. Manómetro sencillo de mercurio



Fuente: Simon Andrew L. **Hidráulica básica**. Pág. 42

El margen usual de esta presión barométrica es de 73 a 79 cm de mercurio, ya que la densidad del mercurio es casi catorce veces mayor que la del agua, si se fuera a usar agua en lugar de mercurio en un barómetro, la columna de agua se elevaría en la parte sellada a una altura de aproximadamente diez metros. En los cálculos hidráulicos se normaliza la presión atmosférica, al nivel del mar y temperatura normal como 9.75 m de agua. En la práctica diaria, esta cifra se redondea con frecuencia a diez metros. La presión de la atmósfera está presente en cualquier parte de la superficie terrestre. En el espacio, fuera de la capa atmosférica, un barómetro registraría cero de presión. Cuando las presiones se expresan en términos de presión barométrica, se trata de *presión absoluta*.

En muchos cálculos hidráulicos resulta suficiente referirse a la superficie del agua que está expuesta a la atmósfera. La presión relativa a la superficie libre del agua se llama *presión relativa* o presión manométrica.

### 1.4.2. Unidades de medida de presión

Ecuación de dimensiones:

$$[p] = [F] [L]^{-2} = [M] [L]^{-1} [T]^{-2}$$

Unidad en el SI:

$$1 \text{ unidad de presión} = 1 \frac{N}{m^2}$$

O bien expresada en las unidades básicas:

$$1 \frac{N}{m^2} = 1 \frac{Kg}{(m \cdot s^2)}$$

Esta unidad ha recibido el nombre de Pascal (Pa):

$$1 \frac{N}{m^2} = 1 Pa$$

Factor de conversión del ST al SI y viceversa:

$$\frac{9.81 N/m^2}{1 kp/m^2} = 1$$

### 1.4.3. Presión expresada en columna de líquido

En la práctica se expresa con frecuencia la presión en altura equivalente de columna de líquido determinado: por ejemplo, en m de columna de agua, en mm de columna de mercurio, etc. Dimensionalmente la presión no es una longitud, sino una fuerza sobre una superficie. Por eso en el Sistema Internacional las alturas como unidades de presión han sido abolidas aunque no hay dificultad en seguir utilizándose como alturas equivalente. Como excepción se puede seguir utilizando en la unidad de presión los mm de columna de mercurio, que recibe el nombre de Torr (en atención a Torricelli), nombre que debe sustituir al de mm de Hg:

$$1 \text{ milímetro Hg.} = 1 \text{ Torr}$$

A continuación se deduce una ecuación que permite pasar fácilmente de una presión expresada en columna equivalente de un fluido a la expresada en unidades de presión de un sistema cualquiera.

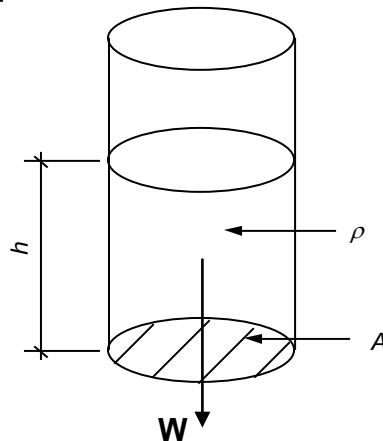
Si se considera un recipiente cilíndrico (ver figura 7) de base horizontal  $A$  lleno de líquido de densidad  $\rho$  hasta una altura  $h$ . Según definición de presión,

$$p = \frac{W}{A} = \frac{A\rho g}{A} = \frac{Ah\rho}{A} = \rho gh = \gamma h$$

o sea

$$p = \rho gh = \gamma h$$

Figura 7. Fórmula de la presión



Fuente: Reynoso Revolorio Mario Eduardo

## 1.5. Fuerzas hidrostáticas sobre superficies sumergidas

La presión o intensidad de presión es la fuerza por área unitaria que actúa sobre cualquier superficie real o imaginaria dentro de un fluido. La presión del fluido actúa normal a la superficie en todos los puntos. A cualquier profundidad la presión actúa por igual en todas las direcciones.

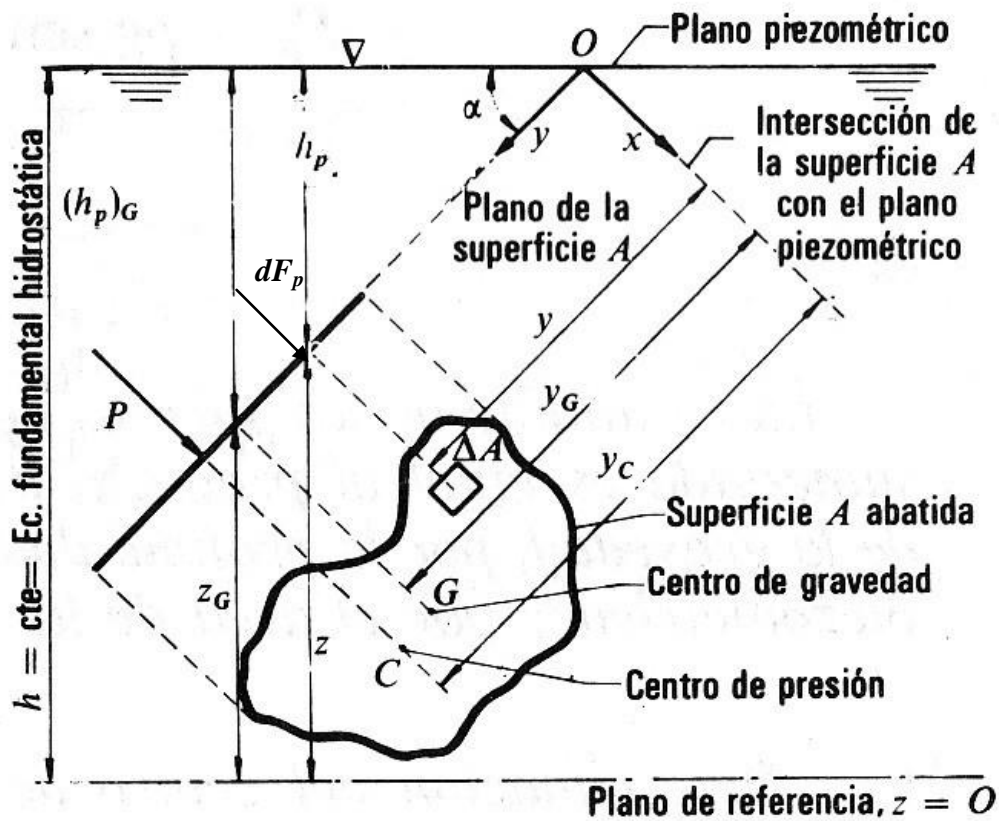
Esto es el resultado de la incapacidad de un fluido para transmitir esfuerzo cortante cuando está en reposo. La presión del líquido y la presión de gas difieren en que la variación de la presión con la profundidad es lineal para un líquido y no lineal para un gas.

Si se considera el caso general en que el plano donde se encuentra la superficie plana sumergida  $A$  forme un ángulo  $\alpha$  con el plano piezométrico, figura 8. La presión  $p$  en cada punto multiplicada por  $dA$  forma un sistema de fuerzas elementales paralelas  $dF_p$ , normales al plano  $A$ , cuya resultante es una



fuerza normal también a dicho plano. La intersección de la línea de aplicación de esta fuerza con la superficie  $A$  determina un punto  $C$ , que se llama centro de presión, que no coincide en general con el centro de gravedad  $G$  de  $A$ .

Figura 8. Cálculo de la fuerza total debida a la presión de un fluido sobre una superficie plana  $A$  y de su punto de aplicación llamada centro de presión  $C$ .



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 69

a) Determinación de la fuerza

En la figura 8 se han acotado para el centro de gravedad  $G$  de  $A$  y para un elemento  $dA$  cualquiera las siguientes magnitudes:

$z$  = altura geodésica

$h_p = \frac{p}{\rho g}$  = altura de presión: profundidad del punto con respecto a la superficie libre o plano piezométrico.

$h$  = altura piezométrica.

Según la ecuación fundamental de la hidrostática,  $h = \left( \frac{p}{\rho g} \right) + z = C$

Observando la figura

$$\frac{p}{\rho g} = y \operatorname{sen} \alpha$$

$$\frac{p}{\rho g} = y \operatorname{sen} \alpha$$

Luego

$$p = \rho g y \operatorname{sen} \alpha$$

y la fuerza elemental  $dF_p$  debida a la presión sobre el elemento  $dA$  (fuerza = presión x superficie) será:

$$dF_p = p dA = \rho g y \operatorname{sen} \alpha dA$$

Siendo paralelas todas las fuerzas  $dF_p$ , la fuerza resultante  $F_p$  debida a la presión será:

$$F_p = \int dF_p = \rho g \operatorname{sen} \alpha \int y dA$$

Pero según la definición de centro de gravedad

$$\int y dA = y_G A$$

Donde  $y_G$  (coordenada  $y$  de  $G$ ); luego

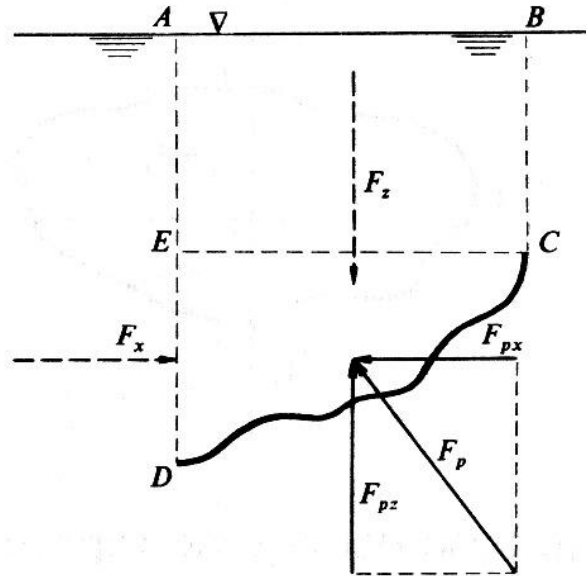
$$F_p = \rho g \operatorname{sen} \alpha y_G A = \rho g (h_p)_G Ag$$

Es decir:

La resultante de las fuerzas debidas a la presión sobre una superficie plana sumergida es igual al producto de la densidad del líquido, por la aceleración de la gravedad, por la profundidad del centro de gravedad con relación al plano piezométrico y por el área de la superficie.

Si se considera la superficie curva cilíndrica  $CD$  de la figura 9 de generatrices normales al plano del dibujo. La resultante de las fuerzas debidas a la presión se determina por dos componentes  $F_{px}$  y  $F_{pz}$ .

Figura 9. Presión hidrostática  $F_p$  sobre una superficie curva cilíndrica sumergida  $CD$ .



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 71

- a) *Obtención de la componente horizontal,  $F_{px}$ .* Si se aísla como cuerpo libre el volumen a la izquierda de la superficie, representado en la figura  $ECD$ , limitado por el plano horizontal  $EC$  y el vertical  $ED$ . El equilibrio horizontal dice que  $F_{px} = F_x$ , en que  $F_x$  es igual en magnitud y línea de acción a la presión que el fluido ejerce sobre el plano vertical  $ED$ .

La componente horizontal de la resultante de las presiones que un líquido ejerce sobre una superficie curva cilíndrica es igual en magnitud y de sentido contrario a la resultante de las presiones que el fluido ejerce sobre la proyección de la superficie sobre un plano vertical y tiene la misma línea de acción, es decir, pasa por el centro de presión de dicha proyección.

b) *Obtención de la componente vertical,  $F_{pz}$ .* Si se considera ahora como cuerpo libre el volumen del líquido encima de la superficie, representado en la figura por *ABCD*. El equilibrio vertical dice que:

$$F_{pz} = F_z$$

En que  $F_z$  es el peso del fluido del volumen aislado. Y por tanto:

La componente vertical de la resultante de las presiones que un líquido ejerce sobre una superficie curva es de igual magnitud y sentido contrario al peso de la columna vertical del líquido contenido entre esta superficie y el plano piezométrico.

Las superficies cilíndricas con generatrices normales al plano del dibujo son de uso muy frecuente en válvulas, vertederos, compuertas, etc.

## 1.6. Centros de presión

Llamando  $y_c$  (figura 8) a la coordenada  $y$  del centro de presión, e igualando el momento con relación al eje O-x de la resultante de las fuerzas debidas a la presión a la suma de los momentos de las componentes, se tiene

$$F_p y_c = \int y dF_p = \rho g \operatorname{sen} \alpha \int y^2 dA$$

De donde:

$$y_c = \frac{\rho g \operatorname{sen} \alpha \int y^2 dA}{\rho g \operatorname{sen} \alpha \int y dA}$$

y finalmente

$$y_C = \frac{\int y^2 dA}{\int y dA} = \frac{I_x}{Ay_G}$$

Donde:

$y_C$  = coordenada y del centro de presiones, C

$I_x$  = momento segundo de la superficie A con relación al eje O-x

$y_G$  = coordenada y el centro de gravedad

A = área de la superficie

Es decir:

La distancia (coordenada  $y_C$ ) del centro de presiones de una superficie plana a la intersección de dicho plano con el plano piezométrico es igual al cociente de los momentos segundo y primero de la superficie con relación a dicha intersección.

La coordenada  $x_C$  se obtendría análogamente mediante la igualdad de momentos:

$$F_p x_C = \int x dF_p$$

## 2. CINEMÁTICA DE LOS FLUIDOS

### 2.1. Definición del flujo de fluidos

Se define como flujo a un fluido en movimiento, se describe el flujo de un fluido en función de ciertas variables físicas como presión, densidad y velocidad en todos los puntos del fluido. Se describe el movimiento de un fluido concentrándose en lo que ocurre en un determinado punto del espacio (x, y, z) en un determinado instante de tiempo t.

La cantidad de flujo que fluye en un sistema por unidad de tiempo se puede expresar mediante los tres términos que se definen a continuación.

*Q* La *rapidez de flujo de volumen* es el volumen del flujo de fluido que pasa por una sección por unidad de tiempo.

*W* La *rapidez de flujo de peso* es el peso de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo.

*M* La *rapidez de flujo de masa* es la masa de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo.

El estudio del movimiento de un fluido en el interior de un contorno (tubería, canal) o alrededor de un contorno (barco, ala de avión) es:

- *Interesantísimo en la técnica:* proyecto de oleoductos, redes de distribución de agua, canalizaciones de aire acondicionado, conductos en los sistemas de refrigeración y engrase de las máquinas, flujo de agua y del vapor en una central térmica, resistencia de los aviones y barcos, etc.

- Es el problema central de la Mecánica de Fluidos
- *Es altamente complicado:* en efecto, el movimiento de un sólido rígido, por muy complicado que sea se descompone en el movimiento de traslación del centro de gravedad y en un movimiento de rotación del sólido alrededor del centro de gravedad; de donde el conocimiento de las tres coordenadas del centro de gravedad en función del tiempo también definen exactamente el movimiento de un sólido. Por el contrario, el movimiento general de un fluido, por ejemplo el agua en un río de lecho rocoso es infinitamente más complicado por el desplazamiento de unas partículas de agua con relación a las otras. Sin embargo, el movimiento de cada partícula de fluido obedece a la ley fundamental de la dinámica: *Fuerza = masa x aceleración.*

## 2.2. Tipos de flujo

Cuando se analiza un fluido en una corriente es importante determinar el carácter del flujo. En algunas condiciones, el fluido parecerá que fluye en capas, de una manera uniforme y regular. Se puede observar este fenómeno cuando se abre un grifo de agua lentamente, hasta que el chorro es uniforme y estable. A este tipo de flujo se le conoce como *flujo laminar*.

Si se abre más el grifo, permitiendo que aumente la velocidad del mismo, se alcanzaría un punto en el que el flujo ya no es uniforme ni regular. El agua del chorro parecerá que se mueve de un amanaera bastante caótica. Al flujo, entonces, se le conoce como *flujo turbulento*.



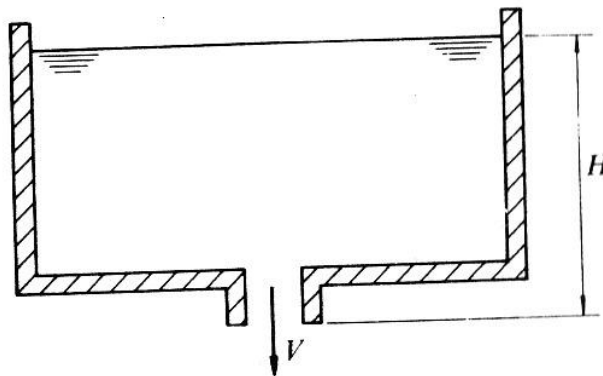
Conviene distinguir los siguientes regímenes de corriente:

- **Flujo permanente y no permanente**

**Permanente** si en cualquier punto del espacio por donde circula el fluido no varían con el tiempo las características de éste (aunque varíen de un punto a otro) en particular su velocidad y su presión. Ejemplo: corriente de agua en un canal de hormigón de pendiente uniforme.

**No permanente o variable** si sucede lo contrario, ejemplo: vaciado de un depósito por un orificio de fondo, figura 10 la velocidad  $V$  de salida por el orificio disminuye a medida que disminuye  $H$  al irse vaciando el depósito.

Figura 10. El vaciado de un depósito por orificio de fondo es un fenómeno de régimen no permanente



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 90

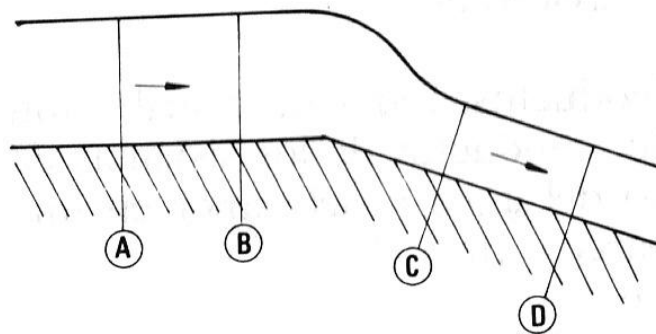
- **Flujo uniforme y no uniforme**

**Uniforme** si en cualquier sección transversal al flujo la velocidad en puntos homólogos es igual en magnitud y dirección, aunque dentro de

una misma sección transversal varíe de un punto a otro. Ejemplo: flujo de un fluido en un tubo de diámetro constante.

**No uniforme** en caso contrario. Ejemplo: en el cono divergente a la salida de una bomba figura 11 la velocidad disminuye a medida que la sección aumenta (como difusor). Es claro que tanto el régimen uniforme como el no uniforme puede ser permanente o variable; ejemplo: si el caudal en los ejemplos primero y segundo no varía, el régimen será permanente; pero si varía, el régimen será variable.

Figura 11. Flujo en un canal. En los tramos *AB* y *CD* la corriente es uniforme y no uniforme en el tramo *BC*. (La longitud en el sentido del flujo se ha reducido mucho en el dibujo.)



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 90

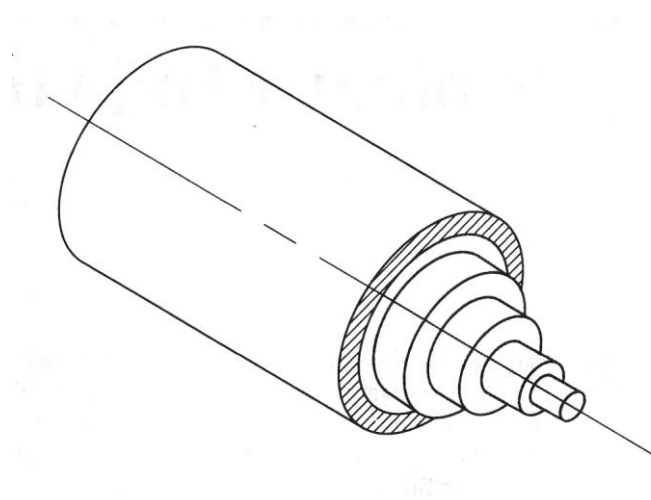
En la transición del canal de la figura 11 el flujo es *uniforme* en los tramos *AB* y *CD* y *no uniforme* en el tramo *BC* (transición). Si aguas arriba de *A* hay una compuerta que permita variar el caudal del canal; durante la maniobra de la compuerta, en los tramos *AB* y *CD* será *uniforme y variable*, y en el tramo *BC no uniforme y variable*, y terminada la maniobra de la compuerta, *uniforme y permanente* y *no uniforme y permanente*, respectivamente. Un caso particular de un flujo uniforme es el de un fluido ideal e irrotacional entre contornos paralelos, en el cual la

velocidad es la misma no solo en toda sección transversal sino también en todos los puntos de una misma sección transversal.

- **Flujo laminar y turbulento**

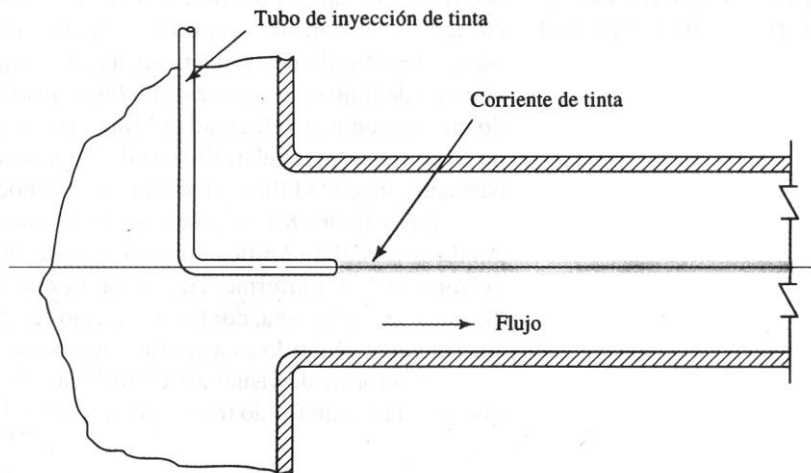
**Laminar** si es perfectamente ordenada de manera que el fluido se mueve en láminas paralelas (si la corriente tiene lugar entre dos planos paralelos figura 12 o en capas cilíndricas coaxiales como la glicerina en un tubo de sección circular, figura 13, etc.

Figura 12. Flujo laminar en una tubería circular



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 220

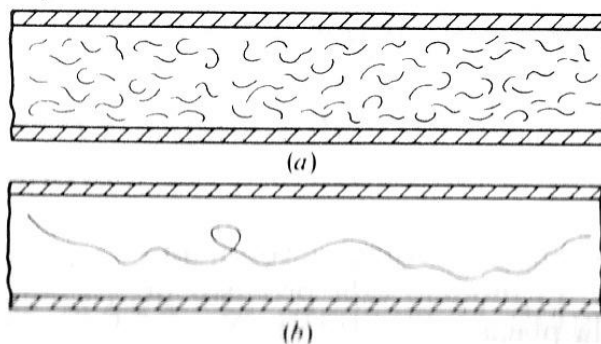
Figura 13. Corriente de tinta en un flujo laminar



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 220

**Turbulento**, en caso contrario, como el agua en un canal de gran pendiente. El que se de uno u otro régimen depende de la influencia de la viscosidad (o del número de Reynolds).

