

2. MECÁNICA DE FLUIDOS

2.1. INTRODUCCIÓN

Un **fluido** es parte de un estado de la materia la cual no tiene una forma definida, sino que se adapta a la forma del recipiente que lo contiene a diferencia de los sólidos los cuales tienen forma y volumen definido. Este concepto de fluidos incluye a líquidos y gases. Las diferencias esenciales entre líquidos y gases son:

- a) los líquidos son prácticamente incompresibles y los gases son compresibles
- b) los líquidos ocupan un volumen definido y tienen superficies libres, mientras que una masa dada de gas se expansiona hasta ocupar todas las partes del recipiente que lo contenga.

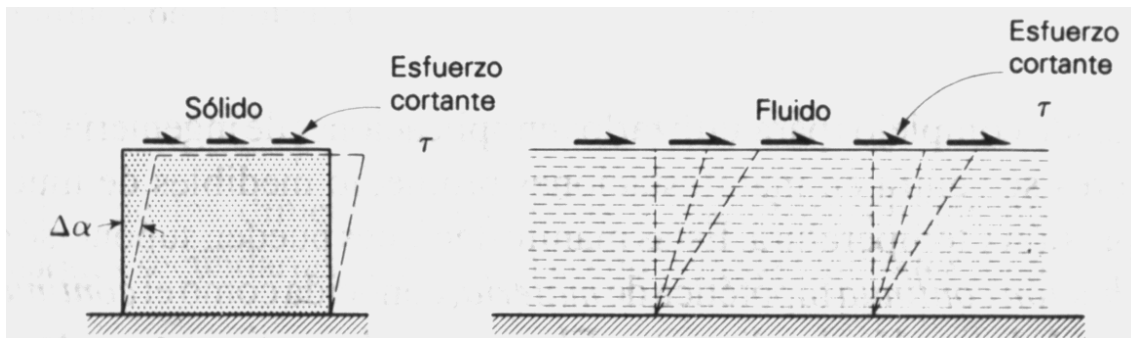
No obstante, a veces la frontera entre líquidos y gases no es muy precisa.

¿Por qué estudiar fluidos? El conocer y entender los principios básicos de la mecánica de fluidos es esencial en el análisis y diseño de cualquier sistema en el cual el fluido es el elemento de trabajo. Hoy en día el diseño de virtualmente todos los medios de transporte requiere la aplicación de la mecánica de fluidos. También es bastante común realizar estudios para determinar las fuerzas aerodinámicas y estudiar el flujo alrededor de edificios, puentes y otras estructuras complejas. Los sistemas de calefacción y de ventilación, tanto de viviendas e industrias como de construcciones subterráneas, túneles y otros, así como el diseño de sistemas de cañerías son ejemplos en los cuales las técnicas de diseño están basadas en la mecánica de fluidos. Incluso el sistema de circulación del cuerpo humano es un sistema fluido; de ahí que se de el diseño de corazones artificiales, maquinas de diálisis, ayudas respiratorias y otros aparatos de este tipo estén basados en los principios de la mecánica de fluidos.

La **Mecánica de Fluidos**, es la parte de la física que se ocupa de la descripción cuantitativa de las acciones de los fluidos en reposo o en movimiento, así como de las aplicaciones y mecanismos que en ingeniería utilizan fluidos. La Mecánica de Fluidos como hoy la conocemos es una mezcla de teoría y experimento que proviene por un lado de los trabajos iniciales de los ingenieros hidráulicos, de carácter fundamentalmente empírico, y por el otro del trabajo de básicamente matemáticos, que abordaban el problema desde un enfoque analítico. La mecánica de fluidos puede dividirse en dos campos principales: la Estática de fluidos, o Hidrostática, que se ocupa de los fluidos en reposo, y la Dinámica de fluidos, que trata de los fluidos en movimiento.

