

**REHABILITACION DEL EQUIPO ENSAYO DE PRESION HIDROSTATICA
SOBRE SUPERFICIES PLANAS Y CURVAS SUMERGIDAS Y FUERZAS
DE BOYAMIENTO SOBRE UN CUERPO PARCIALMENTE SUMERGIDO**

**ADRYANA PAOLA RODRIGUEZ DIAZ
GINNETH VANESSA AGUIRRE MARTINEZ
FABIAN HERNANDEZ FARFAN**

**CORPORACION UNIVERSITARIA MINUTO DE DIOS
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA CIVIL PROYECTO DE GRADO
GIRARDOT
2015**

**REHABILITACION DEL EQUIPO ENSAYO DE PRESION HIDROSTATICA SOBRE
SUPERFICIES PLANAS Y CURVAS SUMERGIDAS Y FUERZAS DE BOYAMIENTO
SOBRE UN CUERPO PARCIALMENTE SUMERGIDO.**

**ADRYANA PAOLA RODRIGUEZ
GINNETH VANNESA AGUIRRE
FABIAN HERNANDEZ FARFAN**

Presentado a:

COMITÉ 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
2015**

Nota de aceptación

Firma del presidentes del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

Tenemos la convicción de que el cuerpo de profesores que quienes con su apoyo y comprensión nos condujeron a lograr la realización de este proyecto.

A nuestros padres que con su esfuerzo y cariño nos brindaron sus experiencias y enseñanzas adquiridas durante sus vidas.

AGRADECIMIENTOS

A toda la planta educativa.

Nuestras familias que con abnegación y sacrificio han permitido nuestra formación aportándonos su apoyo y experiencia.

Todos y cada uno de nuestros compañeros que por instantes nos brindaron sus conocimientos.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	11
1. JUSTIFICACION	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GENERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. MARCO TEÓRICO	15
3.1 PROPIEDADES DEL PROTOXIDO DE HIDROGENO	15
3.1.1 Estática de Fluidos.....	15
3.2 VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN UN FLUIDO ESTÁTICO INCOMPRESIBLE	15
3.3 FUERZA HIDROSTÁTICA SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA.....	18
3.4 PRESIÓN HIDROSTÁTICA SOBRE UNA SUPERFICIE.....	23
3.5 LEYES DE BOYAMIENTO	24
4 MARCO HISTÓRICO	28
5 METODOLOGÍA	31
6 FOTOS LABORATORIO HIDROSTÁTICA	33
6.1 RESTAURACION DEL EQUIPO ENSAYO HIDROSTATICA.....	33
6.2 RESTAURACION DE FUERZA DE BOYAMIENTO	41
7 DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO	4
7.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES	46
7.2 LABORATORIO DE PRUEBAS DE HIDROSTÁTICA	46
7.2.1 Ensayo de Presión Hidrostática.	46

7.2.2	Ensayo de Fuerza de Boyamiento.	51
7.3	ESTRUCTURA DEL LABORATORIO DE HIDROSTÁTICA.....	53
8	CÁLCULO	55
8.1	ENSAYO DE PRESIÓN DE HIDROSTÁTICA	55
8.1.1	Cálculo de la Presión Hidrostática sobre el Recipiente.....	55
8.1.2	Posición del Centro de Presión.....	56
8.2	ENSAYO DE FUERZA DE BOYAMIENTO.....	57
9	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	59
9.1	ENSAYO DE PRESION HIDROSTÁTICA	59
9.1.1	Datos Experimentales:.....	61
9.1.2	Regresión de los Datos Experimentales	63
9.1.3	Cálculo del Error de Medición	64
9.1.4	Análisis de los Resultados	65
9.2	ENSAYO DE FUERZA DE BOYAMIENTO.....	67
9.2.1	Datos Teóricos.....	68
9.2.2	Datos Experimentales.....	68
9.2.3	Cálculo del Error de Medición	69
10	CONCLUSIONES	71
11	RECOMENDACIONES	72
12	REFERENCIAS	73
	ANEXOS	74
	Anexo A. Ensayo de Presión Hidrostática.....	75
	Anexo B. Ensayo de Fuerza de Boyamiento.....	86

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos teóricos de la práctica de presión hidrostática	60
Tabla 2. Datos experimentales del ensayo de presión hidrostática.....	61
Tabla 3. Regresión exponencial de los datos experimentales del ensayo de presión hidrostática	63
Tabla 4. Cálculo del error para el ensayo de presión hidrostática.	64
Tabla 5. Datos teóricos del ensayo de fuerza de boyamiento	68
Tabla 6. Datos experimentales de la fuerza de boyamiento.....	69
Tabla 7. Calculo de error del ensayo de fuerza de boyamiento	70

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Cuerpo libre de un elemento en un fluido estático.....	16
Figura 2. Superficie plana sumergida en un líquido.	19
Figura 3. Vista perpendicular de una superficie plana.....	22
Figura 4. Presión hidrostática F_p sobre una superficie curva cilíndrica sumergida CD.....	23
Figura 5. Cuerpo sumergido en un fluido.....	25
Figura 6. Cuerpo en flotación en la interfaz de dos fluidos no miscibles	27
Figura 7. Arquímedes	28
Figura 8. Masa de Equilibrio	33
Figura 9. Brazos de Apoyo	34
Figura 10. Eje Pivotante.....	35
Figura 11. Recipiente de acrílico	36
Figura 12. Peso de 40 gr.	37
Figura 13. Peso de 50 gr.	38
Figura 14. Peso de 60 gr.	39
Figura 15. Peso de 70 gr.	40
Figura 16. Recipientes en Vidrio	41
Figura 17. Rejilla Cuerpo Flotante	42
Figura 18. Estructura del Banco Hidrostático.....	43
Figura 19. Peso de gr	44
Figura 20. Peso de gr	45
Figura 21. Recipiente y placa de referencia del ensayo de presión hidrostática.	47
Figura 22. Brazo y sistema de equilibrio inicial	48
Figura 23. Estructura del equipo de presión hidrostática.....	48
Figura 24. Disposición de los componentes del equipo de presión hidrostática	49
Figura 25. Ilustración de la metodología de la medición ensayo de la presión hidrostática	50
Figura 26. Cuerpo flotante 1200 gr	51
Figura 27. Pesas del ensayo de fuerza de boyamiento.....	52
Figura 28. Disposición de los componentes del equipo de fuerza de boyamiento	53

Figura 29. Estructura del laboratorio de hidrostática.....	54
Figura 30. Diferenciales de fuerza hidrostática sobre las caras internas del recipiente.....	55
Figura 31. Momentos rotacionales resultantes del ensayo de presión hidrostática	56
Figura 32. Centroide de la placa sumergida.	57
Figura 33. Nivel de hundimiento (ensayo de fuerza de boyamiento)	58
Figura 34. Esquema del ensayo de presión hidrostática	59
Figura 35. Punto de aplicación de la fuerza hidrostática	60
Figura 36. Gráfica de fuerza hidrostática experimental Vs. teórica	62
Figura 37. Esquema general del ensayo de fuerza de boyamiento	67

INTRODUCCIÓN

La materia se clasifica, en sólidos y fluidos; 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. JUSTIFICACIÓN

Actualmente el laboratorio de hidráulica cuenta con el ensayo de “Fuerza de Boyamiento”, en la Corporación Universitaria Minuto de Dios, pero no se encuentra en óptimas condiciones y como parte del plan de estudio de la carrera de Ingeniería Civil, La presente propuesta suple dicha carencia a través del ensayo que queremos dejar en nuestra universidad.

El ensayo pretende ser de utilidad tanto para estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, como para los docentes que imparten la asignatura en cuestión, en tanto puede ser utilizado como material de pruebas de ensayo durante el desarrollo del semestre, contribuyendo así a reforzar el aspecto teórico de la asignatura de hidráulica.

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 está 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 la rehabilitación del equipo ensayo de presión hidrostática sobre superficie planas y curvas sumergidas y fuerza de Boyamiento sobre un cuerpo parcialmente sumergido.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar 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.

- Mejorar 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 la presión hidrostática.

