



FACULTAD DE INGENIERIA

Universidad de Buenos Aires

INSTITUTO DE INGENIERÍA SANITARIA Y AMBIENTAL

CÁTEDRA DE POSGRADO "HIDRÁULICA APLICADA A LA INGENIERÍA SANITARIA"

DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA

CÁTEDRAS DE GRADO "HIDRÁULICA GENERAL Y CONSTRUCCIONES HIDRÁULICAS"

ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN

DIAGRAMAS ENVOLVENTES DE SOBREPRESIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS

UN GRAN APORTE DE LOS PROFESORES VÍCTOR MIGANNE, DIEGO COTTA Y DANTE DALMATI A LA INTERPRETACIÓN Y SOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL GOLPE DE ARIETE

**AUTOR
PROF. ING. LUIS PÉREZ FARRÁS**

DIAGRAMAS ENVOLVENTES DE SOBREPRESIONES MÁXIMAS Y MÍNIMAS

UN GRAN APORTE DE LOS PROFESORES VÍCTOR MIGANNE, DIEGO COTTA Y DANTE DALMATI A LA INTERPRETACIÓN Y SOLUCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA DEL GOLPE DE ARIETE

1.- GENERALIDADES Y OBJETIVOS

En mi carácter de docente, he tenido a mi cargo durante muchos años (*más de 46*) y al menos cinco veces al año, el desarrollo en clase, de la temática del “*Golpe de Ariete*”.

La actividad de referencia sigue teniendo lugar en las carreras ingenieriles de grado y de posgrado de las que soy actualmente profesor en la *FI UBA* y lo tuvo en las Universidades en las que fui profesor en el pasado. Además el tema que nos ocupa fue tratado en numerosas conferencias y cursos cortos y medianos, a mi cargo, en el país y en el extranjero. Estos cursos fueron dirigidos tanto a niveles de *Ingenieros Graduados* como así también a *técnicos* e incluso a *operarios especializados* (más de 160 eventos en unos treinta años).

Además de ocuparme del tema desde el punto de vista pedagógico lo he desarrollado en la bibliografía que he producido, proponiendo incluso un par de metodologías sencillas, basadas en los diagramas de referencia, para el cálculo en general y la selección de válvulas en particular. **Los comentarios precedentes tienen el objetivo central de destacar que en todas las numerosas instancias nombradas, la enseñanza recibida por mis maestros, los Académicos Profesores Ingenieros Víctor Miganne, Diego Cotta y Dante Dalmati, han sido transmitidas en forma inalterada en lo conceptual.**

Justamente es **el objetivo central** del presente artículo de divulgación, **destacar el enorme aporte de los nombrados a la vez que honrarlos por su sencillez y modestia**, puesto que recién al cabo de decenios tomo en cuenta que ellos fueron los creadores y el difusor, respectivamente, de una herramienta pedagógica y de cálculo genial, difundida desde los años cincuenta del siglo pasado por las cátedras de *Hidráulica* de las *Facultades de Ingeniería* de la *Universidades de Buenos Aires* y de *La Plata*, de las que fueron sus profesores.

Me atrevo a calificar el aporte realizado por mis maestros como **genial, puesto que entiendo que merece ese calificativo, el hecho de acotar y difundir**, como ellos lo han hecho, una problemática **sumamente compleja**, con una metodología pedagógica y de **cálculo, sumamente sencilla** y **abarcativa** de la complejidad nombrada.

No se entrará en detalle en la descripción de la herramienta de referencia, la que está desarrollada en la frondosa bibliografía publicada durante decenios, por las cátedras nombradas, y es parte inherente de las clases en la que se imparte la enseñanza de la temática del *Golpe de Ariete* a los estudiantes de *Ingeniería* de grado y posgrado.

En resumen, el objetivo central del artículo, es el de destacar que la autoría del tema que nos ocupa, y su difusión a nivel de las cátedras universitarias, es una acción exclusiva de mis maestros previamente nombrados.

