

LA ESTABILIDAD INICIAL EN LAS CHIMENEAS DE EQUILIBRIO

Por ALFREDO SÉMELAS, Ingeniero de Caminos.

Se da por terminado con el presente artículo el notable trabajo del Sr. Sémelas, que ha hecho una exposición muy completa del estado actual del problema estudiado.

III

Después del estudio analítico realizado anteriormente, queremos, para terminar con el problema de la estabilidad inicial, decir algo sobre su estudio gráfico.

Como ya sabemos, éste no es más que la integración gráfica de las ecuaciones diferenciales deducidas en el estudio analítico. Reemplazando las diferenciales por incrementos finitos, se tiene el sistema:

$$\begin{cases} \frac{L}{g} \Delta U = (z - k U^2) \Delta t \\ f \Delta z = (q - U F) \Delta t \end{cases} \quad [V]$$

De esta integración se puede deducir un diagrama desniveles-tiempos, por el cual podremos ver si el movimiento establecido se amortigua o no.

Tiene el estudio gráfico varios inconvenientes: su pesadez y su falta de precisión, además de que sólo puede ser un método de comprobación y no de estudio general. Tiene, sin embargo, la ventaja indudable de dar una idea mucho más clara de la marcha del fenómeno, y permite, además, la comprobación de los casos más diversos dentro de la generalidad com-

parable con las hipótesis hechas para deducir el sistema de ecuaciones [I]. (Casos de chimeneas con secciones variables, vertederos, etc.).

Esta comprobación ha de realizarse para cambios muy pequeños de caudal, o sea, con desniveles muy pequeños (para que no entren en juego pérdidas de carga que, si bien con grandes variaciones, y por consiguiente, con grandes velocidades, serían efectivas, son inoperantes cuando las variaciones son pequeñas). Esto obliga a aumentar extraordinariamente las escalas del dibujo.

Todas las comprobaciones gráficas las hemos realizado por el método de Schoklitsch, por creer que se adapta más a la realidad hidráulica del fenómeno. Este método ya ha sido detalladamente expuesto en el artículo publicado en la REVISTA DE OBRAS PÚBLICAS del mes de agosto pasado, por los Sres. Del Campo y Hacar. Nada diremos, pues, sobre él; insistiremos únicamente sobre los detalles peculiares adoptados que creemos más apropiados para el estudio de la estabilidad inicial, dando después un esquema general de la marcha a seguir.

Resultaría imposible, o por lo menos muy incómodo, el dibujar el gráfico general después de haber ampliado las escalas. Como las variaciones son pequeñas, en cada sistema de coordenadas sólo nos interesa un pequeño rectángulo. Del gráfico general sacamos, pues, estos cuatro rectángulos (fig. 6.^a), que son las zonas en las cuales nosotros calculamos aproximadamente que se ha de desarrollar el fenómeno, y los adosamos como para formar los cuatro cuadrantes de un plano de coordenadas. Las líneas dibujadas son las que ya conocemos (fig. 7.^a).

En el primer cuadrante de ejes coordenados V (volúmenes), z (desniveles), se dibuja la línea $q \Delta t$, que nos da, para cada estado de altura en la chimenea z , el volumen de agua que absorbe la turbina.

En el cuarto cuadrante de ejes V (que coincide con el anterior V), U (velocidades), se dibuja la línea $U F \Delta t$, que nos da, para cada valor de la ve-

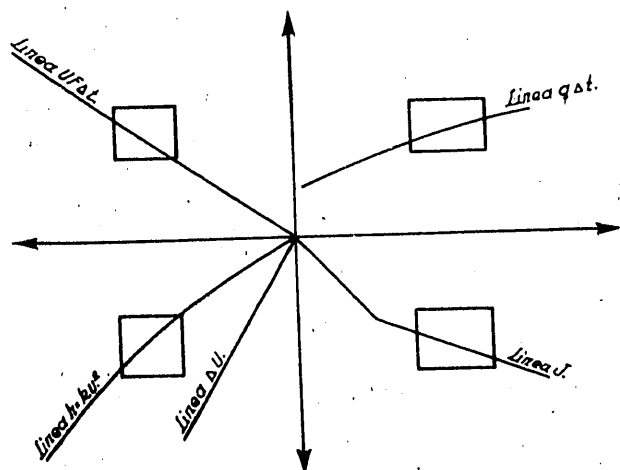


Figura 6.^a

locidad U en el túnel, el volumen de agua que por él llega.