- Diseñar/Implementar 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. MARCO TEÓRICO

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

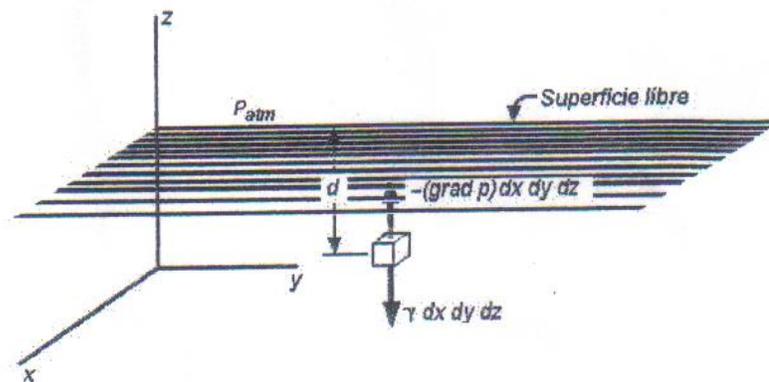
3.1.1 Estática de Fluidos. Un fluido se define como una sustancia que cambia su forma continuamente siempre que esté sometida a un esfuerzo cortante, sin importar que tan pequeño sea¹, el fluido para que se considere estático si todas sus partículas permanecen en reposo o mantiene la misma velocidad 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.

3.2 VARIACIÓN DE LA PRESIÓN EN UN FLUIDO ESTÁTICO INCOMPRESIBLE

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 Ibid, p. 53-54

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



Para el equilibrio, se tiene que.

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

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

$$\frac{\partial p}{\partial x} = 0 \qquad \frac{\partial p}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\gamma \quad (\text{Ecuación 1})$$

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.

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.

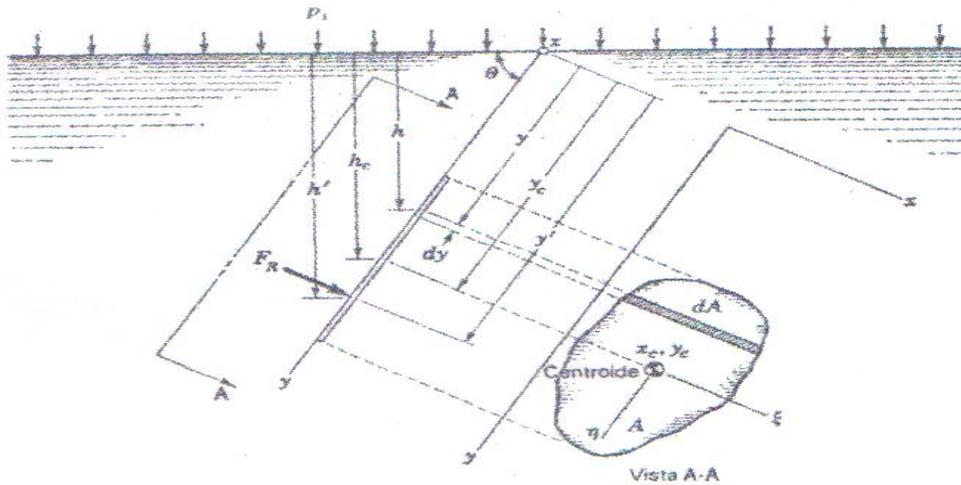
3.3 FUERZA HIDROSTÁTICA SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA SUMERGIDA EN UN FLUIDO ESTÁTICO INCOMPRESIBLE²

Un problema muy común en el diseño de estructuras 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 fórmulas 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.

² Ibid, p. 61

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:

$$F_R = \int_A \gamma h dA = \int_A \gamma y \sin \theta dA = \gamma \sin \theta \int_A y dA$$

$$\int_A y dA$$

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

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

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

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

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 a x de la presión que se incrementa uniformemente en el líquido sobre el área. Por consiguiente,

$$F_R y' = \int_A y (p_s + \rho h) dA$$

Remplazando F_R y h se tiene:

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

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 reescribe la anterior ecuación como:

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

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 $I_{\xi\xi} + Ay_c^2$, donde $I_{\xi\xi}$ es el segundo momento de área con respecto al eje centroidal ξ paralelo al eje x (ver figura2). Luego,

$$p_c Ay' = p_s Ay_c + \gamma \sin\theta (I_{\xi\xi} + Ay_c^2)$$

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

$$p_c Ay' = p_s Ay_c + \gamma \sin\theta I_{\xi\xi}$$

Ordenando los términos se llega a la ecuación deseada:

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

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

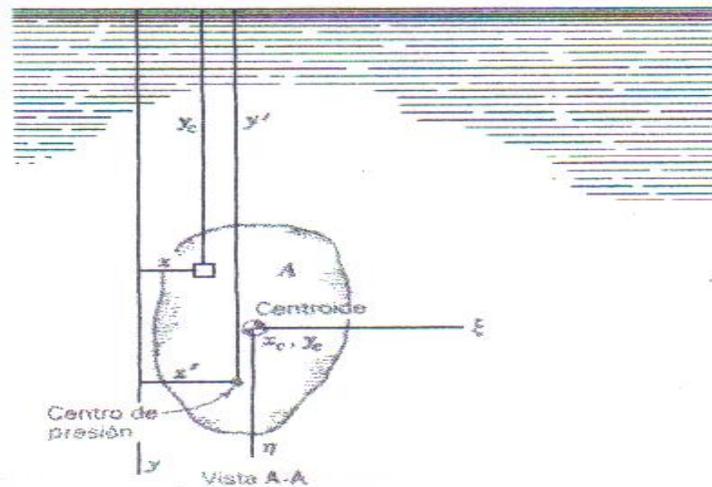
La posición del punto de aplicación de la fuerza resultante sobre la superficie sumergida se conoce como el centro de presión. Como los términos de la parte derecha de la anterior ecuación son positivos, puede verse que el centro de presión siempre estará por debajo del centroide.

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

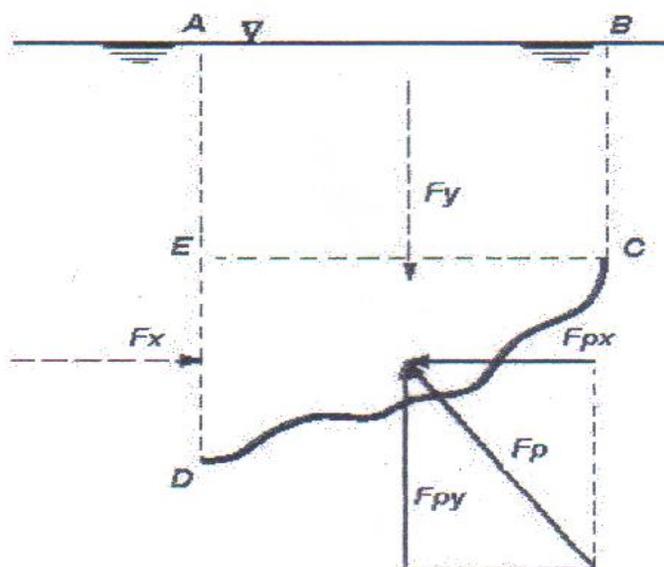


Debe tenerse en cuenta que $I_{\xi\eta}$ es el producto del área respecto de aquellos ejes centroidales paralelos y perpendiculares, respectivamente, a la intersección del plano de área con la superficie libre.

3.4 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 aquélla 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, $F_p y = F_y'$ 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 atmosférica que hay encima de dicha superficie.

3.5 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 utilizamos 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:

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

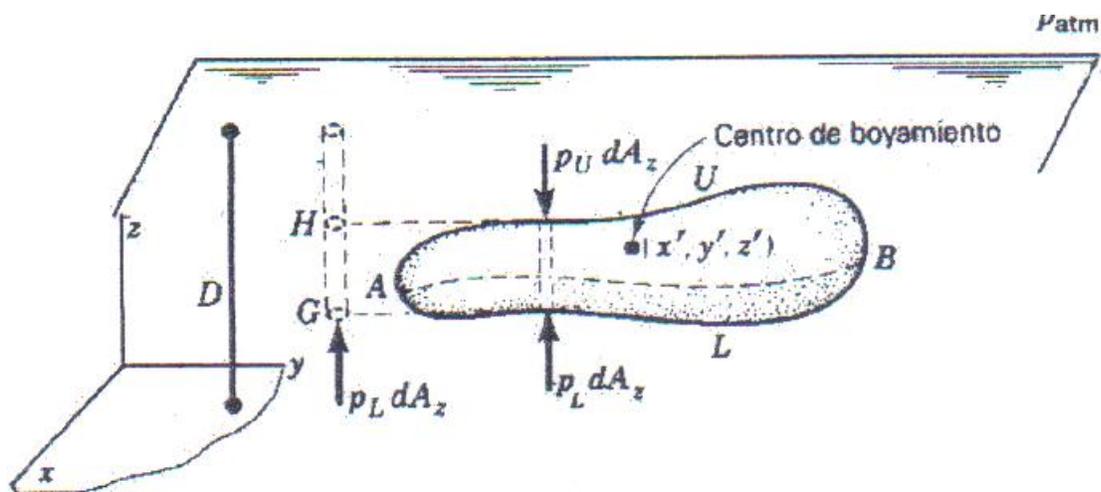
b. Un cuerpo que flota desaloja su propio peso en el fluido en el que flota.

