

COMPUERTAS DE ACERO

Por el Dr. Ing. CURT F. KOLLBRUNNER,
Director de la S. A. Conrad Zschokke. Construcciones de
Acero y Calderería, Döttingen (Argovia), Suiza.

Nos congratulamos muy especialmente con la colaboración del ilustre autor del presente artículo, que, con el valor de su experiencia en el tema del epígrafe, presenta un resumen de los tipos usuales de compuertas de acero, aportando información y datos de algunas muy importantes construídas en Europa.

I. Introducción.

Las construcciones hidráulicas de acero, es decir, las construcciones de acero que tienen por objeto el uso de las aguas o la protección contra ellas, ocupan un puesto muy importante entre las construcciones de acero. A ellas pertenecen las compuertas (azudes móviles), las esclusas y puertas de diques, los diques flotantes, etc. Nos ocuparemos aquí de las compuertas, las cuales constituyen la rama más importante y la que presenta una variedad de formas más grande que cualquier otra rama de las construcciones de acero.

Los problemas de las construcciones hidráulicas exigen conocimientos muy profundos en distintas materias de la ciencia de la Ingeniería, y naturalmente un solo individuo no es capaz de dominar todos esos conocimientos. Por consiguiente, toda construcción hidráulica exige una estrecha colaboración entre especialistas bien capacitados.

II. Mecánica de los líquidos e Hidráulica técnica.

Naturalmente, el conocimiento de la Hidráulica es un requisito indispensable para el ingeniero constructor.

La Mecánica de los líquidos tuvo una época de gran desarrollo en los siglos XVII y XVIII. La conexión de esa ciencia con la práctica se efectuó en el siglo XIX, y la debemos principalmente a Bélanger, Boussinesq, Darcy y Bazin. El teorema de Bernoulli y las ecuaciones de Euler eran entonces la base de las investigaciones.

La Mecánica de los líquidos no pudo seguir el potente desarrollo de las construcciones hidráulicas al final del siglo XIX y principios del XX. Fué la época de los coeficientes y de las fórmulas empíricas, que se establecían en gran número para un mismo fe-

nómeno del movimiento del agua. En general, la estructura de esas fórmulas tenía muy poca relación con la realidad. Hoy en día la investigación moderna trata de eliminar las fórmulas de la Hidráulica empírica y de reducir su aplicación al mínimo necesario. La Hidráulica técnica, o Hidráulica aplicada moderna, considera que es más adecuado hacer primero un cálculo de acuerdo con la teoría y corregirlo luego, si es necesario, con coeficientes empíricos, que utilizar desde un principio una fórmula puramente empírica.

Las compuertas modernas, con vanos de 50 hasta 60 m. de luz, plantean ciertos problemas que no se pueden resolver con las antiguas fórmulas empíricas, sino más bien con investigaciones teóricas junto con ensayos en modelos reducidos. Hoy día todos los problemas de las construcciones hidráulicas, que no son susceptibles de ser resueltos por la teoría, se resuelven por medio de ensayos en modelos reducidos. Junto con los ensayos en modelos, era necesario buscar nuevos métodos de cálculo que tuviesen como base la Mecánica de los líquidos. Después de muchos métodos demasiado complicados, se logró simplificar la teoría del potencial, de modo que es posible determinar, sin tener que acudir a mucha matemática, las líneas de corriente y las equipotenciales de una corriente con ciertas condiciones de contorno.

III. Compuertas.

a) GENERALIDADES.

En lo que sigue nos limitaremos a una discusión muy sucinta de algunos tipos de compuertas. Prescindimos de dar una exposición completa de los distintos sistemas, porque tenemos la intención de publicar dentro de tres años una obra de dos tomos, dedicada no solamente a los problemas básicos de

su cálculo, sino también a todos los sistemas especiales de compuertas.

Generalmente, en la construcción de compuertas se trata de grandes dimensiones, y por eso el problema de la economía es de una importancia primordial. Las tres condiciones principales que hay que considerar son:

- 1.° Evacuación del máximo caudal para unas dimensiones dadas (riadas).
- 2.° Reducción máxima de las fuerzas de elevación necesarias (instalaciones mecánicas y eléctricas).
- 3.° Maniobra fácil, segura y rápida, bajo cualquier circunstancia (es decir, evitando las vibraciones y contrarrestando los efectos del frío y de los hielos).