Figura 14. El flujo turbulento es un movimiento desordenado: (a) segmentos de trayectorias de diversas partículas en un mismo espacio de tiempo; (b) trayectoria de una sola partícula.

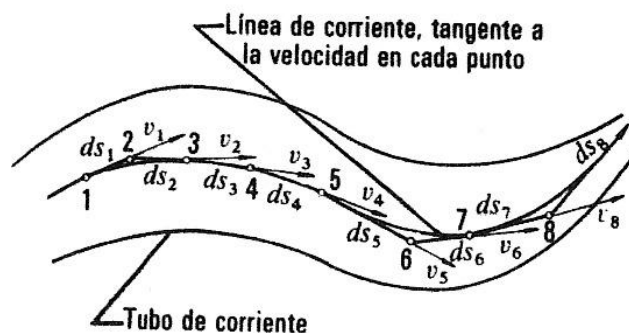


Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 190

### 2.3. Líneas de corriente

El camino que recorre una partícula de fluido en su movimiento se llama trayectoria de la partícula. En régimen permanente la trayectoria coincide con la llamada *línea de corriente*, que es la curva tangente a los vectores de velocidad en cada punto (véase la figura 15). En régimen permanente las velocidades en los puntos 1, 2, 3, etc., serán siempre  $u_1$ ,  $u_2$ ,  $u_3$ , etc. Y la partícula que pasa por 1 seguirá la trayectoria 1-2-3-4 que coincidirá con la línea de corriente. En régimen variable las líneas de corriente varían de un instante a otro.

Figura 15. El tubo de corriente de la figura puede ser sólido (tubería, canal) o formado por una superficie imaginaria que lo separa del fluido adyacente. La línea de corriente y la trayectoria de una partícula coinciden en régimen permanente.

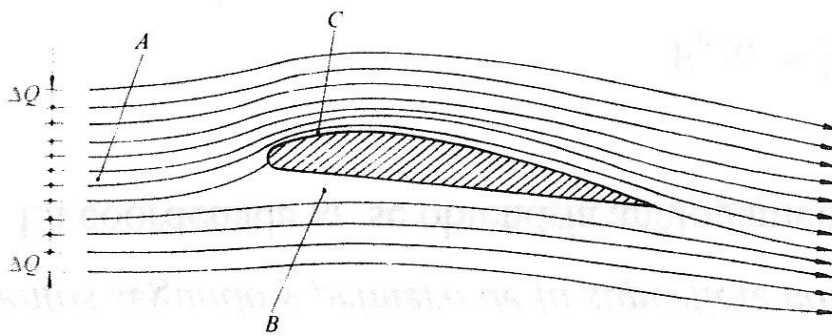


Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 91

Las líneas de corriente sirven para la representación gráfica de los flujos llamados bidimensionales, que pueden representarse fácilmente en un plano porque la velocidad no tiene componente normal al plano del dibujo, y la *configuración de corriente* en todos los planos paralelos al del dibujo es idéntica. Por cada punto de la corriente pasa una línea de corriente. Por tanto, si se trazaran todas las líneas de corriente no se distinguirían ninguna y si se trazaran demasiadas el dibujo sería confuso. Por eso se trazan solo

unas cuantas; pero de manera que *entre cada dos líneas consecutivas circule el mismo caudal,  $\Delta Q$ .*

Figura 16. Líneas de corriente en torno a un perfil de ala. Entre dos líneas de corriente consecutivas circula el mismo caudal  $\Delta Q$ . La velocidad es mayor donde las líneas de corriente se estrechan



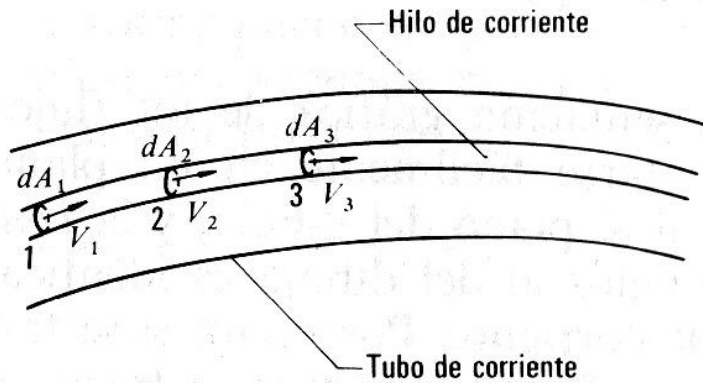
Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 91

## 2.4. Tubos y redes de corriente

Es un tubo imaginario o real cuya pared lateral está formada por líneas de corriente (figuras 15 y 17). Así en una tubería de agua de 250 mm de diámetro un tubo de corriente puede ser un cilindro circular imaginario de 100 mm y concéntrico con el eje de la tubería, o también la tubería misma de 250 mm, que por definición de línea de corriente está formada también por líneas de corriente (la velocidad del fluido en la tubería es tangente a la tubería; de lo contrario el líquido se despegaría de la tubería o se saldría de la misma).

Si el área transversal de un tubo de corriente es infinitesimal el tubo de corriente se llama *hilo* o *filamento de corriente*.

Figura 17. Tubo de corriente e hilo de corriente. El hilo o filamento de corriente es un tubo de corriente infinitesimal



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 92

## 2.5. Ecuación de continuidad

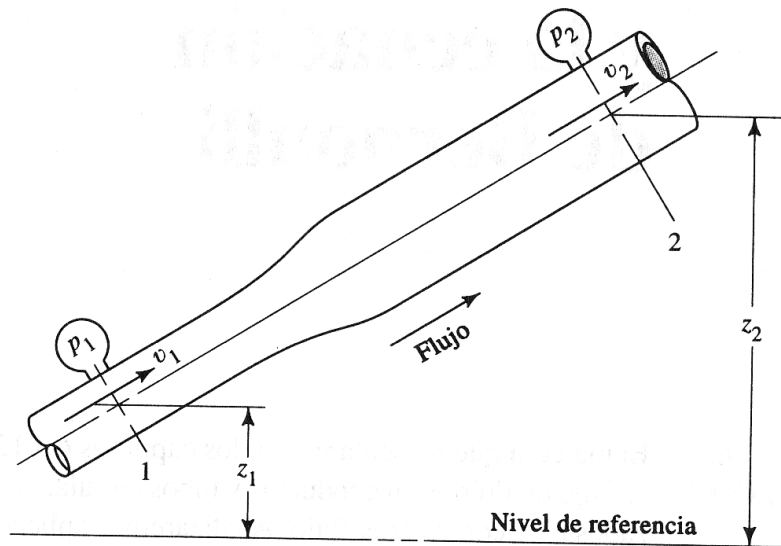
El método para calcular la velocidad de flujo de un fluido en un sistema de conductos cerrados, depende del principio de continuidad. Si se considera el tubo de la figura 18. Un fluido fluye de la sección 1 a la sección 2 con una rapidez constante. Esto es, la cantidad de fluido que pasa por cualquier sección en un cierto tiempo dado es constante. En este caso se tiene un *flujo constante*. Ahora bien, si no se agrega fluido, se almacena o se retira entre la sección 1 y la sección 2, entonces la masa de fluido que pasa por la sección 2 en un tiempo dado, debe ser la misma que la que fluye por la sección 1, en el mismo tiempo. Lo anterior se puede expresar en términos de la rapidez de flujo de masa como:

$$M_1 = M_2$$

O, puesto que  $M = \rho A v$ , entonces:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (2-1)$$

Figura 18. Parte de un sistema de distribución de fluidos



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 146

La ecuación (2-1) es un planteamiento matemático del principio de continuidad y se le conoce como *ecuación de continuidad*. Se utiliza para relacionar la densidad del fluido, el área de flujo y la velocidad de flujo en dos secciones de un sistema en el que existe un flujo estable. Es válida para todos los fluidos, ya sean gases o líquidos.

Si el fluido que se encuentra en el tubo de la figura 18 es un líquido que puede ser considerado incomprensible, entonces los términos  $\rho_1$  y  $\rho_2$  de la ecuación (2-1) son iguales. La ecuación, entonces, queda:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2-2)$$

O, puesto que  $Q = Av$ , entonces:

$$Q_1 = Q_2$$



La ecuación (2-2) es la ecuación de continuidad aplicada a líquidos; establece que para un flujo estable, la rapidez de flujo de volumen es la misma en cualquier sección. También se le puede utilizar, con un error pequeño, para gases a baja velocidad, es decir, menor que 100 m/s.

Ejemplo:

¿Cuál es la velocidad media de una tubería de 15 cm de diámetro si el caudal de agua transportado es de 3800 m<sup>3</sup>/día?

$$Q = \frac{3800 \text{ m}^3}{\text{día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ horas}} \cdot \frac{1 \text{ hora}}{3600 \text{ s}} = \frac{0.0440 \text{ m}^3}{\text{s}} = 44 \frac{\text{L}}{\text{s}}$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi (0.15)^2}{4} = 0.0177 \text{ m}^2$$

$$Q = V A$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0.044 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.0177 \text{ m}^2} = 2.49 \text{ m/s}$$

Fuente: Díaz Ortiz Jaime Ernesto. **Mecánica de los Fluidos e Hidráulica. Colección Ciencias Físicas, Exactas y Naturales.** Programa Editorial Universidad del Valle. Pág. 90.

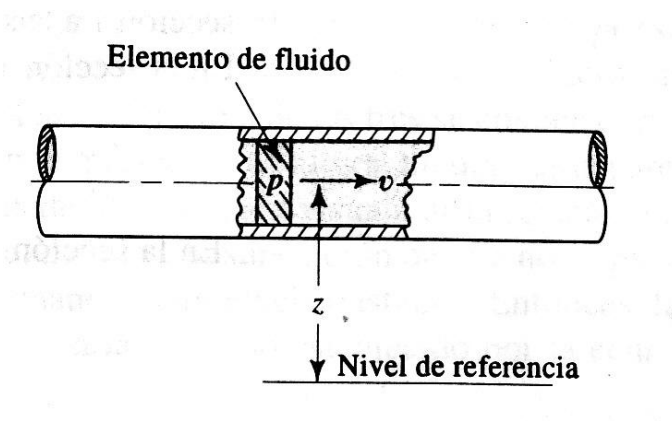
## 2.6. Dinámica de fluidos

### 2.6.1. Ecuación de Bernoulli

El análisis de un problema de líneas de conductos, como el que se ilustra en la figura 18, toma en cuenta toda la energía del sistema. En física se aprendió que la energía no puede ser creada ni destruida, sino que puede ser transformada de un tipo a otro. Éste es el enunciado de la ley de *conservación de la energía*.

Cuando se analizan problemas de flujo en conductos, existen tres formas de energía que siempre hay que tomar en consideración. Si se analiza un elemento de fluido, como el que se muestra en la figura 19, que puede estar dentro de un conducto de un sistema de flujo, el mismo puede estar localizado a una cierta elevación  $z$ , tener una cierta velocidad  $v$  y una presión  $p$ . El elemento de fluido tendrá las siguientes formas de energía:

Figura 19. Elemento de fluido en un conducto.



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 155

- *Energía potencial*. Debido a su elevación, la energía potencial del elemento con respecto de algún nivel de referencia es:

$$PE = wz \quad (2-3)$$

En la que  $w$  es el peso del elemento.

- *Energía cinética.* Debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es:

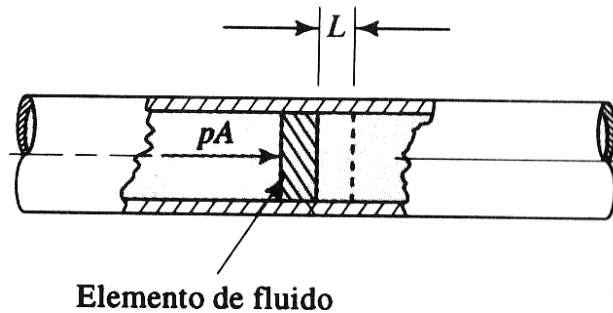
$$KE = wv^2/2g \quad (2-4)$$

- *Energía de flujo.* En ocasiones conocida como *energía de presión o trabajo de flujo*, ésta representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión  $p$ . La energía de flujo se abrevia FE (Flow Energy) y se calcula a partir de la ecuación:

$$FE = wp/\gamma \quad (2-5)$$

La ecuación (2-5) puede ser derivada de la manera siguiente. En la figura 20 se muestra el elemento de fluido en el conducto que se traslada a través de una sección. La fuerza que actúa sobre el elemento es  $pA$ , en la que  $p$  es la presión en la sección y  $A$  es su área. Al trasladar el elemento a través de la sección, la fuerza se mueve una distancia  $L$  igual a la longitud del elemento. En consecuencia, el trabajo hecho es

Figura 20. Energía de flujo



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág.156

$$\text{Trabajo} = pAL = pV$$

En donde  $V$  es el volumen del elemento. El peso del elemento,  $w$ , es:

$$w = \gamma V$$

en la que  $\gamma$  es el peso específico del fluido. Entonces, el volumen del elemento es:

$$V = w/\gamma$$

Y entonces:

$$\text{Trabajo} = pV = pw/\gamma$$

Al cual se le llama energía de flujo en la ecuación (2-5).

La cantidad total de energía de estas tres formas que posee el elemento de fluido será la suma, representada con  $E$ :

$$E = PE + FE + KE$$

$$E = wz + w \frac{p}{\gamma} + \frac{wv^2}{2g}$$

Cada uno de estos términos se expresa en unidades de energía, Newton-metro (N·m) en el Sistema Internacional o en pies-libra (pie · lb.) en el Sistema Británico de Unidades.

Si se considera ahora el elemento de fluido de la figura 21, que se mueve de la sección 1 a la sección 2. Los valores de  $p$ ,  $z$  y  $v$  son diferentes en las dos secciones. En la sección 1, la energía total es:

$$E_1 = wz_1 + \frac{wp_1}{\gamma} + \frac{wv_1^2}{2g}$$

En la sección 2, la energía total es:

$$E_2 = wz_2 + \frac{wp_2}{\gamma} + \frac{wv_2^2}{2g}$$

Si no se agrega energía al fluido o se pierde entre las secciones 1 y 2, entonces el principio de conservación de la energía requiere que:

$$E_1 = E_2$$

donde:

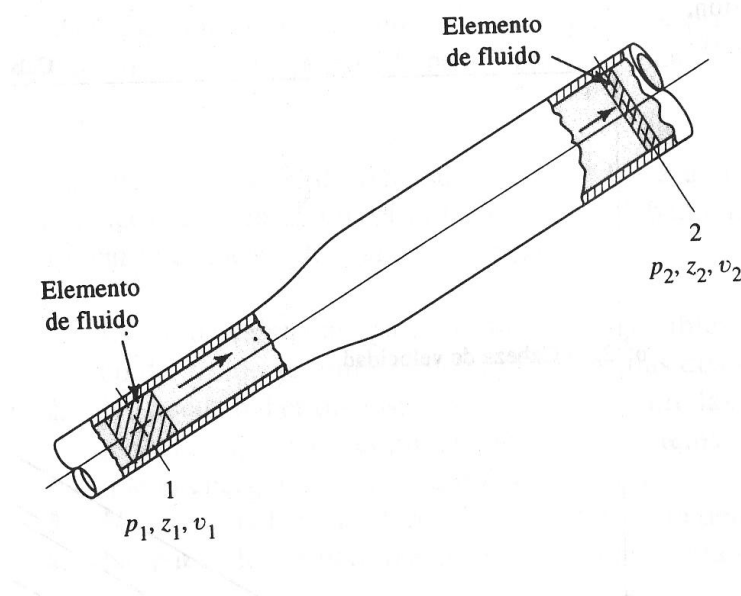
$$wz_1 + \frac{wp_1}{\gamma} + \frac{wv_1^2}{2g} = wz_2 + \frac{wp_2}{\gamma} + \frac{wv_2^2}{2g}$$

El peso del elemento,  $w$ , es común a todos los términos y se le puede cancelar. La ecuación, entonces, se convierte en:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2-6)$$

A esta se le conoce como **ecuación de Bernoulli**.

Figura 21. Elementos de fluido utilizados en la ecuación de Bernoulli



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 157

Cada término de la ecuación de Bernoulli (Ec. 2-6) es el resultado de dividir una expresión de la energía entre el peso de un elemento del fluido. Por consiguiente, es apropiado referirse a las formas resultantes como la *energía poseída por el fluido por unidad de peso de fluido que fluye en el sistema*. Las unidades de cada término pueden ser Newton-metro por Newton ( $N \cdot m/N$ ) en el Sistema Internacional y libras-pies por libra ( $lb. \cdot pie/lb.$ ) en el Sistema Británico de Unidades.

Pero la unidad de peso, el Newton (N) o la libra (lb.), pueden cancelarse, dejando solamente una unidad de longitud, el metro (m) o el pie.

Por tanto, los términos de la ecuación de Bernoulli se conocen, a menudo como “cabezas”, refiriéndose a una altura por encima de un nivel de referencia. El término  $p/\gamma$  se conoce como *cabeza de presión*; a  $z$  se le llama *cabeza de elevación*; y al término  $v^2/2g$  se le conoce como *cabeza de velocidad*. La suma de las tres se conoce como cabeza total. Debido a que cada término representa una altura, un diagrama parecido al que se presenta en la figura 22 es de utilidad para visualizar la relación entre los tres tipos de energía. Observar que, debido a la suposición de que no se pierde o se agrega energía, la cabeza total permanece a un nivel constante. Entonces, la altura relativa de cada término de cabeza varía según lo establecido por la ecuación de Bernoulli.

En la figura 22 se ve que la cabeza de velocidad en la sección 2 será menor que en la sección 1. Esto se puede mostrar mediante la ecuación de continuidad.

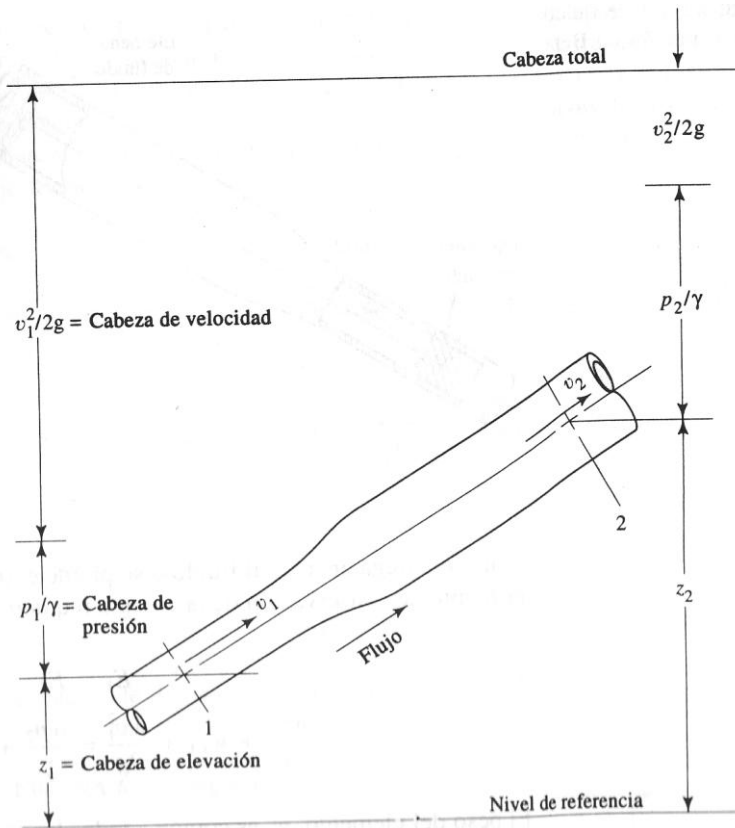
$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = v_1 \left( \frac{A_1}{A_2} \right)$$

Puesto que  $A_1 < A_2$ ,  $v_2$  debe ser menor que  $v_1$ . Y como la velocidad está al cuadrado en el término correspondiente a la cabeza de velocidad,  $v_2^2/2g$  es menor que  $v_1^2/2g$ .

Típicamente, cuando el tamaño de la sección se expande como lo hace en la figura 22, la cabeza de presión aumenta debido a que disminuye la cabeza de velocidad. Esta es la forma en que se construyó la figura 21. Sin embargo, el cambio real también se ve afectado por el cambio en la cabeza de elevación.

Figura 22. Cabeza de presión, cabeza de elevación, cabeza de velocidad y cabeza total



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 158

En suma, la ecuación de Bernoulli explica el cambio en las cabezas de elevación, presión y de velocidad entre dos puntos en un sistema de flujo de fluido. Se supone que no existen pérdidas o ganancias de energía entre los dos puntos, de modo que la cabeza total permanece constante.

Cuando se escribe la ecuación de Bernoulli, es esencial que la presión en los dos puntos de referencia se expresen como presiones absolutas o como presiones manométricas. Es decir, deben tener las dos la misma presión de referencia. En la mayoría de los problemas será conveniente utilizar la presión manométrica pues partes del sistema de fluido expuesto a la atmósfera tendrán entonces presión cero. Se tiene también



que la mayoría de las presiones son medidas con un manómetro con respecto a la presión atmosférica local.

Aunque la ecuación de Bernoulli es aplicable a una gran cantidad de problemas prácticos, existen algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta con el fin de aplicar la ecuación de manera correcta.

- Es válida solamente para fluidos incomprensibles, puesto que el peso específico del fluido se tomó como el mismo en las dos secciones de interés.
- No puede haber dispositivos mecánicos entre las dos secciones de interés que pudieran agregar o eliminar energía del sistema, ya que la ecuación establece que la energía total del fluido es constante.
- No puede haber transferencias de calor hacia adentro o afuera del fluido.
- No pueden haber pérdidas de energía debido a la fricción.

En realidad, ningún sistema satisface estas restricciones. Sin embargo, existen muchos sistemas para los cuales solamente se tendrá un error despreciable cuando se les aplica la ecuación de Bernoulli. Por otro lado, el uso de tal ecuación puede permitir una rápida estimación de un resultado, cuando eso es todo lo que se necesita.

### **2.6.2. Fuerzas desarrolladas por fluidos en movimiento**

Las fuerzas que pueden intervenir en los problemas de mecánica de fluidos son:

- La fuerza de la *gravedad*.
- La fuerza causada por la *diferencia de presiones*. Si un carrito que puede rodar sin rozamiento sobre un plano horizontal es empujado

por la derecha y por la izquierda con una fuerza de 10 N el carro no se mueve. *La presión por ambos lados es igual.* Si Por el lado derecho la fuerza es de 10 N y por el lado izquierdo la fuerza es de 5 N *hay un gradiente de presiones* y el carro se moverá hacia la izquierda en el sentido decreciente del gradiente de presiones. (En un fluido en reposo hay un gradiente de presiones y la fuerza que este gradiente origina está en equilibrio con la fuerza de gravedad.)