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 fluido



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 presión de presión del fluido envolvente, luego:

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

Donde dv representa el volumen del prisma elemental, reemplazando F_b por $\rho V g$ y resolviendo para x' se obtiene:

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

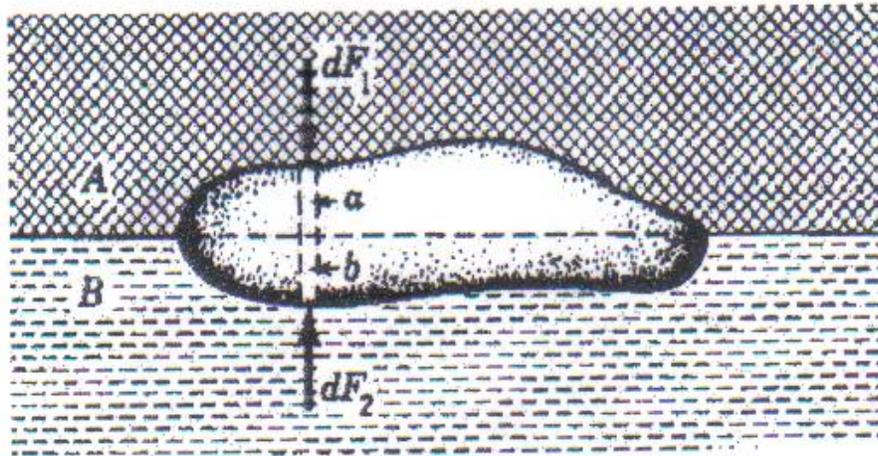
Puede verse que x' es la componente x del vector posición desde $x - y - z$ hasta el centroide del volumen desplazado por el cuerpo. Por consiguiente, puede concluirse que la fuerza de boyamiento ejercida por un fluido incompresible pasa por el centroide de volumen de líquido desplazado por un cuerpo.³

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

³ Ibid p.78

columna a del fluido A más el peso de la columna b del fluido B. Al integrarse 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 y ρ son diferentes, entonces es invalido al argumento de que las fuerzas 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 miscibles ⁴



⁴ Ibid, p79

4 MARCO HISTÓRICO



Figura7. Arquímedes ⁵

⁵ Enciclopedia universal ilustrada europeo americana Pág. 359

Arquímedes, uno de los sabios más famosos de la antigüedad, físico – matemático, nacido en Siracusa (año 287 a. de J.C.) y para algunos primer ingeniero de la historia. Algunos de sus inventos perduran hasta hoy como: Las leyes de la palanca, el tornillo de Arquímedes, sus estudios sobre la parábola y creador del principio que lleva su nombre, plasmado en su libro 8º "Equilibrio de los cuerpos flotantes" el cual relata que el origen de la serie de principios y teoremas que constituyen este excelente y primer tratado de la hidrostática, está en la siguiente anécdota: El arquitecto romano Vitrubio nos cuenta las curiosas circunstancias en las cuales Arquímedes descubriera el famoso principio que lleva su nombre. El rey Hieron había encargado a un artesano una corona de oro, proporcionándole el metal precioso necesario para ello. Si bien el objeto acabado tenía el mismo peso que el oro que se le había entregado, Hieron sospecho que el artesano había sustituido cierta cantidad de oro por otro metal amarillo. Le comunico a Arquímedes su sospecha y le pregunto si sería capaz de descubrir el fraude conservando intacta la corona. Meditando sobre este problema, mientras tomaba su baño se quedó sorprendido al observar que el nivel de agua subía en la tina cuando entraba, y así se dio cuenta de que ese efecto podría usarse para determinar el volumen de la corona. Debido a que la compresión del agua sería despreciable, la corona, al ser sumergida, desplazaría una cantidad de agua igual a su propio volumen. Al dividir la masa de la corona sería menor si otros metales más baratos y menos densos le hubieran sido añadidos. Movido por el entusiasmo que le produjo tal descubrimiento parece ser que se lanzó a la calle desnuda, lanzando gritos de: "Eureka, Eureka!" ("Lo he encontrado").

Este relato no se encuentra en el tratado de Arquímedes, pero en su tratado sobre los cuerpos flotantes el da el principio de hidrostática conocido como el principio de Arquímedes.

Este plantea que cualquier cuerpo solido que se encuentre sumergido total o parcialmente sumergido en un fluido será empujado en una dirección ascendente por una fuerza igual al peso del volumen del líquido desplazado por el cuerpo sólido ⁶

⁶ J. Babini, Arquimedes (buenos Aires, 1948)./ E. Dijksterhuis, Archimedes (Copenhague, 1956). / Arquimedes, OEuvres completes (parís, 1960) NUEVA LAOUSSE Volumen 4 PLAZA & JANES S.A EDITORES (PAG 1027).

5 METODOLOGÍA

A este equipo de ensayo de presión hidrostática sobre superficies planas y curvas sumergidas y fuerza de boyamiento sobre un cuerpo parcialmente sumergido se le hizo una restauración en general, como la limpieza y pintura de la estructura, limpieza de los recipientes en acético, limpieza de pesas, elaboración o construcción de contrapeso en el ensayo de superficies planas y curvas sumergidas y elaboración de recipiente en vidrio en el ensayo de fuerza de boyamiento.

Para la restauración del equipo se emplearon varios materiales desde anticorrosivos para evitar el deterioro de este como pintura azul, espátulas, lijas, brochas, tiner, etc. El equipo se sacó el 20 de junio de 2015 con la autorización de la coordinadora de la facultad de ingeniería civil Ing. Lorena Echavez Baquero, de la Corporación Universitaria Minuto de Dios, y el Director Administrativo Francisco de la Roche hacia una vivienda de la ciudad de Girardot con el fin de su rehabilitación y funcionamiento para el propósito de que los estudiantes obtengan instrumentos que permitan tener un mejor conocimiento de este ensayo de presión hidrostática. Se regresó el día 27 junio del presente año con todas sus mejoras y cosas nuevas como el recipiente en vidrio para el laboratorio de fuerza de boyamiento.

Basamos nuestro proyecto de grado en el mejoramiento de ensayo de presión hidrostática con ayuda y apoyo de lo que lleva como nombre diseño y montaje de laboratorio hidrostática sobre superficies planas y curvas sumergidas y fuerza de boyamiento sobre un cuerpo parcialmente sumergido, que fue un proyecto como opción de grado en la corporación

universitaria minuto de dios y al pasar con el tiempo se fue deteriorando y ah pasar esto se le hizo su restauración con el bien que trae para la comunidad minuto de dios y para las personas que visitan las instalaciones de dicha universidad.

