

EL CONTRASTE DE PARECERES EN TORNO A LAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

Por LUIS TORRENT RODRIGUEZ
Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos

El autor aborda varios puntos en los que su opinión está en franca discordancia con la de numerosos expertos en chimeneas de equilibrio. El encabezamiento de estas notas parece señalar un deseo de controversia en torno a estos temas.

Preámbulo.

Para el estudio de las numerosas chimeneas de equilibrio que hemos tenido que abordar en el ejercicio de la profesión, la bibliografía consultada ha sido abundante y diversa: libros, monografías, tesis doctorales, revistas técnicas, proyectos...

En gran parte de estas publicaciones hemos encontrado algunos conceptos que, en nuestra opinión, no son del todo exactos y pueden inducir a errores de importancia a los proyectistas poco familiarizados con las chimeneas de equilibrio.

A continuación se enuncian los puntos de desacuerdo encontrados. Pedimos disculpas a aquellos estamentos técnicos de seriedad a ultranza bien probada, por la frivolidad de los encabezamientos con la que pretendemos atraer la atención de los lectores técnicamente débiles o poco interesados en el tema.

PUNTO 1.º — *"Chi va piano va lontano"*.

El adagio es aplicable a las oscilaciones de masa en chimeneas de equilibrio, pues suelen ser más amplias para cambios graduales de régimen que para maniobras instantáneas, contrariamente a la opinión de la mayoría de las publicaciones sobre la materia.

PUNTO 2.º — *Trabaja, pero seguro*.

Este punto trata de los coeficientes de "seguridad" apriorísticos con que muchos autores

aconsejan se aumente la sección de Thöma para garantizar la estabilidad incipiente de las chimeneas.

PUNTO 3.º — *Garrote vil*.

En numerosas publicaciones se define un "estrangulamiento óptimo" de las chimeneas, sin tener en cuenta maniobras compuestas ni sobrepresiones por ondas elásticas que pueden transformar el estrangulamiento óptimo en "garrote vil" para la instalación.

PUNTO 4.º — *Crítica del caudal crítico*.

En este apartado analizaremos la leyenda del "caudal crítico", buscando una posible explicación racionalista del mito.

PUNTO 5.º — *No es conveniente engordar*.

Si se pretende reducir la sobreelevación de una chimenea ensanchando la sección de la galería, es muy probable que se obtenga el efecto contrario.

Antes de desarrollar los puntos citados recordaremos, en una breve *Introducción*, las fórmulas básicas de cálculo de chimeneas de equilibrio. Intercalaremos también un *Intermedio*, dando a conocer un gráfico que hemos preparado para tanteos rápidos de dimensionamiento, cuya inclusión en estas notas no tiene otra

finalidad que evitar se nos pueda calificar de "críticos puramente destructivos".

Introducción.

Las ecuaciones que definen las oscilaciones de masa en chimeneas de equilibrio son:

