

**UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA**

**CÁTEDRA DE "CONSTRUCCIONES HIDRÁULICAS"**

**EL AIRE EN LAS CONDUCCIONES  
A PRESIÓN**

**VERSIÓN AL 28/02/2002**

**Ing. Luis E. PÉREZ FARRÁS**

**INDICE**

<b><u>1. INGRESO Y SALIDA DEL AIRE EN LAS CONDUCCIONES A PRESIÓN</u></b>	<b>1</b>
<b><u>2. CONSECUENCIAS DEL AIRE EN LAS CONDUCCIONES</u></b>	<b>2</b>
2.1 GENERALIDADES	2
2.2 EL "GOLPE DE ARIETE INDUCIDO POR ESCAPE DE AIRE"	4
2.3- EVENTUALES SOBREPRESIONES POR TRANSFERENCIA DE ENERGÍA AGUA - AIRE	7
<b><u>3. ELEMENTOS DE DISEÑO DE VÁLVULAS PARA ESCAPE O INGRESO DE AIRE DE LAS CONDUCCIONES A PRESIÓN.</u></b>	<b>9</b>
3.1 CONCEPTOS BÁSICOS Y DISEÑOS TRADICIONALES	9
3.2 CRITERIOS MODERNOS DE DISEÑO DE VÁLVULAS DE AIRE	12
3.2.1 VÁLVULAS PARA PEQUEÑO CAUDAL DE AIRE A PRESIÓN DE TRABAJO	12
3.2.2 VÁLVULAS PARA GRAN CAUDAL DE AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	13
<b><u>4. SELECCIÓN DE VÁLVULAS</u></b>	<b>14</b>
4.1 PARA SALIDA DE PEQUEÑOS CAUDALES DE AIRE A PRESIÓN DE TRABAJO	14
4.2 INGRESO DE GRAN CAUDAL DE AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	14
4.3 EGRESO DE GRAN CAUDAL DE AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA	16
4.4 VÁLVULAS DE TRES EFECTOS	17
<b><u>ANEXO: DISCUSIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE ESCAPE DEL AIRE</u></b>	<b>19</b>

---

## **EL AIRE EN LAS CONDUCCIONES A PRESIÓN**

### **1. INGRESO Y SALIDA DEL AIRE EN LAS CONDUCCIONES A PRESIÓN**

En términos generales podemos afirmar que el vaciado de las conducciones a presión, ya sea provocado deliberadamente (atendiendo a causas de mantenimiento) o por razones accidentales (como eventuales colapsos) introduce depresión, con las consiguientes consecuencias que evaluaremos en el desarrollo del presente texto.

En las impulsiones en particular, las depresiones accidentales se dan frecuentemente como resultante de los inevitables cortes de energía y el consecuente cese del bombeo.

Las depresiones habrán de significar en todos los casos, un funcionamiento defectuoso en los procesos de vaciado y posterior llenado, si no se tienen en cuenta criteriosamente, los ingresos y salidas del aire. Incluso hasta puede significar el colapso por "aplastamiento", para el caso de materiales flexibles y por lo tanto muy deformables ante las cargas externas debidas al relleno y al tránsito, cuyos efectos se suman al originado por las presiones relativas negativas (depresión).

El nombrado ingreso de aire, para contrarrestar los efectos nocivos de las depresiones, implica además la evacuación posterior del mismo, una vez que se restablece el funcionamiento normal de la conducción.

Las causales que motivan el ingreso de aire en las conducciones y su consecuente y posterior evacuación, se resumen en los casos posibles que se detallan a continuación:

- a) Vaciado normal, lo que requiere la instalación de válvulas para el ingreso de aire en los puntos altos de la conducción. Durante el posterior llenado se tendrá una evacuación del aire ingresado en condiciones de presión atmosférica (presión relativa nula).
- b) Vaciado accidental, el que siempre es imprevisto y que requiere previsiones similares a las especificadas precedentemente. En el caso de cese de bombeo en impulsiones por corte de energía, la válvula de retención, la que debe instalarse obligatoriamente para proteger al rotor de la bomba para que no gire en sentido contrario, imposibilita el vaciado por esa causa, quedando sólo como posibilidad de vaciado el colapso de la conducción por alguna causa accidental no prevista y contra la que no existen protecciones.
- c) Depresión originada en la onda negativa por "Golpe de ariete". Es el caso de las instalaciones de impulsión cuando se produce el arranque o el detenimiento del equipo de bombeo, siendo en general de mayor magnitud éste último. Es de destacar que en éste caso la necesaria evacuación del aire por los puntos altos de la instalación, se opera "en presión de línea".

En la práctica (y con buenos resultados) se considera que el caudal de aire a ingresar al sistema debe ser igual al caudal de agua "que se pierde" por la depresión y que está dado por la expresión:

$$Q = \mu U s \quad (1)$$

En la que:

- Q es el caudal de aire a incorporar
- U es la velocidad media del aire ingresante
- $\mu$  es el "coeficiente de contracción" de la vena fluida (aire ingresante por un orificio)
- s es la sección del orificio de ingreso.

La termodinámica, en el capítulo correspondiente a "Toberas", prueba que al establecerse una diferencia de presiones entre dos compartimentos separados y vinculados a través de un orificio, la velocidad del aire supera siempre un valor mínimo de 200 m/s, el que se establece con una diferencia de presiones tan baja como de 2 m de columna de agua. En la tabla que sigue se brindan los valores para depresiones comprendidas entre 2 y 5 m de columna de agua:

Depresión (m.c.d.a.)	2	3	4	5
U (m/s)	200	270	325	400

## 2. CONSECUENCIAS DEL AIRE EN LAS CONDUCCIONES

### 2.1 GENERALIDADES

El agua contiene una determinada cantidad de aire disuelto (solubilizado) que puede oscilar entre los 25 y 40 cm<sup>3</sup>/l, y que su variación con la presión y la temperatura, está regida por la ley de Henry.

En los puntos altos de la instalación y en todas aquellas singularidades que provocan disminuciones de presión, se produce la salida de gas en forma de un burbujeo. Las burbujas pueden ser arrastradas y tienden a quedar "atrapadas" en los nombrados puntos altos, formando "bolsones". Dado que ésta problemática se origina en el funcionamiento "en régimen" de la conducción, la eventual evacuación del aire debe realizarse a la presión de línea.

Los problemas que pueden originar los bolsones de aire atrapados pueden resumirse como sigue:

- a) Originan pérdidas de carga que pueden llegar a ser tan importantes como para impedir el escurrimiento.