Junto con las necesidades técnicas de la maniobra y de la regularización del embalse, son razones de economía las que determinan el uso de uno u otro tipo de compuerta. En vista de que el precio unitario de las instalaciones de elevación viene a ser mayor que el de cualquier otra parte de la presa, tiene suma importancia realizar unas instalaciones mecánicas económicas y a la vez eficaces. Para poder determinar debidamente la potencia de las instalaciones mecánicas, es preciso conocer lo más exactamente posible las fuerzas que influyen sobre el movimiento de las compuertas. El conocimiento de los valores extremos de dichas fuerzas basta solamente para establecer un anteproyecto de las instalaciones mecá-

nicas y eléctricas. Hay que tener en cuenta, desde luego, que la naturaleza misma de los problemas de las construcciones hidráulicas no nos permite alcanzar todavía un grado de exactitud muy elevado. Eso proviene, por una parte, de nuestro conocimiento imperfecto de los efectos hidrodinámicos, y por otra parte no estamos todavía en situación de calcular exactamente las fuerzas debidas al rozamiento. Además existen ciertas cargas suplementarias que son imposibles de expresar numéricamente y que agrupamos bajo la denominación de "cargas eventuales". Todos estos problemas, cuya solución exige numerosos y largos ensayos, han sido resueltos, en parte, por la experiencia.

El movimiento de las alzas se puede obtener de tres maneras distintas: por un movimiento vertical; por una rotación alrededor de un eje fijo, o bien mediante un movimiento de rodamiento sobre un plano inclinado. Estos movimientos indican al mismo tiempo los distintos tipos de compuertas:

- 1.° Compuertas de tablero con paramento vertical.
- 2.° Compuertas de sector (en general con paramento curvo).
- 3.° Compuertas basculantes (de paramento plano o curvo).
- 4.° Compuertas de tambor.

b) COMPUERTAS DE TABLERO CON PARAMENTO VERTICAL.

Las compuertas de tablero representan el tipo más antiguo de presas móviles. Fueron creadas probablemente con el simple objeto de poder darle paso libre a las aguas, en caso de riada.

a) Compuertas deslizantes.

Las compuertas deslizantes son el sistema más sencillo de compuertas de tablero. Son placas planas que se mueven, en dirección vertical, a lo largo de guíaderas que sirven al mismo tiempo de impermeabilización lateral.

Para elevar la compuerta hay que vencer el rozamiento entre los bordes laterales de la compuerta y las guíaderas, limitándose por eso el uso de esta clase de compuertas a pequeños vanos y pequeños desniveles. Sin embargo, las compuertas deslizantes de pequeñas dimensiones son muy recomendables, debido a su manejo sencillo, a su construcción robusta y a su fácil conservación.

β) Compuertas Stoney.

Aun en instalaciones de dimensiones moderadas, las presiones hidráulicas son ya tan importantes que no resultaría económico el empleo de compuertas des-

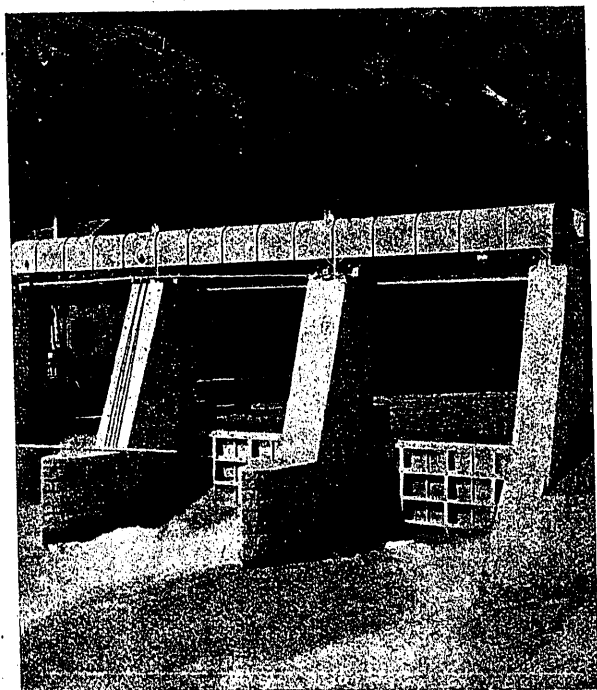


Fig. 1.ª — Compuertas deslizantes en la presa de Mörel, sobre el Ródano (Suiza), año 1949. Tres vanos con 6,2 m. de luz y 3,5 m. de altura.

lizantes, y es preferible usar compuertas con disposición de rodadura.