Desde el punto de vista mecánico nos interesa diferenciar el estado sólido del fluido por la forma en que reacciona el material cuando se le aplica una fuerza. Los fluidos reaccionan de una manera característica a las fuerzas. La característica fundamental de los fluidos es la denominada **fluidéz**, es decir sufren grandes deformaciones no elásticas sin necesidad de grandes acciones externas. Si se compara lo que ocurre a un sólido y a un fluido cuando son sometidos a una **fuerza cortante o tangencial** se tienen reacciones características que se pueden verificar experimentalmente y que permiten diferenciarlos. Un fluido se define como una sustancia que cambia su forma continuamente siempre que esté sometida a una fuerza cortante, sin importar qué tan pequeño sea. La medida de la facilidad con que se mueve vendrá dada por la **viscosidad** que se trata en tercer curso, relacionada con la acción de fuerzas de rozamiento. En contraste un sólido experimenta un desplazamiento definido (o se rompe completamente) cuando se

somete a una fuerza cortante. Es decir, mientras que para un sólido bajo una fuerza cortante constante se alcanza un ángulo de deformación determinado y constante, en un fluido debemos hablar de una velocidad de deformación constante o no, ya que la deformación se produce de forma continua.



Por tanto, con base al comportamiento que desarrollan los fluidos se definen de la siguiente manera: "*Fluido es una sustancia que se deforma continuamente, o sea se escurre, cuando esta sometido a una fuerza de corte o tangencial*".

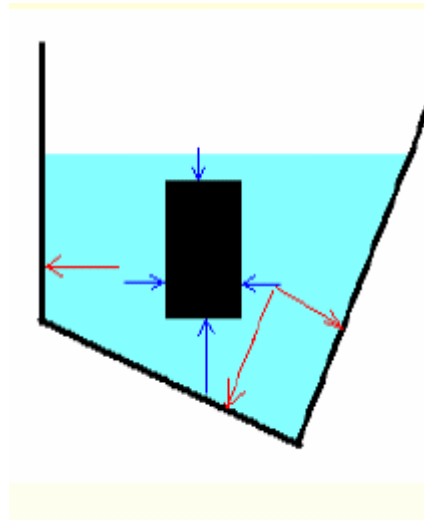
2.2. ESTÁTICA DE FLUIDOS

La *estática de fluidos* estudia las condiciones bajo las cuales un fluido está en equilibrio. En el equilibrio el fluido está detenido o se mueve como si fuera un cuerpo rígido sin deformarse de manera que todos los elementos que lo forman se muevan a la misma velocidad, es decir que no se desplacen los unos a los otros y por lo tanto no exista *escurrimiento o desplazamiento*. La ausencia de escurrimiento o desplazamiento en el estado de equilibrio conduce a una primera conclusión de enorme importancia:

“Un fluido en reposo no soporta ninguna fuerza de corte o tangencial”

Bajo estas condiciones, sobre las superficies que están en contacto con el fluido solo se desarrollan fuerzas normales, cualquier otro tipo de fuerza siempre tendría una componente de corte o tangencial. ***Por tanto, la tercera ley de Newton (Principio de acción y reacción) permite decir que la fuerza ejercida sobre cualquier superficie en contacto con un fluido es perpendicular a dicha superficie.***

Un fluido ejerce fuerza en todas las direcciones (los nadadores y buceadores sienten la fuerza del agua en todas partes de su cuerpo). La fuerza que ejerce un fluido en equilibrio sobre un cuerpo sumergido en cualquier punto es perpendicular a la superficie del cuerpo. En la figura, se muestran las fuerzas que ejerce un fluido en equilibrio sobre las paredes del recipiente y sobre un cuerpo sumergido. En todos los casos la fuerza es perpendicular a la superficie.



Para comenzar el estudio de la estática de fluidos es necesario revisar el concepto de presión.

a) Concepto de presión

Al aplicar una fuerza sobre un sólido deformable, los efectos que provoca dependen no sólo de su intensidad, sino también de cómo esté repartida sobre la superficie del cuerpo. Así, un golpe de martillo sobre un clavo bien afilado hace que penetre más en la pared de lo que lo haría otro clavo sin punta que recibiese el mismo impacto.

