

HIDRODINÁMICA

Clase de Ramiro Mege para
Magíster Náutico y Marítimo

29 Abril 2011
Apunte: Jean Araya

PROTOTIPOS Y MODELOS

Nosotros hemos visto algunas ecuaciones que se usan en la mecánica de los fluidos, es decir, eso corresponde a un método netamente analítico, pero resulta que estas ecuaciones no permitan resolver todas las situaciones que se presentan y si llegaran a serlo serían muy difíciles de manejar, entonces la mecánica de los fluidos y la transferencia de calor y en otras gamas de la ingeniería se usa la experimentación en forma paralela, en forma complementaria, entonces hay una dificultad a veces en estos procedimientos experimentales una es realizar todos los ensayos de su experiencia toda la información que uno tenga trasladarla para poderla manejar, yo digo que frecuentemente no es posible que económica y técnicamente realizar los ensayos de los objetos que uno quiere, se está planificando un puerto y lo ideal sería ensayar con el puerto, pero resulta algo honeroso, lo mismo si es una embarcación, no se puede construir la embarcación tratar de ensayarla y después descartarla porque no funciona bien ¿qué es lo que se hace? Se hacen modelos, vale decir, una copia lo más fiel posible de lo que queremos estudiar y normalmente a tamaño reducido, entonces vamos a llamar prototipo al objeto con sus dimensiones físicas y que nosotros queremos diseñar y modelos a este elemento a escalas normalmente reducidas, porque podrían ser también elementos muy pequeños mucho más difíciles de poder estudiar y que hay que agrandarlos para poder estudiar, ahí pasa lo contrario. Tenemos estos dos elementos prototipos y modelos, una copia fiel debe cumplir dos requisitos, el primer requisito es la similitud geométrica:

todas las longitudes se deben reducir o amplificar en la misma proporción si al subir dice P se refiere al prototipo y el M modelo, las longitudes X, Y, y Z deben entre el modelo y prototipo están relacionadas de la siguiente manera:

$$\frac{X_P}{X_m} = \lambda \quad \frac{Y_P}{Y_m} = \lambda \quad \frac{Z_P}{Z_m} = \lambda$$

Lo mismo con las otras dimensiones con la dimensión Z, lo hemos puesto así para indicar que todo el traspaso de dimensiones tiene que ser tridimensional en todas las direcciones, entonces “ λ es lo que llamamos la escala”, relación de la dimensión del prototipo con respecto al modelo. Si fuera una superficie quiere decir que es el producto de 2 longitudes:

$$\frac{X_P Y_P}{X_m Y_m} = \lambda^2$$

Y similarmente si fuera un volumen tendría que ser la relación de:

$$\lambda^3$$

Porque todas las dimensiones van cambiando las tres simultáneamente en la misma proporción, pero esto nos genera una similitud simplemente geométrica, Uds. están acostumbrados a hacerlo todos estos planos están a escala, una maqueta también está a escala, pero se deben cumplir dos requisitos este es el primero y el segundo es la

similitud dinámica, no nos basta con la similitud geométrica para que haya una correspondencia en sus comportamientos cuando yo hago simplemente la escala tengo una figura que es semejante a la otra a tamaño reductor, pero eso no significa que se comporta de la misma manera y nosotros lo podemos ver en la maqueta. La maqueta normalmente es una representación a escala que puede llegar a ser muy fiel del edificio que se quiere construir, pero si uno lo somete a una fuerza se comporta totalmente distinto que el edificio tiene similitud geométrica, pero no dinámica de hecho una maqueta uno la toma la, traslada, la sube, la baja, la inclina eso uno no lo puede hacer con un edificio se te cae al primer movimiento, entonces ahí hay una diferencia. Tenemos que buscar si queremos una relación completa entre modelo y prototipo, buscar la similitud geométrica y la similitud dinámica, generalmente cuando uno habla de similitud dinámica se entiende que cumple con la similitud geométrica ¿qué significa esto? Que debe producirse además de esta similitud una relación fija entre fuerza, esfuerzo, velocidades, aceleraciones, las distintas variables que pueden estar interviniendo. Yo siempre coloco el ejemplo de una columna hecha con plastilina, si yo pongo un trozo de plastilina y lo cargo con esto no lo soporta perfectamente bien ese es el problema. Ahora voy a hacer una columna de plastilina la voy a amplificar 200 veces y el peso se lo voy a aumentar 200 veces y se lo voy a poner encima ¿qué me va a pasar? Hago la columna de plastilina y probablemente no soporte ni siquiera su propio peso ¿por qué? Porque no hay una similitud dinámica, entonces ¿cómo voy a buscar esta similitud dinámica? ¿Cómo voy a buscar esta relación entre fuerza, fuerza-velocidad, aceleración, etc.? Todo lo que pueda hacer ahí vamos a ampliar uno o varios parámetros de dimensiones que se agrupan en las variables que intervienen en fenómenos que nosotros estamos distribuyendo, luego usamos el número de Reynolds

$$R_d = \frac{VD\rho}{\mu}$$

V = velocidad
D = diámetro interior
ρ = densidad
μ = viscosidad dinámica

y dijimos que todos los fluidos que tuvieran un mismo número de Reynolds se comportaban de la misma manera, es flujo laminar si es menos de 2.000 y turbulenta si es mayor de 4.000. ¿Usamos otro parámetro dimensional?, si la rugosidad relativa:

$$\frac{e}{d}$$

Longitud dividido por longitud no tiene dimensión, y esos valores ¿dónde los usamos? En el diagrama de Moody para buscar el factor de fricción, que a su vez ese factor de fricción es adimensional, por ende no solamente existen esos tres parámetros adimensionales sino que podrían existir infinitos parámetros adimensionales, hay algunos que nos interesan en mecánicas de los fluidos, otros que nos interesan para la transferencia del calor principalmente en esas dos áreas se usan muchísimo. ¿Qué gracia tienen estos parámetros adimensionales?

