

## HEMODYNAMIA II

(07.05.07)

- ♥ **Número de Reynolds:** Permite predecir si va a existir un flujo laminar, turbulento o mezcla de ambos, mediante dos ecuaciones equivalentes. Pero se considerará una sola de ellas, porque es más fácil de entender:

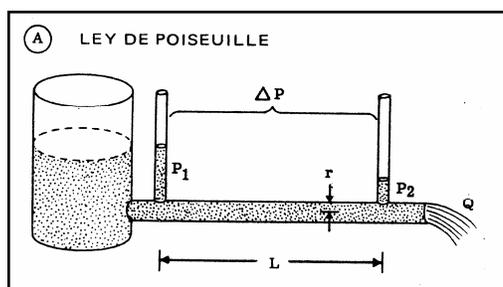
$$\text{N}^\circ \text{ de Reynolds} = \frac{2 \cdot Q \cdot \rho}{\pi \cdot r \cdot \eta}$$

Se dice que el número de Reynolds es igual a dos veces el flujo de la sangre, por su densidad ( $\rho$ ), dividido por  $\pi$  (constante), por el radio del vaso ( $r$ ) y por la viscosidad de la sangre ( $\eta$ ).

- Si este número es **menor que 1.000**, se dice que el flujo será **laminar**.
- Si el número es **mayor que 2.000**, se dice que el flujo será **turbulento**.
- Si el número se encuentra **entre 1.000 y 2.000**, puede haber **de los dos tipos** de flujo.

Si el flujo es constante y la densidad también será constante en condiciones fisiológicas, al igual que la viscosidad, entonces se dice que **el número de Reynolds depende del radio del vaso**. Mientras más pequeño sea el radio, más grande será el valor del número, teniendo la posibilidad de tener un flujo turbulento si es mayor a 2.000.

### ♥ Ley de Poiseuille:



Tenemos un recipiente, que contiene líquido con un nivel de llenado superior al tubo que sale desde él, lo que permite obtener una gradiente de presión ( $P_1 > P_2$ ), el cual generará un flujo de líquido a través del tubo desde  $P_1$  hacia  $P_2$ .

Sabiendo que el Flujo depende el gradiente de presión ( $P_1 - P_2$ ) y es opuesto a la resistencia ( $R$ ):

$$Q = \frac{(P_1 - P_2)}{R} \quad (\text{Ec. General de Flujo})$$

Pero, ¿Qué factores influyen sobre la Resistencia?

La Resistencia es directamente proporcional a una gradiente de presión (se desprende de la ecuación general de flujo).

Luego, calculó el flujo midiendo cuánto cae (ml.) en una probeta graduada, cambiando las gradientes de presiones, es decir, cambiando los niveles de agua dentro del recipiente.

Se comprobó que mientras más alto es el nivel de agua, más gradiente de presión y más flujo de agua hay.

#### 1. El **radio** es indirectamente proporcional a la resistencia

Tomó tubos de distintos radios y midió el flujo. A más radio, menos resistencia porque hay más flujo. Pero no es una relación lineal, sino que depende de  $r^4$ .

#### 2. La resistencia directamente proporcional al **largo** del tubo.

Mientras más largo era el tubo, al líquido le cuesta más salir de él, por lo que presenta más resistencia al flujo. Mientras más largo es el tubo, mayor resistencia habrá.

#### 3. La **viscosidad** ( $\eta$ ) es directamente proporcional a la resistencia.

Mientras más viscoso es un líquido, más le cuesta desplazarse a lo largo del tubo; líquidos menos viscosos, fluyen más rápido que otros con mayor viscosidad, porque ofrecen menos resistencia.

Reuniendo todas estas variables, se dice que:

$$R = \frac{l \cdot \eta}{r^4}$$

Y reemplazando en la ecuación general de flujo:

