

# TÉCNICA

REVISTA TECNOLÓGICO - INDUSTRIAL

AÑO XLI

FEBRERO 1918

NÚM. 2

## OBITUARIO : DON JOSÉ A. BARRET *de los 32*

El día 8 de enero último, cuando nuestro distinguido amigo y compañero señor Barret se dirigía, en cumplimiento de su deber y en aras de su vocación por la enseñanza, a dar su clase en la Escuela Industrial, fué alevosamente asesinado por unos criminales desconocidos que, según parece, estaban acechando su paso. No está en nuestro ánimo, ni sería propio de estas páginas, el hacer comentarios sobre tan odioso crimen, que es de esperar sea puesto en claro por los tribunales de justicia sin perderse en esas nebulosidades que envuelven muchas veces ciertos delitos, por antonomasia llamados sociales. Nuestro propósito es solamente llorar al amigo perdido y hacer resaltar cuán dolorosa es para la clase y para el país esta desaparición brutal de un compañero que tanto trabajó por el progreso industrial y la cultura obrera y del cual teníamos derecho a esperar mucho más todavía.

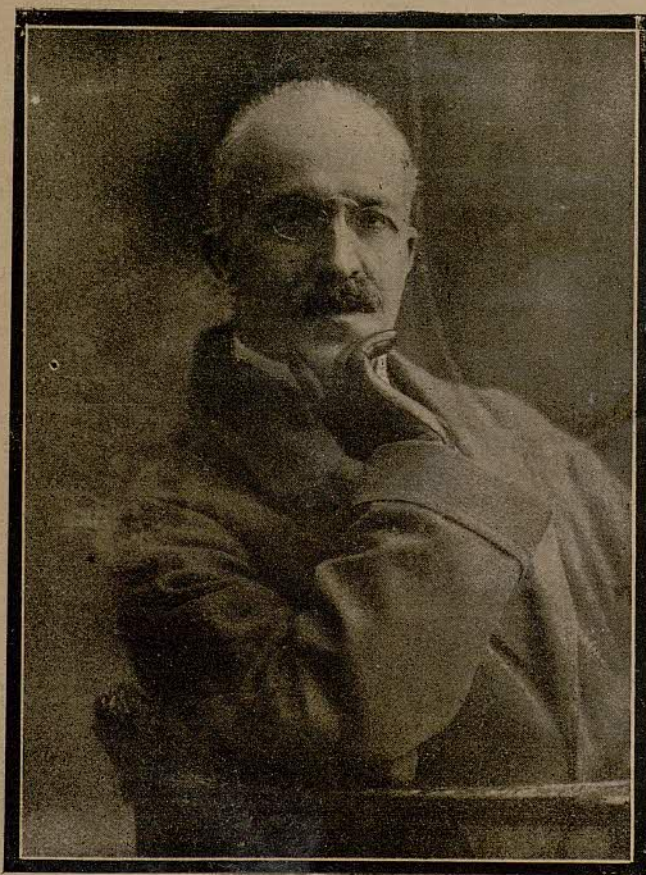
Terminada la carrera en 1885, todavía muy joven, Barret entró en la industria de la Construcción mecánica por el camino espinoso, pero único, que han debido seguir cuantos han llegado a la cumbre por sus propios medios. Sus primeros pasos fueron dados en los talleres del «Nuevo Vulcano», que bajo la dirección de nuestro compañero don Eduardo Font había alcanzado en aquella época un desarrollo considerable, dedican-

dose, además de las reparaciones navales que eran su especialidad, a la construcción de máquinas motrices y transmisiones para la industria manufacturera. Los conocimientos

y la autoridad del joven ingeniero le hicieron llegar pronto al cargo de ingeniero segundo, que dejó más tarde para ocupar el primer puesto en el «Arsenal Civil», donde tuvo ocasión de aplicar su espíritu progresivo en las numerosas ramas a que dicha Sociedad se dedicaba, desde la construcción naval a la de puentes y a la de máquinas para instalaciones fijas.

Más adelante, al decaer aquellos talleres, como consecuencia de la pérdida de las colonias, donde tenía su principal mercado, nuestro compañero no quiso limitarse a desplegar su actividad en el terreno puramente técnico, sino que, llevado de sus iniciativas, fundó la Sociedad «Barret y C.<sup>ª</sup>», que luego había de ampliarse bajo el nombre de «Industrias Mecánicas Consolidadas», y que se dedicó desde un principio a la fundición de hierro en sus aspectos

más modernos. Los talleres de la última razón social merecen ser citados como modelo de fundiciones bien montadas, y en todas sus partes se ven muestras de la actividad de un técnico progresivo, desde las bóvedas tabicadas sobre grandes cerchas que forman la cubierta, hasta la producción de tuerza motriz a base de gas pobre y la transmisión



eléctrica aplicada desde los primeros tiempos. El moldeado a máquina de piezas repetidas se ha aplicado allí en todos los tamaños, y al lado de esto, los cubilotes de fondo móvil, los transportadores *monorail* de suspensión para las cucharas y otra multitud de detalles demuestran al visitante técnico que la dirección se ha inspirado en los más recientes progresos de la industria similar extranjera.

Si las líneas que preceden avaloran los méritos de Barret como técnico, su obra cultural es no menos continua y más notable aun. Su ingreso en la enseñanza profesional a los cuatro años de terminada su carrera tuvo lugar en condiciones que le dieron justo renombre. La Diputación de Barcelona acababa de crear una clase de máquinas y calderas en la «Escuela de Artes y Oficios» de esta ciudad, y a fin de proveerla en un ingeniero experimentado, convocó una oposición-concurso al que concurren varios compañeros distinguidos y de sólido prestigio. Contra ellos luchó Barret, que desde el primer momento se impuso y obtuvo la cátedra que hasta su muerte ha venido desempeñando con gran acierto.

El prestigio que allí ganó, unido a una gran cultura facilitada por su conocimiento de los principales idiomas europeos, contribuyeron, seguramente en gran parte, a que nuestro «Fomento del Trabajo Nacional» le encomendase la honra de una Memoria, que poco después del desastre colonial elevó dicha Sociedad al Gobierno central, pidiendo una especie de concierto económico para la contribución industrial, una parte de la cual debía destinarse a la mejora de la enseñanza técnica. En dicho documento, que, por cierto, fué muy discutido entre los compañeros, Barret sentó las bases de la futura Escuela Industrial, de tal modo que, a pesar de haber fracasado en lo más esencial la instancia del Fomento, de su parte relacionada con la enseñanza, se tomó pie para la creación de aquella escuela, de cuyo Patronato era vocal nato nuestro malogrado amigo.

Más recientemente, al transformar la Diputación de Barcelona la antigua Escuela de Artes y Oficios en «Escuela Elemental del Treball», Barret tomó parte muy activa en su organización, y especialmente en la sección de fundido-

res, a la cual aportó todo su empeño, no sólo dando clase oral, sino escogiendo personal muy apto para las clases prácticas y valiéndose de su prestigio entre los industriales del ramo para que enviaran sus obreros a instruirse y perfeccionarse en dicho centro. Ultimamente había sido nombrado Director de la misma «Escuela» y estaba reorganizándola, instalando maquinaria moderna, para convertirla en una Escuela de Mecánica Práctica, cuyos resultados han de hacerse sentir seguramente dentro de poco tiempo en nuestra industria.

A estas cualidades eminentes como ingeniero y como maestro, unía también dotes poco comunes de hombre de mundo que le abrían todas las puertas. Pulcro y atildado en su persona, de palabra fácil y elegante, discurría con igual brillantez sobre problemas elevados de ingeniería que sobre cuestiones industriales o mercantiles. Por esto su nombre no era sólo respetado entre los ingenieros, sino que todos los constructores mecánicos, en general, habían hecho honor a sus méritos, confiándole la Presidencia de la «Asociación de Industriales Mecánicos y Metalarios» que ocupaba en el momento de su muerte. Desde ella fué el promovedor del primer Congreso Nacional Metalúrgico, celebrado en esta ciudad, y a su iniciativa se debió también la fundación de la «Unión Española de Transformadores Mecánicos», cuya presidencia ocupaba igualmente. En nuestra Asociación era también justamente apreciado, y además de haber tomado parte muy activa en su vida cultural, había desempeñado el cargo de Vicepresidente 1.º en el bienio de 1892-93.

Su trágica muerte deja, pues, grandes vacíos que llenar en muchas de nuestras instituciones vivas, ya que Barret no es de esos hombres que pueden substituirse fácilmente. Al acompañar a su afligida familia en el justo dolor que le ha causado su pérdida, tenemos sus compañeros el doble sentimiento de ver desaparecer al buen amigo e ilustre colega, honra de la carrera, y de echar de menos al ciudadano activo que tanto había hecho y del cual tanto cabía esperar todavía por la prosperidad y la cultura del país.

JOSÉ SERRAT Y BONASTRE

## LA FABRICACIÓN ALEMANA PARA LA INDUSTRIA TEXTIL

RECIENTEMENTE ha aparecido en *Engineering* un informe que permite conocer la importancia de la fabricación de máquinas textiles en Alemania. Actualmente existen en Alemania 223 fábricas dedicadas a estas construcciones: 30 de ellas construyen máquinas para hilar; 106, máquinas para tejer, bordar, etc.; 109 se ocupan de instalaciones para tintorería, lavaje, etc. Veinte de esas fábricas son Sociedades anónimas, las cuales emplean el 40 por 100 del total de obreros ocupados en esta industria.

En 1913 se contaban unos 28,000 brazos trabajando en la construcción de material para la industria textil.

La industria de máquinas textiles tiene su foro en Sajonia, en la región del Rin, en Westphalia, en Wurtemberg,

en Turingia, en el Palatinado, el Brandeburgo, la Silesia, y también en Alsacia.