A tal conclusión llegué, luego de revisar parte de la frondosa bibliografía clásica y comprobar que el tema fue tratado solo por los *Profesores Ing. Miganne, Cotta y Dalmati*.

Es de destacar que al buscar “*WaterHammer*” (*literalmente “Martillo de Agua”,* nombre con que se conoce al “*Golpe de Ariete*” en la bibliografía anglosajona) en Internet, aparecen *un millón cincuenta mil (1 050 000)* resultados, pero no encontré ninguno con los diagramas de referencia.

Al buscar en Castellano, “*Golpe de Ariete- Diagramas de Sobrepresiones Máximas y Mínimas*”, aparecen *nueve mil trescientos diez (9310)* resultados, **pero expresamente referidos a los diagramas de sobrepresiones que nos ocupa, sólo se encuentran los nuestros de la FI UBA.**

Todo lo expuesto me hace pensar que el enfoque a la problemática del *Golpe de Ariete*, a través de la idealización de la “*ley lineal de cierre*” y los *diagramas envolventes* consecuentes y su difusión, es exclusivo de los **Ingenieros Cotta y Dalmati** y que no ha trascendido mayormente más allá de las fronteras de nuestro país. Inclusive ignoro si se ha difundido lo suficiente, en las *Facultades de Ingeniería* de nuestro interior.

Nota: Me consta que en la *Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia*, en las *Cátedras de Hidráulica* de las *Facultades de Ingeniería* de las sedes *Comodoro Rivadavia* y *Trelew*, el tema se desarrolla en forma similar a las de la *Facultades homónimas de Buenos Aires* y de *La Plata*.

Es mi deseo que el presente artículo sirva de disparador para la difusión de la herramienta de referencia tan valiosa por lo práctica y pedagógica. En cuanto a sus creadores y su difusor, creo que merecen también, el mérito a que los hace acreedores su trabajo pionero.

Evidentemente el presente artículo está dirigido a todos aquellos que cuentan con información importante sobre la problemática del *Golpe de Ariete* y conocen, con cierto detalle, la mecánica del fenómeno ondulatorio nombrado.

2.- DESCRIPCIÓN DE LOS FUNDAMENTOS DE LA RESOLUCIÓN ORTODOXA

Me parece oportuno denominar como “**Resolución Ortodoxa**”, la que es utilizada por los numerosísimos autores que han encarado el tema en la vasta bibliografía internacional y que se describe suscintamente a continuación.

Las ecuaciones que rigen los movimientos transitorios en conducciones a presión son las de *Saint Venant*, a saber:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial l} \left(z + \frac{p}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} \right) &= -\frac{1}{g} \frac{\partial U}{\partial t} - j^* \\ \rho \frac{\partial U}{\partial l} + \frac{1}{c^2} \left(U \frac{\partial p}{\partial l} + \frac{\partial p}{\partial t} \right) & \end{aligned} \right\} (1)$$

En las (1) se tiene que

- z es la altura sobre un plano de comparación arbitrario del eje de la conducción.
- p/γ es la altura de presión en cada sección y en cada instante (p es la presión y γ el peso específico del agua).
- U es la velocidad media en cada sección y en cada instante.
- g es la aceleración normal de la gravedad.
- j^* es la "pérdida unitaria de energía hidráulica".
- t es el tiempo.
- ℓ es el camino a lo largo del eje de la conducción.
- c es la celeridad o velocidad de propagación del fenómeno transitorio, que resulta (para tuberías de pared delgada):

$$c = \frac{\sqrt{\varepsilon/\rho}}{\sqrt{1 + \frac{D\varepsilon}{eE}}} \quad (2)$$

En la (2) es:

- ε es el módulo de compresibilidad del agua.
- ρ es la masa específica del agua.
- D es el diámetro interno de la conducción.
- E es el espesor de la misma.
- E es el módulo de elasticidad del material de la conducción.

La solución a la problemática del "Golpe de Ariete" es la integración de las ecuaciones de Saint Venant, para lo que remito al lector interesado a la bibliografía especializada. En el presente artículo se tomará la solución de referencia como conocida.

