

**DISEÑO Y MONTAJE DE LABORATORIO DE PRESION HIDROSTATICA
SOBRE SUPERFICIES PLANAS Y CURVAS SUMERGIDAS Y FUERZAS
DE BOYAMIENTO SOBRE UN CUERPO PARCIALMENTE SUMERGIDO**

ADRIAN MONCADA BALLESTEROS

ROGER ZAMORA RINCON

CORPORACION UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

PROYECTO DE GRADO

GIRARDOT

2009

**DISEÑO Y MONTAJE DE LABORATORIO DE PRESION HIDROSTATICA
SOBRE SUPERFICIES PLANAS Y CURVAS SUMERGIDAS Y FUERZAS
DE BOYAMIENTO SOBRE UN CUERPO PARCIALMENTE SUMERGIDO**

ADRIAN MONCADA BALLESTEROS

ROGER ZAMORA RINCON

Presentado a:

COMITE PROYECTO DE GRADO

Informe final para optar al título de Ingeniería Civil

CORPORACION UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL

PROYECTO DE GRADO

GIRARDOT

2009

CONTENIDO

	Pág.
LISTA DE FIGURAS	5
LISTA DE TABLAS	7
INTRODUCCION	8
1. JUSTIFICACION	10
2. OBJETIVOS	12
2.1. OBJETIVO GENERAL	12
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. PROPIEDADES DEL PROTOXIDO DE HIDROGENO SOBRE SUPERFICIES PLANAS Y CURVAS SUMERGIDAS Y FUERZA DE BOYAMIENTO.	14
3.1. ESTÁTICA DE FLUIDOS	14
3.1.1. Variación de la presión en un fluido estático incompresible	14
3.1.2. Fuerza hidrostática sobre una superficie plana sumergida en un fluido estático incompresible	16
3.1.3. Presión hidrostática sobre una superficie curva cilindrica sumergida.	21
3.1.4. Leyes de Boyamiento.	22
4. FOTOS BANCO DE HIDROSTATICA	25
4.1. MONTAJE DE PRESION HIDROSTATICA SOBRE SUPERFICIES PLANAS Y CURVAS SUMERGIDAS	25
4.2. MONTAJE DE FUERZA DE BOYAMIENTO	27
5. DESCRIPCIÓN DE LOS BANCOS	29
5.1. CARACTERISTICAS GENERALES	29
5.2. BANCO DE PRUEBAS DE HIDROSTATICA	29
5.2.1. Ensayo de presión hidrostática.	29

5.2.2. Ensayo de fuerza de Boyamiento	34
	Pág.
5.2.3. Estructura del banco de hidrostática	38
6. CALCULO	38
6.1. ENSAYO DE PRESIÓN DE HIDROSTÁTICA.	38
6.1.1. Calculo de la presión hidrostática sobre el recipiente.	38
6.1.2. Posición del centro de presión.	40
6.2. ENSAYO DE FUERZA DE BOYAMIENTO.	40
7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	44
7.1. ENSAYO DE PRESION HIDROSTATICA	44
7.1.1. Datos teóricos.	44
7.1.2. Datos experimentales.	46
7.1.3. Regresión de los datos experimentales.	47
7.1.4. Calculo del error de medición.	48
7.1.5. Análisis de los resultados.	49
7.2. ENSAYO DE FUERZA DE BOYAMIENTO	52
7.2.1. Datos teóricos.	52
7.2.2. Datos experimentales.	53
7.2.3. Calculo del error de medición.	54
7.2.4. Análisis de los resultados.	55
8. GUIAS DE LABORATORIO	56
9. CONCLUSIONES	73
10. RECOMENDACIONES	74
11. BIBLIOGRAFIA	75
12. ANEXOS	76

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cuerpo libre de un elemento en un fluido estático.	13
Figura 2. Superficie plana sumergida en un líquido.	16
Figura 3 vista perpendicular de una superficie plana.	19
Figura 4 Presión hidrostática F_p sobre una superficie curva cilíndrica sumergida CD.	20
Figura 5. Cuerpo sumergido en un fluido.	22
Figura 6. Cuerpo en flotación en la interfaz de dos fluidos no miscibles.	23
Figura 7. Recipiente y placa de referencia del ensayo de presión hidrostática.	29
Figura 8. Brazo y sistema de equilibrio inicial.	30
Figura 9. Estructura del equipo de presión hidrostática.	31
Figura 10. Disposición de los componentes del equipo de presión hidrostática.	32
Figura 11. Medición para el ensayo de la presión hidrostática.	33
Figura 12. Cuerpo flotante.	34
Figura 13. Pesas del ensayo de fuerza de Boyamiento.	35
Figura 14. Componentes del equipo de fuerza de Boyamiento.	36
Figura 15. Estructura del banco de hidrostática.	37
Figura 16. Diferenciales de fuerza hidrostática sobre las caras internas del recipiente.	38
Figura 17. Momentos rotacionales resultantes del ensayo de presión hidrostática.	39
Figura 18. Centroide de la placa sumergida.	40
Figura 19. Nivel de hundimiento (ensayo de fuerza de Boyamiento).	42

Figura 20. Esquema del ensayo de presión hidrostática.	44
Figura 21. Punto de aplicación de la fuerza hidrostática.	45
Figura 22. Gráfica de fuerza hidrostática experimental Vs. teórica.	47
Figura 23. Esquema general del ensayo de fuerza de Boyamiento	52

Figuras de la guía de laboratorio.	Pág.
Figura A.1. Disposición de los componentes del ensayo de hidrostática.	58
Figura A.2. Diferenciales de fuerza hidrostática sobre las caras interna del recipiente.	59
Figura A.3. Momentos rotacionales resultantes del ensayo de presión hidrostática.	59
Figura A.4. Configuración de la placa plana.	60
Figura A.5 Ilustración de la metodología de la medición para el ensayo de Presión Hidrostática.	61
Figura A.6. Grafica de fuerza hidrostática experimental vs teórica.	63
Figura B.1. Disposicion de los componentes del ensayo de fuerza de boyamiento.	68
Figura B.2. Esquema del ensayo de fuerza de boyamiento.	69

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos teóricos de la práctica de presión hidrostática.	45
Tabla 2. Datos experimentales del ensayo de presión hidrostática.	46
Tabla 3. Regresión exponencial de los datos experimentales del ensayo de presión hidrostática.	48
Tabla 4. Cálculo del error para el ensayo de presión hidrostática.	49
Tabla 5. Datos teóricos del ensayo de fuerza de Boyamiento.	53
Tabla 6. Datos experimentales de la fuerza de Boyamiento	53
Tabla 7. Calculo de error del ensayo de fuerza de Boyamiento.	54
Tablas guías de laboratorio.	
Tabla 1A. Datos teóricos de la práctica de presión hidrostática.	62
Tabla 2A. Datos experimentales del ensayo de presión hidrostática.	62
Tabla 3A. Cálculo del error para el ensayo de presión hidrostática.	64
Tabla 1B. Datos teóricos de la práctica de fuerza de boyamiento.	70
Tabla 2B. Datos experimentales del ensayo de fuerza de boyameinto.	70
Tabla 3B. Cálculo del error para el ensayo de fuerza de boyamiento.	71

INTRODUCCION

Desde el punto de vista macroscópico, se acostumbra clasificar la materia, en sólidos y fluidos. Se entiende por *fluido* un estado de la materia en el que la forma de los cuerpos no es constante, sino que se adapta a la del recipiente que los contiene. La materia fluida puede ser trasvasada de un recipiente a otro, es decir, tiene la capacidad de fluir. Los líquidos y los gases corresponden a dos tipos diferentes de fluidos. Los primeros tienen un volumen constante que no puede mortificarse apreciablemente por compresión. Se dice por ello que son *fluidos incompresibles*. Los segundos no tienen un volumen propio, sino que ocupan el del recipiente que los contiene; son *fluidos compresibles* porque, a diferencia de los líquidos, sí pueden ser comprimidos.

En un sentido estricto, se puede considerar un fluido como un conjunto de moléculas distribuidas al azar que se mantienen unidas a través de fuerzas cohesivas débiles y las fuerzas ejercidas por las paredes del recipiente que lo contiene. La rama de la física que estudia los fluidos, recibe el nombre de mecánica de los fluidos, la cual a su vez tiene dos vertientes: hidrostática, que orienta su atención a los fluidos en reposo; e hidrodinámica, la cual envuelve los fluidos en movimiento. La hidrostática es la parte de la hidráulica que estudia el equilibrio de los líquidos en estado de reposo. En estas circunstancias, al ser nulo el gradiente de velocidad, no existen esfuerzos cortantes (tangenciales), por lo que no existe viscosidad comportándose el líquido como perfecto. Por tanto, pueden obtenerse sus leyes de forma analítica, no siendo necesario recurrir a la

experimentación para corregir las ecuaciones con coeficientes que ajusten la teoría a la realidad.

Respecto a la segunda parte del laboratorio, donde la fuerza resultante ejercida sobre un cuerpo por un fluido estático, que se encuentra sumergido o flotando se conoce como la fuerza de Boyamiento. Ésta siempre actúa verticalmente hacia arriba. No puede existir componente horizontal de la resultante debido a que la proyección del cuerpo sumergido o la porción sumergida de un cuerpo flotante sobre un plano vertical siempre es cero. La fuerza de Boyamiento sobre un cuerpo sumergido es la diferencia entre la componente vertical de la fuerza de presión en su lado superior y la componente vertical de la fuerza de presión en su lado inferior.

1. JUSTIFICACION

El principio descubierto por Arquímedes, que hoy lleva su nombre, expresa que la fuerza con la cual un líquido empuja un cuerpo sumergido es igual al peso del líquido desplazado por el cuerpo. Es decir, Arquímedes notó que existe una fuerza, denominada empuje hidrostático, que obra sobre los cuerpos sumergidos en los fluidos, en dirección contraria al peso de ellos.

De lo anterior se comprende que un cuerpo flota en un fluido si el empuje es igual al peso del cuerpo. Un barco puede flotar porque el empuje hidrostático que recibe del agua, ocasionado por el volumen desplazado por el casco de la nave, es igual que su peso. No importa si el barco es de hierro, el barco como tal tiene muy poca densidad su interior está hueco o casi vacío. Pero si lo compactamos, plegando las paredes de su casco, su masa no cambia pero si su volumen, al disminuir el volumen disminuye también el peso del agua que desplaza, y por lo tanto disminuye el empuje hundiendo el barco.

Un aspecto, en ocasiones relacionado erróneamente a la flotabilidad, es la tensión superficial de los líquidos. La tensión superficial es responsable de la resistencia que un líquido presenta a la penetración de su superficie. Al interior de un fluido cada molécula esta rodeada de otras moléculas que ejercen atracciones simétricas, pero en la superficie, una molécula se encuentra sólo

parcialmente rodeada por otras moléculas del fluido, y en consecuencia es atraída hacia adentro del líquido. Esta fuerza de atracción tiende a arrastrar a las moléculas de la superficie hacia el interior del líquido (tensión superficial), y al hacerlo el líquido se comporta como si estuviera rodeado por una membrana invisible.

El empuje Hidrostático es igual al peso del líquido desplazado por un cuerpo, si el peso de éste, es igual al peso del volumen del líquido que desplaza, entonces se mantiene en equilibrio dentro del líquido. Por tanto, existe una fuerza de flotación resultante hacia arriba llamado empuje Hidrostático. En este caso, el hecho de que un cuerpo flote o se hunda depende de su peso (hacia abajo), y de la magnitud de empuje hidrostático (hacia arriba), si el peso de su cuerpo es mayor que el peso del líquido que desplaza, el cuerpo se hunde. Si el peso es menor que el peso del líquido que desplaza, entonces el cuerpo flota. Si el peso del cuerpo y el peso del líquido que desplaza son iguales, entonces se mantiene en equilibrio dentro del líquido.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el montaje del laboratorio de presión hidrostática sobre superficie planas y curvas sumergidas y fuerza de Boyamiento sobre un cuerpo parcialmente sumergido. Para el crédito académico de mecánica de fluidos en la Corporación universitaria Minuto de dios regional Girardot año 2009.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Compilar información acerca de las propiedades que tiene el Protóxido de Hidrogeno en reposo, con el propósito de fundamentar la parte teórica del laboratorio de presión hidrostática sobre superficies planas y curvas sumergidas y fuerza de Boyamiento.

- Realizar visitas de campo a los claustros Universitarios, donde se oriente este crédito académico, con el fin de conocer los diferentes montajes para llegar a plantear posibles modificaciones.

- Establecer a través del dibujo asistido por computador, el diseño en Auto CAD del laboratorio proyectado, con el propósito de instaurar y desarrollar en la Corporación universitaria Minuto de Dios Regional Girardot.

- Construir la estructura del laboratorio de presión hidrostática sobre superficie planas y curvas sumergidas y fuerza de Boyamiento sobre un cuerpo parcialmente sumergido. Con el objeto de representar experimentalmente.

- Diseñar la guía de laboratorio, con el propósito de que los estudiantes obtengan un instrumento que les permita desarrollar paso a paso cada uno de los procedimientos que conforman la determinación de presión hidrostática sobre superficie planas y curvas sumergidas y fuerza de Boyamiento sobre un cuerpo parcialmente sumergido.

3. PROPIEDADES DEL PROTOXIDO DE HIDROGENO SOBRE SUPERFICIES PLANAS Y CURVAS SUMERGIDAS Y FUERZA DE BOYAMIENTO.

3.1. ESTÁTICA DE FLUIDOS

Un fluido se define como una sustancia que cambia su forma continuamente siempre que esté sometida a un esfuerzo cortante, sin importar que tan pequeño sea¹, el fluido para que se considere estático, todas sus partículas deben permanecer en reposo o mantener la misma velocidad constante respecto a un sistema de referencia inercial. Al considerar los líquidos, estos presentan cambios muy pequeños en su densidad a pesar de estar sometidos a grandes presiones, el fluido se denomina incompresible y se supone que su densidad es constante para efecto de los cálculos.