- b) Al desplazarse en forma totalmente aleatoria, perturban el régimen de escurrimiento, el que puede hacerse oscilante.
- c) Al encontrar eventualmente una salida (por ejemplo ventilaciones) originan "golpes de ariete inducidos por escape de aire".

Nota: Este último fenómeno será oportunamente desarrollado en detalle.

Cabe destacar que estos efectos son de características destructivas, tal como puede deducirse de las fórmulas correspondientes y apreciarse en los ejemplos mostrados por la Figura 1.



**Figura 1**

Ejemplos de destrucción de tuberías provocada por el aire atrapado en las mismas

De todo lo expuesto se concluye que, para evitar problemas de mal funcionamiento o incluso de colapso en las conducciones a presión, es necesario provocar y controlar el ingreso y salida del aire del interior de las mismas.

El nombrado control significa:

- a) Proyectar las conducciones de forma tal que posibiliten el desplazamiento del aire hacia los puntos altos, tratando de esta forma, de minimizar el desplazamiento errático de los bolsones que se forman con el mismo. Los criterios normativos más actualizados aconsejan generar pendientes mínimas de los trazados de manera de conseguir el efecto deseado y siguiendo las recomendaciones que siguen:

Tramos ascendentes ----- 1 a 3 por mil  
 Tramos descendentes ----- 3 a 5 por mil

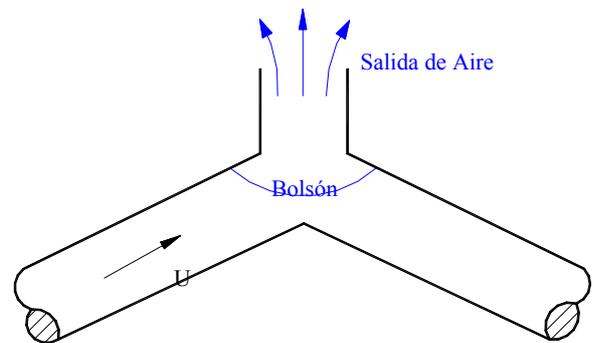
Nota: En general puede encontrarse cierta resistencia en los proyectistas, puesto que los mayores costos de excavación que implica generar una "poligonal adecuada" constituyen una razón de peso en contra de un diseño eficiente.

- b) Seleccionar e instalar adecuadamente, "válvulas de aire" en puntos altos e intermedios. Resulta conveniente instalarlas en todo quiebre de pendientes y si las distancia entre quiebres es grande se recomienda instalar válvulas por lo menos a razón de una por kilómetro.

Entre los tipos de válvulas que ofrece el mercado, es preciso distinguir puesto que su diseño es diferente, a aquellas destinadas a la "evacuación de pequeños caudales a la presión de servicio", de las que posibilitan la "evacuación o ingreso de importantes caudales a la presión atmosférica".

## 2.2 EL "GOLPE DE ARIETE INDUCIDO POR ESCAPE DE AIRE"

En el esquema de la Figura 2, puede ser apreciado como dentro de una conducción a presión, un bolsón de aire relativamente grande, al encontrar una salida grande para ventilación, induce la movilización de un volumen idéntico de agua generando una velocidad inducida "U" en la misma. Obviamente, si el líquido estuviere inicialmente en movimiento, ésta velocidad se suma a la propia del escurrimiento.



**Figura 2**

Escape de un bolsón de aire

Teniendo en cuenta que la velocidad de escape del aire es sumamente elevada (no menor a los 200 m/s) al cesar el escape del mismo y comenzar la salida del agua, ésta lo hará con una velocidad mucho menor, en función, además, de su mucha mayor viscosidad (orden de magnitud de 1 a 2 m/s contra los 200 m/s mínimos del escape del aire). Este hecho implica de por sí, un detenimiento prácticamente instantáneo del caudal de agua inducido por el escape de un caudal idéntico de agua, originando en consecuencia una sobrepresión por "golpe de ariete".

Llamando  $s$  a la sección de la ventilación,  $\Omega$  a la de la conducción y  $w$  a la velocidad del aire, se tiene, teniendo en cuenta la ecuación de continuidad, un caudal de aire evacuado, dado por:

$$Q = w \cdot s \quad (2)$$

El caudal de agua inducido por el escape del bolsón de aire será:

$$Q = U \cdot \Omega \quad (3)$$

Teniendo en cuenta que ambos caudales son necesariamente iguales, de igualar las (2) y (3) surge:

$$Q = w \cdot s = U \cdot \Omega$$

De donde:

$$U = \frac{w \cdot s}{\Omega} \quad (4)$$

La expresión de Allievi para la máxima sobrepresión por golpe de ariete para "cierre brusco" es:

$$\Delta h = \frac{c \cdot U}{g} \quad (5)$$

Reemplazando la expresión de la velocidad (4) en la (5) se obtiene:

$$\Delta h = \frac{c \cdot w \cdot s}{g \cdot \Omega} \quad (6)$$

En la que "c" es la celeridad con que se propagan las ondas originadas en el "detenimiento" del agua, y que se recuerda que responde a la expresión:

$$c = \frac{\sqrt{\frac{\varepsilon}{\rho}}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon \cdot E}{D \cdot e}}} \quad (7)$$

En la que:

- $\varepsilon$  es el módulo de compresibilidad del agua.
- $\rho$  es la masa específica del agua.
- $D$  es el diámetro interno de la conducción.
- $E$  es el módulo de elasticidad del material del caño.
- $e$  es el espesor del caño.

En primera aproximación  $c$  vale 1.000 m/s para los materiales rígidos y puede aceptarse 300 m/s como un valor usual para caños flexibles de clase nominal baja. Para estos caños pero de clase superior a la 10 (caso en el que ya puede discutirse en algunos materiales plásticos si el caño sigue comportándose como flexible) se recomienda el cálculo exacto con la (7).

Obviamente esta ecuación puede ser utilizada en todos los casos, cuando el proyectista pretenda trabajar con más exactitud.