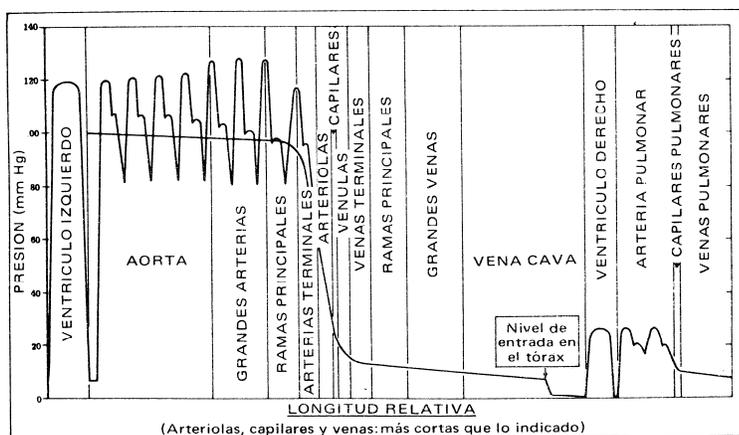
$$Q = \frac{(P_1 - P_2) \cdot r^4}{l \cdot \eta} \cdot \frac{\pi}{8} \rightarrow \text{Constante de proporcionalidad.}$$

**Ley de Poiseuille**

$$R = \frac{l \cdot \eta \cdot 8}{r^4 \pi}$$

♥ **Resistencia en las distintas secciones del sistema circulatorio**

Si se quisiera saber por ejemplo, la resistencia en una arteriola, se puede obtener midiendo el largo de ésta y también su radio, sabiendo la viscosidad de la sangre. Sin embargo, si se quisiera saber la resistencia de todos los vasos del tipo arteriola, es decir, cuánto representa el total de arteriola en la resistencia total, esto es muy difícil de saber con la ecuación de la ley de Poiseuille.



Presión (mm. Hg) v/s Longitud relativa de diferentes tipos de vasos y el comportamiento de la presión en cada uno de ellos.

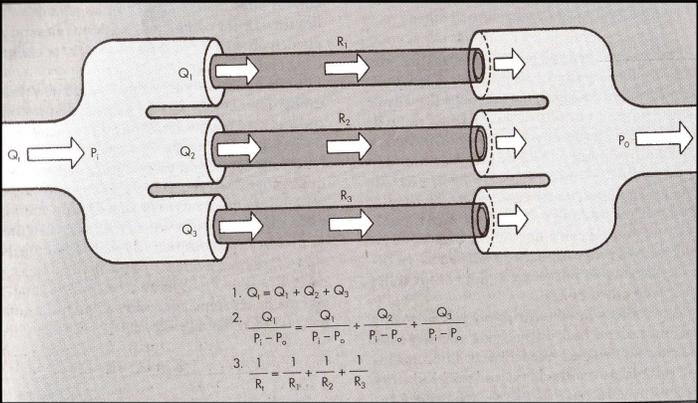
Se puede tener una idea de cuál es la magnitud de la resistencia, conociendo las diferencias de presión, porque a mayor diferencia de presión, más resistencia hay (Ecuación general de flujo).

La presión en la Aorta y en grandes arterias es alta, la diferencia de presión entre ambas es muy baja, es decir, la gradiente de presión es pequeña, por lo que se deduce que la resistencia en esos vasos debe ser también pequeña.

En las arteriolas se observa que existe una gran caída de presión, la gradiente es muy alta, por lo que se desprende que su resistencia es alta.

El mayor porcentaje de la Resistencia Periférica Total (RPT) está dada por las arteriolas (43%) y capilares (27%), son los que más contribuyen a darle resistencia al sistema. Por lo tanto, podemos decir que cambios pequeños en el radio de las arteriolas pueden producir grandes cambios en la resistencia de éstas. Por esto es que ellas pueden distribuir y redistribuir el flujo a diferentes territorios. Por ejemplo, en el ejercicio, las arteriolas del músculo esquelético están muy dilatadas, mientras que en las vísceras, el SN Simpático provoca la contracción del músculo liso de la pared arteriolar, provocando la disminución del radio.

Cabe preguntarse, **¿por qué las arteriolas tienen mayor resistencia al flujo que los capilares, pese a que éstas tienen mayor radio? (su R debiera ser menor).** Esto es porque los miles de capilares, al provenir de una arteriola, forman una especie de sistema de resistencias en serie, donde la resistencia total de los capilares será menor que la resistencia total de las arteriolas.