3.1.1. Variación de la presión en un fluido estático incompresible². Con el fin de averiguar la distribución de presiones en fluidos estáticos, se considerará el equilibrio de fuerzas de un elemento infinitesimal de fluido, tal como se muestra en la figura 1. Las fuerzas que actúan sobre el elemento se originan debido a la presión del medio circundante y a la fuerza de gravedad.

¹ SHAMES, Irving H. mecánica de fluidos. 3 ed. Santafé de Bogotá: Mc Graw-Hill, 1995. P.3.

² Ibid., p. 53-54

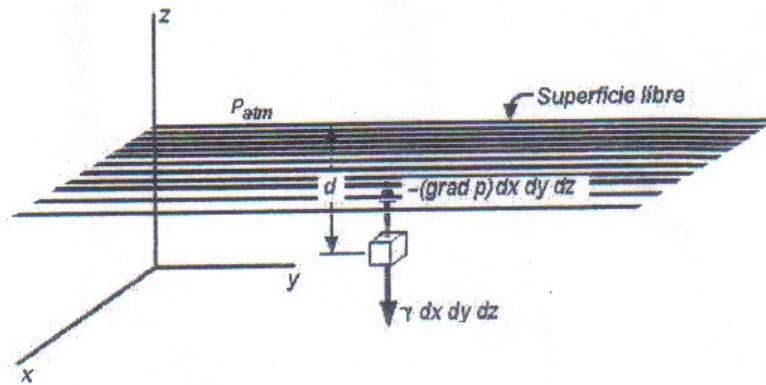


Figura 1. Cuerpo libre de un elemento en un fluido estático

Para el equilibrio, se tiene que.

$$-\gamma dx dy dz \mathbf{k} + (-\text{grad } p) dx dy dz = \mathbf{0}$$

Donde γ es el peso específico. Las ecuaciones escalares resultantes son:

$$\begin{aligned} \frac{\delta p}{\delta x} &= 0 & \frac{\delta p}{\delta y} &= 0 \\ \frac{\delta p}{\delta z} &= -\gamma & & \text{(Ecuación 1)} \end{aligned}$$

Se concluye que la presión varía solo en la dirección z, escogida como la dirección opuesta a la gravedad, como p varía solamente en la dirección z y no es una función de x y y, puede utilizarse una derivada ordinaria en la ecuación 1. Luego,

$$\frac{dp}{dz} = -\gamma \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Esta ecuación diferencial se aplica a cualquier fluido estático compresible o incompresible en un campo gravitacional. Con el fin de evaluar la distribución de presiones, debe integrarse esta ecuación entre límites convenientemente elegidos. Escogiendo el subíndice 0 para representar las condiciones en la superficie libre,

se integra desde cualquier posición z , donde la presión es p , hasta la posición z_0 , donde la presión es atmosférica y se denota como P_{atm} . Luego,

$$\int_p^{P_{atm}} dp = \int_z^{z_0} -\gamma dz$$

Tomando γ como una constante³, la integración es inmediata. De este modo se obtiene:

$$p_{atm} - p = -\gamma(z_0 - z)$$

$$p - p_{atm} = \gamma(z_0 - z) = \gamma d$$

Donde, d es la distancia por debajo de la superficie libre (ver figura 1). Usualmente el término $p - p_{atm}$, es decir, la diferencia de presión con respecto a la presión atmosférica, se conoce como presión manométrica, y se representa mediante el símbolo p_{man} o p manométrica. Luego,

$$p_{man} = \gamma d \quad (\text{Ecuación 3})$$

De las anteriores ecuaciones se concluye que para cualquier fluido estático la presión a una profundidad dada por debajo de la superficie libre permanece constante para esa profundidad en cualquier lugar del fluido.

3.1.2. Fuerza hidrostática sobre una superficie plana sumergida en un fluido estático incompresible⁴. Un problema muy común en el diseño de estructuras

³ Aquí se considera que g es constante en el intervalo de interés, que es un paso que puede tomarse en la mayor parte de los problemas de ingeniería relacionados con hidrostática. Además se considera que el fluido es incompresible, que $\gamma = \rho g$ es constante, en este momento se restringe el análisis de los líquidos.

⁴ *Ibíd.*, p. 61

que interaccionan con fluidos es el cálculo de la fuerza hidrostática sobre una superficie plana. Si se desprecian las variaciones de densidad en el fluido, se puede aplicar la (ecuación 3), que nos indica que la presión sobre cualquier superficie sumergida varía linealmente con la profundidad. En este caso, dado que se presenta una distribución lineal de esfuerzos, el problema hidrostático se reduce a formulas que atañen al centroide o centro de gravedad y a los momentos de inercia de la sección plana. En la figura 2. Se considera el caso general en el que la superficie plana sumergida A, forma un ángulo θ con el plano piezométrico. Con propósito de cálculo, el plano de la superficie sumergida se extiende hasta que interseque el plano de la superficie libre formando el ángulo θ . La traza de esta intersección se muestra como el eje x. Nótese que el eje y es coplanar con la superficie superior de la placa, sobre la placa actúan sobrepuestas una presión uniforme causada por la presión atmosférica en la superficie libre, y una presión que se incrementa uniformemente, debida a la acción de la gravedad sobre el líquido.

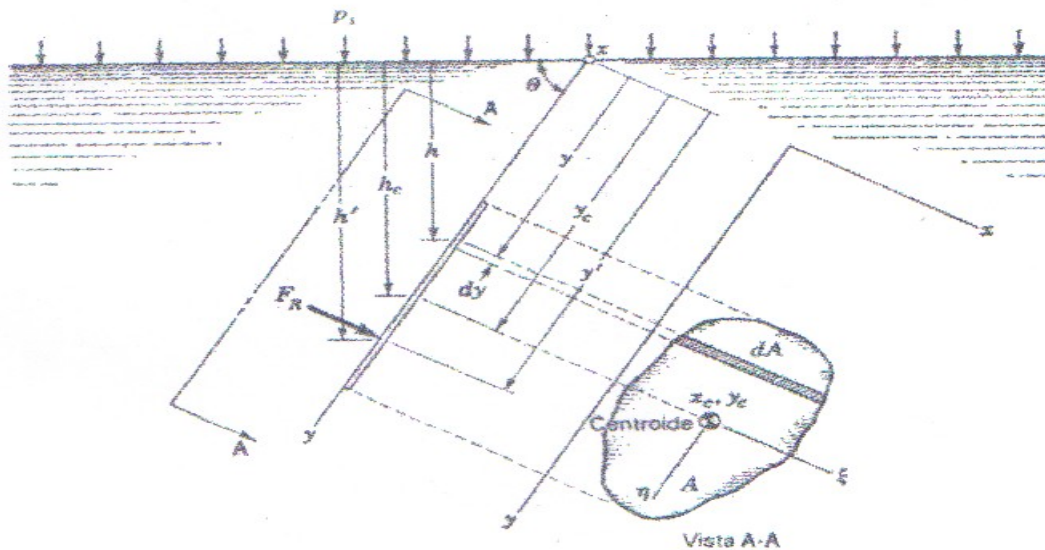


Figura 2. Superficie plana sumergida en un líquido.

El elemento de área dA , ha sido seleccionado, en una profundidad uniforme y en consecuencia está sujeto a una presión constante. La magnitud de la fuerza sobre este elemento es, por consiguiente, $\gamma h dA$. Al integrar sobre el área de la placa se obtiene el valor de la fuerza resultante:

$$F_R = \int_A \gamma h dA = \int_A \gamma y \text{sen} \theta dA = \gamma \text{sen} \theta \int_A y dA$$

Obsérvese que $\int_A y dA$ es el primer momento de área de la placa con respecto al eje x ; en su lugar, puede utilizarse el término Ay_c , donde y_c es la coordenada del centroide de esta superficie. Luego,

$$F_R = \gamma \text{sen} \theta y_c A = \gamma h_c A = p_c A \quad (\text{Ecuación 4})$$

De la ecuación anterior puede concluirse que el valor de la fuerza resultante debida a una presión que se incrementa de modo uniforme puede evaluarse con mayor facilidad, imaginando que la presión en el centroide actúa uniformemente sobre toda el área y calculándola en consecuencia.

Es claro que la *fuerza total* F_R debida a la presión uniforme p_s que actúa en la superficie libre y a la presión causada por la gravedad que se incrementa uniformemente sobre el líquido, está dada por

$$F_R = (p_s + \gamma h_c) A = p_c A \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde ahora p_c es la presión total en el centroide.

La posición inclinada y' del punto de aplicación de la fuerza resultante se calcula igualando el momento de la fuerza resultante F_R con respecto al eje x , con la suma del momento con respecto a la presión p , sobre el área más el momento con respecto al eje x de la presión que se incrementa uniformemente en el líquido sobre el área. Por consiguiente,

$$F_{Ry'} = \int_A y(p_s + \gamma h) dA$$

Remplazando F_R y h se tiene:

$$p_c A y' = \int_A y [p_s + \gamma (y \sin \theta)] dA$$

Donde p_c es la presión total absoluta en y_c causado por p_s y por la presión que se incrementa uniformemente en el líquido, ahora se describe la anterior ecuación como:

$$\begin{aligned} p_c A y' &= p_s \int_A y dA + \gamma \sin \theta \int_A y^2 dA \\ &= p_s A y_c + \gamma \sin \theta I_{xx} \end{aligned}$$

Donde, I_{xx} es el segundo momento de área con respecto al eje x . Ahora se utiliza el teorema de transferencia para reemplazar I_{xx} por $I_{\xi\xi} + A y_c^2$, donde $I_{\xi\xi}$ es el segundo momento de área con respecto al eje centroidal ξ paralelo al eje x (ver figura 2). Luego,

$$p_c A y' = p_s A y_c + \gamma \sin \theta (I_{\xi\xi} + A y_c^2)$$

Notando que $\gamma y_c \sin \theta + p_s = p_c$, el miembro derecho de la anterior ecuación puede describirse como seguido:

$$p_c A y' = p_s A y_c + \gamma \sin \theta I_{\xi\xi}$$

Reordenando los términos se llega a la ecuación deseada:

$$y' - y = \frac{\nu \text{sen} \theta I_{\xi\xi}}{p_c A} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde nuevamente p_c es la presión absoluta total en el centroide de área.

La posición del punto de aplicación de la fuerza resultante sobre la superficie sumergida se conoce como el centro de presión. Como los términos de la parte derecha de la anterior ecuación son positivos, puede verse que el centro de presión siempre estará por debajo del centroide.

La posición lateral del centro de presión x' (ver figura 3) se deduce de forma similar a la posición inclinada y' . Luego,

$$x' - x_c = \frac{\nu \text{sen} \theta I_{\xi\eta}}{p_c A} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Con propósito de claridad, la vista perpendicular A-A de la figura 2 se muestra nuevamente en la figura 3.



Figura 3 vista perpendicular de una superficie plana

Debe tenerse en cuenta que $I_{\xi\eta}$ es el producto del área respecto de aquellos ejes centroidales paralelos y perpendiculares, respectivamente, a la intersección del plano de área con la superficie libre.

3.1.3 Presión hidrostática sobre una superficie curva cilíndrica sumergida.

Las fuerzas sobre superficies sumergidas en cualquier fluido estático pueden determinarse parcialmente mediante los métodos utilizados para superficies planas, presentados anteriormente. En la figura 4 se muestra una superficie curva cilíndrica CD 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_{py} .

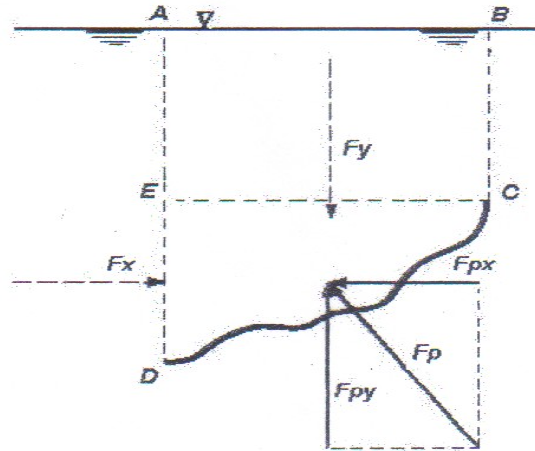


Figura 4 Presión hidrostática F_p sobre una superficie curva cilíndrica sumergida CD

Donde la componente horizontal F_{px} se obtiene al aislar como cuerpo libre el volumen a la izquierda de la superficie, representado en la figura por ECD, limitado por el plano horizontal EC y el vertical ED. El equilibrio horizontal nos dice que $F_{px} = F_x$, en que F_x es igual en magnitud y línea de acción a la presión que ejerce el fluido sobre el plano vertical ED. Por tanto, la componente horizontal de la fuerza ejercida sobre una curva es igual a la fuerza ejercida sobre el área plana formada por la proyección de aquella sobre un plano vertical.

Para determinar la componente vertical F_{py} , se debe considerar como cuerpo libre el volumen del líquido encima de la superficie, representado en la figura por ABCD, el equilibrio vertical nos dice que, $F_{py} = F_y$, en que F_y 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 dirección al peso de la columna del fluido, líquido y aire atmosférico que hay encima de dicha superficie.