Se propone obtener la sección del orificio, de manera tal que el valor de la sobrepresión  $\Delta h_{\text{máx}}$ , resulte convenientemente acotado. Para ello se despeja  $s$  de la ecuación (6) y se obtiene consecuentemente:

$$s = \frac{\Delta h_{\text{máx}} \cdot g \cdot \Omega}{c \cdot w} \quad (8)$$

Y teniendo en cuenta que la sección del orificio es:

$$s = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Y que la sección de la conducción es:

$$\Omega = \frac{\pi \cdot D^2}{4}$$

Entonces el diámetro del orificio que no permita una sobrepresión superior a  $\Delta h_{\text{máx}}$  resulta:

$$d = \sqrt{\frac{\Delta h_{\text{máx}} \cdot g \cdot D^2}{c \cdot w}} \quad (9)$$

Por lo que:

$$d = \sqrt{\frac{\Delta h_{\text{máx}} \cdot g \cdot D^2}{c \cdot w}} = D \sqrt{\frac{\Delta h_{\text{máx}} \cdot g}{c \cdot w}} \quad (10)$$

En general, y siguiendo el criterio de la normativa europea, se adopta para la máxima sobrepresión por "golpe de ariete inducido por escape de aire" el valor 5 m.d.c.a.

Aceptando en términos tecnológicos (de primera aproximación) que la aceleración normal de la gravedad es casi 10 m/s<sup>2</sup>, la (9) para las conducciones que se comportan como rígidas (fibrocemento-acero de espesor importante.-hormigón pretensado-fundición dúctil) resulta:

$$d = D \sqrt{\frac{0,05}{w}}$$

Adoptando además una velocidad mínima de salida del aire de 200 m/s, se obtiene de la anterior, la expresión de aplicación práctica que sigue:

$$d = 0,01581D \cong 0,016.D \quad (11)$$

La expresión anterior brinda la relación, válida para conducciones de material "rígido", entre el diámetro del orificio de la ventilación y el propio de la conducción a la que sirve, y siempre de acuerdo con la normativa europea.

La expresión equivalente para conducciones de material flexible, resulta en primera aproximación (adoptando una celeridad de 300 m/s):

$$d = 0,02826D \cong 0,028.D \quad (12)$$

### 2.3- EVENTUALES SOBREPRESIONES POR TRANSFERENCIA DE ENERGÍA AGUA - AIRE

Es de destacar que desde hace muchos años está difundido entre los instaladores de caños de materiales de comportamiento a la rotura como "frágiles", el concepto de eventuales colapsos en las pruebas hidráulicas de rigor, atribuibles a "explosiones debidas al aire atrapado".

Las mismas encontrarían su explicación en la transferencia de energía dinámica por parte de masas importantes de agua, a bolsones relativamente pequeños de aire atrapado en el interior de las conducciones a presión.

El antecedente publicado más antiguo lo constituye una edición del manual "Uralita" de España (productores de caños de PVC, de Fibrocemento y otros entre una enorme cantidad de productos de aplicación en las obras de Ingeniería y de Arquitectura) que data de 1957 y que es reiterada en todas las ediciones, incluyendo la más actualizada de 1987.

En el antecedente de referencia se brinda un ejemplo numérico, en el que se determina la sobrepresión que alcanza un bolsón de aire de volumen  $\tau_0$ , atrapado en la parte más alta de una conducción siempre ascendente, de diámetro  $D$  y longitud  $L$ , y admitiendo una presión inicial  $p_0$  cuando el sistema está en reposo. Se considera que súbitamente se le imprime al líquido una velocidad  $U$ , actuando así el cilindro líquido como una suerte de pistón, que transfiere energía cinética al relativamente pequeño bolsón de aire atrapado en el extremo elevado de la conducción en estudio.

Al ser  $L$  relativamente pequeño, el cilindro de agua se comporta como si fuera rígido, asimilándose así el efecto contra el bolsón de aire como el del pistón aludido. La dinámica de la transferencia de energía se sintetiza en la expresión siguiente:

$$\frac{1}{2}mU^2 = 2,3p_0 \tau_0 \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \quad (13)$$

La ecuación anterior implica la igualdad de la energía cinética del cilindro líquido, con la energía absorbida por el bolsón de aire en una evolución isotérmica de compresión. En la misma los símbolos representan los siguientes parámetros:

-  $m$  es la masa del cilindro de agua.

- U es la velocidad media del mismo.
- $p_0$  es la presión en el líquido y en el bolsón de aire de volumen  $\tau_0$ , previa al movimiento (en condiciones estáticas).
- p es la presión alcanzada por el bolsón de aire al absorber la energía cinética del cilindro.

Si se tiene en cuenta que G es el peso de la masa m y g es la aceleración normal de la gravedad, al reemplazar valores en la ecuación anterior, se tiene:

$$\lg\left(\frac{p}{p_0}\right) = \frac{1}{2} \frac{m}{\rho_0 \cdot \tau_0} \frac{U^2}{g} = \frac{G \cdot U^2}{4,6g \cdot \rho_0 \cdot \tau_0}$$

Despejando la presión final p de la misma, se obtiene que:

$$p = p_0 \cdot 10^{\frac{G \cdot U^2}{4,6g \cdot \rho_0 \cdot \tau_0}} \quad (14)$$

La ecuación anterior nos permite concluir que para valores de G lo suficientemente grandes y de  $\tau_0$  lo suficientemente pequeños, los valores de p pueden ser tan grandes como se desee, explicándose así el efecto de detonación debido a la transferencia de energía "cilindro de agua -bolsón de aire".

Obviamente al ser el volumen de aire relativamente importante, su efecto sería el de un amortiguador (tal como se usa en las cámaras de aire que protegen contra el "golpe de ariete"). En cambio al resultar pequeño se puede llegar fácilmente a valores enormes de la presión p.

En particular el manual de Uralita desarrolla su ejemplo con los siguientes datos:

$$\tau_0 = 0,1 \text{ m}^3 ; \quad D = 0,40 \text{ m} ; \quad L = 1000 \text{ m} ; \quad p_0 = 2 \text{ atm} ; \quad U = 1 \text{ m/s}$$

El cilindro líquido tendrá un volumen:

$$\tau_0 = \frac{L \cdot D^2}{4} = 125,6 \text{ m}^3$$

El peso resulta:

$$G = \tau_0 \cdot \gamma = 125.600 \text{ Kg}$$

Reemplazando en la ecuación (4) se obtiene:

$$p = 459.065 \text{ kg./m}^2 = 45,91 \text{ atm}$$

Las sobrepresiones originadas en el fenómeno descrito se presentan en forma imprevisible y han presentado su mayor ocurrencia en el transcurso de pruebas hidráulicas.

