

B) AMPLIACIÓN DE MECÁNICA DE FLUIDOS

1. INTRODUCCIÓN

De una manera muy sencilla podemos decir que un *fluido* es un estado de la materia la cual no tiene un volumen definido, 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.

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.

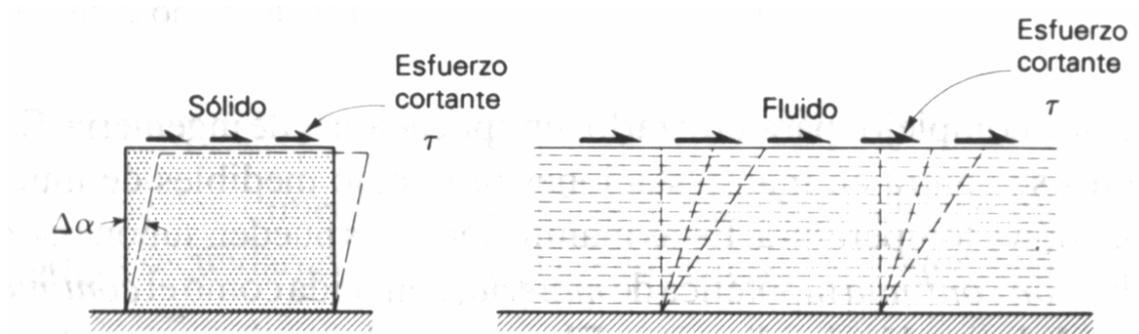
El conocer y entender los principios básicos de la mecánica de fluidos es esencial en el análisis y diseño de cualquier sistema en el cual el fluido es el elemento de trabajo. Hoy en día el diseño de virtualmente todos los medios de transporte requiere la aplicación de la mecánica de fluidos. También 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.

Los dos obstáculos principales para el tratamiento teórico de los fluidos son la geometría y la viscosidad. La teoría general del movimiento de los fluidos es demasiado difícil para permitir abordar configuraciones geométricas arbitrarias, de modo que la mayor parte de los libros de texto se concentran sobre placas planas, conductos circulares y otras geometrías sencillas. El segundo obstáculo para la teoría es la acción de la viscosidad, que puede ser despreciada solamente en algunos flujos idealizados. La viscosidad aumenta la dificultad de la ecuaciones básicas, aunque la aproximación de capa límite, hallada por Ludwig Prandtl en 1904 ha simplificado enormemente el análisis de los flujos viscosos.

a) Definición de fluido

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 de 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

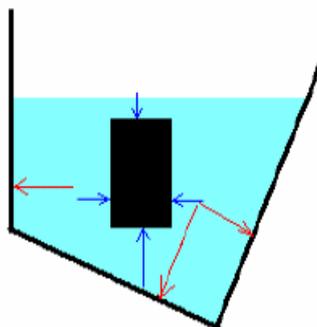
dada por la **viscosidad** que se trata más adelante, relacionada con la acción de fuerzas de rozamiento. En contraste un sólido experimenta un desplazamiento definido (o se rompe completamente) cuando se somete a una fuerza cortante. Es decir, mientras que para un sólido bajo una fuerza cortante constante 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"**.

Un fluido se considera estático si todas sus partículas permanecen en reposo 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"**.

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. 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.



b) Densidad y continuidad

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} mm³ para todos los líquidos y gases a presión atmosférica. En este caso se está tratando también al fluido como un medio continuo, suponemos la cualidad de la *continuidad* utilizada en el estudio del cuerpo sólido deformable.

No obstante, hay casos límite como gases a bajas presiones en los que el espaciado molecular y su recorrido libre medio son comparables o mayores que el tamaño del sistema. Esto obliga a abandonar la aproximación de medio continuo a favor de la teoría molecular del flujo de gases enrarecidos.

Para la descripción del movimiento de un fluido recurriremos a las leyes generales de la Mecánica junto con relaciones específicas condicionadas por la fluidez. 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. En la práctica es posible pues hacer la simplificación que hemos venido haciendo hasta ahora, suponer que todas estas manifestaciones son el resultado de la acción de una hipotética distribución continua de materia, el medio continuo.

Por otro lado, al considerar varios tipos de fluidos en condiciones estáticas, algunos presentan cambios muy pequeños en su densidad a pesar de estar sometidos a grandes presiones. En tales circunstancias, el fluido se denomina incompresible y se supone que su densidad es constante para los cálculos. Cuando la densidad no puede considerarse constante bajo condiciones estáticas como un gas el fluido se denomina compresible. Por tanto, 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 expande hasta ocupar todas las partes del recipiente que lo contenga.