3.1.4. Leyes de Boyamiento. La fuerza de Boyamiento sobre un cuerpo se define como la fuerza vertical neta causada por el fluido o los fluidos en contacto con el cuerpo. En un cuerpo de flotación, la fuerza superficial causada por los fluidos en contacto con el mismo, se encuentran en equilibrio con la fuerza de gravedad que actúa sobre el cuerpo. Para determinar la fuerza de Boyamiento sobre cuerpos en flotación y sujetos a otras condiciones, solo es necesario calcular la fuerza vertical neta sobre la superficie del cuerpo utilizando los mismos principios utilizados para calcular las fuerzas hidrostáticas sobre superficies, en consecuencia, no son necesarias nuevas ecuaciones en los problemas de Boyamiento. Se considera entonces las dos leyes de flotación enunciadas por Arquímedes en el siglo tercero antes de Cristo:

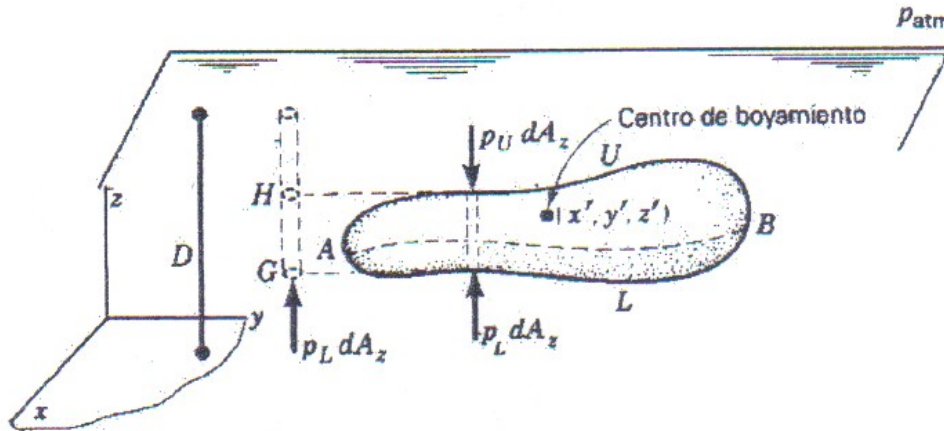
1. Un cuerpo sumergido en un fluido experimenta una fuerza de flotación vertical igual al peso del fluido que desaloja.

2. Un cuerpo que flota desaloja su propio peso en el fluido en el que flota.

En la figura 5 se muestra un cuerpo completamente sumergido, correspondiente a la primera ley. Nótese que la presión atmosférica P_{atm} en la superficie libre produce una presión uniforme en todo el fluido, por debajo de la superficie libre. Por lo consiguiente no se tendrá en cuenta para el cálculo de la fuerza de Boyamiento. Para determinar la fuerza de Boyamiento, se considera una columna vertical infinitesimal en el cuerpo con áreas de sección transversal dA_z , y haciendo un análisis de fuerzas hidrostáticas sobre el cuerpo se obtiene que:

$$F_b = \gamma \int (z_u - z_l) dA_z = \gamma V \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde, V es el volumen del cuerpo sumergido, con los cual se verifica que la fuerza neta hacia arriba es el peso del fluido desplazado.



Figura

5. Cuerpo sumergido en un fluido⁵

Ahora, el centro de Boyamiento (centro de empuje, centro de flotación) que es la posición espacial donde puede considerarse que actúa la fuerza de Boyamiento. Se determina igualando el momento de la fuerza resultante F_b respecto al eje y con los momentos de la distribución de presiones del fluido envolvente, luego:

$$F_b x' = \gamma \int x (z_u - z_l) dA_z = \gamma \int_V x dv \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde dv representa el volumen del prisma elemental, reemplazando F_b por γV y resolviendo para x' se obtiene:

$$x' = \frac{\int_V x dv}{V} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Puede verse que x' es la componente x del vector posición desde xyz hasta el centroide del volumen desplazado por el cuerpo. Por consiguiente, puede concluirse

⁵ Ibíd. p.78

que la fuerza de Boyamiento ejercida por un fluido incompresible pasa por el centroide de volumen de líquido desplazado por el cuerpo.

Ahora, para el caso de un cuerpo en flotación en la interfaz de dos fluidos no miscibles (figura 6), (este es el caso de todos los cuerpos en flotación, siendo los fluidos agua y aire). Es claro que la fuerza vertical neta que produce los fluidos sobre el prisma es igual al peso de la columna a del fluido A más el peso de la columna b del fluido B. Al integrar estas fuerzas para cubrir todo el cuerpo, la fuerza de Boyamiento es igual a la suma de los pesos de los fluidos desplazados por el cuerpo. Ya que los valores de γ son diferentes, entonces es inválido el argumento de que la fuerza de Boyamiento pasa por el centroide de volumen total desplazado por el cuerpo. Sin embargo en trabajos náuticos usualmente se ignora el peso específico del aire, cuyo caso puede considerarse que el centro de Boyamiento está en el centroide de volumen de agua desplazada por el cuerpo.

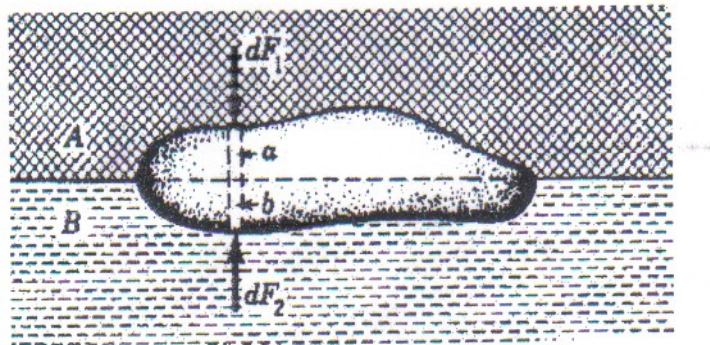


Figura 6. Cuerpo en flotación en la interfaz de dos fluidos no miscibles⁶

4. FOTOS BANCO DE HIDROSTATICA

⁶ *Ibíd.*, p. 79

4.1. MONTAJE DE PRESION HIDROSTATICA SOBRE SUPERFICIES PLANAS Y CURVAS SUMERGIDAS

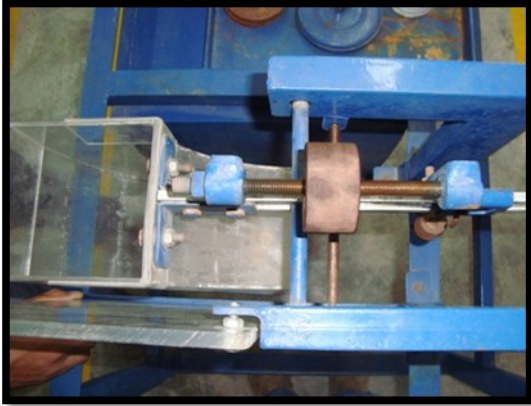


Foto No. 1

Descripción: Masa de equilibrio

Fecha de visita: 24 de Mayo de 2009

Lugar: Universidad de Ibagué

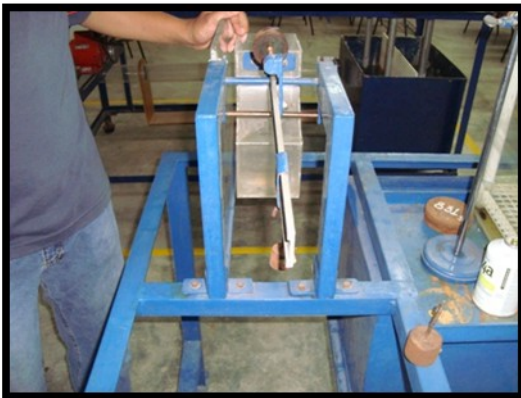


Foto No. 2

Descripción: Brazo

Fecha: 24 de Mayo de 2009

Lugar: Universidad de Ibagué



Foto No. 3

Descripción: Eje pivotante

Fecha: 24 de Mayo de 2009

Lugar: Universidad de Ibagué

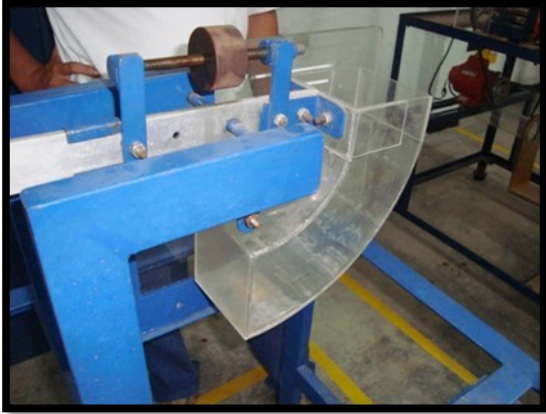


Foto No. 4

Descripción:
Recipiente de acrílico

Fecha: 24 de Mayo
de 2009

Lugar: Universidad
de Ibagué



Foto No. 5

Descripción:
Recipiente de
acrílico, vista lateral

Fecha: 24 de Mayo
de 2009

Lugar: Universidad
de Ibagué

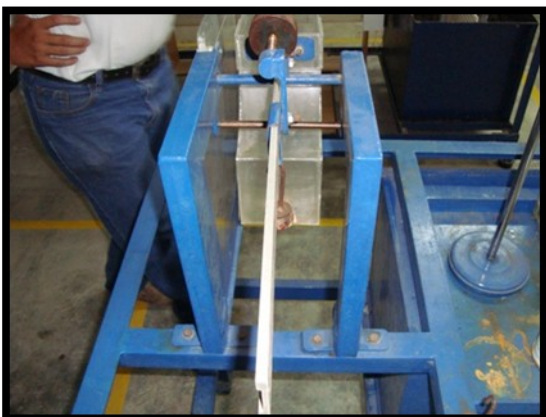


Foto No. 6

Descripción: Brazos
soporte

Fecha: 24 de Mayo
de 2009

Lugar: Universidad
de Ibagué

4.2. MONTAJE DE FUERZA DE BOYAMIENTO



Foto No. 7

Descripción:
Recipiente de vidrio

Fecha: 24 de Mayo
de 2009

Lugar: Universidad
de Ibagué



Foto No. 8

Descripción: Reglilla
Cuerpo flotante

Fecha: 24 de Mayo
de 2009

Lugar: Universidad
de Ibagué

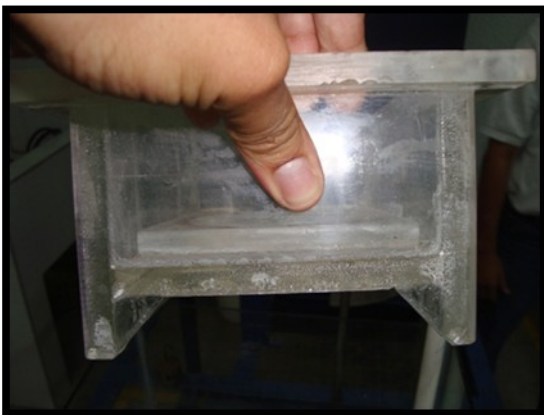


Foto No. 9

Descripción: Cuerpo
flotante

Fecha: 24 de Mayo
de 2009

Lugar: Universidad
de Ibagué



Foto No. 10

Descripción:
ubicación banco de
hidrostática

Fecha: 24 de Mayo
de 2009

Lugar: Universidad
de Ibagué

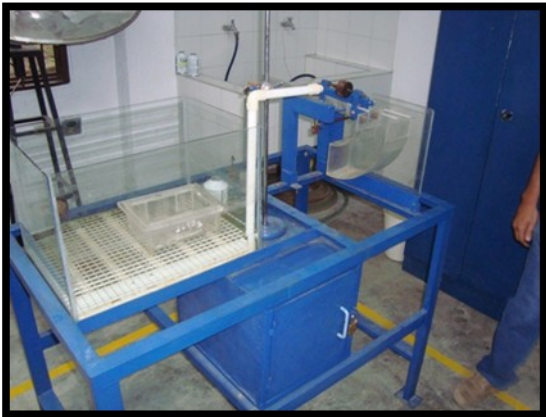


Foto No. 11

Descripción:
estructura banco de
hidrostática

Fecha: 24 de Mayo
de 2009

Lugar: Universidad
de Ibagué



Foto No. 12

Descripción: Banco
de ensayo de
hidrostática

Fecha: 24 de Mayo
de 2009

Lugar: Universidad
de Ibagué

5. DESCRIPCIÓN DE LOS BANCOS

5.1. CARACTERÍSTICAS GENERALES

El banco de prueba de hidrostática se ubicara en el laboratorio de la Corporación Universitaria Minuto de Dios de Girardot, lugar donde se desarrollan los ensayos empleados para las pruebas de hidrostática, un conjunto de elementos donde se destacan: recipiente de acrílico, balanza de brazo, cuerpo flotante, juego de pesas y reglillas de medición.

5.2. BANCO DE PRUEBAS DE HIDROSTÁTICA

El banco de pruebas de hidrostática consta de dos ensayos (ensayo de presión hidrostática y ensayo de fuerza de Boyamiento) los cuales se describen seguidamente.

5.2.1. Ensayo de presión hidrostática. En este montaje se efectúa el análisis experimental de la presión hidrostática sobre superficies planas y curvas sumergidas. A continuación, se detallan los componentes del equipo.

- **Recipiente y placa de referencia.** Se emplea, un recipiente de sección transversal rectangular (ver plano 7/19) construido totalmente en acrílico cristal de 4 mm, sobre el cual se encuentra una reglilla (de acetato con escala en mm), con la que se puede verificar el nivel del agua depositado en el recipiente. El recipiente se fija al equipo mediante unión atornillada (ver plano 1/19).

