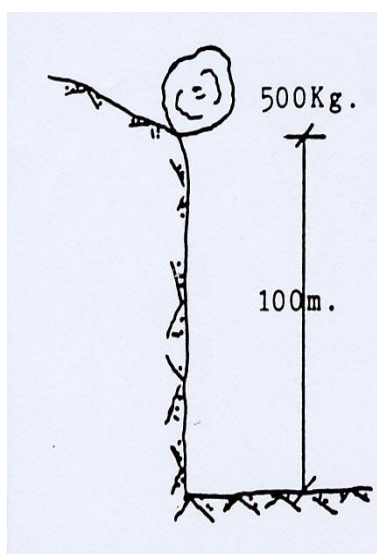


TEMA 2. CÁLCULO APLICADO A LAS OBRAS E INSTALACIONES HIDRÁULICAS.

1.- PRINCIPIO DE CONSERVACIÓN DE LA ENERGÍA

El principio de “Conservación de la Energía” dice que “La energía ni se crea ni se destruye, únicamente se transforma”.

Para aclarar este principio realizaremos un experimento:



Consideremos la piedra de la figura y calculemos su energía potencial cuando está al borde del precipicio, y su energía cinética al llegar al fondo. Comprobaremos que ambas energías son iguales.

Energía Potencial: $E_p = m \cdot g \cdot h$

$$\begin{aligned} m &= 500 \text{ kg,} \\ g &= 9,8 \text{ m/s}^2 \\ h &= 100 \text{ m.} \end{aligned}$$

$$E_p = 500 \cdot 9,8 \cdot 100 = 490.000 \text{ Julios}$$

Energía Cinética: $E_c = \frac{1}{2} m v^2$

$$\begin{aligned} m &= 500 \text{ Kg.} \\ v &= (2 g h)^{1/2} = (2 \cdot 9,8 \cdot 100)^{1/2} = 44,27 \text{ m/s.} \end{aligned}$$

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot 500 \cdot 44,27^2 = 490.000 \text{ Julios.}$$

Figura Nº 1: Ejemplo de transformación de la energía

2.- PRINCIPIO DE ARQUÍMEDES

Arquímedes, sabio griego que vivió en el siglo III antes de Cristo, fue el primero en medir el empuje que los líquidos ejercen sobre los sólidos sumergidos en ellos, con la consiguiente pérdida aparente de peso, enunciando el principio que lleva su nombre: “Todo cuerpo sólido introducido en un líquido, total o parcialmente, experimenta un empuje vertical hacia arriba, igual al peso del líquido desalojado por el cuerpo”.

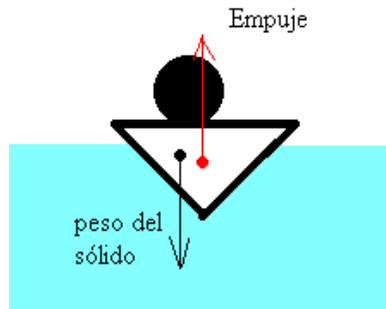


Figura Nº 2: Aplicación del Principio de Arquímedes.

3.- EFECTO JOULE O EFECTO TÉRMICO

Una de las principales aplicaciones de la energía eléctrica proviene de su posibilidad de transformación en calor. Esta conversión, conocida por efecto Joule, se explica como el resultado de los choques que experimentan las cargas eléctricas del cuerpo por la que circula la corriente, que elevan así su temperatura.

Sabemos por la Ley de Ohm $V = R \times I \Rightarrow$ luego $P = R \times I \times I = R \times I^2$

$I = V / R \Rightarrow$ luego también podemos poner que $P = V \times V / R = V^2 / R$

Tenemos tres formas de calcular la potencia eléctrica:

$$P = V \times I$$

$$P = R \times I^2$$

$$P = V^2 / R$$

Evidentemente, la energía E será:

$$E = V \times I \times t$$

$$E = R \times I^2 \times t$$

$$E = (V^2 / R) \times t$$

Cuando la energía eléctrica se manifiesta en forma de calor, suele expresarse en CALORIAS. El número de calorías es fácil de calcular sabiendo que:

1 julio = 0,24 calorías (llamado equivalente calorífico del trabajo) o bien:

1 caloria = 4,18 julios (llamado equivalente mecánico del calor)

Podemos decir que el calor desarrollado por una corriente eléctrica (Ley de Joule) será:

$$C \text{ (calor)} = 0,24 \times R \times I^2 \times t \text{ (calorías)}$$

- I es la intensidad de la corriente que circula y se mide en amperios;
- R es la resistencia eléctrica del conductor y se mide en ohmios;
- t es la tiempo el cual se mide en segundos.

