

Fundamentos de mecánica de fluidos

Alberto García Prats
Ricardo Cobacho Jordán



Alberto García Prats
Ricardo Cobacho Jordán

Fundamentos de Mecánica de Fluidos

EDITORIAL
UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Para referenciar esta publicación utilice la siguiente cita: GARCÍA-PRATS, A. y COBACHO-JORDÁN, R. (2012). *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Valencia: Editorial Universitat Politècnica

Primera edición 2012

© Alberto García Prats
Ricardo Cobacho Jordán

© de la presente edición:
Editorial Universitat Politècnica de València
www.editorial.upv.es

Distribución: pedidos@editorial.upv.es
Tel. 96 387 70 12 / Ref. 318

Imprime: By print percom sl.

ISBN: 978-84-8363-949-8
Impreso bajo demanda

Queda prohibida la reproducción, distribución, comercialización, transformación, y en general, cualquier otra forma de explotación, por cualquier procedimiento, de todo o parte de los contenidos de esta obra sin autorización expresa y por escrito de sus autores.

Impreso en España

Índice

Tema 1. Propiedades de los Fluidos

1. Estados de agregación de la materia	7
1.1. El medio material continuo	7
1.2. Estados de agregación de la materia	7
2. Concepto de fluido	8
3. Ley de viscosidad de Newton	9
4. Propiedades de los fluidos	11
4.1. Viscosidad	12
4.2. Viscosidad cinemática	13
4.3. Peso y masa	13
4.4. Peso específico	14
4.5. Densidad	15
4.6. Presión	15
4.7. Compresibilidad	16
4.8. Tensión de vapor y cavitación	18

Tema 2. Estática de Fluidos

1. Introducción	19
2. Propiedades de la presión hidrostática	19
3. Ecuación general de la Hidrostática o Ecuación de Euler de la Hidrostática	20
4. Presión en un punto	22
5. Presión sobre una superficie plana inclinada	24
6. Punto de aplicación de empuje: el centro de presiones	25
7. Cálculo de empujes en diques y presas de gravedad	27
8. Empuje sobre superficies curvas	30
9. Principio de Arquímedes	34
10. Flotación y Estabilidad	35
11. Medida de la presión. Manómetros	38
11.1. Barómetro de mercurio	38
11.2. Piezómetros	38
11.3. Manómetro abierto o manómetro simple	39
11.4. Manómetro metálico o Bourdon	40
12. Algunos centros de gravedad y momentos de inercia	41

Tema 3. Dinámica integral

1. Introducción	43
2. Análisis del movimiento de los fluidos. Introducción a la cinemática de los fluidos	43
2.1. Descripción cinemática del flujo. Enfoques de Euler y Lagrange	44
2.2. Derivación material	47
2.3. Aceleración	48
2.4. Clasificación del movimiento	48
2.5. Flujo rotacional e irrotacional.....	49
2.6. Caudal o gasto	50
3. Dinámica Integral.....	51
3.1. Ecuación de conservación de la masa: La ecuación de continuidad... 52	
3.1.1. Caso particular 1: Cuando el VC no permite la acumulación de fluido en su interior (conducciones)	53
3.1.2. Caso particular 2: Cuando el VC permite la acumulación de fluido en su interior (depósitos).....	55
3.2. Ecuación de conservación de la energía. Ecuación de Bernouilli	56
3.2.1. Ecuación de Euler y ecuación de Bernouilli	56
3.2.2. Teorema del trabajo y la energía y Ecuación de Bernouilli	59
3.2.3. Representación gráfica de las líneas de energía.....	63
3.2.4. Generalización de la ecuación de Bernouilli. Aplicación a fluidos reales	64
3.3. Ecuación de conservación de cantidad de movimiento.....	68