Que generalizar, hacen las cosas independiente de sus dimensiones, por eso decíamos si tienen un número de Reynolds menor de 2.000 el flujo es laminar en tanto en un tubo pequeño como en una cañería o un ducto grande, tanto en ductos de sección circular como de sección cuadrada o en un canal, esas es la importancia que tienen estos parámetros de adimensional, por otra parte los procedimientos experimentales en un proceso experimental donde intervienen varias variables hay que hacer ensayo y ensayo en distintas condiciones para ver cómo influye cada uno de los elementos, entonces los ensayos hechos lógicamente significa que mi elemento yo lo ensayo de una manera y después dentro de los parámetros que yo pueda modificar, modifico uno y ensayo de nuevo y ahí puedo ver qué efecto tiene ese 1. Si yo modificara más de uno, no sé cuál de los dos me produce los cambios que observo y entonces voy a ir modificando cada uno de ellos, pero no me bastas con modificarlos una sola vez, sino que tengo que del mismo parámetro modificarlo varias veces, ojalá muchas veces para tener una estadística de una buena representación, entonces aquí yo les pongo un ejemplo porque se producen ciertas dificultades:

Voy a suponer que tengo seis variables en un cierto fenómeno y cada una de ellas las hago variar 10 veces, vale decir voy a tener 10 puntos [que es una cantidad bastante modesta], así que también el resultado que va a salir va a ser modesto, entonces varío:

la variable 1 la cambio 10 veces

la variable 2 la cambio 10 veces

Pero cada una de las 10 variables 2 tengo que también probarla con cada una de las variables 1,

Así que me pasé del número de ensayos hasta el momento desde 10^2 , vale decir, de 100, entonces son 6 variables de número de ensayos que debo hacer para esas 10 variables tomando 10 por cada uno serían 1.000.000 de ensayos.

Uno es hacer los ensayos, pero tenemos que generar fluidos que manteniendo su densidad tenga distintas viscosidades o a la inversa que no es fácil ¿cómo le modifico la viscosidad del agua sin modificarle la densidad? Ahí tendríamos que empezar a hacer mezcla de líquidos, se nos complicaría mucho la cosa, la otra dificultad es hacer ese 1.000.000 de ensayos, después que tenga la información procesar toda la información, descubrir en toda esa información las leyes que la rigen, así son dificultades enormes ¿cómo vamos a resolver este problema? Se pueden utilizar los parámetros adimensionales y con eso podemos reducir el número de ensayos y las dificultades en encontrar tantos fluidos distintos, si tomamos el caso de las 6 variables y con esas 6 variables poder formar tres parámetros adimensionales, eso es lo más probable que sean tres, podrían incluso ser dos, por eso supongamos que son 3, entonces los ensayos se reducen a 1.000, todavía es una cifra bastante considerable, pero cambió bastante ¿qué sucede además?

Que muchas veces estos parámetros adimensionales ya están decididos, eso se ha estudiado antes, se sabe cómo influye, entonces en otro fenómeno yo tengo:

las variables velocidad

una longitud para la características que es el diámetro,

la densidad y

la viscosidad

Elijo de inmediato un parámetro adimensional como el número de Reynolds porque ya lo conozco, entonces no tengo que hacer los ensayos que corresponden al número de Reynolds si estuvieran ahí los 1.000 me bajan los ensayos a 100.

Si está también la rugosidad relativa también la elijo, entonces me quedan los ensayos reducidos a 10 veces. Entonces cuando uno genera parámetros adimensionales para estudiar un fenómeno trata de descubrir todos los que son conocidos para no tenerlos que re-estudiar, porque ya ha alguien se dio el trabajo de hacerlo, y con eso alcanzamos a los ensayos son posibles de efectuar en un tiempo prudente y con alguna facilidad, porque si yo quiero obtener un número de Reynolds de 2.000, tengo muy distintas combinaciones, puedo trabajar con agua y y densidad y viscosidad los dejo constante, pero varía la velocidad o varía el diámetro y con esos dos juego para encontrar el número de Reynolds de 2.000, no es como el caso anterior que tenía que buscar 10 líquidos que tuvieran la misma densidad y distinta viscosidad, o 10 líquidos que tuvieran misma viscosidad y distinta densidad como puedo juzgar ahí con esos 4 factores, me es más fácil poder variar a gusto el número de Reynolds.

Lo mismo pasa con cualquier otro parámetro adimensional de muy fácil variable.

En resumen para establecer la similitud geométrica se emplea siempre un parámetro adimensional que es la relación de longitud entre prototipo y número de Reynolds que llamamos la escala λ . Ahora para establecer la similitud dinámica se emplea también parámetros adicionales que en forma lo llamamos π , Que también se usa la misma denominación para resolver la problemática que impone la experimentación, lo vamos a llamar π , el número de Reynolds es uno de estos parámetros π , pero a veces les ponen un nombre especial, hay varios que ya tienen nombre.

Veamos entonces cómo vamos a determinar estos parámetros adimensionales.

Yo podría decir: tengo un fenómeno que quiero estudiar, tomemos el caso de la fricción que es algo que ya hemos conocido y yo sé que en la fricción influye en la velocidad, la longitud, el diámetro del ducto, su rugosidad, la densidad del fluido, la viscosidad del fluido ¿pero qué hago con la variable? ¿Cómo busco los parámetros adimensionales que la rige? Entonces para eso hacemos el análisis dimensional, las dimensiones de las magnitudes físicas las podemos dividir en:

las divisiones básicas y las derivadas.

Las básicas son solamente 7, cualquier cosa física está relacionada con algunas de estas 7 dimensiones básicas ¿cuáles son?