El cociente entre el módulo F de una fuerza aplicada perpendicularmente sobre una superficie y el área S de dicha superficie se denomina el escalar presión:

$$P = \frac{F}{S}$$

Si la fuerza no es normal a la superficie sobre la cual actúa, entonces para el cálculo de la presión se considera solo la componente normal. La presión es un escalar. No hay ninguna dirección asociada a la presión, pero la dirección de la fuerza asociada a la presión es perpendicular a la superficie en cuestión. Hay que tener en cuenta que la presión y la fuerza son magnitudes diferentes. Podemos obtener una presión muy grande a partir de una fuerza relativamente pequeña, haciendo que el área sobre la que se aplica la fuerza sea pequeña. Éste es el caso de las agujas, el área de la punta de la aguja es muy pequeña; por eso basta con ejercer una pequeña fuerza sobre la aguja para generar una presión suficientemente grande que perfora la piel. También podemos generar una pequeña presión a partir de una fuerza grande, aumentando el área sobre la que actúa la fuerza. Éste es el principio que subyace al diseño de las raquetas para andar sobre la nieve.

Unidades de medida de la presión:

En el Sistema Internacional la unidad de presión es el Pascal: $Pa = \frac{N}{m^2}$. Otra unidad común es la atmósfera. La atmósfera ejerce una presión sobre la superficie de la tierra y sobre todos los objetos situados en ella. Actualmente la atmósfera se define como aproximadamente la presión del aire a nivel del mar, $1atm = 1,013 \times 10^5 Pa$. Otra unidad de presión es el *bar* que corresponde a $10^5 Pa$.

b) Ecuación general de la estática de fluidos

Si un fluido está en reposo, esto es, en equilibrio, todas las partes del fluido están en reposo. Consideremos un pequeño elemento de fluido sumergido dentro de la masa del fluido. Supongamos que tiene la forma de un cilindro de sección transversal A , volumen V y cuya altura se extiende desde la profundidad d a la profundidad $d+h$.

Esta porción de líquido permanece en reposo, de manera que, de acuerdo con la segunda ley de Newton, la fuerza neta ejercida sobre la porción de líquido debe ser cero. La fuerza horizontal es cero porque el elemento no tiene aceleración horizontal y solo son debidas a la presión del fluido. Analicemos las fuerzas verticales que actúan sobre la muestra del líquido: las fuerzas aplicadas son las originadas por la presión del fluido circundante aplicadas en la superficie lateral y en las dos bases y su respectivo peso. El líquido en el exterior de nuestra muestra ejerce fuerzas que son, en todos los puntos de la superficie de la muestra perpendiculares a dicha superficie. La presión ejercida sobre el líquido sobre la parte inferior del cilindro es P y la presión sobre la parte superior es P_0 . Así, el módulo de la fuerza ascendente ejercida por el líquido sobre la superficie inferior de la muestra es PA y el módulo de la fuerza descendente ejercida por el líquido sobre la parte superior es P_0A . Como la muestra está en equilibrio, la fuerza neta en la dirección vertical debe ser cero:

$$\sum_{i=1}^n F_y = 0 \Rightarrow PA - P_0A - mg = 0$$

La masa del líquido contenido en la muestra que hemos elegido es $m = \rho V = \rho Ah$, por tanto:

$$PA - P_0A - \rho Ahg = 0 \Rightarrow PA = P_0A + \rho Ahg \Rightarrow P = P_0 + \rho hg$$

Es posible escribir a expresión deducida de la siguiente manera:

$$P = P_0 + \gamma h$$

siendo $\gamma = \rho g$ el *peso específico* del fluido.

Si la superficie superior de nuestra muestra está a una profundidad $d = 0$, es decir, está en contacto con la atmósfera, entonces P_0 coincide con la presión atmosférica. La ecuación que hemos deducido indica que la presión en un líquido depende únicamente de la profundidad dentro del líquido. De esto se deduce que la presión es la misma en todos los puntos del líquidos situados a la misma profundidad, independientemente de la forma del recipiente y de la cantidad de líquido. Esta ecuación constituye *la ecuación fundamental de la hidrostática*. La expresión lógicamente es válida para fluidos de densidad constante.