En el tercero, de ejes U (que coincide con el anterior U), z (desniveles), se trazan las líneas $h = k U^2$, que nos da, para cada valor de la velocidad U en el túnel, la correspondiente pérdida de carga, y la línea $\Delta U = \frac{g}{L} \Delta t (z - k U^2)$, que es una recta, cuya tangente es precisamente $\frac{g}{L} \Delta t$, y que nos dará, por lo

nivel 3, al absorber el volumen 0-1 = 5-6, experimenta en su nivel de agua la sobreelevación 6-7. A este incremento de altura corresponde el incremento de velocidad 2-9 [3-8 es paralela a ΔU , cuya tangente es el multiplicador $\frac{g \Delta t}{L}$ de: $z - k U^2$, que es precisamente (9-8) — (2-3)]. El nuevo estado alcanzado es el definido por el punto 8. Pero a este estado le corresponde un nuevo caudal 10-11 (llevando a 10 la

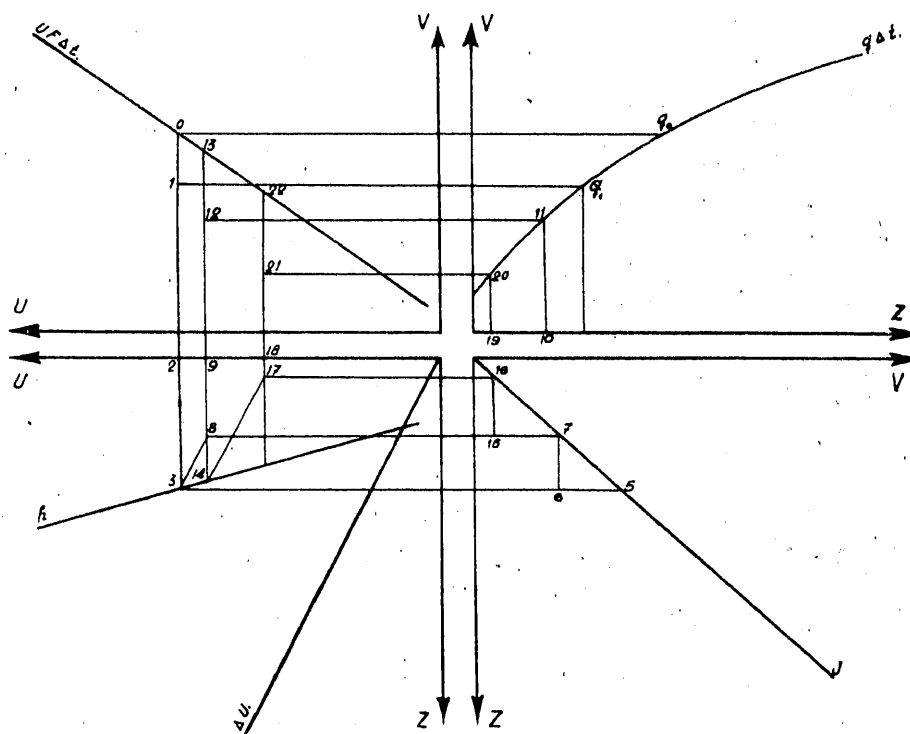


Figura 7.^a

tanto, el incremento de velocidad que corresponde a una cierta variación en los niveles.

Por fin, en el segundo cuadrante de ejes z (que coincide con el anterior), V se lleva la línea de capacidades J , que puede desplazarse horizontalmente lo que se quiera, para mayor comodidad del dibujo, ya que sólo nos interesan los incrementos de altura que corresponden a un incremento de volumen, y no sus valores absolutos.

Guiándonos por el sistema [I'], partimos entonces del estado inicial U_0 , que corresponde a un cierto caudal q_0 .

Al pasar a un caudal q_1 , el volumen 0-1, que va por la galería y no es absorbido por la turbina, se mete en la chimenea de equilibrio. Ésta, que está al

magnitud 9-8). Entonces el agua que va por la galería con la velocidad 9 se encuentra otra vez con un volumen 12-13, que no pasa por turbinas y que tiene que ir también a la chimenea. Este nuevo volumen 12-13 = 7-15, incrementa el nivel de ésta en 15-16. El nuevo incremento de velocidad es 9-18, obtenido multiplicando la nueva $z - k U^2$, que es (17-18) — (9-14) por $\frac{g \Delta t}{L}$ (o sea, llevando 14-17 paralela a ΔU). El nuevo caudal admitido en turbinas es entonces 19-20, etc., repitiéndose así el mismo ciclo.