No existe actualmente bibliografía que trate el tema "in extenso" y mucho menos recomendaciones para tener en cuenta, exceptuando todas aquellas relacionadas con una correcta evacuación del aire durante las pruebas, lo que está íntimamente relacionado con la adopción de un buen sistema de válvulas de aire.

### 3. ELEMENTOS DE DISEÑO DE VÁLVULAS PARA ESCAPE O INGRESO DE AIRE DE LAS CONDUCCIONES A PRESIÓN.

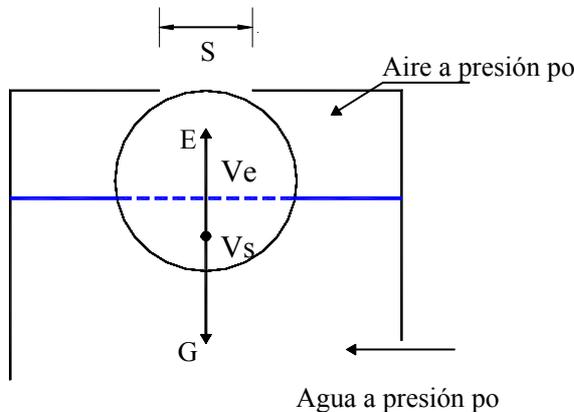
#### 3.1 CONCEPTOS BÁSICOS Y DISEÑOS TRADICIONALES

La función de una válvula de aire es la de permitir evacuar el aire del interior de las conducciones tratando de evitar o al menos minimizar, la posibilidad de que quede atrapado en algún sector alto de la misma.

Básicamente consiste en un flotador que obtura un orificio cuando en el conducto no hay aire, y lo deja libre cuando si lo hay.

Estudiaremos el funcionamiento del flotador de volumen  $V$  y de masa específica o densidad  $\rho_F$  (debe ser  $\rho_F < \rho$ , con  $\rho$  como masa específica o densidad del agua).

En la Figura 3 se esquematizan los elementos principales de la válvula en estudio, como así también los parámetros que la definen.



$$V = V_e + V_s$$

Considerando un coeficiente  $\alpha$  (que puede variar entre 0 y 1)  $V_e$  puede expresarse:

$$V_e = \alpha \cdot V$$

**Figura 3**

Principio de Funcionamiento de una Válvula de Aire

Plantearémos en primer término las ecuaciones del equilibrio de fuerzas actuantes, para el caso de ausencia de aire, es decir flotador adherido.

Las fuerzas que se ejercen sobre el flotador hacia arriba son:

Debida a la presión -----  $p_0 \cdot S$

Debida al empuje hidrostático (Arquímedes) ----  $(\rho - \rho_F) \cdot g \cdot V$

Nota: Se destaca que aún con  $\rho > \rho_F$  el flotador queda adherido al orificio.

En cambio para las condiciones de flotador despegado, es decir en presencia del aire, las condiciones de equilibrio de las fuerzas resultan:

Fuerzas hacia arriba:

Debida a la presión -----  $p_0 S$

Debida al empuje -----  $\rho \cdot g \cdot (V - V_e) = \rho \cdot g \cdot V.$

El flotador se despegue cuando el peso  $G$  es mayor que la resultante de las "fuerzas hacia arriba". La condición en símbolos resulta:

$$G = \rho_F \cdot g \cdot V > p_0 \cdot S + \rho \cdot g \cdot V \cdot (1 - \alpha)$$

De la anterior surge la condición:

$$\frac{p_0 \cdot S}{g \cdot V} < \rho_F - (1 - \alpha) \rho \quad (16)$$

De la expresión (16) surge el valor límite para que el flotador se despegue, es decir el caso que se corresponde con la condición  $\alpha = 1$ , lo que implica obviamente el volumen:

$$V = \frac{p_0 \cdot S}{g \cdot \rho_F} \quad (17)$$

De todos los conceptos analizados es fácil inferir que no es posible asegurar con un mismo flotador las funciones de "escape de grandes caudales de aire a presión atmosférica", y de "pequeños caudales de aire a la presión de trabajo", dado que:

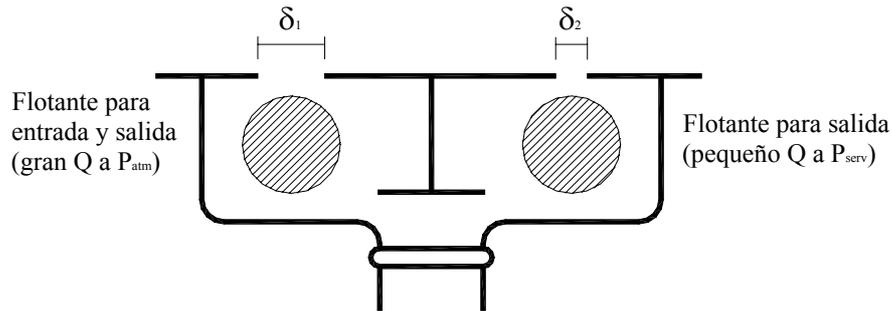
- a) La primera condición (gran  $Q$  a  $p_a$ ) fija el área  $s$  del orificio y consecuentemente el volumen del flotador resulta importante.
- b) La segunda condición (pequeño  $Q$  a  $p_0$ ) fija justamente la presión de diseño.

En consecuencia los fabricantes se ven obligados a ofrecer diseños diferenciados para cada uso, basados además en los siguientes conceptos:

- a) La superficie  $s$  debe ser limitada por los "golpes de ariete inducidos por el escape del aire".
- b) La velocidad de escape del aire cuando es evacuado (necesariamente alta) no debe arrastrar al flotador y tender a pegarlo contra el orificio.

Se destaca especialmente, que las válvulas para "Evacuación de grandes caudales de aire a presión atmosférica", son necesariamente de "doble efecto", puesto que también posibilitan la función de "ingreso de grandes caudales de aire a presión atmosférica".

Los fabricantes ofrecen al mercado, un aparato que posibilita las tres funciones analizadas, las que se logran con dos flotantes y otros tantos orificios, dimensionados de acuerdo a los conceptos analizados precedentemente. En la Figura 4 se esquematizan, para un diseño tradicional difundido en nuestro medio, los elementos básicos constitutivos de éstos tipos de válvulas de aire de tres funciones.