Concepto de densidad:

Los fluidos son agregaciones de moléculas muy separadas en los gases y próximas en los líquidos. La distancia entre las moléculas es mucho mayor que el diámetro molecular. Las moléculas no están fijas en una red, sino que se mueven libremente. Por ello, la densidad, o masa por unidad de volumen no tiene en principio un significado preciso, pues el número de moléculas en el interior de un volumen cualquiera cambia continuamente. Este efecto pierde importancia si la unidad de volumen es mucho mayor que el cubo del espaciado molecular, ya que el número de moléculas permanecerá prácticamente constante a pesar del considerable intercambio a través de su contorno. El volumen límite

es alrededor de 10^{-9} mm^3 para todos los líquidos y gases a presión atmosférica. En la mayor parte de los cálculos hidráulicos, el interés está realmente centrado en manifestaciones macroscópicas promedio que resultan de la acción conjunta de una gran cantidad de moléculas, manifestaciones como la densidad, la presión o la temperatura. Por tanto, la densidad seguirá siendo para nosotros el cociente entre la masa y el volumen del fluido:

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

Aunque la mayor parte de los sólidos y líquidos se dilatan ligeramente cuando se calientan y se contraen ligeramente cuando se ven sujetos a un incremento de presión externa, estas variaciones de volumen son extremadamente pequeñas, por lo que podemos decir que la mayor parte de los sólidos y líquidos son aproximadamente independientes de la temperatura y la presión ($\rho \approx cte$, líquidos incompresibles). En cambio, la densidad de un gas depende fuertemente de la presión y temperatura. Por lo tanto, se debe especificar la temperatura y presión cuando se den las densidades de los gases. Por convención, las **condiciones estándar o condiciones normales** para las medidas de las propiedades físicas son presión atmosférica a nivel del mar y temperatura de 0° .

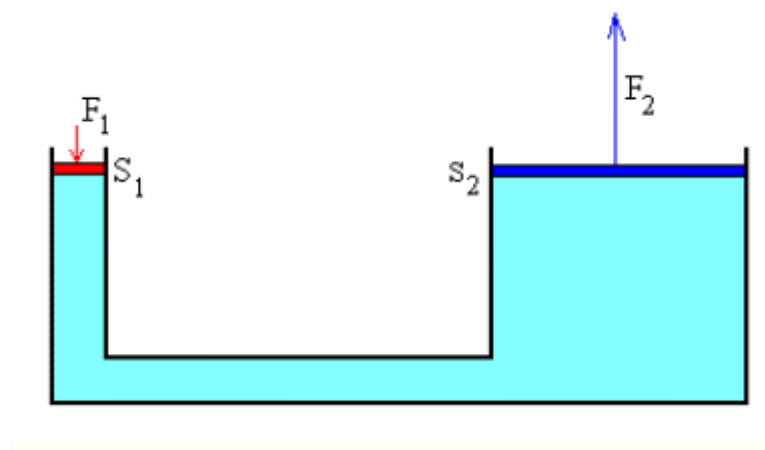
d) Principio de Pascal

A la vista de la ecuación de la estática de fluidos tenemos que cualquier aumento de la presión sobre la superficie deberá transmitirse a todos los puntos del interior del líquido:

$$P'_0 = P_0 + \Delta P \Rightarrow P' = P_0 + \Delta P + \rho h g = P + \Delta P$$

Este hecho fue descubierto por primera vez por el científico francés Blaise Pascal y se llama principio de Pascal: un cambio en la presión aplicada sobre un líquido contenido en un recipiente se transmite con la misma intensidad a todos los puntos del fluido y a las paredes del recipiente.

Una aplicación importante del principio de Pascal es la **prensa hidráulica**. Se aplica una fuerza F_1 en un pistón pequeño de área A_1 . La presión se transmite a través del líquido de área A_2 y la fuerza que ejerce el líquido sobre el pistón es F_2 . Como la presión es la misma en ambos pistones, ya que tenemos la misma altura en ambos lados, vemos que se debe cumplir $\frac{F_1}{A_1} = P_1 = \frac{F_2}{A_2} = P_2 = P$. El módulo de la fuerza F_2 es un factor $\frac{A_2}{A_1}$ mayor que F_1 , es decir como $A_2 > A_1$, entonces $F_2 > F_1$. Los frenos hidráulicos, los elevadores de coches, los gatos hidráulicos y los ascensores hacen uso de este principio.