Los tres abacos de las figuras 8.^a, 9.^a y 10, se han obtenido con este procedimiento para el caso de El Tranco, suponiendo un paso de 32 m.³/s. a 31 m.³/s., con incrementos de tiempo $\Delta t = 10''$, y para distin-

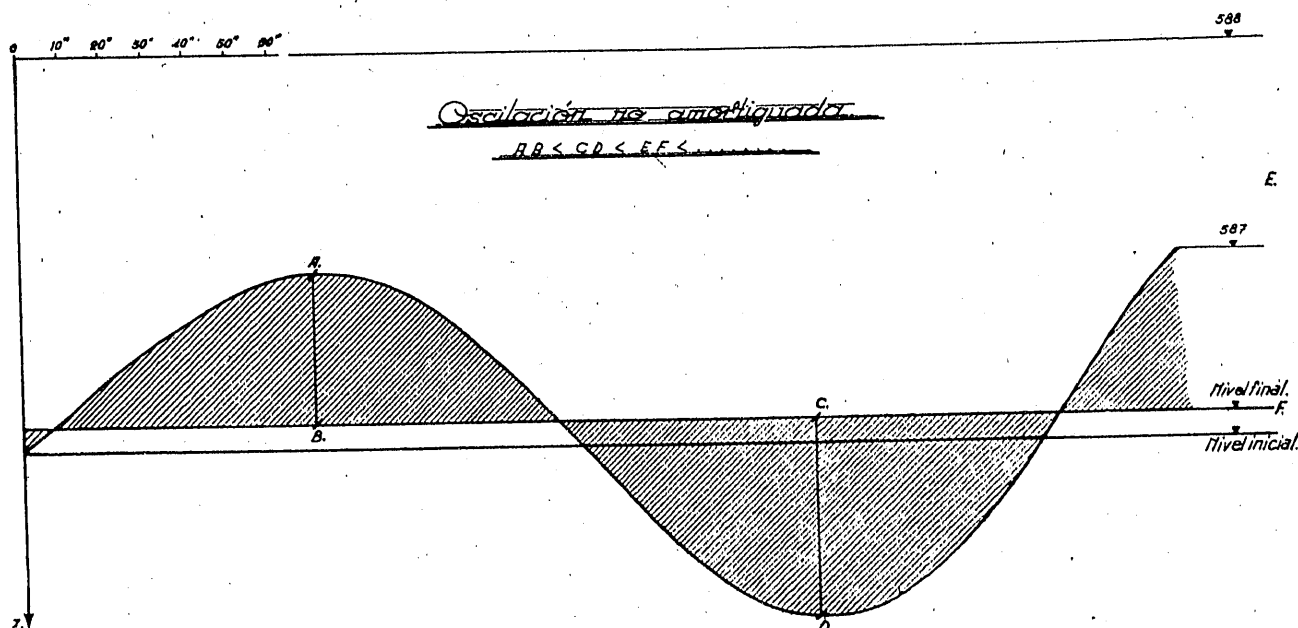


Fig. 8.ª — Paso de 32 a 31 m.³/seg., con chimenea $f = 58 \text{ m.}^2$, mitad de la que da la fórmula de Thöma.

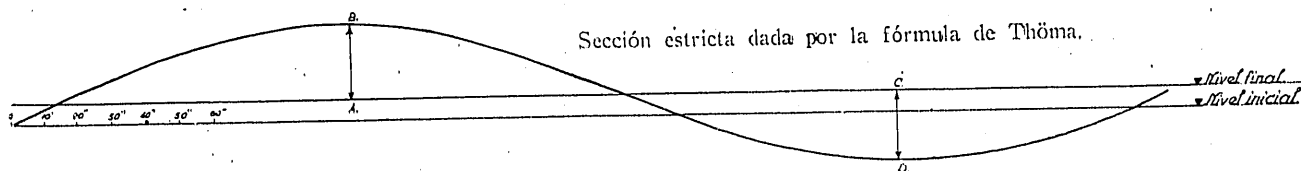


Fig. 9.ª — Oscilación entretenida $AB = CD = EF \dots$

tas secciones (1). El coeficiente de rugosidad de Strickler, aceptado, es 90, que es, quizás, desfavorable. En ellos pueden apreciarse con toda claridad los tres regímenes establecidos de oscilaciones amplificadas, amortiguadas y entretenidas.