Tema 4. Flujo a presión

1. Introducción	71
2. Régimen hidráulico en tuberías	71
2.1. El número de Reynolds	72
3. Movimiento en régimen laminar	73
4. Movimiento en régimen turbulento.....	77
4.1. Teoría de la capa límite de Prandtl	77
4.2. Pérdidas de carga continuas en régimen turbulento.....	79
5. La rugosidad en las tuberías	83
6. Cálculo del valor de f	84
7. Fórmulas empíricas de pérdida de carga	88

8. Pérdidas de carga localizadas	88
8.1. Coeficientes de resistencia en algunas singularidades habituales	90
8.2. Cálculo de las pérdidas de carga singulares como porcentaje de las continuas. El coeficiente mayorante	92
8.3 Longitud equivalente de una tubería	93
9. Problemas simples en tuberías	93
10. Desdoblamiento de diámetros	95
11. Asociación de tuberías	97
11.1. Tuberías en serie	97
11.2. Tuberías en paralelo	98
12. Cavitación en tuberías	98

Tema 5. Máquinas Hidráulicas y Bombas Centrífugas

1. Máquinas Hidráulicas.....	101
2. Clasificación de las bombas.....	101
3. La bomba centrífuga	109
4. Potencia en una corriente líquida	111
5. Potencia en bombas.....	111
6. Curvas características reales en bombas centrífugas.....	113
7. Leyes de semejanza en bombas.....	117
8. Velocidad específica o n° específico de revoluciones	119
9. Curvas características a velocidades distintas de la velocidad nominal ..	120
10. Punto de funcionamiento de una instalación	120
11. Asociación de bombas.....	122
12. Cavitación en bombas.....	125
13. Campos de trabajo y selección de bombas	128

Tema 6. Transitorios

1. Introducción	131
2. Modelos de cálculo	132
3. Descripción física del fenómeno	133
4. El pulso de Joukowsky	138

Tema 7. Flujo en lámina libre

1. Introducción.....	141
2. Definiciones	141
3. Análisis unidimensional.....	142
4. Clasificación del flujo	142
5. Movimiento uniforme permanente	144
6. Distribución de velocidades en una sección transversal	147
7. Coeficiente de Coriolis	147
8. Pendiente motriz y tensión tangencial.....	148
9. Ecuaciones de pérdida en flujo uniforme	150
9.1. La Fórmula de Chézy	150
9.2. La Fórmula de Bazin	151
9.3. La Fórmula de Manning.....	152
10. Relaciones geométricas en las secciones más comúnmente utilizadas	155
10.1. Sección rectangular	155
10.2. Sección trapecial.....	156
10.3. Sección circular	158
11. Sección hidráulicamente óptima	158
11.1. Sección rectangular	159
11.2. Sección trapecial.....	159
11.3. Sección circular	161
12. Curva de capacidad de un canal en régimen uniforme.....	162
13. Velocidades máximas y mínimas	163
14. Diseño de canales	164
15. Flujo permanente no uniforme.....	164
16. Energía específica	165
17. Curva de energía específica	167
18. Calado crítico	169
19. El número de Froude	172
20. La curva de remanso.....	173
21. Resalto hidráulico	175
Bibliografía	179

Tema 1. Propiedades de los Fluidos

1. Estados de agregación de la materia

1.1. *El medio material continuo*

La materia está constituida por moléculas. En un gas estas moléculas están separadas por una distancia que, en ocasiones, es mayor que las propias moléculas. Incluso en los líquidos, las moléculas dejan espacios libres entre sí, por lo que la materia, estrictamente hablando, es un medio discontinuo.

Sin embargo, si analizamos el número de moléculas existente en un volumen muy pequeño de materia, veremos que se trata de un número muy grande. Dado que los problemas estudiados en ingeniería son siempre de tipo macroscópico o macromolecular, se establece la hipótesis del **modelo material continuo**, esto implica suponer que no existen los anteriormente mencionados huecos vacíos de materia, por lo que la densidad de un determinado volumen de materia puede ser obtenida por el cociente entre la masa y el volumen que ocupa, siendo constante en todo el volumen.