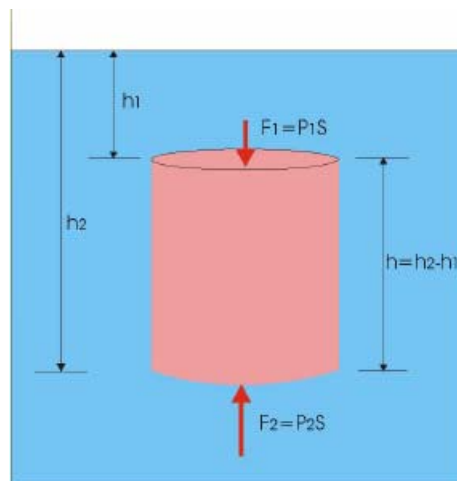


d) Principio de Arquímedes

Cuando un cuerpo está parcial o totalmente sumergido en un fluido en reposo, el fluido ejerce una presión sobre todas las partes de la superficie del cuerpo. Como la presión es mayor en las partes sumergidas más profundamente, la resultante de la fuerza ejercida por el fluido sobre el cuerpo es una fuerza vertical y hacia arriba denominada **empuje**.

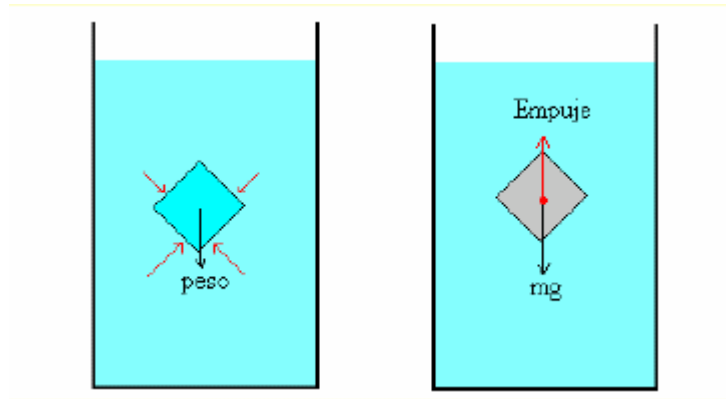
Consideremos un cilindro de altura h , base S y totalmente sumergido en un fluido de densidad ρ . La fuerza resultante debida a la diferencia de presión entre la base superior e inferior (EMPUJE) es:

$$F = S\rho g(h_2 - h_1) = S\rho gh = \rho Vg = P_{\text{Líquido}}$$



Por consiguiente, un cuerpo sólido sumergido en un líquido sufre un empuje vertical igual y directamente opuesto al peso del líquido desalojado (principio de Arquímedes)

La fuerza de empuje está aplicada en el centro de masas del volumen del fluido desalojado. A este punto se le denomina **centro de empuje o centro de carena**.

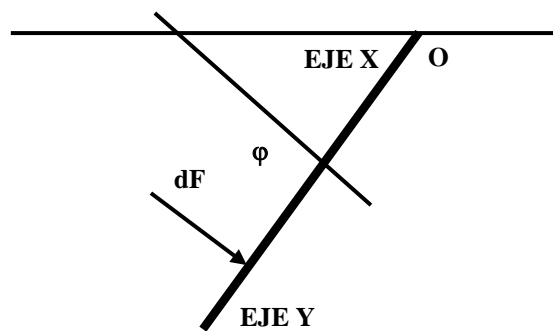


Según que el peso del cuerpo sea superior o inferior al peso del volumen del líquido desalojado, el cuerpo desciende hasta el fono del líquido o asciende hasta alcanzar la superficie libre, manteniéndose en equilibrio en una posición en la que el empuje sea igual al peso del cuerpo.

2.3. FUERZAS HIDROSTÁTICAS SOBRE SUPERFICIES PLANAS

La ecuación fundamental de la hidrostática debe satisfacerse en todos los puntos de un líquido incompresible en equilibrio, incluso en los que están en contacto con las superficies que lo limitan, tales como las superficies de las paredes de un depósito o de una presa. En los casos particulares como el de una pared plana o superficie curva simétrica las fuerzas que ejerce el líquido sobre la pared son equivalentes a una fuerza única o resultante.