- La fuerza de *viscosidad*. Es nula en el *fluido ideal*.
- La fuerza de la *elasticidad*. No entra en juego en el *fluido incompresible*.
- La *tensión superficial*. Juega de ordinario papel poco importante

La fuerza de gravedad es *externa* al fluido (la ejerce la tierra con su atracción). Las otras son *internas*. Además en problemas concretos pueden intervenir otras fuerzas externas.

Siempre que la magnitud o dirección de la velocidad de un cuerpo cambie, se requiere una fuerza para llevar a cabo dicho cambio. La segunda ley de Newton del movimiento se utiliza con frecuencia para expresar este concepto en forma matemática; la manera más común es:

$$\vec{F} = ma \quad (2-7)$$

Fuerza es igual a masa por aceleración. La aceleración es la rapidez de cambio de la velocidad. Sin embargo, puesto que la velocidad es una cantidad vectorial que tiene tanto magnitud como dirección, cambiando ya sea la magnitud o la dirección el resultado será una aceleración. De acuerdo con la ecuación (2-7), se requiere de una fuerza externa para provocar el cambio.

La ecuación (2-7) es apropiada para su utilización con cuerpos sólidos, puesto que la masa permanece constante y la aceleración del cuerpo completo se puede determinar. En problemas de flujo de fluidos, un flujo continuo provoca que se presente una aceleración, por lo que es apropiada una forma diferente de la ecuación de Newton. Debido a que la aceleración es la rapidez de cambio de la velocidad, la ecuación (2-7) puede escribirse como:

$$F = ma = m \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (2-8)$$

El término  $m/\Delta t$  puede interpretarse como la velocidad de flujo de masa, esto es, la cantidad de masa fluyendo en un determinado lapso. En el análisis de flujo de fluidos, la velocidad de flujo de masa se indica por el símbolo de  $M$ . Asimismo,  $M$  se relaciona con la velocidad de flujo de volumen  $Q$  por la relación:

$$M = \rho Q \quad (2-9)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido. Por consiguiente, la ecuación (2-9) se puede escribir como:

$$F = \left( \frac{m}{\Delta t} \right) \Delta v = M \Delta v = \rho Q \Delta v \quad (2-10)$$

Esta es la forma general de la ecuación de fuerza para utilizarse en problemas de flujo de fluidos debido a que involucra la velocidad y la velocidad de flujo de fluidos, los cuales son términos que en general se conocen en un sistema de flujo de fluidos. En forma escalar y en una misma dirección:

Sustituyendo  $Q = AV$ ,

$$F_x = \rho A V_x^2$$

Ejemplo:

Un chorro de aceite de 5 cm de diámetro choca contra una placa mantenida en posición normal al eje del chorro. Para una velocidad del chorro de 25 m/s, calcular la fuerza ejercida sobre la placa por el aceite de densidad relativa 0.85.

$$F = \rho A V^2$$

Donde

$\rho$  = densidad del aceite expresada en  $kg \frac{kg}{m^3}$

A = área del chorro

V = velocidad del chorro

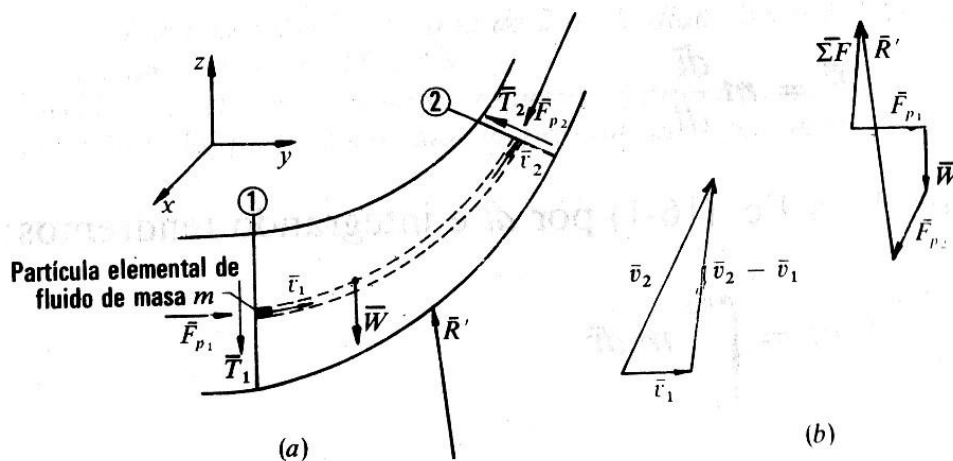
$$F = 850 \frac{kg}{m^3} \cdot \left( \frac{\pi}{4} \cdot (0.05m)^2 \right) \cdot \left( 25 \frac{m}{s} \right)^2 = 1043.1 \frac{kg \cdot m}{s} = 1043.1N$$

Fuente: Díaz Ortiz Jaime Ernesto. **Mecánica de los Fluidos e Hidráulica**. Colección Ciencias Físicas, Exactas y Naturales. Programa Editorial Universidad del Valle. Pág. 252.

### 2.6.3. Conservación de la cantidad de movimiento

El teorema del impulso o de la cantidad de movimiento junto con la ecuación de continuidad y el teorema de Bernoulli, son las tres ecuaciones básicas en la resolución de problemas de Mecánica de Fluidos.

Figura 23. Deducción del teorema de impulso.



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 330

La ecuación de fuerza, ecuación (2-10), se relaciona con otro principio de la dinámica de fluidos, la *ecuación impulso-momentum*. El impulso se define como la fuerza que actúa sobre un cuerpo en un período y se indica por:

$$IMPULSO = F(\Delta t)$$

Esta forma, la cual depende del cambio total en tiempo  $\Delta t$ , es la apropiada cuando se esté tratando con condiciones de flujo estacionario. Cuando cambien las condiciones, se utiliza la ecuación en su forma instantánea.

$$IMPULSO = F(dt)$$

Donde  $dt$  es la cantidad de cambio en tiempo expresada en forma diferencial.

El *momentum* se define como el producto de la masa de un cuerpo y su velocidad. El *cambio* de momentum es:

$$\text{Cambio de momentum} = m(\Delta v)$$

En un sentido instantáneo:

$$\text{Cambio de momentum} = m(dv)$$

Ahora la ecuación (2-8) puede reagruparse en la forma:

$$F(\Delta t) = m(\Delta v)$$

Aquí está demostrada la ecuación impulso-momentum para condiciones de flujo estacionario. En un sentido instantáneo:

$$F(dt) = m(dv)$$

En los problemas que involucran fuerzas se deben tomar en cuenta las direcciones en las que éstas actúan. En la ecuación (2-10), la fuerza y la velocidad son cantidades vectoriales. La ecuación es válida solamente cuando todos los términos tengan la misma dirección. Por esta razón, existen diferentes ecuaciones para cada dirección de interés en un caso particular. En general, si las tres direcciones perpendiculares se llaman  $x$ ,  $y$  y  $z$ , puede escribirse una ecuación en forma separada para cada dirección:

$$F_x = \rho Q \Delta v_x = \rho Q (v_{2_x} - v_{1_x})$$

$$F_y = \rho Q \Delta v_y = \rho Q (v_{2_y} - v_{1_y})$$

$$F_z = \rho Q \Delta v_z = \rho Q (v_{2_z} - v_{1_z})$$

En una dirección en particular, digamos  $x$ , el término  $F_x$  se refiere a la fuerza externa neta que actúa sobre el fluido en esa dirección. Por lo tanto, es la suma algebraica de *todas* las fuerzas externas, incluyendo la que es ejercida por una superficie sólida y las fuerzas debido a la presión del fluido.

El término  $\Delta u_x$  se refiere al cambio de velocidad en la dirección  $x$ . Asimismo,  $u_1$  es la velocidad con la que el fluido ingresa al dispositivo y  $u_2$  es la velocidad a la que éste lo abandona. Por consiguiente,  $u_{1x}$  es la componente de  $u_1$  en la dirección  $x$  y  $u_{2x}$  es la componente de  $u_2$  en la dirección  $x$ .

El método específico en problemas que utilizan la ecuación de fuerza depende en alguna forma de la naturaleza de los datos proporcionados.





## 3. MÉTODOS EXPERIMENTALES

### 3.1. Métodos para determinar la viscosidad

Los procedimientos y el equipo para medir la viscosidad son numerosos. Algunos emplean los principios fundamentales de la Mecánica de Fluidos para tener la viscosidad en sus unidades básicas. Otros indican exclusivamente valores relativos de la viscosidad que se pueden utilizar para comparar diferentes fluidos.

La Sociedad Norteamericana para Pruebas y Materiales (ASTM) por sus siglas en ingles, genera normas para la medición y el informe de viscosidades.

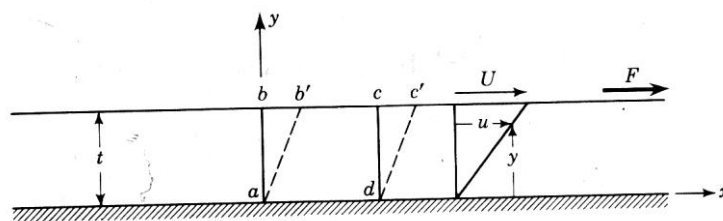
#### 3.1.1. Fórmula del esfuerzo cortante-deformación

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se somete a un esfuerzo cortante, sin importar cuán pequeño sea ese esfuerzo. Una fuerza cortante es el componente de fuerza tangente a una superficie, y esta fuerza dividida por el área de la superficie es el esfuerzo cortante promedio sobre el área. El esfuerzo cortante en un punto es el valor límite de la fuerza cortante al área cuando ésta se reduce al punto.

En la figura 24 se coloca una sustancia entre dos placas paralelas, separadas una distancia pequeña, siendo ellas lo suficientemente grandes para que las condiciones en sus orillas se puedan despreciar. La placa inferior es fija y se aplica una fuerza  $F$  a la placa superior, ejerciéndose entonces un esfuerzo cortante  $F/A$  sobre cualquier sustancia entre las

placas.  $A$  es el área de la placa superior. Cuando la fuerza  $F$  provoca que la placa superior se mueva con una velocidad uniforme (que no sea cero), sin que importe lo pequeña que sea la magnitud de  $F$ , se puede concluir que la sustancia entre las dos placas es un fluido.

Figura 24. Deformación resultante de la aplicación de una fuerza cortante constante



Fuente: Streeter Victor L. y E. Benjamín Wylie. **Mecánica de los fluidos**. Pág. 4

El fluido en contacto inmediato con una frontera sólida tiene la misma velocidad que la frontera, es decir, no hay deslizamiento en la frontera.

Este es un hecho experimental que ha sido verificado muchas veces en pruebas con varias clases de fluidos y materiales de frontera. El fluido en el área  $abcd$  fluye a la nueva posición  $ab'c'd'$ , con cada partícula del fluido en movimiento paralelo a la placa y variando la velocidad  $u$  de modo uniforme desde cero en la placa estacionaria hasta  $U$  en la placa superior. Los experimentos muestran que, siendo constantes otras cantidades,  $F$  es directamente proporcional a  $A$  y a  $U$  e inversamente al espesor  $t$ . En forma de ecuación

$$F = \mu \frac{AU}{t}$$

Donde  $\mu$  es el factor de proporcionalidad e incluye el efecto del fluido en particular. Si  $\tau = F/A$  para el esfuerzo cortante,

$$\tau = \mu \frac{U}{t}$$

La razón  $U/T$  es la velocidad angular de la línea  $ab$ , o es la *rapidez de deformación angular* del fluido, es decir, la rapidez de decremento del ángulo  $bad$ . La velocidad angular también se puede escribir  $du/dy$ , ya que  $U/t$  y  $du/dy$  expresan la velocidad de cambio dividida por la distancia sobre la cual ocurre el cambio. Sin embargo,  $du/dy$  es más general, ya que es válida para situaciones en las que la velocidad angular y el esfuerzo cortante cambian con  $y$ . El gradiente de velocidad  $du/dy$  también se puede visualizar como la rapidez con la que una capa se mueve en relación con una capa adyacente. En forma diferencial, la ecuación

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

Esta es la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de la deformación angular por el flujo unidimensional de un fluido. El factor de proporcionalidad  $\mu$  se denomina *viscosidad* del fluido, y la ecuación anterior es la *ley de viscosidad de Newton*.

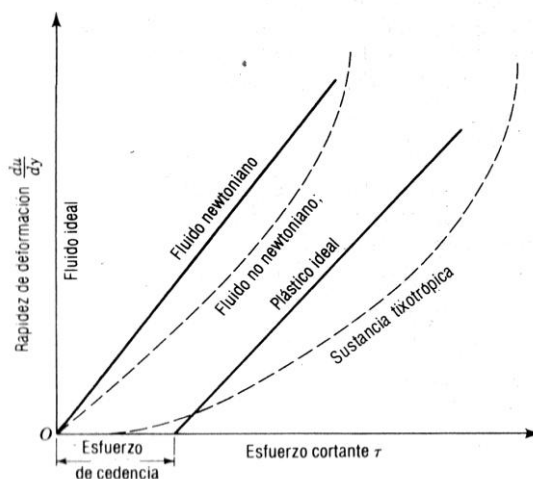
Otros materiales diferentes de los fluidos no pueden satisfacer la definición de un fluido. Una sustancia plástica se deformará cierta cantidad proporcional a la fuerza, pero no continuamente cuando el esfuerzo aplicado es menor que el esfuerzo cortante cedente. Un vacío completo entre las placas causaría deformación con una rapidez siempre en aumento. Si se colocara arena entre las dos placas, la fricción de Coulomb requeriría una fuerza finita para causar un movimiento continuo. Por tanto, plásticos y sólidos se excluyen de la clasificación de fluidos.

Los fluidos se clasifican en newtonianos y no newtonianos. En el flujo newtoniano hay una relación lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante

aplicado y la rapidez de deformación resultante ( $\mu$  constante en la ecuación), como se muestra en la figura 25. En el fluido no newtoniano hay una relación no lineal entre la magnitud del esfuerzo cortante aplicado y la rapidez de deformación angular. Un *plástico ideal* tiene un esfuerzo de cadencia definido y una relación lineal constante entre  $\tau$  y  $du/dy$ . Una sustancia tixotrópica, como la tinta de impresión tiene una viscosidad que depende de la deformación angular inmediatamente anterior de la sustancia y tiende a asentarse cuando está en reposo. Los gases y los líquidos delgados tienden a ser fluidos newtonianos, mientras que los hidrocarburos espesos de cadena larga pueden ser no newtonianos.

Para fines de análisis, frecuentemente se supone que un fluido es no viscoso. Con viscosidad nula, el esfuerzo cortante es siempre cero, sin importar el movimiento del fluido. Si el fluido se considera también incompresible se denomina entonces fluido ideal y se traza como la ordenada en la figura 25.

Figura 25. Diagrama reológico



Fuente: Streeter Victor L. y E. Benjamín Wylie. **Mecánica de los fluidos**. Pág.5

### 3.1.2. Grados SAE

La Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE) ha desarrollado un sistema de valoración en aceites para motor (tabla III) y lubricantes de engranajes y de ejes (tabla IV) que indica la viscosidad de los aceites a temperaturas específicas. Los aceites que tienen el sufijo W deben tener viscosidades cinemáticas en los intervalos indicados a 100° C. Los aceites de multiviscosidad, como el SAE 10W-30, deben cumplir con las normas en las condiciones de baja y de altas temperaturas.

Tabla III. Grados de viscosidad SAE de aceites para motor

Grado de viscosidad SAE	Baja temperatura—Viscosidad dinámica		Alta temperatura	
	Condición de manivela*	Condición de bombeo <sup>#</sup>	Viscosidad cinemática a 100 °C (cSt) <sup>+</sup>	
	(cP) Máx. a (°C)	(cP) Máx. a (°C)	Mín.	Máx.
0W	3250 a -30	30 000 a -35	3.8	—
5W	3500 a -25	30 000 a -30	3.8	—
10W	3500 a -20	30 000 a -25	4.1	—
15W	3500 a -15	30 000 a -20	5.6	—
20W	4500 a -10	30 000 a -15	5.6	—
25W	6000 a -5	30 000 a -10	9.3	—
20	—	—	5.6	< 9.3
30	—	—	9.3	< 12.5
40	—	—	12.5	< 16.3
50	—	—	16.3	< 21.9
60	—	—	21.9	< 26.1

Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 37

La especificación de valores de viscosidad máxima a baja temperatura para aceites está relacionada con la capacidad del aceite para fluir hacia las superficies que necesitan lubricación, a las velocidades de motor que se alcanzan durante el inicio del funcionamiento a bajas temperaturas. La viscosidad de bombeo indica la capacidad del aceite para fluir hacia la entrada de la bomba de aceite de un motor.

Las especificaciones del intervalo de viscosidades a altas temperaturas se relacionan con la capacidad del aceite de proporcionar una película de aceite satisfactoria para llevar las cargas esperadas mientras no se tenga una viscosidad excesivamente alta que pudiera aumentar la fricción y las pérdidas de energía generadas por las partes en movimiento.

Las normas siguientes se aplican a las clasificaciones SAE y a los métodos de prueba:

SAE J300	Clasificación de viscosidad de aceite para motor.
SAE J306	Clasificación de viscosidad lubricante de transmisión manual y de eje.
ASTM D445	Método estándar de prueba para viscosidad cinemática de líquidos transparentes y opacos.
ASTM D446	Especificaciones estándar e instrucciones de operación para viscosímetros cinemáticos capilares de vidrio.
ASTM D2602	Método de prueba estándar para viscosidad aparente de aceites para motor a baja temperatura utilizando el simulador de manivela fría.
ASTM D2983	Método de prueba para viscosidad aparente a baja temperatura utilizando el Viscosímetro de Brookfield.

ASTM D3829 Método de prueba estándar para predecir la temperatura de bombeo de frontera de aceite para motor.

ASTM D4684 Método de prueba estándar para la determinación de la tensión de producción y la viscosidad aparente de aceites para motor a baja temperatura.

Tabla IV. Grados de viscosidad SAE para lubricantes de transmisiones de eje y manuales

Grado de viscosidad SAE	Temperatura máxima para viscosidad dinámica de 150 000 cP (°C)	Viscosidad cinemática a 100 °C (cSt) <sup>#</sup>	
		Mín.	Máx.
70W	-55	4.1	—
75W	-40	4.1	—
80W	-26	7.0	—
85W	-12	11.0	—
90	—	13.5	<24.0
140	—	24.0	<41.0
250	—	41.0	—

Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 37

Los aceites diseñados para operar a amplios intervalos de temperatura tienen aditivos especiales que sirven para aumentar el índice de viscosidad.

Un ejemplo es un aceite para motor multiviscoso que debe cumplir con rigurosos límites de viscosidad a baja temperatura, mientras mantiene una viscosidad suficientemente alta a temperaturas de operación de motor más altas, para una lubricación efectiva. También los aceites para el sistema hidráulico automotriz que deben operar con un desempeño parecido tanto en

climas fríos como templados, y los aceites para sistemas hidráulicos de máquinas-herramienta que deben operar al aire libre deben tener altos índices de viscosidad.

La obtención de un alto índice de viscosidad en un aceite, a menudo requiere la mezcla de materiales poliméricos con petróleo. La mezcla resultante puede presentar características no newtonianas, particularmente a bajas temperatura.

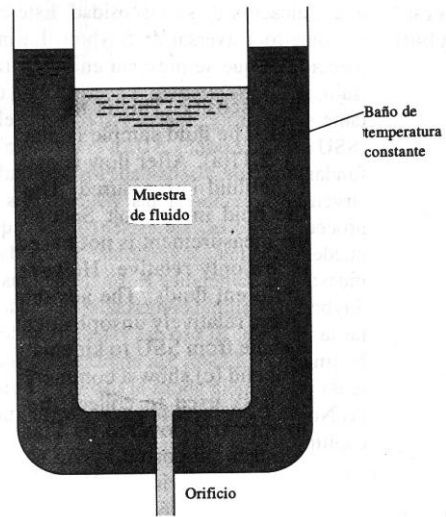
### **3.1.3. Grados Saybolt**

La facilidad con que un fluido fluye a través de un orificio de diámetro pequeño es una indicación de su viscosidad. Este es el principio sobre el cual está basado el viscosímetro universal de Saybolt. La muestra de fluido se coloca en un aparato parecido al que se presenta en la figura 26 (a). Después de que se establece el flujo, se mide el tiempo requerido para coleccionar 60 mL del fluido. El tiempo resultante se reporta como la viscosidad del fluido en Segundos Universales Saybolt (SSU o, en ocasiones, SUS). Puesto que la medición no está basada en la definición fundamental de la viscosidad, los resultados son solamente relativos. Sin embargo, sirven para comparar las viscosidades de diferentes fluidos.

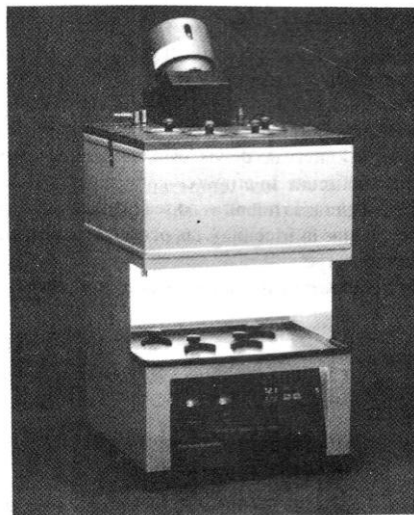
La ventaja de este procedimiento es que es sencillo y requiere un equipo relativamente simple. En las figuras (b) y (c) se muestran el viscosímetro de Saybolt disponible comercialmente y la botella de 60 ml que se utiliza para coleccionar la muestra. El uso del viscosímetro de Saybolt fue cubierto anteriormente por la Norma ASTM D88. Sin embargo, dicha norma ya no es apoyada por la ASTM. Se le da preferencia ahora al uso de los viscosímetros capilares de vidrio descritos en las Normas ASTM D445 y D446.