En la Figura 1 se representa la onda que se genera con una maniobra de cierre del obturador (válvula) totalmente aleatoria y que culmina en un tiempo T_{mc} .

Su "frente de onda" sigue consecuentemente una ley cualquiera, que no responde a una geometría definida. Considerada una sección cualquiera a una distancia " l ", la dinámica de la onda en su avance como F_1 , su rebote como F_2 , su avance como $-F_1$ y su rebote como $-F_2$ (ver secuencia del fenómeno en el desarrollo de la teoría) implica en la misma una variación de la sobrepresión hasta un máximo positivo y un mínimo negativo.

El valor de la oscilación, variable en el tiempo en la sección elegida está dada para cada instante por la expresión Δh (solución de las Ecuaciones de Saint Venant), que como puede apreciarse en la *Figura 1* resulta de la diferencia entre los segmentos dados por:

$$\left. \begin{aligned} \pm \Delta h &= \frac{c \Delta V}{g} = \frac{c}{g} \left(U - V \right) \\ \pm \int j^* dl & \end{aligned} \right\} (2)$$

En las ecuaciones (2), que se reitera son las soluciones de la integración de las (1), las variables involucradas son:

- Δh es la *sobrepresión* (o *depresión*) en la sección en el tiempo t
- c es la *celeridad* con que se propaga el fenómeno
- U es la *Velocidad media* en la conducción previa a la maniobra de cierre del obturador, origen del transitorio
- V es la *Velocidad media* en la conducción para cada grado de apertura del órgano de cierre.
- g es la *aceleración normal* de la gravedad.
- $\int j^* dl$ es la *pérdida de energía* (o de "carga") debida al frotamiento, con signo siempre opuesto al de Δh .

La ecuación de Δh y la *Figura 1* permiten interpretar que el segmento que lo mide puede variar hasta un *máximo positivo* y otro *negativo* y que por el efecto amortiguador de la *fricción* el mismo se anulará en un *tiempo t*, luego de un número de oscilaciones. El mismo proceso se reproduce a lo largo de toda la conducción en todas las secciones que la componen y a medida que pasan las ondas F_1 y F_2 .

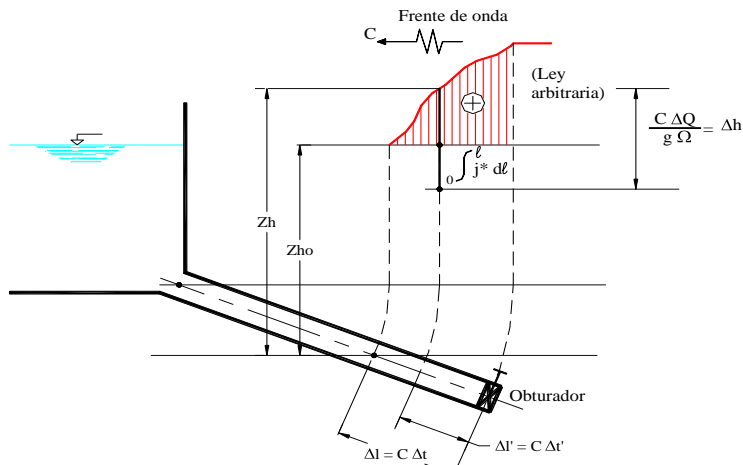


Figura 1
Frente de Onda F1
Maniobra de Cierre Aleatoria

Queda consecuentemente expuesta la complejidad del tema, puesto que la **“Solución Ortodoxa”** implica conocer las oscilaciones en el tiempo en las infinitas secciones a lo largo de la conducción.

3.- BREVE DESCRIPCIÓN DE LOS DIAGRAMAS ENVOLVENTES DE SOBREPRESIONES

Los Profesores Miganne y Cotta, consideraron que el frente de onda de la maniobra de cierre responde a una ley hipotéticamente lineal, y que la maniobra real puede considerarse contenida dentro de la misma. Suponiendo una maniobra lineal, la F_1 tendrá consecuentemente una forma triangular.