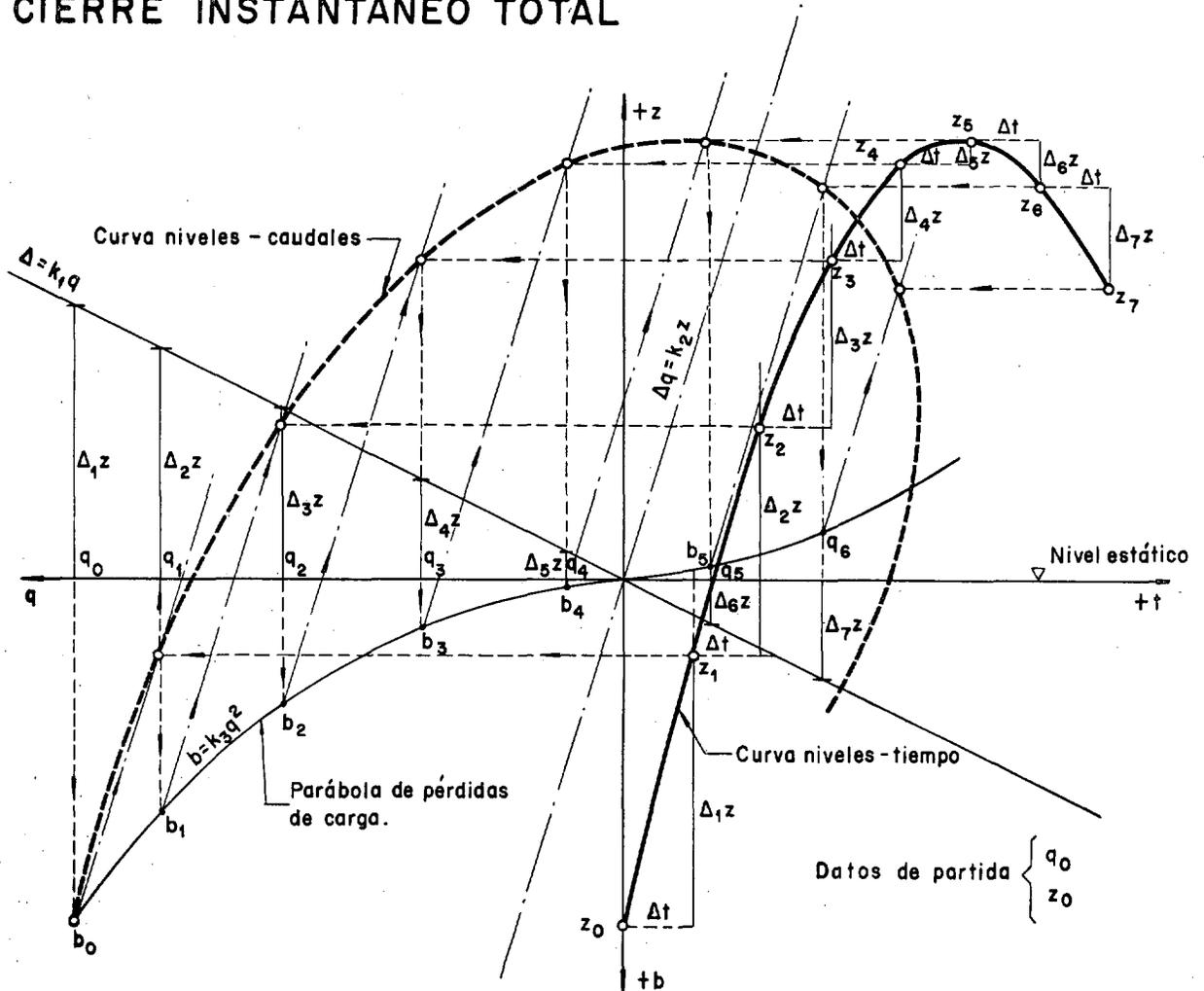
$$\left. \begin{aligned} \frac{L}{g} \frac{dw}{dt} + z \pm p w^2 \pm p_1 (w_r - w)^2 &= 0 \\ f w = f w_r + F \frac{dz}{dt} = Q_r + F \frac{dz}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

L = longitud de la galería a presión (m.).
 g = aceleración de la gravedad (m./seg.²).

w = velocidad del agua en la galería (m./seg.²).
 w_r = velocidad de régimen; es decir, de equilibrio de la maniobra en estudio.
 t = tiempo (seg.).
 z = nivel del agua en la chimenea respecto al nivel estático (m.).
 p = pérdida de carga en la galería para $w = 1$ (m.).
 p_1 = pérdida de carga en la inserción de la chimenea para $w_r - w = 1$.
 f = sección de la galería (m.²).
 F = sección horizontal de la chimenea (m.²).
 Q_r = caudal de régimen (m.³/seg.).

Las pérdidas de carga tienen siempre el mismo signo que la circulación; es decir, p tiene el

CIERRE INSTANTANEO TOTAL



(Obsérvese el desplazamiento del máximo de la curva niveles - caudales que teóricamente debería estar sobre el eje $q=0$)

Fig. 1. — Método gráfico de Aguirre y García de Diego.

signo de w ; p_1 , el de $(w - w_r)$ (p_1 tendrá, en general, distinto valor según sea circulación hacia o desde la chimenea).