La longitud, [L]
La masa o la fuerza, [M] ó [F]
Tiempo [T]

Esas tres son las que más nos interesan a nosotros, una cuarta que podría interesarnos es:

la temperatura [q]
la tensión y [V]
corriente [I]
la luminosidad [C] Candela.

Estas siete, nosotros las combinamos para formar cualquier magnitud física.

Por ejemplo,

La velocidad es la longitud partido por el tiempo, vale decir $\frac{L}{T}$

La presión es fuerza partido por área,

$$\text{Dim } p = \frac{F}{A} = \frac{ML}{T^2L^2} = \frac{M}{T^2L} = ML^{-1}T^{-2}$$

Nosotros en general podemos dividir las variables en variables geométricas,

- longitudes
- diámetro
- rugosidad
- áreas
- momento de inercia

cinemáticas

- velocidades lineales, angulares, rotacionales

dinámicas

-Propiedades del fluido

- densidad
- peso específico
- viscosidad
- tensión superficial

-De comportamiento

- Variación de presión
- Potencia
- Torque
- Resistencia
- Energía por unidad de masa

Entonces yo las variables puedo pensar que las clasifico de esta manera y frente a un fenómeno yo voy a empezar a revisar este listado y a ver cuáles tengo, y cuáles no tengo, o cuáles creo yo que intervienen en ese proceso.

Yo voy a pensar en un proceso en que quiero ver la pérdida de carga en mi fluido ¿qué cree que interviene?

1. De las geométricas: la longitud de la tubería, mientras más larga más pérdida de carga tengo ¿y el diámetro? También el diámetro es importante porque cuando tengo un tubo muy pequeño la resistencia es muy grande, pero si el tubo es de mayor diámetro, es menor ¿cuánto? No sé, pero esa es la impresión que yo tengo ¿y la rugosidad? Bueno no es lo mismo una tubería lisa que una tubería rugosa, por ejemplo ahí tengo la longitud, el diámetro y la rugosidad son tres variables geométricas

2. De las cinemática: Solamente la velocidad del fluido ¿y por qué? y ¿el caudal me interesa? El caudal está formado por la velocidad y por el área del ducto así que ya está involucrado indirectamente ¿aceleraciones? No aceleraciones no tengo porque voy a considerar que el flujo es permanente, es decir, no cambia en el tiempo.

Entonces ahí tengo mis variables geométricas, después las variables cinemáticas que es la velocidad y después

3. Propiedades del fluido ¿qué propiedades? Siempre está presente la densidad, casi siempre está presente la viscosidad en este caso en este caso la tensión superficial y no es importante en la pérdida

4. De comportamiento: Variación de presión por potencia, torque, resistencia en unidad de energía por masa

H-pérdida [Hp] (que es lo que deberíamos buscar), se podría decir que es la variable principal H-pérdida [Hp] ¿cuánta energía se perdió? Entonces tengo 7 variables, si yo aplicara el método de experimental, tendría que hacer 10.000.000 de ensayos, entonces teniendo clara esta lista o esta manera de poder seleccionar variables me ayuda mucho porque es una guía, podríamos no tenerla y llegar a lo mismo, pero así es más ordenado.

Ahora, ¿qué vamos a hacer con esto? ¿Cómo vamos a llegar a determinar los parámetros a dimensionales que se pueden hacer con estas variables? Y aquí está este teorema π de Buckingham.

Voy a seguir con este ejemplo. Voy a ordenar mis variables. Voy a decir

	L	M	T	OBSERVACIONES
Hp	2	0	-2	Como es la incógnita no se repite
μ	-1	1	-1	No se repite porque basta que figure un solo parámetro
ρ	-3	1	0	Variable repetible
V	1	0	-1	Variable repetible
D	1	0	0	Variable repetible
L	1	0	0	No se repite porque ya está en D
E	1	0	0	No se repite porque ya está en D

$$L = L^1 M^0 T^0 \quad V = \frac{L}{T} = L^1 T^{-1} \quad \rho = \frac{M}{V} = \frac{M}{L^3} \quad \mu = \frac{\tau}{\frac{\partial v}{\partial y}} = \frac{FTL}{AL} = \frac{MLTL}{T^2L^2L} = \frac{M}{TL}$$

$$Hp = \frac{L^2}{T^2}$$

Yo tengo que determinar cuántos parámetros a dimensionales yo puedo tener con estas 7 variables. Voy a usar el camino simple, que funciona casi siempre, puede fallar, pero no es muy frecuente ¿Cómo lo voy a hacer?

El número de parámetros adimensionales que se pueden formar son: el número de variables menos el número de dimensiones básicas empleadas ¿qué significa esto?

Que el número de parámetros es igual a

$$7 - 3 = 4$$

Tengo 7 variables y 4 parámetros para generar con estas 7 variables ¿puedo más? No ¿Puedo menos? No debo. Tengo que formar los 4. Este es un número que no admite cambios ¿cómo voy a hacer esos parámetros? Yo diría que serían parámetros π . Voy a

tomar uno que se va a llamar π_1 , después un π_2 , después un π_3 y un π_4 . Para esos 4 parámetros adimensionales tengo que elegir de esta lista de variables, variables que se repitan.

