

HEMODINÁMICA (PARTE II)

Prof. Dr. Juan Fernando Gómez Rinesi

12.- CUALES SON LAS COMPONENTES ENERGÉTICAS EN EL LÍQUIDO EN FLUJO CONTINUO?

Las componentes que energéticas que presentes en un flujo hidrodinámico continuo son:

- Energía de presión : correspondiente al gradiente de presión aplicado entre ambos extremos del circuito.
- Energía cinética: que resulta del movimiento de la masa líquida. La magnitud de este tipo de energía está determinada por la velocidad y la densidad del líquido.
- Energía potencial gravitatoria: que está determinada por la gravedad, la diferencia de altura entre los extremos del tubo y la densidad del líquido. Cuando no existe diferencia de altura entre dichos extremos la energía potencial gravitatoria es cero (no existe)
- Energía viscosa: es la porción de energía que se desarrolla para provocar la deformación de la masa líquida y es directamente proporcional a la viscosidad de dicho líquido (Ver parte I : viscosidad)

La expresión matemática es la siguiente:

$$E = \Delta P + \partial h g + \frac{1}{2} m v^2 + R h$$

dónde :

E: energía de una masa líquida en flujo constante.

(ver fig. 1)

ΔP : gradiente de presión entre los extremos del circuito

∂ : densidad del líquido

h : altura entre los extremos del circuito

g : aceleración de la gravedad

Rh : resistencia viscosa

El producto $\partial h g$ corresponde a la energía potencial gravitatoria, $\frac{1}{2} m v^2$ es la energía cinética.

Conforme a la ley de Poiseuille la resistencia viscosa está dada por : $\frac{8l}{pr^4} h$, dónde: ∂

l : longitud del circuito

r : radio del tubo

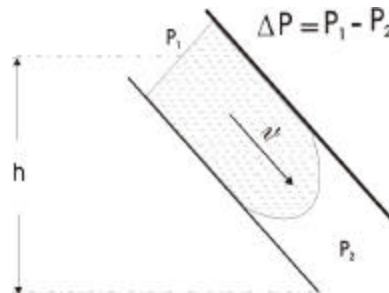


Fig. 1

13.- QUE ESTABLECE EL PRINCIPIO DE BERNOUILLE?

El principio de Bernouille establece que el caudal en cualquier área de un circuito con flujo constante es el mismo.

A partir de este principio puede estimarse el gradiente de presión (energía de presión) para la sangre circulante aplicando la fórmula :

$$GP(\text{gradiente de presión}) = 4.v^2$$

14.- CUALES SON LOS PATRONES DE COMPORTAMIENTO ENERGÉTICO EN LAS ESTENOSIS?

15.- CUALES SON SUS CONSECUENCIAS EVIDENCIABLES POR DOPPLER?

16.- QUÉ ENTIENDE POR ESTENOSIS CRÍTICA?

Para facilitar el análisis de las variaciones energéticas en un circuito hidrodinámico puede considerarse un circuito en el que sus extremos se hallan a la misma altura, de esta manera se suprime la participación de la

energía potencial gravitacional¹, de manera que puede considerarse que la energía en cualquier punto del circuito será:

$$E = \text{energía de presión} + \text{energía cinética} + \text{energía viscosa}$$

Teniendo en cuenta que la resistencia viscosa está fuertemente determinada por la geometría del circuito (radio o calibre del tubo), ésta adquirirá mayor importancia a medida que se estreche la luz tubular (para nuestro caso, la luz arterial). de manera que las variaciones energéticas serán diferentes según el grado de estrechamiento arterial.

Para las formas de **estrechez leve** la modificación de la resistencia viscosa es despreciable, por lo tanto, las variaciones van a depender fundamentalmente de las energías de presión y cinética.

Por el teorema de Bernouille, al disminuir el área de sección es necesario que aumente la velocidad del fluido para mantener constante el caudal, el aumento de velocidad produce caída de la energía de presión, es decir que el patrón característico de este grado de estenosis es el aumento de la energía cinética (por aumento de la velocidad) a costa de la energía de presión, manteniéndose la energía total en el sistema.

Con el **aumento del grado de estrechez**, comienzan a tener efecto dos factores disipadores de energía: la resistencia viscosa ya referida y la resistencia inercial que se debe a la resistencia que ofrece la masa líquida para modificar su velocidad (recordar que el principio de inercia establece que todo cuerpo tiende a permanecer en el estado en que se encuentra). Para modificar este estado es necesario aplicar una fuerza, que en este caso particular se hace sobre una superficie por lo tanto es presión. Es decir que con el incremento de velocidad parte de la energía de presión se disipa en forma de calor por la resistencia inercial. De la misma manera, parte de la energía del sistema se disipa en forma de calor por el significativo aumento de la resistencia viscosa.

La resistencia inercial es un nuevo componente de distribución energética que en condiciones de flujo constante normal, con igual calibre en todos los sectores del circuito, no participa porque no hay variaciones de velocidad.

