

FORMULAS DE CALCULO, INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD, VALOR MAXIMO DEL GOLPE DE ARIETE EN OPERACIONES LENTAS (*)

Por ENRIQUE MENDILUCE

Dr. Ingeniero Industrial.
Asesor Técnico de Matubo, S. A.

En este trabajo de investigación divulgadora se examinan comparativamente los resultados de tres fórmulas establecidas para calcular el golpe de ariete en operaciones lentas, llegando el autor a la conclusión de que es preferible utilizar la fórmula sencilla de Michaud, menos expuesta a errores operatorios y de aproximación conocida, por ligero exceso.

Se deduce también en este trabajo que la sobrepresión, en operaciones lentas, no aumenta en razón directamente proporcional a la velocidad de impulsión, por lo que se recomienda que ésta sea fijada por otros condicionantes, protegiendo la instalación por cualquiera de los medios a nuestro alcance.

Demuestra analítica y experimentalmente que la presión total de parada puede alcanzar el triple de la presión estática, cuando existe una opinión notoriamente extendida que establece este límite en el doble de dicha presión.

1. Fórmulas de cálculo.

La lectura de un artículo sobre golpe de ariete en impulsiones, publicado en una revista internacional a finales del pasado año, cuyo autor, el ingeniero por la Escuela Politécnica Federal de Zurich, Shaul Bar Shlomo, del Instituto de Hidrología de Haifa, propone la utilización de la fórmula del doctor Angus para calcular la sobrepresión en operaciones lentas, excitó nuestro deseo de realizar un estudio sobre los valores que proporciona esta fórmula en comparación con los que proporcionan las de Michaud y del conde de Sparre.

La fórmula del doctor Angus es la siguiente:

$$\sqrt{\frac{H_T}{H_m}} = \sqrt{\left| \frac{av}{2gH_m} \left(1 - \frac{2L}{at} \right) \right|^2 + \frac{av}{gH_m} + 1 - \frac{av}{2gH_m} \left(1 - \frac{2L}{at} \right)}$$

siendo H_T la presión total después de la parada, y H_m la presión en el conducto antes de la maniobra.

El pionero del cálculo del golpe de ariete fue Michaud, quien hace aproximadamente un

siglo, obtenía su divulgada fórmula de atractiva sencillez. En 1896 se publicaron los trabajos de Joukowski, que ponían límite al crecimiento lineal de Michaud, y en 1904 publicaba Allievi su notable teoría, obteniendo su fórmula de análoga sencillez, aceptada mundialmente sin objeción para operaciones rápidas.

Dado que Michaud no tuvo en cuenta la elasticidad del conducto ni la compresibilidad del agua, el conde de Sparre, siguiendo la teoría de Allievi, establecía pocos meses después de éste, sus fórmulas aplicables a las operaciones lentas, en las que corregía esta omisión:

$$\Delta H = \frac{2Lv}{gt} \cdot \frac{1}{1 + \frac{av}{2gH} \left(1 - \frac{2L}{at} \right)}$$

cuando

$$\frac{av}{2gH} \leq 1$$

y

$$\Delta H = \frac{2Lv}{gt} \cdot \frac{1}{2 \left(1 - \frac{Lv}{2gHt} \right)}$$

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta revista hasta el 31 de mayo de 1976.

cuando

$$\frac{av}{2gH} > 1$$

Resulta evidente la gran atracción que sobre el que ha de realizar un cálculo ejerce una fórmula sencilla, y en este caso la elección, a tal fin, entre las tres que analizamos —una de ellas doble—, no ofrece duda.

Es conveniente, no obstante, antes de tomar una decisión a este respecto, conocer las diferencias entre los valores que nos proporcionan tales expresiones.

Disponemos para este estudio de las interesantes experiencias y ensayos realizados por Camichel, Eydoux y Gariel en los saltos de agua de Couteret (Francia) publicados por Dunod en 1918 bajo el título *Etud theorique et experimentel des coup de belier*, quienes después de tres mil experiencias llegaron a la conclusión, entre otras, de que la fórmula de Michaud es la expresión exacta del valor máximo *maximum* del golpe de ariete en operaciones lentas, si bien este valor puede no alcanzarse en determinadas circunstancias.