La hipótesis de medio material continuo como modelo matemático, lo que nos va a permitir es suponer que las propiedades de la materia se conservan aun cuando el volumen estudiado tiende a cero, pudiendo por tanto emplear el cálculo infinitesimal.

1.2. *Estados de agregación de la materia*

La materia puede presentarse en diferentes estados, los cuales quedan reducidos básicamente a tres: sólido, líquido y gas. Líquidos y gases se engloban dentro de los denominados fluidos, contrapuestos en sus propiedades a los sólidos, debido al grado de rigidez de sus enlaces moleculares.

Lógicamente no existen magnitudes absolutas por lo que no existe una rigidez nula ni una rigidez absoluta que definirían el líquido perfecto o el sólido perfecto. Así hablamos de plasticidad en sólidos o de viscosidad en fluidos para designar la participación respectiva de las propiedades del grupo opuesto.

La materia puede cambiar de estado. Para ello debe modificarse la libertad de los enlaces moleculares, lo cual lleva asociado cambios en la presión y en la temperatura. Así, los cambios que suponen aumento en la libertad de los enlaces moleculares llevan asociadas la elevación de la temperatura (endotérmicos) y la disminución de presión, y viceversa. En el siguiente esquema se puede ver los distintos cambios de estado:

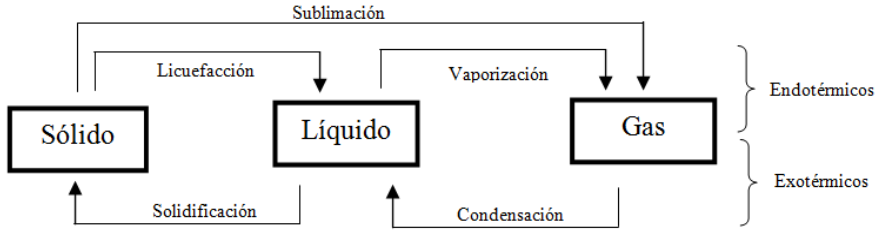


Figura 1-1. Cambios de estado.

2. Concepto de fluido

Un fluido es un medio material continuo (sustancia) que se deforma continuamente al ser sometido a un esfuerzo cortante o tangencial, cualquiera que sea su magnitud.

Sobre el fluido representado en la figura 1-2 actúa una fuerza de forma tangencial a la superficie S . El cociente entre fuerza y superficie determina el esfuerzo cortante o tangencial.

Para estudiar un fluido se toman dos placas paralelas poco separadas un espesor y , lo suficientemente grandes como para desprestigiar la influencia de los extremos, introduciendo entre ambas placas una sustancia. La placa inferior permanece fija, mientras que a la placa superior se le aplica una fuerza F . Esto es equivalente a aplicar un esfuerzo tangencial o cortante sobre la sustancia igual a F/S .

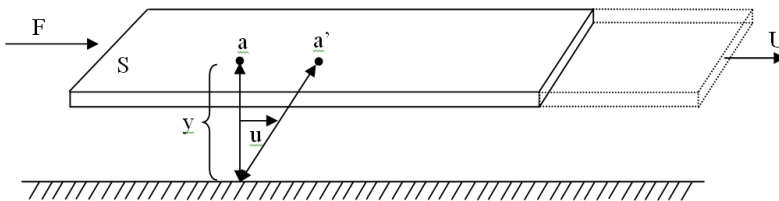


Figura 1-2. Definición de fluido.

Si la fuerza F ocasiona que la placa superior se mueva a velocidad constante U , cualquiera que sea F , la sustancia contenida entre las placas es un fluido.

Este movimiento provoca que la sustancia se deforme continuamente bajo el esfuerzo cortante pues está desprovista de rigidez. Se dice que es capaz de **fluir**, es decir, sufrir grandes variaciones de forma bajo el esfuerzo aplicado.