Yo les voy a ir dando una idea de cómo se seleccionan, por ejemplo las variables que yo usé, pero yo les dije algo, tenemos la velocidad, el diámetro, la densidad y la viscosidad ¿quién estará metido ahí? Reynolds, entonces está la velocidad, el diámetro, la densidad, la viscosidad (esas 4) y tengo que decir tres de estos para repetir ¿cuáles de estos voy a repetir?

$$\pi_1 = D^x V^y \rho^z H \rho^1$$

$$\pi_2 = D^u V^1 \rho^v \mu^w$$

$$\pi_3 = D^r V^s \rho^t L^1$$

$$\pi_4 = D^a V^b \rho^c e^1$$

¿Qué hacemos ahora? Buscar cuanto vale X,Y y Z y todas las demás, ¿Cómo se hace eso? Es bien simple es netamente mecánica, voy a tomar el primero

$$\pi_1 = D^x V^y \rho^z H \rho^1$$

Según el cuadrante de dimensión de cada variable determinamos, transformamos cada uno

$$\pi_1 = (L^x) (L^y T^{-y}) (L^{-z} M^z) (L^2 T^{-2}) = M^u L^v T^w$$

$$\begin{array}{rcccccccc} L: & x & + & y & - & z & + & 2 & = & 0 \\ M: & & & & & z & & & = & 0 \\ T: & & & -y & & & & -2 & = & 0 \end{array}$$

$$X=0 \quad y=-2 \quad z=0$$

$$\pi_1 = H \rho V^{-2}$$

Con el segundo hago lo mismo ¿qué me va a resultar?

$$\pi_2 = \frac{VD\rho}{\mu}$$

En π_3 me va a dar:

$$\pi_3 = \frac{L}{D}$$

En π_4 me va a dar:

$$\pi_4 = \frac{e}{D}$$

$$H_p = \pi_1 V^2 \Leftrightarrow \pi_1 = H_p V^{-2}$$

Entonces,

$$H_p = \pi_1 V^2 (\pi_2, \pi_3, \pi_4)$$

el H pérdida acá es P1 por V², función y todo esto otro. Si queremos le ponemos la función prima para que no se diga.... Y eso tiene algo que ver con lo que nosotros habíamos visto de pérdida de carga. Claro, porque nosotros decíamos que la pérdida de carga era:

$$H_p = f' \frac{L}{D} \frac{V^2}{2}$$

F, yo lo saco del Gráfico de Moody, en que tengo el número de Reynolds y tengo la rugosidad relativa:

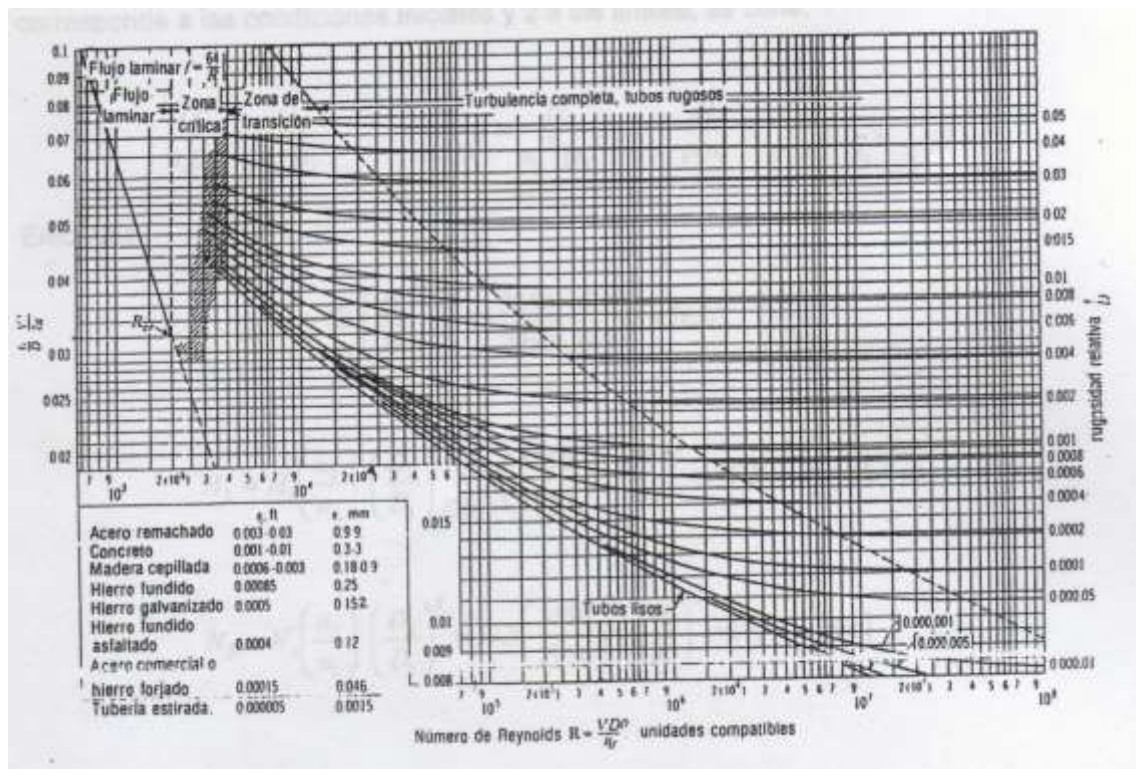


GRÁFICO DE MOODY

Entonces, cómo opera esto. Una vez que ya tengo esta expresión hago ensayo. Este Señor Moody se dio la tremenda pega para hacer los ensayos con respecto al número de Reynolds, de rugosidades relativas y al valor de F. Vale decir, en la fórmula

$$H_p = f' \frac{L}{D} \frac{V^2}{2}$$

En f , está involucrado π^2 y π^4 , a través del elemento gráfico en Moody, que se estuvo experimentando. ¿Dónde nos va a llevar esto?, A que se podrá aplicar en los modelos que se están haciendo, o que se van a hacer o se van a ensayar. Porque ahí vamos a tener que traspasar la información, y para poder traspasar esa información tenemos que tener parámetros adimensionales.

“Aclaración” ¿Por qué $\frac{V^2}{2}$?

Esto es porque es representativo de la Energía Cinética, entonces generalmente cuando está V^2 , como tiene que ver con la Energía Cinética se le agrega el 2, y entonces todos los elementos quedan naturalmente condicionados al 2. Pero eso es, podría haber sido sin el 2 y nos daría otros valores de f , en buenas cuentas nos daría un $\frac{f}{2}$, pero el autor de este asunto quiso dejar claro que es la Energía Cinética la que está involucrada en la pérdida y muchas veces sale así, entonces, hay otros parámetros adicionales que los europeos usan de una manera, y los norteamericanos de otra, ¿y qué pasa?, que unos le ponen el 2 y los otros no, entonces un valor sale el doble del otro, pero siguen siendo adimensionales, porque ese 2, los números son adimensionales, el 2 es 2, no tiene dimensión de nada. Entonces con eso se quiere señalar que ahí está involucrada la Energía Cinética.