No existe un repertorio «oficial» completo de la producción alemana relativa a las máquinas textiles. Alguien atribuye a esta fabricación un valor total anual de 100 a 120 millones de marcos, es decir, una vigésima parte de la fabricación mundial de máquinas, producto del trabajo de 550,000 brazos, estimado en 2,500 millones de marcos.

El valor medio de las exportaciones de material para la industria textil durante los años de 1910 a 1913 y el primer semestre de 1914 es de 45 millones de marcos. En la exportación se señala la de Alsacia a Francia y a Rusia, cuyo valor es de 2 millones de marcos aproximadamente.

(De la *Technique Moderne*)

# TUBERÍAS FORZADAS DE DIÁMETRO VARIABLE

(CONCLUSIÓN 1)

y observando que el primer término es precisamente el diámetro  $D_m$  de la tubería cilíndrica equivalente, se puede poner

$$K = D_m \left( \frac{S}{n} \right)^{\frac{1}{7}} \left[ \frac{1}{n} \sum_0^n x^{\frac{5}{7}} \right]^{\frac{1}{5}};$$

y conocido el valor de  $K$  se pueden calcular los valores de los diámetros de los trozos sucesivos, que serán:

$$D_1 = D_m \left[ \frac{1}{n} \sum_0^n x^{\frac{5}{7}} \right]^{\frac{1}{5}},$$

$$D_2 = D_m \left[ \frac{1}{n} \sum_0^n x^{\frac{5}{7}} \right]^{\frac{1}{5}} \cdot \frac{1}{2^{\frac{1}{7}}} = \frac{D_1}{2^{\frac{1}{7}}}$$

$$D_3 = D_m \left[ \frac{1}{n} \sum_0^n x^{\frac{5}{7}} \right]^{\frac{1}{5}} \cdot \frac{1}{3^{\frac{1}{7}}} = \frac{D_1}{3^{\frac{1}{7}}}, \dots, D_n = \frac{D_1}{n^{\frac{1}{7}}}$$

Tratemos ahora de encontrar una fórmula que nos dé el peso de la tubería en función del número de trozos. Podremos aplicar la fórmula

$$p = 2 h D^2$$

encontrada anteriormente. Para el trozo de orden

$x$ ,  $h$  vale  $h_x = x \frac{S}{n} i$ ; el diámetro  $D_x$  valdrá

$$D_x = K \left( \frac{xS}{n} \right)^{-\frac{1}{7}}; \text{ por consiguiente, el peso del}$$

trozo  $x$  será

$$P_x = 2x \frac{S}{n} i K^2 \left( \frac{xS}{n} \right)^{-\frac{2}{7}} \frac{S}{n} = 2 K^2 i \left( \frac{S}{n} \right)^{\frac{12}{7}} x^{\frac{5}{7}}.$$

luego el peso total  $P_v$  valdrá

$$P_v = \sum_0^n P_x = 2 K^2 i \left[ \frac{S}{n} \right]^{\frac{12}{7}} \sum_0^n x^{\frac{5}{7}} \quad (5);$$

y substituyendo el valor de  $K$  encontrando antes se obtiene

$$P_v = 2 i D_m^2 \left( \frac{S}{n} \right)^2 \left( \frac{1}{n} \right)^{\frac{2}{5}} \left[ \sum_0^n x^{\frac{5}{7}} \right]^{\frac{7}{5}}$$

El peso de la tubería cilíndrica equivalente es

$$P_c = 2 D_m^2 i \int_0^S s ds = i D_m^2 S^2.$$

El coeficiente de economía  $\eta$  se puede expresar por la relación

$$\eta = \frac{P_c - P_v}{P_c} = 1 - \frac{P_v}{P_c};$$

por lo tanto

$$\eta = 1 - \frac{2}{n^{\frac{12}{5}}} \left[ \sum_0^n x^{\frac{5}{7}} \right]^{\frac{7}{5}}$$

cuando  $n$  es grande, se puede admitir sin grave error la igualdad

$$\sum_0^n x^{\frac{5}{7}} = \frac{n^{\frac{12}{7}}}{\frac{12}{7}} + \frac{n^{\frac{5}{7}}}{2} = \frac{n^{\frac{5}{7}}}{2} \left[ \frac{7n}{6} + 1 \right];$$

por consiguiente

$$\left[ \sum_0^n x^{\frac{5}{7}} \right]^{\frac{7}{5}} = \frac{n}{2^{\frac{7}{5}}} \left( \frac{7n}{6} + 1 \right)^{\frac{7}{5}} = \frac{n}{2^{\frac{7}{5}}} \times \left[ \left( \frac{7n}{6} \right)^{\frac{7}{5}} + \frac{7}{5} \left( \frac{7n}{6} \right)^{\frac{2}{5}} + \frac{7}{5} \cdot \frac{2}{2} \left( \frac{7n}{6} \right)^{-\frac{3}{5}} + \dots \right].$$

El tercer término del paréntesis es ya pequeño cuando  $n$  es grande, y los términos sucesivos son

1) Se suplica la corrección de las siguientes erratas, por ser las más importantes de las que se escaparon al revisar las pruebas de la primera parte de este trabajo.

Página	Columna	Línea	Dice	Debe decir
7	2	10	F (5)	F (s)
7	2	16	F (5)	F (s)
7	2	21	$\frac{\partial}{\partial D}$ (	$\frac{\partial}{\partial D}$ (
8	1	3-4-5-7	K	$K_1$
9	1	penúltima	$\frac{7}{12}n + 1$	$\frac{7}{12}n + \frac{1}{2}$

más pequeños todavía y de signos alternadamente negativos y positivos, por lo cual estamos autorizados para tener en cuenta los dos primeros términos tan sólo, resultando

$$\eta = 1 - \frac{2}{n^{1/5}} \cdot \frac{n^{12}}{2^{7/5}} \left[ \left( \frac{7}{6} \right)^{7/5} + \frac{7}{5} \left( \frac{7}{6} \right)^{2/5} \frac{1}{n} \right] =$$

$$= 1 - 2 \left( \frac{7}{12} \right)^{7/5} \left( 1 + \frac{6}{5n} \right) = 1 - 0'9104 - \frac{1'1285}{n} =$$

$$= 0'0596 - \frac{1'1285}{n} \quad (6)$$

Esta expresión sencilla de la economía, si bien no es exacta sino cuando  $n$  es grande, puede ser de gran utilidad para deducir el peso aproximado de la tubería de diámetro decreciente, una vez conocido el peso de la tubería cilíndrica equivalente, pues se tiene  $P_v = P_c (1 - \eta)$  y  $P_c$  es un valor muy fácil de calcular, según se ha visto.

Además, la anterior expresión de la economía sirve para indicarnos cuál es la economía máxima que se puede obtener en una tubería de inclinación constante, como la estudiada por ahora, pues para  $n = \infty$ ,  $\eta = 0'0596$ ; es decir, la economía máxima en una tubería de inclinación constante es del 5'96 por ciento; para  $n = 100$ ,  $\eta = 0'0483$ .

Resulta, pues, que la economía crece con el número trozos, contrariamente al resultado a que conducen los cálculos de Catani, que llega a la expresión  $\frac{P_v}{P_c} = 0'95 - \frac{1}{2n}$ , la cual sólo es cierta para valores algo grandes de  $n$ ; esta expresión dice claramente que  $P_v$  aumenta cuando  $n$  aumenta, y este resultado debe bastar para echar por tierra los cálculos de este ingeniero italiano; pero como no se trata de un error en los cálculos, sino de un error en el procedimiento, pasaremos a tratar un ejemplo que lo pondrá de manifiesto, y servirá al mismo tiempo de aplicación de las fórmulas encontradas.

Sea una tubería forzada de 1,000 metros de longitud y 200 metros de desnivel, con una inclinación constante de 0'2; admitida una pérdida de carga de 20 metros, calculemos los diámetros de los distintos trozos y el peso total de la conducción para un gasto de 1,000 litros por segundo.

Supongamos la tubería descompuesta en 20 trozos; el acuerdo entre cada dos trozos se puede hacer por un tubo cónico, para reducir la pérdida de carga debida al cambio brusco de sección. Admitamos para  $b$  el valor  $b = 0'0025$ . El diámetro de tubería cilíndrica equivalente sería

$$D_m = \left( \frac{0'0025 \cdot 1000 \cdot 1^2}{20} \right)^{1/5} = (0'135)^{1/5} = 0'65975 \text{ metros}$$

$$\text{o sea } D_m = 0'66 \text{ metros}$$

Por otra parte tenemos

$$n = 20, \quad \frac{S}{n} = 50 \text{ metros,}$$

$$\text{luego } K = 0'66 \cdot 50^{1/7} \left[ \frac{1}{20} \sum_0^{20} \frac{5}{x^7} \right]^{1/5} =$$

$$= \left[ 0'125 \cdot 50^{5/7} \cdot 0'05 \cdot \sum_0^{20} \frac{5}{x^7} \right]^{1/5}$$

la tabla nos da el valor 103'2728 para la suma de potencias  $\frac{5}{7}$  entre cero y veinte, y 16'3520 para  $50^{1/7}$ ; luego

$$K = (0'125 \cdot 16'3520 \cdot 0'05 \cdot 103'2728)^{1/5} = (10'55338)^{1/5} = 1'60209$$

Conocido este valor se pueden calcular los diámetros de los trozos sucesivos, resultando

$$D_1 = K \left( \frac{S}{n} \right)^{-1/7} = \frac{1'60209}{50^{1/7}} = 0'916 \text{ metros;}$$

$$D_2 = \frac{D_1}{2^{1/7}} = \frac{0'916}{2^{1/7}} = 0'823;$$

y de este modo seguiríamos obteniendo

$$D_3 = \frac{0'916}{3^{1/7}} = 0'783 \dots \dots D_{10} = \frac{0'916}{10^{1/7}} = 0'660 = D_m$$

$$\dots \dots \dots \text{ hasta llegar a } D_{20} = \frac{0'916}{20^{1/7}} = 0'597.$$

Es digno de observar que el diámetro del trozo central es precisamente el mismo que el de la tubería cilíndrica equivalente.