Enseguida, se describe las características generales del acrílico, utilizado para la construcción del recipiente y placa de referencia: el acrílico tiene un índice de transmisión de la luz de 92°, un peso específico que es,

aproximadamente, la tercera parte del correspondiente al vidrio. No le afectan los cambios de temperatura y tiene excelentes propiedades mecánicas, con una resistencia al choque diez veces superior a la del cristal, es muy fácil de moldear y de trabajar con sierra, taladro etc.

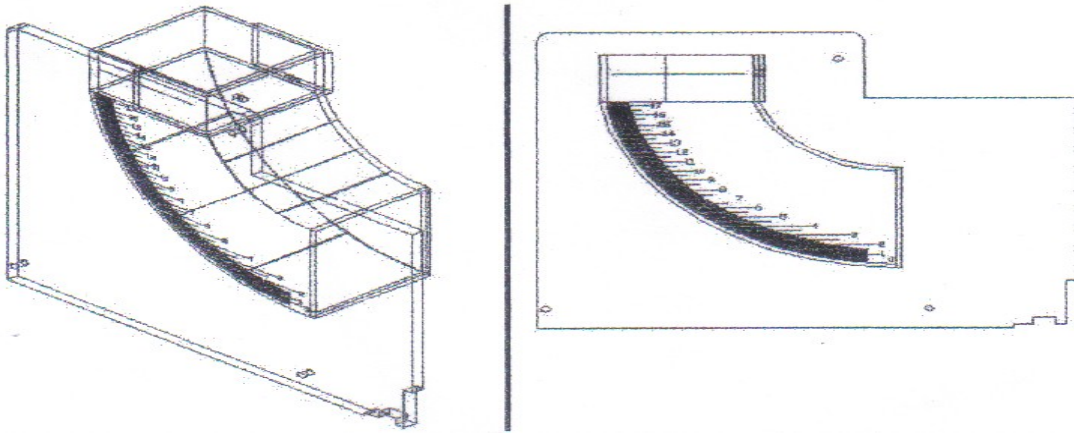


Figura 7. Recipiente y placa de referencia del ensayo de presión hidrostática.

- **Balanza y sistema de equilibrio inicial.** Se maneja una balanza de brazo, la cual consta de un brazo (en aluminio) (ver plano 10/19) en el que de un lado se acoplan el recipiente de acrílico y se fija parcialmente el sistema de equilibrio inicial, todo mediante unión atornillada (ver plano 1/19). Del otro lado, se encuentra el indicador que puede alojar un contrapeso que sirve para equilibrar el sistema de balanza de acuerdo con los requerimientos del ensayo (ver plano 12/19). El brazo dispondrá de una reglilla usada para determinar la posición del contrapeso (n), dicho brazo se acopla al eje pivotante (eje de acero 1020HR de 11 mm de diámetro) (ver plano 11/19), que se ubica sobre dos rodamientos tipo abierto 8-22 mm, asegurando la fácil rotación del equipo, estos irán fijos sobre dados (en acero 1020HR de sección cuadrada de 31.8 mm, maquinados), que a su vez están montados

sobre los dos brazos de apoyo (en tubo de sección rectangular de 1" por 2" calibre 18) del equipo (ver plano 5/19). Entre los brazos de apoyo se dispuso de un eje tensor, cuya función es la de dar mayor rigidez a la estructura (en acero 1020HR, de 9 mm de diámetro, maquinado) (ver plano 13/19)

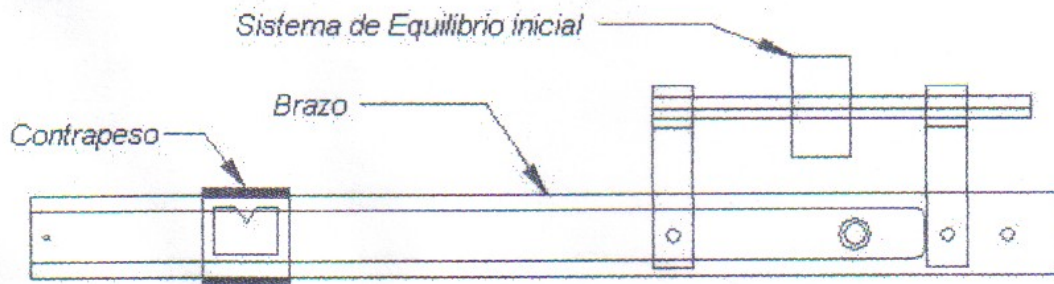


Figura 8. Brazo y sistema de equilibrio inicial.

El sistema de equilibrio inicial que se emplea (ver plano 4/19), consta de dos brazos de apoyo (fabricados en platino de $3/16'' \times 3/4''$) ver plano 5/19), sobre los cuales se dispone un eje roscado (en acero 1020HR, rosca de $3/8''$) (ver plano 4/19), en el que se desplaza una pesa (en acero 1020HR de 2" de diámetro) (ver plano 16/19), induciendo el equilibrio inicial del sistema.

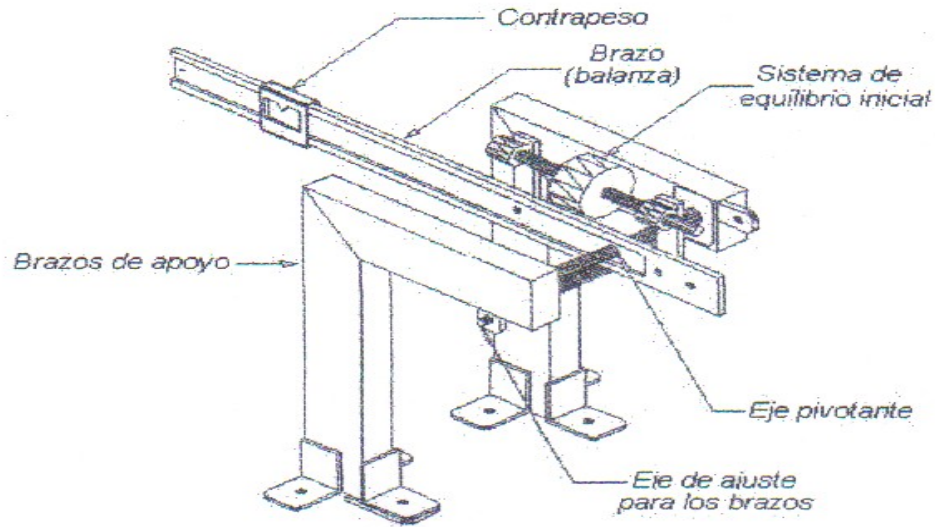


Figura 9. Estructura del equipo de presión hidrostática.

- **Toma de datos.** En principio, se lleva el equipo a un estado de equilibrio inicial (sin líquido en el recipiente) con el desplazamiento de la pesa del sistema de equilibrio inicial y la verificación de la linealidad de las líneas de nivel del recipiente y la placa de referencia. Luego, se deposita agua en el recipiente montado en el equipo y se induce de nuevo el equilibrio. Una vez dada esta condición, se toma el dato del nivel de líquido depositado en el recipiente (s) (con el uso de la reglilla situada en el recipiente) y la magnitud de la distancia entre el centro del eje pivotante y la posición del indicador del contrapeso (n) sobre la reglilla de la medición dispuesta en el brazo sobre el cual se desliza el indicador con su respectivo contrapeso.

Para determinar la presión hidrostática ejercida por el líquido sobre el recipiente, inicialmente se determina el punto de aplicación de la fuerza hidrostática (F_H) sobre la placa de sección cuadrada, tal como se muestra más adelante en la sección 6.1.1. Luego se mide la posición del contrapeso (n). Con estos datos se hace sumatoria de momentos respecto al centro del

eje pivotante en el plano radial del recipiente de ese cálculo resulta el valor de la fuerza hidrostática sobre la placa, procedimiento que se ampliara en la sección 6.1.1. En la siguiente grafica se observa la disposición de los componentes del equipo de presión hidrostática.

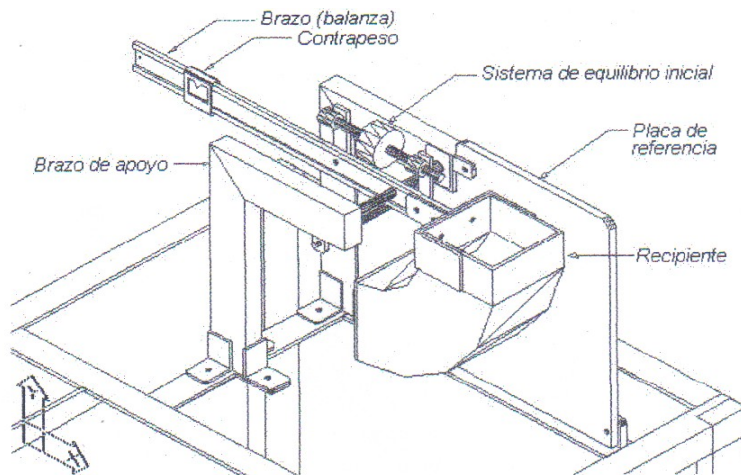


Figura 10. Disposición de los componentes del equipo de presión hidrostática.

➤ **Metodología de la medición.** Para la correcta ejecución del ensayo se debe seguir los siguientes pasos:

I) Inicialmente, se une el recipiente al equipo mediante la unión atornillada.

II) Se debe retirar el indicador de la balanza, antes de inducir el equilibrio inicial del equipo.

III) Se lleva el sistema a un estado de equilibrio inicial, por medio del sistema dispuesto para este fin (desplazando la pesa del sistema de equilibrio inicial)

IV) Luego, se deposita el agua en el recipiente, en un volumen cualquiera.

V) Después, se desplaza el contrapeso (indicador sólo ó con contrapeso, de acuerdo, al nivel de agua en el recipiente) sobre el brazo hasta conseguir el equilibrio, en el cual debe verificarse con el uso de la línea de nivel, ubicada en la placa de referencia.

VI) Se mide el nivel del líquido en el recipiente (s), observando el nivel del líquido respecto a la reglilla dispuesta en el recipiente.

VII) Se toma el dato de la distancia entre el centro del eje pivotante y el indicador del contrapeso (n).

VIII) Se repite el procedimiento anterior desde el numeral (IV), agregando más agua con el propósito de obtener varias mediciones con valores distintos de nivel de agua contenidos en el recipiente.

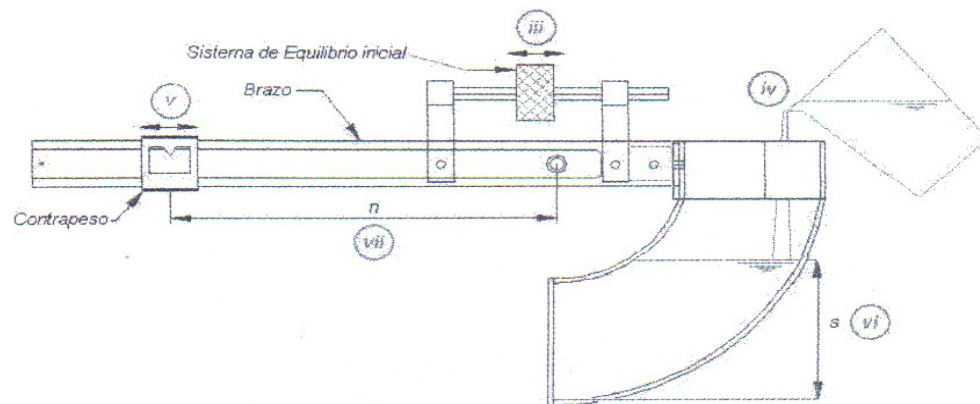


Figura 11. Medición para el ensayo de la presión hidrostática.

5.2.2. Ensayo de fuerza de Boyamiento. En este montaje se lleva a cabo el análisis experimental de la fuerza de Boyamiento sobre el cuerpo parcialmente sumergido. A continuación se describe los componentes de este ensayo.

- **Cuerpo flotante y recipiente.** El cuerpo flotante (ver figura 12) es un cuerpo fabricado en acrílico de 1 cm de espesor (ver plano 8/19), el cual posee un alojamiento para fijar pesas (ver plano 19/19 y 18/19).

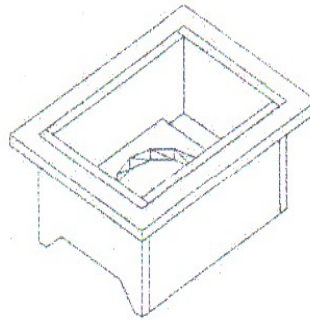


Figura 12. Cuerpo flotante.

El recipiente (tanque de vidrio). En el que se efectúa el ensayo, se construyó con placas de vidrio de 4mm de espesor, unidas con siliconas (ver plano 15/19), en el cual se adecuó un sistema de desagüe, compuesta por un tapón de $\frac{3}{4}$ " , dispuesto en la cara inferior del recipiente. En la cara lateral del cuerpo flotante se acondiciona una reglilla de referencia, con el propósito de determinar el nivel de hundimiento del cuerpo.

- **Pesas.** Se emplean dos pesas (ver planos 19/19 y 18/19) fabricadas en acero 1020HR, mediante proceso de maquinado, las cuales tienen peso diferente debido a sus diferentes formas.