Si los tres tubos fueran capilares que salen de una arteriola, decimos que en cada uno de ellos el flujo es el mismo y el flujo total ( $Q_t$ ) será la suma de los tres flujos en los capilares. (1)

Como la diferencia de presión es idéntica para todos los elementos en paralelo ( $P_i - P_o$ ), cada flujo de un capilar, puede ser dividido por este valor. (2)

Si  $Q = \frac{(P_i - P_o)}{R}$ , entonces:

$$\frac{Q}{(P_i - P_o)} = \frac{1}{R}$$

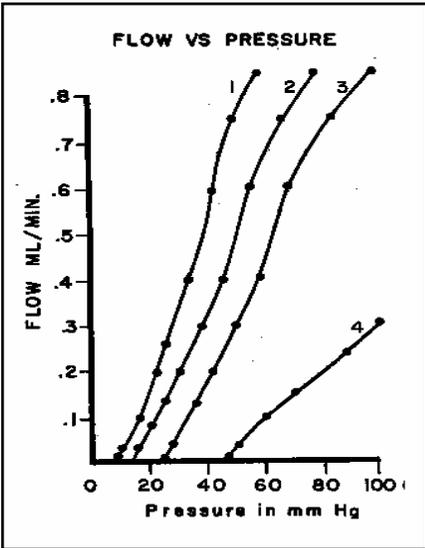
Por esto es que las resistencias se sumarán "en paralelo"

Supongamos que  $R_1 = R_2 = R_3 = 15$

$$\frac{1}{R_t} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \Rightarrow \frac{1}{R_t} = \frac{1}{15} + \frac{1}{15} + \frac{1}{15} \Rightarrow \frac{1}{R_t} = \frac{3}{15} \Rightarrow R_t = 5$$

Por lo tanto, la resistencia total de los capilares (5) es menor a la resistencia de cada uno de ellos (15). Y si hubiera más ramificaciones, la resistencia total sería mucho menor. Lo mismo pasa con las ramificaciones de las arteriolas, sin embargo, éstas **no se ramifican tanto** como lo hacen los capilares, por lo que su resistencia total, será **mayor** a ellos, y es por eso que su contribución a la RPT es mayor que la de los capilares.

♥ Distensibilidad



Se define como: Variación de volumen por unidad de variación de presión.

$$D = \frac{\Delta V}{\Delta P}$$

Las paredes de los vasos, al aumentarles la presión, responden distendiéndose.

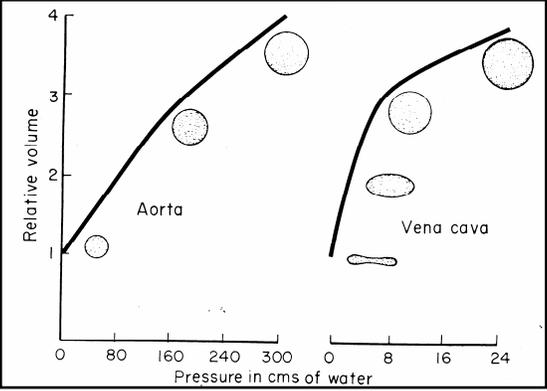
En el gráfico de Flujo v/s Presión, se observan 4 curvas, que representan distintos grados de tono simpático, de menor a mayor. El tono simpático provoca un aumento en el tono del músculo liso y, por lo tanto, una reducción del radio del vaso, aumentando así la Resistencia.

Se puede observar que existe una presión bajo la cual no hay flujo, pues sufren del colapso por el músculo liso de sus paredes y porque no hay suficiente presión para empujar a los elementos figurados (en el caso de los capilares). Esta presión se denomina

**Presión Crítica de Cierre** y en vasos con un tono normal, corresponde a 10 mm. de Hg aproximadamente.

Cuando aumenta el gradiente de presión, aumenta el flujo porque las paredes del vaso sanguíneo ceden y se distienden, disminuyendo así la resistencia. A mayor pendiente de estas curvas, menor resistencia al flujo.

Por lo tanto, la curva 4 es la que presenta mayor resistencia, ya que a un cambio determinado de presión, el flujo no cambia mucho, debido a que posee un mayor tono simpático que las tres anteriores.

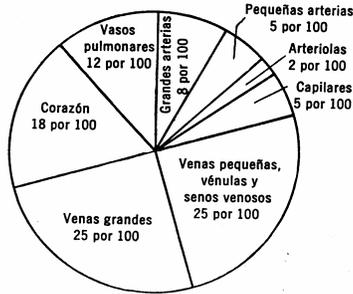


En este gráfico, el valor de Distensibilidad lo da la pendiente de las curvas ( $\Delta V/\Delta P$ ). Se compara la distensibilidad relativa entre la Aorta y la vena Cava.

En el caso de la Aorta, pequeños cambios de volumen producen grandes cambios de presión. Por la definición de distensibilidad, se dice entonces que la Aorta es poco distensible.