Una vez finalizado el cierre del obturador, se habrá llegado al valor máximo posible de Δh , el que se obtiene cuando V es nula, como puede apreciarse en la Figura 2 que sigue:

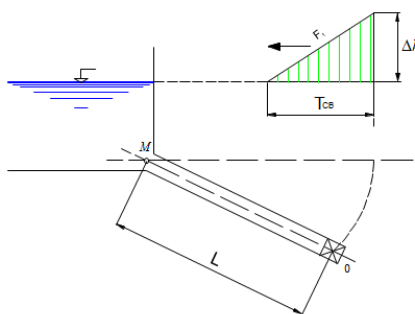


Figura 2
Ley lineal de cierre

Para tiempos mayores de T_{CB} el triángulo se desplaza hacia M con la celeridad c y una vez llegado al embalse (tiempos mayores a L/c) comienza a reflejarse como F_2 . La teoría y la práctica nos enseñan que en función del tiempo de las maniobras de cierre, las mismas pueden ser *bruscas* o *lentas*, lo que ocurre cuando éste es menor o mayor que el tiempo que tarda la onda en ir y volver hasta el obturador o válvula ($2L/c$).

A medida que más lentas son las maniobras, mayor es la parte de la conducción *no afectada por las sobrepresiones*, dado que esta está dada por $1/2 c T_{Mc}$. Cuando T_{Mc} es nula tenemos el caso del cierre instantáneo y cuando $T_{Mc} = 2L/c$ la máxima sobrepresión alcanza solo a la sección del obturador. En la *Figura 3* se brinda el caso general, siendo los casos intermedios, los que se representan en la *Figura 4* que le sigue.

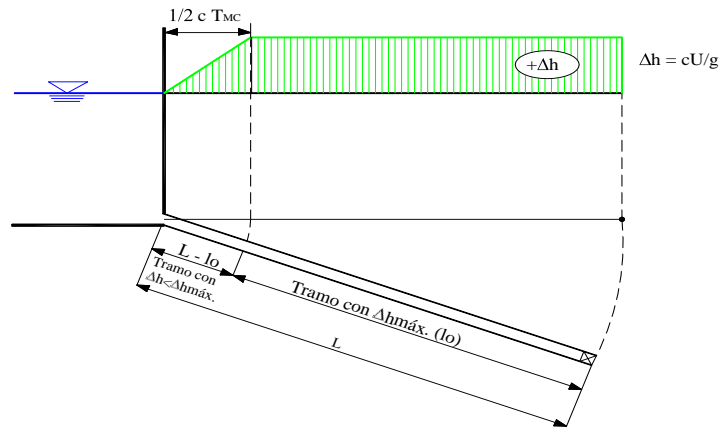


Figura 3
Diagrama de Sobrepresiones
Para cierre lineal

En la *Figura 4* se puede apreciar que cuando T_{Mc} es nula tenemos el caso del cierre instantáneo y cuando $T_{Mc} = 2L/c$ la máxima sobrepresión alcanza solo a la sección del obturador, siendo los casos intermedios, los que se representan en la misma *Figura 4*.

En consecuencia para el *caso de cierres bruscos*, los diagramas envolventes son los representados, en los que se muestran los diagramas para leyes de cierre del obturador, en las que el *Tiempo de Maniobra de Cierre* varía desde 0, hasta $2L/c$, pasando por maniobras intermedias con *Tiempos de maniobra* $1/4$; $1/2$ y $3/4$ de $2L/c$ respectivamente.