6 FOTOS LABORATORIO HIDROSTÁTICA

6.1 RESTAURACION DEL EQUIPO ENSAYO HIDROSTATICA SOBRE SUPERFICIES PLANAS Y CURVAS SUMERGIDAS

Figura 8. Masa de Equilibrio

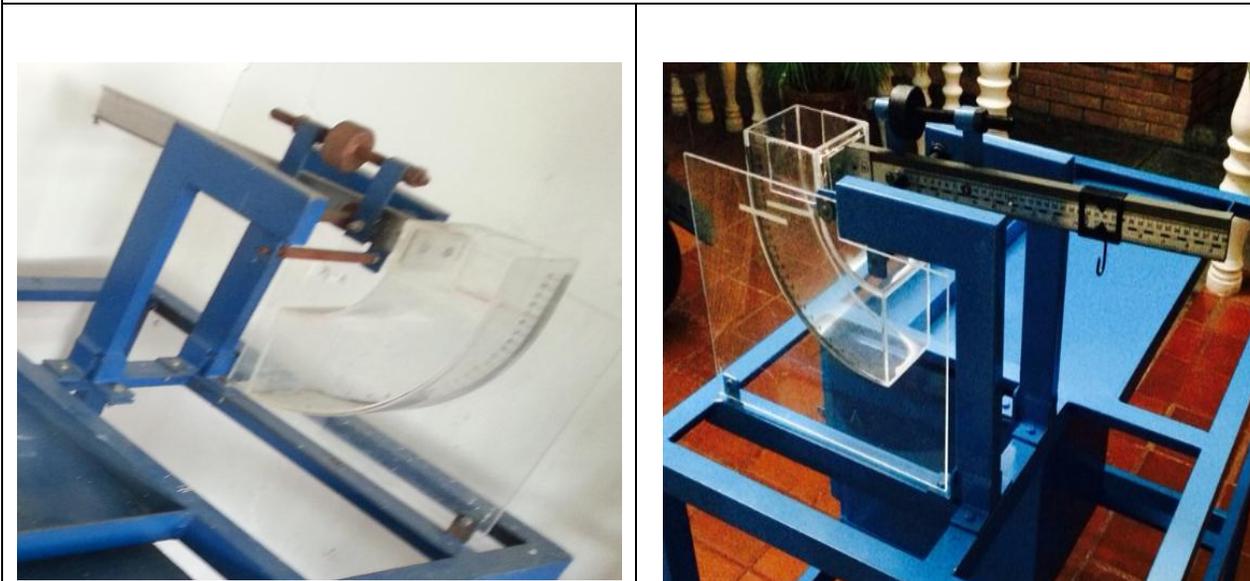
	
<p>ANTES</p>	<p>DESPUES</p>
<p>En esta foto se muestra en qué estado estaba el equipo de ensayo superficies planas y curvas sumergidas cuando se sacó de la corporación universitaria minuto de dios. (Sábado 20 de junio 2015).</p>	<p>Equipo de Ensayo de superficies planas y curvas sumergidas en estado óptimo para entrega, pintado limpiado y colocación de elemento nuevo como el contrapeso. (Sábado 27 de junio 2015)</p>
<p>FUENTE : LOS AUTORES</p>	

Figura 9. Brazos de Apoyo



ANTES



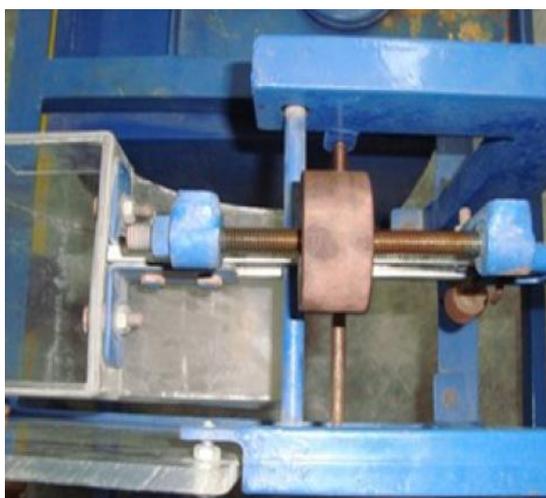
DESPUES

Se encuentra en un deterioro el equipo con oxidación, falta de limpieza y falta de pintura.

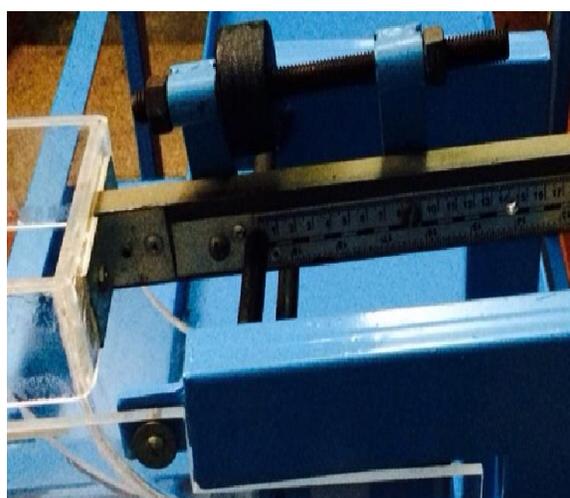
Limpieza, anticorrosivos en partes afectadas, y pintura Mantenimiento en general del equipo.

Fuente. Los Autores

Figura 10. Eje Pivotante



ANTES

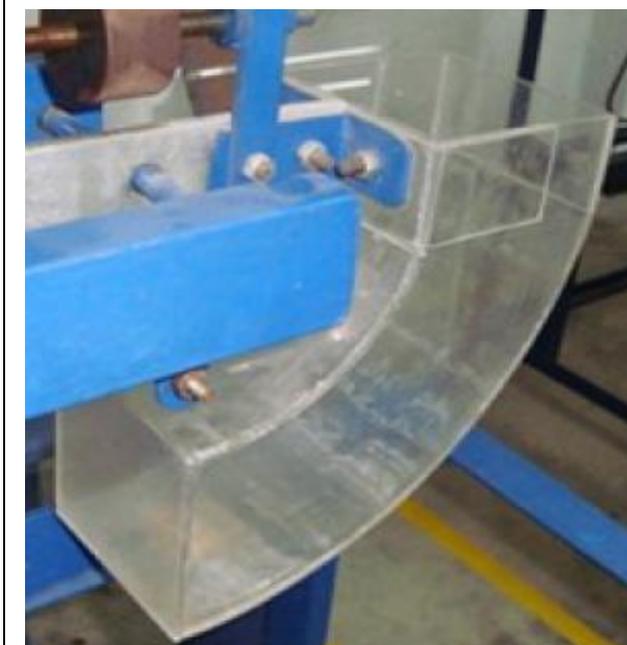
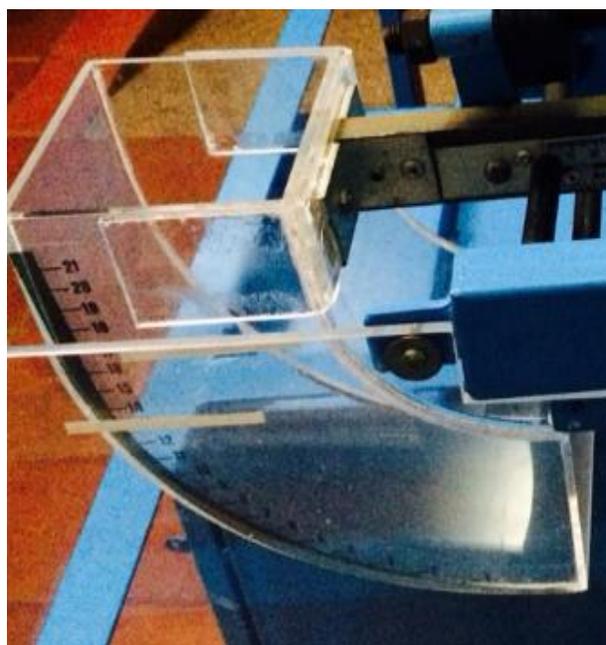


DESPUES

Estado en el que se encontró el pivote y sistema de equilibrio inicial del equipo (falta de pintura y falta de aceite o lubricante en estos).

Pintura y entrega en buen estado de pivote y sistema de equilibrio inicial del equipo, lubricación de piezas y un buen desempeño de estas.

Fuente. Los Autores

Figura 11. Recipiente de acrílico**ANTES****DESPUES**

Recipiente sucio y falta de limpieza

Recipiente limpio lavado y colocado en buen funcionamiento (revisión para verificar si tenía fisura).

Fuente. Los Autores

Figura 12. Peso de 40 gr.



Pesas de colocación en contrapeso para la nivelación que se observa en la placa de referencia del ensayo de presión hidrostática. Las pesas que aparecen en esta fotografía son de 40 Gramos y estas pueden estar acompañadas de otras pesas con diferente gramaje.

Fuente. Los Autores

Figura 13. Peso de 50 gr.



Pesas de colocación en contrapeso para la nivelación que se observa en la placa de referencia del ensayo de presión hidrostática. Las pesas que aparecen en esta fotografía son de 50 Gramos y estas pueden estar acompañadas de otras pesas con diferente gramaje.

Fuente. Los Autores

Figura 14. Peso de 60 gr.