Cuando existen varias chimeneas situadas aguas arriba de la Central, el procedimiento es el mismo, pero hay que llevar entonces simultáneamente tantos gráficos como chimeneas existen. Vamos a indicar la marcha general en el caso de dos chimeneas nada más, por considerar que en un caso más general el procedimiento a seguir se deduciría fácilmente del anterior.

Las ecuaciones diferenciales puestas en incrementos finitos son aquí:

$$\Delta U_1 = \frac{g}{L_1} (z_1 - k_1 U_1^2); \quad f_1 \frac{dz_1}{dt} = U_2 F_2 - U_1 F_1;$$

$$\Delta U_2 = \frac{g}{L_2} (z_2 - z_1 - k_2 U_2^2); \quad f_2 \frac{dz_2}{dt} = q - U_2 F_2;$$

siendo aquí:

$$q = \frac{Q_1 H_1}{H - z_2}.$$

En la figura 11 se han dibujado ya los dos gráficos correspondientes a cada chimenea. El de la izquierda corresponde a la chimenea de aguas abajo y lleva la línea de caudales variables $q \Delta t$. El de la derecha, que corresponde a la chimenea intermedia, no necesita llevar esta línea, ya que los volúmenes salientes $U_2 F_2 \Delta t$ se sacan directamente del gráfico anterior.

Al pasar de un caudal, q_0 , a otro, q_1 , tenemos, en la primera chimenea, un sobrante de agua 0-1, que incrementa su altura en 6-7 con una disminución consiguiente de la velocidad 2-9. Como siempre, 4-8 es paralelo a ΔU_2 , siendo la distancia vertical entre 4 y 8 igual a $z_2 - z_1 - k_2 U_2^2$, ya que:

$$z_2 = 9 - 8; \quad z_1 = 3 - 4 = 12 - 13; \quad k_2 U_2^2 = 2 - 3.$$

El nuevo volumen $U_2 F_2 \Delta t$ es el 10 que, referido entonces al gráfico de la derecha, da en la galería 1 un sobrante 0-11, que acarrea en esta chimenea una sobreelevación 15-16, con una disminución de velocidad 12-18.

(1) En la figura 8.ª es interesante observar cómo una variación de caudales muy pequeña (del 3 %) puede conducir al establecimiento de oscilaciones de gran amplitud, al no haber tenido en cuenta la fórmula de Thöma.

Sección: 1, 4, F (F, sección absoluta de la fórmula de F. H. M. N.)

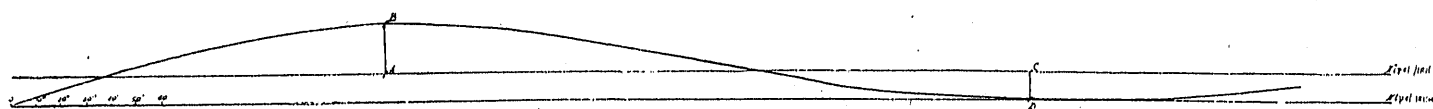


Fig. 10. — Oscilación amortiguada: $AB > CD > \dots$

Con todo esto, el nuevo caudal variable será el 20, obtenido al llevar a 19 la nueva $z_2 = 9-8$, con lo cual el sobrante es 10-20. Este sobrante vuelve a incrementar la altura de la chimenea, z , en 23-24, y disminuye la velocidad en 9-26. Como antes, 22-25 es paralela a ΔU_2 , y el punto 22 se obtiene llevando a partir de 21 la nueva z_1 , que es 18-17. Así, la distancia vertical entre 22 y 25 seguirá siendo:

$$z_2 - z_1 = k_2 U_2^2;$$

o sea (26-25) — (21-22) — (9-21).

La nueva $U_2 F_2 \Delta t$ es la 27, que se refiere a 28, y se sigue el ciclo como anteriormente.

La figura 12 nos muestra el resultado de un estudio de éstos, aplicado al mismo caso de El Tranco, con las siguientes características:

$$L_1 = 2305 \text{ m.}$$

$$L_2 = 1000 \text{ m.}$$

$$f_1 = 59 \text{ m.}^2 = \frac{1}{2} f_c.$$

$$f_2 = 59 \text{ m.}^2 = \frac{1}{2} f_c.$$

Y con $F_1 = F_2 = 14,20 \text{ m.}^2$. Un paso de 32 a 31 $\text{m.}^3/\text{s.}$ y unos intervalos de tiempo de 10". El

coeficiente de rugosidad de Strickler es aquí también 90.