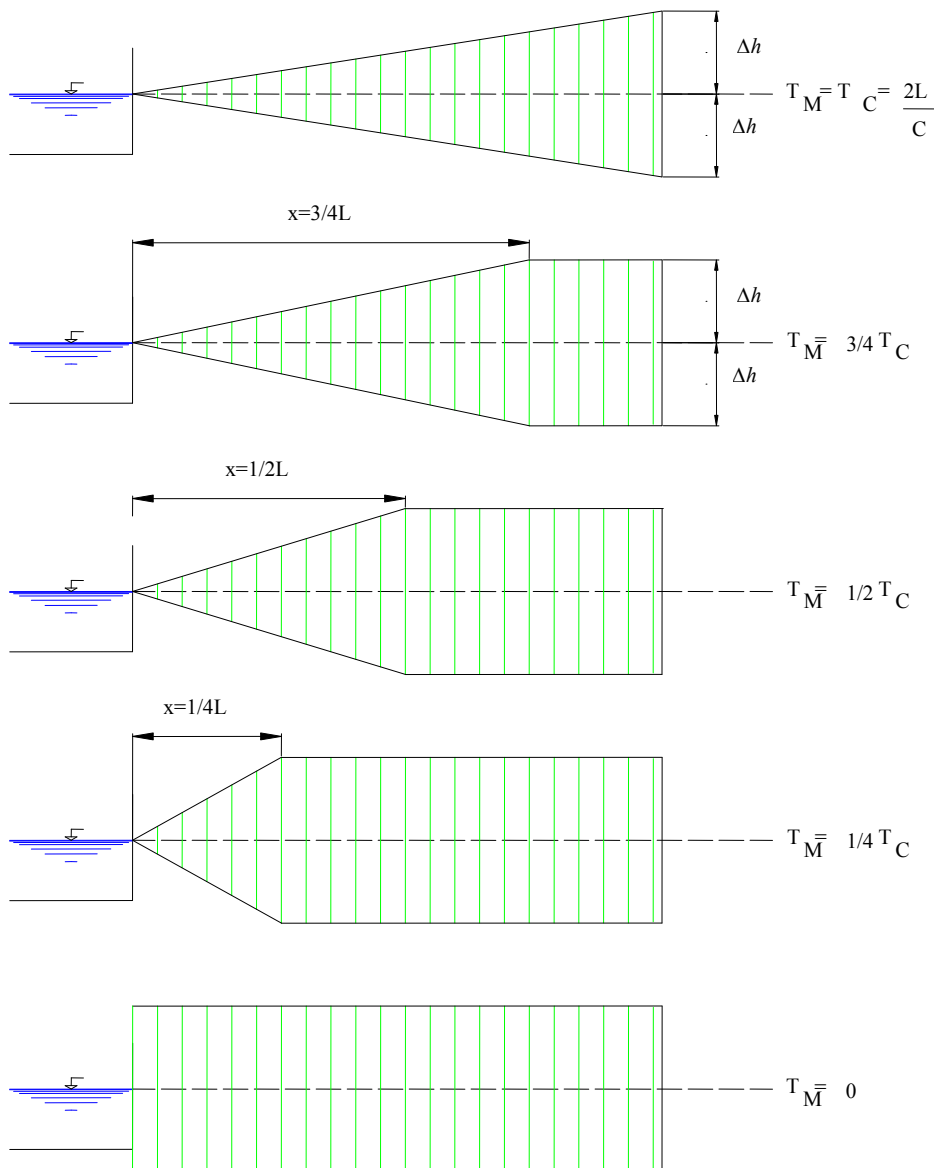
Nótese que para $T_{Mc} = 0$ se tiene que $\pm \Delta h$ es la *máxima* y *mínima* y abarca toda la conducción, dando lugar a la situación más comprometida para la tubería.

- Cuando $T_{Mc} = T_c / 4$, $1/4$ de conducción no está jamás sometida a la sobrepresión máxima.

- Cuando $T_{Mc} = T_c / 2$, $1/2$ de conducción no está jamás sometida a la sobrepresión máxima.

- Cuando $T_{Mc} = 3T_c / 4$, $3/4$ de conducción no está sometida jamás a la sobrepresión máxima.

- Cuando $T_{Mc} = T_c$, sólo la sección del obturador alcanza la sobrepresión máxima.