ARRASTRE Y SUSTENTACIÓN

En el aspecto de sustentación siempre pensamos en los aviones, pero está presente en muchas otras situaciones a las que ustedes les va a tocar analizar. En su proyecto va a estar la sustentación, vista desde otra posición.

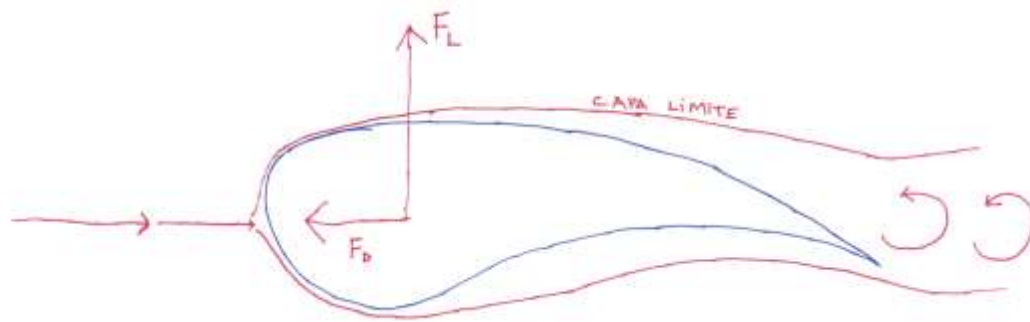
Bueno, el arrastre es un efecto, (en realidad los dos), tanto el arrastre como sustentación tienen que ver con cómo se distribuye un líquido alrededor de un cuerpo, y cómo esa distribución genera distintas presiones que producen estos dos efectos. Esto tiene mucho que ver con la forma y posición del objeto, del objeto sumergido.

El arrastre se define como una fuerza paralela al flujo y que se opone al movimiento.

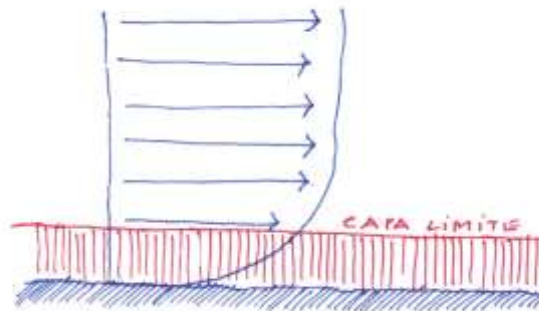
Y la sustentación es una fuerza perpendicular al flujo. Esto que sea perpendicular no quiere decir que sea para arriba, puede ser para abajo, puede ser para el lado. En una hélice de un barco se produce sustentación. Y eso es parte de lo que es el impulso. Si no hubiera sustentación en la hélice del barco, el barco no se mueve.

Ahora, ¿qué diferencia tiene? El arrastre es inevitable. Podremos reducirla, pero jamás eliminarla. En cambio la sustentación, puede existir o no.

Cuando yo tengo un cuerpo, supongamos un perfil alar, y el fluido viene en la dirección de la figura, el fluido llega al centro frontal tomando contacto con el cuerpo y se divide. Se divide y forma una pequeña zona alterada que crece. Nosotros lo llamamos estela, y por debajo del perfil alar en la misma dirección también, forma vórtices, al final. Esto origina arrastre y sustentación. El perfil alar genera una fuerza vertical con respecto al plano y una resistencia horizontal. La vertical es la fuerza de sustentación F_L , y la horizontal es la de arrastre F_D . La zona que se forma como estela y están dibujada en rojo, esas líneas de flujo se llaman la capa límite.

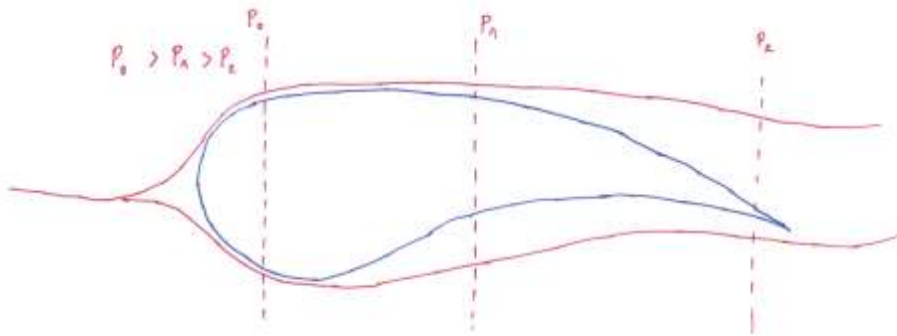


Nosotros ya habíamos visto que si tenemos una superficie, el fluido tenía un gradiente de velocidad. Un gradiente de velocidad, entonces la capa límite es una zona, en la parte inferior en que la velocidad es muy baja. La capa límite esta en la región en la que la velocidad es muy baja. La capa límite que es la zona donde se está produciendo la gradiente de velocidad.. Toda la región inferior, donde hay gradiente y velocidad. En el centro prácticamente no hay gradiente velocidad. En la zona cercana al objeto, debido a que el fluido se frena por el contacto con el objeto.