**Figura 4**

Aparato de tres funciones

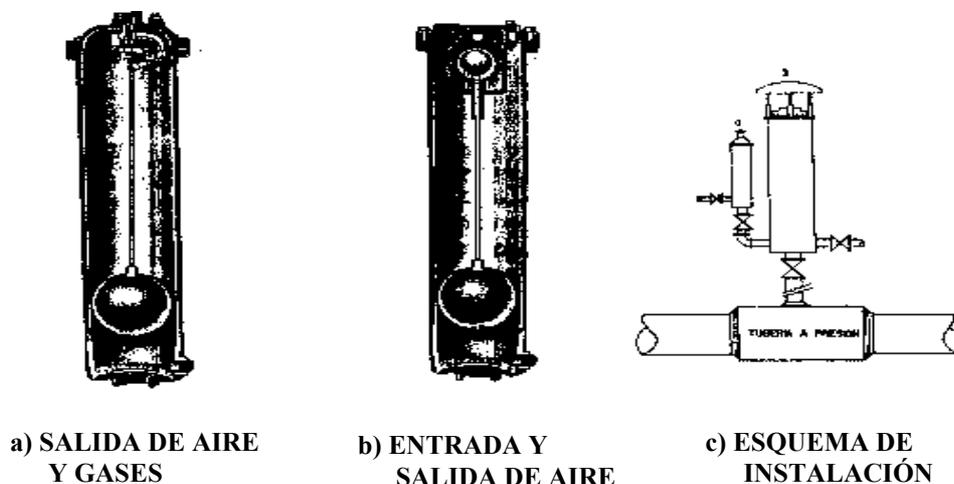
Estos aparatos han sido diseñados para ser instalados en conducciones de aguas relativamente limpias. Cuando se trata del transporte de líquidos cloacales el problema es más delicado, puesto que tales líquidos transportan suspensiones de partículas muy heterogéneas, entre las que abundan las de naturaleza orgánica, lo que da como resultado la obstrucción de los orificios, el consecuente cierre defectuoso, y muchas veces dificultades para que se produzca el despegue. Por éstas razones, en las instalaciones para líquidos cloacales, deben ser utilizadas válvulas especialmente diseñadas para enfrentar la problemática apuntada.

En la Figura 5 pueden ser apreciados los elementos de diseño, de un equipo también tradicional, compuesto por dos cilindros verticales independientes y unidos entre sí, de los cuales uno, esquematizado en la figura 4a, posibilita la salida de pequeños volúmenes de gas (mezcla de aire y gases provenientes del líquido cloacal). Cuando el líquido transportado por la conducción alcanza el flotante ubicado en la parte inferior del cuerpo de la válvula, éste recibe un empuje hidrostático el que es transmitido por un vástago adosado al mecanismo de ventilación, el que mediante un juego de palancas convenientemente dispuestas, cierra la salida de aire.

El aire en el interior de la conducción se encuentra inicialmente a la presión atmosférica y es comprimido cuando el líquido cloacal se eleva en el interior de la válvula por acción de la presión a la que está sometido, hasta que aire y líquido equilibran su presión. El aparato está diseñado de forma tal que el líquido no llega al sistema de ventilación, el que permanentemente está en contacto con aire.

Aire y gas, al desprenderse del líquido cloacal tenderán a desplazar hacia abajo al líquido, y en consecuencia el flotante resultará arrastrado, con lo que el mecanismo de ventilación resultará abierto, permitiendo así que parte del aire y gas escapen hacia la

atmósfera. En estas circunstancias, el líquido que necesariamente ocupa el volumen dejado por el aire, levanta el flotante con lo que se cierra nuevamente la ventilación. Evidentemente, el ciclo se repite cada vez que la mezcla de aire y gas se acumula en el interior de la válvula.



**Figura 5**

Válvulas de aire de tres efectos para líquidos cloacales

El otro cilindro, que completa la válvula, posibilita las funciones de "ingreso y salida de importantes caudales de gas a la presión atmosférica", es decir en los procesos de vaciado y llenado de la conducción, con el propósito previamente analizado de evitar los efectos nocivos del aire (o mezcla aire-gas en este caso) inevitables en el interior de la conducción.

En este cilindro (Figura 5b) se dispone un flotador en la parte inferior y una bocha de goma en la superior, unida con el primero mediante un vástago mantenido en la posición correcta mediante una guía.

Al ingresar el líquido en el cilindro, el flotante recibe un empuje hidrostático que es transmitido a la bocha superior por el vástago, quedando así el contacto con la atmósfera. Consecuentemente el aire en el interior de la válvula se presuriza y mantiene el dispositivo de cierre alejado del líquido cloacal. Al disminuir la presión en la conducción, el flotante cae al perder el sustento de la presión hidrostática, y la bocha no obtura más al orificio que comunica con la atmósfera el interior del cilindro, permitiendo así el ingreso de aire, el que ocupa el volumen previamente ocupado por el líquido.

## 3.2 CRITERIOS MODERNOS DE DISEÑO DE VÁLVULAS DE AIRE

### 3.2.1 Válvulas para Pequeño Caudal de Aire a Presión de Trabajo

A las consideraciones teóricas que rigen su diseño y que conducen a calcular pequeños orificios para poder acotar el "Golpe de ariete inducido por escape de aire" en valores prefijados, se le agregan modernamente, criterios de diseño que hacen que la obturación sea paulatina.

Esto posibilita el escape no solo de pequeños bolsones que erráticamente circulan por la conducción, si no que, también posibilitan el escape del aire que se desprende del agua, por burbujeo y en forma continua.

Por estas consideraciones y por el hecho de que el escape se produce cada vez que el aire que se acumula en la parte superior, logra el volumen suficiente para el descenso del flotante, a este tipo de válvulas se las conoce como "automáticas".

### **3.2.2 Válvulas para Gran Caudal de Aire a Presión Atmosférica**

El criterio tradicional de diseño, si bien es muy racional y acertado, al ser aplicado sin otras consideraciones complementarias, trae aparejado inconvenientes de funcionamiento. En efecto, al no ser considerados los efectos fluidodinámicos del aire que escapa, se está obviando la acción o sollicitación adicional, que está empujando al flotante contra el orificio, por lo que tiende a evitar su despegado cuando éste es necesario.

En efecto, al desarrollar el análisis básico del diseño esquematizado en 3-1, no se han hecho otras consideraciones que no sean de tipo hidrostático.

Es evidente que el aire al escapar con las velocidades siempre altas características del proceso, ha de efectuar una acción dinámica en el sentido de empujar al flotante contra el orificio, y contraria a su peso, lo que implica que muchas veces éste quede adherido cuando, justamente y por acción del peso, debería despegarse.