Juzgamos de claro interés el estudio comparativo que hemos realizado para conocer el alcance de la inexactitud que podemos cometer al utilizar esta fórmula, y para ello hemos comparado los resultados obtenidos de la aplicación de las tres fórmulas a varias impulsiones de longitud igual a la crítica, y sucesivamente hemos repetido los cálculos para determinar los valores del golpe de ariete a distancias $\frac{3L}{4}$, $\frac{L}{2}$, $\frac{L}{4}$ y $\frac{L}{8}$, resultados que resumimos en sus valores medios en el cuadro siguiente, en el que para cada longitud hacemos figurar la relación entre el valor del golpe de ariete, proporcionado por cada fórmula y el del punto crítico:

$$\frac{\Delta H}{av} \cdot g$$

Conocemos bien que en el punto crítico de cada impulsión; es decir, en el punto que se halla a la distancia $L = l_c = \frac{at}{2}$ del final de

una impulsión, la aplicación de las fórmulas de Michaud y Allievi dan el mismo resultado, siendo fácil de comprobar que las otras tres cumplen con esta condición.

Comparación de valores de ΔH			
Longitud	Michaud	Sparre	Angus
$L = l_c$	1	1	1
$\frac{3l_c}{4}$	0,75	0,64	0,64
$\frac{l_c}{2}$	0,50	0,33	0,33
$\frac{l_c}{4}$	0,25	0,16	0,10
$\frac{l_c}{8}$	0,12	0,08	0,03

Representando gráficamente estos resultados obtendremos una visión clara y rápida de las diferencias entre ellas.

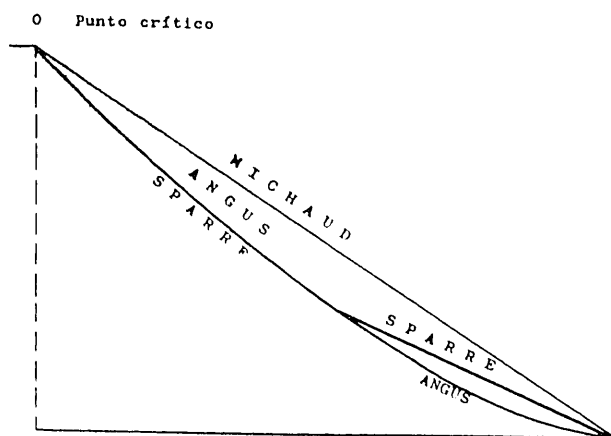


Fig. 1.—Comparación gráfica de Michaud, Angus y Sparre.

Como representación gráfica de un fenómeno físico parecen más aceptables la recta de Michaud o la curva de Angus, pero como sabemos que el primero omitió la compresibilidad del agua y la dilatación del conducto aceptamos que la curva de Angus pueda ser la interpretación más aproximada de la realidad.

Ahora bien, todos nuestros trabajos han sido siempre orientados a facilitar los cálculos, y en este tema a obtener la presión máxima que habrá de soportar la tubería de una impulsión con la mayor aproximación posible en atmósferas, sin olvidar que la mayor parte de las 3.000 ó 4.000 impulsiones que se realizan en España anualmente han de ser calculadas por técnicos que no disponen de un gabinete de cálculo ni de ordenadores u otros medios análogos y que, por tanto, prefieren fórmulas sencillas menos expuestas a errores, si conocen su aproximación y ésta es por escaso exceso.

En efecto, si analizamos una impulsión cuyo golpe de ariete en el punto crítico sea de 120 m, valor muy frecuente en la práctica, vemos que la máxima diferencia absoluta entre los valores que proporciona Michaud y Angus será de dos atmósferas a la mitad de la distancia crítica, y esta diferencia se reduce a 1,5 y 1,2 atmósferas a la cuarta y octava parte de su longitud crítica, respectivamente, diferencias de escasa o nula repercusión en el timbraje de las tuberías necesarias.

El que desee afinar y tenga confianza en la fórmula de Angus puede determinar previamente la relación $\frac{L}{L_c}$, y en el caso de que el valor obtenido sea menor que 0,75 puede optar por aplicarla directamente o bien introducir en la fórmula de Michaud el coeficiente reductor que le corresponda según el cuadro que hemos presentado.

Nuestro criterio personal ya lo dejamos expuesto, considerando más eficaz y tranquilizador el empleo de expresiones sencillas de conocido margen de seguridad que las de desarrollo laborioso y de una mayor exactitud hipotética, que en este caso concreto no hemos vislumbrado en nuestra experimentación.