4.- PRINCIPIOS DE LA HIDRÁULICA

Parte de la física que estudia el equilibrio y movimiento de los fluidos.

Se divide en dos disciplinas: Hidrostática e Hidrodinámica.

- **Hidrostática:** Ciencia que estudia el comportamiento de los líquidos en reposo.
- **Hidrodinámica:** Ciencia que estudia el comportamiento de los líquidos en movimiento

5.- PRESIÓN HIDROSTÁTICA

El concepto de presión hidrostática nace intuitivamente al considerar que el agua que hay en el fondo de un recipiente está soportando sobre sí el peso del agua que tiene encima.

Llamamos presión hidrostática a la presión que se ejerce en un punto cualquiera de un líquido debido al propio peso de éste.

Supongamos un depósito con agua y una zona horizontal situada en el interior del mismo, la superficie de la zona la llamamos S y la profundidad h.

La presión será igual al peso del volumen de agua sobre el punto considerado dividido por su superficie $P = \frac{S h \gamma}{S} = h \gamma$

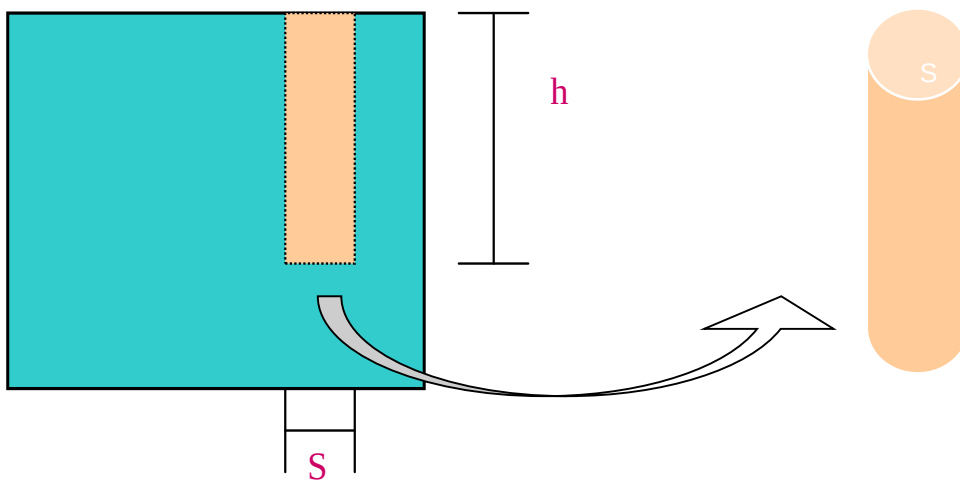


Figura N°3: Determinación de la presión hidrostática en un cilindro de base S y altura h.

Como se observa en la fórmula, la presión hidrostática es independiente del valor de la superficie S considerada. El valor de la presión es el producto de la profundidad vertical del agua por el peso específico de la misma.

Teniendo en cuenta que el peso específico es la unidad (1kg/dm^3 o 1tn/m^3) la presión en un punto viene representada numéricamente por el mismo valor que la altura de agua. Esta altura se suele representar en **metros de columna de agua (m.c.a.)**

Si se quiere representar en unidades propias de presión, hay que tener en cuenta:

$$P (\text{kg} / \text{cm}^2) = \frac{h (\text{m})}{10} \quad \text{Esto quiere decir que 50 m.c.a. corresponden a 5 kp/cm}^2.$$

Si utilizamos las unidades del Sistema Internacional, la presión vendrá dada en Newton/ m^2 (N/m^2) que se denomina “Pascal” (Pa), o sus múltiplos “kilopascal” (kPa) que equivale a mil pascals o “megapascal” (Mpa) que equivale a un millón de pascals.

