

MECANICA DE FLUIDOS

Curso obligatorio de Licenciatura

3 controles (60%)

Ejercicios todas las semanas (15%)

Laboratorio (25%)

Temario:

Estática de Fluidos: Presión, empuje, flotación, cálculo de fuerzas sobre superficies, medición de presiones.

Cinemática de Fluidos: Campo de velocidad, representación gráfica. Puntos de vista euleriano y lagrangiano. Aceleración de una partícula fluida. Función de corriente.

Principios generales: Conservación de materia, cantidad de movimiento, energía. Sistemas y volúmenes de control.

Flujos no viscosos: ecuación de Bernoulli

Análisis básico de máquinas hidráulicas

Tensiones en flujos viscosos

Ley de viscosidad de Stokes

Ecuaciones de movimiento de un fluido

Ecuaciones de Navier-Stokes

Flujo Laminar y turbulento

Casos importantes de flujos viscosos

Análisis dimensional y Semejanza

Concepto de pérdida de carga

Fricción en tuberías y redes de tuberías.

Teoría de la Capa límite

Flujo compresible

Flujo en canales abiertos*

*Si queda tiempo

INTRODUCCIÓN

Mecánica de Fluidos: Por qué la estudiamos?

Algunos ejemplos

- Suministro de agua
- Irrigación, bombeo
- Navegación aérea y marítima
- Energía

Históricamente tuvo 2 líneas de desarrollo:

Una teórica, matemática, que consideraba fluidos ideales (sin roce)

Una práctica y empírica, que arranca desde la antigüedad

La Mecánica de Fluidos moderna combina ambas aproximaciones. Esto fue posible gracias a tres desarrollos:

Ecuaciones de Navier Stokes (sistema de ecuaciones del movimiento del fluido viscoso ca. 1850)

Teoría de la capa límite (L. Prandtl, 1904)

Otros avances:

Experimentación

Necesidades de infraestructura, industria, comercio y bélicas.

Computadores y métodos numéricos (desde 1960s en adelante)

Con estos desarrollos es posible ahora resolver problemas de complejidad cada vez mayor, y en escalas mucho mayores y menores, tales como:

Flujo supersónico

Dispersión de contaminantes en agua y aire

Flujo de sangre en arterias, venas, y en órganos artificiales

Buques super tankers de 1 millón de toneladas.

Simulación de corrientes oceánicas a escala mundial

Modelos predictivos del clima, que han alcanzado niveles de precisión aceptables en la última década.

Astronáutica (problemas de salida y regreso de objetos al espacio)

Aeronáutica

En Ingeniería mecánica las aplicaciones tradicionales son: Diseño de redes de tuberías (piping), máquinas hidráulicas, turbinas, bombas, ventiladores y

compresores. En unión con la Termodinámica y la Transferencia de Calor forman la base de lo que llamamos “Ingeniería en Termofluidos”

El estado fluido

Los sólidos, líquidos y gases se diferencian por el espaciamiento entre las moléculas y por el rango de longitud de sus movimientos.

Estos largos intuitivos son mayores en los gases, menores en los líquidos y mucho menores en los sólidos.

Las fuerzas cohesivas intermoleculares son grandes en un sólido, menores en un líquido, y mucho menores en un gas.

Esto implica que los sólidos son compactos y rígidos.

En cambio las moléculas de líquido y gas se mueven constantemente en la masa. Los gases llenan completamente sus recipientes, mientras que una masa de líquido en un recipiente toma un volumen y una superficie libre definidos.

A pesar de la movilidad y espaciamiento de las moléculas, un fluido se considera un medio continuo, sin huecos o agujeros, excepto en los gases a muy baja presión. La hipótesis de medio continuo es suficiente en la mayoría de los casos de estudio.

La base del uso de la hipótesis continua para flujo de fluidos está en la mecánica molecular, que predice:

Para aire atmosférico el recorrido libre medio de las moléculas es del orden de 6×10^{-8} m, y el tiempo medio entre colisiones es de 10^{-10} seg.

La escala de movimientos más pequeña es del orden de 10^{-4} m. Con una velocidad de 100 m/s, nos da una escala límite inferior de tiempo de 10^{-6} seg.

En consecuencia, la hipótesis continua es utilizable para aire, y con mayor razón para líquidos.

Por lo tanto, las ecuaciones continuas de continuidad, momentum y energía (que veremos en el curso) son la base adecuada para la predicción de flujos, excepto en los gases a muy baja presión.

Comportamiento de fluidos bajo esfuerzos

En los Sólidos: Por aplicación de tensión, compresión, y esfuerzos de corte, aparece primero una deformación elástica, y si los esfuerzos exceden el límite elástico, hay una deformación permanente.

Los fluidos poseen propiedades elásticas sólo bajo compresión directa.