Pesas de colocación en contrapeso para la nivelación que se observa en la placa de referencia del ensayo de presión hidrostática. Las pesas que aparecen en esta fotografía son de 60 Gramos y estas pueden estar acompañadas de otras pesas con diferente gramaje.

Fuente. Los Autores

Figura 15. Peso de 70 gr.



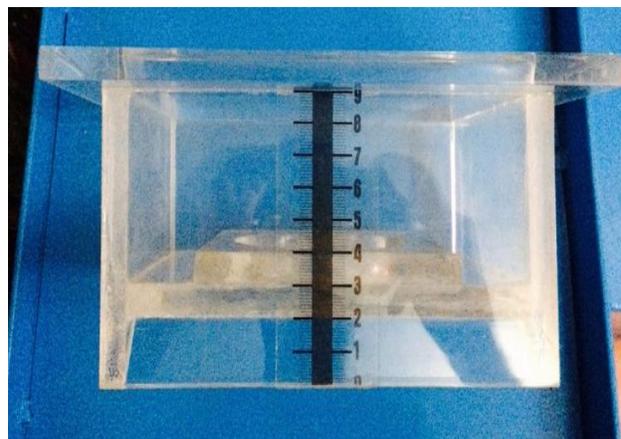
Pesas de colocación en contrapeso para la nivelación que se observa en la placa de referencia del ensayo de presión hidrostática. Las pesas que aparecen en esta fotografía son de 70 Gramos y estas pueden estar acompañadas de otras pesas con diferente gramaje.

Fuente. Los Autores

6.2 RESTAURACION DE FUERZA DE BOYAMIENTO

Figura 16. Recipientes en Vidrio

	
<p>ANTES</p>	<p>DESPUES</p>
<p>Este Recipiente de vidrio no se encontró en el laboratorio a la hora y día de entrega para la mejora del equipo.</p>	<p>Recipiente en Vidrio comprado por los autores de la restauración del equipo de ensayo de fuerza de boyamiento.</p>
<p>Fuente. Los Autores</p>	

Figura 17. Rejilla Cuerpo Flotante**ANTES****DESPUES**

Rejilla de cuerpo Flotante se encontró en un mal estado falta de limpieza y se encontró en algunas partes oxidado.

Se limpió y se deja en un buen estado y funcionamiento para el alojamiento de las pesas circulares para la realización del ensayo de laboratorio de fuerza de boyamiento .

Fuente. Los Autores

Figura 18. Estructura del Banco Hidrostático**ANTES****DESPUES**

Se encontró el equipo en mal estado en su totalidad

Restauración del equipo en su totalidad.

Fuente. Los Autores

Figura 19. Peso de 498 gr



Esta pesa de 438 gr se utiliza para ubicarla en el recipiente de cuerpo flotante el cual hace el funcionamiento del laboratorio que tiene como prioridad el principio de Arquímedes. Se le hizo limpieza.

Fuente. Los Autores

Figura 20. Peso de 490 gr



Esta pesa de 498 gr se utiliza para ubicarla en el recipiente de cuerpo flotante el cual hace el funcionamiento del laboratorio que tiene como prioridad el principio de Arquímedes. Se le hizo limpieza.

Fuente. Los Autores

7 DESCRIPCIÓN DEL LABORATORIO

7.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES

Se ubicara en el laboratorio de Hidráulica de fluidos de la corporación universitaria Minuto de Dios sede Girardot, lugar donde se desarrollaran 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.

7.2 LABORATORIO DE PRUEBAS DE HIDROSTÁTICA

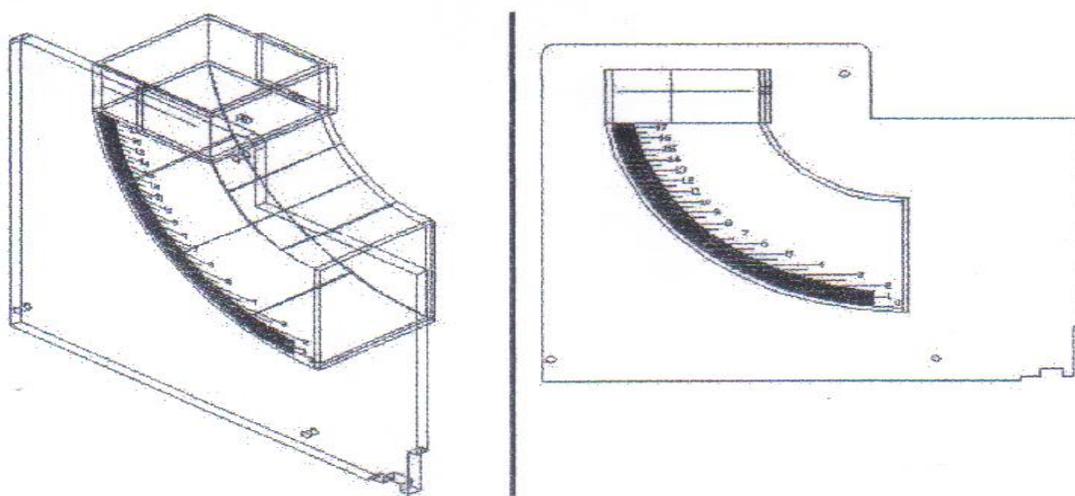
El laboratorio de pruebas de hidrostática consta de dos ensayos (ensayo de presión hidrostática y ensayo de fuerza de boyamiento) los cuales se describen seguidamente.

7.2.1 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, construido totalmente en acrílico cristal de 4mm, 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.

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.

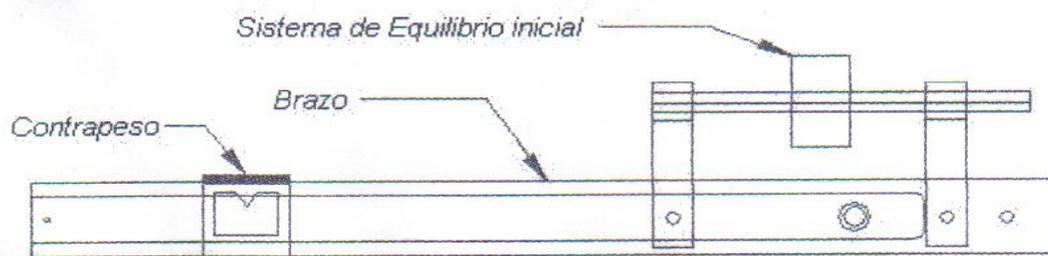
Figura 21. Recipiente y placa de referencia del ensayo de presión hidrostática



Balanza y sistema de equilibrio inicial: Se maneja una balanza de brazo, la cual consta de un brazo (en aluminio) en el que de un lado se acopla en recipiente de acrílico y se fija parcialmente el sistema de equilibrio inicial, todo mediante unión atornillada. 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. 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), que se ubica sobre dos rodamientos tipo abierto 8-22 mm,

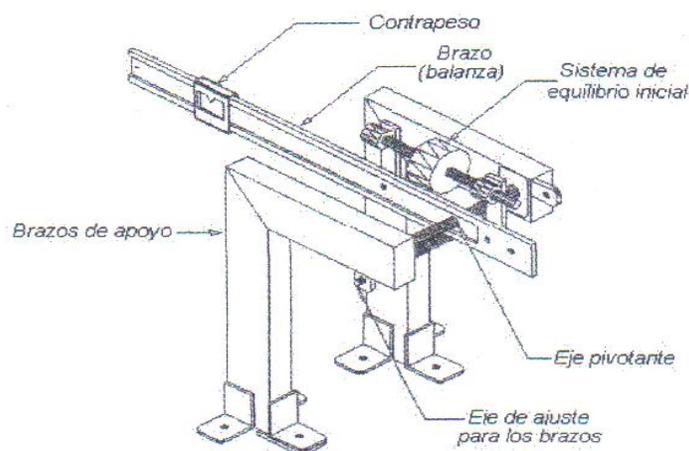
asegurando la fácil rotación del equipo, estos irán fijos sobre dados (en acero 1020HR de sección cuadrada de 31.8 mm, maquinados), que a su vez están montados sobre los dos brazos de apoyo (en tubo de sección rectangular de 1'' por 2'' calibre 18) del equipo. Entre los brazos de apoyo se dispuso de un eje tensor, cuya función es la de dar mayor rigidez a la estructura (en acero 1020HR, de 9 mm de diámetro, maquinado).