3. Ley de viscosidad de Newton

El fluido en contacto con la placa fija se mueve lo mismo que ésta, es decir tiene velocidad nula $\mathbf{u}=\mathbf{0}$. El fluido en contacto con la placa superior se mueve a velocidad igual a ésta, es decir a $\mathbf{u}=\mathbf{U}$. El fluido intermedio variará proporcionalmente su velocidad con la profundidad según una ley, la cual experimentalmente se demuestra que tiene la forma:

$$F = \mu \frac{S \cdot U}{y} \quad (1.1)$$

En la que vemos que F es directamente proporcional a la superficie S y a la velocidad U e inversamente proporcional al espesor de sustancia y .

Como $\tau = F / S$, entonces $F = \tau \cdot S$, se puede plantear la igualdad:

$$\tau \cdot S = \mu \frac{S U}{y} \quad (1.2)$$

$$\tau = \mu \frac{U}{y} \quad (1.3)$$

donde:

- U / y recibe el nombre de velocidad angular de deformación del fluido
- μ es el factor de proporcionalidad entre el esfuerzo aplicado y la deformación angular producida, llamado viscosidad dinámica o absoluta, que se estudiará con más detalle en este mismo tema.

En su forma diferencial, esta ley se puede escribir de esta otra forma:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.4)$$

En la que du/dy es el gradiente de velocidad interpretado como la rapidez con la que una capa de fluido se mueve con respecto a otra capa adyacente, constituyendo la denominada **Ley de Viscosidad de Newton**.

La relación vista entre esfuerzo tangencial y velocidad de deformación $\tau = \mu \frac{du}{dy}$ es una relación **lineal**. Para ello la constante de proporcionalidad, denominada viscosidad, se mantiene constante. Los fluidos que la cumplen reciben el nombre de **fluidos newtonianos**. Cuando dicha relación es **no lineal**, reciben el nombre de **no newtonianos**.

Denominamos **fluido ideal** aquel que no presenta viscosidad y por lo tanto no ofrece resistencia a deformarse. En el gráfico de la figura 1-3 supondrá el eje de ordenadas.

Los fluidos no newtonianos, es decir, aquellos que presentan una relación compleja entre tensión cortante aplicada y velocidad de deformación obtenida, se estudian en una disciplina que llamamos **Reología**.

Los fluidos **no newtonianos** o reológicos se pueden agrupar en dos grandes grupos: **independientes del tiempo**, son aquellos en los que la velocidad de deformación no está influida por el tiempo de aplicación del esfuerzo; y los **dependientes del tiempo**, en los que la velocidad de deformación sí está influida por el tiempo que dura el esfuerzo aplicado. Finalmente hay un tipo de fluido no newtoniano que no puede ser incluido en la clasificación anterior que son los fluidos visco-elásticos.

Fluidos no newtonianos independientes del tiempo

Fluidos pseudoplásticos: Son aquellos en los que la **viscosidad disminuye** a medida que **aumenta el esfuerzo** aplicado.

Fluidos dilatantes: Son aquellos en los que la **viscosidad aumenta** a medida que **aumenta el esfuerzo** aplicado.

Plásticos de Bingham o ideal: Se comportan como un sólido a bajos esfuerzos, pero una vez superado el esfuerzo inicial llamado **esfuerzo de cedencia**, se comportan como newtonianos.