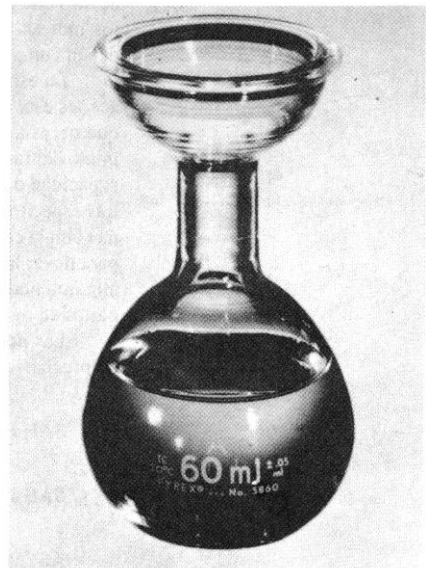
Figura 26. (a) Aparato para recolectar fluido, (b) Viscosímetro universal de Saybolt, (c) Botella de 60 mL para coleccionar la muestra de Saybolt



(a)



(b)



(c)

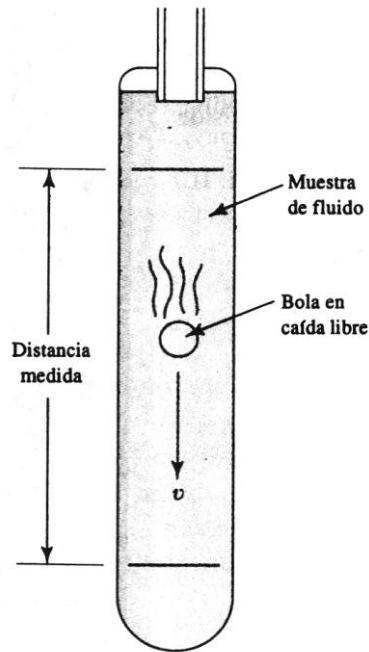
Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 36

### 3.1.4. Caída de bola

Cuando un cuerpo cae en un fluido bajo la sola influencia de la gravedad, se acelera hasta que la fuerza que lo jala hacia abajo (su peso) queda balanceada por la fuerza de flotación y la fuerza de arrastre viscoso que actúan hacia arriba. La velocidad que adquiere en ese momento se conoce como velocidad terminal. El viscosímetro de caída de bola que se presenta en la figura 27 utiliza este principio, haciendo que una bola esférica caiga libremente a través del fluido, midiendo el tiempo requerido para que ésta recorra una distancia conocida. Así pues, la velocidad puede calcularse. En la figura 27 se muestra un diagrama de cuerpo libre de la bola en el que  $w$  es el peso de la bola,  $F_b$  es la fuerza de flotación y  $F_d$  es la fuerza de arrastre viscoso que actúa sobre la bola. Cuando ésta ha alcanzado su velocidad terminal se encuentra en equilibrio, en consecuencia se tiene:

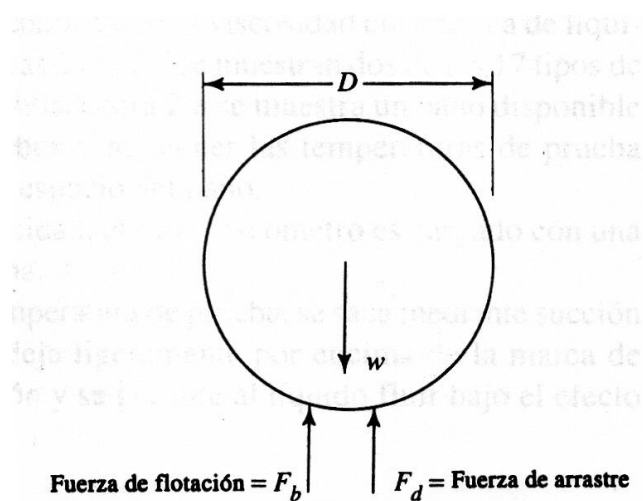
$$w - F_b - F_d = 0 \quad (3-1)$$

Figura 27. Viscosímetro de caída de bola



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 34

Figura 28. Diagrama de cuerpo libre de la bola de un viscosímetro de caída de bola



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 34

Si  $\gamma_s$  es el peso específico de la esfera,  $\gamma_f$  es el peso específico del fluido,  $V$  es el volumen de la esfera y  $D$  es su diámetro, se tiene:

$$w = \gamma_s V = \frac{\gamma_s \pi D^3}{6} \quad (3-2)$$

$$F_b = \gamma_f V = \frac{\gamma_f \pi D^3}{6} \quad (3-3)$$

Para fluidos muy viscosos y una velocidad pequeña, la fuerza de arrastre sobre la esfera es:

$$F_d = 3\pi \mu \nu D \quad (3-4)$$

La ecuación (3-1) queda entonces:

$$\frac{\gamma_s \pi D^3}{6} - \frac{\gamma_f \pi D^3}{6} - 3\pi \mu \nu D = 0$$

Resolviendo para  $\mu$  tenemos:

$$\mu = \frac{(\gamma_s - \gamma_f) D^2}{18\nu} \quad (3-5)$$

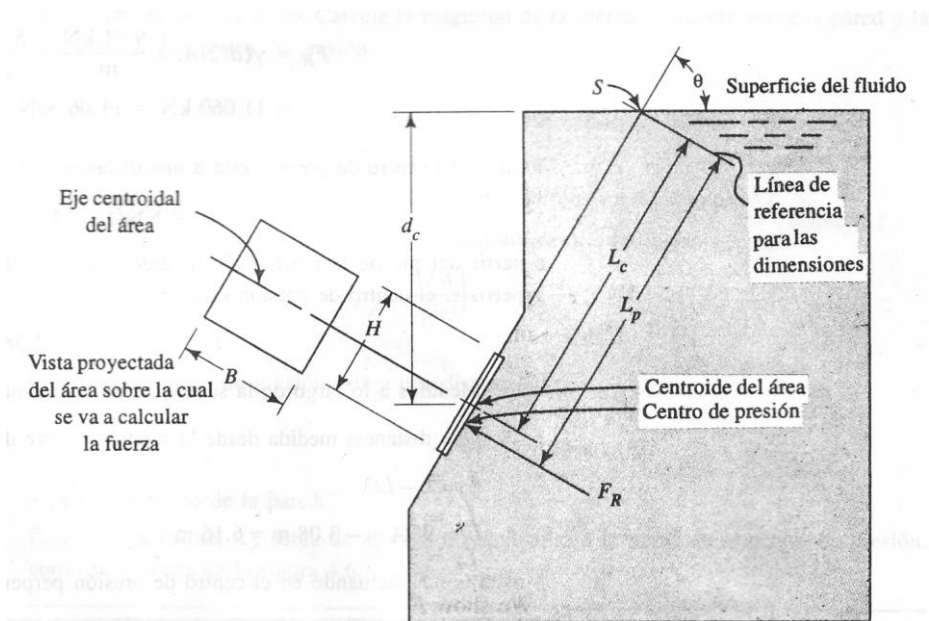
### 3.2. Métodos para determinación de fuerzas hidrostáticas

El procedimiento que se utiliza para analizar en esta sección se aplica a problemas que involucran áreas planas, ya sean verticales o inclinadas y curvas completamente sumergidas en un fluido. Este procedimiento enseña como calcular la magnitud de la fuerza resultante sobre el área y la localización del centro de presión, en donde se puede suponer que actúa la fuerza resultante.

En la figura 29 se muestra un tanque que tiene una ventana rectangular en una pared inclinada. Las dimensiones estándar y los símbolos utilizados en el procedimiento que se describirá más adelante, se muestran en la figura y se definen a continuación:

- $F_R$  Fuerza resultante sobre el área, debida a la presión de fluido.
- El *centro de presión* del área es el punto en el que se puede considerar que actúa la fuerza resultante.
- El *centroide* del área sería el punto de equilibrio de ésta si quedara suspendida de dicho sitio. Es equivalente al centro de gravedad de un cuerpo sólido.
- $\theta$  Ángulo de inclinación del área.
- $d_c$  Profundidad de fluido desde la superficie libre hasta el centroide del área.
- $L_c$  Distancia existente desde la superficie libre del fluido al centroide del área, medida a lo largo del ángulo de inclinación del área.
- $L_p$  Distancia del nivel de la superficie libre del fluido al centro de presión del área, medida a lo largo del ángulo de inclinación del área.
- $B, H$  Dimensiones del área.

Figura 29. Fuerza sobre un área plana sumergida



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 82

El siguiente procedimiento será de utilidad para calcular la magnitud de la fuerza resultante sobre un área plana sumergida, debido a la presión del fluido y para calcular la localización del centro de presión.

1. Identificar el punto en el que el ángulo de inclinación del área de interés intersecta el nivel de la superficie del fluido. Esto puede requerir la extensión de la superficie inclinada. Señalar este punto con  $S$ .
2. Localizar el centroide del área a partir de su geometría.
3. Determinar  $d_c$  como la distancia *vertical* desde el nivel de la superficie libre hasta el centroide del área.
4. Determinar  $L_c$  como la distancia inclinada desde el nivel de la superficie libre hasta el centroide del área. Esta es la distancia desde  $S$  hasta el centroide. Observar que  $d_c$  y  $L_c$  están relacionadas por:

$$d_c = L_c \cdot \text{sen} \theta$$

5. Calcular el área total de A sobre la cual se va a determinar la fuerza.
6. Calcular la fuerza resultante a partir de

$$F_R = \gamma d_c A \quad (3-1)$$

En la que  $\gamma$  es el peso específico del fluido. Esta ecuación establece que la fuerza resultante es el producto de la presión en el centroide del área por el área total.

7. Calcular  $I_c$ , el momento de inercia del área alrededor de su eje centroidal.
8. Calcular la localización del centro de presión a partir de

$$L_p = L_c + \frac{I_c}{L_c A} \quad (3-2)$$

El centro de presión está siempre por debajo del centroide de un área que esté inclinada con respecto de la horizontal. En algunos casos, puede ser de interés calcular solamente la diferencia entre  $L_p$  y  $L_c$  con la ecuación

$$L_p - L_c = \frac{I_c}{L_c A} \quad (3-3)$$

9. Hacer un diagrama de la fuerza  $F_R$  que actúa en el centro de presión, perpendicular al área.
10. Mostrar la dimensión  $L_p$  en el diagrama de manera parecida a la utilizada en la figura 29.
11. Dibujar las líneas de dimensión para  $L_c$  y  $L_p$  a partir de una línea de referencia que pase por el punto S y perpendicular al ángulo de inclinación del área.

### 3.2.1. Fuerza hidrostática sobre superficies planas inclinadas

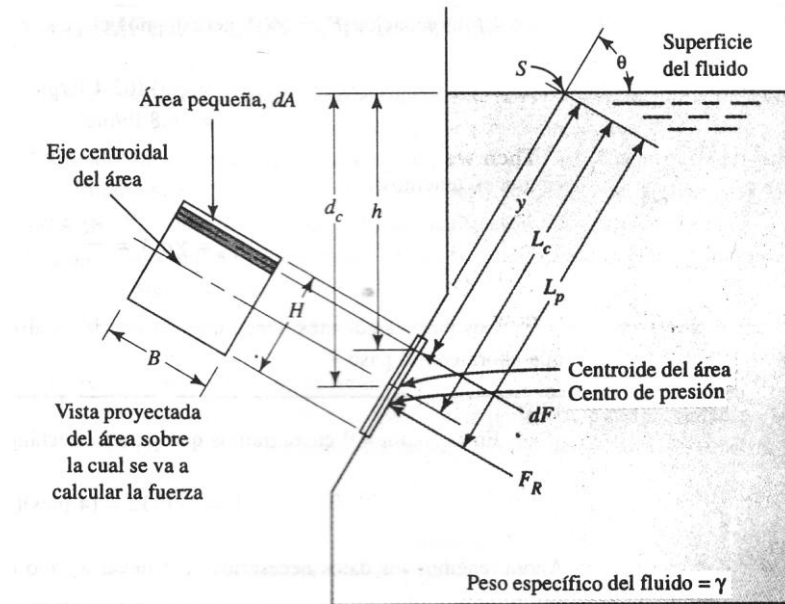
Anteriormente se mostró el uso de los principios para calcular la fuerza resultante sobre un área plana sumergida y para encontrar la localización del centro de presión. La ecuación (3-1) proporciona la fuerza resultante, y la ecuación (3-3), da la distancia entre el centroide del área de interés y el centro de presión.

La *fuerza resultante* se define como la suma de las fuerzas que actúan sobre pequeños elementos del área de interés. En la figura 30 se ilustra el concepto utilizando la misma ventana rectangular que se uso anteriormente. En realidad la forma del área es arbitraria. Sobre un área pequeña  $dA$ , existe una fuerza  $dF$  que actúa perpendicularmente al área debido a la presión de fluido,  $p$ . Pero la magnitud de la presión a una profundidad  $h$  en un líquido estático de peso específico  $\gamma$  es  $p = \gamma h$ . Entonces la fuerza es:

$$dF = p(dA) = \gamma h(dA)$$



Figura 30. Desarrollo del procedimiento general para obtener las fuerzas sobre áreas planas sumergidas



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 86

Puesto que el área presenta una inclinación de ángulo  $\theta$ , es conveniente trabajar en el plano del área, utilizando  $y$  para denotar la posición sobre el área a cualquier profundidad  $h$ . Observar que:

$$h = y \text{ sen } \theta$$

En la que  $y$  se mide desde el nivel de la superficie libre del fluido a lo largo del ángulo de inclinación del área. Entonces,

$$dF = \gamma(y \text{ sen } \theta)(dA)$$

La suma de las fuerzas sobre el área entera se lleva a cabo mediante el proceso matemático de la integración:

$$F_R = \int_A dF = \int_A \gamma(y \text{ sen } \theta)(dA) = \gamma \text{ sen } \theta \int_A y(dA)$$

De la mecánica se sabe que  $\int y(dA)$  es igual al producto del área total por la distancia al centroide de área desde el eje de referencia. Esto es:

$$\int_A y(dA) = L_c A$$

Entonces la fuerza resultante,  $F_R$ , es:

$$F_R = \gamma \text{ sen } \theta (L_c A)$$

Ahora se puede sustituir  $d_c = L_c \text{ sen } \theta$ , lo que da:

$$F_R = \gamma d_c A$$

Ésta tiene la misma forma que la ecuación (3-1). Puesto que cada una de las pequeñas fuerzas,  $dF$ , actúan de manera perpendicular al área, la fuerza resultante actúa en forma semejante.

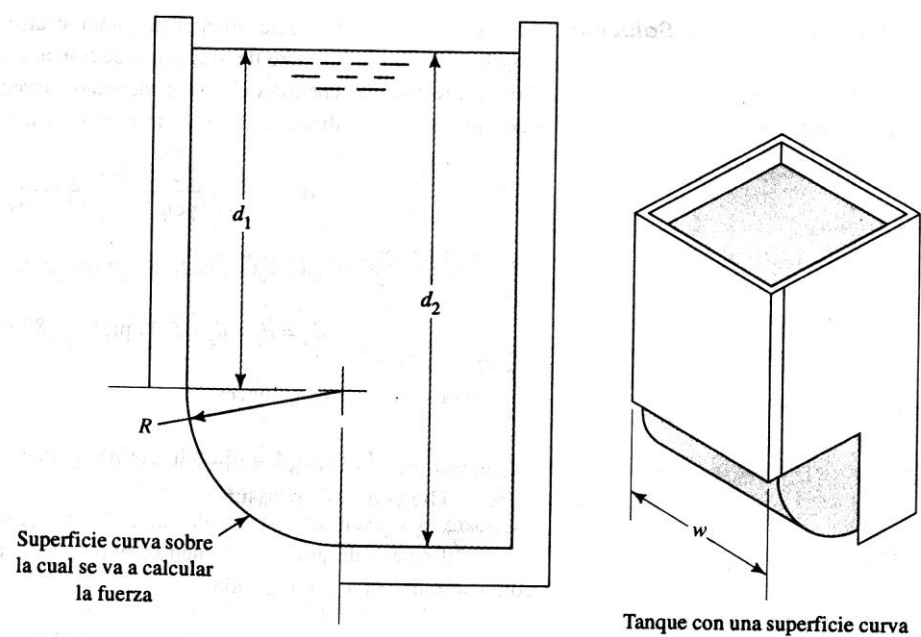
### 3.2.2. Fuerza hidrostática sobre superficies curvas

En la figura 31 se muestra un tanque que contiene un líquido y cuya parte superior está abierta a la atmósfera. Parte de la pared izquierda es vertical, y la parte inferior es un segmento de cilindro. En este caso el interés es en la fuerza que actúa sobre la superficie curva debida a la presión del fluido.

Una forma de visualizar el sistema total de fuerzas implicado consiste en aislar el volumen del fluido que se encuentra directamente por encima de

la superficie de interés como un cuerpo libre y mostrar todas las fuerzas que actúan sobre él, como se muestra en la figura 32. El objetivo, aquí, es determinar la fuerza horizontal,  $F_H$ , y vertical,  $F_V$ , ejercidas sobre el fluido por la superficie curva, y su fuerza resultante,  $F_R$ . La línea de acción de la fuerza resultante actúa a través del centro de curvatura de la superficie curva. Esto es así porque cada uno de los vectores de fuerza individual debido a la presión del fluido actúa perpendicularmente a la frontera, que está, entonces, a lo largo del radio de curvatura. En la figura 32 se muestran los vectores de fuerza resultante.

Figura 31. Tanque con una superficie curva que contiene un fluido estático

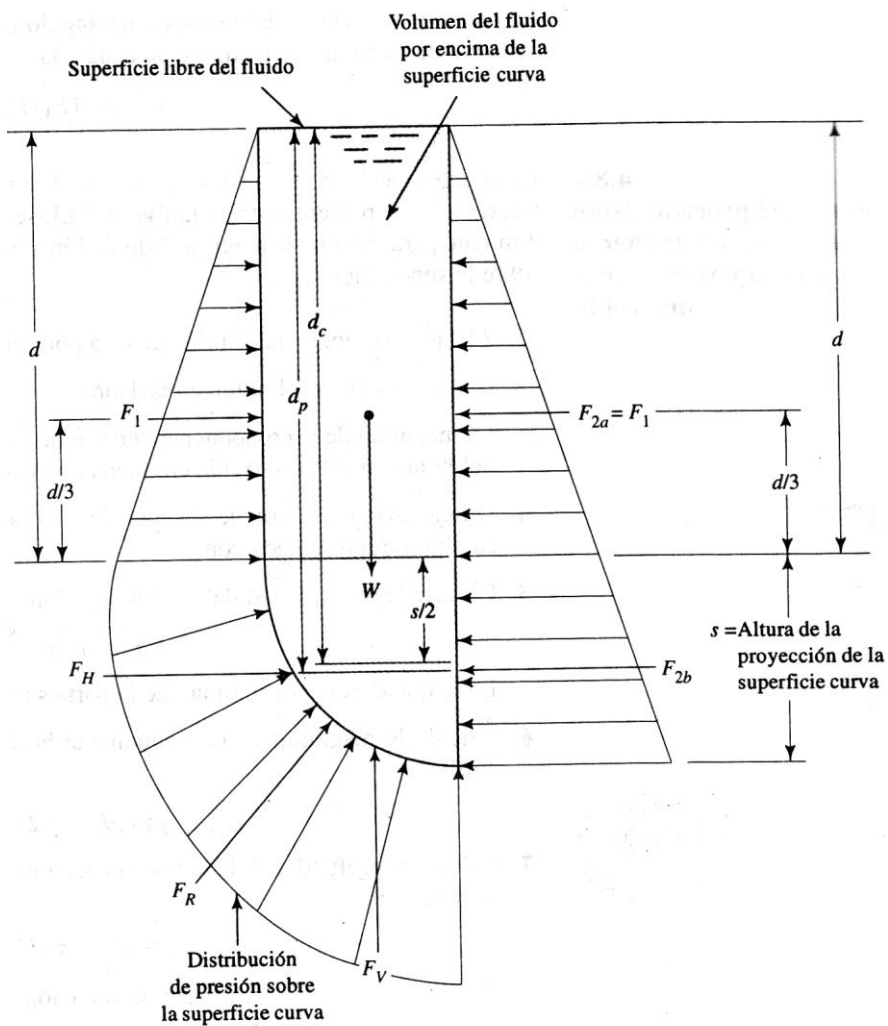


Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 90

La pared sólida vertical que se encuentra a la izquierda ejerce fuerzas horizontales sobre el fluido que está en contacto con ella, como reacción a

las fuerzas debidas a la presión del fluido. La fuerza resultante,  $F_1$ , actúa a una distancia  $d/3$  del pie de la pared.

Figura 32. Diagrama de cuerpo libre del volumen de fluido que se encuentra por encima de la superficie curva



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 91

La fuerza  $F_{2a}$  que actúa sobre el lado derecho de la parte superior a una profundidad  $d$  es igual a  $F_1$  en magnitud, pero actúa en dirección opuesta. Entonces no tiene efecto sobre la superficie curva.

Sumando fuerzas en la dirección horizontal, se puede ver que  $F_H$  debe ser igual a  $F_{2b}$  que actúa sobre la parte inferior del lado derecho. El área sobre la que  $F_{2b}$  actúa es la proyección de la superficie curva en un plano vertical.

La magnitud de  $F_{2b}$  y su posición se pueden encontrar utilizando los procedimientos desarrollados para las superficies planas. Esto es,

$$F_{2b} = \gamma d_c A$$

En la que  $d_c$  es la profundidad a la que se encuentra el centroide del área proyectada. Para el tipo de superficie que se muestra en la figura 32, el área proyectada es un rectángulo. Haciendo  $s$  la altura del rectángulo, se puede ver que  $d = d + s/2$ . Se tiene también que el área es  $sw$ , en la que  $w$  es el ancho de la superficie curva. Entonces,

$$F_{2b} = F_H = \gamma s w (d + s/2)$$

La localización de  $F_{2b}$  es el centro de presión del área proyectada. De nuevo, utilizando los principios desarrollados con anterioridad se obtiene:

$$d_p - d_c = I_c / (d_c A)$$

Pero, para el área rectangular proyectada,

$$I_c = ws^3 / 12$$

$$A = s w$$

Entonces:

$$d_p - d_c = \frac{ws^3}{12(d_c)(sw)} = \frac{s^2}{12d_c}$$

La componente vertical de la fuerza ejercida por la superficie curva sobre el fluido puede encontrarse sumando las fuerzas que actúan en la dirección vertical. Únicamente el peso del fluido actúa hacia abajo, y solamente la componente vertical,  $F_v$  actúa hacia arriba. Entonces, el peso y  $F_v$  deben ser iguales entre sí en magnitud. El peso del fluido es simplemente el producto de su peso específico por el volumen del cuerpo del fluido aislado. El volumen es el producto del área de la sección transversal del volumen que se muestra en la figura 32, y la longitud de interés,  $w$ . Esto es,

$$F_v = \gamma(\text{volumen}) = \gamma Aw$$

La fuerza total resultante,  $F_R$ , es:

$$F_R = \sqrt{F_H^2 + F_v^2}$$

La fuerza resultante actúa formando un ángulo  $\Phi$ , con respecto de la horizontal, y se le puede calcular por medio de la ecuación:

$$\phi = \tan^{-1}(F_v / F_H)$$

### 3.3. Métodos para determinar fuerzas desarrolladas por fluidos en movimiento

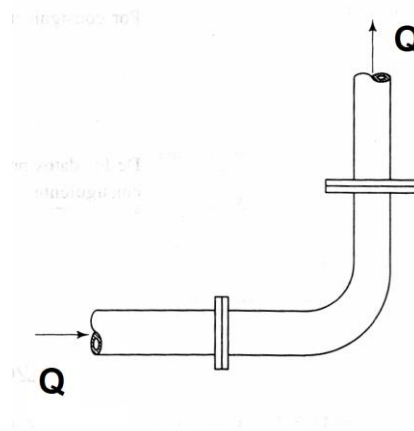
#### 3.3.1. Fuerzas en codos

La figura 33 muestra un codo típico a  $90^\circ$  en una tubería que transporta una velocidad de flujo de volumen estacionario  $Q$ . Con la finalidad de asegurar una instalación adecuada, es importante conocer que cantidad de fuerza se requiere para mantenerlo en equilibrio. El siguiente ejemplo ilustrativo muestra un método de solución de este tipo de situaciones.