Figura 22. Brazo y sistema de equilibrio inicial



El sistema de equilibrio inicial se emplea, consta de dos brazos de apoyo (fabricados en platino de 3/16'' * 3/4''), sobre los cuales se dispone un eje roscado (en acero 1020HR, roca de 3/8''), en el que se desliza una pesa (en acero 1020HR de 2'' de diámetro), induciendo el equilibrio inicial del sistema.

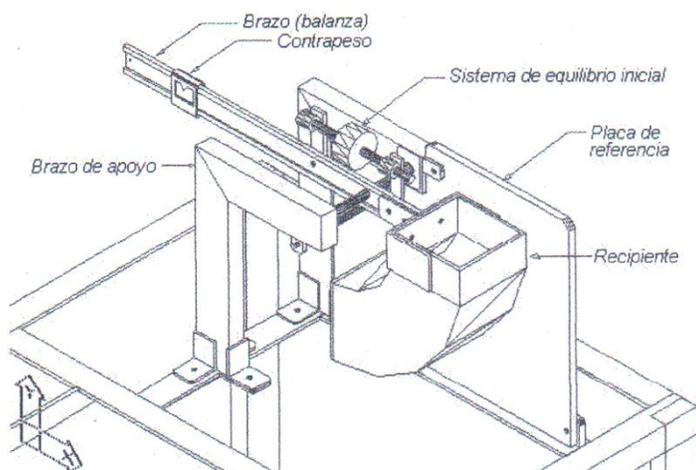
Figura 23. Estructura del equipo de presión hidrostática



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 desplaza 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 (FH) sobre la placa de sección cuadrada, tal como se muestra más adelante en la sección 8.1.1 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 ampliará en la sección 8.1.1 En la siguiente grafica se observa la disposición de los componentes del equipo de presión hidrostática.

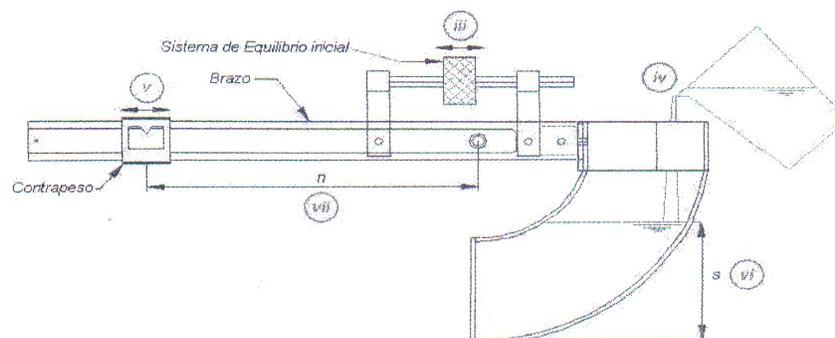
Figura 24. Disposición de los componentes del equipo de presión hidrostática



Metodología de la Medición: Para la Correcta Ejecución del Ensayo de Debe Seguir Los Siguietes Pasos:

- a) Inicialmente, se une el recipiente al equipo mediante la unión atornillada.
- b) Se debe retirar el indicador de la balanza, antes de inducir el equilibrio inicial del equipo.
- c) 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).
- d) Luego, se deposita el agua en el recipiente, en un volumen cualquiera.
- e) Después, se desplaza el contrapeso (indicador sólo o 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.
- f) Se mide el nivel del líquido en el recipiente (s), observando el nivel del líquido respecto a la reglilla dispuesta en el recipiente.
- g) Se toma el dato de la distancia entre el centro del eje pivotante y el indicador del contrapeso (n).
- h) 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.

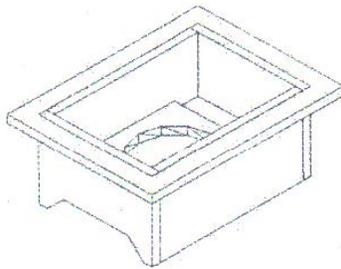
Figura 25. Ilustración de la metodología de la medición para el ensayo de la presión hidrostática



7.2.2 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 17) es un cuerpo fabricado en acrílico de 1 cm de espesor, el cual posee un alojamiento para fijar pesas.

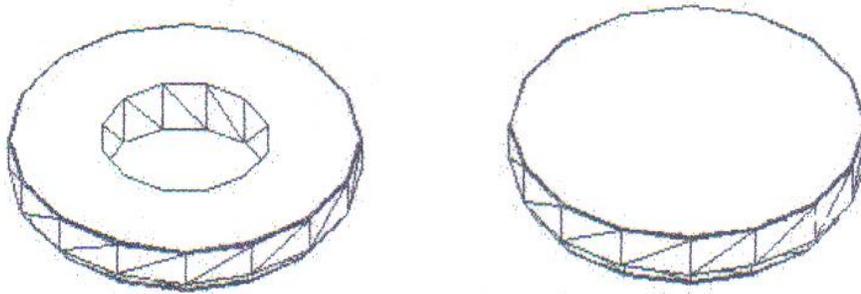
Figura 26. Cuerpo flotante



El recipiente (tanque de vidrio). En el que se efectúa el ensayo, se construyó con placas de vidrio de 6mm de espesor, unidas con siliconas, 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 fabricadas en acero 1020HR, mediante proceso de maquinado, las cuales tiene peso diferente debido a sus diferentes formas.

Figura 27. Pesas del ensayo de fuerza de boyamiento

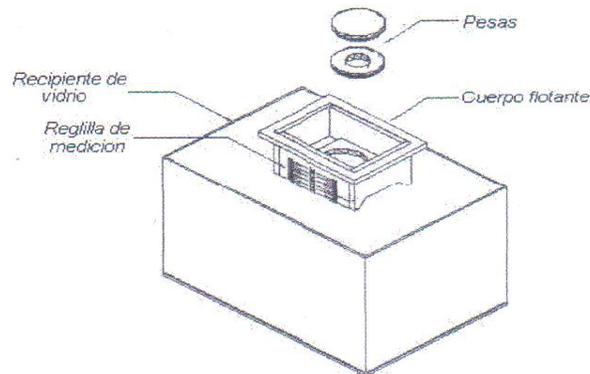


Toma de datos: La fuerza de boyamiento, se calcula con un conjunto de datos recogidos en el ensayo, tal como el nivel de hundimiento del cuerpo flotante, el cual se observa con una reglilla dispuesta en la cuerpo flotante, hundimiento que en un principio es debido a la acción de la aceleración gravitacional sobre el cuerpo y en el transcurso del ensayo también a la fuerza ejercida por la adición 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 (8.1.2)

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

Figura 28. Disposición de los componentes del equipo de fuerza de boyamiento



Metodología de la Medición: Para la correcta ejecución del ensayo se debe de seguir los siguientes pasos:

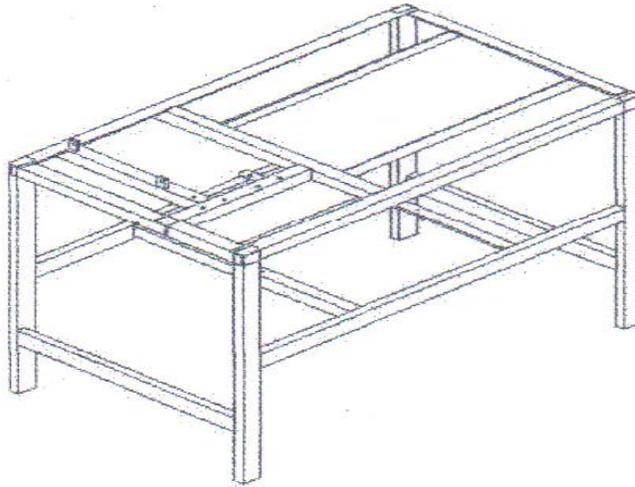
- a) Inicialmente, se toman las mediciones del cuerpo flotante, para poder así determinar el volumen del cuerpo y se verifica el peso del cuerpo.
- b) Luego debe llenarse el recipiente de vidrio hasta un nivel que permita desarrollar el ensayo.
- c) Se sumerge el cuerpo flotante en el agua y se registra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

7.3 ESTRUCTURA DEL LABORATORIO DE HIDROSTÁTICA

Básicamente, la estructura para el laboratorio de presión hidrostática fue hecha en ángulo de alas iguales de $1\frac{1}{2}'' \times \frac{3}{16}''$ y en platino de $1\frac{1}{4}'' \times \frac{1}{18}''$, con soldadura de electrodo

revestido (E6013 1/8"), además se adaptó un soporte para el tanque del ensayo de fuerza de boyamiento, en lámina CR calibre 18.