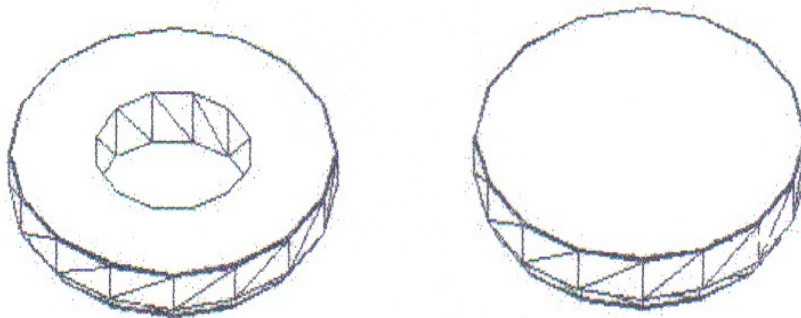


Figura 13. Pesas del ensayo de fuerza de Boyamiento

- **Toma de datos.** La fuerza de Boyamiento, se calcula con un conjunto de datos recogidos en el ensayo, tal como el nivel de hundimiento del cuerpo flotante, el cual se observa con una reglilla dispuesta en la cuerpo flotante, hundimiento que en un principio es debido a la acción de la aceleración gravitacional sobre el cuerpo y en el transcurso del ensayo también a la fuerza ejercida por la adicción de otros cuerpos (pesas) de diferentes peso al cuerpo flotante.

Para hallar el valor de la fuerza de Boyamiento, se determina el nivel de hundimiento (h), se calcula el volumen del cuerpo sumergido (V_d) y conociendo el valor del peso específico del agua (γ_h), se encuentra el empuje, como se muestra más adelante en el capítulo de cálculos (6.2.).

En la siguiente grafica se observan los componentes del equipo para el ensayo de fuerza de boyamiento:

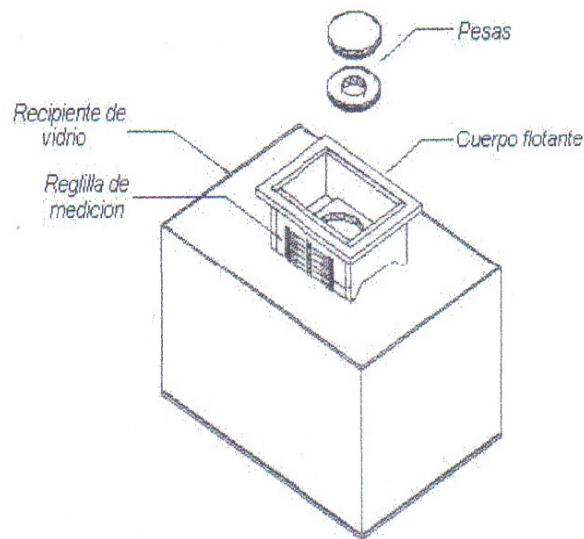


Figura 14. Componentes del equipo de fuerza de Boyamiento

- **Metodología de la medición.** Para la correcta ejecución del ensayo se debe de seguir los siguientes pasos:

I) Inicialmente, se toman las mediciones del cuerpo flotante, para poder así determinar el volumen del cuerpo y se verifica el peso del cuerpo.

II) Luego debe llenarse el recipiente de vidrio hasta un nivel que permita desarrollar el ensayo.

III) Se sumerge el cuerpo flotante en el agua y se registra el dato del nivel de hundimiento (h), con el uso de la reglilla dispuesta en el cuerpo flotante.

IV) Por último, se adicionan las pesas al cuerpo y se calcula los nuevos valores del nivel de hundimiento (h).

5.2.3. Estructura del banco de hidrostática

Básicamente, la estructura para el banco de presión hidrostática fue hecha en ángulo de alas iguales de 1 ½" x 3/16" y en platino de 1 ¼" x 1/18" (ver plano 2/19), con soldadura de electrodo revestido (E6013 1/8"), además se adaptó un soporte para el tanque del ensayo de fuerza de Boyamiento, en lamina CR calibre 18.

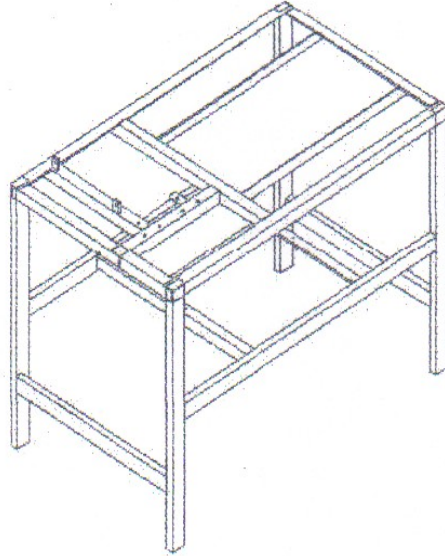


Figura 15. Estructura del banco de hidrostática.

6. CALCULO

6.1. Ensayo de presión de hidrostática. En seguida, se presenta los cálculos necesarios para lograr la comprensión del fenómeno estudiado.

6.1.1. Calculo de la presión hidrostática sobre el recipiente. Inicialmente, se explica el principio físico que se desarrollara en el ensayo. Cuando el recipiente,

tiene agua dentro de sí, la presión hidrostática, actúa normalmente a las placas internas del recipiente, tal como se ve en la figura 16. (En la que se muestra que las placas curvas cilíndricas son concéntricas), por lo tanto, los vectores de los elementos diferenciales de fuerza, atraviesan el centro de las curvas que describen las placas internas del recipiente. Si se tiene en cuenta que el eje pivotante (respecto al cual rota el recipiente) está ubicado en el centro de curvatura de las placa curvas circulares, entonces, se deduce que la presión hidrostática ejercida sobre las placas curvas producen momento rotacional cero, respecto al centro de las placas curvas (centro del eje pivotante).

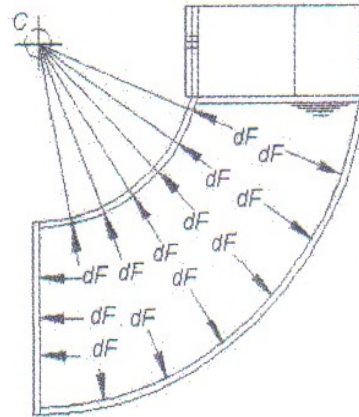


Figura 16. Diferenciales de fuerza hidrostática sobre las caras internas del recipiente.

En conclusión, la presión hidrostática que ejerce momento efectivo en la balanza, es la ejercida en la placa plana transversal del recipiente (ver figura 17.)

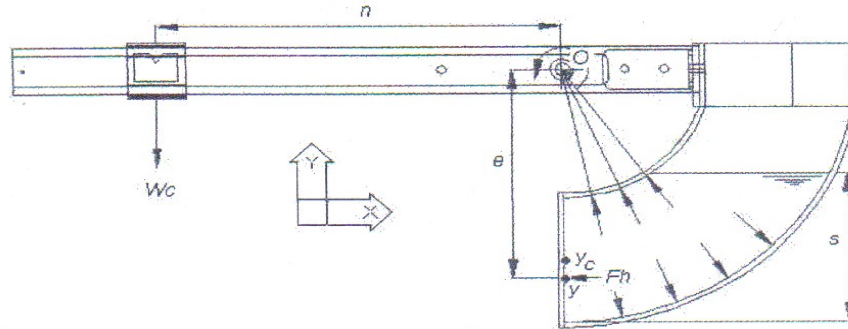


Figura 17. Momentos rotacionales resultantes del ensayo de presión hidrostática.

De la figura anterior se puede deducir (por sumatoria de momentos respecto a "0") que:

$$F_h = \frac{W_c \cdot n}{e} \quad (\text{ecuación 11})$$

Donde:

- W_c = peso en kg de los cuerpos utilizados como contrapeso.
- e = posición del punto de aplicación de la fuerza hidrostática sobre la placa

Plana (centro de presión) respecto al punto "0"

- n = distancia entre la posición del contrapeso y el punto "0".

Entonces la presión hidrostática (P_h) (ver figura 18) es igual a:

$$P_h = \frac{F_h}{b \cdot d} = \frac{Wc \cdot n}{e \cdot b \cdot d} \quad (\text{Ecuación 12})$$

6.1.2. Posición del centro de presión. La posición del punto de aplicación del centro de presión (e), se calcula respecto al centroide de la placa plana sumergida, tal como se observa a continuación:

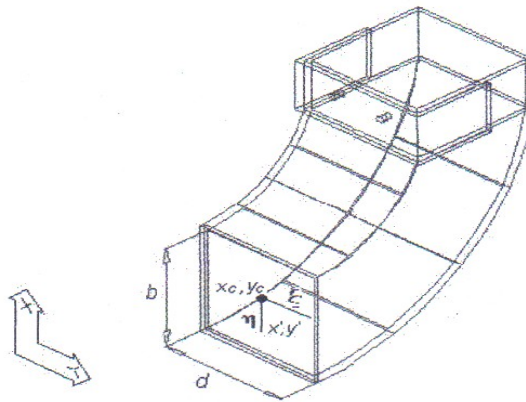


Figura 18. Centroide de la placa sumergida.

Al considerar la posición lateral del centro de presión se observa que el producto de inercia del área respecto del sistema de ejes ξ, η (ver figura 18), respecto de los ejes con origen en el centroide es nulo (a causa de la simetría) por tanto $x' = x_c$ (donde x' es el punto de la aplicación del centro de presión en el eje x , y x_c es la posición del centroide en el mismo eje). Esto significa que el centro de presión está sobre el eje de simetría situada sobre el plano vertical (ver ecuación 6). El centro de presión está localizado a una distancia debajo del centroide, $y - y_c$:

$$y - y_c = \frac{\gamma I_{\xi\xi}}{\rho_c A} = - \frac{\gamma \cdot d \cdot \frac{b^3}{12}}{\gamma \left(s - \frac{b}{2}\right) \cdot b \cdot d} = - \frac{b^2}{12s - 6b} \quad (\text{Ecuación 13})$$

6.2. Ensayo de fuerza de Boyamiento. Inicialmente, se determina el volumen del cuerpo flotante que se encuentra sumergido (V_d) (que depende de el nivel de hundimiento h del cuerpo y la geometría del mismo, ver plano 8/19), el cual es igual al volumen del liquido desplazado (de acuerdo con lo que se describe en la sección 1.5.), y si tenemos en cuenta que todo cuerpo sumergido total o parcialmente en un liquido sufre un empuje vertical hacia arriba (fuerza de Boyamiento) igual al peso del liquido desplazado, entonces la fuerza de Boyamiento (F_b) es igual a:

$$F_b = V_d \cdot \gamma_h \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde, γ_h es el peso específico del agua el cual para efecto de los cálculos es: $\gamma_h = 998,2 \text{ kg/m}^3$. El anterior procedimiento, se repite luego de adicionarse las pesas al cuerpo flotante.

Para calcular los niveles de hundimiento teórico (h_t) en cada uno de las pruebas (cuerpo flotante sólo y cuerpo flotante más pesas), se plantea el equilibrio entre peso total del cuerpo flotante más las pesas y el peso del agua desplazada de la siguiente forma:

Peso total del cuerpo flotante y la pesa = peso del agua desplazada

$$(W_{1c} + W_{1p}) = \gamma_1 h * V_{1d} \quad (\text{Ecuación 15})$$

De la ecuación anterior se despeja el nivel de hundimiento teórico (h) del volumen desplazado (V_d) teniendo en cuenta la geometría del cuerpo flotante.

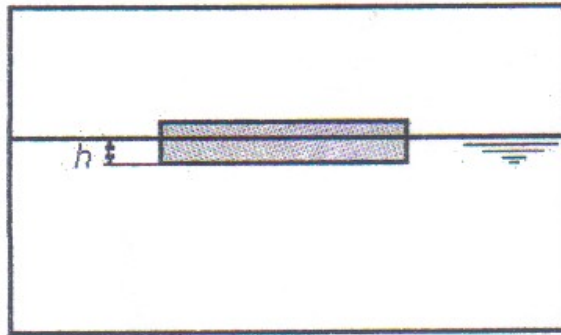


Figura 19. Nivel de hundimiento (ensayo de fuerza de Boyamiento)

7. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

7.1. ENSAYO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Análisis experimental de la presión hidrostática sobre superficies planas y curvas sumergidas.

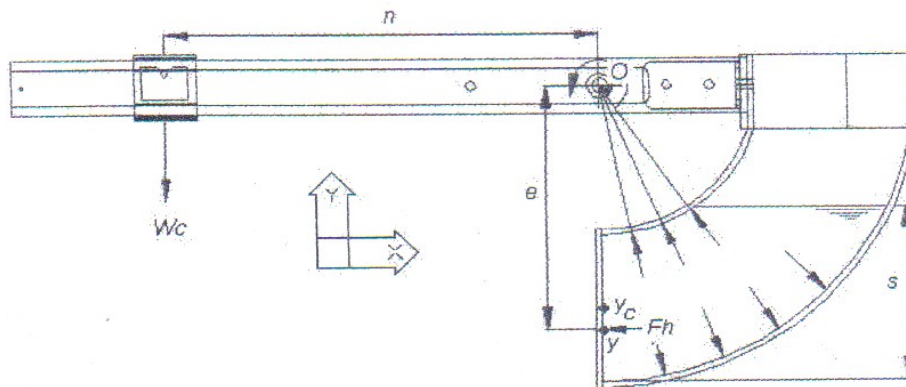


Figura 20. Esquema del ensayo de presión hidrostática.