Las ecuaciones (1) son integrables solamente en casos muy particulares. Para el estudio de las oscilaciones hay que recurrir, pues, al cálculo por incrementos finitos, bien sea por procedimientos gráficos (Schoklitsh, Hacar, García de Diego, etc.), bien analíticamente (Pressel, Escande, Jaeger, etc.). Particularmente solemos utilizar las fórmulas ya explícitas.

$$w_{i+1} = \frac{\left(\frac{L}{g \Delta t} - \frac{f \Delta t}{4f}\right) w_i - z_i + \frac{Q_m}{2F} \Delta t + |p_1 w_r (w_r - w)|}{\frac{L}{g \Delta t} + \frac{f \Delta t}{4F} + |p w_i| + |p_1 (w_r - w)|}$$

$$\Delta z = \frac{f \Delta t}{2F} (w_i + w_{i+1}) - \frac{Q_m}{F} \Delta t \quad (2)$$

(Los símbolos de valor absoluto provienen de considerar conjuntamente los signos de los coeficientes y las velocidades que producen sumandos siempre positivos, con lo que se evitan posibles errores de signo; Q_m es el caudal medio en el intervalo Δt .)

Si en las ecuaciones (1) se elimina el tiempo se obtiene:

$$\frac{dz}{dw} = \frac{Lf}{Fg} \frac{w_r - w}{z \pm p w^2 \pm p_1 (w_r - w)^2} \quad (3)$$

cuya representación en ejes cartesianos w, z , es una espiral que parte del punto (w_0, z_0) inicial y se enrosca, asintóticamente, al punto de equilibrio final (w_r, z_r) .

Los puntos de equilibrio dinámico de todas las maniobras posibles están sobre la parábola:

$$z \pm p w^2 = 0$$

Los máximos y mínimos de oscilación corresponden a $w = w_r$.

Los máximos y mínimos de velocidad en la galería se encuentran en:

$$z + p w^2 + p_1 (w_r - w)^2 = 0.$$

La tangente a la espiral en el punto de origen de maniobra (punto de equilibrio dinámico) es:

$$\frac{dz}{dw} = \pm \frac{Lf}{Fg} \frac{1}{p_1 (w_r - w_0)} \quad (4)$$

La ecuación (3) permite analizar fácilmente los puntos de enlace más desfavorable entre maniobras de signo distinto (cierres y aperturas combinados) o del mismo signo (apertura o cierres escalonados) y, como caso particular de estas últimas, estudiar las maniobras lentas del distribuidor de las turbinas, como veremos en el punto siguiente.

Punto primero.

Las maniobras reales de los órganos de obturación de las turbinas — o de las válvulas de protección de las bombas, en el caso de una impulsión — nunca son instantáneas, como se admite con frecuencia en el cálculo de las oscilaciones de masa, al menos en los tanteos pre-

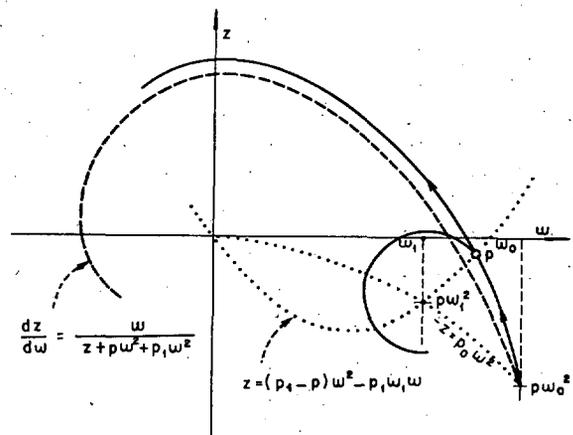


Figura 2.

vios de proyecto. Al tratar de este tema, la gran mayoría de los autores señalan que la suposición de tiempo de maniobra nulo es una simplificación del proceso operatorio situada del lado de la seguridad, puesto que las aperturas o cierres bruscos son más exigentes que los lentos a efectos de oscilación en la chimenea.