Ejemplo:

Calcular la fuerza que debe ejercerse sobre el codo de la tubería que se muestra en la figura 33 para mantener el equilibrio. El codo se encuentra en un plano horizontal y está conectado a dos tuberías Calibre 40 de 4 pulg. que transporta 3000 L/min de agua a  $15^\circ\text{C}$ . La presión de entrada es de 550 kPa.

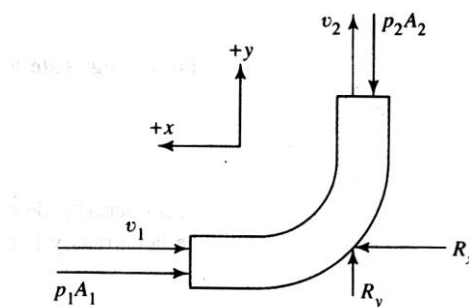
Figura 33. Codo de tubería



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 455

El problema puede visualizarse considerando al fluido dentro del codo como si fuera un cuerpo libre, como se muestra en la figura 34. Las fuerzas se muestran como los vectores  $p_1A_1$  y  $p_2A_2$ , mientras que la dirección de la velocidad de flujo se muestra con los vectores  $v_1$  y  $v_2$ . Se debe establecer una convención para las direcciones de todos los vectores. Aquí se supone que la dirección  $x$  positiva es a la izquierda y la dirección  $y$  positiva es hacia arriba. Las fuerzas  $R_x$  y  $R_y$  son las reacciones externas que se requieren para mantener el equilibrio. Las fuerzas  $p_1A_1$  y  $p_2A_2$  son las fuerzas debido a la presión del fluido. Las dos direcciones se analizarán por separado.

Figura 34. Diagrama de fuerzas del fluido en el codo



Fuente: Mott Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. Pág. 455

Encontrar la fuerza externa neta en la dirección  $x$  utilizando la ecuación:

$$F_x = \rho Q(v_{2_x} - v_{1_x})$$

Pero, se sabe que:

$$F_x = R_x - p_1A_1$$

$$v_{2_x} = 0$$

$$v_{1_x} = -v_1$$



Por consiguiente se tiene:

$$\begin{aligned} R_x - p_1 A_1 &= \rho Q [0 - (-v_1)] \\ R_x &= \rho Q v_1 + p_1 A_1 \end{aligned} \quad (3-4)$$

De los datos proporcionados,  $p_1 = 550 \text{ kPa}$ ,  $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ , y  $A_1 = 8.213 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ , Por consiguiente:

$$Q = 3000 \text{ L/min} \times \frac{1 \text{ m}^3 / \text{s}}{60,000 \text{ L/min}} = 0.05 \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0.05 \text{ m}^3 / \text{s}}{8.213 \times 10^{-3} \text{ m}^2} = 6.09 \text{ m/s}$$

$$\rho Q v_1 = \frac{1000 \text{ kg}}{\text{m}^3} \times \frac{0.05 \text{ m}^3}{\text{s}} \times \frac{6.09 \text{ m}}{\text{s}} = 305 \text{ kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2 = 305 \text{ N}$$

$$p_1 A_1 = \frac{550 \times 10^{-3} \text{ N}}{\text{m}^2} \times (8.213 \times 10^{-3} \text{ m}^2) = 4517 \text{ N}$$

Sustituyendo estos valores en la ecuación (3-4) se obtiene:

$$R_x = (305 + 4517) \text{ N} = 4822 \text{ N}$$

En la dirección y, la ecuación para la fuerza externa neta es:

$$F_y = \rho Q (v_{2,y} - v_{1,y})$$

Pero se sabe que:

$$F_y = R_y - p_2 A_2$$

$$v_{2,y} = +v_2$$

$$v_{1,y} = 0$$

Por consiguiente se tiene:

$$R_x - p_2 A_2 = \rho Q v_2$$

$$R_x = \rho Q v_2 + p_2 A_2$$

Si las pérdidas de energía en el codo se desprecian,  $v_2 = v_1$  y  $p_2 = p_1$ , puesto que las medidas de la entrada y la salida son iguales. Por consiguiente:

$$\rho Q v_2 = 305 \text{ N}$$

$$p_2 A_2 = 4517 \text{ N}$$

$$R_y = (305 + 4517) \text{ N} = 4822 \text{ N}$$

Las fuerzas  $R_x$  y  $R_y$  son las reacciones provocada en el codo a medida que el fluido de una vuelta de  $90^\circ$ . Éstas pueden ser provistas por anclajes en el codo o tomadas de las orillas hasta las tuberías principales.

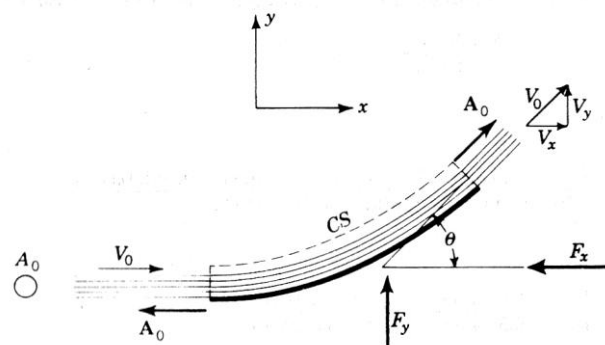
### 3.3.2. Fuerzas en alabes fijos

La teoría de turbo máquinas se basa en las relaciones entre chorros y alabes. La mecánica de transferencia de trabajo y energía de chorros de fluidos a alabes en movimiento se estudia como una aplicación de los principios de cantidad de movimiento.

Cuando un chorro libre golpea un alabe liso que es curvo, como en la figura 35, el chorro se desvía, cambia su cantidad de movimiento y se ejerce una fuerza sobre el alabe. Se supone que el chorro fluye contra el alabe en dirección tangencial, sin choque y, más aún, se desprecia la resistencia de fricción entre el chorro y el alabe. Se supone que la velocidad es uniforme en todo el chorro corriente arriba y corriente abajo del alabe. Ya que el chorro está abierto al aire, tiene la misma presión en cada extremo del alabe. Cuando se desprecia el pequeño cambio de elevación entre los extremos, la

aplicación de la ecuación de Bernoulli muestra que la magnitud de la velocidad no cambia para alabes *fijos*.

Figura 35. Chorro libre que incide sobre un alabe liso y fijo



Fuente: Streeter Victor L. **Mecánica de los fluidos**. Pág. 134

Ejemplo:

Un fluido sale de una larga ranura y golpea contra una placa lisa, plana, inclinada (figura 36). Determinar la división de flujo ejercida sobre la placa despreciando las pérdidas debidas a impacto.

Solución: como no hay cambios en la elevación a presión antes y después del impacto, la magnitud de la velocidad de salida es la misma que la velocidad inicial del chorro. La división de flujo  $Q_1$ ,  $Q_2$  se puede calcular por aplicación de la ecuación de cantidad de movimiento en la dirección  $s$ , paralela a la placa. Ninguna fuerza se ejerce sobre el fluido por la placa en esta dirección; por tanto, el componente de cantidad de movimiento final debe ser igual al componente de cantidad de movimiento inicial en la dirección  $s$ . La ecuación de cantidad de movimiento a régimen permanente para la dirección  $s$ , produce:

$$\sum_{sc} F_x = \int \rho v_s V \cdot dA = 0 = \rho V_o Q_1 + \rho V_o \cos \theta (Q_o) + \rho (-V_o) Q_2$$

$$\rho V_o (V_o) - \rho V_o (V_o A_o) - \rho V_o (V_o A_2) = 0$$

$$V_o A_1 - V_o A_o - V_o A_2 = 0$$

Con la sustitución  $Q_1 = V_o A_1$ ,  $Q_2 = V_o A_2$ , y  $Q_o = V_o A_o$  se reduce a

$$Q_1 - Q_2 = Q_o \cos \theta$$

Y con la ecuación de continuidad,

$$Q_1 + Q_2 = Q_o$$

Las dos ecuaciones se pueden resolver para  $Q_1$  y  $Q_2$ :

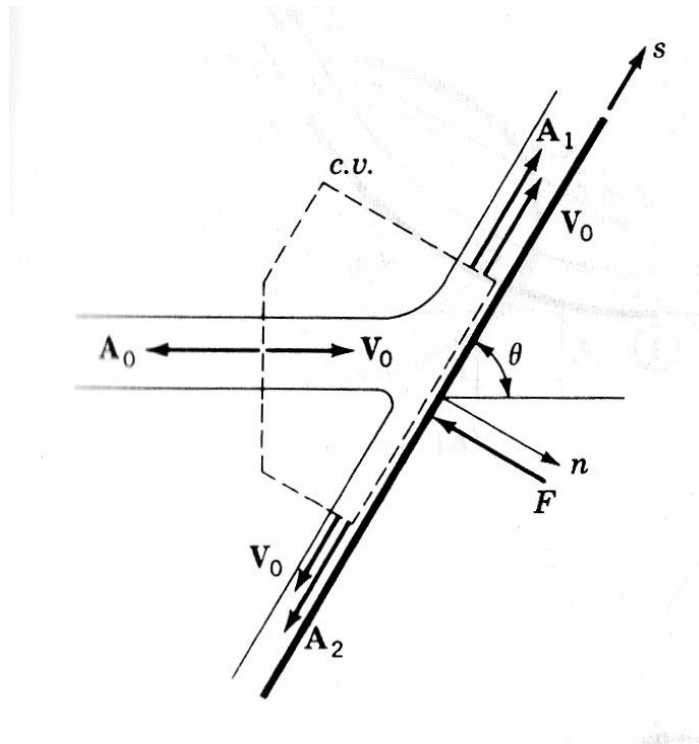
$$Q_1 = \frac{Q_o}{2}(1 + \cos \theta) \quad Q_2 = \frac{Q_o}{2}(1 - \cos \theta)$$

La fuerza  $F$  ejercida sobre la placa debe ser normal a ella. Para la ecuación de movimiento normal a la placa,

$$\sum_{sc} F_n = \int \rho v_n V \cdot dA = -F = \rho V_o \text{sen} \theta (-V_o A_o)$$

$$F = \rho Q_o V_o \text{sen} \theta$$

Figura 36. Chorro bidimensional que incide sobre una superficie plana, inclinada y fija.



Fuente: Streeter Victor L. **Mecánica de los fluidos**. Pág. 135

### 3.3.3. Fuerzas en alabes móviles

La turbo maquinaria utiliza las fuerzas resultantes de movimiento sobre alabes en movimiento. Ningún trabajo puede realizarse sobre o por un fluido que fluye sobre un alabe fijo. Cuando se pueden desplazar los albes, se puede realizar trabajo ya sea sobre el alabe o sobre el fluido. En la figura 37 (a) se muestra un alabe en movimiento con fluido desplazándose tangencialmente sobre ella. Las fuerzas ejercidas sobre un fluido por el alabe se indican por  $F_x$  y  $F_y$ . Para analizar el flujo, el problema se reduce a un régimen permanente por superposición de la velocidad del alabe o a la izquierda (figura 37 (b)) en alabe y fluido.

El volumen de control encierra entonces el fluido en contacto con el alabe con su superficie de control normal al flujo en las secciones 1 y 2. La figura 37 (c) muestra el diagrama vectorial polar para flujo a través del alabe. Los vectores de velocidad absoluta se originan en el punto O, y el vector de velocidad relativa  $V_o - u$  se hace girar a través del ángulo  $\theta$  de la aleta, como se muestra.  $V_2$  es la velocidad absoluta final que abandona el alabe. La velocidad relativa  $v_r = V_o - u$  no cambia de magnitud al pasar por el alabe.

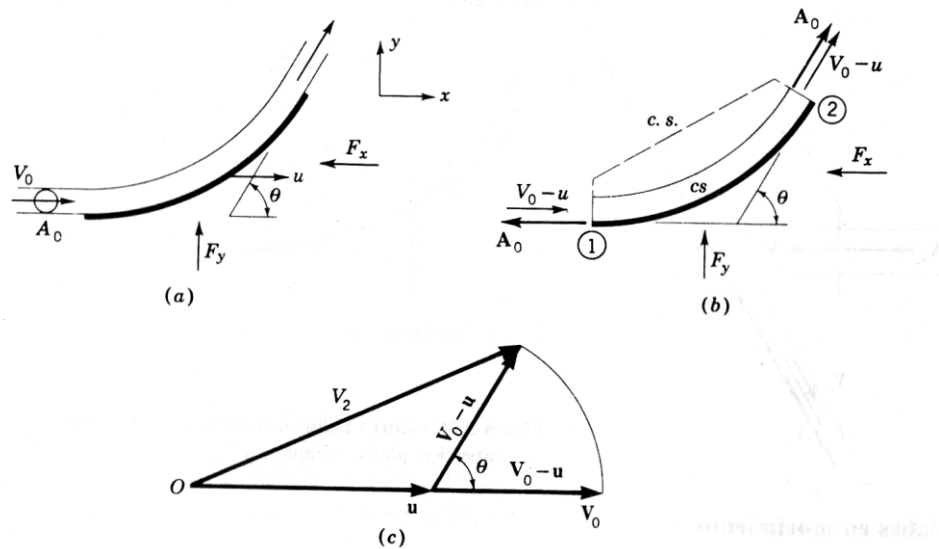
La masa por unidad de tiempo está dada por  $\rho A_o v_r$  y no es la tasa con la que se descarga masa de la boquilla. Si se emplea una *serie de alabes*, como en la periferia de una rueda, arreglados de modo que uno u otro de los choros intercepte todo un flujo de la boquilla y la velocidad sea sustancialmente  $u$ , entonces la masa por segundo corresponde a la masa total por segundo que se descarga. La aplicación de la ecuación de la cantidad de movimiento al volumen de control produce:

$$\sum F_x = \int_{sc} \rho v_x V \cdot dA = -F_x = \rho(V_o - u) \cos \theta [(V_o - u)A_o] + \rho(V_o - u)[- (V_o - u)A_o]$$

o

$$F_x = \rho(V_o - u)^2 A_o (1 - \cos \theta)$$

Figura 37. (a) alabe en movimiento; (b) flujo en alabe visto como problema a régimen permanente por superposición de la velocidad  $u$  a la izquierda; (c) diagrama vectorial polar.



Fuente: Streeter Victor L. **Mecánica de los fluidos**. Pág. 136

$$\sum_{sc} F_y = \int \rho v_y V \cdot dA = F_y = \rho(V_0 - u) \text{sen} \theta [(V_0 - u) A_0]$$

O

$$F_y = \rho(V_0 - u)^2 A_0 \text{sen} \theta$$

Estas relaciones son para un solo alabe. Para una serie de alabe se vuelven

$$F_x = \rho Q_0 (V_0 - u) (1 - \cos \theta) \quad F_y = \rho Q_0 (V_0 - u) \text{sen} \theta$$





## 4. PRÁCTICAS DE LABORATORIO

### 4.1. Fabricación y reconstrucción de los equipos para los ensayos de viscosidad, centros de presión, líneas de corriente e impacto de un chorro.

#### 4.1.1. Equipo para medir la viscosidad de un fluido (Viscosímetro)

Este equipo se fabricó como parte del presente trabajo de graduación, utilizándose los siguientes materiales:

- Angular de 1" X 1" X  $\frac{1}{8}$ ".
- Angular de 1" X  $\frac{1}{8}$ ".
- Lamina de 0.35 m X 0.35 m.
- Cilindro acrílico de 1.40 m de largo.
- Silicón.
- Chorro de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro.
- Pintura color gris

El aparato mostrado en la figura 38 consta de un tubo plástico transparente de 1.40 m de alto, 0.156 m diámetro externo, cerrado en un extremo, y montado en una estructura de metal fabricada con angular de 1" X 1" X  $\frac{1}{8}$ ".

La base de la estructura tiene forma de banco, la cual tiene una base de 0.50 m X 0.50 m y una altura de 0.50 m y sobre ésta se encuentra una lámina de 0.35 m X 0.35 m. Debajo de la lámina se coloca, centrado, un chorro de  $\frac{3}{4}$ " para drenar el fluido ensayado.

La parte superior de la estructura tiene forma rectangular, de 0.25 m X 0.25 m X 1.40 m, con cuatro anillos de metal, el primero pegado a la lámina y los siguientes a cada 0.40 m de distancia. Dentro de esta estructura se instala un tubo acrílico transparente de 0.156 m de diámetro, el cual se une al primer anillo y a la lámina con silicón.

Adicionalmente se cuenta con

- 2 esferas de acero de 19.75 mm de diámetro
- 2 esferas de acero de 27 mm de diámetro
- 1 cinta métrica
- 1 cronómetro
- 1 imán para poder sacar las esferas del fondo del tubo plástico
- 1 termómetro
- Hilo plástico
- Wipe
- Vernier.

Figura 38. Viscosímetro de caída de bola



**Precauciones a ser tomadas en cuenta para su utilización**

- Evitar derramar líquidos
- Tener a mano limpiadores o wipe por los derrames de fluidos, para limpiar las esferas utilizadas

#### **4.1.2. Equipo para determinar la fuerza hidrostática y el centro de presión de un fluido sobre una superficie plana sumergida**

Este equipo se rehabilitó como parte del presente trabajo de graduación utilizándose los siguientes materiales:

- 10 pesas de 50 gr. cada una
- Una pipeta o gotero
- Silicón.
- Acrílico transparente de  $\frac{1}{8}$ ".
- Lubricante afloja todo súper penetrante.
- Aceite tres en uno.

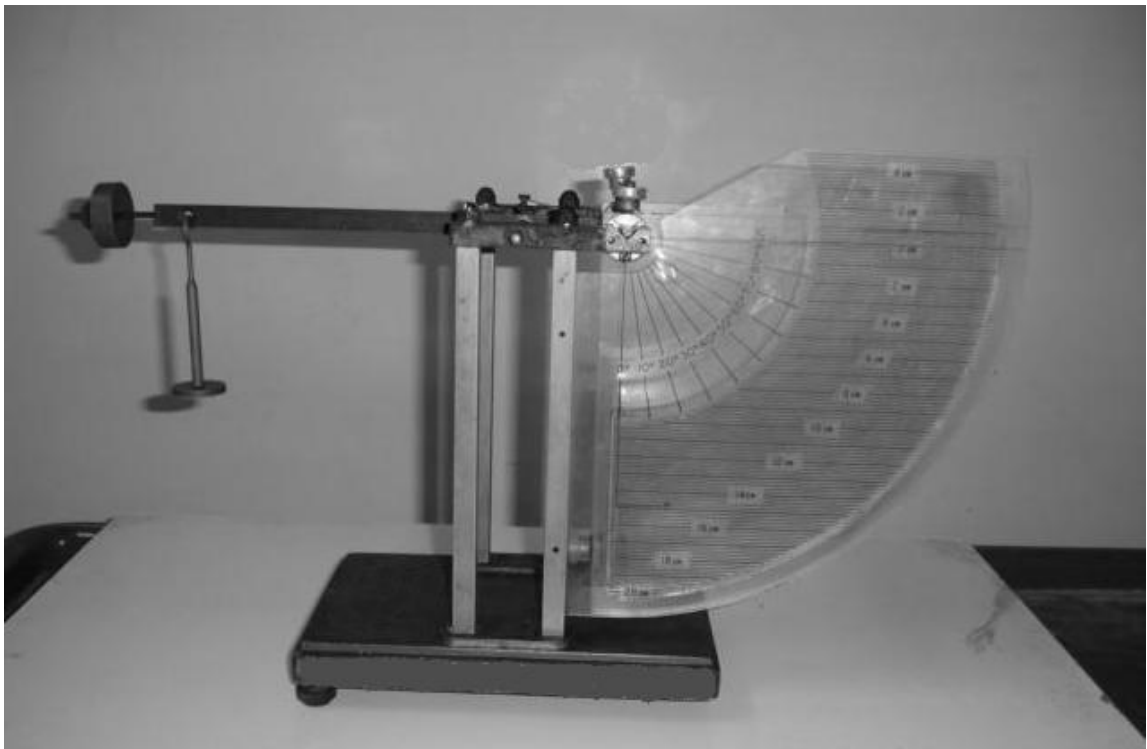
Se fabricó un recipiente en forma de un cuarto de círculo y sección rectangular con acrílico, de 200 mm de radio y 75 mm de ancho, la forma curva sirve para que todas las presiones de la parte curva se anulen y solo haya fuerza hidrostática sobre el área plana, el área plana o compuerta se construyó de acrílico de 75 mm de base y 100 mm de altura, el cuarto de círculo ésta pivotado en su centro.

El equipo cuenta con un brazo de 250 mm de longitud para colocar los pesos de 50 gr cada uno, que servirán para poder mantener la compuerta cerrada cuando está sometido a la fuerza hidrostática.

El equipo de la figura 39 consta de lo siguiente:

- Modelo de cuadrante hidráulico
- Nivel de mano
- Juego de pesas de 50 gr cada una
- 1 beacker de 50 ml
- 1 beacker de 250 ml
- 1 beacker de 1000 ml
- 1 pipeta o gotero

Figura 39. Equipo para determinar la fuerza hidrostática y el centro de presión de un fluido sobre una superficie plana sumergida



### **4.1.3. Equipo para estudiar el comportamiento de las líneas de corriente a través de una figura**

Este equipo se rehabilitó como parte del presente trabajo de graduación utilizándose los siguientes materiales:

- Manguera plástica de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro interno.
- Manguera plástica de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro interno.
- Reducidor de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{1}{4}$ ".
- Lubricante afloja todo súper penetrante (permatex Fast break)
- Depósito metálico cilíndrico de 0.08 m de diámetro y 0.10 m de altura, con válvula de salida de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro en la parte inferior.
- Pintura color gris.
- Lámina para fabricar las figuras a ensayar.