La primera compuerta de esta categoría fué la que inventó el ingeniero británico Stoney. La compuerta Stoney consiste en un tablero metálico que lleva a cada lado un tren de rodillos (instalados en las ranuras e independientes del tablero), el cual facilita el deslizamiento de la compuerta. Dichos trenes de rodillos están suspendidos por un cable, el cual pasa por una polea libre; por un extremo está unido a un punto fijo de las pilas y por el otro a la compuerta.

En Suiza se instalaron compuertas Stoney en la presa de Hagneck, sobre el Aar (1898), en la presa de Beznau, sobre el mismo río (1900), etc.

Un gran inconveniente de las compuertas Stoney reside en las reacciones de apoyo, estáticamente indeterminadas, de los rodillos. De aquí resultan unas posibles sobrecargas de los rodillos, imposibles de prever por el cálculo. Además, cuando se procede a levantar la compuerta, los rodillos inferiores quedan expuestos al ataque de la lámina vertiente y a sus arrastres, lo que produce un desgaste muy grande de los rodillos.

γ) Compuertas de ruedas fijas.

Por estas razones se prefiere usar hoy día, en vez de los rodillos Stoney, ruedas fijas con cojinete de bolas, instaladas en los nervios verticales situados en los bordes laterales del tablero. Dichas ruedas tienen soportes de péndulo, de modo que las reacciones de apoyo son estáticamente determinadas, y con ellas también los esfuerzos en cada rueda. No hay, pues, temor de sobrecargas peligrosas debidas a deformaciones horizontales de la compuerta, como suele suceder en las compuertas Stoney, causando un desgaste prematuro de los rodillos. Además la experiencia demuestra que, si bien teóricamente los rodillos Stoney requieren un menor esfuerzo de elevación que ruedas de igual diámetro, en la práctica resulta todo lo contrario, porque en las compuertas Stoney dicho esfuerzo va aumentando con los años, y eso fuera del hecho de que las ruedas se hacen siempre de un diámetro mayor que los rodillos Sto-

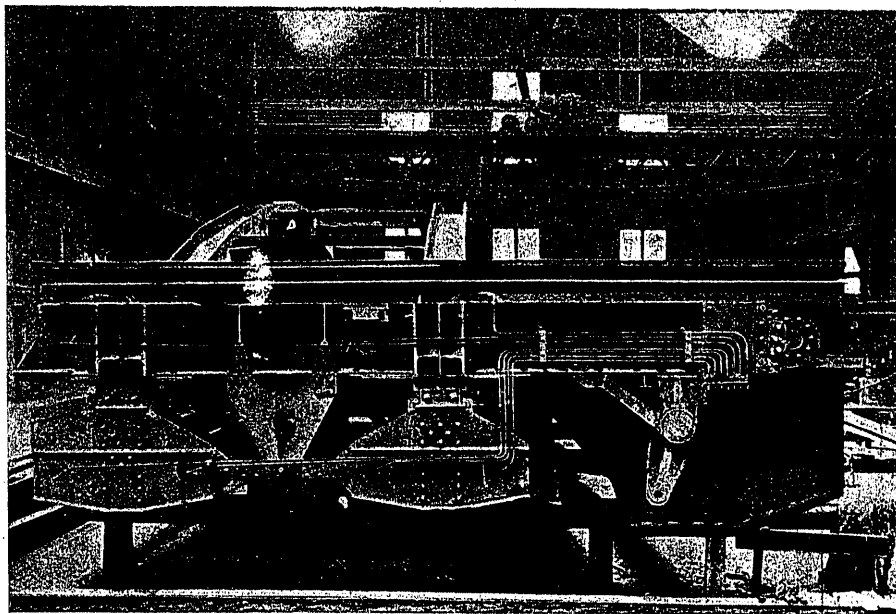


Fig. 2.* — Compuerta de ruedas fijas, con visera o pantalla móvil. Presa de Teufelswand, sobre el Reuss (Suiza), 1943. En la figura se puede ver el nervio vertical lateral, con los vagones con apoyo de péndulo para las cuatro ruedas fijas, así como el eje de suspensión y las tuberías de engrase.

ney y, por consiguiente, también del punto de vista teórico, el esfuerzo de elevación resulta menor. El desarrollo tan importante de las compuertas de doble tablero hubiera sido prácticamente imposible sin el sistema de ruedas fijas.