En nuestra opinión, la lentitud de las maniobras condiciona favorablemente los fenómenos elásticos del cambio de régimen — golpe de ariete —; pero, en cambio, su influencia es, generalmente, de sentido contrario para las oscilaciones de masa.

Supongamos, por ejemplo, un caso de cierre de turbinas, a partir de un punto (w_0, z_0) de

funcionamiento estable. La curva de cierre total instantáneo sería la señalada de trazos en la figura 2. Su tangente en (w_0, z_0) viene expresada por (4):

$$\left(\frac{dz}{dw}\right)_0 = -\frac{Lf}{Fg} \frac{1}{p_1 w_0}$$

Si en lugar de efectuar el cierre total de una vez, se realiza en dos tiempos (de w_0 a w_1 y, posteriormente, de w_1 a $w_r = 0$), la rama de la curva inicial arranca con una tangente:

$$\left(\frac{dz}{dw}\right) = -\frac{Lf}{Fg} \frac{1}{p_1 (w_0 - w_1)}$$

Estará, por consiguiente, situada por fuera de la curva de cierre total en parte de su trazado. Si se efectúa, a continuación, el cierre total de w_1 a $w_r = 0$ a partir de un punto P de esta curva exterior, el máximo de oscilación será, evidentemente, más elevado que el anterior. Tenemos, pues, una maniobra en dos tiempos más exigente que la instantánea total. Podríamos seguir subdividiendo las maniobras parciales y obteniendo cada vez mayores amplitudes de oscilación, hasta llegar a una situación de "cierre pésimo", envolvente externa de todos los posibles, cuya tangente en el origen (w_0, z_0) sería vertical (*).

Los tiempos de maniobra de los órganos de obturación suelen ser menores que los exigidos por la maniobra pésima y, por tanto, las curvas de oscilación reales estarán situadas entre la instantánea y la extrema que comentamos.

Hemos supuesto en los párrafos precedentes que $p_1 \neq 0$; es decir, que la inserción de la chimenea en la galería produce pérdidas de carga apreciables. Solamente si no existiera ninguna pérdida de inserción (caso poco probable, en la práctica) sería cierta la afirmación de que el cierre o apertura instantáneos producen desnivelecciones en la chimena mayores que los realizados en tiempos breves.

Punto segundo.

El dimensionamiento de chimeneas de equilibrio para la estabilidad a las pequeñas oscila-

(*) La maniobra "pésima" está estudiada con mayor detenimiento por el autor en un artículo publicado en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS de junio de 1965.

ciones suele hacerse calculando previamente la sección de Thöma y afectándola después de un coeficiente de "seguridad" que, según la importancia de la instalación (y el temperamento del proyectista) oscila entre 1,4 y 2,0.

La sección de Thöma (*), límite inferior de las oscilaciones entretenidas, fue establecida para una turbina-orificio; es decir, no tiene en cuenta las variaciones de rendimiento de la máquina, que son desfavorables a la estabilidad. Tampoco contempla la influencia de las pérdidas de carga aguas abajo de la chimenea de equilibrio, también desfavorable, ni de la energía cinética en el entronque chimenea-galería, cuyo efecto es estabilizador y variable con las formas de inserción. De la conjunción de estos factores, unos en sentido positivo, los otros negativos, resultan casos en los que el coeficiente de seguridad 1,4 señalado anteriormente es excesivamente conservador; mientras que en otros, la adopción apriorística del coeficiente 2,0 deja por debajo de la realidad.

En su libro *Cámaras de equilibrio*, el profesor A. Gardel analiza con detenimiento la influencia en la estabilidad de los factores anteriormente citados y obtiene una fórmula final en que intervienen las curvas del rendimiento en función de la potencia, del par motor y de la potencia en función de la velocidad de la máquina, la relación de la energía regulada en la central respecto a la total de la red a que se acopla, el amortiguamiento de las oscilaciones en un tiempo prefijado, así como las formas de la inserción de la chimenea en la galería de presión.