7.1.1. Datos teóricos. De acuerdo a la ecuación 4, la fuerza hidrostática ejercida sobre la placa (ver figura 21) es:

$$F_h = \rho \cdot h \cdot A \quad (\text{Ecuación 16})$$

El centro de presión para distintos niveles de líquido en el recipiente, es (según la ecuación 13):

$$y - y_c = \frac{\rho I_{\xi\xi}}{\rho_c A} = -\frac{\rho \cdot d \cdot \frac{b^3}{12}}{\rho \left(s - \frac{b}{2}\right) \cdot b \cdot d} = -\frac{b^2}{12s - 6b}$$

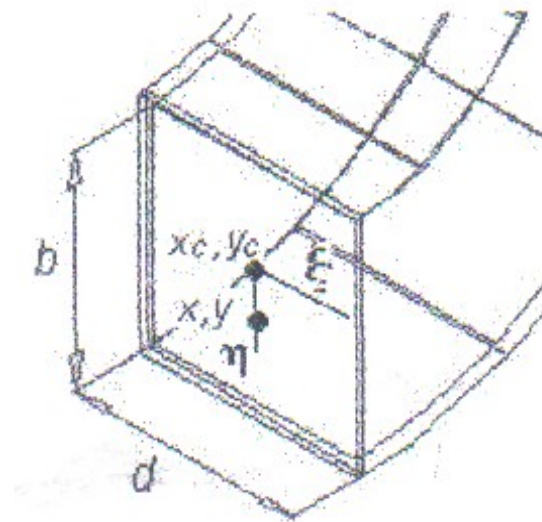


Figura 21. Punto de aplicación de la fuerza hidrostática.

Donde, s es el nivel de agua depositada en el recipiente, entonces, para diferentes volúmenes de agua depositada en el recipiente, se tiene que:

Tabla 1. Datos teóricos de la práctica de presión hidrostática.

Nivel (s) (m)	Centro de presión (y_c)* (m)	fuerza hidrostatica (F_h) (kg)	Presión hidrostática (P_h) (kg)
0,01	0,2007	0,005	5
0,02	0,1973	0,02	10
0,025	0,1957	0,03125	12,5
0,03	0,194	0,045	15
0,04	0,1907	0,08	20
0,05	0,1873	0,125	25
0,07	0,1807	0,245	35
0,1	0,1707	0,5	50
0,12	0,1659	0,72	72
0,14	0,1633	0,98	98

*Nota: Este valor del centro de presión, es medido desde el centro de rotación de la balanza, es decir es el valor de la variable (e).

7.1.2. Datos experimentales. para distintos niveles de agua contenidos en el recipiente, se tomaron los valores de:

- nivel del líquido contenido en el recipiente(s).
- distancia entre la posición del contrapeso y centro de pivote (n).
- pesos de los cuerpos utilizados como contrapeso (W_c).

En la tabla 2, se muestran los resultados obtenidos del ensayo y la estimación de la incertidumbre experimental (W_{fn}), para cada dato de nivel de líquido depositado en el recipiente, además, se registro el valor de la posición de el centro de presión (e), el cual es necesario para determinar el valor de la fuerza hidrostática (ver sección 6.1.1.).

Tabla 2. Datos experimentales del ensayo de presión hidrostática.

Nivel (s) (m)	Posición del contrapeso(n) (m)	Posición del centro de presión (e) (m)	Peso del contrapeso (W _c) (kg)	Fuerza Hidrostática (F _h) (kg)	W _{fh} (kg)
0,01	0,025	0,2007	0,04	0,0049826	± 0,00023
0,02	0,097	0,1973	0,04	0,0196655	± 0,00034
0,025	0,15	0,1957	0,04	0,0306592	± 0,00053
0,03	0,215	0,194	0,04	0,0443299	± 0,00079
0,04	0,375	0,1907	0,04	0,0786576	± 0,00080
0,05	0,167	0,1873	0,14	0,1248265	± 0,00107
0,07	0,315	0,1807	0,14	0,2440509	± 0,00148
0,1	0,18	0,1707	0,47	0,4956063	± 0,00322
0,12	0,245	0,1659	0,47	0,6940928	± 0,00506
0,14	0,31	0,1633	0,47	0,8922229	± 0,00675

*W_{Fh} = incertidumbre experimental

La estimación de la incertidumbre experimental⁷, se hace en función de las incertidumbres primarias o de las variables independientes, de la siguiente forma:

$$w_{F_h} = \left[\left(\frac{\delta_{F_h}}{\delta_{W_c}} w_{W_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta_{F_h}}{\delta_n} w_n \right)^2 + \left(\frac{\delta_{F_h}}{\delta_e} w_e \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Ecuación 17})$$

⁷ HOLMAN, Jack p. Métodos experimentales para ingenieros. 2Ed. Naucalpan de Juárez: Mc Graw- Hill, 1990. p. 56.

Donde; W_{wc} , W_n y W_e , son las incertidumbres de las variables independientes.

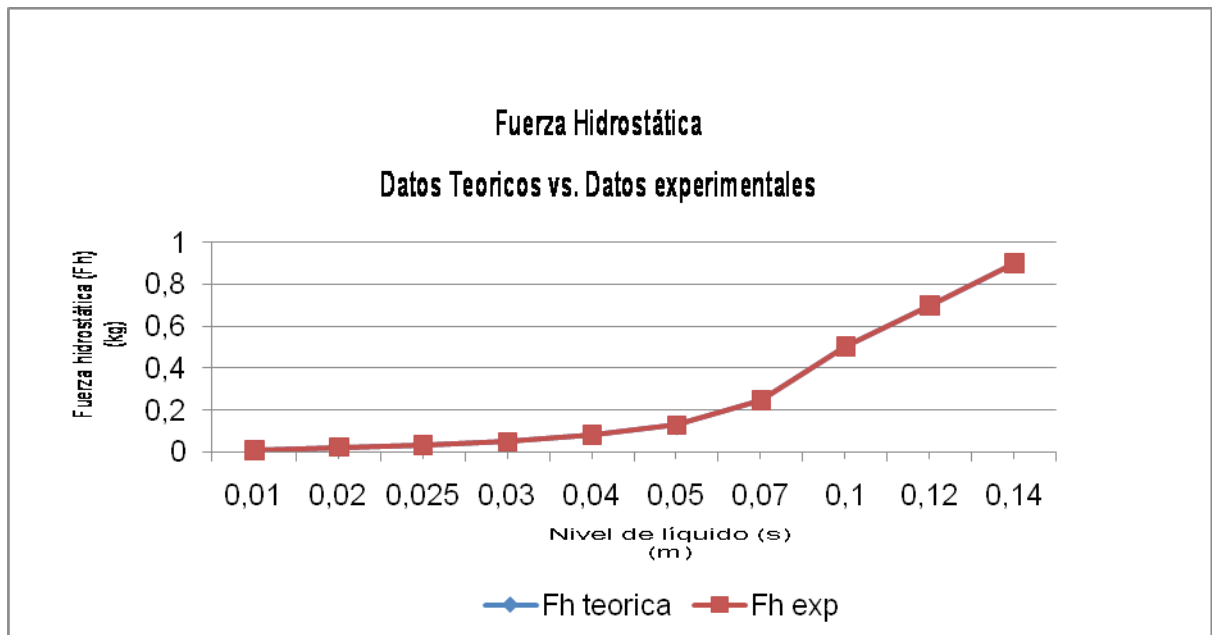


Figura 22. Gráfica de fuerza hidrostática experimental Vs. teórica.

7.1.3. Regresión de los datos experimentales. De acuerdo a los resultados experimentales, es evidente que la fuerza hidrostática varía con el nivel de líquido

depositado en el recipiente; entonces son variables dependientes tales que $F_h = F(s)$. Para determinar la dependencia funcional de las variables, se relacionó matemáticamente las fuerzas hidrostáticas (F_h) experimentales, con los valores del nivel de líquido contenido en el recipiente (s), donde se obtuvo un valor de correlación de 0.9998, mediante una regresión exponencial, lo cual nos indica un buen grado de asociación entre variables⁸. Los resultados obtenidos en la regresión se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Regresión exponencial de los datos experimentales del ensayo de presión hidrostática.

Relación funcional	Ecuación de la regresión	Factor de correlación
$F_h = a * b^{s * s^c}$	$F_h = 162,7370938 * 0,009717632247^{s * s^{2,311462405}}$	0,9998

7.1.4. Cálculo del error de medición. El error de la medición se obtuvo relacionando los valores particulares de la presión hidrostática teórica y experimental, expuesta en las tablas 1 y 2 respectivamente, de la siguiente forma:

$$Error = \left| 1 - \frac{P_{h \text{ experimental}}}{P_{h \text{ teorica}}} \right| * 100$$

⁸ Cuando el valor absoluto del factor de correlación es 1, hay una dependencia funcional perfecta entre las variables.

Los resultados del cálculo del error de medición para distintos niveles de agua Son los siguientes:

Tabla 4. Cálculo del error para el ensayo de presión hidrostática.

Nivel (s) (m)	Fh* teórica kg	Fh experimental kg	Error %
0,01	0,005	0,0049826	0,349
0,02	0,02	0,0196655	1,673
0,025	0,3125	0,0306592	1,891
0,03	0,045	0,0443299	1,489
0,04	0,08	0,0786576	1,678
0,05	0,125	0,1248265	0,139
0,07	0,245	0,2440509	0,387
0,1	0,5	0,4956063	0,879
0,12	0,7	0,6940928	0,274
0,14	0,9	0,8922229	0,422

*Fh= fuerza hidrostática.

7.1.5. Análisis de los resultados. De la tabla anterior se observó que el error de la práctica se encuentra entre 1.891% y el 0.139%, lo cual nos indica un buen nivel de exactitud del ensayo. El error se puede generar por diversas causas y Generalidades se clasifica en tres categorías principales⁹.

- **Errores sistemáticos.** Son aquellos que en igualdad de condiciones, producen siempre un error de la misma magnitud y del mismo signo. Estos errores son totalmente controlables, en el sentido de que puede calcularse

⁹ COPPER, William D. instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición. Ciudad de México: PRENTICE HALL. Pág. 7.

en qué magnitud se afecta el resultado final. Existen diferentes tipos de errores sistémicos:

- a)** Errores instrumentales: son debido a la falta en los líquidos (errores de calibración).

- b)** Errores personales: son errores debidos a predisposiciones del experimentador (errores de paralaje en los instrumentos análogos).

- c)** Errores externos: son como consecuencias de causas externas como: viento, temperatura, humedad, vibraciones, etc.

- d)** Errores en el modelo: este tipo de error se presenta cuando el modelo matemático propuesto del fenómeno que va a ser estudiado no se asemeja a la realidad.

- **Errores accidentales o aleatorios:** son aquellos en los cuales los errores positivos y negativos son igualmente probables debido a múltiples causas cuya influencia es imposible mostrar. Se diferencia de los sistémicos en que es imposible evaluarlos y su cálculo se efectúa con base en teorías probabilísticas, entre ellos tenemos:
 - a) **Errores de apreciación:** como por ejemplo, en la estimación de una fracción de la menor división de una escala.
 - b) **Errores debidos a condiciones que fluctúan:** como por ejemplo, variaciones del voltaje y la corriente de una red de energía eléctrica.
 - c) **Errores debidos a la naturaleza de la magnitud que se mide:** como por ejemplo, variaciones observadas en la longitud de un objeto debido a la falta de pulimiento o paralelismo de las caras.
- **Errores burdos:** son en gran parte de origen humano, como mala lectura de los instrumentos, ajuste incorrecto y aplicaciones inapropiadas, así como equivocadamente en los cálculos. Este tipo de error se deben a técnicas deficientes y deben de tratarse de eliminar. Los demás errores pueden ser reducidos si se emplea técnicas buenas y buenos instrumentos, pero nunca pueden ser eliminados totalmente.

A continuación, se describe los errores que se dan en el ensayo de presión hidrostática según la clasificación anterior:

➤ **Errores sistemáticos.**

a) Errores instrumentales:

- Precisión de la reglilla usada en el ensayo.

b) Errores personales.

- Error en la verificación del equipo inicial y el equilibrio del ensayo.
- Error en la medición del recipiente en el cual se depositó el agua.

➤ **Errores accidentales o aleatorios**

a) Errores de apreciación

- Error en la lectura del nivel de líquido contenido en el recipiente.
- Error en la medición de la posición del contrapeso.

➤ **Errores debidos a la naturaleza de la magnitud que se mide.**

- Los cálculos de la fuerza hidrostática en el recipiente, dependen del peso específico del agua, el cual a su vez depende de las condiciones locales del ambiente (temperatura), lo que genera diferencias entre los valores experimentales y teóricos utilizados.

7.2. ENSAYO DE FUERZA DE BOYAMIENTO

Análisis experimental de la fuerza de Boyamiento sobre un cuerpo parcialmente sumergido.

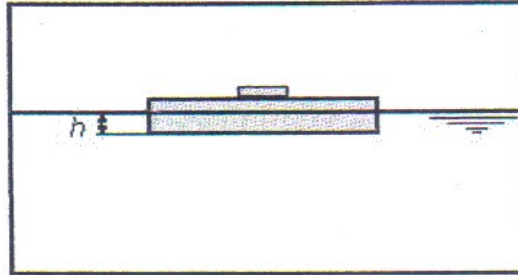


Figura 23. Esquema general del ensayo de fuerza de Boyamiento

7.2.1. Datos teóricos. El nivel de hundimiento del cuerpo flotante, es función de la geometría del cuerpo sumergido, que se puede deducir de la ecuación 15:

$$V_d = \frac{(W_c + W_p)}{\gamma_h}$$

La fuerza de Boyamiento según la ecuación 14, es:

$$F_b = V_d \cdot \gamma_h$$

Entonces, para el cuerpo flotante sólo y con la adición de las pesas se tiene que:

Tabla 5. Datos teóricos del ensayo de fuerza de Boyamiento.