δ) Compuertas de doble tablero.

Las compuertas de un solo tablero se adaptan mal a las condiciones de trabajo de las centrales hidroeléctricas modernas, donde se exige una regulación rápida, y sin pérdidas notables de caudal, del nivel del embalse. Aun para pequeñas variaciones de caudal, es necesario levantar la compuerta entera; una operación que, en general, no se puede verificar rápidamente. Tampoco resulta fácil dar paso libre a los cuerpos flotantes. Además, cuando la compuerta está abierta sólo parcialmente, el agua, que pasa con gran velocidad por debajo de la compuerta, produce casi invariablemente un resalto acompañado de remolinos que pueden iniciar vibraciones peligrosas en el entramado de la compuerta y socavar el terreno aguas abajo de la presa.

Por todas estas razones se instalaron en la presa de Laufenburg, sobre el Rin (1909), compuertas de doble tablero, lográndose al mismo tiempo una solución más económica para las dimensiones relativamente grandes de dicha presa.

Un punto muy importante en la construcción de las compuertas de doble tablero es la disposición

de la chapa de paramento y del entramado resistente de los tableros. En las compuertas de la presa de

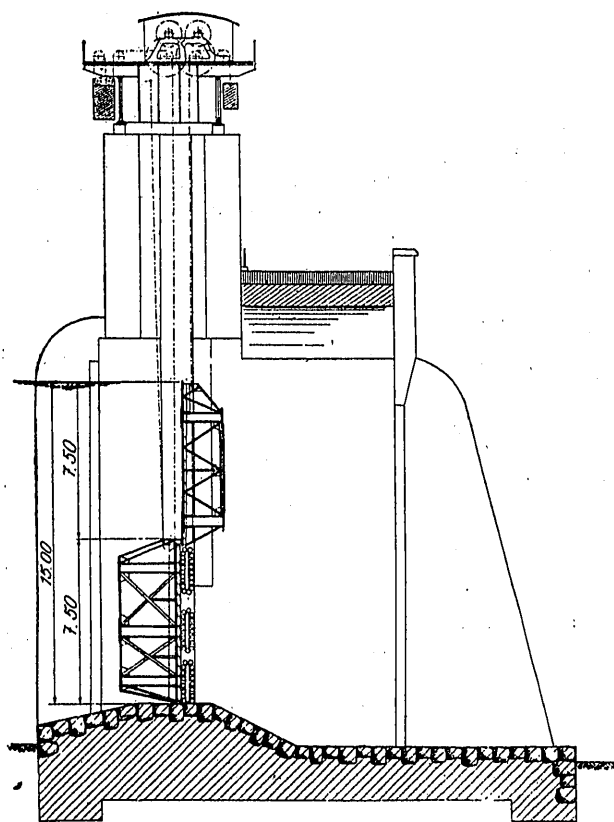


Fig. 3ª, a. — Compuertas de doble tablero. Anteproyecto de la presa de Laufenburg, sobre el Rin (Suiza), año 1909. Sección vertical.

Laufenburg, sobre el Rin, se dispuso el entramado del tablero superior hacia aguas abajo, mientras el entramado del tablero inferior está situado aguas arriba del umbral de los tableros. Dicha disposición se adoptó con el fin de evitar que caigan bloques de hielo o cuerpos flotantes sobre el alza inferior, cuando la presa funciona como vertedero. En la ya citada presa de Laufenburg el alza inferior forma, debido a la posición de la chapa de paramento, una especie de cajón, abierto solamente hacia aguas abajo. Esta disposición se adoptó para evitar que cuerpos extraños, arrastrados por la corriente, pudiesen introducirse en el entramado del alza inferior, aumentando así su peso y hasta causando daños en la estructura del alza. Sin embargo, en la práctica este sistema ha resultado ser muy desfavorable, porque al levantar el tablero inferior a una cierta altura crítica, aparecen en el borde inferior del tablero fuerzas de succión, las cuales, junto con la sobrecarga de agua, exigen un esfuerzo de elevación muy importante.