La aplicación de un esfuerzo de corte produce una distorsión continua y permanente.

La incapacidad de los fluidos para resistir el esfuerzo de corte les da la habilidad para cambiar de forma (fluir).

Entonces, existen los esfuerzos de corte en los fluidos?

Claro que sí, en flujos de fluidos viscosos, los esfuerzos de corte determinan, por ejemplo, la fuerza de arrastre que experimenta un vehículo al avanzar

En un fluido en reposo, en cambio, no pueden existir esfuerzos de corte, y el esfuerzo de compresión (presión) es el único esfuerzo a considerar en un fluido en reposo.

Como los fluidos en reposo no pueden sostener esfuerzos de corte (y mantenerse en reposo), no existen componentes de esfuerzo tangenciales a una pared sólida, o tangentes a una sección arbitraria que pasa por el fluido.

Presión

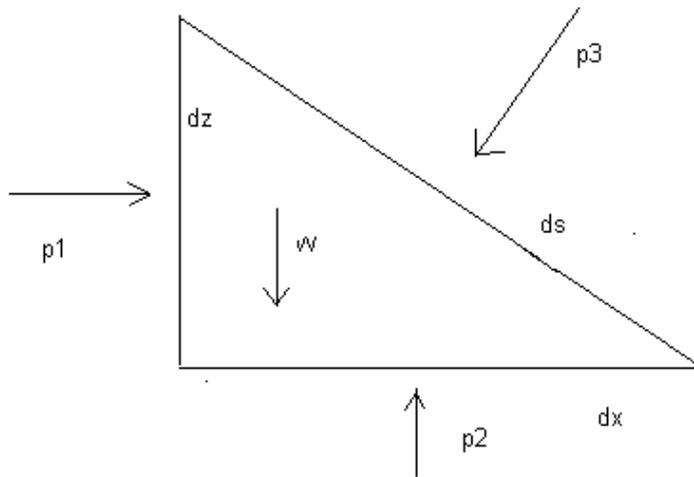
Si se considera un elemento de fluido aislado, la presión actuará hacia el interior del elemento.

Las presiones ejercidas por el fluido sobre el contenedor actúan hacia afuera, pero las reacciones actúan hacia adentro.

La presión en un punto de un fluido tiene la misma magnitud en todas direcciones.

Prueba:

Se considera un elemento de fluido de ancho unitario (normal a la figura)



P_1, p_2, p_3 son las presiones medias en las superficies respectivamente. Un balance estático de fuerzas indica:

$$\sum F_x = p_1 dz - p_3 ds \operatorname{sen} \theta = 0 \quad (1)$$

$$\sum F_y = p_2 dx - \frac{\gamma dx dz}{2} - p_3 ds \cos \theta = 0 \quad (2)$$

En el triángulo, $dz = ds \operatorname{sen} \theta$ $dx = ds \cos \theta$

Entonces: $p_1 = p_3$, $p_2 = p_3 + \gamma dz / 2$

Las tres presiones se igualan a medida que dz tiende a cero, es decir, al convertirse el triángulo en un punto.

Luego, en un punto en un fluido estático, las presiones en todas direcciones son iguales.

En consecuencia, la presión no es un vector, sino un escalar. Sin embargo, las fuerzas producidas por la presión sobre diferentes áreas son vectores normales a estas áreas.

Las presiones impuestas sobre un fluido en reposo se transmiten sin disminución a todos los puntos del fluido (Ej. Gata hidráulica)

Propiedades y unidades

Las propiedades principales son la densidad ρ , y el peso específico, γ .

Densidad o masa específica, ρ , ML^{-3} , puede expresarse en kg/m^3 , o lbm/ft^3

Peso específico, $\gamma = \rho g$, $ML^{-3} \times LT^{-2} = ML^{-2}T^{-2}$

Se expresa en Newton/m³, lbf/ft³, o en kgf/m³

Unidades de fuerza: Newton y lbf

Equivalencia: Newton = $kg \ m \ s^{-2}$

Presión:

1 N/m² = 1 Pascal. El pascal es una unidad muy pequeña. Por ejemplo, 1 bar = 10^5 Pa.

1 atmósfera normal = 1,01325 bar.

Compresibilidad y elasticidad de los fluidos

Los fluidos pueden ser comprimidos por aplicación de una presión, almacenando energía en el proceso.

Al suprimir la presión aplicada vuelven a su volumen original.

Luego, los fluidos son medios elásticos.

Como los fluidos no poseen rigidez, el módulo de elasticidad se define en base al volumen.

Nº de Mach y flujo compresible

Se tratan mayormente flujos de baja velocidad o incompresibles, en que la velocidad del fluido es mucho menor que la velocidad del sonido, y la densidad es uniforme.

En un espacio dado, los cambios de densidad de un fluido incompresible deben propagarse de manera instantánea a todo el espacio, es decir, con una velocidad infinita.