El proyectista de una instalación hidroeléctrica desconoce de antemano las curvas de rendimiento de la maquinaria de la central, que varían sensiblemente de unos a otros constructores de equipos hidráulicos. Aunque posteriormente puedan afinarse los cálculos, en fase de proyecto se debe partir de unos rendimientos hipotéticos suficientemente conservadores para no dar lugar a situaciones inestables del sistema. Asimismo, se debe prever un amortiguamiento de las oscilaciones que puede ser diferente para la marcha aislada de la central y

(*) Con las simplificaciones que más adelante se indican, la sección de Thöma es

$$F_{th} = 50 \frac{d^{3,2}}{H_{di}}$$

para el funcionamiento — más probable — en conexión con una red eléctrica alimentada por otras fuentes. (En el caso de central reguladora de frecuencia-potencia de un sistema, la estabilidad incipiente debe estar ampliamente asegurada).

La fórmula de Gardel, que hemos particularizado y simplificado para su empleo en proyectos, puede escribirse como sigue:

$$F = \frac{1,8 L d^{3,2}}{(0,02 L + d^{1,2}) (H_{di} - 4,2 P_t)} \quad (5)$$

o bien:

$$F = \frac{L d^{3,2}}{(0,01 L + d^{1,2}) (H_{di} - 3 P_t)} \quad (6)$$

siendo H_{di} = salto bruto mínimo, menos pérdidas en la galería (m.); P_t = pérdida de carga en la tubería forzada (m.).

La primera expresión corresponde a un amortiguamiento de las oscilaciones del 90 por 100 en el tiempo $T_0 = 100 \frac{d^{3,2}}{Q}$ (seg), característico de la instalación, supuesto que la cen-

tral es la única alimentadora de la red; la expresión (6) proviene de admitir un mayor amortiguamiento (60 por 100 durante el mismo tiempo característico) en la hipótesis de que nuestra central proporciona el 70 por 100 de la energía regulada del sistema.

Ambas fórmulas — que dan resultados más exigentes, en general, que la condición de Thöma — están calculadas suponiendo coeficientes de rozamiento débiles en la galería (*), ya que se trata de obtener un límite superior de la sección necesaria de chimenea. Recomendamos, por esta misma causa, adoptar fuertes rozamientos en la determinación de P_t .

Punto tercero.

El estrangulamiento llamado óptimo es aquel que produce una presión inicial en el entronque de la chimenea igual a la máxima sobre-elevación subsiguiente a un cierre total. El caso de la figura 3 corresponde a una instalación

(*) Se ha utilizado la forma hidráulica del autor: $w = B R^{0,6} j^{0,5}$, con $B = 81$ (rugosidad equivalente a la del acero soldado)