2. Influencia de la velocidad.

Aceptada la fórmula de Michaud como expresión del golpe de ariete en operaciones lentas o impulsiones "cortas" pudiera interpretarse a primera vista que el valor de ésta sobre presión ha de ser directamente proporcional a la velocidad, y esta circunstancia puede inducir al proyectista a adoptar velocidades discretas que resulten antieconómicas, según aconsejaría la representación hipotética de la figura 2.

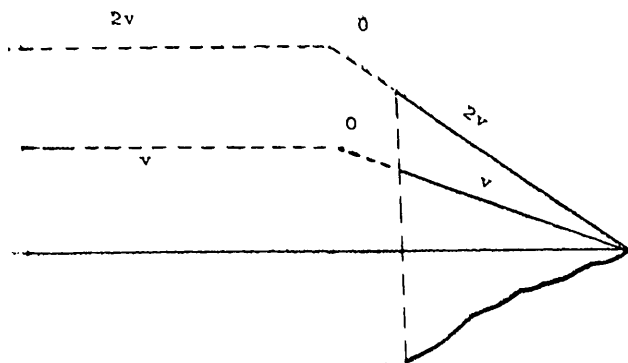


Fig. 2. — Representación hipotética del golpe de ariete.

Aceptada también nuestra fórmula del tiempo de parada, avalada por la experimentación anterior a su obtención y por las experimentaciones y comprobaciones analíticas durante los doce años posteriores, podemos plantear el siguiente razonamiento.

Si prescindimos en ella del coeficiente C, y despreciando el aumento de pérdida de carga con el de la velocidad, tendremos:

$$\Delta H = \frac{\frac{1}{2} L V}{\frac{K L V}{g H_m}} = \frac{2 H_m}{K}$$

expresión de la que deducimos que en tales supuestos, el golpe de ariete resultaría constante para cualquier velocidad según la representación gráfica hipotética de la figura 3.

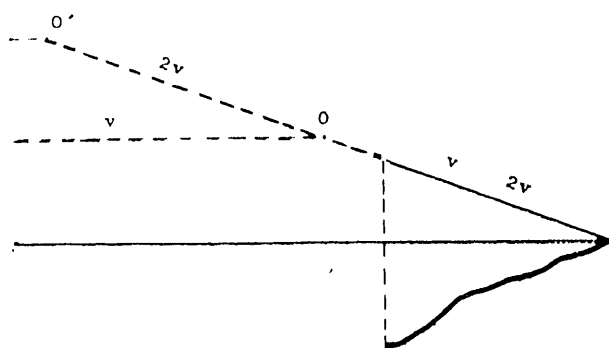


Fig. 3. — Representación hipotética del golpe de ariete.

En la realidad no ocurre de ninguna de las dos formas extremas expuestas, sino de una manera intermedia, y para comprobarlo hemos efectuado el cálculo de los valores del golpe de

ariete en impulsiones de distinto diámetro representativo para velocidades de 1 y 2 m/s de distintas longitudes, y las alturas de elevación para que resulten cortas para los dos regímenes, formando con los resultados el siguiente cuadro, que no tiene otra finalidad que proporcionar la mejor idea del crecimiento de la sobrepresión en función de la velocidad.

Ø	V	4.000 m		2.000 m		500 m	
		H	%	H	%	H	%
250	1	74		92		44	
250	2	107	144	144	156	60	136
500	1	70		80		44	
500	2	87	124	108	135	58	131
1.000	1	68		76		44	
1.000	2	85	117	90	118	57	129

Se observa que aunque se produce cierta dispersión en los resultados, el aumento promedio del golpe de ariete del 33 por 100, cuando la velocidad de impulsión se duplica de 1 a 2 m/s, es marcadamente representativo, dándonos clara idea de lo que perseguimos en estos comentarios.

La figura 5 sirve para fijar definitivamente las ideas al respecto. En ella vemos que el punto crítico se vería sometido a una presión doble cuando la velocidad se duplica, pero como simultáneamente la longitud crítica aumenta, la pendiente de Michaud aumenta también, aunque en menor proporción.