En los anteproyectos de la presa de Eglisau, sobre el Rin (1915), y de la presa La Plaine, sobre el Ródano (1918), se invirtieron las posiciones relativas de los dos tableros; es decir: entramado del tablero superior aguas arriba y entramado del tablero inferior aguas abajo del umbral. Esta solución tampoco es satisfactoria, porque, si bien quedan eliminados los efectos de succión, la parte inferior del tablero inferior queda expuesta a las agresiones del agua y de sus arrastres, cuando ésta pasa por debajo de la compuerta con gran velocidad. Pueden entonces producirse vibraciones de carácter grave. También hay que tener en cuenta que cuerpos flotantes pueden caer sobre el entramado del alza inferior cuando la presa está funcionando como vertedero.

Por lo tanto, ambos modos de disponer los dos tableros padecen de defectos muy serios. La Casa alemana M.A.N. (Maschinenfabrik Augsburg-Nürnberg) ha eliminado dichas imperfecciones de una manera elegante en su tipo especial de compuerta de doble tablero. Las ventajas de las compuertas de doble tablero, tipo M.A.N., son considerables:

1.º En ambos tableros los entramados están situados aguas abajo del umbral de apoyo, de modo que todas las estructuras quedan fuera del agua, y eso aun cuando la compuerta funciona como vertedero, porque la pantalla curva, en la coronación del alza superior, impide que la lámina vertiente caiga sobre el alza inferior.

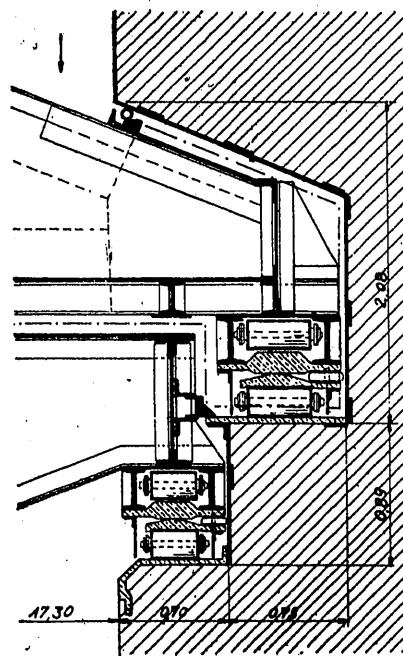


Fig. 3ª, b. — Anteproyecto de la presa de Laufenburg. Detalle de la impermeabilización lateral.