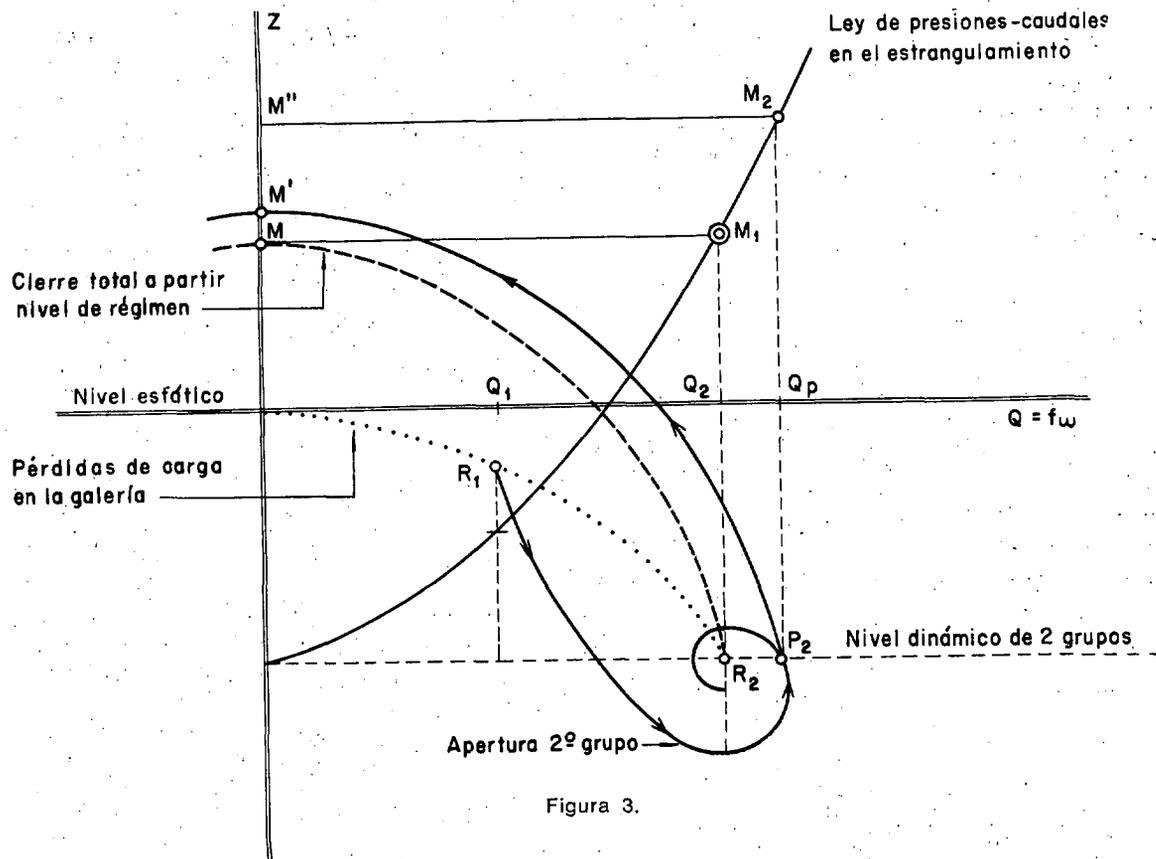


Figura 3.

de dos turbinas; su funcionamiento aislado o en paralelo se realiza con los niveles dinámicos R_1 y R_2 , respectivamente. La maniobra de cierre total a partir de R_2 , determina un máximo de oscilación M igual a la máxima sobrepresión $R_2 M_1$ inicial en el estrangulamiento, que será, por tanto, "óptimo".

Pero supongamos que el cierre total se produce cuando acaba de ponerse en marcha el segundo grupo, y precisamente cuando el nivel de la chimenea está en P_2 (mismo nivel que R_2 , pero mayor caudal circulando en la galería, como consecuencia de la oscilación de apertura). La curva de cierre será ahora $P_2 M_1$, con máximo de oscilación algo más elevado que el anterior; pero la sobrepresión será $P_2 M_2$, muy superior a la obtenida anteriormente.

¿Se debe, pues, dimensionar el estrangulamiento para maniobras combinadas? Tampoco encontramos lógico este criterio, puesto que se trata de maniobras fortuitas y, además, la posibilidad de resonancias es, teóricamente, ilimitada.

En nuestra opinión, el estrangulamiento debe ser *siempre inferior al llamado óptimo*; pero no solamente debido a las circunstancias que acabamos de evidenciar, sino, principalmente, porque en el estudio de las chimeneas por oscilaciones de masa, no se tiene en cuenta la deformabilidad de la galería ni la compresibilidad del agua, factores éstos que tienen escasa influencia en la sobre-elevación máxima, pero no así en las presiones en la inserción de la chimenea ni en las transmitidas a la galería de carga.

Punto cuarto.

Algunos autores mencionan un "caudal crítico" de las turbinas, a partir del cual dicen que la maniobra de cierre total de las turbinas produce sobre-elevaciones en la chimenea de equilibrio superiores a las obtenidas partiendo del caudal máximo.

Basta considerar la ecuación diferencial de la oscilación de masa (3), que particularizada para $w_r = 0$ queda:

$$\left(\frac{dz}{dw}\right)_0 = -\frac{Lf}{Fg} \frac{w}{z + (p + p_1)w^2}$$

para comprender la inexactitud de la aseveración citada. En efecto, las espirales de la familia definida por dicha ecuación no tienen más

punto común que el asintótico ($w = 0, z = 0$). Por consiguiente, no se cortan unas con otras, y será envolvente de las restantes aquella cuyo punto de origen sea más alejado; es decir, la que pasa por el punto de equilibrio del caudal máximo.