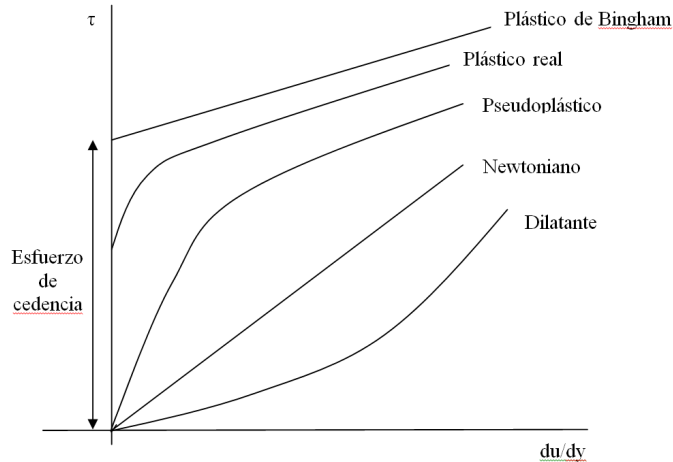


Figura 1-3. Ley Viscosidad Newton.

Fluidos no newtonianos dependientes del tiempo

Fluidos reopécticos. Son aquellos en los que la **viscosidad aumenta** a medida que **aumenta la exposición** al esfuerzo cortante.

Fluidos tixotrópicos: Son aquellos en los que la **viscosidad disminuye** a medida que **aumenta la exposición** al esfuerzo cortante.

Fluidos visco-elásticos.

Como su nombre indica, son aquellos que presentan propiedades **elásticas y viscosas**. El más simple sería aquel que desde el punto de vista de la viscosidad es **newtoniano** y desde el punto de vista de la elasticidad sigue la **Ley de Hook**. Tras aplicar un esfuerzo, la parte elástica recupera la forma, mientras que la parte viscosa quedará deformada.

4. Propiedades de los fluidos

Son aquellas magnitudes físicas cuyos valores nos definen el estado en el que se encuentra el fluido. En primer lugar deberemos diferenciar entre los dos principales tipos de fluidos: líquidos y gases. Los líquidos son poco compresibles (se consideran incompresibles siempre excepto en algunas aplicaciones relacionadas con el flujo transitorio), pueden presentar una superficie libre en

contacto con la atmósfera y ocupan un volumen determinado. Los gases presentan las propiedades opuestas a éstas.

Otra diferencia fundamental es que la viscosidad de los líquidos se debe a la **cohesión entre las partículas**, mientras que en los gases depende del **intercambio de cantidad de movimiento** entre partículas.

No menos importante es la diferencia que encontramos al estudiar la dependencia de la viscosidad con la temperatura. En los líquidos la viscosidad disminuye al aumentar la temperatura, mientras que en los gases, con la temperatura, aumenta la actividad molecular, aumenta también el intercambio de cantidad de movimiento y con éste la viscosidad.

En nuestro caso estudiaremos principalmente los líquidos, asimilados éstos a medios materiales continuos, homogéneos, deformables, constituidos por partículas líquidas infinitamente pequeñas.

Veamos algunas de las propiedades de los líquidos.

4.1. Viscosidad

Propiedad de los fluidos que representa la resistencia a deformarse ante un esfuerzo tangencial o cortante. Como se ha mencionado anteriormente, la libertad de los enlaces moleculares está asociada con la temperatura y la presión, por lo que la viscosidad depende en gran medida de la primera y en menor medida de la segunda.

La viscosidad sólo se manifiesta si hay movimiento. En reposo no existe esfuerzo cortante, por lo tanto no hay efecto de resistencia al mismo.

Su ecuación de dimensiones es $\mu = [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-1}]$

En el Sistema Internacional de Unidades (SI), la viscosidad dinámica o absoluta, o simplemente viscosidad se mide en $N \cdot s / m^2$ o lo que es lo mismo en $Pa \cdot s$ ($1 Pa = 1 N / m^2$). El $Pa \cdot s$ en Francia se ha intentado denominar al $Pa \cdot s = Poiseuille = Pl$, aunque sin demasiada aceptación fuera de allí. También en SI, es habitual encontrarnos la viscosidad en $kg / m \cdot s$, unidad a la que se llega sin más que aplicar la equivalencia $1 N = 1 kg \cdot m / s^2$.