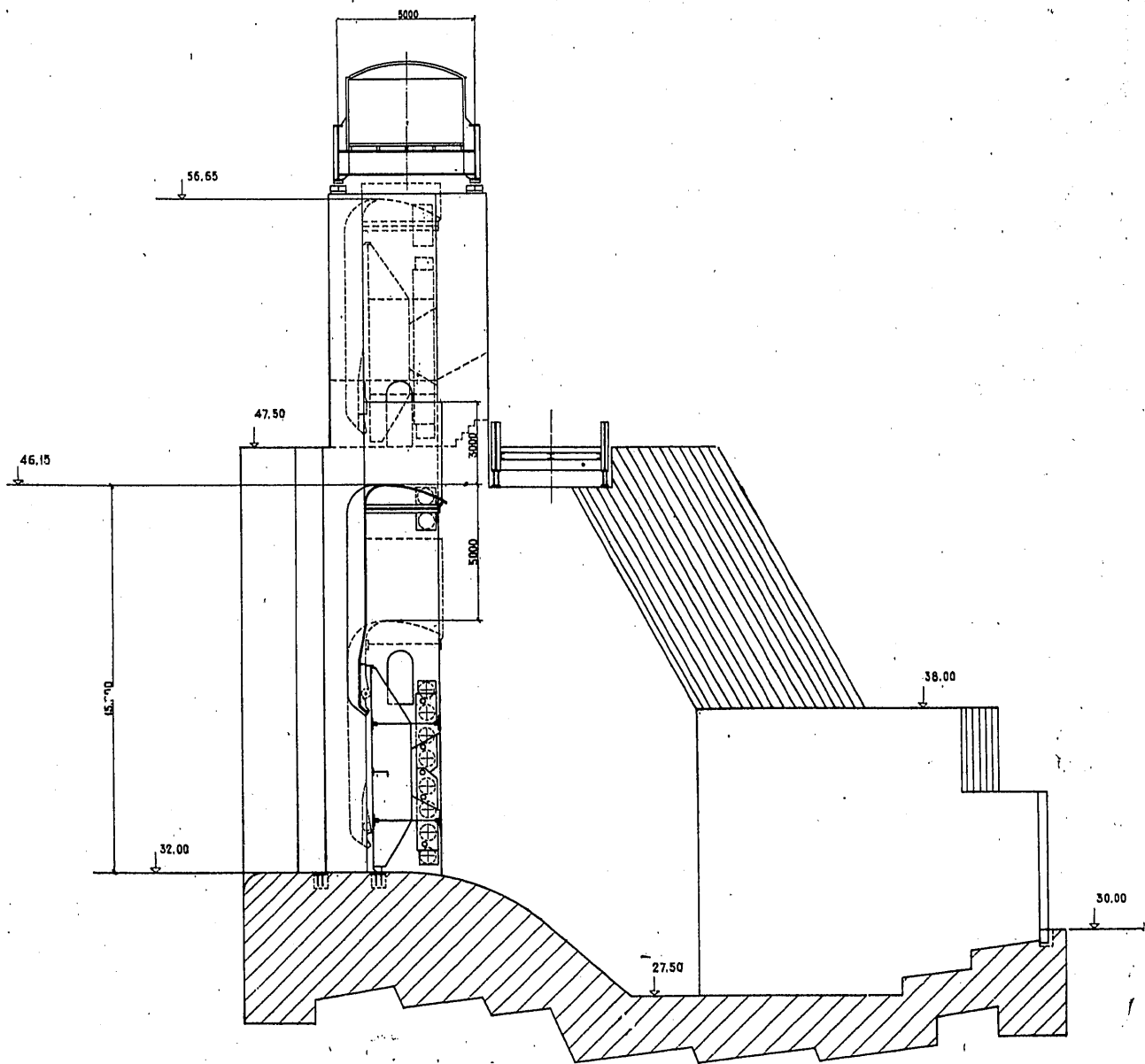


Fig. 4.^a — Compuertas de doble tablero, tipo MAN. Presa de Belver, en el Tajo (Portugal), actualmente en construcción. Sección vertical.

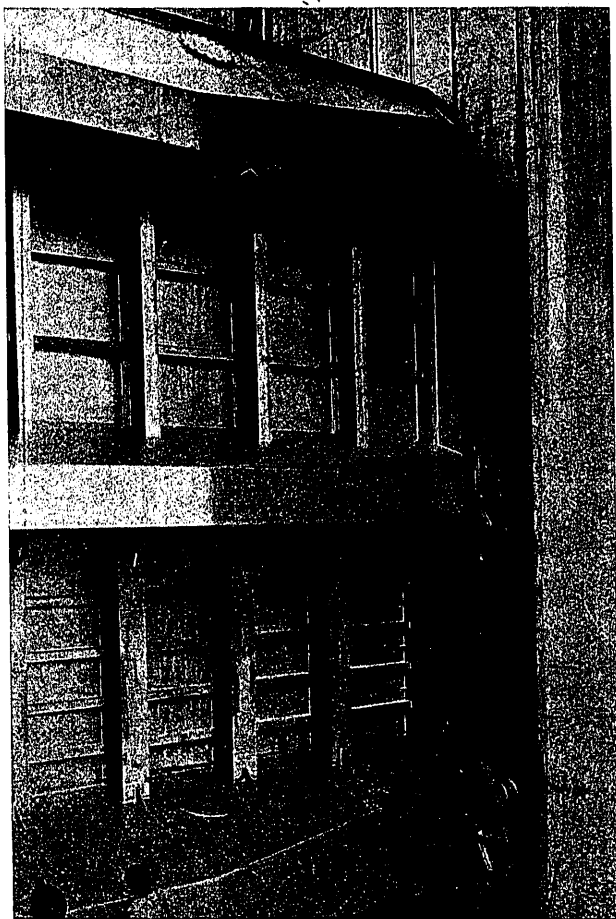


Fig. 5.ª — Compuertas de doble tablero, de tipo análogo a la compuerta MAN, con la diferencia que el tablero inferior transmite su carga al superior, al revés de lo que sucede en el sistema MAN. Toma de agua en Evionnaz de la presa de Lavey, sobre el Ródano (Suiza), 1949.