¿De dónde proviene, entonces, ese falso concepto de "caudal crítico"? Probablemente del empleo de fórmulas aproximadas en la obtención del máximo de oscilación.

En las chimeneas de equilibrio sin estrangulamiento, con pérdidas de carga en la galería, la ecuación diferencial de la oscilación por cierre total es integrable en su primera rama ascendente, siempre que la sección de la chimenea sea constante en el tramo de integración. La ecuación que resulta es:

$$\left(\frac{w}{w_0}\right)^2 = -\frac{z}{p w_0^2} + \frac{Lf w_0^2}{2g F (p w_0^2)^2} \left[1 - e^{-\frac{2g F p w_0^2}{Lf w_0^2} (z + p w_0^2)}\right] \quad (7)$$

Llamando (*):

$$p_0 = \frac{p w_0^2}{w_0 \sqrt{\frac{Lf}{Fg}}} \quad \gg \quad z_0 = \frac{z}{w_0 \sqrt{\frac{Lf}{Fg}}}$$

la expresión anterior se escribe:

$$\left(\frac{w}{w_0}\right)^2 = \frac{1}{2 p_0^2} [1 - 2 p_0 z_0 - e^{-2 p_0 (z_0 + p_0)}] \quad (8)$$

El máximo de z_0 corresponderá a $w = 0$, o sea:

$$1 - 2 p_0 z_0 - e^{-2 p_0 (z_0 + p_0)} = 0 \quad (9)$$

Como esta última ecuación es trascendente y de incómoda resolución por tanteos, son varios los autores que aconsejan sustituirla por:

$$z_0 = \left(1 - \frac{1}{3} p_0\right)^2 \quad (10)$$

cuyos resultados son muy concordantes, siempre que $p_0 < 0,5$. La expresión (10), sustituyendo valores y adoptando unos coeficientes de rozamiento normales, queda así:

$$z = 0,407 \frac{Q_0 \sqrt{L}}{d D} \left(1 - \frac{Q_0 \sqrt{L D}}{912 d^{4,2}}\right)^2 \quad (11)$$

(*) Valores relativos de Calame y Gaden.

siendo d el diámetro en metros de la galería y D el de la sección horizontal de la chimenea (o su equivalente, si no es circular).

Derivando la expresión (11) respecto a Q_0 e igualando a cero, se obtiene un máximo de z para $p_0 = 1$, con:

$$Q_0 = \frac{304 d^{4,2}}{D \sqrt{L}} = \text{«caudal crítico»}; \quad z_{\text{máx}} = 55 \frac{d^{3,2}}{D^2}$$

Como antes dijimos, la fórmula (10) es, tan sólo, una aproximación, bastante exacta para $p_0 < 0,5$, pero no para $p_0 = 1$. La resolución de la ecuación trascendente, para los mismos valores de los parámetros, da:

$$z_{\text{máx}} = 58,51 \frac{d^{3,2}}{D^2}$$

lo que representa un 6,4 por 100 de error de la aproximada, suficiente para anular la existencia del "caudal crítico".

Intermedio.

Metidos en el tema de sobreelevación máxima subsiguiente a un cierre total, con chimenea de sección constante y pérdidas de carga en la galería (pero no en la inserción de la chimenea) vamos a intercalar aquí un gráfico que hemos calculado para obtener directamente esta

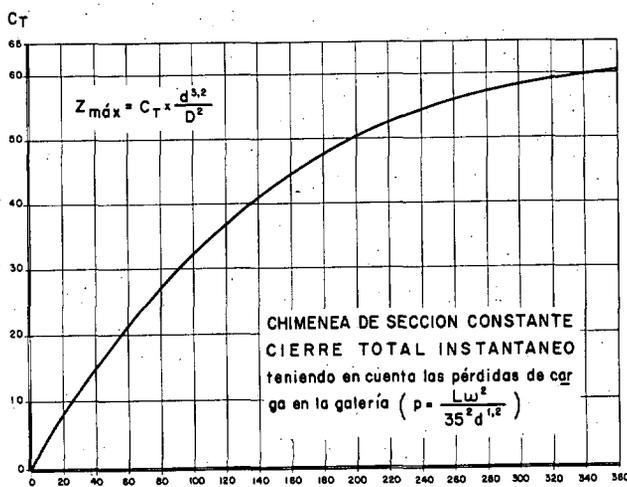


Figura 4.