No obstante, a veces la frontera entre líquidos y gases no es muy precisa. En dinámica de fluidos se habla de flujos incompresibles y compresibles en lugar de fluidos incompresibles o compresibles.

2. DINÁMICA DE FLUIDOS

Los problemas de Estática de fluidos solo requieren básicamente, conocer la densidad del fluido y la posición de la superficie, sin embargo en la mayoría de los problemas con flujos es necesario analizar un estado arbitrario de movimiento del fluido definido por la geometría, las condiciones del contorno y las leyes de la mecánica.

En un flujo dado, la solución del problema consiste en la determinación de las propiedades del fluido como funciones de la posición y el tiempo. La más importante de todas las propiedades del flujo es el campo de velocidades. De hecho, determinar la velocidad es a menudo equivalente a resolver el problema, ya que otras propiedades se obtienen directamente de la velocidad. En general, la velocidad es un vector función de la posición y del tiempo, esto es $\vec{V} = V(x, y, z, t)$. A partir de la velocidad se pueden calcular otras propiedades como la posición, la aceleración, el flujo a través de una superficie.....

Existen dos puntos de vista posibles para analizar los problemas en Mecánica, y por tanto llegar a la expresión del vector velocidad: el método de Lagrange y el método de Euler. El primer método sigue a las partículas (parte de fluido contenido en un volumen cuyas dimensiones son despreciables frente al fenómeno de estudio) en su movimiento. Esto significa que en la expresión de la velocidad $\vec{V} = V(x, y, z, t)$ las coordenadas x , y y z no permanecen fijas. Este método no será considerado en este curso. Sin embargo, los análisis numéricos de algunos flujos con límites muy marcados, como el movimientos de gotitas aisladas, se llevan a cabo mejor en coordenadas lagrangianas.

En el método de Euler se desiste de describir el movimiento del fluido mediante la historia de cada una de las partículas individuales. En su lugar se especifica el movimiento por la densidad y la velocidad de las partículas del mismo en ese punto como una función del tiempo y del espacio. Es decir, en este método se estudia un una región del espacio y como es el movimiento del fluido en esa región en función del tiempo.

Un ejemplo casero de ambas descripciones puede ser el análisis del tráfico en una autopista. Seleccionemos un cierto tramo para estudio y determinación del tráfico. Con el transcurso del tiempo varios coches entrarán y saldrán del tramo y la identidad de los mismos estará cambiando continuamente. El ingeniero de tráfico ignora la identidad de los coches y se concentra en su velocidad, medida como función de la posición del tramo y del tiempo, y también estudia el flujo o número de coches por hora que pasan por una cierta sección de la autovía. Este ingeniero realiza una descripción euleriana del tráfico. Otros investigadores, como la policía o los sociólogos, pueden estar interesados en la velocidad y trayectoria de determinados coches. Siguiendo a éstos realizan una descripción lagrangiana del tráfico.

a) Viscosidad:

Cuando se consideran los fluidos en reposo la única propiedad significativa es el peso específico del fluido. Para el estudio del movimiento de los fluidos se requieren conceptos adicionales como el de la *viscosidad*. De una manera muy simple podemos decir que la viscosidad se define como la resistencia de un líquido a fluir. Esta resistencia es provocada por las fuerzas de atracción entre las moléculas del líquido. La fuerza cortante necesaria para hacer fluir el líquido es función de esta resistencia. Los fluidos con alta viscosidad ofrecen cierta resistencia a fluir, mientras que los poco viscosos lo hacen con facilidad.

En la Dinámica de Fluidos vamos a distinguir entre *fluidos perfectos o ideales, esto es no viscosos y fluidos viscosos*. El flujo de un fluido real es mucho más complejo que el de un fluido ideal. Dependiendo de la expresión matemática que relaciona la viscosidad con las fuerzas cortantes se habla de *fluidos newtonianos y no newtonianos*. Si el fluido comienza a moverse con una velocidad inversamente proporcional a lo que se conoce como coeficiente de viscosidad μ se denomina newtoniano. Los fluidos comunes como el agua, el aceite y el aire presentan una relación lineal entre el esfuerzo aplicado y la velocidad de deformación resultante.

b) Técnicas básicas de análisis de los fluidos:

Hay tres vías posibles para abordar un problema de dinámica de fluidos:

- volumen de control o análisis integral
- partícula fluida o análisis diferencial

- estudio experimental o análisis dimensiones

En todos los casos, el flujo debe satisfacer las tres leyes de conservación de la mecánica, más una relación de estado y las condiciones iniciales y de contorno apropiadas:

- el principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad
- ecuación de movimiento del fluido o conservación de la cantidad de movimiento
- el principio de conservación de la energía: si la energía se define como la capacidad para realizar un trabajo, los fluidos en movimiento poseen energía.
- relación de estado: $\rho = \rho(p, T)$
- condiciones de contorno sobre superficies sólidas, interfases...

leyes que tendremos que adaptaremos al estudio de los fluidos.