Este efecto no deseado se anula en los diseños avanzados, protegiendo al flotante de la acción dinámica del aire. La forma más apropiada se logra con una canastilla renurada o perforada de manera tal que, posibilite la acción del empuje hidrostático del agua, por una parte, e impida la acción dinámica del aire por la otra.

En base a su funcionamiento, fundado en evitar la acción de las elevadas velocidades del aire que escapa, se las conoce a este tipo de válvulas, como cinéticas.

## 4. SELECCIÓN DE VÁLVULAS

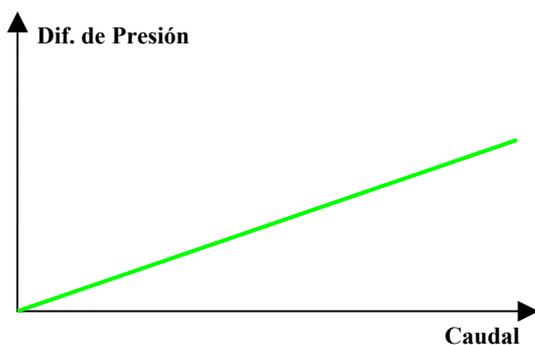
### 4.1 PARA SALIDA DE PEQUEÑOS CAUDALES DE AIRE A PRESIÓN DE TRABAJO

En resumen, su diseño está condicionado al problema del "Golpe de ariete inducido por escape de aire", cuyo marco conceptual y criterios de cálculo han sido tratados en el ítem 2.2 y con las ecuaciones que van de la (2) hasta la (12).

El fabricante brinda para las válvulas de su producción, la curva característica correspondiente, es decir el diagrama "Diferencia de presiones- Caudal de aire".

Con el valor preestablecido para la "máxima sobrepresión admitida" (por ejemplo 5 m.c.d.a.), del gráfico se obtiene el caudal de aire a erogar por la válvula.

En general, no importa en estos casos evaluar el volumen total de aire acumulado en un bolsón que erráticamente encuentra su posibilidad de escape.



**Figura 6**

Característica "Diferencia de Presión-Caudal de Aire"

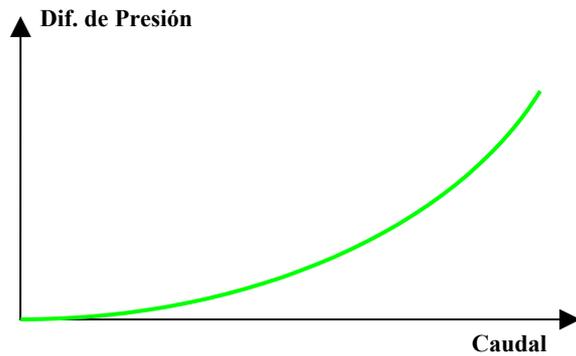
En primer lugar porque su determinación es impredecible y sobretodo porque las dimensiones del orificio posibilitan el escape de volumen, independientemente de su magnitud y de forma tal que la sobrepresión no sea superada, no importando además cuanto dure el proceso de escape del bolsón de aire.

### 4.2 INGRESO DE GRAN CAUDAL DE AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Tal como se indicó al comienzo (Ítem1), contrarrestar depresiones en las conducciones a presión, conlleva necesariamente al ingreso de aire en las mismas.

Obviamente el caudal de aire a ingresar debe estar relacionado con la magnitud de la depresión a tolerar en la conducción.

El par de valores "Depresión admisible- Caudal de aire" (Figura 7) definen la selección de la válvula más apropiada.

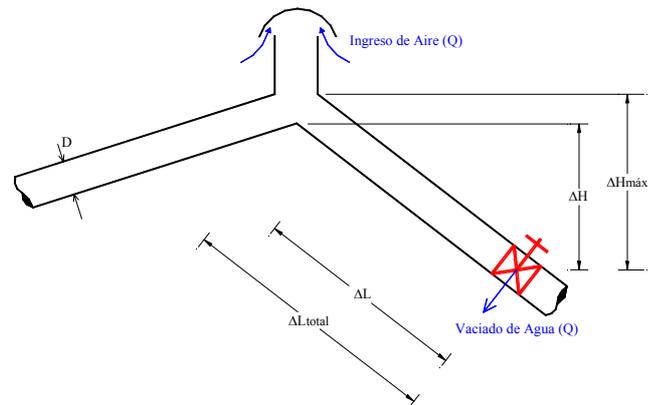


**Figura 7**

La válvula (o válvulas) seleccionadas por el proyectista será la que satisfaga la exigencia de ingreso del caudal requerido.

El problema principal en estos casos es justamente determinar cuál será el "caudal requerido".

Para ello se fija la siguiente condición de diseño:



**Figura 8**

Ingreso de aire debido a la depresión

Se selecciona la válvula de entrada de aire de manera tal que, el caudal de aire ingresante sea igual al caudal de agua evacuado, a la vez que la depresión no debe sobrepasar un valor preestablecido.

El simple esquema de la figura permite establecer que el caudal de vaciado estará dado en función de la carga variable  $\Delta H$ , por lo que el mismo resultará variable también.

En primera aproximación, y a los efectos de la selección de las válvulas, puede considerarse una pérdida de energía total  $\Delta H_{máx}$ . Este valor dividido por la longitud total del tramo en estudio ( $\Delta L_{total}$ ), nos brinda el valor de la "pérdida de carga unitaria":

$$j = \Delta H_{máx} / \Delta L_{total} \tag{18}$$

Con la expresión anterior y alguna expresión empírica es factible calcular el caudal buscado.

En efecto utilizando la expresión de Hazen y Williams, se tiene que:

$$\Delta H_{max} = \frac{\Delta L_{Total}}{(0,275C)^{1,85}} \frac{Q^{1,85}}{D^{4,85}} \tag{19}$$

Despejando Q y recordando la (18) se obtiene:

$$Q = 0,275 C \cdot j^{0,54} \cdot D^{2,62} \quad (20)$$

Con el caudal dado por la (20) se selecciona la válvula o las válvulas en paralelo que resulten necesarias.

Los casos de vaciados accidentales por colapsos eventuales, responderían a un criterio de cálculo análogo, imaginando hipótesis desfavorables para las secciones críticas de colapso.

Lo más recomendable y lógico es seleccionar las válvulas y disponer las cámaras de desagüe de forma tal que la problemática del colapso quede convenientemente acotada por el caso previsto de desagüe premeditado.