sobreelevación. Como abscisas del gráfico tomaremos el valor de:

$$\frac{Q_0 \sqrt{L}}{d^{4,2}} \times D$$

(Se trata, pues, de las constantes del salto en cuestión: caudal, longitud de la galería y diámetro de la misma; D es el diámetro de la chimenea en estudio). Las ordenadas de la curva representan un coeficiente C_T tal que, multiplicado por $\frac{d^{3,2}}{D^2}$ da directamente la máxima sobreelevación buscada:

$$Z = C_T \times \frac{d^{3,2}}{D^2} \text{ (m.)}$$

Punto quinto.

Algunos autores, dejándose llevar por una intuición lógica en apariencia, señalan: Para disminuir la sobreelevación en las chimeneas puede acudirse también al recurso de ampliar el diámetro de la galería de presión, sobre todo en aquellos saltos cuya galería es corta y, por consiguiente, su encarecimiento por aumento del diámetro no es desproporcionado respecto al incremento de coste de chimenea por la misma causa, y queda compensado con la ganancia de salto neto.

Estamos de acuerdo en el razonamiento anterior, salvo en la afirmación de que basta aumentar el diámetro de la galería para disminuir la oscilación en la chimenea. Por el contrario, vamos a ver que para una longitud de galería y un caudal dados, a cada sección de chimenea de equilibrio corresponde un diámetro de galería "conjugado" que produce mayores sobreelevaciones de cierre en la chimenea que cualquier otro. En efecto, si se deriva respecto a d la ecuación aproximada (11), y se iguala a cero, resulta un máximo de:

$$z_{\text{máx}} \text{ para } d^{4,2} = \frac{D Q_0 \sqrt{L}}{97,1} \approx \frac{D Q_0 \sqrt{L}}{100}$$

La sobreelevación máxima-maximorum, correspondiente a este diámetro de D , es:

$$Z_+ = 0,965 \frac{Q_0^{0,762} L^{0,381}}{D^{1,238}} \approx \frac{Q_0^2 L}{300 d^{5,2}}$$

o bien, según el gráfico anterior:

$$Z_+ = 31,6 \frac{d^{3,2}}{D^2}$$

Ejemplo: Para $Q_0 = 100 \text{ m}^3/\text{seg.}$, $L = 11.000$ metros, $F = 100 \text{ m}^2$ ($D = 11,285 \text{ m.}$), resulta:

$$d_+^{4,2} = \frac{11,285 \times 100 \times \sqrt{11.000}}{97,1} = 1.219$$

$$d_+ = 5,43 \text{ m.} \quad Z_+ = 55,59 \text{ m.}$$

La sobreelevación para $d = 5 \text{ m.}$ es $Z = 54,47$; para $d = 6 \text{ m.}$ vale $Z = 54,50 \text{ m.}$

Si se emplea la fórmula exacta (7) en vez

de la aproximada se obtiene en el ejemplo anterior $Z_+ = 55,67 \text{ m.}$ para $d_+ = 5,41 \text{ m.}$, lo que no resta validez al principio del diámetro "conjugado" que hemos enunciado.

La consecuencia práctica que deducimos de todo ello es que las galerías de presión deben ser proyectadas con independencia del fenómeno de oscilación de masa, fijando su sección transversal por otros criterios, ya que la influencia de su diámetro sobre la amplitud de las oscilaciones es muy escasa y, como acabamos de ver puede ser de sentido contrario al buscado. Aprovechamos la ocasión para hacer hincapié en la gran importancia que, en cambio, tiene el descenso máximo de la chimenea en la fijación de la pendiente de la galería.