Un volumen de control es una región finita, escogida cuidadosamente por el analista, a través de cuya frontera se permite el paso de masa, cantidad de movimiento o energía. El analista hace un balance entre las entradas y salidas y los cambios que operan en el interior del volumen del control. El método es muy poderoso pero demasiado global, ya que no tiene en cuenta los detalles del flujo.

Cuando aplicamos las leyes de conservación a un volumen infinitesimal o partícula fluida, obtenemos las ecuaciones diferenciales básicas del flujo. En un problema concreto, las ecuaciones deben ser integradas con las condiciones iniciales y de contorno adecuadas. Las soluciones analíticas exactas sólo se pueden hallar con facilidad en ciertos casos de geometrías o condiciones de contorno simples.

La ecuación de transporte de Reynolds permite cambiar de un enfoque diferencial a un enfoque integral o de volumen de control.

Un experimento bien preparado es a veces la mejor manera de analizar un problema concreto. Por ejemplo, ningún análisis teórico, ni diferencial ni integral puede predecir con suficiente fiabilidad la resistencia y la fuerza lateral que se ejerce sobre un automóvil que circula por una autopista con viento cruzado. Aunque la experimentación se puede hacer de manera real lo habitual es llevar a cabo el experimento en túneles aerodinámicos, sin embargo en este caso el viento producido en el túnel puede no ser exactamente como un viento real. El papel del ingeniero analista debe ser utilizándolas técnicas de análisis dimensional, preparar los experimentos que reproduzcan con la adecuada fidelidad los resultados que se obtendrían con el prototipo real.

Los tres métodos son aproximadamente iguales en importancia, pero el análisis con volúmenes de control está quizá por encima, siendo la herramienta aislada más valiosa de cara al análisis de los flujos. Da respuestas a veces groseras y burdas, pero siempre útiles. En principio, la descripción diferencial puede ser utilizada para cualquier problema, pero en la práctica la falta de herramientas matemáticas hace que la descripción diferencial esté muy limitada. Análogamente el análisis dimensional puede ser aplicado a cualquier problema pero la experimentación es a veces una técnica muy limitada.

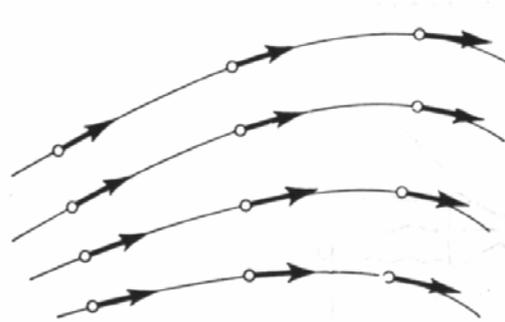
Además el método de volúmenes de control es el método más moderno de los tres. El análisis diferencial comenzó con Euler y Lagrange en el siglo XVIII y el análisis dimensional tuvo sus primeros pasos con Lord Rayleigh a finales del siglo XIX, pero el de volumen de control, aunque había sido

propuesto por Euler, no ha sido desarrollado sobre una base rigurosa como herramienta analítica hasta hace 40 años.

c) Descripción gráfica del flujo

Los problemas de Mecánica de fluidos se pueden visualizar. El flujo puede ser visualizado de muchas maneras distintas y observando las diversas representaciones gráficas posibles se pueden conocer cualitativamente y cuantitativamente aspectos del mismo. Hay cuatro formas básicas de describir un flujo.

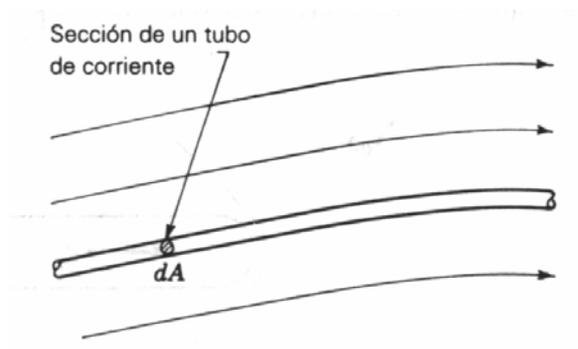
1) Las **líneas de corriente**: estas líneas se dibujan de manera que siempre sean tangentes a los vectores de velocidad de las partículas en un flujo. La línea de corriente está definida para un instante dado.