Sin embargo todavía seguimos utilizando otras unidades de presión que no pertenecen al Sistema Internacional, como el kilopondio por centímetro cuadrado (kp/cm^2) o la atmósfera técnica (at) que corresponde a la presión ejercida por una columna de agua de 10 metros de altura: $1 \text{ at} = 98.066,5 \text{ Pa}$.

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kp/cm}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2 = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Pascales}$$

Para afianzar este concepto se propone calcular la presión hidrostática en el fondo de un embalse en el que la altura del agua es 90 metros, si la densidad del agua es 1.000 kg/m^3 y la aceleración de la gravedad es $9,8 \text{ m/s}^2$ (Nótese que todas las unidades son del sistema internacional).

$$P = h \cdot d \cdot g = 90 \text{ m} \cdot 1.000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 = 882.000 \text{ Pascales}$$

Ahora pasaremos de Pascales a “ kp/cm^2 ” o “at”

$$882.000 \text{ Pascales} = 882.000 / 9,8 \cdot 10^4 \text{ at} = 9 \text{ at} = 9 \text{ kp/cm}^2.$$

Nótese estas dos cuestiones muy importantes:

- a) Si se trata de agua, cada 10 m de altura ocasionan una presión de una atmósfera técnica o 1 kp/cm^2 .

- b) La presión de un líquido únicamente depende de la altura, y por tanto la presión en el fondo de un tubo fino de 90 m. de alto será la misma que en el embalse del ejercicio anterior.

6.- PRINCIPIO DE PASCAL

Blaise Pascal, físico francés (1623-1662), enunció un importante principio de la hidrostática. Si se ejerce una presión cualquiera en la superficie de un líquido en equilibrio, esta presión se transmite íntegramente en todos los sentidos, es decir a todas las moléculas del líquido. Es consecuencia de la isotropía y la ausencia de cohesión de los líquidos

Se puede decir entonces que la presión en los líquidos que hemos calculado anteriormente $P = h \gamma$, no sólo lo soporta una superficie horizontal, sino todas las paredes del recipiente, aunque éstas sean verticales.

¿Dónde piensas que habrá más presión en el fondo del embalse o en una pequeña tubería de abastecimiento que sale de la presa?

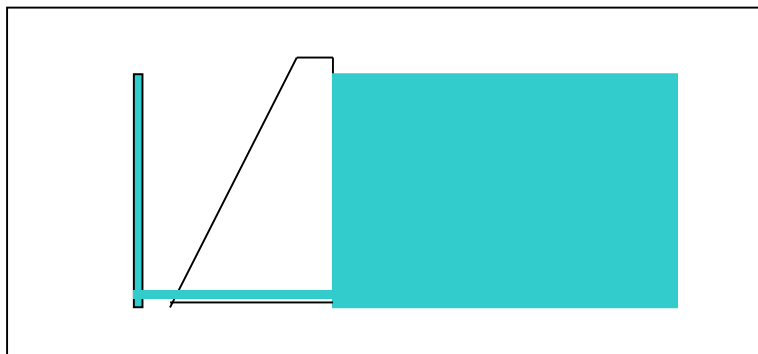


Figura N°4: Determinación de la presión en el fondo de una presa y en la base de una tubería de igual altura.

La presión que los líquidos ejercen sobre una pared plana o curva es siempre perpendicular a ella.

Los principios físicos que permiten explicar el funcionamiento de un circuito hidráulico son los siguientes principios hidráulicos:

- a) Un líquido puede asumir cualquier forma y puede ser bidireccional sin que esto afecte el movimiento libre del flujo.
- b) Cuando un fluido dentro de un contenedor es sometido a presión, la presión se transmite igualmente en todas direcciones y a todas las caras del contenedor. Éste es el principio que se usa para entender el ariete en un cilindro hidráulico.