El régimen así establecido es amplificado como tenía que ser, a pesar de que:

$$f_1 + f_2 = f_c.$$

* * *

Tenemos que señalar que en todos los casos hemos elegido el coeficiente de rugosidad de Strickler, igual a 90. Es, quizás, algo excesivo; pero ya dijimos anteriormente, al hablar del valor que debe aceptarse para este coeficiente, que es importantísimo determinarlo cuidadosamente por ensayos previos dentro de las condiciones mismas de la obra. Estos ensayos determinarán el valor a adoptar, aunque, de todos modos, nunca está de más el excederse un poco para evitar posibles percances desagradables, o, por lo menos, mejorar notablemente las condiciones de marcha de la Central.

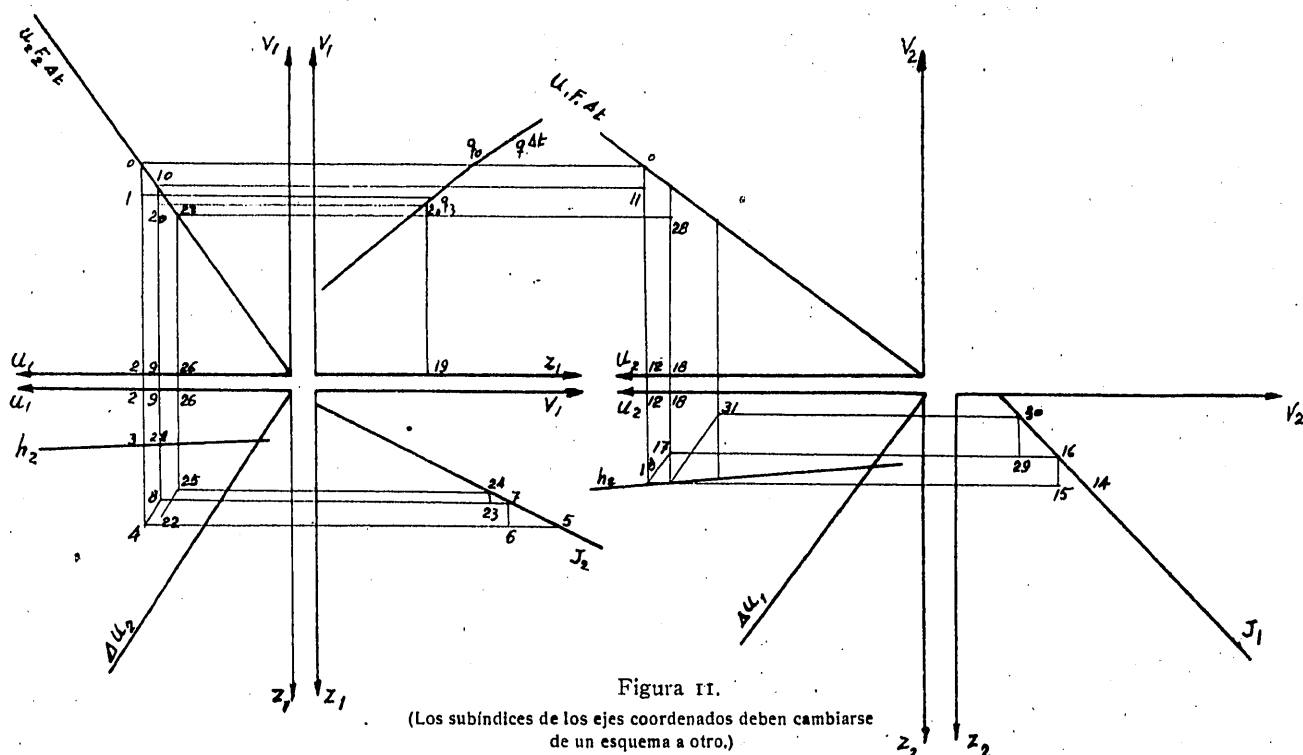


Figura 11.

(Los subíndices de los ejes coordenados deben cambiarse de un esquema a otro.)