Sea por ejemplo un líquido que está en equilibrio limitado por una pared plana oblicua:



La presión atmosférica actúa sobre las dos caras de la pared, bien directamente o bien a través del líquido por lo que será nula su influencia en el equilibrio de la pared y únicamente deberán tenerse en cuenta las presiones ejercidas por el líquido. La presión ejercida sobre la pared varía con la profundidad, sobre elemento de pared de área dS , situada a una profundidad h actúa la fuerza $dF = PdS = \rho gh dS$. Como todas las fuerzas dF son normales a la superficie de la pared, constituyen un sistema de fuerzas paralelas equivalentes a una fuerza resultante suma de todas ellas:

$$F = \int_A dF = \int_A \rho gh dS = \int_A \rho g y \sin \alpha dS = \rho g \sin \alpha \int_A y dS$$

La coordenada \bar{Y} del centro de gravedad o centro de masas de la pared viene dado por $\bar{Y} = \frac{1}{M} \int y dm = \frac{1}{S} \int y ds$, de manera que $\bar{Y} \cdot S = \int y ds$, y la expresión de la fuerza sobre la pared:

$$F = \int_A dF = \rho g \sin \alpha \bar{Y} S = \rho g h_{CM} S = SP_{CM}$$

Por consiguiente, la resultante de las fuerzas que un líquido ejerce sobre una superficie plana sumergida en él es igual al área de dicha superficie por la presión hidrostática en su centro de masas o centro de gravedad.

El conocimiento de dicha fuerza resultante no completa el estudio de la acción del fluido sobre la superficie, es necesario conocer el punto de aplicación de dicha fuerza. Para calcular el punto de aplicación de la fuerza hay que encontrar el llamado **centro de momentos del sistema de vectores paralelos** cuyo vector de posición viene dado por la siguiente expresión:

$$O\vec{C} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i \vec{r}_i}{R}$$

siendo λ_i el módulo de los vectores paralelos. Si estamos en un sistema plano, la ecuación vectorial anterior se transforma en la dos siguientes ecuaciones escalares:

$$X = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i x_i}{R} \qquad Y = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i y_i}{R}$$

En nuestro caso λ_i representa el módulo de cada una de las fuerzas, y los sumatorios se convierten en integrales sobre aquellas regiones en las que el módulo de la fuerza ejercida por el fluido sea constante, esto es:

$$Y = \frac{\int y d\lambda}{R} = \frac{\int y dF}{F} = \frac{\int y \rho g \sin \alpha dS}{\int \rho g \sin \alpha dS} = \frac{\rho g \sin \alpha \int y^2 dS}{\rho g \sin \alpha \int y dS} = \frac{\int y^2 dS}{\int y dS} = \frac{\sigma \int y^2 dS}{\sigma \int y dS} = \frac{\int y^2 dm}{\int y dm} = \frac{I_X}{M \cdot \bar{Y}_{CM}}$$

siendo I_X el momento de inercia de la superficie respecto al eje X. Este momento de inercia puede ser escrito en función del momento de inercia de un eje paralelo a esto y que pase por el centro de masas usando el teorema de Steiner:

$$Y = \frac{I_X}{M \cdot \bar{Y}_{CM}} = \frac{I'_X + M \bar{Y}_{CM}^2}{M \cdot \bar{Y}_{CM}} = \bar{Y}_{CM} + \frac{I'_X}{M \cdot \bar{Y}_{CM}}$$

ecuación que muestra que el punto de aplicación de la fuerza está a mayor profundidad que el centro de masas de la superficie.

De manera análoga para la coordenada X:

$$X = \frac{\int x d\lambda}{R} = \frac{\int y dF}{F} = \frac{\int x \rho g y \sin \alpha dS}{\int \rho g y \sin \alpha dS} = \frac{\rho g \sin \alpha \int x y dS}{\rho g \sin \alpha \int y dS} = \frac{\int x y dS}{\int y dS} = \frac{\sigma \int x y dS}{\sigma \int y dS} = \frac{\int x y d m}{\int y d m} = \frac{I_{XY}}{M \cdot \bar{Y}_{CM}}$$

En este caso particular al punto de coordenadas (X, Y) donde está aplicada la fuerza F recibe el nombre de **centro de presiones**.