Figuras 4
Diagramas envolventes para tiempos de cierre bruscos

Del análisis de los diagramas, se desprende la enseñanza de que a medida que la maniobra de cierre del obturador es más lenta, la conducción resulta menos comprometida. En resumen, a medida que la maniobra de cierre tiende a hacerse instantánea, los diagramas de envolventes máximo y mínimo alcanzan la máxima $\pm \Delta h$, en toda la extensión de la conducción.

En cambio cuando tiende a ser más lenta, hay partes de la conducción que nunca serán comprometidas, llegando al caso que cuando el tiempo de maniobra de cierre coincide con el tiempo que tarda la onda en ir y volver hasta el obturador, es decir $2L/c$, **sólo en la sección del obturador se alcanza el máximo posible dado por cU/g .**

Cuando la maniobra de cierre es lenta (T_{Mc} mayor que $2L/c$), la sobrepresión no alcanza el máximo nunca **y puede hacerse tan pequeña como se desee**, haciendo la maniobra **lo suficientemente lenta**.

Justamente la teoría desarrollada por los *Profesores Miganne y Cotta*, y difundida por el *Profesor Dante Dalmati*, permite deducir fácilmente la famosa ecuación de *Michaud* que simboliza los conceptos expuestos y que está dada por

$$\Delta h^* = \frac{2LU}{g T_{Mc}}$$

En la que:

- Δh^* es la *máxima sobrepresión* para maniobra de cierre lenta
- L es la *Longitud* de la conducción
- g es la *aceleración normal* de la gravedad
- T_c es el *tiempo de maniobra de cierre lento*

Nota: Nótese que en la anterior haciendo T_{cL} lo suficientemente largo Δh^* , puede acotarse a voluntad

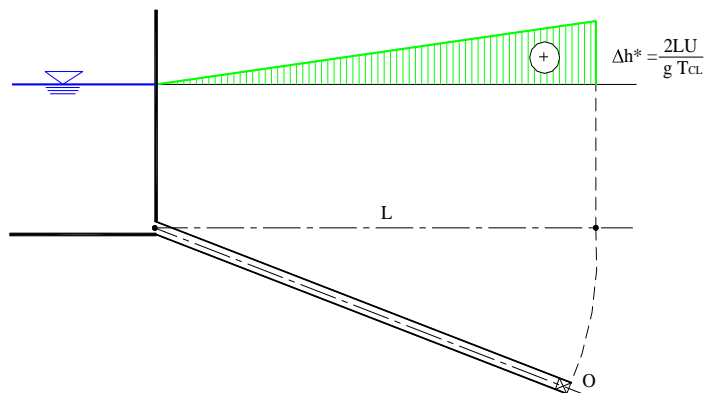


Figura 5
Diagrama Envolute para Maniobra de Cierre Lenta

Es de destacar lo simple que resulta el estudio del *Golpe de Ariete*, a partir de los *diagramas envolventes de sobrepresiones*. Los mismos *acotan* con valores que no pueden ser sobrepasados, la *compleja realidad* (que se resolvería con mayor exactitud conceptual y numérica, con la “*solución ortodoxa*”) y lo hace con una *sencillez notable*.

En efecto, todo se reduce a cálculos muy simples y al trazado de los diagramas, **admitiendo como negativo el diagrama simétrico del hallado**, tal como se muestra en la *Figura 4*.

La aparente “*debilidad*” conceptual de la metodología de los sencillos diagramas de referencia, es la hipótesis de la **validez de la maniobra lineal de cierre**, la que es casi imposible de lograr en la práctica operando con una sola válvula. Se resuelve con el sencillo trámite de verificar si la maniobra real “*se cuelga*” de la ley lineal o es *convexa* con respecto a ella.

En efecto, en el primer caso la solución simplificada, brinda valores ligeramente por encima de los reales (tecnológicamente aceptables), y en el segundo, **que obviamente resultaría una maniobra no aconsejable por lo severa**, quedaría acotada la realidad, por el diagrama correspondiente al ***Cierre Instantáneo***.