El peso de la tubería será, empleando la fórmula (5).

$$P_v = 2 \cdot 1'60209^2 \cdot 0'2 \cdot 50^{12/7} \cdot 103'2728 = 86684 \text{ Kgs. ,}$$

mientras que la tubería cilíndrica de 0'660 metros de diámetro tendría un peso

$$P_c = 0'66^2 \cdot 0'2 \cdot 1000^2 = 87120 \text{ Kgs.}$$

La economía será, por consiguiente,

$$\eta = \frac{87120 - 86684}{87120} = 0'005;$$

calculando  $\eta$  por la expresión aproximada hallada se obtiene

$$\eta = 0'0596 - \frac{1'1285}{20} = 0'0596 - 0'0584 = 0'0032;$$

como se ve, para  $n = 20$  el error con que se obtiene  $\eta$  empleando la fórmula (6) vale 0'0018 por defecto.

En igualdad de condiciones, el peso de la tubería calculada por el método de Catani sería

$$P = \frac{2 S^2 i}{n^2} \left( \frac{n+1}{2} \right)^{\frac{2}{5}} D_m^2 \sum_0^n \frac{x^{\frac{3}{5}}}{5} = \frac{2 S^2 i}{n^2} \left( \frac{n+1}{2} \right)^{\frac{2}{5}} \times$$

$$\times \left( \frac{n^{\frac{8}{5}}}{8} + \frac{n^{\frac{3}{5}}}{2} - 0'175 \right) D_m^2 = \frac{2 \cdot 1000^2 \cdot 0'2}{20^2} \left( \frac{21}{2} \right)^{\frac{2}{5}} \times$$

$$\times \left( \frac{5 \cdot 20^{\frac{8}{5}}}{8} + \frac{20^{\frac{3}{5}}}{2} - 0'175 \right) 0'66^2 = 87328 \text{ Kgs.}$$

es decir, que el peso de la tubería así calculada es superior al de la tubería cilíndrica; pero debo confesar que la fórmula empleada no es la deducida por Catani, sino la que debió deducir. En sus cálculos hace este ingeniero la hipótesis de que el espesor de cada trozo de tubería debe ser el correspondiente al punto medio; pero esto no es admisible, por cuanto así resulta que la mitad inferior de cada trozo trabaja a mayor esfuerzo que la mitad superior; y ahora aparecerá claramente que siguiendo este método para calcular los espesores, la economía será tanto mayor cuanto menor sea el número de trozos; pues considérese la tubería como formada por un solo trozo, y calcúlese la economía que puede resultar de adoptar un espesor correspondiente a la carga media y no a la máxima. Ahora bien, si se prescinde de las fórmulas que da Catani, y sólo se tiene en cuenta la idea fundamental del método, se pueden obtener economías disminuyendo el diámetro a medida que la distancia aumenta. Pero no es precisamente la distancia (como parece deducirse del trabajo a que vengo haciendo referencia) lo que

debe hacer variar al diámetro, sino *la presión*; y la ley general deducida más adelante puede servir para el cálculo práctico de una tubería de perfil cualquiera obteniendo el máximo de economía.

La misma tubería anterior, descompuesta en 50 trozos tendría un peso total

$$P_D = 2 \cdot 0'2 \cdot 0'66^2 \cdot 20^2 \cdot 0'02^{\frac{2}{5}} \cdot 484'9638^{\frac{2}{5}} = 83871 \text{ Kgs.}$$

lo cual supone una economía de

$$87120 - 83871 = 3249 \text{ kgs}$$

y por tanto

$$\eta = \frac{3249}{87120} = 0'0373$$

y según la fórmula (6)

$$\eta = 0'0596 - \frac{1'1285}{50} = 0'0596 - 0'0226 = 0'0370$$

valor que concuerda con el anterior.

Conviene observar que como la economía depende exclusivamente del número de trozos en que se descompone la tubería, al hacer el tanteo preliminar sobre la pérdida de carga más económica, se calculará el coste de la tubería cilíndrica de diámetro  $D_m$ , aplicando el factor de reducción  $(1 - \eta)$ , previa deducción de  $\eta$  por la fórmula (6), y una vez encontrado el diámetro  $D_m$  más económico se substituirá en las fórmulas que dan los valores de los diámetros de los trozos sucesivos.

Pero en las consideraciones anteriores se supone que el espesor de las planchas puede ser cualquiera, y esto no puede en la realidad admitirse así, ya que en el comercio se encuentran planchas de espesores fijos, que suelen variar de milímetro en milímetro. Esto conduce a tener, por ejemplo, que emplear plancha de 6 m. m. donde el espesor teórico debiera ser 5'1 m. m. Pero el aumento de peso producido, lo mismo afecta a la tubería cilíndrica que a la de diámetro decreciente, y aún quizás resulte alguna ventaja en favor de la última, pues en una tubería de esta clase hay menos cambios de espesor que en una tubería cilíndrica. En una tubería cilíndrica los cambios de espesor están espaciados por igual, ya que siendo el diámetro constante, la presión es el único factor que influye en el espesor, mientras que en la tubería de diámetro variable los cambios de espesor se van separando más a medida que el diámetro disminuye; y si bien al principio de la tubería habrá mayor gasto de metal que en la cilíndrica, por ser ésta de menor diámetro, en la segunda mitad de

la tubería ocurre lo contrario, pudiéndose admitir que ambos efectos se compensan, quedando a favor de la tubería de diámetro decreciente la diferencia que resulta de presentar menor número de cambios de espesor. Por consiguiente, el tanto por ciento de economía calculado por la fórmula (6) se puede admitir para las tuberías construídas con las planchas que hay en el comercio.

No obstante lo anterior, la economía de peso así calculada no es exacta, pues se precisa dotar a los primeros tubos de un espesor superior al que da la fórmula deducida. Por este motivo se impone proceder por tanteos, pues como el diámetro inicial aumenta con el número de trozos en que se descompone la tubería, para cada caso existirá un número máximo de trozos, del cual, no convendrá pasar. Determinar por cálculo este número es completamente imposible; pero los tanteos nunca serán muy pesados. Se acostumbra, y resulta económico, construir la primera sección de la tubería de cemento armado, hasta el punto en que la presión es ya bastante fuerte para que sean de temer las filtraciones, aunque sobre esta presión no se sigue un criterio muy fijo. De adoptar la solución mixta, es decir, la tubería de cemento armado al principio, como el espesor de ésta es siempre sobrado para resistir la presión y la flexión, se puede suponer dicho espesor constante y hacer el cálculo del coste que, en tal supuesto, será proporcional al diámetro; y si se llega a un diámetro excesivo, que aconseje un espesor mayor, se aumentará éste y se hará de nuevo el cálculo como si fuese constante.

Las ventajas de una tubería de diámetro decreciente, aparte su menor coste, son:

1.<sup>a</sup> La velocidad del agua a la entrada es menor que en la tubería cilíndrica, por consiguiente la pérdida de carga debida a la entrada  $\left(\frac{V^2}{4g}\right)$  es menor, disminuyendo además la probabilidad de formación de bolsas de aire, al par que la entrada de arena, aunque la pérdida de carga debida a la velocidad es mayor, pero esto no es un inconveniente.

2.<sup>a</sup> Si bien el volumen de agua contenido en la tubería de diámetro decreciente es mayor que el contenido en la tubería cilíndrica, su fuerza viva es menor, según vamos a ver.

El volumen de la tubería cilíndrica es

$$V_c = \frac{\pi D^2 S}{4}$$

y la fuerza viva del agua contenida en la misma

$$F_c = \frac{1000}{2g} \cdot \frac{\pi D^2 S}{4} \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 D^4} = \frac{2000}{g} \cdot \frac{S Q^2}{\pi D^2}$$

El volumen de la tubería de diámetro variable es

$$\begin{aligned} V_v &= \frac{\pi S}{4n} \left[ D_1^2 + D_2^2 + \dots + D_n^2 \right] = \frac{\pi S}{4n} \frac{D_m^2}{n^{\frac{2}{5}}} \times \\ &\times \left[ \sum_0^n \frac{n}{x^{\frac{5}{7}}} \right]^{\frac{2}{5}} \left[ \frac{1}{1^{\frac{2}{7}}} + \frac{1}{2^{\frac{2}{7}}} + \dots + \frac{1}{n^{\frac{2}{7}}} \right] = \\ &= \frac{\pi S D_m^2}{4 n^{\frac{7}{5}}} \left[ \sum_0^n \frac{n}{x^{\frac{5}{7}}} \right]^{\frac{2}{5}} \sum_0^n \frac{n}{x^{\frac{2}{7}}} \end{aligned}$$

para  $n = 50$  se tiene

$$V_v = 1.144 V_c$$

La fuerza viva del agua contenida en el trozo  $x$  valdrá

$$f_x = \frac{m_x u_x^2}{2} = \frac{1000}{g} \cdot \frac{\pi D_x^2 S}{4n} \cdot \frac{Q^2}{\pi^2 D_x^4} = \frac{2000}{g} \cdot \frac{S Q^2}{n \pi D_x^2}$$

Luego la fuerza viva total será

$$\begin{aligned} F_v &= \frac{2000}{g} \cdot \frac{S Q^2}{n \pi} \left[ \frac{1}{D_1^2} + \frac{1}{D_2^2} + \dots + \frac{1}{D_n^2} \right] = \\ &= \frac{2000}{g} \cdot \frac{S Q^2}{\pi D_m^2 n^{\frac{3}{5}}} \left[ \sum_0^n \frac{n}{x^{\frac{5}{7}}} \right]^{-\frac{2}{5}} \sum_0^n \frac{n}{x^{\frac{2}{7}}} \end{aligned}$$

La relación entre  $F_c$  y  $F_v$  se puede admitir que vale aproximadamente

$$\begin{aligned} \frac{F_c}{F_v} &= n^{\frac{3}{5}} \left[ \sum_0^n \frac{n}{x^{\frac{5}{7}}} \right]^{\frac{2}{5}} \left[ \sum_0^n \frac{n}{x^{\frac{2}{7}}} \right]^{-1} = \\ &= n^{\frac{3}{5}} \left[ \frac{\frac{12}{7}}{\frac{12}{7}} + \frac{\frac{5}{7}}{2} \right]^{\frac{2}{5}} \times \frac{1}{\frac{\frac{9}{7}}{\frac{9}{7}} + \frac{\frac{2}{7}}{2}} = \end{aligned}$$

$$n^{\frac{9}{7}} \left[ \frac{7}{12} + \frac{1}{2n} \right]^{\frac{2}{5}} \times \frac{1}{\left( \frac{7}{9} + \frac{1}{2n} \right) n^{\frac{9}{7}}} = \left[ \frac{7}{12} + \frac{1}{2n} \right]^{\frac{2}{5}} ;$$

cuando  $n$  es grande se obtiene

$$\frac{F_c}{F_v} = \frac{\left( \frac{7}{12} \right)^{\frac{2}{5}}}{\frac{7}{9}} = 1.036 \text{ ó bien}$$

$F_c = 1.036 F_v$ ; para  $n=2$  ya resulta  $F_c = 1.03 F_v$ .