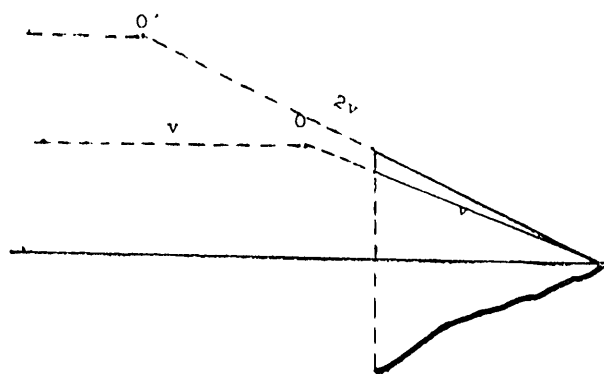


Fig. 4.—Representación real del golpe de ariete promedio.

Se deduce de lo que antecede que no debe limitarse, en general, la velocidad de una instalación por temor a la sobrepresión que produzca, ya que será siempre más rentable fijar la velocidad económica, por consideraciones de otra índole y proteger la instalación, por medio de cualquiera de los distintos sistemas a nuestro alcance.

3. Valor máximo.

Sigue siendo frecuente la opinión de que la presión total máxima por parada de bomba es el doble de la presión estática, y aunque ya nos referimos a ello en nuestra ponencia del I Coloquio Nacional sobre Golpe de Ariete de 1965 aprovechamos esta comunicación para insistir en esta cuestión, que juzgamos interesante.

No parece fácil establecer analíticamente esta relación exacta, pero el intento realizado por Camichel en su publicación antes citada le condujo al resultado $\Delta H = 2H$; es decir, $H_T = 3H$, si bien reconocía utilizar para ello una de las fórmulas del conde de Sparre fuera del campo de utilización señalado por su autor.

Nosotros vamos a llegar a un resultado similar por dos caminos: analítico y experimental.

Si en la fórmula de Michaud sustituimos el tiempo de parada por el que nosotros le atribuímos tendremos:

$$\Delta H = \frac{2LV}{g} = \frac{2LV}{g \left(C + \frac{KLV}{gH} \right)}$$

Analizando la expresión obtenida vemos que para longitudes pequeñas y alturas manométricas grandes, el coeficiente C se anula, y el K es 2, y por tanto:

$$\Delta H = \frac{2LV}{2LV} = H_m$$

Para longitudes mayores, $C = 1$:

$$\Delta H = \frac{2H_m}{\frac{gH_m}{LV} + K}$$

expresión en la que una longitud media próxima a 1.000, para la que $K = 1,5$, y velocidad reducida, con altura manométrica de varias decenas de metros, nos dará el resultado:

$$\Delta H < H_m$$

Hasta aquí está justificado el criterio que comentamos, pero si la longitud es grande ($K = 1$) y si la velocidad es también grande se ve claramente que con alturas pequeñas, el término $\frac{g H_m}{L v}$ tiende a anularse y, por tanto, el límite máximo será:

$$\Delta H \approx 2 H_m$$

Por tanto, el que confíe en el límite inicialmente mencionado podrá encontrarse con sorpresas desagradables.

Profundizando más en la cuestión hemos de recordar que en nuestra fórmula hicimos figurar por comodidad nemotécnica, y por facilidad de cálculo además de un ligero margen de seguridad, la presión manométrica, cuando el cálculo introduce el término $H + J/2$, lo que permite sospechar que pudiera incluso resultar:

$$\Delta H > 2 H$$

Como confirmación experimental hemos de decir que hacia 1962 solicitamos de la Administración la reforma de un proyeco ya adjudicado porque la presión total prevista en la impulsión, de un valor doble de la estática, resultaba menor que la que proveíamos, según cálculos presentados.

La reforma se aprobó y la obra fue ejecutada, comprobándose en presencia del ingeniero director de la obra, que la presión total en parada alcanzó el 246 por 100 de la presión estática, a pesar de que la velocidad era discreta.

En otro caso, extremo en nuestra experimentación, por su gran longitud frente a su escasa altura, la presión total registrada después de la parada, fue exactamente el 300 por 100 de la presión estática.

Ambos casos citados figuran entre los que nos sirvieron para poner a punto nuestra fórmula experimental (*).

Creemos haber dejado claro que es el golpe de ariete el que puede alcanzar un valor doble de la presión estática, al que hay que sumarle ésta, con lo que llegamos a una presión total del triple de la altura de elevación.

(*) *El golpe de ariete en impulsiones*. Servicio de Publicaciones de la E. S. T. de Ingenieros de Caminos. Madrid, 1974.