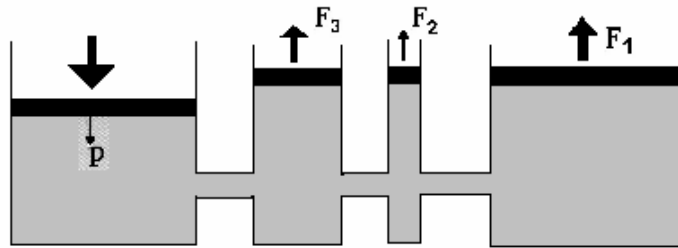


Figura Nº 5: Principio hidráulico

$$P = F / s \quad F_3 = p \times S_3 \quad F_2 = p \times S_2 \quad F_1 = p \times S_1$$

$$p = F / S = F_1 / S_1 = F_2 / S_2 = F_3 / S_3$$

7.- PRENSA HIDRÁULICA

Aplicando el principio de Pascal y debido a que la presión en un fluido es la misma en todos sus puntos, podemos aplicar una fuerza F_1 a un pequeño émbolo de área S_1 , y compensar una fuerza mucho mayor F_2 en el émbolo de área S_2 .

$$P = \frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$

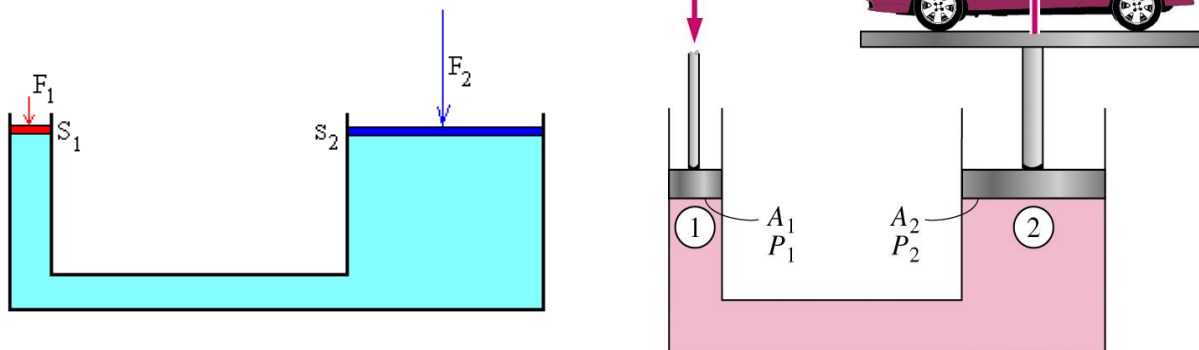


Figura Nº 6: Esquema representativo de las fuerzas aplicables a una prensa hidráulica

Este principio es el que se aplica en un taller para elevar nuestro coche.

El fluido más comúnmente utilizado es un aceite hidráulico derivado del petróleo y que debido a su cualidad lubricante alarga la vida de las piezas en rozamiento del sistema.

Estos aceites deben tener las características básicas siguientes:

- Una viscosidad no muy alta y modificada poco con la temperatura
- Elevada resistencia a la formación de espuma.

- Elevada estabilidad con el tiempo.
- No deben ser agresivos a los materiales de goma, como mangueras y empaquetaduras.

Mientras más capacidad lubricante, mejor

8.- PRISMA DE EMPUJES

El empuje de un líquido sobre una superficie origina un prisma de empujes, cuyo valor de

fuerza total es: $E = \frac{1}{2} H H b = \frac{1}{2} H^2 b$, siendo H la altura y b la anchura