Por consiguiente, no obstante ser mayor el volumen de agua contenido en la tubería de diámetro variable; su fuerza viva es menor que la del agua contenida en la tubería cilíndrica equivalente, lo cual reducirá, aunque poco, el efecto de los golpes de ariete.

3.<sup>a</sup> Caso de que la tubería se rompa, el daño será tanto mayor cuanto mayor sea el volumen de agua que salga; lo más probable es que la tubería se rompa por el sitio donde la presión es mayor; y como los gastos varían como los cuadrados de los diámetros, la relación entre el gasto de la tubería cilíndrica y la de diámetro decreciente será

$$\frac{Q_c}{Q_v} = \frac{D_m^2 n^{\frac{24}{5}}}{D_m^2 \left[ \sum_0^n x^{\frac{5}{7}} \right]^{\frac{2}{5}}}$$

que para  $n=50$  da  $\frac{Q_c}{Q_v} = 1.232$

Pero una tubería de inclinación constante, como la estudiada hasta aquí, es un caso puramente teórico. Pasemos a estudiar una tubería real de perfil cualquiera. Sea una tubería forzada de longitud total  $S$ , compuesta de una serie de tramos de longitudes  $S_1, S_2, S_3, \dots, S_r$ , que tienen inclinaciones respectivamente iguales a  $i_1, i_2, i_3, \dots, i_r$ ; convendrá recordar que llamamos inclinaciones a los senos de los ángulos que los tramos de la tubería forman con la horizontal. Se deberán verificar las dos igualdades siguientes:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_r$$

$$Z_r = S_1 i_1 + S_2 i_2 + S_3 i_3 + \dots + S_r i_r$$

siendo  $Z_r$  el desnivel que existe entre los extremos de la tubería.

Tratemos de averiguar la ley que debe relacionar

el diámetro de la tubería en un punto con la cota del mismo bajo el origen, o sea el diámetro con la presión, para que el peso de la tubería sea un mínimo.

Hagamos

$$S_1 i_1 = Z_1$$

$$S_1 i_1 + S_2 i_2 = Z_2$$

$$S_1 i_1 + S_2 i_2 + S_3 i_3 = Z_3$$

de modo que como no hemos dicho nada sobre el signo de  $i_1, i_2, \dots, Z_1, Z_2, \dots, Z_r$  representan las cargas en los puntos en que quiebra el perfil longitudinal de la tubería.

El peso de un elemento de tubería vale, según quedó establecido,

$$dp = 2 h D^2 ds$$

siendo  $h$  la carga en metros de agua que obra sobre este elemento. En el caso que consideramos, la carga en un elemento del tramo de orden  $x$  valdrá

$$h = Z_{x-1} + i_x s$$

pues  $Z_{x-1}$  es la carga en el origen de este tramo,  $i_x$  la inclinación del mismo, y  $s$  la distancia a lo largo de la tubería desde el origen del tramo hasta el punto que se considera. Por consiguiente

$$dp_x = 2 (Z_{x-1} + i_x s) D^2 ds$$

El peso total de la tubería será

$$P = p_1 + p_2 + \dots + p_r = 2 \int_0^{S_1} i_1 D^2 s ds$$

$$+ 2 \int_{S_1}^{S_1+S_2} (Z_1 + i_2 s) D^2 ds + 2 \int_{S_1+S_2}^{S_1+S_2+S_3} (Z_2 + i_3 s) D^2 ds + \dots$$

$$+ 2 \int_{S_1+S_2+\dots+S_{r-1}}^S (Z_{r-1} + i_r s) D^2 ds$$

La pérdida de carga debe valer, según quedó ya establecido,

$$J = b Q^2 \int_0^S D^{-5} ds$$

Tratemos de hallar una función  $D = F(s)$  que haga mínimo el peso de la tubería para una pérdida de carga dada  $J$ ; tendremos, pues, las dos ecuaciones

$$P = \text{mínimo}$$

$$J = \text{constante}$$

Ahora bien, todas las integrales que entran en el valor de  $P$  son de la misma forma, y por consi-

guiente, si determinamos la función buscada de modo que anule la derivada de cualquiera de ellas, forzosamente anulará las demás; siguiendo, pues, un razonamiento análogo al hecho al principio de este trabajo, estableceremos la condición

$$\frac{\partial}{\partial D} \left[ \alpha d^{-5} Ds + (Z_{x-1} + i_x s) D^2 ds \right] = 0$$

o sea

$$-5 \alpha D^{-6} D' ds + 2 (Z_{x-1} + i_x s) D D' ds = 0$$

de donde

$$-5 \alpha D^{-7} + 2 (Z_{x-1} + i_x s) = 0$$

y por fin

$$D = \left[ \frac{2 (Z_{x-1} + i_x s)}{5 \alpha} \right]^{-\frac{1}{7}} = K (Z_{x-1} + i_x s)^{-\frac{1}{7}}$$

y como lo comprendido entre paréntesis no es otra cosa que la carga, se puede enunciar la siguiente ley: *La tubería forzada más económica es aquella en que el diámetro varía en razón inversa de la raíz séptima de la presión.*

Para estudiar una tubería con inclinaciones distintas, convendrá dividirla por planos horizontales equidistantes; estos planos la dividirán en trozos de longitud variable con la inclinación; cuanto menor sea la inclinación de mayor longitud resultarán los trozos. Sea  $z$  la altura que separa cada dos planos escogidos; se tendrán las expresiones

$$D_1 = K z^{-\frac{1}{7}} \quad D_2 = K (2z)^{-\frac{1}{7}} \dots \quad D_r = K (rz)^{-\frac{1}{7}}$$

para valores de los diámetros en función de las cargas. Si la tubería tiene forma de sifón, naturalmente que los trozos que se hallen a la misma altura resultarán del mismo diámetro. Para no complicar los cálculos supondremos que la tubería es constantemente descendente.

La pérdida total de carga  $J$  valdrá

$$J = b Q^2 \left[ \frac{\frac{z}{i_1}}{K^5 z^{-\frac{5}{7}}} + \frac{\frac{z}{i_1}}{K^5 (2z)^{-\frac{5}{7}}} + \frac{\frac{z}{i_1}}{K^5 (3z)^{-\frac{5}{7}}} + \dots + \frac{\frac{z}{i_1}}{K^5 (n_1 z)^{-\frac{5}{7}}} + \frac{\frac{z}{i_2}}{K^5 [(n_1 + 1)z]^{-\frac{5}{7}}} + \dots \right]$$

$$\left. + \frac{\frac{z}{i_2}}{K^5 [(n_1 + 2)z]^{-\frac{5}{7}}} + \dots \right] = \frac{b Q^2 z^{\frac{5}{7}}}{K^5} \left[ l_1 \cdot 1^{\frac{5}{7}} + l_1 \cdot 2^{\frac{5}{7}} + l_1 \cdot 3^{\frac{5}{7}} + \dots + l_1 \cdot n_1^{\frac{5}{7}} + l_2 (n_1 + 1)^{\frac{5}{7}} + l_2 (n_1 + 2)^{\frac{5}{7}} + \dots + l_2 n_2^{\frac{5}{7}} + \dots + l_r n_r^{\frac{5}{7}} \right]$$

o bien

$$J = \frac{b Q^2 z^{\frac{5}{7}}}{K^5} \left[ l_1 \sum_0^{n_1} x^{\frac{5}{7}} + l_2 \sum_{n_1}^{n_2} x^{\frac{5}{7}} + \dots + l_r \sum_{n_{r-1}}^{n_r} x^{\frac{5}{7}} \right] \quad (7)$$

expresión en la cual  $l_1, l_2, \dots, l_r$  son las longitudes de los trozos en que quedan divididos los diversos tramos  $s_1, s_2, \dots, s_r$  de la conducción por los planos horizontales de seccionamiento; y  $n_1, n_2, \dots, n_r$ , representan el número de trozos en que queda dividida la tubería desde el origen hasta el fin de cada tramo  $S_1, S_2, \dots, S_r$ .

Se comprende fácilmente que conviene escoger los planos de seccionamiento de modo que pasen por todos los vértices del perfil longitudinal, pues de este modo el cálculo de la expresión comprendida en el paréntesis de la fórmula anterior resultará relativamente fácil; si los planos de seccionamiento no pasan por los puntos origen de todos los tramos, será preciso calcular las sumas de las potencias  $\frac{5}{7}$  entre límites fraccionarios, lo cual, si bien no deja de ser pesado, se puede hacer empleando la tabla, por interpolación entre los valores de la misma.

Una vez calculado el valor del paréntesis se puede despejar  $K$ , pues  $J$  ha debido ser ya fijado por consideraciones preliminares; y una vez conocido  $K$  se pueden calcular los diámetros y después los espesores de todos los trozos.