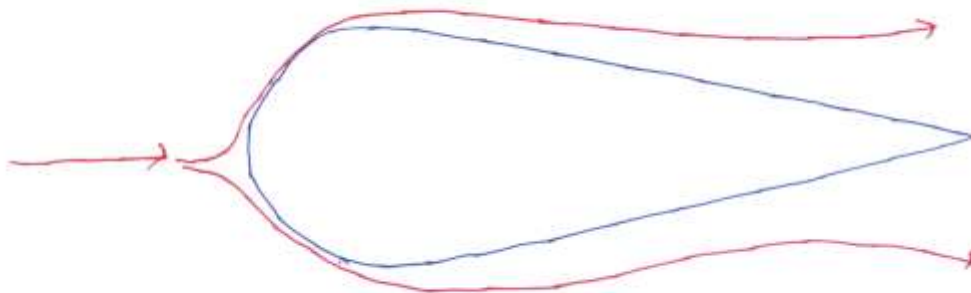


Ahora, esta capa límite, en el caso de la parte superior del perfil alar es muy delgada al principio, pero esa va creciendo, porque al principio se frenan unas pocas moléculas del fluido, pero al frenarse esa, empiezan a frenar a las vecinas, y entonces el efecto de frenado va creciendo hacia afuera. Y qué sucede. Podríamos decir que tenemos una primera zona, en que la presión se llama presión 0. Esta presión 0 es mayor que la presión cuando la estela avanza. Si es mayor, es lo normal, que en un flujo la presión vaya disminuyendo. Y por qué disminuye la presión. Porque al ir creciendo el cuerpo disminuye la sección de paso. Se disminuye la sección de paso, el fluido se acelera. Si el fluido se acelera, ¿de dónde saca energía? De la presión. Pero al avanzar y esto se empieza a disminuir la sección, así que si yo tuviera aquí otro punto, la presión 2, esta presión 2 va a ser mayor que la presión 1 y eso se llama una presión adversa. Adversa, porque no es lo normal que ocurra. Y esa presión adversa hace que moléculas, o partes del fluido aquí se me empiece a devolver desde la zona de mayor presión a la zona de menor presión. Y se produce en algún punto, se produce lo que se llama la separación de la capa límite. Vale decir donde el fluido se mueve en dirección contraria al flujo principal. Nosotros ¿lo hemos visto? Sí, probablemente lo han visto muchas veces en ríos o en las piedras ahí a la orilla del mar, cuando se forman contracorrientes y si no, hay una contracorriente. Ah, la contracorriente es por la separación de la capa límite, entonces se genera una diferencial de presiones adversas que impulsa parte del líquido en sentido contrario. Y a veces en los ríos ocurre que quedan hojas o palos

moviéndose en círculos detrás de una piedra o algo así, con un recodo, y no salen, nos cuesta mucho que salgan en la separación de la capa límite.



Entonces, esta separación de la capa límite trae como consecuencia que se produzca ser distinta la parte superior que la inferior, hace que se produzcan diferentes presiones. En la forma anterior hay presiones mayores abajo y menores arriba.



Ahora, si yo tomara un perfil simétrico, y lo pongo justo en la dirección del flujo, ¿se va a producir la separación de la capa límite? Sí. Eso es inevitable. Se me produce una estela, pero una estela simétrica, y siendo simétrica, las presiones abajo son iguales a las de arriba, y entonces en ese caso, la sustentación es 0. Sólo qué me queda. Me queda la fuerza de arrastre. Sólo me queda F_D . Y esta fuerza, a qué se debe. Por una parte, al roce del fluido con este objeto, y por otra parte, a la diferencial de presiones que hay atrás con respecto de adelante. Y eso ¿lo puedo evitar? No porque el arrastre es inevitable. Yo puedo buscar, cuando uno dice “vamos a hablar de una forma aerodinámica”. Qué significa eso. Que le voy a dar una forma para que el arrastre sea mínimo. En un bus, en una embarcación se le da casco de una forma tal que el arrastre sea mínimo. ¿Cómo podríamos mejorar esto? Tiene que ver con La rugosidad, porque si tiene que ver con el roce tiene que ver con la rugosidad. Mientras más pulido mejor. Tiene que ver con la forma del cuerpo. Esperemos la forma más apropiada. Para eso se usan los túneles de viento, los hidráulicos, hidrodinámicos. Para buscar las formas más apropiadas, sobre todo que es una cosa que cambia en función del número de Reynolds. El arrastre, por ejemplo, la fuerza de arrastre es:

$$F_D = C_D \Lambda \rho \frac{V^2}{2}$$

C_D es el coeficiente del arrastre, que depende de la forma, posición, rugosidad, del objeto sumergido, y depende del número de Reynolds. A veces pasa algo así, (lo voy a exponer acá arriba). Si yo lo graficara como Reynolds, C_D es adimensional. El número de Reynolds es adimensional, así que yo podría tomar, por ejemplo, una esfera, un disco, y no importa que tamaño tenga. Lo importante es qué número de Reynolds tiene.

En la primera parte podemos haber tenido un flujo laminar, y ahora pasamos a un flujo turbulento. Cuando tenemos un flujo turbulento, el flujo principal de afuera quiere decir que tiene una velocidad muy alta, entonces evita que se separe ampliamente la zona, porque las moléculas que tiene las tiende a arrastrar, las que están en la zona límite. Que cuando la velocidad desvaría con la del flujo principal en un 1% (es ahí donde está el borde de la capa límite que toma valores de ese tipo).

Entonces, el arrastre no es evitable, solamente es bueno buscar la forma más adecuada para disminuirlo o aumentarlo. Porque un avión cuando quiere aterrizar, quiere frenar, entonces ¿qué hace? Aumenta el arrastre. La sustentación:

$$F_L = C_L \Lambda \rho \frac{V^2}{2}$$

Así que mientras el avión va volando rápido, tiene muy buena sustentación, pero cuando va a aterrizar y disminuye la velocidad, en realidad el aterrizar indica que el avión se empieza a caer, así la fuerza de sustentación es menor que el peso del avión, entonces empieza a caer. La cosa es que esa caída sea controlada, entonces por un lado saca los "flaps" para frenar, los elementos aerodinámicos de frenado, pero aumenta las superficies del área, y con eso empiezan a suplir la disminución de velocidad. Hay todo un juego ahí para mantener el equilibrio y lograr un aterrizaje suave.