Para la vena Cava, cambios de volumen de 1 a 2, provocan cambios muy pequeños de presión. Esto significa que este vaso es muy distensible.

La alta distensibilidad de las venas, juega un rol importante en relación al lugar se encuentra la mayor parte de la volemia<sup>1</sup>. La mitad de la sangre total, están en vasos del tipo venoso (grandes y pequeñas venas, vénulas y senos venosos). Las venas constituyen el mayor reservorio de sangre y ésta se encuentra a baja presión.



Los vasos pulmonares también poseen gran cantidad de la volemia, pero las arteriolas son las que poseen la menor cantidad de la volemia.

Las venas, retornan la sangre de forma activa porque puede entregar más o menos cantidad de sangre al corazón estimulando al músculo liso que está inervado por el Simpático. Cuando aumenta el tono simpático, aumenta el tono muscular y así, no hay un cambio importante en el radio de la vena, pero sí cambia su distensibilidad, ésta se hace menor y la presión tiende a aumentar.

♥ Ley de Laplace

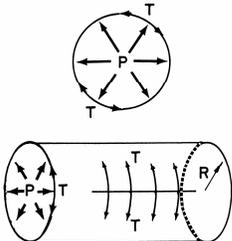
Para el caso de un tubo como lo es un vaso sanguíneo, la ley dice que la Tensión es igual a la Tensión Transmural multiplicado por el radio.

$$T = P_{TM} \cdot r$$

$P_{TM}$  = Presión Transmural =  $P_{LUMINAL} - P_{EXTERNA}$   
 $r$  = radio del vaso

Nosotros tenemos un equilibrio entre lo que es Tensión, Presión transmural y radio, y es bajo estas situaciones cuando se aplica esta ecuación.

Los vasos sanguíneos tienen distintos grados de tensión, de acuerdo a las presiones internas (luminales) y externas que tengan.



<sup>1</sup> Es el volumen total de sangre.

♥ **Teorema de Bernoulli**

Aplica los distintos tipos de energía que se pueden encontrar en la sangre.

$E_{total} = \text{Energía de Presión} + \text{Energía cinética} + \text{Energía potencial gravitatoria} + \text{calor}^2$

Suponiendo que se considera la circulación desde el corazón hacia los pies, la energía gravitacional en el corazón será mucho mayor que en los pies (de echo, es la máxima en el corazón y en los pies es la mínima), porque depende de la altura.

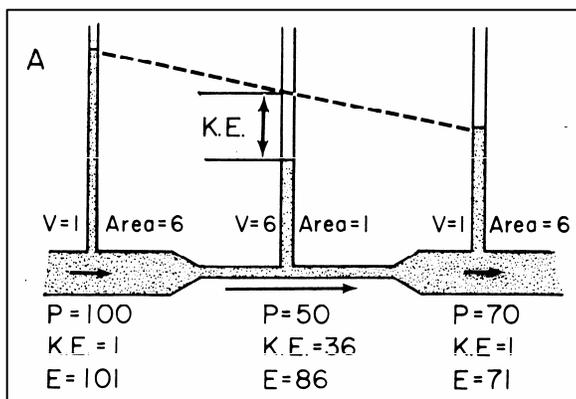
$E_{total} = P \cdot Vol + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h + \text{calor}$

Estos tipos de energía, exceptuando el calor, son totalmente interconvertibles una en la otra.

Si consideramos la Energía total por unidad de volumen, dividimos todo por volumen:

$\frac{E_t}{V} = P + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 + \rho \cdot g \cdot h$

$\rho$  es igual a la masa dividido por el volumen y eso es Densidad.



La energía no se pierde, sólo se transforma en otros tipos de energía.

En la figura, se tiene un vaso en forma horizontal, que al principio presenta un cierto diámetro, luego al medio disminuye y, finalmente, vuelve a ser como al inicio.