A velocidades comparables a la del sonido, las variaciones de densidad se hacen importantes y el flujo se denomina compresible.

Si se considera la compresibilidad, una perturbación en un elemento de fluido producirá cambios en los elementos adyacentes, y luego, una perturbación se propagará en el medio como una onda a una velocidad finita.

Los flujos compresibles son difíciles de obtener en líquidos, pero son muy abundantes en gases. Por eso el flujo compresible se llama frecuentemente como “dinámica de gases”.

Un flujo es incompresible cuando su número de Mach (razón entre la velocidad del flujo y la del sonido en el fluido) es pequeño:

$$Ma = \frac{V}{a} \ll 1$$

Habiendo variación considerable de densidades, las ecuaciones necesarias son:

- ❖ Continuidad
- ❖ Cantidad de movimiento
- ❖ Energía
- ❖ Estado

Que suministran soluciones para las variables p, ρ, T, V

Si en flujo incompresible es fácil enfocarse en los flujos isotérmicos, esto es imposible en los flujos compresibles. Los efectos de transferencia de calor estarán siempre presentes.

Regímenes de flujo compresible según el valor de Ma :

- ✓ $Ma < 0.3$: flujo incompresible, densidad constante
- ✓ $0.3 < Ma < 0.8$: flujo subsónico, sin ondas de choque

- ✓ $0.8 < Ma < 1.2$: flujo transónico. Aparecen ondas de choque, y regiones subsónicas.
- ✓ $1.2 < Ma < 3.0$: flujo supersónico, Ondas de choque sin regiones subsónicas
- ✓ $3.0 < Ma$: flujo hipersónico.

Además de Ma , un segundo parámetro adimensional relevante es la razón de calores específicos:

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

que tiene el valor 1.4 para el aire. Para las propiedades, se puede usar cualquier ecuación de estado. Para vapor de agua, las propiedades se extraen de la Tabla de vapor. Para líquidos, prácticamente incompresibles, se puede usar

$$\rho = cte \quad c_p - c_v = 0 \quad dh = c_p dT$$

La densidad y calor específico del agua varían levemente con la temperatura, pero la variación de la viscosidad con esta variable es considerable.

Cuando se considera que la perturbación de densidad es *pequeña*, se tiene la velocidad del sonido, a . En cambio, una perturbación grande (explosión, onda de choque) dará lugar a una onda con velocidad de propagación mucho mayor. Entonces:

$$a^2 = \frac{\partial p}{\partial \rho}$$

Esta derivada se evalúa en condiciones isentrópicas ya que el proceso es adiabático, no habiendo gradientes de temperatura para una perturbación muy pequeña. Haciendo uso de la ecuación de estado del gas perfecto:

$$a = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_s^{1/2} = \left(\frac{\gamma p}{\rho} \right)^{1/2} = (\gamma RT)^{1/2} \quad (3)$$

Ejemplos de valores de velocidad del sonido (15°C y 1 atm):

Material	a, m/s
Hidrógeno	1294
Helio	1000
Aire	340
Dióxido de Carbono	266
Agua	1490

Viscosidad y tasa de deformación

En la observación común, se dice que un fluido es “viscoso” cuando fluye lentamente, en las mismas circunstancias en que otro lo haría rápido.

En esos casos, el fluido tiene que vencer fuerzas de fricción para moverse.

Todos los fluidos reales (incluyendo gases) tienen viscosidad, y por lo tanto, todos exhiben fenómenos de fricción al moverse.

El flujo laminar, se representa como capas de fluido que deslizan unas sobre otras. Consideremos el flujo laminar cerca de una pared sólida.

Las observaciones muestran que, aunque el fluido toma una velocidad v , a cualquier distancia de la pared, la velocidad es nula en la pared misma (condición de no deslizamiento), y aumenta con la distancia a ésta. Se forma, en consecuencia, un “perfil de velocidad”, que implica movimiento relativo entre capas vecinas de fluido.

Consideremos dos capas adyacentes de espesor dy , la inferior (1) se mueve con velocidad v y la superior (2) con velocidad $(v + dv)$. Las partículas ubicadas en esas posiciones se mueven distancias vdt y $(v + dv)dt$ respectivamente en un intervalo de tiempo dt .

El fluido se va distorsionando (deformando) continuamente, lo que se visualiza en que una línea que conecta 1 y 2 adquiere mayor longitud a medida que pasa el tiempo.

En sólidos, los esfuerzos debidos a corte son proporcionales a la deformación.

En el caso del fluido la deformación sería: $(v + dv)dt - vdt = dvdt$. La deformación relativa $dvdt / dy = (dv / dy)dt$

Sin embargo, el fluido se deforma continuamente, por lo cual el esfuerzo debe relacionarse con la tasa temporal de deformación y no con la deformación total.