### 4.3 EGRESO DE GRAN CAUDAL DE AIRE A PRESIÓN ATMOSFÉRICA

Tiene lugar esta alternativa toda vez que se procede al llenado de una conducción a presión.

Resulta evidente que la maniobra de llenado debe realizarse cuidadosamente, para posibilitar el siempre dificultoso escape del aire por los puntos cuspidales (naturales o realizados "ex-profeso") en los que invariablemente debe ser colocada una válvula de aire que posibilite la evacuación del mismo desde el interior de la conducción a proteger.

El llenado rápido puede dar lugar a la formación de bolsones, los que al no encontrar una salida rápida, pueden dar lugar a la problemática descrita y establecida en el comienzo del presente texto.

La normativa europea especifica desde hace muchos años, una velocidad de llenado que no supere los 0,05 m/s a sección llena.

Éste concepto resulta de prefijar un valor de sobrepresión máxima  $\Delta h_{\text{máx}}$ , para el "Golpe de ariete inducido por el escape del último aire".

En efecto, en las postrimerías del llenado, cuando la tubería ya ha entrado en presión, el escape de un bolsón de aire puede inducir una sobrepresión

$$\Delta h_{\text{máx}} = c U / g$$

En la que U es la velocidad a acotar. Si se despeja U de la anterior y nuevamente se establece un  $\Delta h_{\text{máx}}$  de 5 m.c.d.a., se obtiene que

$$U = g \Delta h_{\text{máx}} / c \quad (21)$$

Si se tiene en cuenta que g es aproximadamente igual a 10 m/s<sup>2</sup> y que para los materiales rígidos c vale (también en términos de primera aproximación tecnológica)

aproximadamente 1000 m/s, la velocidad máxima para que no se produzca una sobrepresión mayor de 5 m.c.d.a. será de aproximadamente 0,05 m/s.

En cambio, si el material de la conducción resultara flexible, adoptando para ese caso un valor máximo de  $c$  de 400 m/s, la velocidad de llenado máxima resultará de 0,125 m/s.

El caudal de llenado puede entonces establecerse a partir de los valores anteriores a velocidades máximas y de multiplicar a éstas por la sección de la tubería.

La condición de selección de la válvula de egreso de aire, adoptada con toda lógica, es que el caudal de llenado sea igual al del aire a ser evacuado.

Obviamente el dispositivo que posibilita el ingreso de aire, también habrá de posibilitar la salida del mismo, la que tendrá lugar en general con una característica  $\Delta p$ - $Q$  algo distinta a la de ingreso, aunque similar.

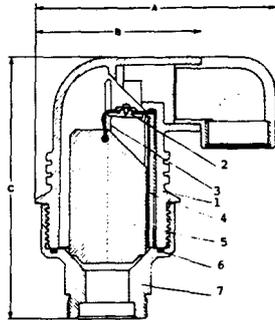
#### **4.4 VÁLVULAS DE TRES EFECTOS**

Tal como se indicó en el ítem 3.1, cuando se abordaron los conceptos básicos de diseño, resulta imposible lograr los tres efectos deseados y estudiados, con solo un flotador que obture a un orificio único.

Es por ello que las funciones "Ingreso y salida de gran caudal de aire a presión atmosférica" y "Salida de pequeño caudal a presión de trabajo", deben ser satisfechas en realidad por dos válvulas con dimensiones y densidades de los flotadores distintas.

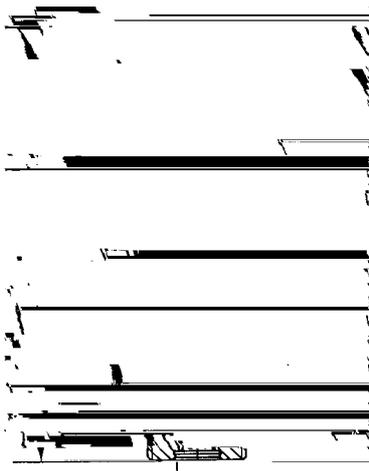
Los fabricantes ofrecen ambos tipos de válvula independientemente y algunos modelos del mercado ofrecen válvulas con las tres funciones, lo que logran con un artefacto único, en el que en realidad se encuentran las dos válvulas necesarias adosadas, con criterios de diseño y acople ingeniosos.

En las figuras que siguen, se brindan ejemplos de válvulas de aire de diseño moderno, en el que son tenidos en cuenta los criterios expuestos, y que se encuentran difundidas en nuestro medio.

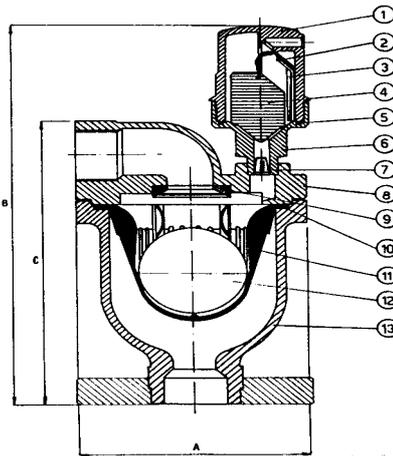


Nº	COMPONENTE	MATERIAL
1	CUERPO	NYLON REFORZADO F.V.
2	JUNTA RIGIDA	NYLON REFORZADO F.V.
3	JUNTA DE CIERRE	EPDM
4	POSICIONADOR	NYLON REFORZADO F.V.
5	FLOTADOR	PP EXPANDIDO
6	JUNTA TORICA	BUNA-N
7	BASE	NYLON REFORZADO F.V.

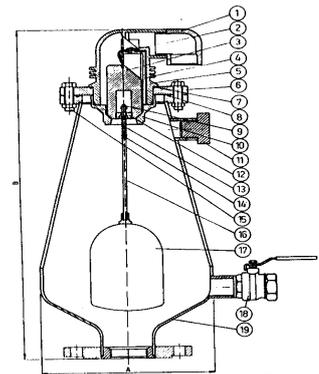
Válvula Automática



Válvula Automática



Válvula Cinética con Válvula Automática (3 efectos)



Válvula de 3 efectos para instalaciones cloacales

Figura 9

Válvulas de Aire de Diseño Moderno

## ANEXO: DISCUSIÓN SOBRE LA VELOCIDAD DE ESCAPE DEL AIRE

Estimamos oportuno resumir aquí los conceptos generales que rigen la salida de gases por orificios o toberas, extractados del libro "Termodinámica Técnica" de A. ESTRADA.