El arrastre y la sustentación. Y como decía, no sólo tienen que ver con los aviones, sino que con cualquier turbo-máquina, como una hélice. Se está produciendo una división perpendicular al flujo y eso puede considerarse como positivo en el caso de una hélice de un barco. Tenemos la hélice, que está girando. Es decir, si bien se está moviendo, también el flujo en esta dirección, pero la hélice gira mucho más rápidamente. Por lo tanto, su velocidad con respecto al líquido es perpendicular al eje, por lo tanto la fuerza de sustentación es en dirección del eje y eso genera el empuje que mueve a la embarcación.

Entonces, arrastre y sustentación. A ver, podemos ver ahora esa figura.

+++++++FOTO DE PERFIL ALAR DE LA NASA

Aquí, es un perfil que fue la precursora de la NASA, y arriba está el túnel hidrodinámico con distintos ángulos. Tiene número de Reynolds de 300.000, y parte con un ángulo de 0 al principio, en la cual se ve una pequeña línea que le atraviesa. Se ha coloreado el agua ahí. Y se ven unas líneas superficiales, pero se ve que se va separando. Si a ese mismo perfil yo ahora le doy un pequeño ángulo. El segundo es 3

grados, el fenómeno éste se produce también. Y se va produciendo y a medida que aumenta el ángulo se va produciendo más adelante. En el último de abajo casi no se nota, porque la difusión de la tinta parte prácticamente en la parte más adelantada. Y eso indica cómo la capa límite va cambiando por la inclinación que tiene el perfil alar.

+++++++FOTO DE CAVITACIÓN+++++++

La cavitación es la formación de burbujas de vapor. Se pueden producir presiones muy pequeñas, como en el primer caso, se tiene un número de Reynolds de un millón, o sea una muy alta velocidad y si bien está con cero grados en la primera y que se ve la línea verde que va bien continua hacia allá, sin embargo toda las burbujas que se ven ahí, no es aire, es el vapor que se genera. porque baja la presión a tal nivel en esa zona que se evapora parte de ella y se forman esas burbujas. Naturalmente cuando el ángulo se incrementa, el efecto de la zona de separación y las bajas presiones aumenta y se corre hacia adelante. Entonces ahí tenemos una situación donde hay un cierto grado de cavitación.

Esto es interesante visualmente, pero la cavitación en general es un elemento muy dañino, porque produce efectos físicos sobre la pieza porque se generan estas burbujas, pero al instante también se colapsan, porque hay cambios de presión tan bruscos que se generan por una baja presión pero suben a una zona de alta presión y se colapsan. Y el agua, a la presión atmosférica, cuando se evapora, aumenta su volumen 1.600 veces, así que tenemos una burbuja de cierto tamaño que cuando se desaparece, al cerrarse el líquido en el espacio vacío que deja, el agua golpea y genera las altas presiones, y esa alta presión que es muy localizada como la punta de un alfiler se mete por los intersticios de los poros del metal y comienzan verdaderas explosiones, y empieza a erosionar muy fuertemente el objeto, las hélices, por ejemplo, los bunkers son muy proclives a cavitación. En general, las máquinas axiales, como las hélices, son muy proclives a cavitación.

Bueno, y uno podría decir “bueno, lo estropeé un poco, lo cambiamos”, pero además pierde las características del empuje, la hélice, entonces no sólo les afecta físicamente en su constitución, sino que también en su operación. En las bombas, por ejemplo, que tienen una succión muy elevada, también se puede producir esta cavitación, o que trabajan con líquidos calientes, en que es fácil que se evapore el líquido, o el líquido muy volátil es como gasolina, se puede producir esta cavitación.

Hay algunos diseños de instalación de bombeos, y puede saber que va a cavitación, entonces podría tomar algunas medidas que disminuyan el efecto, y una de esas es introducir un poco el aire, porque el aire hace de amortiguador.

¿Medidas de mitigación para la cavitación? Generalmente en el caso de las bombas, cada bomba tiene su huella digital con respecto a la cavitación, entonces uno tiene que ponerlas a una distancia adecuada con respecto al líquido que está aspirando. Hay algunas bombas, como las de pozos profundos, que las características tienen que estar sumergidas, no pueden estar aspirando sobre el agua. Tienen que estar sumergidas a una cierta cantidad de metros para que no caviten. Y cuando son otros tipos de objetos en que se produce el fenómeno, uno podría buscar algunas otras soluciones, pero habría que ver el caso. Muchas veces generando un giro del flujo, éste hace que al girarse generan fuerzas centrífugas que lo tiran contra las paredes de un ducto. Entonces las posibilidades de cavitación son nulas, porque en la cavitación se puede

producir tanto en un álabe, una hélice, en una bomba, como también en la misma tubería. A veces la tubería tiene en una unión, un resalto, entonces el líquido al pasar, y a veces puede ser una rayadura, como un alfiler, no necesita más. Al pasar se genera baja presión, entonces se empieza a cavitación toda esa zona.

En las turbinas hidráulicas de las centrales hidroeléctricas, hay algunas que son muy propensas a la cavitación.

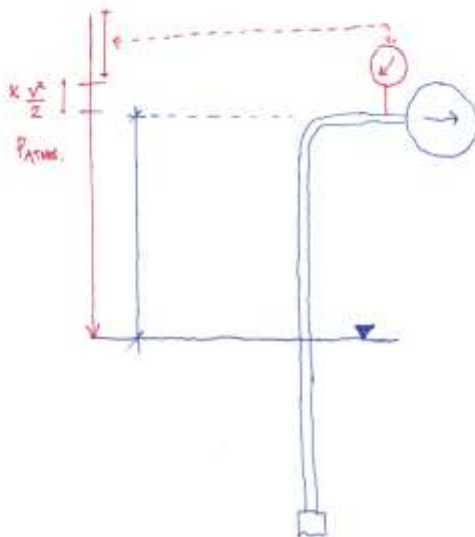
Por ejemplo, cavita esa central chiquitita Carén, por la que pasa el agua del Mapocho, por la cuesta barriga y después baja a Curacaví. Esa tenía problemas de cavitación.