En Sistema Cegesimal (SCGs), ya en desuso, la unidad de la viscosidad es el Poise (en honor al mismo J.M. Marie Poiseuille). El Poise tiene la siguiente equivalencia:

$$1 \text{ Poise} = 1 \text{ g} / \text{cm} \cdot \text{s}$$

Por lo que:

$$1 \text{ Pa}\cdot\text{s} = 1 \text{ kg/ m}\cdot\text{s} = 1000 \text{ g / 100 cm} \cdot \text{s} = 10 \text{ poise}$$

$$1 \text{ Poise} = 0,1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$$

El agua a 20° tiene una viscosidad de 1,005 centi poise = 1,005 mili Pa·s

El aceite de oliva a 25°C tiene una viscosidad de 81 mili Pa·s.

El mercurio a 20°C tiene una viscosidad de 1,554 mili Pa·s.

4.2. Viscosidad cinemática

Se define viscosidad cinemática a la relación entre viscosidad dinámica o absoluta y la densidad de masa.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.5)$$

Su ecuación de dimensiones es $\mu = [L^2 \cdot T^{-1}]$.

En SI sus unidades son m²/s mientras que en CGs la unidad es el Stokes (en honor a G.G. Stokes), siendo la equivalencia 1 stoke = 1 cm²/s, por lo que 1 m²/s = 10.000 stokes.

La viscosidad cinemática del agua a 20°C vale **1,01·10⁻⁶ m²/s**. Dada la importancia que presenta en Hidráulica, de cara a la resolución de problemas, el disponer de los valores correctos de la viscosidad cinemática en función de la temperatura, ésta la podremos calcular a partir de la relación siguiente:

$$\nu = \frac{1,8 \cdot 10^{-6}}{1 + 0,03620862 \cdot T + 0,00015909 \cdot T^2} (m^2 / s) \quad (1.6)$$

Donde:

- T, temperatura en °C a la cual queremos obtener la viscosidad cinemática

4.3. Peso y masa

La masa **m** nos indica la cantidad de materia que un cuerpo posee, generando una reacción inercial a cualquier fuerza aceleradora. El peso **P** representa la

fuerza de atracción que la gravedad ejerce sobre el líquido, siendo la relación entre ambos:

$$P = m \cdot g \quad (1.7)$$

Donde:

- m, masa
- g, aceleración de la gravedad = 9,80665 m/s²

4.4. Peso específico

Representa el peso por unidad de volumen, o lo que es lo mismo, la fuerza con la que la gravedad atrae cada unidad de volumen de fluido.

$$\gamma = \frac{P}{V} = \frac{m \cdot g}{V} \quad (1.8)$$

Donde:

- γ , peso específico
- V, volumen

Su ecuación de dimensiones es $\gamma = [M \cdot L^{-2} \cdot T^{-2}]$ y sus unidades son en:

- SI¹: N/m³ ó kg·m⁻²·s⁻²
- ST: Kgf/m³

¹ El SI de Unidades utiliza la masa como magnitud básica y la fuerza como magnitud derivada, mientras que el Sistema Técnico (ST) de Unidades utiliza la fuerza como magnitud básica y la masa como magnitud derivada.

En SI la unidad básica de masa es el kg y la derivada de fuerza es el N, el cual nos indica la fuerza que actuando sobre la masa de 1 kg, le comunica una aceleración de 1 m/s².

En ST la unidad básica de fuerza es el kilogramo-fuerza (Kgf), también llamada kilopondio (Kp) y se define como la fuerza de gravedad que actúa sobre 1 kg de masa. En este caso la aceleración de la gravedad g depende de la latitud y de la altitud de la localización según la relación $g=9,7803 \cdot (1+0,0053 \cdot \text{sen}^2 \text{latitud}) \cdot (1-0,0000003 \cdot \text{altitud})$, siendo el valor más empleado el que corresponde a latitud 45° y altitud del mar 0 metros de 9,80665 m/s².