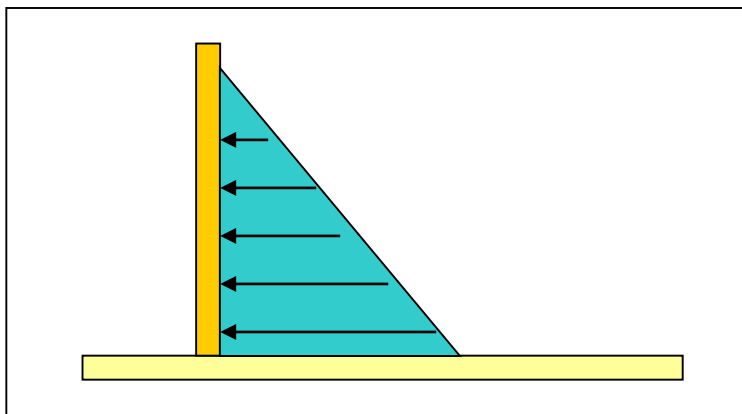


Figura N°7: Prisma de empuje triangular sobre una compuerta vertical

Necesitamos conocer el centro de aplicación de la resultante del prisma de presiones, que está situado en su centro de gravedad y en el caso que nos ocupa de prisma triangular, estará situado en la vertical de la compuerta a una altura $H/3$ sobre el fondo.

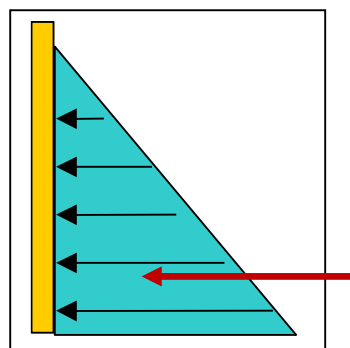


Figura N°8: Centro de aplicación de la resultante del prisma de empuje hidráulico triangular.

9.- HIDRODINÁMICA

Ciencia que estudia el comportamiento de los líquidos en movimiento

Clasificación de una corriente de agua

a) Atendiendo al grado de turbulencia

Laminar: corrientes casi perfectas en las que las partículas del líquido recorren trayectorias rectas y paralelas entre sí. Son propias de velocidades muy bajas y rara vez se presenta en ingeniería por lo que tiene poca importancia.

Turbulenta: corrientes con movimiento desigual de cada partícula. Las moléculas chocan entre sí y contra las paredes rebotando y perdiendo energía. Son propias de velocidades altas.



Figura N° 9: Régimen laminar a la entrada del aliviadero de una presa (izquierda) y turbulento en el cuenco amortiguador (derecha).

El paso de corriente laminar a turbulenta lo marca el *número de Reynolds*

$$R = \frac{VL}{\nu} \quad \text{donde } V = \text{velocidad } L = \text{longitud y } \nu = \text{viscosidad cinemática}$$

b) Atendiendo al régimen

Permanente: las características hidráulicas del flujo (caudal) permanecen constantes en un intervalo de tiempo. Puede ser a su vez:

Permanente Uniforme: Si las condiciones del movimiento son las mismas en todas las secciones de la corriente. Ej. Un canal con caudal constante cuya sección y pendiente no varían.

Permanente Variado: Si las condiciones de la corriente cambian de una sección a otra. Ej. un canal con caudal constante en el que cambia la pendiente y la sección

Variable: las características hidráulicas del flujo (caudal) varían en un intervalo de tiempo. Ej. Un canal vacío al principio y al abrir la compuerta se va llenando

10.- ECUACIÓN DE CONTINUIDAD DE BERNOULLI

La incompresibilidad de los líquidos obliga en régimen permanente, a que el caudal que entra por el origen sea el mismo que sale por el final del conducto. Toda la masa de agua que atraviesa la sección S_1 , está obligada a pasar por la sección S_2 , pasado un intervalo de tiempo. $Q = v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$ lo denominamos ecuación de continuidad.

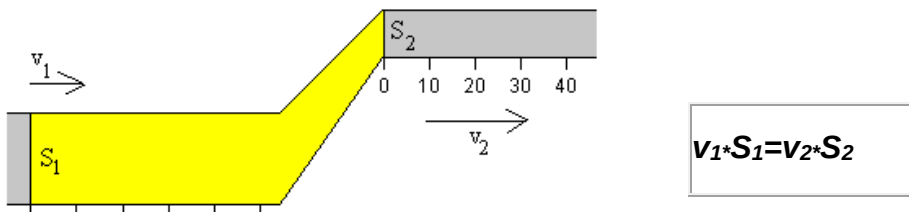


Figura Nº 10: Ecuación de Continuidad de Bernoulli.

En la figura, el radio del primer tramo de la tubería es el doble que la del segundo tramo, luego la velocidad del fluido en el segundo tramo es cuatro veces mayor que en el primero porque la sección es circular.