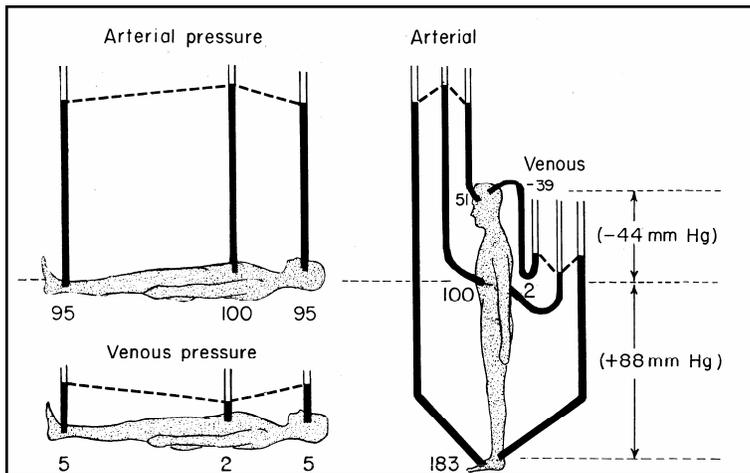
Suponemos que al comienzo y final, el área de la sección transversal es 6 y que su velocidad es 1. Si en el medio, su área disminuye a 1, obligatoriamente la velocidad será 6 (el flujo es el mismo,  $Q = A \cdot v$ ). La energía potencial no será considerada, porque los vasos se encuentran a la misma altura.

- Al comienzo, tendremos que la presión es igual a 100 mm. de Hg y que la energía cinética es 1. Por lo tanto, la Energía total será la suma de las energías: 101.
- Luego, al medio, la presión cae a 50 mm. de Hg, a cambio de un aumento de la energía cinética de 1 a 36, porque como el flujo es el mismo dentro de un lumen más pequeño, las moléculas deben pasar más rápido para mantener tal flujo. Y la Energía total será 86.
- Al recuperarse el radio, se recupera la velocidad, por lo que la energía cinética vuelve a ser 1. Y la presión subirá pero no a 100, sino a 70. Esto es porque parte de la energía se perdió como calor por el roce interno de la sangre con las paredes del vaso, y no puede recuperarse.

Es importante observar que la sangre fluirá en un momento, de una zona de baja presión (50 mm. Hg) hacia una de alta presión (70 mm. Hg), la sangre debiera devolverse pero no lo hace. ¿Cómo puede ocurrir esto? Ocurre porque en realidad la sangre se mueve por **Diferencias de Energía**, es decir, en este caso se movió desde una zona con Energía 86 hacia otra con Energía 71. Pero no significa que decir que la sangre se mueve por diferencias de presión esté malo, porque cuando se habla de la ecuación general de flujo, se considera en una persona que está acostada y en ese caso, la mayor parte de la energía se encuentra como Energía de Presión.

<sup>2</sup> Se considera distinto a los otros tipos de energía mecánica, porque una vez que la energía se transformó en calor, ya no puede volver a convertirse en E. mecánica o Cinética por ejemplo.

La energía cinética en el lado arterial, es poca, otorga muy poca energía a la Energía Total. Sin embargo, en el lado venoso, la energía cinética vuelve a ser importante porque en ella hay baja presión y por lo tanto la energía que se pierde como presión, se gana como energía cinética.



En un individuo acostado, el valor de presión arterial a nivel del corazón es de 100 mm. Hg. Al llegar a los pies, la sangre ha perdido presión, pero de apenas 5 mm. de Hg. Lo mismo ocurre cuando la sangre arterial ha llegado a la cabeza. Esto es así, porque la sangre ha viajado por arterias, que son de muy baja resistencia, hay poco roce interno y la velocidad no necesita ser alta para viajar a través de ellas.

En un individuo acostado, el territorio venoso es de una gran caída de presión si lo comparamos con las arterias. En los pies y cabeza, la presión será de 5 mm. Hg y bajará al llegar al corazón (2 mm. Hg), por lo tanto nos damos cuenta de que la gradiente de presión para el retorno venoso es muy pequeña.

Si el individuo está de pie, en el caso de las arterias existirán 100 mm. Hg a nivel del corazón (siempre es ese valor), pero a nivel de los pies hay una presión de 183 mm. Hg porque la sangre perdió Energía potencial gravitacional y se transformó en Presión. Mientras que cuando la sangre gana altura, aumenta la Energía potencial gravitatoria en desmedro de una baja de Presión. En realidad, para los pies, eran 188 mm. Hg (100+88), pero como también hay sangre arterial hacia la cabeza, se llevó 5 mm. Hg, entonces quedaron 183 mm. Hg.

En las venas, al tener mayor Presión, se distenderán más y por lo tanto podrán almacenar más sangre por un momento, disminuyendo el retorno venoso, disminuye el flujo de sangre al corazón, disminuye el gasto cardíaco, disminuye el envío de sangre a la cabeza y la persona se puede desmayar. Al caerse, estará "acostado" y la sangre podrá llegar al cerebro.