La tasa de deformación relativa es $\frac{dv}{dy} dt / dt = \frac{dv}{dy}$

Es decir, se expresa como un gradiente de velocidad.

Existirá una fuerza friccional o de corte (roce) entre capas de fluido, que se expresa por unidad de área (τ). En flujo laminar, τ es proporcional a la tasa de deformación relativa, es decir, al gradiente de velocidad.

$$\tau \propto \frac{dv}{dy} = \mu \frac{dv}{dy}$$

En que μ es el coeficiente de viscosidad.

Unidades: Pa.s = kg/m s; psi= lbf/ pulg²

Viscosidad del agua

T°C	Viscosidad, kg/ms
0.01	1786×10^{-6}
20	1002×10^{-6}
50	$547,8 \times 10^{-6}$
90	$315,6 \times 10^{-6}$

Viscosidad cinemática:

$$\nu = \mu / \rho$$

Las dimensiones de ν son $L^2 T^{-1}$, y sus unidades son m²/s o pie²/hr.

Unidad tradicional de viscosidad: 1 poise= 0,1 Kg/ms

También se usa el centipoise, 1 cp=10⁻² poise.

Las siguientes Tablas indican las unidades y conversiones mas usadas.

CONVECTIVE BOILING AND CONDENSATION

(d) Viscosity

$\frac{N s}{m^2}$ (Poiseuille)*	Centipoises	$\frac{lb}{s ft}$	$\frac{lb f s}{ft^2}$	$\frac{lb}{h ft}$	$\frac{kg}{h m}$
1	1,000	0.672	0.0209	2,420	3,600
0.001	1	0.000672	0.0000209	2.42	3.60
1.49	1,490	1	0.0311	3,600	5,350
47.88	47,880	32.2	1	116,000	172,000
0.0004134	0.4134	0.000278	0.00000864	1	1.49
0.000278	0.278	0.000187	0.00000581	0.672	1

* 1 Ns/m² (poiseuille) = 10 poise.

(e) Physical Quantities

Physical quantity	British units	SI	Conversion factor*	Reciprocal conversion factor*
<i>Basic engineering units:</i>				
Mass	lb	kg	0.4536	2.2045
Length	ft	m	0.3048	3.2808
Force	lbf	N	4.4482	0.2248
Energy	Btu	J	1055.06	9.4781×10^{-4}
	ft lbf	J	1.3558	0.7375
Power	550 ft lbf/s = 1 h.p.	W	745.69	1.3410×10^{-3}
<i>Heat transfer units:</i>				
ϕ	Btu/ft ² h	W/m ²	3.155	0.3169
h	Btu/ft ² h °F	W/m ² °C	5.678	0.1761
k	Btu/ft h °F	W/m °C	1.731	0.5777
c_p	Btu/lb °F	J/kg °C	4186.8	2.388×10^{-4}
ρ	lb/ft ³	kg/m ³	16.0185	0.06243
μ	lb/ft h	kg/m s, or N s/m ²	4.134×10^{-4}	2.4189×10^3
α, ϵ, D	ft ² /h	m ² /s	2.581×10^{-5}	3.8744×10^4
τ, p	lbf/ft ²	N/m ²	47.880	0.02089
τ, p	lbf/in ²	N/m ²	6.8948×10^3	1.4503×10^{-4}

* Multiply the numerical value in British units by the conversion factor to obtain the equivalent in SI; multiply the numerical value in SI by the reciprocal conversion factor to obtain the equivalent in British units.

G	$\frac{lb}{hr ft^2}$	$\frac{kg}{sec m^2}$	0.001356	737.463
h_{fg}	$\frac{BTU}{lb}$	$\frac{Kcal}{kg}$	0.55629	1.79762

La viscosidad resulta de:

-fuerzas de cohesión entre moléculas

-intercambio de cantidad de movimiento a escala molecular entre capas de fluido.

Estos efectos aparecen como fuerzas de corte o tangenciales entre capas de fluido.

-El esfuerzo de corte y la viscosidad son independientes de la presión. Por lo tanto, la fricción en fluidos es diferente de aquella entre sólidos que se mueven, en que la presión es muy importante.

-Cualquier valor de esfuerzo de corte producirá flujo.

-Un flujo en que dv/dy sea nulo tendrá esfuerzos de corte nulos, independientemente de la viscosidad, y podrá ser tratado como un flujo ideal.

Comportamiento de fluidos no newtonianos.

La figura siguiente muestra diversos comportamientos esfuerzo-deformación.

Cuando la relación de estas magnitudes es no lineal, se representan por la Ley de potencia de Ostwald-de Waele:

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

Para estos casos, la viscosidad es:

$$\mu = K \left(\frac{dv}{dy} \right)^{n-1}$$

Modelo de Viscosidad de Ostwald-de Waele