Procedamos a calcular el peso de la tubería. El peso del trozo de orden  $x$  en el tramo de orden  $q$  será

$$P_{qx} = 2 h D^2 l_q; \text{ pero } h = Z_{q-1} + x z = n_{q-1} z + x z = z (n_{q-1} + x), \text{ y } D = K [z (n_{q-1} + x)]^{-\frac{1}{7}};$$

por consiguiente

$$P_{qx} = z K^2 l_q z^{\frac{5}{7}} (n_{q-1} + x)^{\frac{5}{7}};$$



luego el tramo de orden  $q$  tendrá un peso

$$p_q = 2 K^2 l_q z^{\frac{5}{7}} \sum_{n_{q-1}}^{n_q} \frac{x^{\frac{5}{7}}}{x^{\frac{5}{7}}}$$

El peso total  $P_v$  de la tubería viene representado por una suma de expresiones análogas a la anterior; por consiguiente será

$$P_v = 2 K^2 z^{\frac{5}{7}} \left[ l_1 \sum_0^{n_1} x^{\frac{5}{7}} + l_2 \sum_{n_1}^{n_2} x^{\frac{5}{7}} + \dots + l_r \sum_{n_{r-1}}^{n_r} x^{\frac{5}{7}} \right]; 8$$

y llamando  $\varepsilon$  al paréntesis pondremos

$$P_v = 2 K^2 z^{\frac{5}{7}} \sum$$

Si se compara esta expresión con la (5) encontrada para la tubería de inclinación constante, se observa, al hacer  $l_1 = l_2 = \dots = l_r$ , que no aparece la inclinación  $i$  elevada a la primera potencia; esto es debido a que  $K$  no representa ahora lo mismo que entonces, por dar aspecto sencillo a las fórmulas; pero en el fondo la expresión (5) no es sino un caso particular de la expresión (8), según se puede comprobar.

Despejando  $K$  en (7) resulta

$$K = \left( \frac{b Q^2 S}{J} \right)^{\frac{5}{7}} z^{\frac{1}{7}} S^{-\frac{1}{5}} \left( \sum \right)^{\frac{1}{5}} = D_m z^{\frac{1}{7}} S^{-\frac{1}{5}} \left( \sum \right)^{\frac{1}{5}};$$

y substituyendo este valor en el de  $P_v$ , se obtiene en definitiva

$$P_v = 2 D_m^2 z S^{-\frac{2}{5}} \left( \sum \right)^{\frac{7}{5}}$$

El peso del tramo de orden  $q$  de la tubería cilíndrica equivalente es

$$p'_q = D_m^2 \int_0^{S_q} h ds = 2 D_m^2 \int_0^{S_q} (Z_{q-1} + i_q s) ds = 2 D_m^2 \left( Z_{q-1} S_q + \frac{i_q S_q^2}{2} \right)$$

pero

$$Z_{q-1} Z = n_{q-1} z; i_q S_q = (n_q - n_{q-1}) z$$

luego

$$p'_q = 2 D_m^2 z S_q \left( n_{q-1} + \frac{n_q - n_{q-1}}{z} \right) = D_m^2 z S_q (n_{q-1} + n_q);$$

y como

$$S_q = l_q (n_q - n_{q-1})$$

resulta en definitiva

$$p'_q = D_m^2 z l_q (n_q^2 - n_{q-1}^2)$$

Por lo tanto, el peso de la tubería cilíndrica equivalente será

$$P_c = D_m^2 z \left[ l_1 n_1^2 + l_2 (n_2^2 - n_1^2) + l_3 (n_3^2 - n_2^2) + \dots + l_r (n_r^2 - n_{r-1}^2) \right]$$

que simbólicamente se puede expresar en la siguiente forma

$$P_c = D_m^2 z \sum_0^r l (\Delta n^2)$$

El coeficiente de economía  $\eta$  valdrá

$$\eta = 1 - \frac{2 \left( \sum \right)^{\frac{7}{5}}}{S^{\frac{2}{5}} \sum_0^r l (\Delta n^2)}$$

Es imposible dar una fórmula más sencilla del valor de  $\eta$ , pues como depende de las longitudes de los tramos, no hay medio de simplificar los cálculos. La economía no puede ser superior al límite 0'0596 encontrado para una tubería de inclinación constante; un ejemplo lo pondrá de manifiesto, y nos servirá además para hacer aplicación del método al caso de una tubería con inclinaciones positivas y negativas, caso, que si se observa bien, está comprendido en las fórmulas halladas, dando a las cantidades que en ellas entran los signos o valores correspondientes.

Sea un sifón constituido por tres tramos; el pri-

mero de 500 metros de longitud y de inclinación  $i = 0.5$ ; el segundo horizontal con una longitud de 250 metros; y el tercero ascendente, de 450 metros de longitud con inclinación de  $0.5$ ; la longitud total de la conducción es de 1,200 metros; se trata de calcular la tubería más económica para un gasto de  $1.500 \text{ m}^3$ . Este sifón puede presentarse, por ejemplo, en el caso de una conducción de agua para riegos o para abastecimiento de una población.

Fijada la pérdida de carga total por consideraciones preliminares en 25 metros, tendremos

$$D_m = \left( \frac{0.0025 \cdot 1200 \cdot 1.5^2}{25} \right)^{\frac{1}{5}} = 0.275^{\frac{1}{5}} = 0.76961 = 0.77 \text{ metros (aprox.)}$$

Dividamos la conducción por planos horizontales de 5 en 5 metros de altura, obteniendo así

$$\begin{aligned} z &= 5 \text{ mts.}, n_1 = 50, Z_1 = 50 z, l_1 = 10 \text{ mts.} \\ Z_2 &= 50 z = Z_1, n_2 = 1, l_2 = 250 \text{ mts.} \\ n_3 &= 45, Z_3 = 25 = 5z, l_3 = 10 \text{ mts.} \end{aligned}$$

Convendrá observar que aquí  $n_1, n_2$  y  $n_3$  designan el número de trozos de cada tramo, y no el número total de trozos hasta el final de cada tramo como representan en la fórmula (7). Teniendo esto presente, podremos poner

$$J = 25 = \frac{0.0025 \cdot 1.5^2 \cdot 5^{\frac{5}{7}}}{K^5} \left[ 10 \sum_0^{50} x^{\frac{5}{7}} + 250 \sum_{49}^{50} x^{\frac{5}{7}} + 10 \sum_5^{50} x^{\frac{5}{7}} \right]$$

Aunque la expresión (7) sólo sirva para el caso de una tubería descendente, la substitución anterior no ofrece dificultad, si se tiene en cuenta el significado de los diferentes valores y el sentido en que crecen.

La tabla nos permite calcular al momento el valor del paréntesis, que resulta ser

$$\Sigma = 10.484'9638 + 250.16'3520 + 10(484'9638 - 10.6812) = 13680'464$$

quedando así en disposición de despejar  $K$ , que vale

$$K = \left( \frac{0.0025 \cdot 1.5^2 \cdot 5^{\frac{5}{7}}}{25} \cdot 13680'464 \right)^{\frac{1}{5}} = 1.57583$$

y conocido el valor de  $K$  podremos calcular los diámetros, que resultan

$$\begin{aligned} D_1 &= K \cdot 5^{\frac{1}{7}} = 1.255 \text{ mts.}, D_2 = K \cdot (2.5)^{-\frac{1}{7}} = 1.134 \text{ mts.} \\ D_3 &= K \cdot (3.5)^{-\frac{1}{7}} = 1.070 \text{ mts.} \dots D_{10} = K (10.5)^{-\frac{1}{7}} = \\ &= 0.901 \text{ mts} \dots D_{25} = K \cdot (25.5)^{-\frac{1}{7}} = 0.791 \text{ mts.} \dots \\ D_{50} &= K \cdot (50.5)^{-\frac{1}{7}} = 0.716 \text{ mts.} \end{aligned}$$

este último diámetro será el correspondiente al tramo horizontal. Los diámetros de los trozos correspondientes al tramo ascendente serán los mismos que los del tramo descendente de la misma cota. Es de notar, que podíamos haber obtenido una economía caso de que el sifón vertiera en un canal, pues entonces la carga en el último trozo sería de 5 metros en lugar de 25 como ahora suponemos.

El peso total de la tubería, en virtud de la fórmula (8), será

$$P_v = 2 K^2 z^{\frac{5}{7}} \Sigma = 2 \cdot 1.57583^2 \cdot 5^{\frac{5}{7}} \cdot 13680'464 = 214494 \text{ Kgs.}$$

mientras que la tubería cilíndrica equivalente tendría un peso total

$$P_c = 0.76961^2 \cdot 5 [10.50^2 + 2.250.50 + 10(50^2 - 5^2)] = 0.76961^2 \cdot 5 \cdot 74750 = 221374 \text{ Kgs.}$$

La economía de peso es por consiguiente de

$$221374 - 214494 = 6880 \text{ Kgs.}$$

y por lo tanto

$$\eta = \frac{6880}{221374} = 0.0311$$

Para hacernos cargo de como varía  $\eta$  con el perfil de la tubería, calculemos un sifón que sólo difiera del anterior en la longitud del tramo horizontal, que ahora supondremos es de 1,000 metros. La longitud total de la tubería será así de 1950 metros, y claro es que para una pérdida total de carga igual, el diámetro de la tubería cilíndrica resultará mayor que en el caso anterior.