El equipo cuenta con un depósito para agua que se coloca arriba del nivel del depósito de tinta, el cual se une a la cámara hidrodinámica por medio de una manguera de  $\frac{1}{2}$ " de diámetro, un reductor de  $\frac{1}{2}$ " a  $\frac{1}{4}$ " y una manguera de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro.

También se fabricaron, con lámina, las siguientes figuras: una en forma circular de 0.08 m de diámetro, una en forma cuadrada de 0.06 m por lado, una en forma de un triángulo isósceles de 0.10 m de base y 0.10 m de altura, una en forma de triángulo rectángulo de 0.05 m de base y 0.07 m de altura, una figura compuesta y una figura en forma de un perfil de ala de avión.

El equipo sirve para representar líneas paralelas de flujo (figura 40) cuando hay inundación de cuerpos. El equipo opera con agua como medio en circulación.

Se inyecta tinta a través de finos agujeros en una cámara hidrodinámica. La cámara está cubierta con una tapa de vidrio, lo que permite una observación adecuada.

En la cámara de turbulencia se pueden introducir distintos cuerpos de diversas formas. Además, mediante cuatro orificios adicionales, se pueden simular y representar fuentes y depresiones de flujo en la cámara de turbulencia.

Figura 40. Equipo para estudiar el comportamiento de líneas de corriente a través de una figura



Con el equipo se pueden tratar las áreas temáticas siguientes:

- Definición de las líneas de corriente y de la trayectoria en la mecánica de los fluidos.
- Representación de líneas paralelas de corriente en la inundación de cuerpos
- Influencia de cuerpos de diferentes formas sobre la corriente

### **Instrucciones para la utilización del equipo:**

Se procede a la limpiar el equipo con un paño humedecido en agua y jabón, seguidamente se limpian cada uno de los orificios de salida de agua y de tinta de la cámara hidrodinámica plástica del equipo, utilizando un alambre fino. Se procede a aflojar los tornillos niveladores del equipo con el lubricante afloja todo.

Se coloca el depósito pequeño (cilindro de 0.08 m de diámetro y 0.10 m de altura) arriba del nivel del equipo y se conecta con el mismo por medio de la válvula de salida, utilizando una manguera de  $\frac{1}{4}$ " de diámetro. La válvula de salida sirve para controlar el flujo de tinta hacia la cámara hidrodinámica. La tinta se prepara con agua y colorante artificial alimenticio color rojo (de preferencia).



#### **4.1.4. Equipo para determinar la fuerza producida por el impacto de un chorro**

Este equipo se rehabilitó como parte del presente trabajo de graduación utilizándose los siguientes materiales:

- Placa plana de metal de forma cilíndrica, de 3 cm de diámetro y 2 cm de altura
- Placa semiesférica: de forma cilíndrica en la parte exterior, de 3 cm de diámetro y semiesfera de 1.5 cm de radio en la parte interior.
- Una tobera o salida de agua de 4 mm de diámetro
- Un nivel de hilo.
- Un peso de 1.5 N.
- Silicón para sellar la cámara de salida
- Llave de 1/16" tipo Allen.
- Teflón.
- Tubo galvanizado de  $\frac{3}{8}$ " de diámetro para el drenaje del agua.
- Una conexión para manguera de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro.

#### **Instrucciones para la utilización del equipo:**

Como primer paso se procede a la limpieza del equipo utilizando un paño húmedo con agua y jabón. Seguidamente se procede a sellar con silicón la parte inferior del aparato donde se encuentra la cámara de drenaje del equipo.

Luego se coloca la tobera de salida en la tubería que esta dentro del cilindro plástico del equipo, utilizando un poco de teflón para evitar fugas de agua en la unión de la tobera con la tubería de descarga.

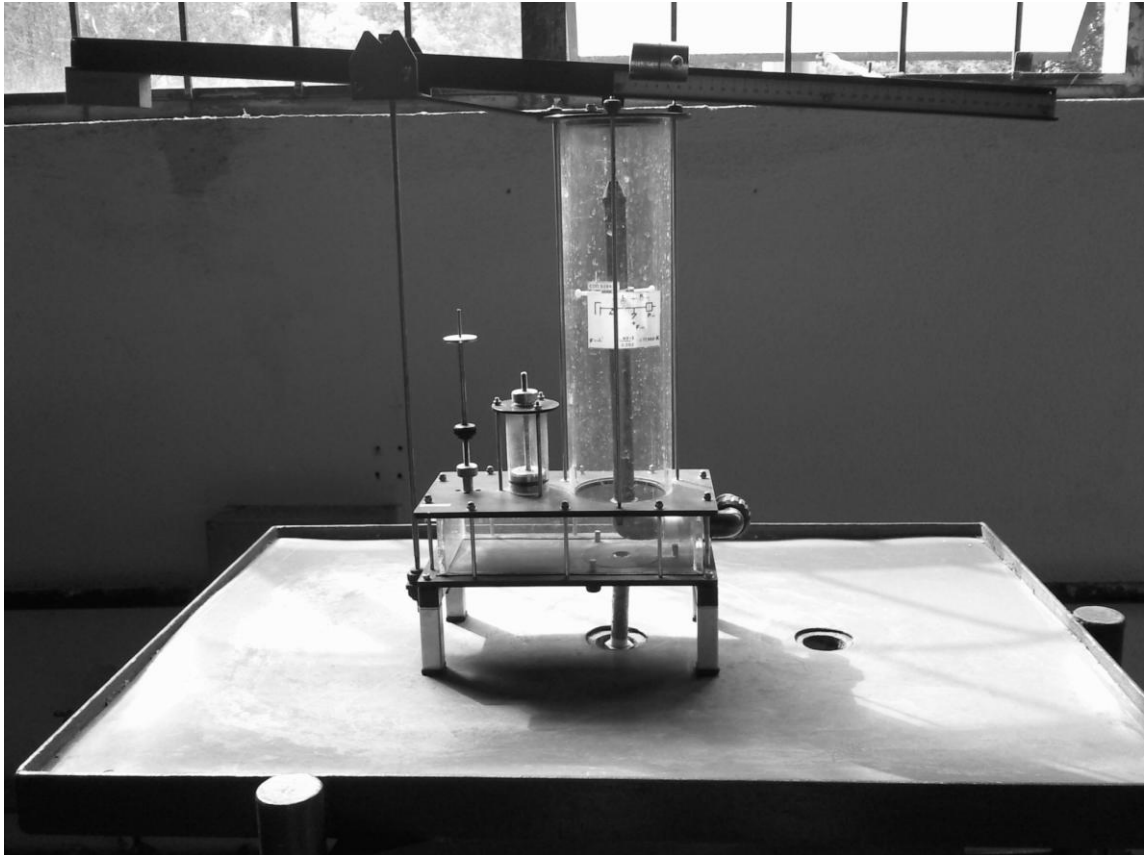
Adicional a esto se debe conectar una manguera de  $\frac{3}{4}$ " de diámetro en la conexión de tubo galvanizado de  $\frac{3}{8}$ " de diámetro que se instaló en la cámara de drenaje del equipo, esto con el fin de poder aforar la cantidad de agua que sale del mismo.

De la tobera sale un chorro, figura 41, que incide sobre una placa que puede ser plana o semiesférica. La fuerza del chorro se transmite a un mecanismo que consiste en un brazo de metal articulado en un pivote. Sobre dicho brazo se coloca una pesa que en determinada posición hace que el sistema esté en equilibrio, de tal manera que la placa está fija cuando impacte el chorro sobre ella.

Cuando actúa el chorro, la pesa deberá colocarse en una posición "k" para que el sistema permanezca estático, mientras que la placa soporta la fuerza  $F$  ejercida por el chorro.

El equipo está cubierto por un cilindro transparente para que no se escape el agua. El caudal drena hacia un tubo que se conecta con el tanque de medición volumétrica de caudales que encuentra debajo de la mesa de prácticas. Se debe de utilizar un cronometro para determinar el tiempo de llenado de dicho recipiente.

Figura 41. Equipo para determinar la fuerza producida por el impacto de un chorro



## 4.2. Ensayo 1. Determinación de la viscosidad de un fluido

### 4.2.1. Objetivos

- Determinar la viscosidad de un aceite utilizando el método de caída de bola.
- Familiarizarse con el manejo de un viscosímetro de caída de bola.

### 4.2.2. Procedimiento para realizar el ensayo

- a) Llenar el tubo completamente con el líquido cuya viscosidad se desea determinar.
- b) Medir el diámetro de las esferas a utilizar para realizar el ensayo y determinar el volumen de éstas, utilizando la expresión.

$$Vol = \frac{1}{6} \pi \phi^3$$

- c) Pesar las esferas en una balanza y determinar la densidad y peso específico, utilizando las expresiones siguientes

$$\rho_e = \frac{masa}{Vol}$$

$$\gamma_e = \rho_e g$$

$$donde \ g = \text{aceleración de la gravedad} = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

- d) Pesar el líquido a ensayar en una probeta de la cual se conozca su volumen y determinar la densidad y peso específico del líquido utilizando la expresión.

$$\rho_f = \frac{m}{Vol}$$

$$\gamma_f = \rho_f g$$

donde  $g = \text{aceleración de la gravedad} = 9.81 \frac{m}{s^2}$

- e) Medir el diámetro interno del tubo plástico y anotarlo
- f) Hacer dos marcas en la parte media del tubo plástico. La distancia entre las dos marcas se medirá con una regla milimetrada o con la escala auxiliar milimetrada dispuesta a tal efecto.
- g) Medir y anotar la temperatura del líquido contenido en el tubo plástico. Conviene repetir esta medida varias veces en el transcurso de la experiencia para asegurarse de que ésta no cambie significativamente.
- h) Si fuese necesario, limpiar bien las esferas y secarlas
- i) Dejar caer una esfera desde corta distancia sobre la superficie libre del líquido problema, en el centro de dicha superficie. La bola deberá descender a lo largo del eje de la probeta o tubo, lejos de las paredes. Medir y anotar el tiempo de tránsito de la bola entre las dos marcas señaladas en la probeta o tubo
- j) Repetir la operación anterior tres veces para reducir el margen de error en el tiempo de tránsito.

### 4.2.3. Cálculos

- a) Determinar el valor medio de los tiempos de tránsito obtenidos anteriormente y, a partir de éste, calcular la velocidad media de caída.

$$v_m = \frac{d}{t}$$

- b) Aplicar la corrección para obtener la velocidad límite corregida.

$$v_{\text{lim}} = \left(1 + 2.4 \frac{D}{\phi}\right) v_m$$

donde  $\phi$  = es el diámetro interno del tubo.

$D$  = diámetro de la esfera

$v_m$  = velocidad media

- c) Calcular el valor del coeficiente de viscosidad o viscosidad dinámica del líquido utilizando la expresión.

$$\mu = \frac{(\gamma_e - \gamma_f)}{18v_{\text{lim}}}$$

- d) Calcular la viscosidad cinemática utilizando la expresión

$$v_c = \frac{\mu}{\rho_f}$$

## Medidas preliminares

$$D_e = 1.975 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$m_e = 3.18 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

$$m_f = 7.5 \times 10^{-2} \text{ kg}$$

$$\text{Vol. tara} = 80 \text{ ml} = 80 \text{ cm}^3 = 8 \times 10^{-5} \text{ m}^3$$

$$\text{Distancia entre marcas} = 0.466 \text{ m}$$

$$\varnothing_{\text{Int. Tubo}} = 0.138 \text{ m}$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

## Cálculo de la densidad de la esfera

$$\rho_e = \frac{m_e}{\text{Vol}} = \frac{3.18 \times 10^{-2}}{4.03 \times 10^{-6}}$$

$$\rho_e = 7883 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma_e = \rho_e g = 7883 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\gamma_e = 77338 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

## Cálculo de la densidad del fluido

$$\rho_f = \frac{m_f}{\text{Vol. Tara}} = \frac{7.5 \times 10^{-2} \text{ kg}}{8 \times 10^{-5} \text{ m}^3}$$

$$\rho_f = 937.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\gamma_f = \rho_f g = 937.5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\gamma_e = 9196.88 \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

### Cálculo de la velocidad media

$$t_1 = 0.65 \text{ s};$$

$$t_2 = 0.65 \text{ s};$$

$$t_3 = 0.61 \text{ s}$$

$$\bar{t} = 0.64 \text{ s}$$

$$v_m = \frac{d}{t} = \frac{0.466 \text{ m}}{0.64 \text{ s}}$$

$$v_m = 0.728 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

### Velocidad corregida

$$v_{\text{lim}} = \left( 1 + 2.4 \frac{D}{\phi_{\text{Int.Tubo}}} \right) v_m$$

$$v_{\text{lim}} = \left( 1 + 2.4 \left( \frac{1.975 \times 10^{-2} \text{ m}}{0.138 \text{ m}} \right) \right) \cdot 0.72 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$



$$v_{\text{lim}} = 0.96 \frac{m}{s}$$

### Cálculo de la viscosidad dinámica

$$\mu = \frac{(\gamma_e - \gamma_f) D^2}{18 v_{\text{lim}}}$$

$$\mu = \frac{\left( 77338 \frac{N}{m^3} - 9196.88 \frac{N}{m^3} \right) (1.97 \times 10^{-2} m)^2}{18 \left( 0.96 \frac{m}{s} \right)}$$

$$\mu = 1.53 \frac{kg}{m \cdot s}$$

### Cálculo de la viscosidad cinemática

$$v_c = \frac{\mu}{\rho_f} = \frac{1.53 \frac{kg}{m \cdot s}}{937.5 \frac{N}{m^3}}$$

$$v_c = 1.62 \times 10^{-3} \frac{kg^2}{s}$$

### **4.3. Ensayo II. Determinación de la fuerza hidrostática y centro de presión de un fluido sobre una superficie plana sumergida**

#### **4.3.1. Objetivos**

- Determinar experimentalmente el centro de presión (C.P.) en una superficie plana vertical.
- Analizar el comportamiento del centro de presión (C.P.) cuando varía la altura de agua sobre una superficie plana vertical.
- Determinar la magnitud de la fuerza resultante ejercida por el líquido sobre una superficie plana sumergida.
- Determinar el error que se comete al realizar el experimento, con el cálculo teórico.

#### **4.3.2. Procedimiento para realizar el ensayo**

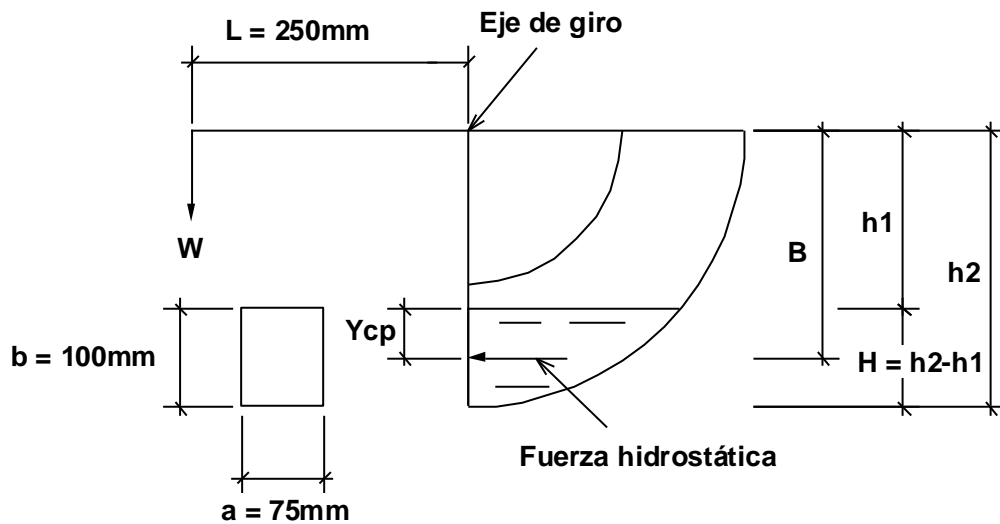
##### **Generalidades**

Para la determinación del centro de presión se igualan los dos momentos: el momento producido por el peso multiplicado por el brazo ( $L = 250$  mm) y el producido por la fuerza resultante multiplicado por su brazo ( $B$ ) que no se conoce ya que está en dependencia del centro de presión (C. P.). Hay que recordar que cuando la altura del agua es mayor que 100 mm, la resultante de la presión actúa en la cara de la curva, la cual no produce momento, ya que su línea de acción pasa por el punto de giro (ver figura 42).

$$M_R = M_T \quad (1)$$

*Momento real = Momento teórico*

Figura 42. Esquema de cuadrante hidráulico



## Procedimiento experimental

- Nivelar la plataforma por medio de los tornillos ajustables, haciendo uso del nivel de mano.
- Ajustar el ángulo de  $90^\circ$  con respecto a la horizontal, usando la barra de pasador y tornillos de fijación.
- Soltar los dos tornillos de fijación y fijar el ángulo  $(\theta)$  deseado con respecto a la vertical.
- Equilibrar el peso seco del cuadrante, cuando el brazo está descargado, utilizando el peso movable, luego anotar la altura  $H_2 = 200\text{ mm}$  (ver figura 42).

- e) Romper el equilibrio del cuadrante hidráulico colocando el porta pesas con un peso conocido ( $W$ ) en el extremo del brazo del mismo.
- f) Agregar agua dentro del cuadrante hidráulico hasta conseguir el equilibrio (posición obtenida en el inciso c).
- g) Anotar la lectura ( $h_1$ ) del nivel del agua en el cuadrante hidráulico (ver figura 41)
- h) Incrementar el peso ( $W$ ) en el porta pesas en 50 gr y anotar la lectura ( $h_1$ ) del nivel de agua en el cuadrante hidráulico y el peso ( $W$ ) acumulado correspondiente.
- i) Repetir el paso anterior cuantas veces sea necesario.

### 4.3.3. Cálculos

#### Superficie parcialmente sumergida sin inclinación

En este caso se desarrolla el siguiente procedimiento con base a la figura 42.

#### Tabla de recolección de datos

Tabla V. Recolección de datos de una superficie parcialmente sumergida vertical

<i>LECTURA No.</i>	<i>W (gr)</i>	<i>h2 (mm)</i>	<i>h1 (mm)</i>
1	100	200	137
2	150	200	125
3	200	200	112

Para la determinación del centro de presión ( $y_{cp}$ ) se aplica el concepto de momento en una articulación, o sea la ecuación (1). Donde la sumatoria de momentos es igual a cero, o sea:

$$W \cdot L = F \cdot B \quad (2)$$

Donde:

$$F = \rho g h_{cg} A$$

$$h_{cg} = \frac{1}{2}(h_2 - h_1)$$

$$h_{cg} = \frac{1}{2}(200mm - 137mm)$$

$$h_{cg} = 31.5mm$$

$$H = (h_2 - h_1)$$

$$H = 200mm - 137mm$$

$$H = 63mm$$

$$A = (h_2 - h_1) \cdot a$$

$$A = (200mm - 137mm) \cdot 75mm$$

$$A = 4725mm^2 = 0.004725m^2$$

Sustituyendo cada uno de los términos

$$F = \frac{1}{2} \rho g (h_2 - h_1)^2 \cdot a \quad (3)$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} (0.200m - 0.137m)^2 \cdot 0.075m$$

$$F = 1.46N$$

Sustituyendo la ecuación (3) en la ecuación (1) y despejando  $B$ , se obtiene la siguiente expresión

$$B = \frac{2WL}{\rho g (h_2 - h_1)^2 \cdot a}$$

$$B = \frac{2 \cdot 0.100 \text{kg} \cdot 0.25 \text{m}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (0.200 \text{m} - 0.137 \text{m})^2 \cdot 0.075 \text{m}}$$

$$B = 0.168 \text{m} = 168 \text{mm}$$

Del esquema de la figura 42, se obtiene:

$$y_{cp-\text{exp}} = \frac{2}{3}(0.200 - h_1) \quad (4)$$

$$y_{cp-\text{exp}} = \frac{2}{3}(0.200 \text{m} - 0.137 \text{m})$$

$$y_{cp-\text{exp}} = 0.042 \text{m} = 42 \text{mm}$$

## Determinación teórica del centro de presión

Ésta se realiza por medio de la aplicación de la fórmula deducida por integración:

$$y_{cp-\text{teor.}} = \frac{I_{cg}}{y_{cg} \cdot A} + y_{cg} \quad (5)$$

$$y_{cp-\text{teor.}} = \frac{1.56 \times 10^6 \text{mm}^4}{31.5 \text{mm} \cdot 4725 \text{mm}^2} + 31.5 \text{mm}$$

$$y_{cp-\text{teor}} = 41.9 \text{mm}$$

## Cálculo del porcentaje de error (%E)

$$\% \text{ error} = \frac{y_{cp-teor.} - y_{cp-exper.}}{y_{cp-teor.}} \cdot 100 \quad (6)$$

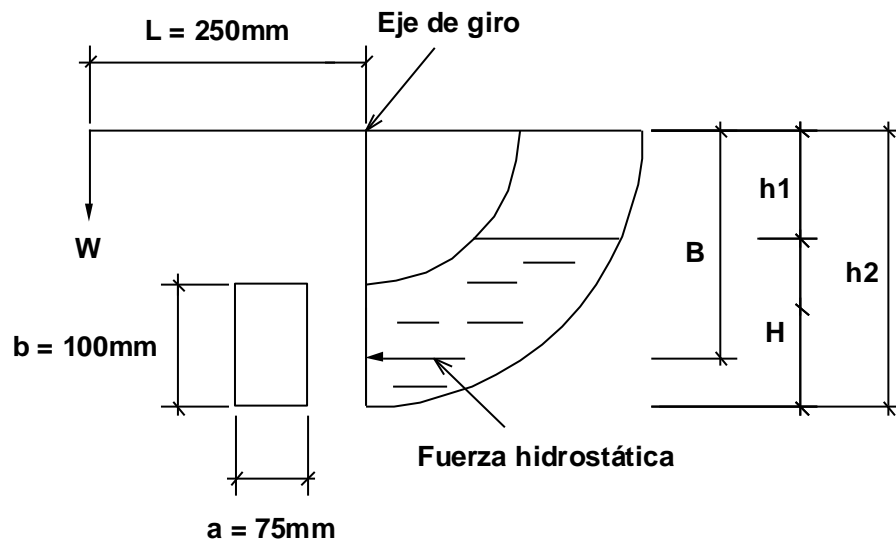
$$\% \text{ error} = \frac{41.9\text{mm} - 42\text{mm}}{41.9\text{mm}} \cdot 100$$

$$\% \text{ error} = 0.23\%$$

$$\% \text{ error}_{\text{permisible}} \leq 5\%$$

## Superficie totalmente sumergida sin inclinación

Figura 43. Esquema de compuerta vertical totalmente sumergida



## Tabla de recolección de datos

Tabla VI. Recolección de datos de una superficie totalmente sumergida vertical

<i>LECTURA No.</i>	<i>W (gr)</i>	<i>h2 (mm)</i>	<i>h1 (mm)</i>
1	400	200	66
2	450	200	56
3	500	200	45