Para comprender la repercusión que tienen estos eventos sobre la hemodinámica es necesario analizar lo que ocurre en el sector distal a la obstrucción.

En las estenosis leves (sin significación hemodinámica), en las que las resistencia inercial y viscosa son despreciables no se disipa energía del sistema en forma de calor, es decir que transcurrido el trayecto de la obstrucción, al aumentar nuevamente el calibre del vaso se reduce la velocidad, con lo que disminuye la energía cinética. Esta situación produce la recuperación de presión, de manera que antes y después de la obstrucción la energía total del sistema se mantiene. (fig2.)

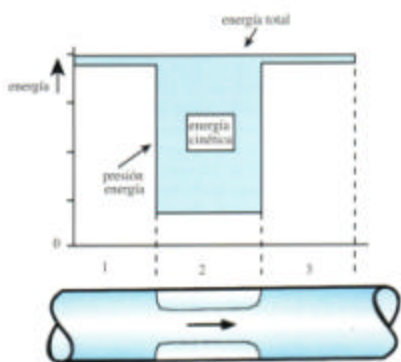


Fig. 2 Variación de los componentes energéticos en una obstrucción leve.

En el modelo de análisis de reducciones leves de la luz, se pueden reducir los componentes energéticos a dos (porque no existen variaciones importantes de la resistencia viscosa):

Energía de presión
Energía cinética

de manera que la energía total es igual a la suma de ambas. La línea recta superior grafica la energía total, la inferior la energía de presión, la diferencia entre ambas (sombreada) corresponde al valor de energía cinética.

En el sector preestenótico (1) la energía de presión es predominante, en el trayecto de la estrechez (2) se produce una abrupta caída de ésta y aumenta la energía cinética por aumento de velocidad del fluido, al alcanzar el sector postestenótico (3) vuelve a recuperarse el diámetro del vaso, razón por la que disminuye la velocidad (para mantener constante el caudal) y la energía cinética se transforma nuevamente en energía de presión.

El resultado final es que la Energía total antes, durante y después de la obstrucción es la misma (observe la línea superior).

Quando la estrechez aumenta adquiere significación hemodinámica debido a que los efectos disipadores de las resistencias viscosa e inercial (la disipación de calor significa una pérdida de la energía total del sistema) por lo que, distalmente a la estenosis, las condiciones de menor disponibilidad energética para el desarrollo de energía cinética compromete en grado creciente al flujo. Con la aparición de turbulencias la resistencia viscosa se incrementa inusitadamente y constituye otro factor de disipación energética que compromete en mayor medida la energía total del sistema.

¹ ver punto c) de la respuesta a la pregunta 12.

Las figura 3 muestran los efecto de grados severos de estenosis sobre la disponibilidad energética posestenótica.

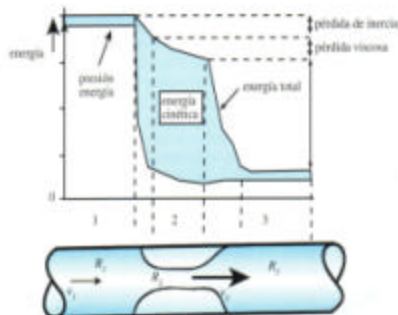


Fig. 3 Pérdidas energéticas del sistema en las estenosis severas.

En el modelo de estrechez hemodinámicamente significativa se representan también las pérdidas de la energía total del sistema producidas por la disipación generadas para vencer las resistencias viscosa e inercial. Obsérvese que en el sector post-estenótico la energía total del sistema se ha reducido drásticamente (línea superior) a expensas de la energía de presión (línea inferior), conservándose una energía cinética similar a la del sector preestenótico. Esto significa que la energía de presión se ha disipado en su mayoría como consecuencia de las resistencias viscosa e inercial. Esto determina que cualquier requerimiento adicional de presión para sostener la circulación no podrá ser satisfecha (por ejemplo: aumento de la resistencia periférica o estrecheces en serie) se está entonces en presencia de una estenosis crítica.

Cuando la pérdida energética del sistema es tal que la presión en el sector pos-estenótico pierde progresivamente su capacidad para impulsar la masa líquida contra la resistencia periférica imperante, el caudal se reduce también progresivamente hasta alcanzar un punto en el cual éste cae a cero, la velocidad de flujo en el sistema también será cero. El mismo comportamiento se observará a nivel de la estrechez, puesto que el aumento de la velocidad incrementada inicialmente por la reducción de la sección y la necesidad de mantener un determinado caudal se irá reduciendo conforme la caída de este último. Estrecheces que comprometen más del 85% de la luz se comportan como críticas y pueden llegar a cancelar totalmente el flujo según la resistencia periférica que opera sobre el sector post-estenótico.