Para el nuevo sifón se obtiene

$$D_m = \left( \frac{0.0025 \cdot 1950 \cdot 1.5^2}{25} \right)^{\frac{1}{5}} = 0.848 \text{ mts.}$$

$$\Sigma = 10 \cdot 484'9638 + 1000 \cdot 16'3520 + 10 \cdot 474'2826 =$$

$$= 25944'464; K = \left( \frac{0'0025 \cdot 1'5^2 \cdot 5^{\frac{5}{7}}}{25} \cdot 25944'464 \right)^{\frac{1}{5}}$$

$$= 1'79101$$

por consiguiente

$$D_1 = K \cdot 5^{-\frac{1}{7}} = 1'423 \text{ mts.} \dots D_{25} = K \cdot 125^{-\frac{1}{7}} =$$

$$= 0'899 \text{ mts.}; D_{30} = K \cdot 250^{-\frac{1}{7}} = 0'814 \text{ mts.}$$

El peso total de la tubería será

$$P_v = 2 \cdot 1'79101^2 \cdot 5^{\frac{5}{7}} \cdot 25944'464 = 525455 \text{ Kgs.}$$

El peso de la tubería cilíndrica sería

$$P_c = 0'848093^2 \cdot 5 [10 \cdot 50^2 + 2 \cdot 1000 \cdot 50 + 10 (50^2 - 5^2)] =$$

$$= 0'848093^2 \cdot 5 \cdot 149750 = 538547 \text{ Kgs.}$$

de donde

$$\eta = \frac{538547 - 525455}{538547} = \frac{13092}{538547} = 0'0243$$

El valor anterior resulta inferior al encontrado en el primer caso, lo cual claramente dice lo que ya podíamos haber sospechado y es, que la economía, aparte del número de trozos en que se descomponga la tubería, es tanto mayor cuanto más variable es la presión a lo largo de la misma; es decir, la economía es tanto mayor cuanto más uniforme es la pendiente de la tubería, correspondiendo el máximo a una

tubería de pendiente constante; y este máximo, según quedó probado, puede llegar teóricamente al 5'96 por ciento; en la práctica se podrá llegar a una economía del 4'5 por ciento, y aún con dificultad. Si se trata de tuberías derivadas, las mismas conclusiones pueden obtenerse, pero hago gracia de ellas por no incurrir en repeticiones.

Llegados al final de este estudio, a alguien podrá parecer de poca importancia el beneficio que se puede conseguir después de tanto cálculo; por mi parte creo que bien merece la pena emplear algunas horas de trabajo, si éstas se han de transformar en una economía de algunos miles de pesetas, como puede ocurrir en las tuberías forzadas para saltos de importancia. Muchos ingenieros hay que tienen cierto desdén hacia los cálculos algo complicados, buscando la solución de las cuestiones por la teoría que pudiéramos llamar «teoría de los promedios»; pero a pesar de su aparente complicación, nadie que haya manejado unas tablas de logaritmos se atreverá a decirme que el procedimiento que propongo conduce a cálculos difíciles. En contra de la «teoría de los promedios» diré, para terminar, que suele fracasar en todas las cuestiones que no son representables por una función de primer grado, y que todo problema ingenieril, en el fondo, no es sino un problema de máximos y mínimos; el máximo efecto útil con el mínimo gasto; y desgraciadamente estos problemas de máximos y mínimos están todos fuera del alcance de la teoría de los promedios antes aludida.

SIXTO OCAMPO  
Ingeniero industrial

## METALES DE LOS MOTORES DE AVIACIÓN

La Revista *The Foundry*, de este mes, da una curiosa información sobre los metales empleados en la construcción de los motores para aviación. De los catorce motores empleados, cinco tienen cilindros de fundición; los restantes cinco son de acero, uno de fundición acerada y tres de aluminio.

La camisa de agua de uno de ellos (Aeromarine) está hecha de cobre, depositado electrolíticamente después de terminados los cilindros; en otros es de cobre, de aluminio o de acero.

El motor alemán «Mercedes» tiene cilindros de acero con camisas de acero comprimido, soldado con acetileno. Los pistones son de fundición y de acero forjado; la cabeza que lleva el eje es de acero y atornillada a una pieza de fundición. El peso total del pistón es sólo de 5 kilogramos.

El *caster del aguenal* es de una aleación de aluminio: aluminio, 90'36; cobre, 4'22; cinc, 3'65; hierro, 0'81; silicio, 0'96. Esta aleación tiene una resistencia a la tensión de 14'7 kgr. por mm.<sup>2</sup> con un límite de elasticidad de 1'37 kgr. por mm.<sup>2</sup>, un alargamiento de 3'55 por 100 sobre una barra de 50 milímetros y una reducción de sección de

3'5 por 100. Su peso específico es 2'87. Estas propiedades físicas son ordinarias y desde el punto de vista químico las impurezas son en un tanto por ciento elevado. La mayor parte de los aceros del motor «Mercedes» contienen de 2 a 4 por 100 de níquel.

La caja de distribución de fundición da al análisis, en centésimas: carbón grafitico, 2'97; carbón combinado, 0'62; silicio, 1'81; manganeso, 0'53; azufre, 0'118 y fósforo, 0'085. Los bronce de los cojinetes son de bronce: cobre, 89; estaño, 6'50; cinc, 3; plomo, 1'5. Están revestidas de metal «Babbitt» o de metal blanco fundido. Es sabido que los zepelines utilizan una aleación de aluminio: aluminio, 89'74; manganeso, 0'54; cobre, 0'7; cinc, 9. El aluminio debe tener una pureza de 99 por 100. Otros bronce de Aluminio tienen un gran interés para los fundidores y para la aviación. Uno de ellos tiene una resistencia de más de 40 kgr. por mm.<sup>2</sup>; el alargamiento oscila de 30 a 40 por 100; es particularmente resistente a las vibraciones y se moldea líquido. Pueden hacerse moldeados complicados de tres milímetros; pero es preciso tomar precauciones a causa de la gran contracción.

## HORNO ELÉCTRICO PARA ACERO SISTEMA BOOTH-HALL

NUEVO MODELO EXISTENTE EN LA FÁBRICA DE LA COMPAÑÍA «MIDLAND ELECTRIC STEEL CO.»  
CONMUTADOR ESPECIAL PARA LA REDUCCIÓN DEL VOLTAJE Y PUERTA ORIGINAL

LA creación de un nuevo tipo de horno eléctrico para el acero, verificada por los ingenieros americanos, ha sido uno de los adelantos en esta industria durante el año pasado. El horno eléctrico para aceros lleva el nombre de los señores Booth y Hall, ambos de Chicago, por ser el primero quien lo inventó y quien lo construyó el segundo.

Este horno está construido para emplear líneas mono bi o trifásicas. El horno para corriente monofásica emplea un electrodo auxiliar, un electrodo principal, una solera conductora y un emparrillado conductor de acero fundido enterrado en dicha solera. El horno bifásico emplea dos electrodos principales y dos emparrillados de acero. El horno trifásico emplea tres electrodos principales; pero tiene solamente un emparrillado retorno en la solera. Se ve de antemano que el horno de una sola fase será construido únicamente para tamaños muy pequeños porque las Compañías productoras de energía no admiten cargas considerables en una sola fase, empleándose, por tanto, los hornos de corriente trifásica solamente para las grandes capacidades, en las cuales el mayor número de electrodos tenderá a facilitar la fusión y el afino. El horno más conveniente en la mayoría de los casos será el de corriente bifásica y de éste trataremos principalmente aquí.

Recientemente se puso en marcha un horno eléctrico Booth Hall, de cuatro toneladas de capacidad, en la fábrica de la Midland Electric Steel Co, Terre Haute, Indiana. Este horno va alimentado por dos transformadores monofásicos de 600 kilovatios cada uno. Los transformadores van conectados por el sis-

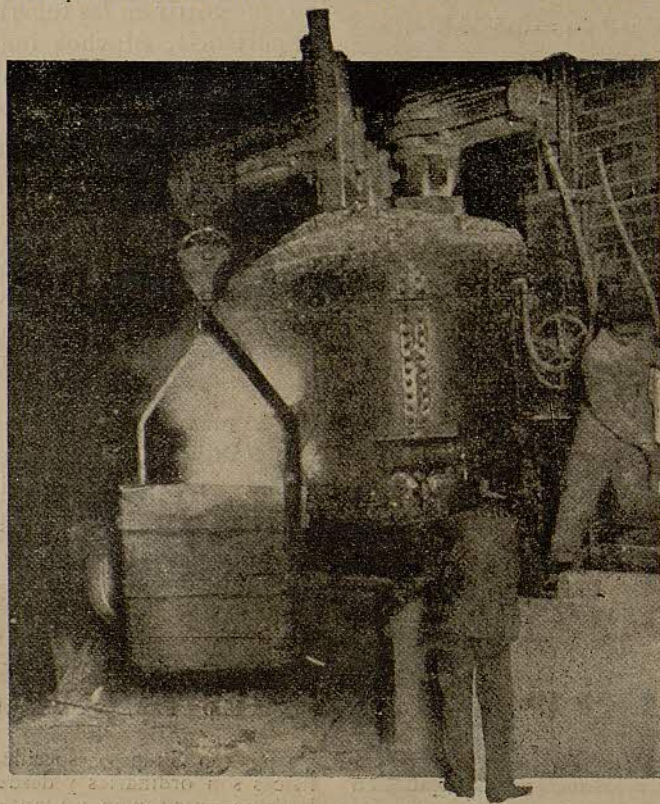
tema Scott a una línea de corriente trifásica de 13,200 voltios y 60 períodos. La conexión Scott da una carga bien equilibrada sobre las tres fases del circuito primario, según viene comprobado por las indicaciones de los aparatos de medida.

Un conmutador especial, cuyo grabado acompañamos, está calculado para reducir el voltaje a la mitad durante el afino, o para mantener los hornos calientes. Los electrodos dan regulados automática-

mente mediante reguladores Thury, y mediante el gobierno de estos reguladores, junto con el del conmutador de reducción del voltaje, es posible consumir en el horno una fracción cualquiera de la energía total. Este horno funciona con un cos. S. de 0'9, y cuando se trabaja a plena carga la energía utilizada es de 1,000 a 1,100 kilovatios.