Cuando la compuerta está totalmente sumergida

$$b_{\text{constante}} = 0.1m$$

$$A_{\text{constante}} = a \cdot b = 0.075 \cdot 0.1 = 0.0075m^2$$

$$h_{cg} = (h_2 - h_1) - \frac{b}{2}$$

$$h_{cg} = (200mm - 66mm) - \frac{100mm}{2}$$

$$h_{cg} = 84mm$$

$$H = h_2 - h_1$$

$$H = 200mm - 66mm$$

$$H = 134mm$$

$$y_{cg} = H - 0.05$$

$$y_{cg} = 134mm - 50mm$$

$$y_{cg} = 84mm$$



## Determinación experimental del centro de presión (C. P)

$$F = \rho g [(h_2 - h_1) - 0.05] \cdot A \quad (7)$$

$$F = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} (0.2m - 0.066m - 0.05m) \cdot 0.0075m^2$$

$$F = 6.18N$$

Se sustituye la ecuación (7) en la ecuación (2) y se despeja  $B$

$$B = \frac{WL}{\rho g [(h_2 - h_1) - 0.05] \cdot A} \quad (8)$$

$$B = \frac{0.4kg \cdot 0.25m}{1000 \frac{kg}{m^3} (0.2m - 0.066m - 0.05m) \cdot 0.0075m^2}$$

$$B = 0.158m = 158mm$$

$$y_{cp-exp} = B - h_1$$

$$y_{cp-exp} = 158mm - 66mm$$

$$y_{cp-exp} = 92mm$$

## Determinación teórica del centro de presión

Ésta se realiza por medio de la aplicación de la fórmula deducida por integración:

$$y_{cp-teor.} = \frac{I_{cg}}{y_{cg} \cdot A} + y_{cg}$$

$$y_{cp-teor.} = \frac{6.25 \times 10^6 \text{ mm}^4}{84 \text{ mm} \cdot 7500 \text{ mm}^2} + 84 \text{ mm}$$

$$y_{cp-teor.} = 93 \text{ mm}$$

### Cálculo del porcentaje de error (%E)

$$\% \text{ error} = \frac{y_{cp-teor.} - y_{cp-exper}}{y_{cp-teor.}} \cdot 100$$

$$\% \text{ error} = \frac{93 \text{ mm} - 92 \text{ mm}}{93 \text{ mm}} \cdot 100$$

$$\% \text{ error} = 1.07\%$$

$$\% \text{ error}_{\text{permissible}} \leq 5\%$$

Tabla VII. Resultados de una superficie parcialmente sumergida vertical

<b>Lectura</b>	<b>Caso I. Superficie parcialmente sumergida vertical</b>									
	<b>W (gr)</b>	<b>H (mm)</b>	<b>hcg (mm)</b>	<b>ycg (mm)</b>	<b>A (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>F (N)</b>	<b>B (mm)</b>	<b>ycp- exp (mm)</b>	<b>ycp- teo (mm)</b>	<b>% error</b>
1	100	63	31.5	31.5	4725	1.46	168	42	41.9	0.23
2	150	75	37.5	37.5	5625	2.07	177	50	50	0.00
3	200	88	44	44	6600	2.85	172	58.66	58	1.13

Tabla VIII. Resultados de una superficie totalmente sumergida vertical

<i>Lectura</i>	<i>Caso II. Superficie totalmente sumergida vertical</i>									
	<i>W (gr)</i>	<i>H (mm)</i>	<i>hcg (mm)</i>	<i>ycg (mm)</i>	<i>A (mm<sup>2</sup>)</i>	<i>F (N)</i>	<i>B (mm)</i>	<i>ycp-exp (mm)</i>	<i>ycp-teo (mm)</i>	<i>% error</i>
1	400	134	84	84	7500	6.18	158	92	93	1.07
2	450	144	94	94	7500	6.91	159	103	102	1.00
3	500	158	105	105	7500	7.72	166	113	112	0.90

#### 4.4 Ensayo III. Estudio del comportamiento de las líneas de flujo a través de una figura

##### 4.4.1 Objetivos

- Definir las líneas de flujo y la trayectoria de las mismas en un conducto.
- Representar líneas paralelas de flujo en la inundación de cuerpos.
- Observar la influencia de cuerpos de diferentes formas sobre el campo de flujo.

##### 4.4.2 Procedimiento para realizar el ensayo

- a) Nivelar el aparato con un nivel de mano, de forma que tenga pendiente para poder drenar el agua y la tinta.
- b) Retirar la tapa de vidrio y aplicar con wipe, un poco de jabón líquido sobre la parte interior del vidrio, con el fin de evitar que queden atrapadas burbujas de aire.

- c) Cerrar las válvulas y llenar el depósito de agua y conectar la bomba hidrodinámica.
- d) Llenar el depósito con tinta (previamente preparada con tinta vegetal color rojo de preferencia).
- e) Posicionar la figura plana con exactitud en los orificios centrales de la cámara hidrodinámica.
- f) Colocar la tapa de vidrio lateralmente empezando por el lado de entrada de agua.
- g) Verificar que no ingresen burbujas de aire, si es necesario repetir la operación.
- h) Colocar los tornillos y apretarlos a mano.
- i) Abrir un poco la válvula del depósito de agua para irrigar la cámara hidrodinámica.
- j) Abrir un poco la válvula del depósito de tinta para que ésta fluya a través de la manguera hacia los orificios de inyección.
- k) Para evitar que se formen burbujas de aire comprobar que el depósito de agua y tinta no se queden vacíos.

#### **4.4.3 Cálculos**

Del ensayo realizado a una figura cuadrada (figura 44) se sigue el siguiente procedimiento:

- a) Seleccionar una de las líneas que se forman alrededor de la figura ensayada, para su análisis, en este caso se seleccionó la línea de corriente que se encuentra entre el punto 3 y 4 sobre el eje "Y".
- b) Determinar un punto (0,0) sobre la cuadrícula de la tapadera de vidrio.

- c) Determinar las coordenadas de un tramo de la línea de corriente seleccionada.
- d) Con las coordenadas trazar la gráfica.

Figura 44. Líneas de corriente alrededor de una figura cuadrada

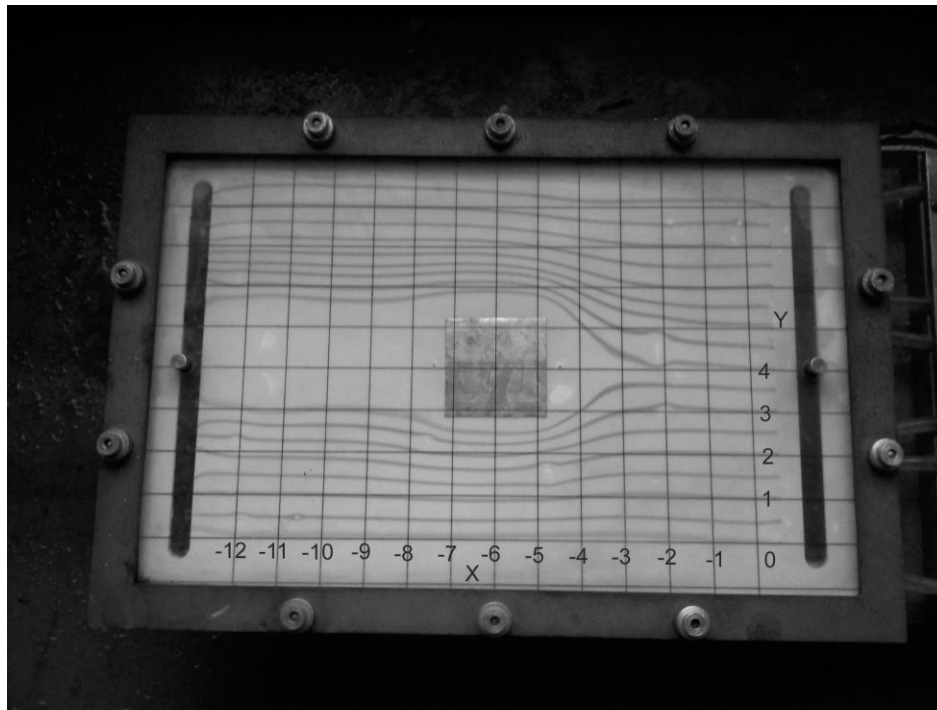


Tabla IX. Datos de coordenadas de una línea de flujo a través de una figura cuadrada

<b>X</b>	<b>Y</b>
0	3.5
-1	3.6
-2	3.7
-3	3.6
-4	3
-5	2.6
-6	2.5
-7	2.6
-8	2.8
-9	3.0
-10	3.0
-11	3.0
-12	3.0

Figura 45. Diagrama de líneas de corriente a través de una figura circular

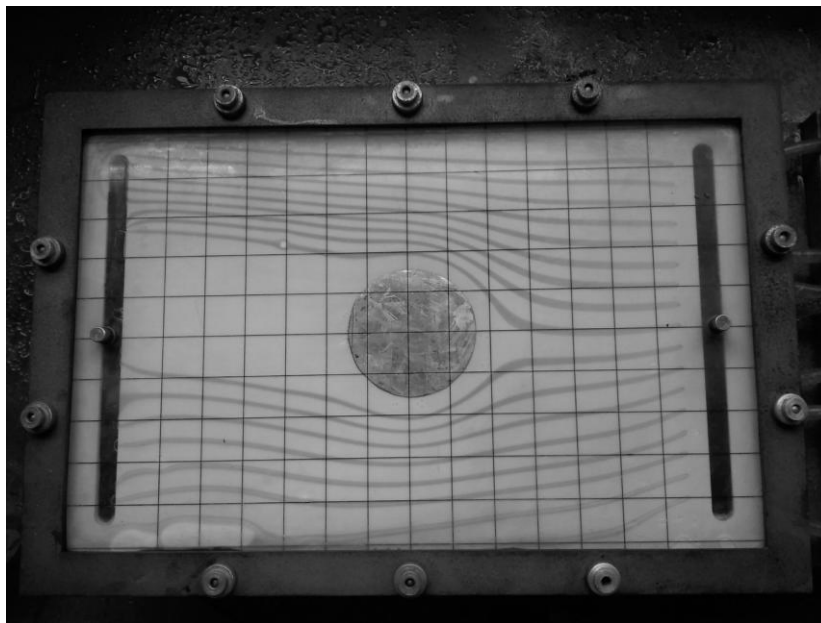
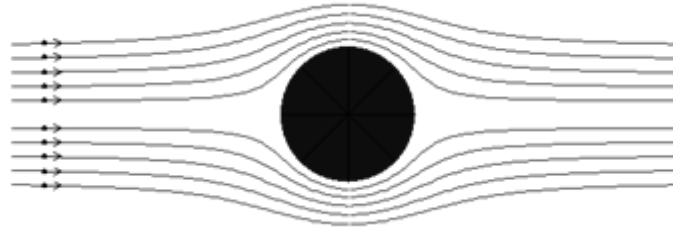


Figura 46. Gráfico de líneas alrededor de una figura circular



En la figura anterior se puede observar que el cuerpo queda inundado por arriba de forma limpia. Una vez cubiertos los lados, las líneas de flujo se separan del cuerpo y se producen remolinos.

Figura 47. Diagrama de líneas de corriente de una figura compuesta

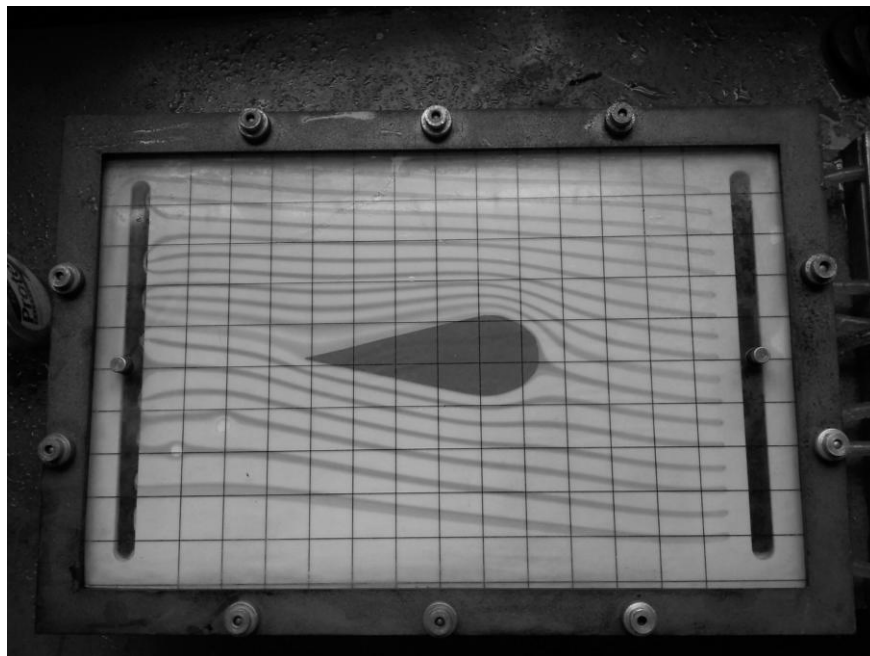
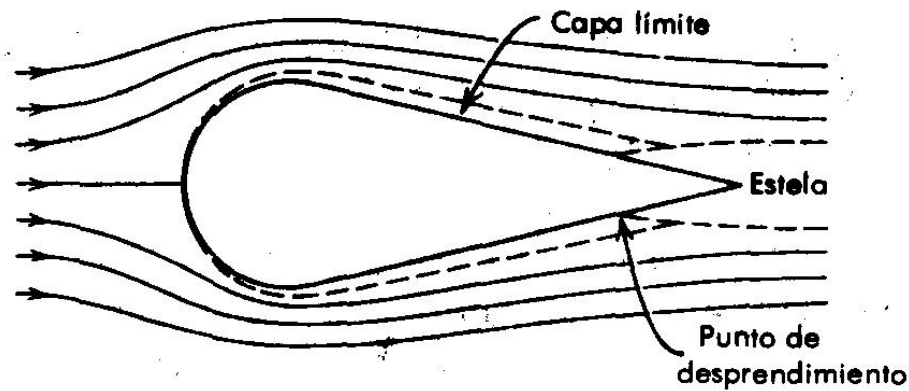


Figura 48. Gráfico de líneas de corriente alrededor de una figura compuesta



Es conveniente contar con medios para describir matemáticamente cualquier patrón particular de flujo. Una descripción adecuada debe retratar la idea de la forma de las líneas de corriente (incluyendo las fronteras) y la escala de velocidad en puntos representativos del flujo. Un dispositivo matemático que sirve para este propósito es la función de corriente,  $\psi$ . La función de corriente se formula como una relación entre las líneas de corriente y el enunciado de la conservación de la masa. Es una función matemática que contiene las variables,  $\psi(x, y, t)$  que reemplaza a las dos componentes de velocidad,  $u(x, y, t)$  y  $v(x, y, t)$

Para un flujo bidimensional incomprensible en el plano  $xy$ , la conservación de la masa, se tiene la ecuación

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

La cual requiere de conocimientos matemáticos que están fuera del propósito de este trabajo y no está contemplado en el contenido del curso, sin



embargo, es importante que el estudiante tenga el concepto claro de líneas de corriente en el flujo de fluidos, y es importante observar el comportamiento de las mismas cuando envuelven a un cuerpo geoméricamente conocido.

Figura 49. Diagrama de líneas de corriente en torno a un perfil de ala

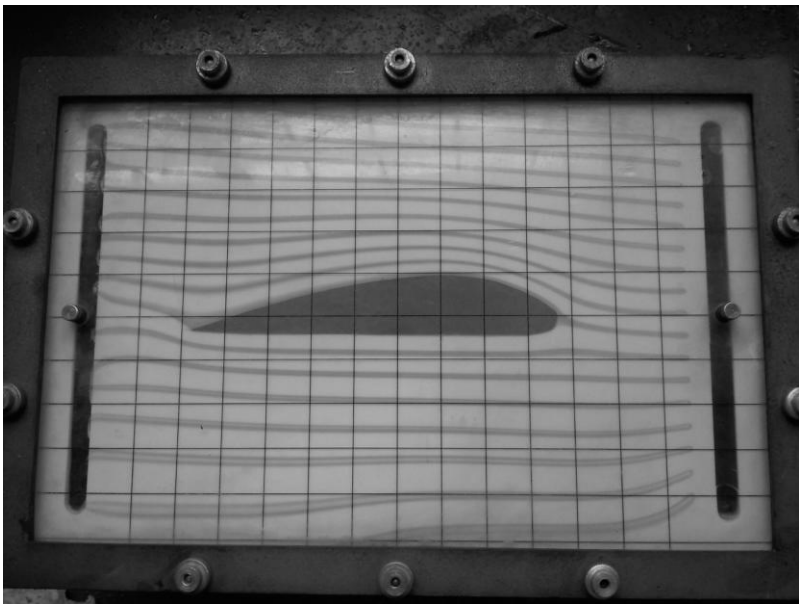
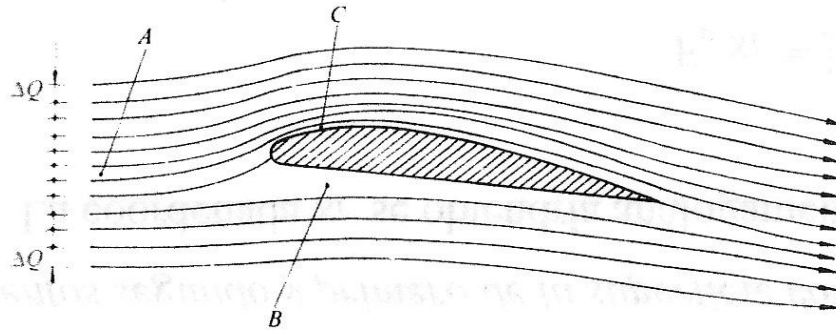
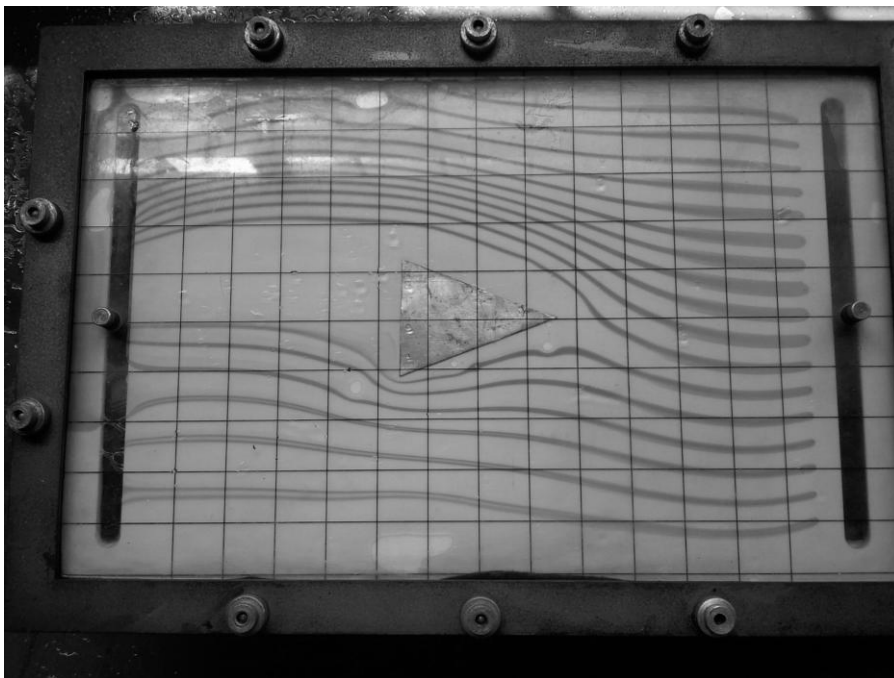


Figura 50. Líneas de corriente en torno a un perfil de ala. Entre dos líneas de corriente consecutivas circula el mismo caudal  $\Delta Q$ . La velocidad es mayor donde las líneas de corriente se estrechan



Fuente: Mataix Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. Pág. 91

Figura 51. Diagrama de líneas de corriente alrededor de un triángulo



#### 4.4.4 Gráficas

Con las coordenadas que se obtuvieron de la línea de corriente alrededor de una figura cuadrada, se traza la siguiente gráfica:

Figura 52. Trayectoria de línea de corriente

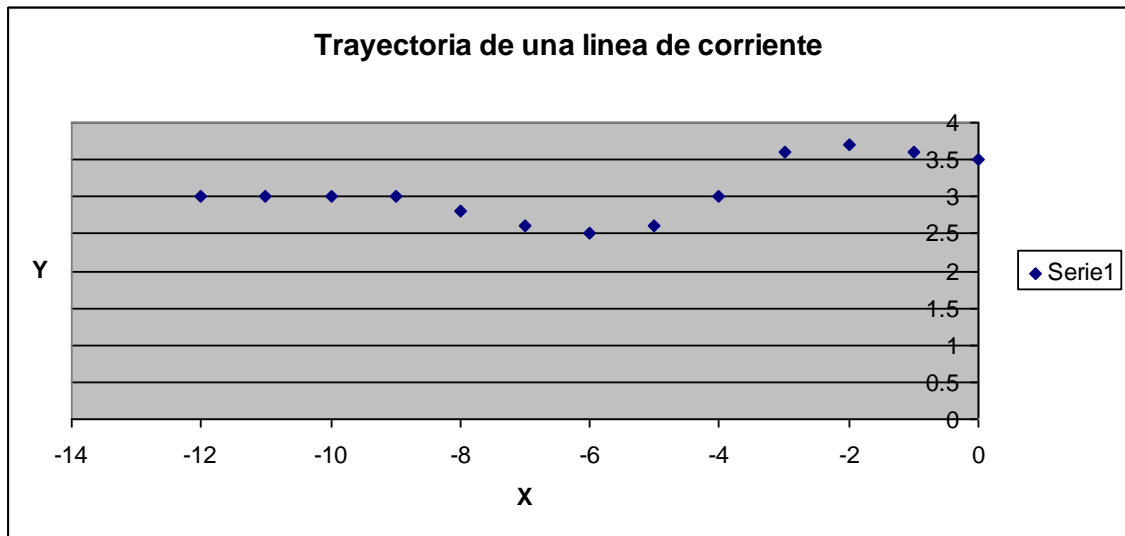
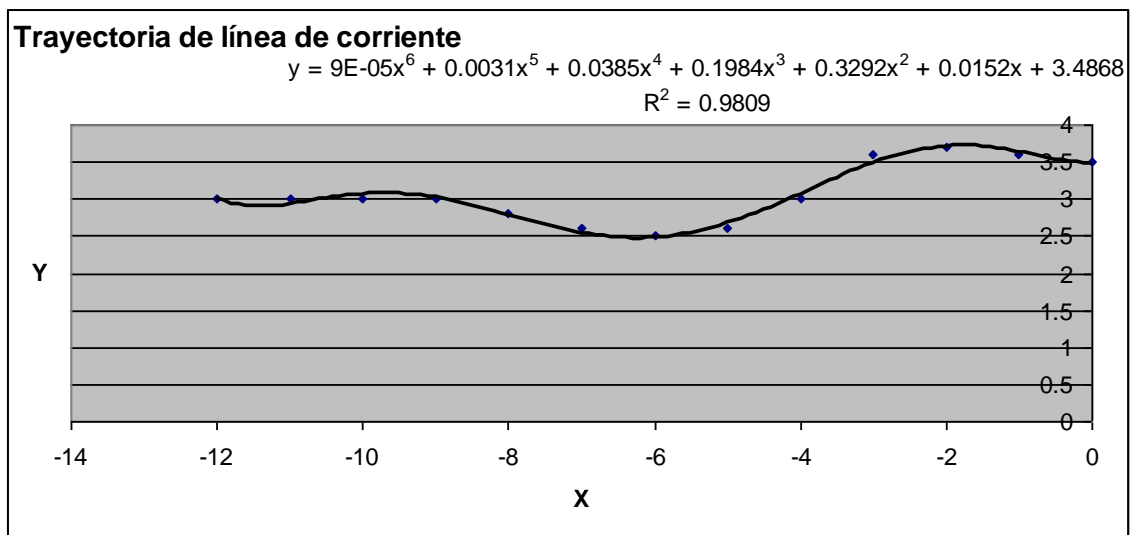


Figura 53. Trayectoria y ecuación de línea de corriente



## **4.5 Ensayo IV. Determinación de la fuerza producida por impacto de un chorro**

### **4.5.1 Objetivos**

- Observar experimentalmente los efectos de las fuerzas desarrolladas por un fluido al impactar sobre una superficie.
- Comparar las fuerzas teóricas con las fuerzas experimentales producidas por el impacto de un chorro.