¿Alguna consulta?

- Eso de la cavitación, se produce una baja muy brusca de presión, y esto ¿ocurre principalmente por velocidades muy altas, que baja más la presión?

Puede ayudar las velocidades, pero depende...

- De la velocidad y el ángulo, ¿o no? Si



Sí. Si yo tengo, por ejemplo, el caso de una bomba, yo tengo la bomba instalada sobre el pozo al cual esta aspirando. Otra cosa, es que depende también de la velocidad, ¿y por qué de la velocidad?, porque la velocidad tiene que ver con las pérdidas. Entonces, yo sobre el nivel del líquido, tengo actuando la presión atmosférica. La presión atmosférica, ésta es la que impulsa el agua hacia la bomba, la bomba crea una condición para que haga el trabajo la presión atmosférica, entonces yo gasto ya una parte de la presión atmosférica en elevar el. Gasto otra parte en vencer la resistencia.

Esto es, podría decir un $K \frac{v^2}{2}$. Aquí influye la velocidad. Y entonces, lo que queda, viene a ser la presión que tengo antes de la bomba, eso que queda. Pero cuándo se me va a producir cavitación. Cuando esta última presión es tan baja que el agua se me empieza a evaporar. Y dónde se me evapora. En la boca de la bomba que es la zona de más baja presión, y en los bordes de los alabes que es donde más baja agua, baja más la presión.

- Pero, en un caso, por ejemplo, de que un buque horizontal, donde no hay cambio de altura por presión...

Sería por velocidad. Lo que está mostrando ahí es la velocidad, exclusivamente.

- Y por ejemplo, si hay mayor velocidad, aumenta el número de Reynolds, entonces ¿es más posible que la cavitación ocurra en flujo turbulento?

Correcto. Porque mientras más velocidad es mayor el número de Reynolds. Y por eso ahí teníamos el primero que era como a 300.000, número de Reynolds, y el otro era un millón.

Entonces uno cuando diseña, se preocupa mucho de la característica de la bomba. Generalmente uno hace: (a la presión atmosférica, le resta $K \frac{v^2}{2}$ y le resta un término que es la presión de vapor, del líquido), y nos queda un pedacito que se llama columna neta de succión positiva disponible (CNSPD). Y la bomba tiene una característica que es la columna neta de succión positiva requerida. Vale decir, cuánto debe valer CNSPD para que la bomba no cavite, entonces uno siempre lo que busca es que la disponible sea la búsqueda requerida. Cuando son iguales, en realidad la cavitación está en puerto. Si se hace menor, cavita. Ahora, a veces una bomba puede cavitarse aunque se de esta condición. Por algo ajeno a la bomba por ejemplo, si le trasmite alguna vibración, entonces la vibración genera o incuba la formación burbujas y cavitación, que se suelte un perno, o está mal alineada con el motor, puede generar cavitación, aunque se de la condición óptima.

- ¿Y por qué al introducirle aire baja la cavitación?

Bajan los efectos de la cavitación.

- Los efectos, ¿pero la cavitación se produce igual?

Se produce, porque el aire sirve de amortiguador.

- O sea, va a separar un poco las moléculas del agua.

Sí. Como esto se genera una alta presión que es capaz de romper altas presiones, (que el manómetro de no indica nada). Son muy puntuales, pero el aire en interior logra amortiguar esos golpes de presión y, por lo tanto, lo hace más efectivo, entonces no se destruye tan fácilmente...

- Es que estaba pensando en las motos de agua, pienso en la velocidad que se inyecta el agua, el jet, es brutal, los motores jet de agua...

Sí, pero esa parte de la aspiración que está adelante, ahí tendrías que tener la zona de más baja presión, a pesar de que la misma velocidad te ayuda a que entre el agua, y después tienes un tubo venturi para que salga el chorro a la máxima velocidad posible.

- Pero esa agua tiene que venir con mucho aire por todos los remolinos que hay debajo...

El ideal ahí, cuando en todos estos jet, es que la velocidad del chorro de salida sea el doble, o las condiciones óptimas es que sea alrededor del doble de la velocidad de succión del aparato que está moviendo. En el caso de un avión, si el avión va a 900 km/hr, el chorro está saliendo a 1800.

- Para mejorar el CNSPD ¿qué profundidad es la adecuada de succión?

Bueno, uno podría decir, siempre menos de 7 metros. Ojalá menos de 6. Colóquenla siempre lo más cerca del agua posible. A veces es tanto, que el pozo es de tipo artesanal y grande. Por ejemplo, yo me acuerdo que en la CCU de Limache que era un pozo que tenía un diámetro como esta pieza. La bomba estaba sobre una balsa flotando, entonces más cerca del agua no podía estar.

- O poner bombas en profundidad...

Bueno lo otro, las bombas de pozo profundo son bombas mixtas, que se llaman, pero son muy propensas a cavitarse, entonces esas tienen que estar adecuadamente sumergidas, además no es un poco, tienen que estar bien sumergidas. No basta que

estén sumergidas un poco, sino que tienen que estar bien sumergidas, porque teóricamente el valor de la presión atmosférica es 10,33 mts,. Entonces algunas de esas bombas de pozo profundo son columnas de succión positiva requerida de más de 10 mts, es decir tienen que estar sumergidas, pero muy bien sumergidas. 10,33mts es un valor propio de cada bomba como las huellas digitales.