El horno se carga con trozos de acero de distintas clases, pudiendo emplearse desde las torneaduras hasta trozos de acero fundido. El electrodo auxiliar y los dos electrodos principales se hacen descender hasta descansar sobre los fragmentos de acero. Un trinquete

que sujeta el electrodo auxiliar se suelta, a fin de que este electrodo descansa por su propio peso sobre los trozos a fundir, y los dos electrodos principales se suben, creando así un arco debajo de cada uno de ellos. Estos arcos van regulados por los reguladores automáticos de los electrodos principales, que sirven para asegurar un consumo constante de energía, manteniendo repartida por igual la carga en las tres fases de la línea. De este modo el calor viene producido por los arcos que se forman entre los electrodos principales y la carga, mientras



*Horno eléctrico Booth-Hall, de cuatro toneladas, existente en la Midland Electric Steel C.º, Terre-Haute, Sud*

que el electrodo auxiliar, debajo del cual no se forma arco alguno, obra como retorno común. La razón de que en este electrodo no se forme arco alguno consiste en que se halla descansando por su propio peso sobre los trozos de la carga.

Cuando se llega a formar una bolsa de acero líquido en el horno, de modo que este acero se convierta en conductor de la electricidad, la corriente empieza a circular a través del horno, saliendo por los dos juegos de barras empotradas en la solera, según puede verse en uno de los grabados. El momento en que esto ocurre lo registran inmediatamente los amperímetros, y entonces se hace ascender el electrodo auxiliar fuera del contacto de los trozos de acero, viniendo a cerrar la abertura practicada en el techo para el paso del mismo. El horno continúa funcionando como si fuese un horno bifásico con dos circuitos independientes, recorriendo la corriente del transformador de cada lado un circuito completo, formado por el electrodo, el arco, el baño y la solera, hasta el emparrillado conductor opuesto, y de allí hacia atrás hasta el otro polo del transformador.

Es digno de observar que el electrodo auxiliar se retira antes de la fusión de los fragmentos sobre los cuales descansaba, y, por consiguiente, el acero líquido no absorbe carbono alguno por este motivo.

Las ventajas que se atribuyen a este sistema son :

Que el uso del electrodo auxiliar hace prácticamente posible la puesta en marcha en cada operación, evitando las molestias de establecer el contacto.

Que el empleo de la solera conductora produce un calor uniforme en todo el baño, facilitando la escoriación y dando una distribución más rápida y completa de las aleaciones más pesadas, del cromo, tungsteno, vanadio, manganeso y níquel que descienden al fondo del baño.

Que el uso de los circuitos independientes en sentido longitudinal y transversal del baño combinados produce una circulación máxima en el seno del mismo.

Que el empleo de un electrodo auxiliar en combinación con la solera conductora permite el uso del mínimo de electrodos para el servicio multifásico, ya que el electrodo auxiliar se emplea solamente al principio de cada operación cuando la carga es menos elevada. Esto da por resultado un menor consumo de electrodos y una reducción de pérdidas de calor.

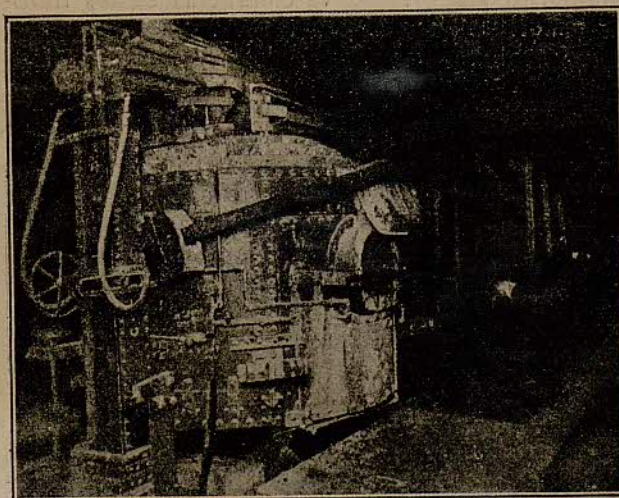
La solera es sólida, similar a la de un horno Martin-Siemens, sin aberturas ni contactos con el fon-

do que debiliten el revestimiento, y se forma apisonándolo por capas, formando una masa monolítica, no empleándose refrigeración por agua en el hogar ni en los conductores de retorno, por haber demostrado la práctica que esto no es necesario.

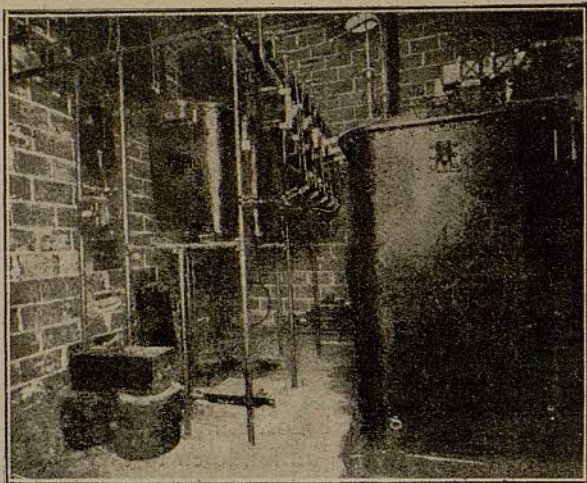
Cuando el fondo está completamente frío, se precisa emplear el electrodo auxiliar durante unos cuarenta y cinco minutos antes de que el hogar llegue a ser conductor de la electricidad. Un horno que haya permanecido cerrado durante la noche requiere veinte o treinta minutos para hacerse conductor, y un horno caliente unos diez minutos, y frecuentemente nada.

Como se ve en los grabados, el horno Booth-Hall es de forma esférica, con un fondo en forma de cubeta, y el techo va construido con briquetas de sílice. El empleo de briquetas de sílice en el techo no produce un resultado tan satisfactorio ni una apariencia tan buena como resultaría si el techo fuera de ladrillo especialmente preparado; pero se empleó la briqueta de sílice como medida práctica para ahorrar tiempo en la entrega del refractario. Es siempre posible encontrar briquetas de sílice de forma corriente para este objeto, mientras que las formas especiales son difíciles de obtener. Los constructores del horno han empleado en toda su construcción materiales de forma corriente a causa de la facilidad, disponibilidad y pequeño coste de los recambios.

La envoltura del horno es de planchas de acero de media pulgada de grueso, convenientemente remachadas. Los electrodos principales van colocados



*Puerta del horno de construcción especial con una culata extendiéndose sobre ambos lados del horno. Pueden verse las válvulas del sistema de enfriamiento*



*Emplazamiento de conjunto de los interruptores especiales de alta tensión*

uno a cada lado del horno, y el electrodo auxiliar directamente a lo largo de los electrodos principales y hacia la parte delantera del horno. La puerta para la carga y purga de escorias está situada directamente en la parte posterior. Los flexibles de cobre y los motores para los electrodos están colocados en fosas individuales una a cada lado del horno y el mecanismo para la inclinación está colocado detrás de la fosa principal, de manera que no existe mecanismo de básculas inmediatamente debajo del horno.

La subestación puede ser emplazada directamente detrás del horno o en uno cualquiera de los lados; en la instalación que nos ocupa se encuentra detrás del horno. La corriente va conducida de los transformadores al horno por medio de barras ómnibus de cobre conectadas entre sí, a fin de disminuir la autoinducción del circuito. Estas barras van instaladas de manera que puedan ajustarse para variar la reactancia a fin de adaptarla a las condiciones del factor de potencia de la red en servicio.

El horno puede tener un revestimiento básico o ácido; el elemento de Terre-Haute lo tiene básico. El hogar es de un espesor de veinticuatro pulgadas y las rejillas se encuentran diez y ocho pulgadas debajo de la superficie del hogar. El hogar del horno se compone principalmente de magnesita o de dolomita, y está sólidamente formado por capas. Desde el hogar hacia arriba las paredes son de ladrillo. Hasta las primeras tres hiladas que vienen sobre la línea de escorias se emplea ladrillo de magnesita y el resto se construye con ladrillo de sílice. También se emplean ladrillos de sílice para el techo.

En la puerta del horno van montados dos balan-

cines con un contrapeso cada uno. Los balancines se extienden, en parte, fuera de la puerta hacia los lados del horno, y por razón de los contrapesos la puerta puede ser levantada por el operario con una mano. La puerta va revestida interiormente de ladrillo y exteriormente no lleva revestimiento alguno, permitiendo así la radiación del calor y preservando al ladrillo. La puerta gira sobre los gorriones montados en los balancines, según se eleva o desciende, manteniendo él siempre la cara interior caliente hacia la pared del horno. Esta puerta es de forma ovalada, de manera que no hay temor de romper la abertura, como sucede cuando se usan puertas redondas, facilitando la comodidad del trabajo. Es posible levantar la puerta tanto como se quiere, de manera que para observar el interior del horno, para remover la carga o para algunos casos de prueba no se precisa abrir la puerta por completo. La puerta desciende suavemente, adheriéndose al bastidor y encajando en él por su propio peso, impidiendo las pérdidas de calor del horno, como también la filtración de aire en el interior, lo cual perturba la marcha del mismo. El bastidor de la puerta está construido en dos secciones, una de las cuales se extiende hacia el techo y puede cambiarse fácilmente una vez destruida.

Con la colocación de la puerta en la parte posterior del horno las operaciones de carga, colada y extracción de escorias quedan simplificadas. Inclinando el horno hacia adelante es posible cargarlo rápidamente mediante una tolva similar a las empleadas para cargar los mezcladores de hormigón. Inclinando el horno hacia atrás es posible traer las escorias al nivel del umbral de la puerta, bien sea para removerlas o para verterlas en cazos destinados a este objeto. También es práctico vaciar las escorias líquidas por el orificio de carga.