Peso del cuerpo (W_c) (Kg)	peso del cuerpo adicionado (W_p) (Kg)	Vol. Sumergido del cuerpo (V_d) (m^3)	Nivel de hundimiento (h) (m)	Fuerza de boyamiento (F_b) (Kg)
1,1691		0,001197395	0,0427641	1,1974
1,1691	0,435	0,001633267	0,058330948	1,6333
1,1691	0,495	0,001693387	0,060478099	1,6934

7.2.2. Datos experimentales. Para cada ensayo con el cuerpo flotante sólo y con las pesas adicionadas se tomó el nivel de hundimiento del cuerpo (h) y se calculo el volumen sumergido (V_d), el valor de la fuerza de Boyamiento (F_b) y la incertidumbre experimental (W_{Fb}), obteniendo los datos que se muestran a continuación:

Tabla 6. Datos experimentales de la fuerza de Boyamiento

Peso total (W_c+W_p) (Kg)	Nivel de hundimiento (h) (m)	Vol. Sumergido del cuerpo (V_d) (m^3)	Fuerza de boyamiento (F_b) (Kg)	Incertidumbre experimental (W_{fb}) (Kg)
1,195	0,041	0,001148	1,148	$\pm 0,0018$
1,63	0,057	0,001596	1,596	$\pm 0,0023$
1,69	0,059	0,001652	1,652	$\pm 0,0026$

La estimación de la incertidumbre experimental se evalúa con el uso de las incertidumbres primarias, de la siguiente fórmula:

$$w_{F_b} = \left[\left(\frac{\partial F_b}{\partial V_d} w_{V_d} \right)^2 + \left(\frac{\partial F_b}{\partial y_h} w_{y_h} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Ecuación 18})$$

7.2.3. Cálculo del error de medición. El error de medición se obtuvo relacionando los valores particulares de la fuerza de Boyamiento teórica y experimental, expuesto en la tabla 5 y 6. Respectivamente, de la siguiente forma:

$$\text{Error} = \left| 1 - \frac{P_h \text{ experimental}}{P_h \text{ teorica}} \right|$$

Los resultados del cálculo del error de medición, son los siguientes:

Tabla 7. Cálculo de error del ensayo de Fuerza de Boyamiento.

Peso total (Wc+Wp) (Kg)	Fuerza de boyamiento teórica (Fbteor) (Kg)	Fuerza de boyamiento experimental (Fbexp) (Kg)	error %
1,195	1,1974	1,148	4,13
1,63	1,6333	1,596	2,28
1,69	1,6934	1,652	2,44

7.2.4. Análisis de los resultados. De la tabla anterior se observa que el error de la práctica se encuentra entre el 4.13% y el 2.28%, donde los errores propios de la práctica son:

- **Errores sistemáticos.**

- Errores instrumentales
- Precisión de la reglilla usada en el ensayo

➤ **Errores accidentales o aleatorios**

- Errores de apreciación.
- Error en la lectura del nivel de hundimiento del cuerpo flotante.

8. GUÍAS DE LABORATORIO



CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL
ÁREA DE FLUIDOS

ENSAYO DE PRESIÓN HIDROSTÁTICA

Análisis experimental de la presión hidrostática sobre superficies planas y curvas sumergidas.

ASIGNATURA: MECÁNICA DE FLUIDOS

ALUMNOS:

NOMBRE:

CODIGO:

DOCENTE

FECHA: _____

UNIMINUTO

OBJETIVO GENERAL: Analizar experimentalmente la presión hidrostática sobre superficies planas y curvas sumergidas.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Comprender los conceptos de hidrostática referentes a la presión hidrostática sobre superficies planas y curvas sumergidas.
- Efectuar las mediciones de la fuerza hidrostática resultante, para distintos valores del nivel del líquido contenido en el recipiente.
- Desarrollar el cálculo de los resultados teóricos, para cada una de las pruebas realizadas.
- Relacionar matemática y gráficamente los resultados experimentales y los resultados teóricos de la práctica.
- Analizar los resultados obtenidos de la práctica.

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Para el ensayo de presión hidrostática sobre superficies planas y curvas sumergidas, se emplea un conjunto de componentes (ver figura A.1.) entre los cuales se distinguen: un recipiente de acrílico cristal, un sistema de equilibrio inicial y un contrapeso con un juego de dos pesas.

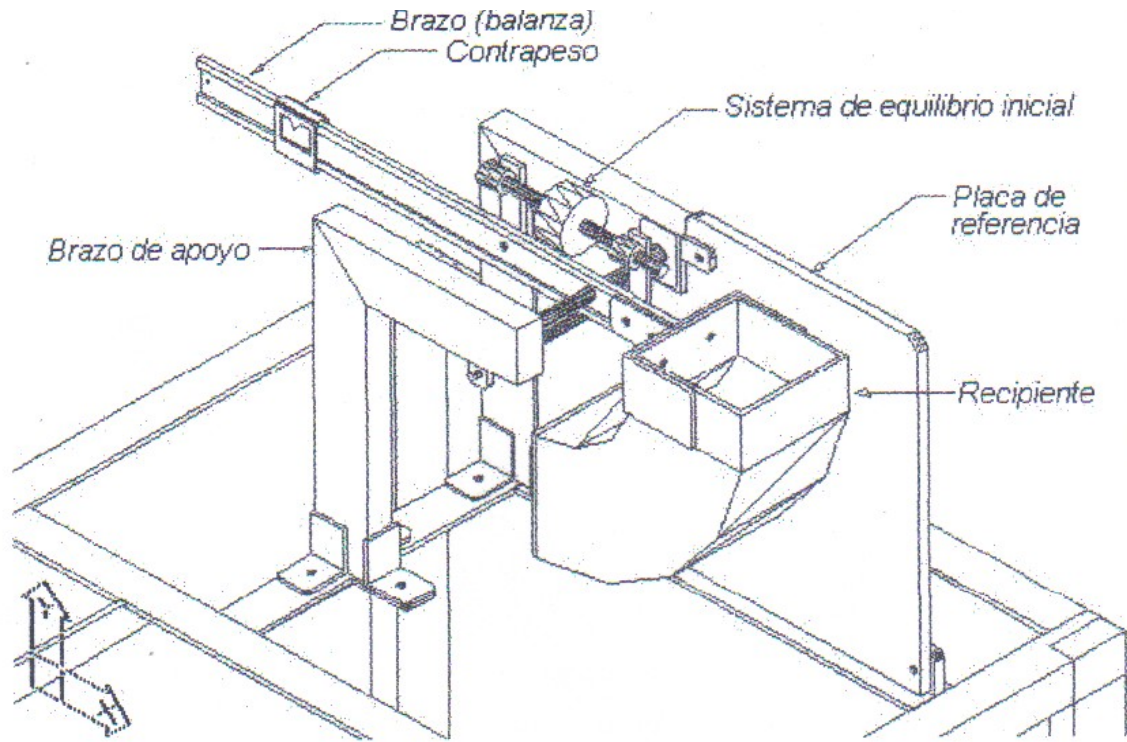


Figura A.1. Disposición de los componentes del ensayo de presión hidrostática.

A continuación, se explicará el principio físico que se desarrolla en el ensayo. Cuando el recipiente, tiene agua dentro de sí, la presión hidrostática, actúa normal a las placas internas del recipiente, tal como se ve en la figura A.2. (En la que se muestra que las placas curvas cilíndricas son concéntricas), por lo tanto, los vectores de los elementos diferenciales de fuerza, atraviesan el centro de las curvas que describen las placas internas del recipiente. Si se tiene en cuenta que el eje pivotante (respecto al cual rota el recipiente) está ubicado en el centro de curvatura de las placas cilíndricas, entonces, se deduce que la presión hidrostática ejercida sobre las placas curva producen momentos rotacional cero, respecto al centro de las mismas (centro del eje pivotante)

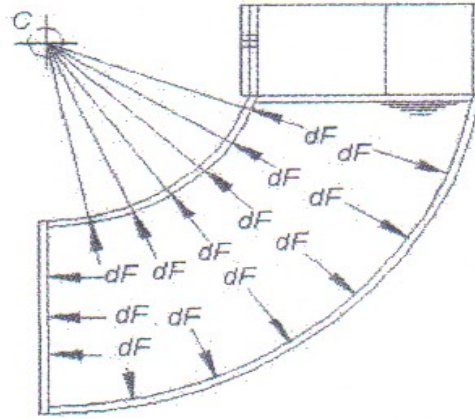


Figura A.2. Diferenciales de fuerza hidrostática sobre las caras interna del recipiente.

En conclusión, la presión hidrostática que ejerce momento efectivo en la balanza, es la aplicada en la placa plana transversal del recipiente (ver figura A.3.)

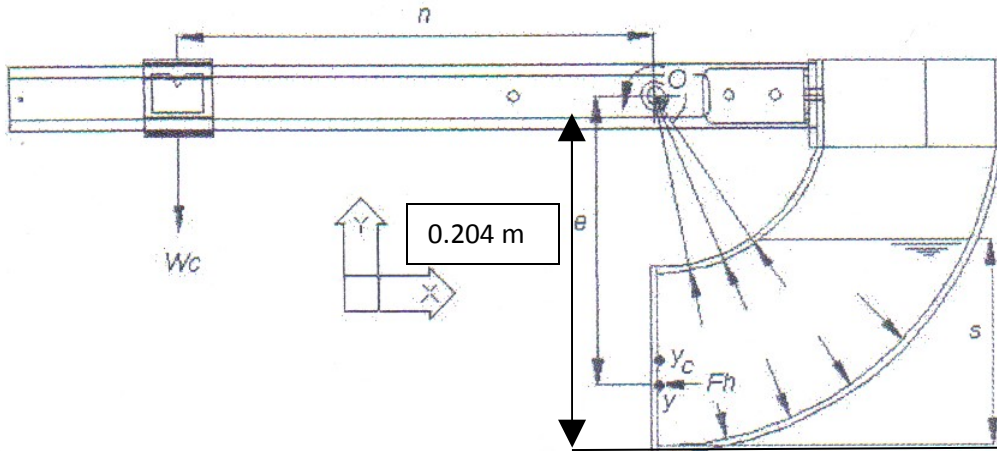


Figura A.3. Momentos rotacionales resultantes del ensayo de presión hidrostática.

De la figura anterior se puede deducir (por sumatoria de momentos respecto a "o") que:

$$F_h = \frac{W_c \cdot n}{e}$$

Donde:

- W_c = peso en kg de los cuerpos utilizados como contrapeso,
- e = posición del punto de aplicación de la fuerza hidrostática sobre la placa plana (centro de presión) respecto al punto “o”
- n = distancia entre la posición del contrapeso y el punto “o”

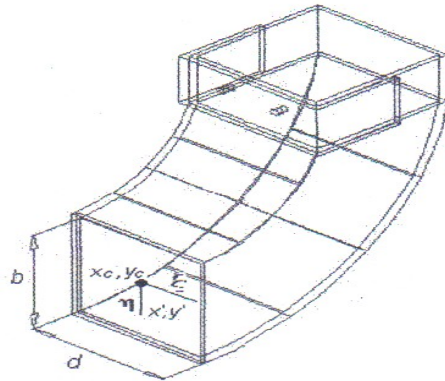


Figura A.4. Configuración de la placa plana.

Entonces la presión hidrostática (P_h) (ver figura A.4.) es igual a:

$$P_h = \frac{F_h}{b * d} = \frac{W_c * n}{e * s * d}$$

METODOLOGÍA DE LA MEDICIÓN

- I) Inicialmente, se une el recipiente al equipo mediante unión atornillada (asegurando la linealidad).
- II) Se debe retirar el indicador de la balanza, antes de inducir el equilibrio inicial del equipo.
- III) Se lleva el sistema a un estado de equilibrio inicial, por medio del sistema dispuesto para este fin (desplazando la pesa del sistema de equilibrio inicial).
- IV) Luego, se deposita el agua en el recipiente, en un volumen cualquiera.

V) Después, se desplaza el contrapeso (indicador sólo ó con los contrapesos, de acuerdo, al nivel de agua en el recipiente) sobre el brazo hasta conseguir el equilibrio, el cual debe verificarse con el uso de la línea del nivel, ubicada en la placa de referencia.

VI) Se mide el nivel del equilibrio en el recipiente(s), observándolo respecto a la reglilla dispuesta en el recipiente.

VII) Se toma el dato de la distancia entre el centro del eje pivotante y el indicador del contrapeso(n)

VIII) Se repite el procedimiento anterior desde el numeral (IV), agregando más agua, con el propósito de obtener varias mediciones con valores distintos de nivel de agua contenido en el recipiente.

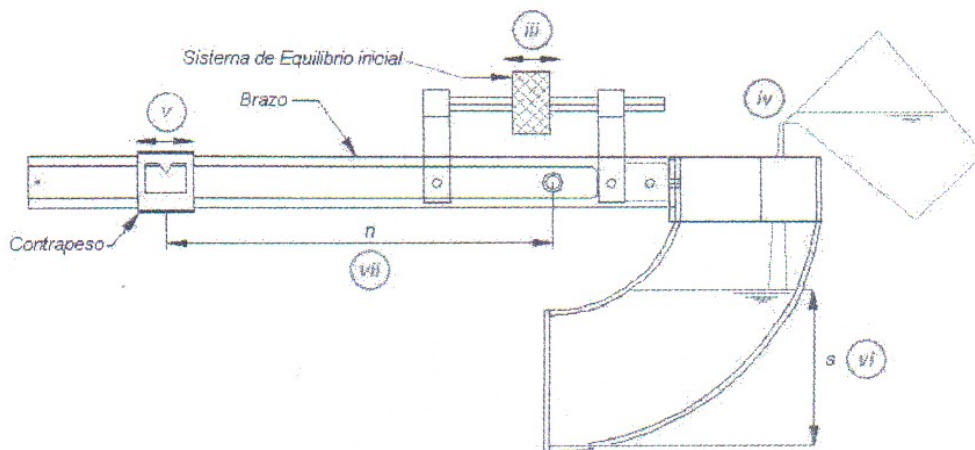


Figura A.5 Ilustración de la metodología de la medición para el ensayo de presión hidrostática.