11.- TEOREMA DE BERNOULLI

La energía de una corriente de agua en régimen permanente, se compone de los siguientes sumandos.

$$z + \frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + \sum h_B = H_B$$

- Energía potencial z = cota geométrica del punto en m.
- Energía de presión.- Presión/Peso específico
- Energía cinética.- o altura representativa de la velocidad en m
- Pérdidas de carga existentes entre el punto inicial y el punto que estamos considerando

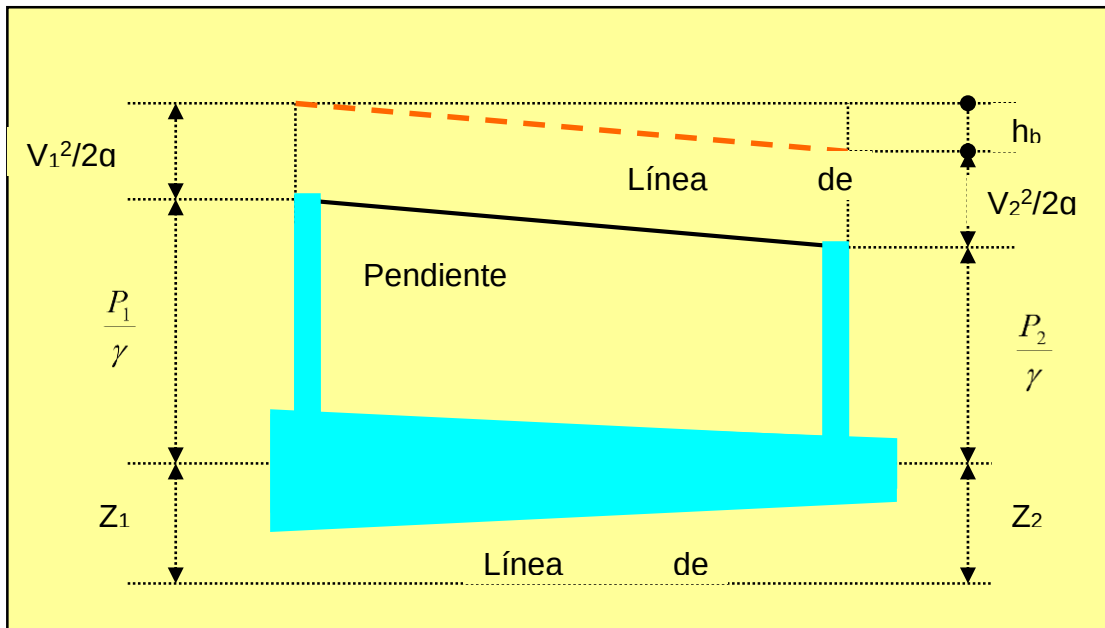


Figura Nº 11: Teorema de Bernoulli y determinación de la energía de una corriente de agua.

12- CONCEPTOS DE HIDRÁULICA

Sección hidráulica:

Es el área de una sección perpendicular al movimiento de la corriente que está mojada por la lámina líquida.

No se considera el área total de una tubería o canal a menos que estén llenos de agua.

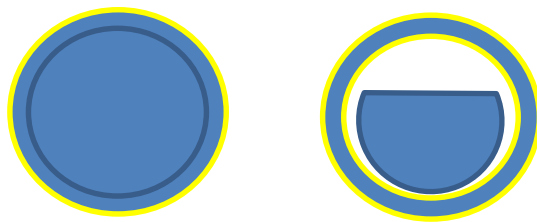


Figura Nº 12 Sección hidráulica completa y media sección de una tubería.

Perímetro mojado:

Perímetro que moja el agua. En una tubería a sección completa será πD

Radio hidráulico (R):

Es el cociente entre la sección hidráulica y el perímetro mojado.