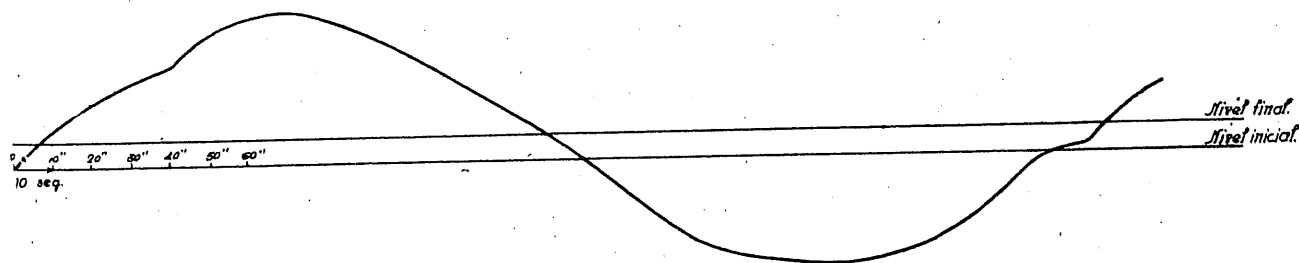
También queremos señalar que en los estudios analíticos hemos despreciado siempre el término correspondiente a la altura de velocidad $\frac{U^2}{2g}$. Los señores Calamme y Gaden, al tener en cuenta este factor, llegan a la fórmula:

$$f_c = \frac{M^2 \cdot R^{4/3} \cdot F}{2g \left(k + \frac{1}{2g} \right) \cdot \left(H_1 + 2 \frac{U^2}{2g} \right)}$$

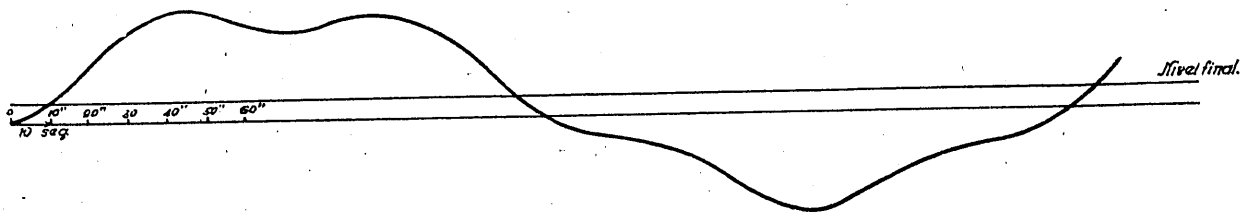
Fórmula que es fácil deducir de nuestro estudio analítico, al hacer intervenir este nuevo factor $\frac{U^2}{2g}$ en las ecuaciones del sistema [II]. El valor de $\frac{U^2}{2g}$ es,

Finalmente, no queremos dejar de insistir sobre la importancia trascendental que en estos problemas tienen los ensayos en modelos reducidos, que pueden, en muchos casos, conducir a la adopción de dispositivos muy interesantes para lograr amortiguamientos más rápidos en las grandes oscilaciones, y además permitan fijar de modo concreto el coeficiente de seguridad de la fórmula de Thöma, que muchas veces ha llegado a tener valores forzados de 2, en lugar de 1,4, como reseñamos en la primera parte.

No quisiera acabar este estudio sin agradecer profundamente al alumno de la Escuela de Caminos señor Barceló su constante colaboración, y a cuantos componen las oficinas de Estudios y Obras de Mengemor, la ayuda que no han dejado ni un solo momento de prestarme, sobre todo por parte de nuestro querido



Oscilación producida en la chimenea f_2 al variar el caudal de 32 a 31 m.³/seg.



Oscilación en la chimenea f_1 al variar q de 32 a 31 m.³/seg.

Figura 12.

generalmente, muy pequeño, y la fórmula anterior es poco diferente de la de Thöma. Sin embargo, esto nos indica que la adopción de un Venturi en la galería, a su paso por la chimenea, puede, al aumentar el término $\frac{U^2}{2g}$, mejorar un poco las condiciones de estabilidad y, por consiguiente, permitirá una pequeña reducción en el diámetro de la chimenea.

compañero y Director, José Luis Mendoza, cuyo interés y cuya preocupación constantes han sido el más firme estímulo en mi modesto trabajo.

Bibliografía.

- FORCHEIMER: *Tratado de Hidráulica*.
 SCHOKLITSCH: *Arquitectura hidráulica*.
 CALAMME y GADEN: *Théorie des chambres d'équilibre*.