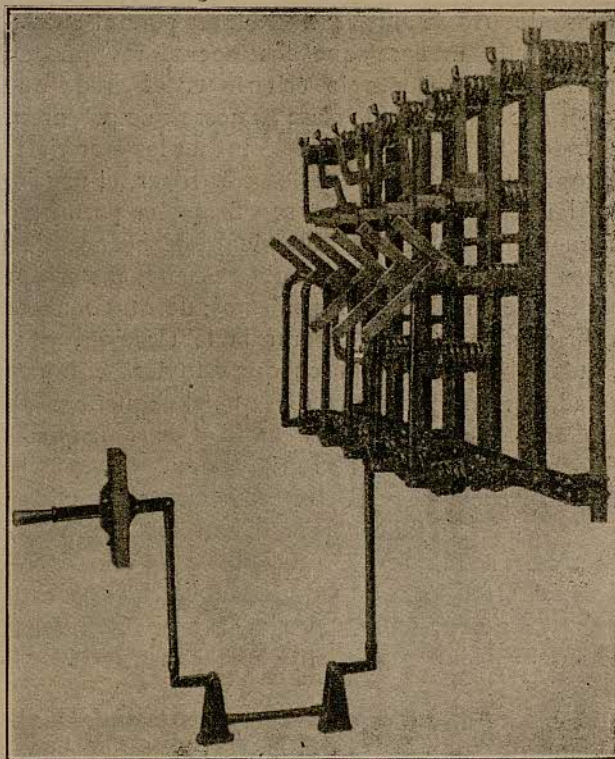
El horno bascula hacia adelante y hacia atrás sobre carriles de acero, sujetos con pernos sobre los pilones de hormigón de la fundación que separan las fosas de las fosas principales del horno laterales de debajo de los portaelectrodos. Así resulta que el apoyo viene al borde exterior del horno, dándole una base amplia y menos probabilidad de que las sacudidas puedan romper los electrodos y dañar el refractario. En cada carril van montados tres lóbulos o dientes que sobresalen por arriba del mismo y engranan con las ranuras o huellas fundidas, constituidas por piezas atornilladas al lado del horno. El horno, por lo tanto, oscila hacia atrás y hacia adelante sobre el carril y los lóbulos enunciados le impiden deslizar. La inclinación del horno viene de-

terminada por un bastidor en forma de A, con riostras transversales que se extienden debajo de la fosa o cámara principal de cada lado del horno, yendo este bastidor conectado con el horno por la parte inferior mediante una tornapunta armada. A esta tornapunta va unida otra que se extiende hacia atrás dentro de la fosa del horno, llevando una cremallera con la que engranan las ruedas motrices. Estas ruedas van movidas por un motor cuyo controller va colocado en el frente de la plataforma del horno. Una disposición permite que en caso de que este motor deje de funcionar, el mecanismo pueda ser movido a mano. El mecanismo de inclinación requiere una profundidad mínima del foso, yendo el fondo de éste a unos siete pies tan sólo debajo de la plataforma de carga. Para vaciar el horno completamente se necesita una inclinación de treinta grados.

La suspensión de los electrodos es también de modelo y construcción perfeccionados. Cada grapa consta de tres segmentos, uno de los cuales está atornillado sólidamente al bastidor del centro o principal, mientras que los otros dos, uno a cada lado, giran sobre los bastimentos gorriones montados en bastidores exteriores, los cuales a su vez van articulados con el bastidor principal. Esto permite subir o bajar el electrodo haciendo girar un volante de mano dispuesto al lado del horno, evitándose así la necesidad de que el operario suba sobre el horno. Las articulaciones de dos de los segmentos determinan un huelgo que absorbe cualquier inexactitud del diámetro de los electrodos. Las grapas son de 16 pulgadas de longitud y dan un buen apoyo al electrodo, lo cual reduce a un mínimo la tendencia de los electrodos a agrietarse o recalentarse en este punto. Cada segmento de las grapas del electrodo va enfriado por agua.

Debemos señalar que en el horno descrito se usan tres electrodos de 6 pulgadas, sistema Stackpole, en cada grapa del electrodo. Esta disposición fué necesaria a causa del retardo para la obtención de electrodos de un tamaño suficiente para conducir la corriente. Tan pronto como se puedan obtener electrodos corrientes de 10 pulgadas, sistema Stackpole, uno de éstos reemplazará en cada grapa los tres electrodos de 6 pulgadas que ahora se emplean.

Deberá también notarse en las ilustraciones que acompañan este artículo que los collares de enfriamiento por agua del electrodo no se ven en el techo, debido esto a que se usa la disposición interina de los tres electrodos en cada grapa, y en estas condiciones ha sido difícil hallar el modo de construir



*Interruptor de alta tensión característico al horno  
Booth-Hall*

los collares. El tipo del horno requiere un tipo especial de collar de electrodo que ajuste alrededor de cada electrodo, y que se extienda bien por bajo del techo de ladrillo, proporcionando, además, protección para los electrodos y para el arco del techo en este punto. En el horno Booth-Hall no solamente se ha proyectado el enfriamiento por agua de los collares alrededor de los electrodos, sino también el de las mismas grapas de los electrodos, según quedó mencionado; las válvulas de los tubos están colocadas de manera que prácticamente pueda cerrarse el agua para la porción del área de enfriamiento que se desee, dependiendo del servicio para que se use el horno. Un punto importante ha sido el dotar de refrigeración por agua todos aquellos lugares en los cuales haya ventaja en ello, de manera que el operador del horno puede refrescar aquellas partes del mismo que por su trabajo están más expuestas al calentamiento. Debemos hacer observar que los tubos para el enfriamiento por agua han sido colocados alrededor del marco de la puerta para economizar así material refractario.

Los inventores de hornos difieren sobre el uso del enfriamiento por el agua; pero ha sido la práctica de los proyectistas del Booth-Hall lo que les ha

hecho dotarlo de amplias facilidades para el enfriamiento, de manera que los operadores pueden usarlo según su propio criterio en el grado que crean necesario para la clase de acero que preparen. Debido a las dificultades para obtener los materiales apropiados refractarios y los electrodos, el uso del enfriamiento por el agua se afirma ha permitido frecuentemente el funcionamiento de hornos eléctricos hasta que pudieron obtenerse los materiales para la reparación de los mismos; de otra manera hubiera sido necesario parar la fabricación, y los gastos debidos al tiempo en que estuviera el horno parado serían mucho mayores que el pequeño gasto adicional que representa la cantidad de calor que es absorbida por el agua de refrigeración.

Las suspensiones del electrodo están proyectadas para sostener 10 toneladas en el extremo. Los portaelectrodos se mueven en unas guías con una disposición de rodillos, proporcionándoles movimiento suave y sin exposición a averías. Los circuitos magnéticos se rompen mediante una construcción especial.

El cuadro de aparatos para el funcionamiento de los hornos está generalmente dotado de un contador o dos voltímetros y dos amperímetros, uno para cada electrodo. El horno de Terre-Haute está también previsto de un watímetro y un indicador del factor de potencia. El conmutador especial para la reducción del voltaje, construido para ser empleado en estos hornos, es un aparato sencillo y consiste en seis interruptores monopolares de dos contactos, de cuchillo, montados juntos y operados por una palanca. Este aparato está enclavado con el cortacircuitos de aceite, de manera que el interruptor no puede moverse bajo carga.

El horno descrito en este artículo ha sido empleado para fabricar acero al carbono muy básico y fundición poco fosforosa. El acero ha sido preparado con una pequeña proporción de carbono hasta del 0'07 por 100. Se han obtenido productos variables, desde el acero dulce hasta el hierro colado con proporciones de azufre variables desde 0'01 a 0'04 por 100, dependiendo de la composición deseada. En la reducción del fósforo se forma una escoria caliza oxidante para eliminar el azufre. Esto se consigue echando sobre la superficie cierta cantidad de polvo de cok o de antracita. Se obtiene una escoria desazufradora de color pálido, la cual se deja en el horno hasta que el azufre ha sido reducido a los límites deseados.

En circunstancias ordinarias no es necesario reducir el voltaje, ya que la energía consumida viene

gobernada por los reguladores de electrodo. Si se desea obtener un acero muy refinado, se reducen el voltaje y la potencia mediante el conmutador reductor del voltaje, y la refinación se lleva hasta el extremo deseado, manteniendo una temperatura tal que no perjudique al revestimiento.

La inauguración de este horno, en diciembre de 1917, constituye un *record* notable, especialmente en estos tiempos anormales. La Compañía Booth-Hall no se formó hasta últimos de junio, y en el período siguiente se prepararon los proyectos, se construyó el horno, se le instaló y fué puesto en marcha. Guillermo K. Booth, inventor y proyectista de este horno, cursó sus estudios a la «Ohio State University» y ha trabajado durante varios años en la «Snyder Electric Furnace, C.<sup>o</sup>»; es socio de la «American Electrochemical Society» y del «American Institute of Electrical Engineers». Julio R. Hall, quien se asoció con Booth para el estudio de los detalles mecánicos, estudió en la Universidad de Lehigh y ha trabajado en la «American Bridge, C.<sup>o</sup>», en la «Strauss Bascule Bridge, C.<sup>o</sup>», en la «Brown Hoisting Machinery, C.<sup>o</sup>» y en la «Snyder Electric Furnace, C.<sup>o</sup>». Actualmente sirve en el ejército de los Estados Unidos como primer teniente en el «Engineers Reserve Corps», y su plaza como ingeniero proyectista y constructor la ocupa su hermano Carlos F. Hall, quien hace poco dimitió su plaza de ingeniero de la casa «Armour and C.<sup>o</sup>» para encargarse de este trabajo. Las oficinas centrales están en el n.<sup>o</sup> 565 del «West Washington Boulevard», Chicago.



## NOTA IMPORTANTE

*A fin de proporcionar a nuestros lectores el interesante artículo de nuestro compañero don Sixto Ocampo, íntegramente, nos vemos en la imposibilidad de publicar en este número nuestras secciones "Bibliografía" e "Información técnica", por lo cual rogamos a los señores J. B., Enrique Mañé y B. S. que se sirvan excusarnos.*

A. Artís, impresor; Calle de Gerona, 116 : Teléf. G. 1471 : Barcelona