### **Fórmulas para el cálculo de la fuerza teórica del impacto de chorro de una placa plana y semiesférica**

Si se considera una placa fija en la cual incide un flujo de agua, tal como se muestra en las siguientes figuras:

Figura 54. Impacto de un chorro en una placa plana

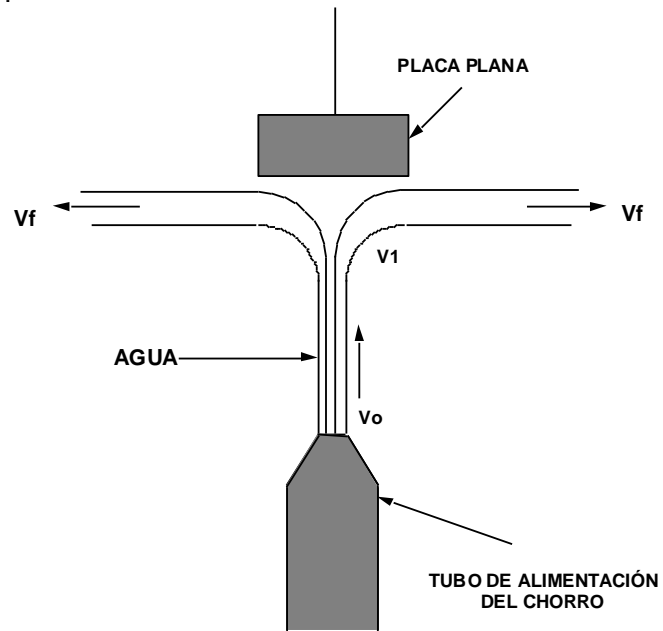
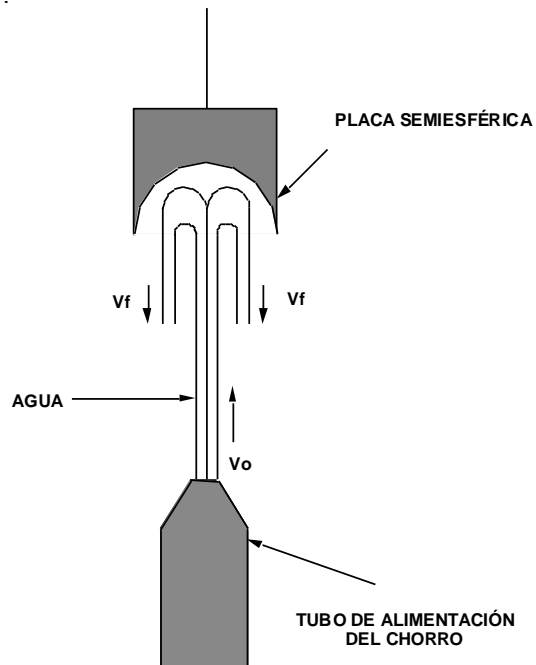


Figura 55. Impacto de un chorro en una placa semiesférica



La velocidad de descarga del chorro es:

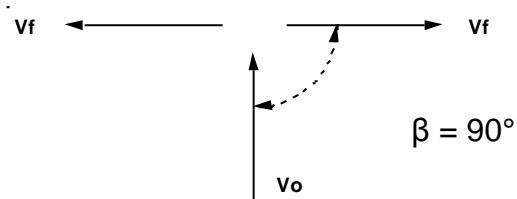
$$V_o = \frac{Q}{A_o}$$

Donde: Q = caudal

$A_o$  = área de la sección del chorro.

La fuerza teórica desarrollada por el fluido en la dirección vertical al incidir sobre las placas es:

Figura 56. Diagrama de velocidades de la desviación del flujo al impactar en una placa plana



$$F_{Teórica} = \rho Q_o (V_o - V_f \cos \beta) \quad (1)$$

$$Q = V_o A \quad (2)$$

Cuando la placa es plana

$$\cos \beta = \cos 90^\circ = 0$$

Sustituyendo 2 en 1

$$F_{Teor.} = \rho A V_o^2$$

Asumiendo que no hay pérdidas de energía

Cuando la placa es semiesférica  $V_o$  y  $V_f$  forman un ángulo de  $180^\circ$ , y  $\cos 180^\circ = -1$

$$V_o = V_f$$

$$F_{Teor.} = \rho Q_o (V_o - (-1)V_f)$$

$$F_{Teor.} = 2\rho A_o V_o^2$$

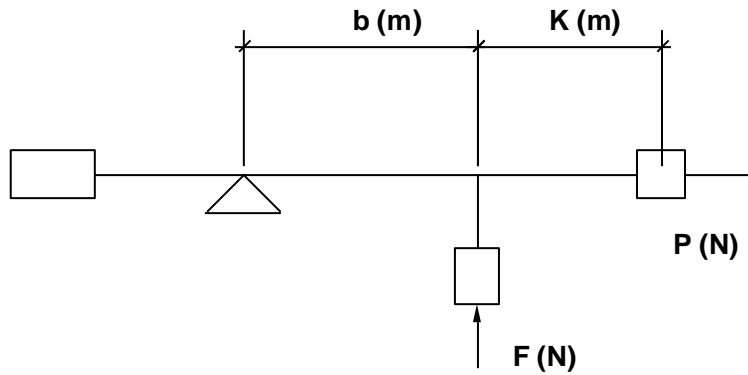
Son las ecuaciones de la fuerza de impacto que no consideran las pérdidas de energía

#### **4.5.2 Procedimiento para realizar el ensayo**

##### **Descripción del equipo**

De la tobera sale un chorro que incide sobre una placa que puede ser plana o semiesférica, a elección. La fuerza del chorro se transmite a un mecanismo que consiste en un brazo de metal articulado en un pivote. Sobre dicho brazo se coloca una pesa que en determinada posición hace que el sistema esté en equilibrio, de tal manera que la placa está fija cuando impacta el chorro sobre ella.

Figura 57. Diagrama de fuerzas que actúan en una placa plana



Cuando actúa el chorro, la pesa deberá colocarse a una posición “K” para que el sistema permanezca estático, mientras que la placa soporta la fuerza F ejercida por el chorro.

El sistema de placa, brazo, pesa y pivote está diseñado de tal manera que:

$$F \cdot b = P \cdot K$$

De donde:  $F = \frac{P \cdot K}{b}$

$F$  = Fuerza real que incide sobre la placa

$K$  = Posición donde se coloca la pesa

$B$  = Distancia entre el pivote y el centro de la placa

$P$  = Peso (en N)

- Conectar la manguera que suministra el flujo a la tobera
- Verificar que el aparato esté nivelado y que el agua drene hacia la parte inferior del mismo, después de impactar la placa.



- c) Colocar la placa a ensayar, la cual puede ser la plana o semiesférica.
- d) Colocar el peso a una distancia “K” de tal forma que al accionar el chorro dirigido hacia el centro de la placa, el brazo se mantenga horizontal (ver figura 57), anotar el valor de la variable “K” una vez el brazo esté a nivel.
- e) Medir el caudal que sale de la tobera utilizando el método volumétrico de aforo, realizando tres veces la medición del tiempo.
- f) Repetir los incisos d) y e) para otras dos posiciones de “K” con sus respectivos valores de caudal.

Tabla X. Recolección de tiempos placa plana

<b>No. Ensayo</b>	<b>K(m)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Tiempo Promedio(s)</b>
1	0.118	78.14	78.24	77.4	77.93
2	0.132	72.14	72.36	72.23	61.28
3	0.149	67.12	67.57	67.48	67.39

Tabla XI. Recolección de tiempos placa semiesférica

<b>No. Ensayo</b>	<b>K(m)</b>	<b>t1 (s)</b>	<b>t2 (s)</b>	<b>t3 (s)</b>	<b>Tiempo Promedio(s)</b>
1	0.118	109.05	109.57	109.01	109.21
2	0.139	100.58	100.77	100.72	100.69
3	0.16	94.37	94.29	94.43	94.36

### 4.5.3 Cálculos (placa plana)

#### Ensayo 1 (procedimiento teórico placa plana)

Datos preliminares

$$\phi_{\text{Boquilla}} = 4\text{mm} = 0.004\text{m}$$

$$\text{Vol} = 8\text{lbs} = 0.008\text{m}^3$$

$$\text{Area} = \pi r^2 = \pi(0.002)^2 = 1.25 \times 10^{-5} \text{m}^2$$

Determinar el caudal ( $Q$ ) con la siguiente fórmula

$$Q_1 = \frac{\text{Vol}}{t_p} = \frac{0.008\text{m}^3}{77.93\text{s}}$$

$$Q_1 = 1.02 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} = 0.102 \frac{\text{lbs}}{\text{s}}$$

Determinar la velocidad ( $V$ ) con la siguiente fórmula

$$V_1 = \frac{Q_1}{A} = \frac{1.02 \times 10^{-4} \text{m}^3 / \text{s}}{1.25 \times 10^{-5} \text{m}^2}$$

$$V_1 = 8.17 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Determinar la fuerza ( $F$ ) producida por el impacto del flujo en la placa plana

$$F_1 = \rho AV_1^2 = 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1.25 \times 10^{-5} m^2 \cdot \left( 8.17 \frac{m}{s} \right)^2$$

$$F_1 = 0.84N$$

Para la placa semiesférica el procedimiento para calcular el caudal y la velocidad es el mismo procedimiento utilizado para la placa plana, y para calcular la fuerza producida por el impacto del flujo en la placa se determina de la siguiente manera

$$F_1 = 2\rho AV_o^2 = 2 \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} \cdot 1.257 \times 10^{-5} m^2 \cdot \left( 5.86 \frac{m}{s} \right)^2$$

$$F_1 = 0.86N$$

### Ensayo 1 (procedimiento experimental placa plana)

$$P = 1.5N$$

$$b = 0.202m \text{ Cte}$$

$$K_1 = 0.118m$$

$$F_1 = \frac{P \cdot K_1}{b}$$

$$F_1 = \frac{1.5N(0.118m)}{0.202m}$$

$$F_1 = 0.88N$$

Tabla XII. Resultados del ensayo a una placa plana

<b>No. Ensayo</b>	<b>Q (lts/s)</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>Fteor. (N)</b>	<b>Fexp (N)</b>	<b>% error</b>
1	0.102	8.17	0.84	0.88	4.76
2	0.111	8.88	0.99	0.98	1.01
3	0.119	9.5	1.13	1.11	1.77

Tabla XIII. Resultados del ensayo a una placa semiesférica

<b>No. Ensayo</b>	<b>Q (lts/s)</b>	<b>V (m/s)</b>	<b>Fteor. (N)</b>	<b>Fexp (N)</b>	<b>% error</b>
1	0.073	5.86	0.86	0.88	2.32
2	0.079	6.35	1.01	1.03	1.98
3	0.085	6.78	1.15	1.19	3.47

#### 4.5.4 Gráficas

Figura 58. Gráfica caudal contra fuerza de una placa plana

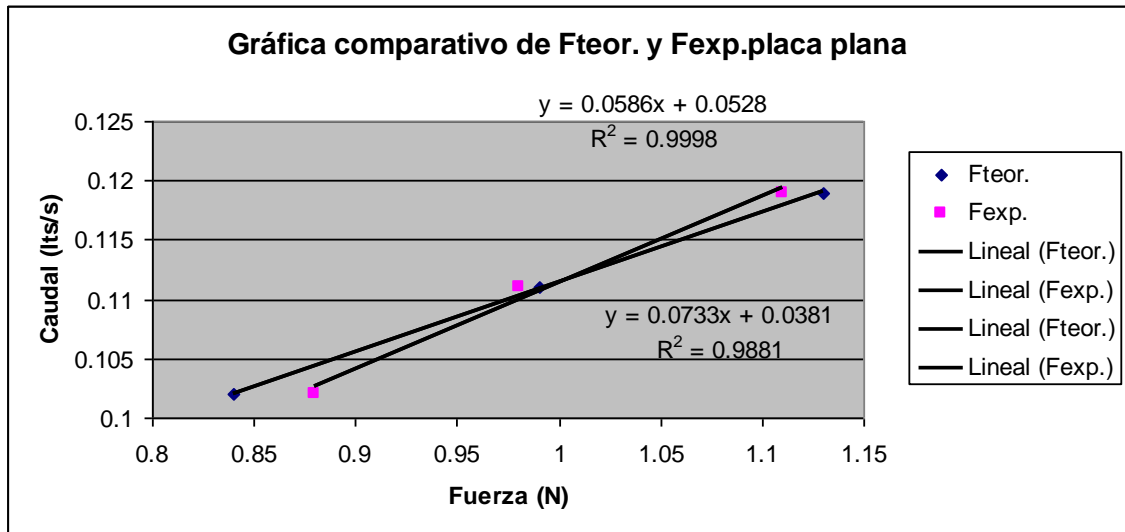


Figura 59. Gráfica caudal contra fuerza de una placa semiesférica

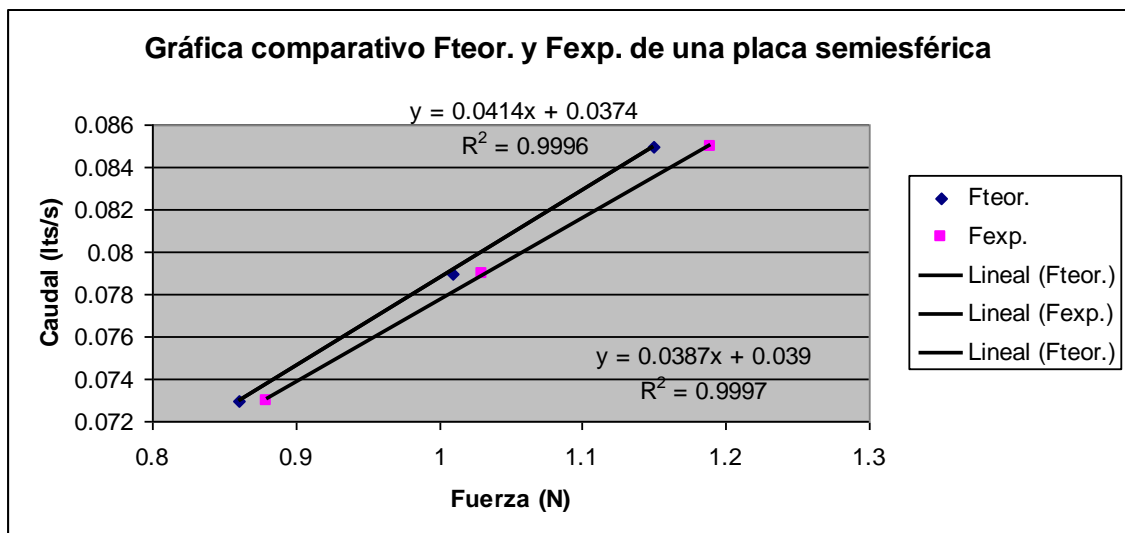
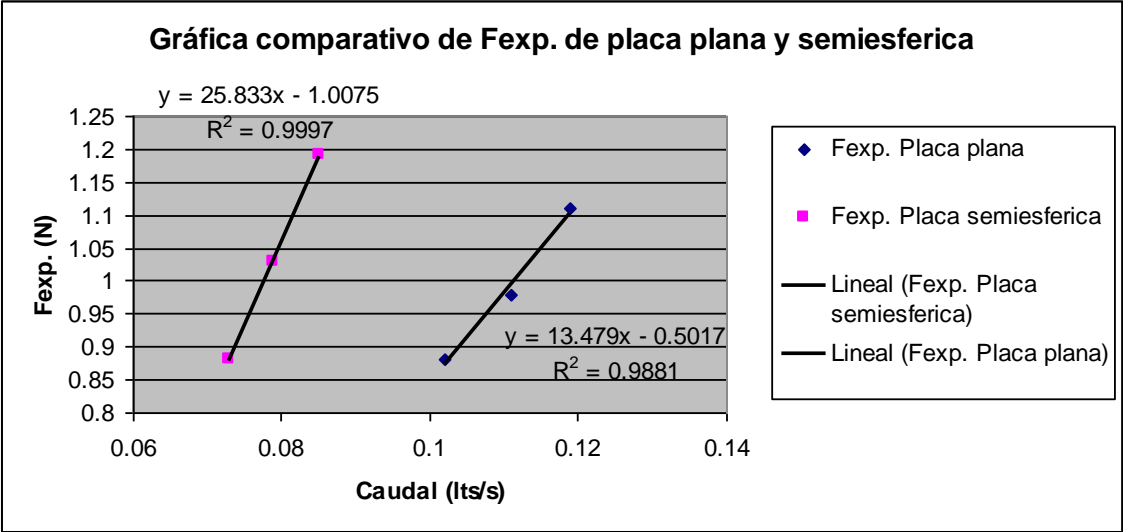


Figura 60. Gráfica de fuerza experimental contra caudal de una placa plana y semiesférica



## CONCLUSIONES

1. Se determinó, mediante la realización del ensayo de viscosidad que, si el valor de la viscosidad del fluido es mayor, la fuerza que opone resistencia a la esfera en movimiento será mayor, y esto se observó debido a que la velocidad de caída era menor cuando el aceite ensayado era más viscoso.
2. La viscosidad dinámica de los fluidos varía mucho con la temperatura, aumentando en los gases y disminuyendo en los líquidos. Por el contrario, la viscosidad cinemática de los gases varía mucho con la presión y la temperatura, mientras que la de los líquidos prácticamente solo varía con la temperatura.
3. En una superficie plana sumergida, la fuerza hidrostática ejercida por el agua aumenta con la profundidad, además en el ensayo se pudo observar que dicha fuerza obedece a la ecuación del centro de presiones que se encuentran en los textos.
4. En el ensayo de centro de presiones se obtuvo el  $Y_{cp.exp}$  y al compararlo con el  $Y_{cp.teor.}$  se pudo determinar que el porcentaje de error entre los dos es mínimo.
5. En el ensayo de redes de flujo se observó el comportamiento de las líneas de corriente sobre las distintas formas geométricas ensayadas. Las líneas de corriente representan de forma gráfica el comportamiento alrededor de una figura y se observa que los patrones de flujo mostrados en los textos son muy parecidos a los reales.

6. En cualquier punto en el campo de flujo pasa una línea de corriente, entre dos líneas de corriente consecutivas circula el mismo caudal, la velocidad es mayor donde las líneas de corriente se estrechan.
  
7. Se comprobó que la fuerza producida por el impacto de un chorro a una placa varía en función del caudal y de la forma geométrica del alabe o placa donde el chorro impacta.



## RECOMENDACIONES

1. Incluir en el contenido del laboratorio del curso de Mecánica de Fluidos las nuevas prácticas propuestas, con el fin de afianzar los conocimientos del estudiante y despertar en él más interés en el tema.
2. Es importante darle mantenimiento periódico a los equipos de ensayo. con el fin de prolongar la vida útil de los mismos. En el caso del viscosímetro de caída de bola vaciarlo al finalizar la práctica y limpiarlo con agua y jabón, para evitar que el tubo plástico pierda su transparencia.
3. Evitar que las piezas de los distintos equipos sufran golpes porque pierden su precisión, además mantenerlas en un lugar seco y seguro.
4. En el equipo de líneas de flujo es importante lavarlo inmediatamente después de realizar el ensayo, ya que la tinta puede manchar la superficie plástica. Además realizar una limpieza periódica a los orificios de salida del agua.
5. Es importante saber calcular el centro de presión en una superficie plana sumergida puesto que ahí se encuentra aplicada la fuerza resultante de todas las presiones que actúan sobre la compuerta, además el centro de presión juega un papel importante en el análisis de estructuras hidráulicas, como un muro de contención.

6. La desviación de un chorro debido al impacto en una placa produce una fuerza que bien puede cambiar la posición de la misma por lo que es importante considerarla en el análisis de flujo de fluidos, donde se presente cambio de dirección del flujo, por ejemplo en una línea de conducción.

## BIBLIOGRAFÍA

1. De Acevedo Netto, J. M. y Guillermo Acosta Álvarez. **Manual de hidráulica**. 6ª ed. México: Editorial Harla, 1975. 575pp.
2. Ernesto Díaz Ortiz. **Mecánica de los Fluidos e Hidráulica**. Colección Ciencias Físicas, Exactas y Naturales. Programa Editorial Universidad del Valle. Pág. 90.
3. Fox, Robert W. y Alan T. McDonald. **Introducción a la mecánica de fluidos**. 4ª ed. México: editorial McGraw-Hill, 1995. 916pp.
4. Mataix, Claudio. **Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas**. 2da ed. México: Editorial Alfaomega, 2005. 660pp.
5. Mott, Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada**. 4ª. ed. México: Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, S. A., 1999. 580pp.
6. Simon, Andrew L. **Hidráulica básica**. 1ª reimpresión México: Editorial Limusa, 1992. 234pp.
7. Streeter, Víctor. y Benjamín Wylie. **Mecánica de los fluidos**. 9ª ed. México: Editorial McGraw-Hill, 1994. 594pp.