Figura 29. Estructura del laboratorio de hidrostática



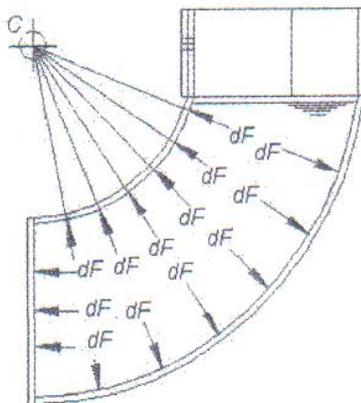
8 CÁLCULO

8.1 ENSAYO DE PRESIÓN DE HIDROSTÁTICA

En seguida, se presenta los cálculos necesarios para lograr la comprensión del fenómeno estudiado.

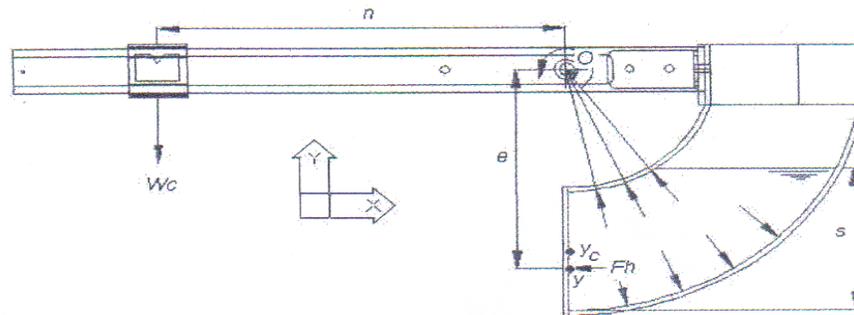
8.1.1 Cálculo de la Presión Hidrostática sobre el Recipiente. Inicialmente, se explica el principio físico que se desarrollara en el ensayo. Cuando el recipiente, tiene agua dentro de sí, la presión hidrostática actúa normalmente a las placas internas del recipiente, tal como se ve en la figura 16. (En 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 placas 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 30. 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 30).

Figura 31. 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:

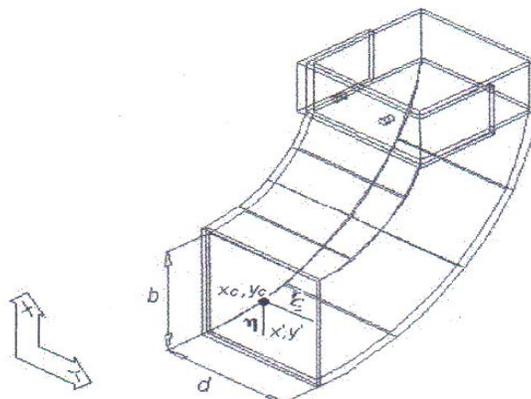
- W_c = peso en kg de los cuerpos utilizados como contrapeso.
- e = posición del punto de aplicación de la fuerza hidrostática sobre la placa plana (centro de presión) respecto al punto “0”
- n = distancia entre la posición del contrapeso y el punto “0”.

Entonces la presión hidrostática (P_h) (ver figura 32) es igual a:

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

8.1.2 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:

Figura 32. 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, $y - y_c$:

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

8.2 ENSAYO DE FUERZA DE BOYAMIENTO

Inicialmente, se determina el volumen del cuerpo flotante que se encuentra sumergido (V_d) (que depende del nivel de hundimiento h del cuerpo y la geometría del mismo, el cual es igual al volumen del líquido 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 líquido sufre un empuje vertical hacia arriba (fuerza de boyamiento) igual al peso del líquido 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: $\gamma_h = 998,2$ kg/m³. El anterior procedimiento, se repite luego de adicionarse las pesas al cuerpo flotante.

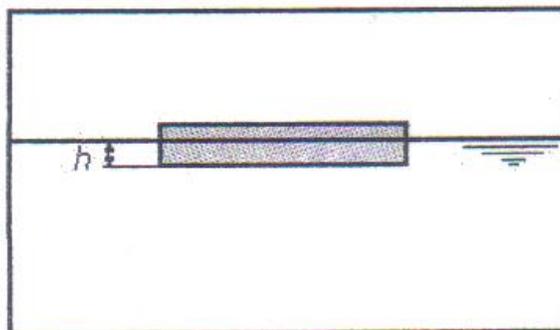
Para calcular los niveles de hundimiento teórico (h_t) en cada uno de las pruebas (cuerpo flotante sólo y cuerpo flotante más pesas), se plantea el equilibrio entre peso total del cuerpo flotante más las pesas y el peso del agua desplazada de la siguiente forma:

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

$$(W_{fc} + W_{fp}) = \gamma_h h \cdot V_d \quad (\text{Ecuación 15})$$

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 33. Nivel de hundimiento (ensayo de fuerza de boyamiento)

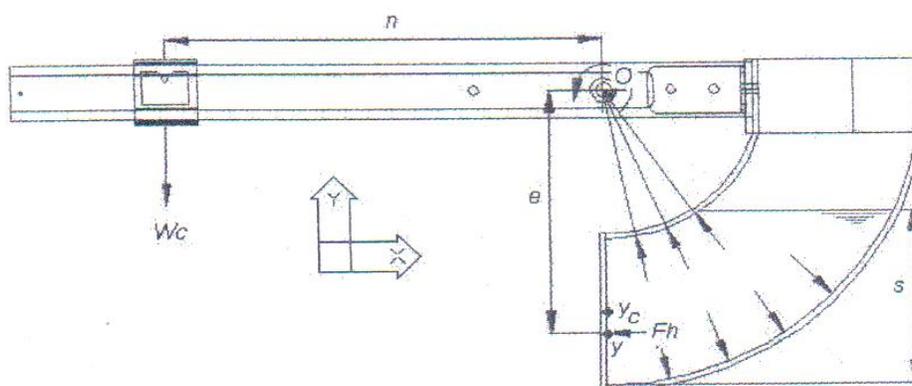


9 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

9.1 ENSAYO DE PRESION HIDROSTÁTICA

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

Figura 34. Esquema del ensayo de presión hidrostática

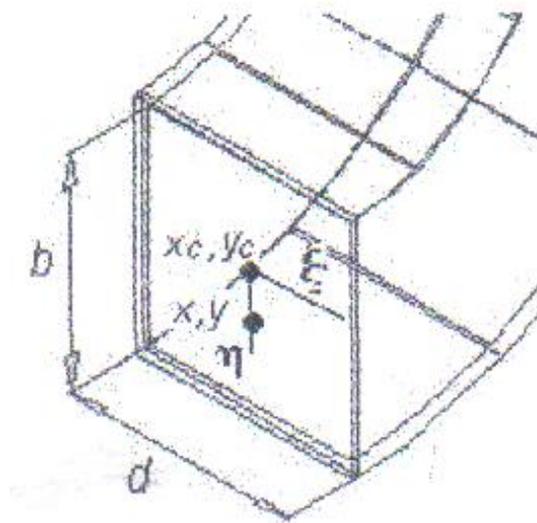


Datos teóricos. De acuerdo a la ecuación 4, la fuerza hidrostática ejercida sobre la placa (ver figura 35) es:

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

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

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

Figura 35. 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 (yc)*(m)	Fuerza hidrostática (Fh)(kg)	Presión hidrostática (Ph)(kg/m ²)
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)

9.1.1 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 (WF_h), para cada dato de nivel de líquido depositado en el recipiente, además, se registró el valor de la posición del centro de presión (e), el cual es necesario para determinar el valor de la fuerza hidrostática (ver sección 8.1.1.).

Tabla 2. Datos experimentales del ensayo de presión hidrostática.