En el caso particular de una tubería circular a sección completa, será:

$$R_H = \frac{S}{P} = \frac{\frac{\pi * D^2}{4}}{\pi * D} = \frac{D}{4} = \frac{r}{2}$$

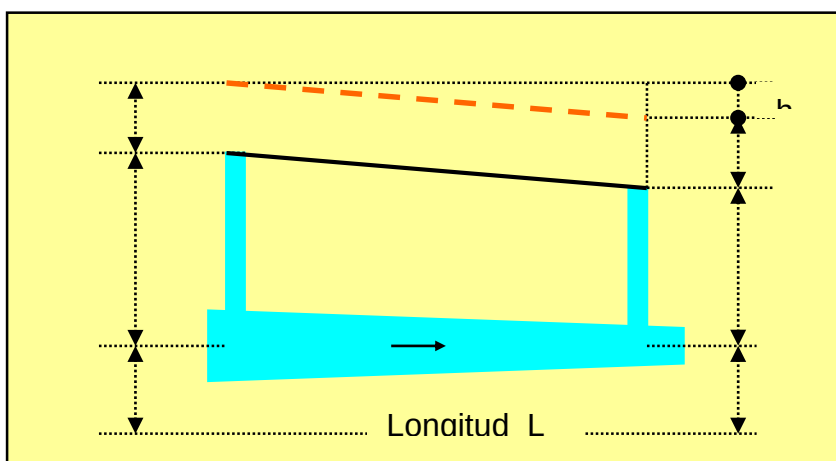
Por lo tanto el Radio hidráulico (R) es la mitad del radio geométrico, este es un concepto muy utilizado en hidráulica.

Pérdida de carga unitaria (J):

Dentro de una conducción existe un desnivel entre el punto inicial y el final, que representa la energía gravitacional que impulsa el agua por el interior del tubo. Dicha energía se necesita para compensar las pérdidas por rozamiento que el movimiento produce.

Cuanto mayor sea la velocidad, mayores serán las pérdidas.

Este desnivel total dividido por la longitud total de la conducción, se define como Pérdida de carga unitaria (J):



$$J = \frac{h_B}{L}$$

Figura Nº 13: Determinación de la pérdida de carga unitaria en una tubería.

Cavitación:

La cavitación o aspiración en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando un fluido pasa a gran velocidad, produciendo una bajada de presión del fluido. Puede ocurrir que se alcance la presión de vapor del líquido de tal forma que las moléculas que lo

componen cambian inmediatamente a estado de vapor, formándose burbujas o, más correctamente, cavidades. Las burbujas formadas viajan a zonas de mayor presión e implotan (el vapor regresa al estado líquido de manera súbita, «aplastándose» bruscamente las burbujas) produciendo una estela de gas y un rápido desgaste de la superficie por la que se transporta el líquido.

La implosión causa ondas de presión que viajan en el líquido. Estas pueden disiparse en la corriente del líquido o pueden chocar con una superficie. Si la zona donde chocan las ondas de presión es la misma, el material tiende a debilitarse metalúrgicamente y se inicia una erosión que, además de dañar la superficie, provoca que ésta se convierta en una zona de mayor pérdida de presión y por ende de mayor foco de formación de burbujas de vapor. Si las burbujas de vapor se encuentran cerca o en contacto con una pared sólida cuando implosionan, las fuerzas ejercidas por el líquido al aplastar la cavidad dejada por el vapor dan lugar a presiones localizadas muy altas, ocasionando picaduras sobre la superficie sólida.

El fenómeno generalmente va acompañado de ruido y vibraciones, dando la impresión de que se tratara de gravas que golpean en las diferentes partes de la tubería.

Se produce en tramos de alta velocidad como en zonas de bombas y hélices.



Figura Nº 14: Desgaste producido por la cavitación en un rodete de una bomba centrífuga.

Golpe de ariete:

El golpe de ariete se origina debido a que el agua es ligeramente elástica (aunque en diversas situaciones se puede considerar como un fluido no compresible). En consecuencia, cuando se cierra bruscamente una válvula o un grifo instalado en el extremo de una tubería de cierta longitud, las partículas de agua que se han detenido son empujadas por las que vienen inmediatamente detrás y que siguen aún en movimiento. Esto origina una sobrepresión que se desplaza por la tubería a una velocidad algo menor que la del sonido en el agua. Esta sobrepresión tiene dos efectos: primero comprime ligeramente el agua, reduciendo su volumen, y segundo dilata ligeramente la tubería.