RESULTADOS

Inicialmente, se exponen los resultados teóricos del ensayo en la siguiente tabla:

Tabla 1A. Datos teóricos de la práctica de presión hidrostática.

Nivel (s) (m)	Centro de presión (y_c)* (m)	fuerza hidrostatica (F_h) (kg)	Presión hidrostática (P_h) (kg)

*Nota: este valor del centro de presión, es medido desde el centro de rotación de la balanza, es decir es el valor de la variable (e)

Luego, se exponen los resultados experimentales y el error de la medición:

Tabla 2A. Datos experimentales del ensayo de presión hidrostática.

Nivel (s) (m)	Posición del contrapeso(n) (m)	Posición del centro de presión (e) (m)	Peso del contrapeso (W_c) (kg)	Fuerza Hidrostática (Fh) (kg)	W_{fh} (kg)

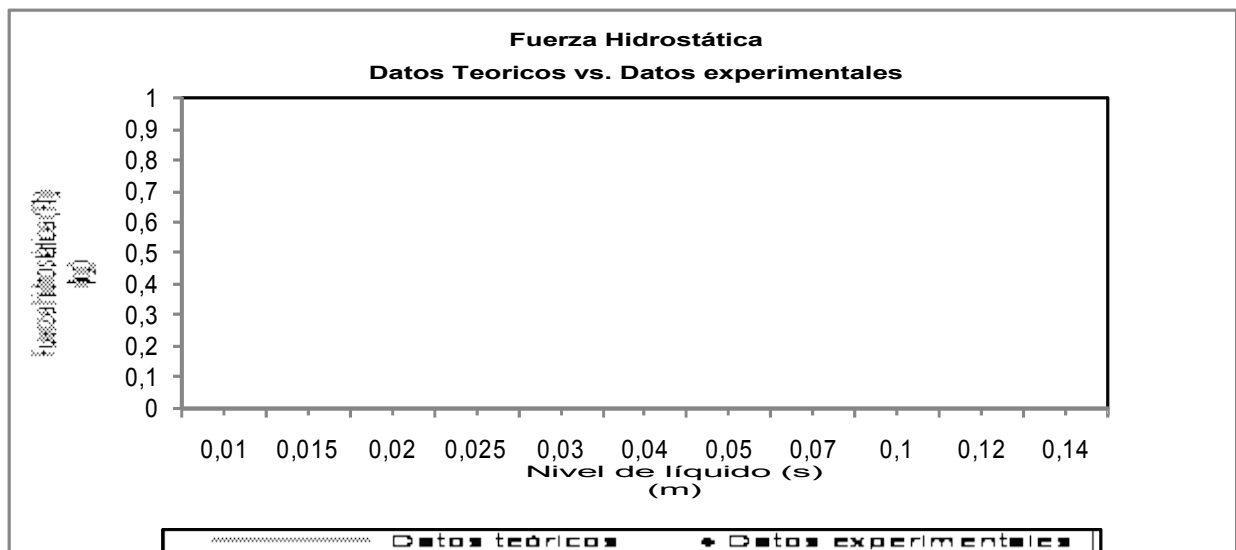


Figura A.6. Grafica de fuerza hidrostática experimental vs teórica.

CALCULO DEL ERROR DE MEDICIÓN

El error de medición se obtiene relacionando los valores particulares de la presión Hidrostática teórica y experimental, expuesta en las tablas 1. Y 2. Respectivamente de la siguiente forma:

$$Error = \left| 1 - \frac{P_{\text{experimental}}}{P_{\text{teorica}}} \right|$$

Los resultados del cálculo del error de medición para distintos niveles de agua se se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3A. Cálculo del error para el ensayo de presión hidrostática.

Nivel (s) (m)	Fh* teórica kg	Fh experimental kg	Error %

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

CONCLUSIONES

-
-
-
-
-

OBSERVACIONES



**FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ÁREA DE FLUIDOS**

ENSAYO DE FUERZA DE BOYAMIENTO

**Análisis experimental de la fuerza de boyamiento sobre un cuerpo
parcialmente sumergido.**

ASIGNATURA: MECÁNICA DE FLUIDOS

ALUMNOS:

NOMBRE:

CODIGO:

DOCENTE

FECHA: _____

UNIMINUTO

OBJETIVO GENERAL: Analizar experimentalmente la fuerza de boyamiento sobre un cuerpo parcialmente sumergido.

OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Comprender los conceptos de hidrostática referentes a la fuerza de boyamiento sobre cuerpos parcialmente sumergidos.
- Efectuar las mediciones del nivel de hundimiento del cuerpo flotante, para cuando se experimenta con el cuerpo sólo y con las pesas.
- Desarrollar el cálculo de los resultados teóricos, para cada una de las pruebas realizadas.
- Relacionar matemática y gráficamente los resultados experimentales y los resultados teóricos de la práctica.
- Analizar los resultados obtenidos de la práctica.

DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

Para el ensayo de fuerza de boyamiento, se emplea un conjunto de componentes (ver figura...) entre los cuales se distinguen: un cuerpo flotante constituido en acrílico, un juego de pesas y un recipiente de vidrio.

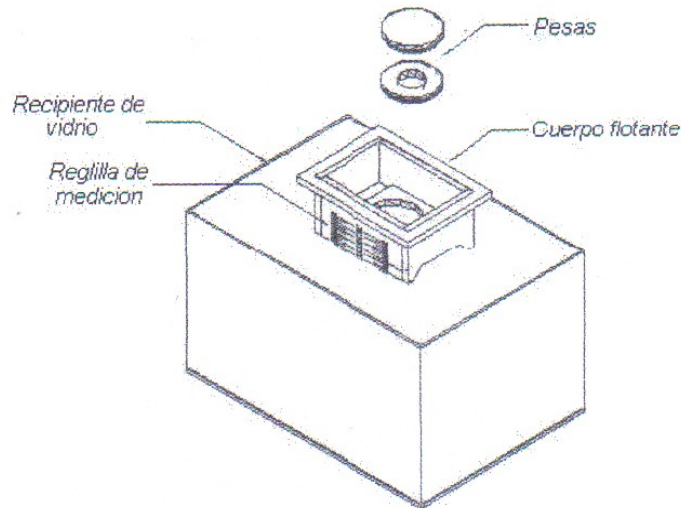


Figura B.1. Disposición de los componentes del ensayo de fuerza de boyamiento.

A continuación, se explica el principio físico que se desarrolla en el ensayo. La fuerza de boyamiento sobre un cuerpo se define como la fuerza vertical neta causada por el fluido o los fluidos en el contacto con el cuerpo. Para el cuerpo en flotación, la fuerza superficial causada por los fluidos se contacta con el mismo, se encuentra en equilibrio con la fuerza de gravedad que actúa sobre el cuerpo. Para determinar la fuerza de boyamiento sobre cuerpos en flotación y sujetos a otras condiciones, sólo es necesario calcular la fuerza vertical neta sobre la superficie del cuerpo utilizando los mismos principios utilizados para calcular las fuerzas hidrostáticas sobre superficies.

En conclusión, la fuerza de boyamiento o el empuje vertical aplicado sobre el cuerpo, se calcula multiplicando el peso específico del agua γ_h , por el volumen del

cuerpo sumergido V_d (el cual es función del nivel de hundimiento del cuerpo flotante h y de forma del cuerpo, ver figura...)

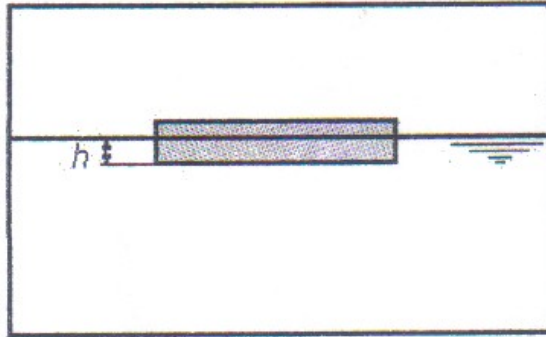


Figura B.2. Esquema del ensayo de fuerza de boyamiento.

METODOLOGIA DE LA MEDICIÓN

- I. Inicialmente, se toman las medidas del cuerpo flotante, para poder así determinar el volumen del cuerpo y se verifica el peso del cuerpo.
- II. Luego, debe llenarse el recipiente de vidrio hasta un nivel que permita desarrollar el ensayo.
- III. Se sumerge el cuerpo flotante en el agua y se registra el dato del nivel de hundimiento (h), con el uso de la reglilla dispuesta en el recipiente.
- IV. Por último, se adicionan las pesas al cuerpo y se calculan los nuevos valores del nivel de hundimiento (h).

RESULTADOS

Inicialmente, se exponen los resultados teóricos del ensayo en la siguiente tabla:

Tabla 1B. Datos teóricos de la práctica de fuerza de boyamiento.

Peso del cuerpo (W_c) (Kg)	peso del cuerpo adicionado (W_p) (Kg)	Vol. Sumergido del cuerpo (V_d) (m^3)	Nivel de hundimiento (h) (m)	Fuerza de boyamiento (F_b) (Kg)

Luego, se exponen los resultados experimentales y el error de la medición:

Tabla 2B. Datos experimentales del ensayo de fuerza de boyamiento.

Peso total (W_c+W_p) (Kg)	fuerza de boyamiento teorica (F_{bteor}) (Kg)	Fuerza de boyamiento experimental (F_{bexp}) (Kg)	Error %

CÁLCULO DEL ERROR DE MEDICIÓN

El error de medición se obtiene relacionando los valores particulares de la fuerza de boyamiento teóricos y experimentales, expuesta en la tabla (...) respectivamente, de la siguiente forma:

$$Error = \left| 1 - \frac{P_{experimental}}{P_{teorica}} \right|$$

Los resultados del calculo del error de medición para cuando se sumerge el cuerpo flotante sólo y con las pesas, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 3B. Cálculo del error para el ensayo de fuerza de boyamiento.

Peso total (W_c+W_p) (Kg)	Fuerza de boyamiento teorica (F_{bteor}) (Kg)	Fuerza de boyamiento experimental (F_{bexp}) (Kg)	error %

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

CONCLUSIÓN

-
-
-
-
-

OBSERVACIONES

9. CONCLUSIONES

- Se hallaron experimentalmente los valores de la fuerza de boyamiento para el cuerpo flotante sólo y con las pesas y en los tres casos se verifico que la fuerza de boyamiento fue igual a los pesos de los cuerpos en cuestión (y respectivamente al peso del agua desplazada). Se verifico el principio de Arquímedes (leyes de Boyamiento) para cuerpos parcialmente sumergidos.
- Se hallaron experimentales los valores de la fuerza hidrostática resultante aplicados en el centroide de la placa plana sumergida, para distintos niveles de agua depositados en el recipiente, y al analizar los resultados del error de la medición, se verifico que los valores de la fuerza hidrostática teórica difieren en poca medida de los experimentos.
- Se comprobó experimentalmente la teoría de la presión hidrostática sobre las placas curvas y planas sumergías y se verifico el concepto de la presión diferencial sobre la superficie.

10. RECOMENDACIONES

- Se sugiere a la Corporación Universitaria Minuto de Dios, que en la sede que se está construyendo actualmente, se cuente con un espacio para el Laboratorio de Mecánica de Fluidos, para que los estudiantes lleven a la práctica los conocimientos teóricos adquiridos.
- Se recomienda a las personas encargadas de guiar el laboratorio hacer énfasis en los estudiantes en la toma de los datos de una manera eficiente y lo más exactos posible para reducir al mínimo errores en los ensayos.
- Teniendo en cuenta que los instrumentos son frágiles, se le recomienda a la Corporación Universitaria Minuto de Dios, el mantenimiento y la conservación de los mismos para que tenga una mayor vida útil.

11. BIBLIOGRAFIA

HOLMAN, Jack p. Métodos experimentales para ingenieros. 2Ed. Naucalpan de Juárez: Mc Graw- Hill, 1990. p. 56.

COPPER, William D. instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición. Ciudad de México: PRENTICE HALL. Pág. 7.

<http://www.cepis.ops-oms.org/bvsatp/e/tecnoapro/documentos/sanea/163esp-diseno-TI.pdf>.

MATAIX, Claudio. "Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas". ed. Harla México 1995.

GILES, Ronald V."Mecánica de los fluidos e hidráulica" ed. mc Graw Hill México 1990. Serie Schaum.

GUZMAN, Cesar Ricardo y VALDERRAMA SABOGAL, Ramón. Diseño, montaje y puesta a punta de equipamiento para las practicas en pérdidas de tuberías y accesorios e hidrostática

12. ANEXO

Planos en Auto CAD 2008 Banco de Hidrostática.

Plano 1/19. Montaje del Banco de Hidrostática.

Plano 2/19. Estructura del banco de Hidrostática.

Plano 3/19. Submontaje principal.

Plano 4/19. Sistema de equilibrio inicial.

Plano 5/19. Brazo soporte.

Plano 6/19. Gabinete.

Plano 7/19. Recipiente de acrílico.

Plano 8/19. Cuerpo flotante.

Plano 9/19. Placa de referencia.

Plano 10/19. Brazo.

Plano 11/19. Eje pivotante.

Plano 12/19. Indicador.

Plano 13/19. Eje Tensor.

Plano 14/19. Platina de recipiente.

Plano 15/19. Recipiente de vidrio.

Plano 16/19. Masa de equilibrio.

Plano 17/19. Pesas.

Plano 18/19. Pesa anular.

Plano 19/19. Pesa maciza.