La equivalencia entre ambas resulta:

- SI: 1 N = 1 Kg · 1 m/s² = 1 m·Kg/s²
- ST: 1 Kgf = 1 Kg·g m/s² = g·N \cong 9,81 N

Por lo tanto se puede establecer la aproximación 1 Kgf = 10 N.

La relación entre peso específico y densidad es $\gamma = \rho \cdot g$. El peso específico del agua a 4°C y presión atmosférica normal es $\gamma = 1000 \text{ kgf/m}^3$.

4.5. Densidad

También llamada densidad de masa, masa específica o densidad absoluta. Es la masa contenida por unidad de volumen:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.9)$$

Sustituyendo la ecuación 7 en 9:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{P}{V \cdot g} = \frac{\gamma}{g} \quad (1.10)$$

Llegando de nuevo a la relación entre densidad y peso específico $\rho = \frac{\gamma}{g}$.

Su ecuación de dimensiones es $\rho = [M \cdot L^{-3}]$ y sus unidades son en SI podemos obtenerlas del cociente anterior, utilizando las unidades de peso específico y gravedad:

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{1 \text{ Kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-2}}{1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}} = \text{Kg} / \text{m}^3 \quad (1.11)$$

4.6. Presión

Toda fuerza superficial que actúa mediante contacto directo en el interior de una masa líquida tiene, en general, una componente normal y otra tangencial a la superficie de contacto.

Llamaremos presión a la relación entre la fuerza **F** que actúa normal a una superficie, y dicha superficie **S**.

$$P = \frac{F}{S} \quad (1.12)$$

Su ecuación de dimensiones es $P = [M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}]$ y sus unidades son en:

- SI: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} = \text{Pascal (Pa)} = \text{N/m}^2$
- ST: Kgf/m^2

Como el Pa es una unidad tan pequeña se emplea habitualmente el múltiplo MegaPascal **MPa**.

La presión medida sin tener en cuenta la columna de aire que hay por encima debido a la atmósfera (presión atmosférica), la llamaremos **presión relativa**. La presión atmosférica P_o en condiciones normales y a nivel del mar (depende de la altitud, la latitud y las condiciones atmosféricas) adopta los siguientes valores:

$$P_o = 760 \text{ mmHg} = 1,033 \text{ Kg/cm}^2 = 10.336 \text{ Kg/m}^2 = 10,33 \text{ m.c.a.} = 1 \text{ atmósfera} = 1.013,2 \text{ mb}$$

El resultado de sumar a la presión relativa la presión atmosférica lo llamaremos presión absoluta:

$$P_a = P + P_o \quad (1.13)$$

La presión es habitual expresarla en forma de altura (magnitud lineal). Para ello dividimos la presión por su peso específico:

$$\frac{P}{\gamma} = h = \text{altura de presión} = \frac{\text{Kg/m}^2}{\text{Kg/m}^3} = \text{m.c.a.} \quad (1.14)$$

En hidráulica práctica se establece la equivalencia de presiones siguiente:

$$1 \text{ atmósfera técnica} = 1 \text{ Kg/cm}^2 = 10 \text{ m.c.a.}$$

4.7. Compresibilidad

Un campo específico dentro de la mecánica de fluidos que no será tratado en este curso es el estudio de los fluidos como compresibles, indispensable en áreas como la aeronáutica.

En general en Mecánica de Fluidos se considera que los líquidos son fluidos incompresibles (principalmente el agua) excepto en el análisis de transitorios hidráulicos (golpe de ariete) en el cual se hace necesario tratarlo como compresible.

El coeficiente de compresibilidad K indica la facilidad de un fluido para disminuir de volumen por efecto del incremento de presión.

$$K = -\frac{1}{V} \cdot \frac{\Delta V}{\Delta p} \quad (1.15)$$

Para seguir leyendo haga click aquí