Cuando toda el agua que circulaba en la tubería se ha detenido, cesa el impulso que la comprimía y, por tanto, ésta tiende a expandirse. Por otro lado, la tubería que se había ensanchado ligeramente tiende a retomar su dimensión normal. Conjuntamente, estos efectos provocan otra onda de presión en el sentido contrario. El agua se desplaza en dirección contraria pero, al estar la válvula cerrada, se produce una depresión con respecto a la presión normal de la tubería. Al reducirse la presión, el agua puede pasar a estado gaseoso formando una burbuja mientras que la tubería se contrae. Al alcanzar el otro extremo de la tubería, si la onda no se ve disipada por ejemplo, en un depósito a presión atmosférica, se reflejará siendo mitigada progresivamente por la propia resistencia a la compresión del agua y a la dilatación de la tubería.

Este fenómeno es muy peligroso, ya que la sobrepresión generada puede llegar a entre 60 y 100 veces la presión normal de la tubería, ocasionando roturas en los accesorios instalados en los extremos (grifos, válvulas, etc).

Existen varios dispositivos para controlar el golpe de ariete, para evitar los golpes de ariete causados por el cierre de válvulas, hay que estrangular gradualmente la corriente de agua, es decir, cortándola con lentitud utilizando para ello, por ejemplo, válvulas de rosca. Cuanto más larga es la tubería, tanto más deberá durar el cierre.

Cuando la interrupción del flujo se deba a causas incontrolables, como por ejemplo, la parada brusca de una bomba eléctrica, entonces se tendrán que emplear:

- Calderines: tanques neumáticos con cámara de aire comprimido.
- Chimenea de equilibrio o torres piezométricas,
- Válvulas de Retención que puedan absorber la onda de presión.

Cálculo de tuberías:

Con frecuencia necesitamos conocer las pérdidas de carga en una tubería, para saber si el agua va a tener suficiente presión para llegar del punto de captación al punto de suministro. Existen numerosa formulación técnica que resuelve el problema y cada fabricante de tubería nos proporciona una formula experimental que ha ajustado a su producto. A continuación se van a exponer las dos formulaciones más utilizadas internacionalmente:

1) Fórmula de Hazen-William

Esta fórmula es de gran empleo en Estados Unidos para el cálculo de redes de abastecimiento de agua potable.

$$J = \frac{1}{D^{4,87}} \left(\frac{Q}{279C} \right)^{1,85}$$

J = pérdida de carga (m/m); Q = caudal (litros/s); D = diámetro (m)

C es un coeficiente de rugosidad de Hazen-William que depende del tipo de material.

VALOR DE C	MATERIAL
75	Fundición usada durante más de 30 años
95	Palastro o acero roblonado usado
100	Fundición usada de menos de 30 años
114	Palastro o acero roblonado nuevo
115	Hormigón con encofrado de madera de calidad
118	Hormigón con encofrado metálico
120	Hormigón enlucido y acero soldado
130	Fundición nueva, sin uso
140	Tubos más lisos (PVC)

2) Fórmula de Manning

Es una fórmula muy conocida tanto en tuberías como en régimen natural de cauces.

$$J = \left(\frac{n}{0,312} \right)^2 \frac{Q^2}{D^{5,33}}$$

También puedo despejar otras variables como D o Q:

$$D = \sqrt[5,33]{\frac{1}{J} \left(\frac{nQ}{0,312} \right)^{0,375}} \quad Q = \frac{0,312}{n} D^{2,67} \sqrt{J}$$

Donde Q=caudal (m³/s); D = diámetro (m) y J = pérdida de carga (m/m)

n es el coeficiente de rugosidad de Manning

VALOR de n	MATERIAL
0,011	Fundición nueva- Hormigón enlucido muy liso
0,013	Hormigón con encofrados metálicos buenos
0,011-0,012	Amianto-cemento
0,014	Hormigón con encofrado de madera o gunita
0,02-0,032	Canales en tierra
0,03-0,045	Canales en roca