En la *Figura 6* se aprecia una “*maniobra real convexa*” en relación con *la ley lineal*, la que daría sobrepresiones reales que superan a las del diagrama considerado con cierre lineal.

De ser así el diagrama correspondiente al *Cierre Instantáneo*, acotaría convenientemente y del lado de la seguridad, a las sobrepresiones a las que se vería sometida la conducción.

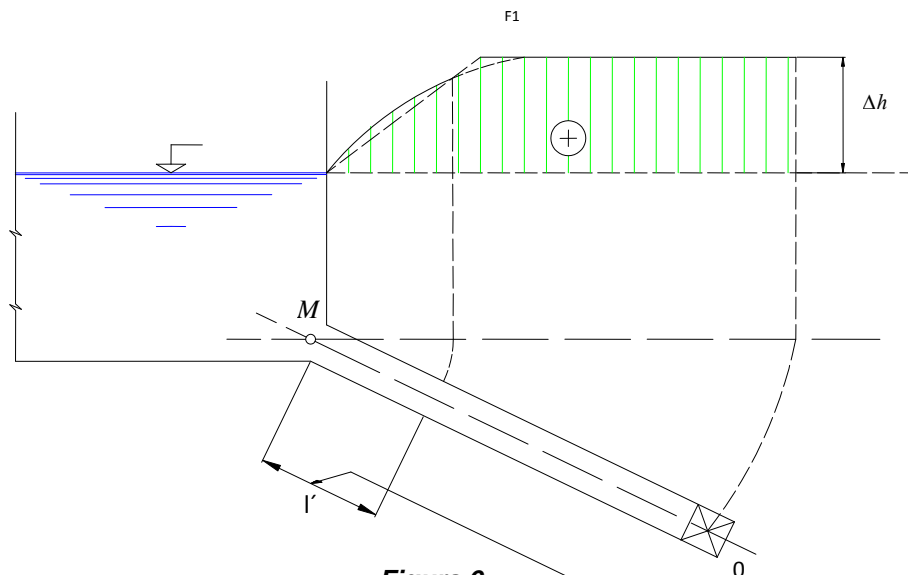


Figura 6
Ley de cierre convexa con respecto a la ley lineal

4.- CONCLUSIONES

- La hipótesis de la *ley lineal de cierre* del obturador brinda una teoría sencilla y suficientemente aproximada para el desarrollo conceptual de la teoría del Golpe de Ariete, y el consecuente trazado de los *diagramas de envolventes de sobrepresiones máximas y mínimas*.

- Los diagramas de referencia posibilitan acotar convenientemente, los máximos y mínimos posibles en cada sección, por lo que constituyen una muy útil herramienta; a la vez pedagógica y de cálculo.

- Los diagramas permiten entender fácilmente por que las maniobras de cierre son menos agresivas para la conducción a medida que se hacen más lentas.

- Los diagramas han posibilitado el desarrollo de metodologías de cálculo y de selección de Válvulas Anticipadoras de Sobrepresiones (ver TOMO 2 Cap. 9, del libro "*Hidráulica General y Aplicada a la Ingeniería Sanitaria*", EUDEBA).

- Su valor pedagógico y su practicidad es tal, que se recomienda fuertemente su difusión y utilización.

- Es importante y merecido difundir la autoría de los *Profesores Ingenieros Víctor Miganne y Diego Cotta*, y la eficiente difusión del *Profesor Ingeniero Dante Dalmati*, de la Teoría y Práctica de los *Diagramas Envolventes de Sobrepresiones Máximas y Mínimas*.

- Es mi deseo que el presente artículo sirva fundamentalmente, para honrar a los nombrados profesores, excelentes maestros, quienes han creado y difundido, respectivamente y con gran humildad, la teoría y práctica de los diagramas envolventes de sobrepresiones, desde las *Cátedras de Hidráulica* de las *Universidades de Buenos Aires y de La Plata*.