Conceptualmente, la Estenosis Crítica es aquel grado de compromiso de la luz vascular en el cual las pérdidas energéticas que produce en el sistema y que se manifiestan en el sector post-estenótico imposibilitan el flujo en las condiciones de resistencia periférica imperante. Podrá advertirse, entonces, que se trata de un concepto dinámico donde interaccionan energía del sistema con resistencia periférica, de manera que una estrechez crítica podrá dejar de serlo si se reduce la resistencia periférica o, a la inversa, una estrechez que aún no ha alcanzado a ser crítica puede hacerlo si se incrementa la resistencia periférica.

El estudio Doppler pondrá en evidencia las modificaciones en la energía cinética del sistema vía de la determinación de las velocidades en los sectores pre-estenóticos, estenóticos y post-estenóticos del vaso.

17.- QUE ENTIENDE POR FLUJO PULSATIL?

Se entiende por flujo pulsátil a aquél presenta variaciones periódicas de su caudal. Considerando cualquier sector del circuito, las variaciones de caudal sin modificaciones de la geometría dependen básicamente del gradiente de presión impuesto a ese nivel en cada instante y por lo tanto se acompañará de variaciones de velocidad.

A diferencia de lo que acontece en el flujo continuo de caudal constante estudiado anteriormente en la configuración energética del sistema, la resistencia inercial participa como un factor de disipación energética independientemente de la existencia o no de estrechez. Esto se debe a que, por las propias características del flujo, la masa líquida se ve modificada en su velocidad a cada instante y, por lo tanto, la resistencia inercial se verifica permanentemente.

18.- QUE ES LA ACELERACIÓN, LA INERCIA Y LA DISTENSIBILIDAD?

21.- QUE ENTIENDE POR COMPLIANCE ARTERIAL?

Se entiende por aceleración a la variación de velocidad que se verifica en la unidad de tiempo, responde a la siguiente formulación matemática

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t}$$

donde :

a: aceleración

v1: velocidad inicial

v2: velocidad final

t: tiempo transcurrido en variar de v_1 a v_2

Para velocidades que se expresan en cm/seg, la aceleración por segundo se expresa como:

$$a = \frac{cm}{seg^2}$$

en forma genérica : $a = \frac{e}{t^2}$

La inercia es la tendencia que tienen los cuerpos a mantener el estado cinético en el que se encuentran

Al ejercer presión sobre la pared arterial ésta modifica su longitud circunferencial con el consiguiente aumento de la sección del mismo: Conceptualmente, la distensibilidad es la deformación que sufre un vaso por efecto de la presión.

Resulta interesante advertir que es un parámetro que modifica significativamente la interpretación de los circuitos con flujo pulsátil y complican su análisis matemático, pero que es un factor presente en los circuitos biológicos. Merced a la distensibilidad, la capacitancia vascular se modifica en función de la presión. Con esto se da por tierra a uno de los presupuestos de análisis hidrodinámico a partir de conductores rígidos que se aplicó en el estudio de los flujos continuos y constantes : la invariabilidad de la geometría del vaso. Es decir que las variaciones de presión que necesariamente se verifican en el flujo pulsátil producirán variaciones en la geometría del vaso.

La distensibilidad confiere al sistema vascular la propiedad de modificar su capacitancia en función de la presión aplicada: esta propiedad se denomina *Compliance Arterial*.

Conceptualmente, la compliance es la relación entre la variación de capacitancia² arterial por unidad de presión aplicada.

Una de las consecuencias de la distensibilidad arterial es el efecto Windkessel, por el que la raíz aórtica actúa como amortiguador de la pulsatilidad generada por la eyección ventricular izquierda. (fig 4)

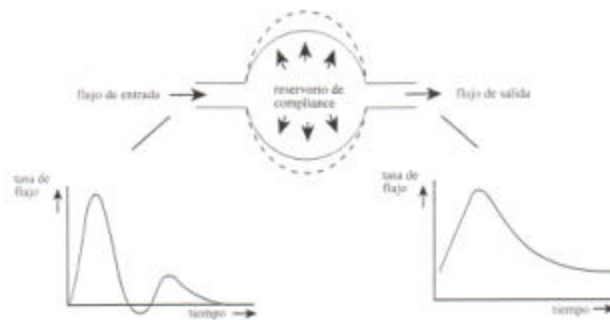


Fig. 4. Efecto Windkessel.

Bibliografía:

Taylor K. J. W., Burns P.N., Wells P: N. T. Clinical applications of doppler ultrasound. 2nd Ed. New York. Raven Press.1995

Abel F.L., McCutcheon E.P. Cardiovascular function.Principles and applications. First Edition.Little Brown and Company.1979.

Sears F.W., Zemansky M.W. Física general.Aguilar Ediciones.Madrid.1973

Frumento A.S. Biofísica. Tercera Edición.Mosby/Doyma.Madrid.1995

2 Se llama capacitancia a el volumen de sangre que puede contener el lecho arterial.