Nivel (s) (m)	Posición de contrapeso (n) (m)	Posición del centro de presión (e) (m)	Peso del contrapeso (W_c) (kg)	Fuerza hidrostática (F_h) (kg)	WF_h (kg)
0,01	0,025	0,2007	0,04	0,0049826	$\pm 0,00023$
0,02	0,097	0,1973	0,04	0,0196655	$\pm 0,00034$
0,025	0,15	0,1957	0,04	0,0306592	$\pm 0,00053$
0,03	0,215	0,194	0,04	0,0443299	$\pm 0,00079$
0,04	0,375	0,1907	0,04	0,0786576	$\pm 0,00080$
0,05	0,167	0,1873	0,14	0,1248265	$\pm 0,00107$
0,07	0,315	0,1807	0,14	0,2440509	$\pm 0,00148$
0,1	0,18	0,1707	0,47	0,4956073	$\pm 0,00322$
0,12	0,245	0,1659	0,47	0,6940928	$\pm 0,00506$
0,14	0,31	0,1633	0,47	0,8922229	$\pm 0,00675$

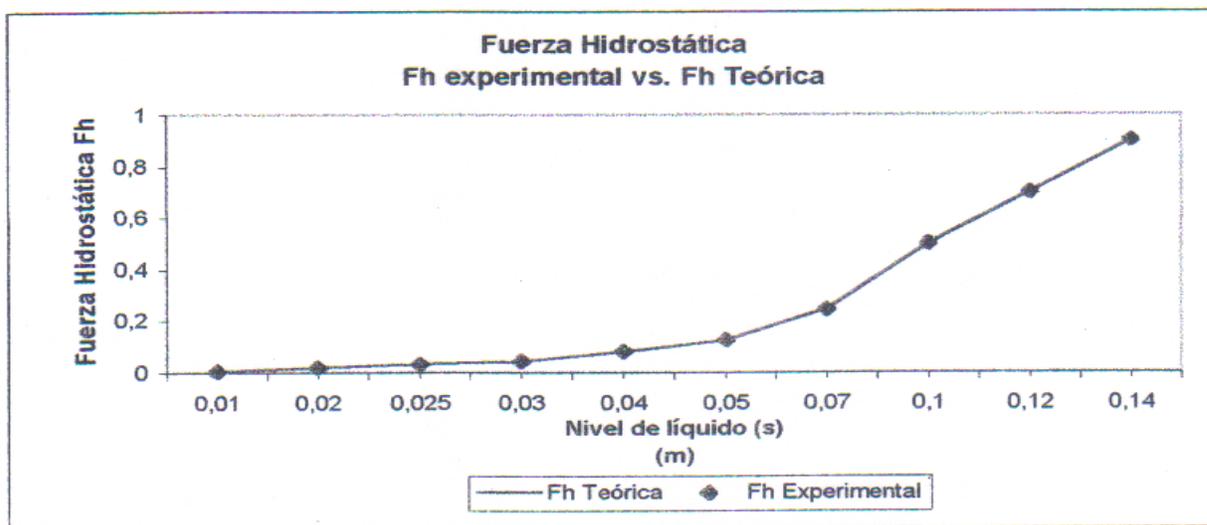
* WF_h = incertidumbre experimental

La estimación de la incertidumbre experimental, se hace en función de las incertidumbres primarias o de las variables independientes, de la siguiente forma: ⁷

$$W_{F_h} = \left[\left(\frac{\delta_{F_h}}{\delta_{W_c}} W_{W_c} \right)^2 + \left(\frac{\delta_{F_h}}{\delta_n} W_n \right)^2 + \left(\frac{\delta_{F_h}}{\delta_\theta} W_\theta \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Ecuación 17})$$

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

Figura 36. Gráfica de fuerza hidrostática experimental Vs. teórica



⁷ HOLMAN, Jack p. Metodos experimentales para ingenieros. 2Ed. Naucalpan de Juarez: Mc Graw . Hill, 1990, p,

9.1.2 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 variables. Los resultados obtenidos en la regresión se muestran en la tabla 3. Cuando el valor absoluto del factor de correlación es 1, hay una dependencia funcional perfecta entre las variables.⁸

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

Relación funcional	Ecuación de la regresión	Factor de correlación
$F_h = a \cdot b^s \cdot c$	$F_h = 162.7370938 \cdot 0.009717632247^s \cdot 2.311462405$	0.9998

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

9.1.3 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:

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

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.

9.1.4 Análisis de los Resultados. De la tabla anterior se observó que el error de la práctica se encuentra entre 2.06% y el 0.09%, lo cual nos indica un bien nivel de exactitud del ensayo. El error se puede generar por diversas causas y generalidades se clasifica en tres categorías principales.⁹

➤ **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 en qué magnitud se afecta el resultado final. Existe 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 probabilísticos, entre ellos tenemos:

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

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) Error de apreciación

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

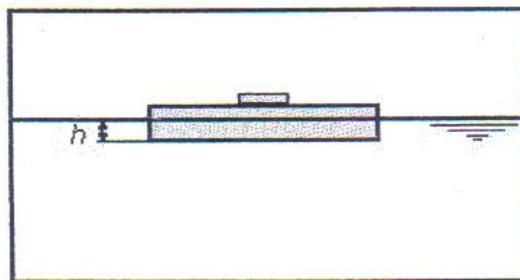
b) Errores debidos a la naturaleza de la magnitud que se mide.

• 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.

9.2 ENSAYO DE FUERZA DE BOYAMIENTO

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

Figura 37. Esquema general del ensayo de fuerza de boyamiento



9.2.1 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:

$$V_d = (W_c + W_p) / \gamma h$$

La fuerza de boyamiento según la ecuación 14, es:

$$F_b = V_d * \gamma h$$

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 (Wc) (kg)	Peso del cuerpo adicionado (Wp) (Kg)	Vol. Sumergido del cuerpo (Vd) (m3)	Nivel del hundimiento (h) (m)	Fuerza de boyamiento (Fb) (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

9.2.2 Datos Experimentales. Para cada ensayo con el cuerpo flotante solo y con las pesas adicionadas se tomó el nivel de hundimiento del cuerpo (h) y se calculó el volumen sumergido (Vd), el valor de la fuerza de boyamiento (Fb) y la incertidumbre experimental (WFb), obteniendo los datos que se muestran a continuación:

Tabla 6. Datos experimentales de la fuerza de boyamiento

Peso total (Wc +Wp) (kg)	Nivel de hundimiento (h) (m)	Vol. Sumergido del cuerpo (Vd) (m3)	Fuerza de boyamiento (Fb) (Kg)	Incertidumbre experimental (WFb) (kg)
1,195	0.041	0,001148	1,148	±0,0018
1,63	0,057	0,001596	1,596	±0,0023
1,69	0,059	0,001652	1,652	±0,0026

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

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

9.2.3 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:

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

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

Tabla 7. Calculo de error del ensayo de fuerza de boyamiento

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

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

a) Errores instrumentales

b) Precisión de la reglilla usada en el ensayo

➤ Errores accidentales o aleatorios

a) Errores de apreciación

b) Error en la lectura del nivel de hundimiento del cuerpo flotante

10 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.

Es muy útil porque a los estudiantes nos facilita o es la mejor manera de corroborar la teoría y para nosotros es de gran valor entregarle a nuestra universidad este ensayo de hidráulica.

11 RECOMENDACIONES

- Se le recomienda a la universidad Minuto de Dios que se cuente con un espacio para el laboratorio de mecánica de fluidos, para que los estudiantes lleven práctica los conocimientos 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 exacto posible para reducir al mínimo errores en los ensayos.
- Teniendo en cuenta que los instrumentos son frágiles, se le recomienda a la universidad Minuto de Dios el mantenimiento y conservación de los mismos para que tenga una mayor vida útil.

12 REFERENCIAS

Shames I.H. (1995). Mecánica de fluidos. 3 ed. Santafé de Bogotá: Mc Graw-Hill, p.3.

Shames I.H. (1995). Mecánica de fluidos. 3 ed. Santafé de Bogotá: Mc Graw-Hill, p.53-54.

Shames I.H. (1995). Mecánica de fluidos. 3 ed. Santafé de Bogotá: Mc Graw-Hill, p.61

Shames I.H. (1995). Mecánica de fluidos. 3 ed. Santafé de Bogotá: Mc Graw-Hill, p.78

Shames I.H. (1995). Mecánica de fluidos. 3 ed. Santafé de Bogotá: Mc Graw-Hill, p.79

Enciclopedia Universal Ilustrada Europeo Americana, p.359

Nueva Louss vol.4 plaza & jannes S.A Editores, p.1027

Copper, William D. instrumentación electrónica moderna y técnicas de medición. Ciudad de México: PRENTICE HALL. P. 07.

Holman, Jack p. Metodos experimentales para ingenieros. 2Ed. Naucalpan de Juarez: Mc Graw Hill,1990, p.56.