Del "Primer Principio" (conservación de la energía) surge que el escurrimiento de fluidos compresibles entre dos secciones 1 y 2, y en su forma más original, está regido por la expresión:

$$Q + i_1 + A \cdot i + A \frac{\omega_1^2}{2 \cdot g} = A \cdot L_c + i_2 + A \frac{\omega_2^2}{2 \cdot g} + A \cdot h_2$$

En la que:

- Q es la cantidad de calor entregado al sistema.
- i es la función Entalpía.
- $\omega$  es la velocidad media en la sección.
- A.h es la energía potencial de posición.
- A.L<sub>c</sub> es el trabajo de circulación.

- A es el equivalente térmico del trabajo;  $A = \frac{1 \text{ Kgm}}{427 \text{ cal}}$

La ecuación anterior en forma diferencial, es decir entre secciones infinitamente próximas es:

$$dQ = A \cdot dL_c + A \cdot d \frac{\omega^2}{2g} + A \cdot dh + di \quad (1)$$

Para orificios o toberas cortas suponemos  $h = \text{cte.}$  y  $L_c = 0$ , por lo que la (1) se reduce a:

$$dQ = A \cdot d \frac{\omega^2}{2g} + di$$

Por otra parte, por definición de entalpía:

$$dQ = di - a \cdot \tau_e \cdot dp$$

En la que:

- $\tau_e$  es el volumen específico.
- p es la presión.

Reemplazando en la anterior tendremos:

$$\tau_e \cdot dp = d \frac{\omega^2}{2g} = \frac{\omega}{g} d\omega \quad (2)$$

La que, integrada, nos lleva a:

$$\int_1^2 \tau_e \cdot dp = \frac{1}{2 \cdot g} (\omega_2^2 - \omega_1^2)$$

Aplicando al caso en el que el fluido descarga desde la presión  $p_0$  a la presión  $p$  a través de un orificio, tendremos:

$$\omega^2 = 2 \cdot g \cdot \left[ -\int_{p_0}^p \tau_e \cdot dp \right]$$

La anterior es la expresión generalizada de TORRICELLI. Para fluidos incompresibles se tiene que:

$$\begin{aligned} \omega^2 &= 2 \cdot g \cdot [\tau_e (p_0 - p)] = 2 \cdot g \cdot \left[ \frac{1}{\gamma} (h_0 - h) \gamma \right] \\ \therefore \omega^2 &= 2 \cdot g \cdot \Delta h \end{aligned}$$

Es decir que  $\omega = \sqrt{2 \cdot g \cdot \Delta h}$ , la conocida expresión de TORRICELLI, que constituye un caso particular de la anterior.

Para una expansión adiabática, es decir sin intercambio de calor, se ha deducido oportunamente que:

$$\int_{p_0}^p \tau_e \cdot dp = \frac{K}{K-1} p_0 \cdot \tau_{e_0} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]$$

En la que  $K$  es el exponente de la adiabática ( $K=1,4$ ).

Reemplazando en la (2):

$$\omega = \sqrt{2g \frac{K}{K-1} p \tau_{e_0} \left[ 1 - \left( \frac{p}{p_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right]} \tag{3}$$

En teoría, la (3) nos da la velocidad de salida del fluido, pero la misma está limitada por lo siguiente:

El gasto, expresado en Kg./s es:

$$Q_G = \Omega \cdot \omega \cdot \gamma$$

Haciendo  $Q_G = 1 \text{ Kg./s}$  y considerando que:

$$\gamma = \frac{1}{\tau_e}$$

Resulta:

$$\Omega = \frac{\tau_e}{\omega} \quad (4)$$

Al cumplir las transformaciones adiabáticas con la ley  $p \cdot \tau_e = \text{cte.}$ , diferenciando tenemos:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{p} + K \frac{d\tau_e}{\tau_e} &= 0 \\ \therefore \frac{dp}{d\tau_e} &= -K \frac{p}{\tau_e} \end{aligned} \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que el mínimo de la (4) surge de considerar  $d\Omega = 0$ , es decir:

$$\omega d\tau_e - \tau_e d\omega = 0$$

De donde:

$$d\omega = \frac{\omega}{\tau_e} d\tau_e$$

Reemplazando en la (2):

$$\tau_e dp = \frac{\omega^2}{g} \frac{d\tau_e}{\tau_e}$$

Pero de la (5) se tiene que:

$$\tau_e \cdot dp = k \cdot p \cdot d\tau_e$$

Por lo que:

$$K.p.d\tau_e = \frac{\omega^2}{g} \frac{d\tau_e}{\tau_e}$$

De donde la velocidad de "escape" resulta:

$$\omega = \sqrt{g.K.p.\tau_e} \quad (6)$$

La (6) coincide con la velocidad de propagación del sonido (perturbación elástica) en un medio gaseoso a presión  $p$  y volumen específico  $\tau_e$ .

De la igualación entre la (3) y la (6) surge que:

$$\frac{p}{p_0} = \left( \frac{2}{K+1} \right)^{\frac{K}{K-1}}$$

Es decir que la presión en la sección mínima resulta independiente de la presión exterior. Para el caso del aire con  $K=1,4$  tenemos:

$$\frac{p}{p_0} = 0,530$$

En el caso de un orificio, la velocidad dada por la (6) es la máxima posible, puesto que a partir de esa sección la vena fluida comienza a abrirse y a mezclarse con el fluido exterior.

Entendemos oportuno realizar algunas determinaciones numéricas para encontrar el orden de magnitud de la velocidad de salida del aire.

Si reemplazamos valores en la (3), teniendo en cuenta que por la ley de los gases perfectos:

$$p.\tau_e = R.T$$

Y considerando, además, los siguientes datos:

- $R = 29,27$
- $p_0 = 3 \text{ atm} = 30\,990 \text{ Kg./m}^2$
- Temperatura:  $27^\circ\text{C} \therefore T = 300^\circ\text{K}$
- Presión relativa final;
- $K = 1,4$

Obtendremos reemplazando en la (3):

$$\omega \cong 403 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Aplicando ahora la (6) se tiene:

$$\omega = \sqrt{g \cdot K \cdot p \cdot \tau_e}$$

Con  $p = 0,53 p_0 = 16\,425 \text{ Kg./m}^2$ ; y  $\tau_e \cong 0,4 \text{ m}^3/\text{Kg}$ . resulta:

$$\omega = 300 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Los valores dados, tanto por la (3) como por la (6), dan valores muy superiores a los 200 m/s, tomados como límite inferior.