2) Una **senda** es el camino seguido realmente por una partícula fluida. Su carácter es fundamentalmente experimental.

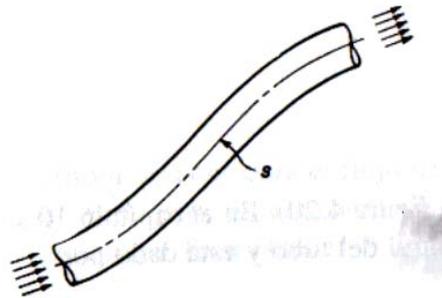
3) Una **línea de traza** es el lugar geométrico de las partículas que en instantes sucesivos pasaron por un punto dado.

La línea de corriente tiene un profundo sustrato matemático, mientras que las otras tres son más esencialmente experimentales. Una senda se describe con las posiciones ocupadas en instantes sucesivos por una partícula cargada. Es difícil producir experimentalmente las líneas de corriente en un flujo no estacionario, a menos que se marquen muchas partículas y se pueda conocer la dirección de la velocidad comparando las fotografías tomadas en instantes inmediatos. Una línea de traza se genera experimentalmente por medio de la inyección continua de partículas marcadas (tinta, humo o burbujas) desde un punto fijo.



Solo para un flujo permanente la orientación de las líneas de corriente será fija y las partículas del fluido seguirán trayectorias que coinciden con las líneas de corriente. En este caso las líneas de corriente, sendas y líneas de traza coinciden. Como la componente de la velocidad normal a la línea de corriente es nula, queda claro que no existe en ninguno de sus puntos flujo perpendicular a la línea de corriente. Las líneas de corriente que pasan por la periferia de un área infinitesimal en un tiempo t formarán un tubo, que es muy útil en el análisis de los fluidos. Este se conoce como **tubo de corriente**. Por la definición de línea de corriente no puede haber flujo a través de la superficie lateral del tubo de corriente, por lo que se puede considerar un tubo de corriente como un conducto impermeable con paredes de espesor nulo y sección transversal infinitesimal.

Por otro lado, el flujo de fluidos es complejo y no siempre puede ser estudiado de forma exacta mediante el análisis matemático. Se estudian entonces flujos simplificados siempre que el proceso hipotético que imaginemos para describir lo que sucede en el fluido en movimiento permita un tratamiento matemático que produzca resultados de valor práctico, esto es que funcionen como ya hemos indicado al introducir la hipótesis de continuidad. Por ejemplo, se habla de **flujo unidimensional** de un fluido incomprensible tiene lugar cuando el módulo, dirección y sentido de la velocidad en todos los puntos de una sección transversal del flujo son idénticos. Habitualmente, el flujo en tuberías se puede analizar mediante los principios del flujo unidimensional cuando la sección transversal de las mismas es pequeña:



Un flujo bidimensional se distingue por la condición de que todas las propiedades y características del flujo son funciones de dos coordenadas cartesianas, por ejemplo x, y y el tiempo; por consiguiente no cambian a lo largo de la dirección z en un instante dado.

Otra serie de definiciones para el estudio analítico del movimiento de un fluido, a algunas de las cuales ya nos hemos referido, son las siguientes:

Un **flujo permanente (estacionario)** tiene lugar cuando en un punto cualquiera la velocidad de las sucesivas partículas que ocupan ese punto en los sucesivos instantes es la misma. Es decir, las propiedades y características en cada punto del espacio permanecen invariables en el tiempo. Esto no quiere decir que la velocidad sea la misma en dos puntos distintos, sino sólo que en un mismo punto no deben variar con el tiempo. Por ejemplo, el transporte de líquidos bajo condiciones de altura constante es un ejemplo de flujo permanente. Un **flujo uniforme** tiene lugar cuando el módulo, la dirección y el sentido de la velocidad no varían de un punto a otro del fluido.

Un flujo dependiente del tiempo se denomina *flujo no permanente (no estacionario)*. La complejidad de los flujos no permanentes hace que su estudio caiga fuera del propósito de una introducción a la Mecánica de Fluidos.

Se dice que el *flujo es compresible* si la densidad en el mismo varía como por ejemplo en los gases, mientras que se dice que un *flujo es incompresible* cuando la densidad apenas varía como es el caso de la mayoría de los líquidos.