2.º El mismo camino de rodadura sirve para ambos tableros.

3.º No existe efecto alguno de succión.

4.º La pantalla curva, que forma el paramento en la coronación del tablero superior, tiene un perfil favorable desde el punto de vista hidráulico, lo que disminuye el esfuerzo de elevación y permite evacuar un caudal mayor.

c) COMPUERTAS DE SECTOR CON PARAMENTO CURVO (COMPUERTAS TAINTER).

Entre las compuertas de tablero, la compuerta de doble tablero de la Casa M.A.N. es, sin duda, la más moderna. Sin embargo, tiene el grave defecto de necesitar instalaciones de elevación de mucha potencia y que representan una parte importante del coste total de las compuertas. Necesita también un

puente de servicio pesado, el cual, no solamente es muy costoso, sino que también alarga mucho la duración de los trabajos de montaje. Además, las pilas, junto con el puente de servicio, forman una estructura pesada y de un efecto arquitectónico muy desfavorable.

La compuerta de sector o compuerta Tainter, inventada por el ingeniero americano Jeremiah Tainter alrededor de 1875, no tiene tales defectos. El esfuerzo necesario para la elevación de una compuerta de sector es bastante más pequeño que el requerido por una compuerta de tablero de dimensiones equivalentes. Eso se debe a las siguientes razones:

1.º Como la compuerta Tainter tiene un paramento cilíndrico, cuyo eje coincide con el eje de rotación de la compuerta, la resultante de la presión hidráulica pasa siempre por dicho eje, incluso cuando la compuerta está levantada parcialmente, dejando pasar agua por debajo. Por consiguiente, no hay que vencer la presión hidráulica al abrir o cerrar la compuerta.

2.º Los apoyos de la compuerta cargan con una parte del peso propio de la compuerta.

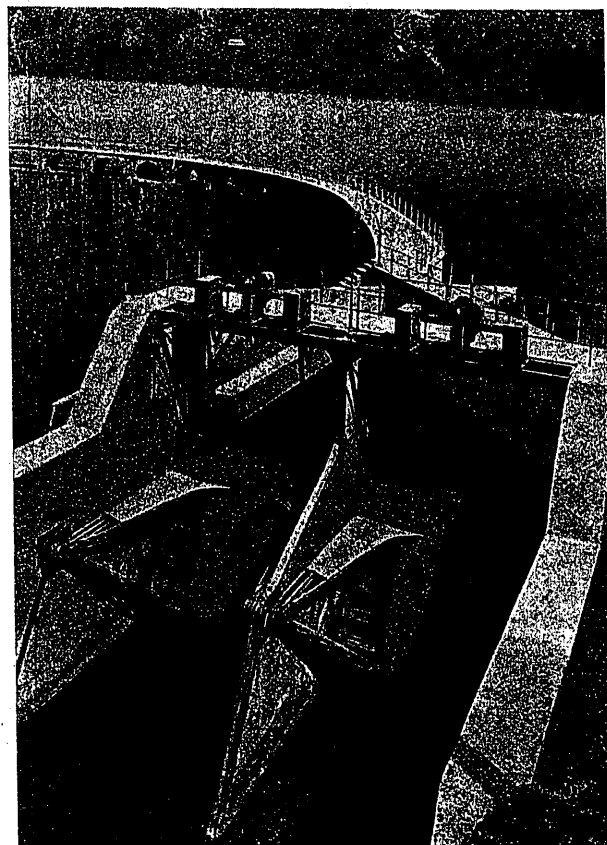


Fig. 6.ª — Compuertas de sector, de la presa de Montsalvens, sobre el Jogne (Suiza), 1925.

Fig. 7.^a — Compuerta Tainter o de sector, de la presa de Autisha (Perú).

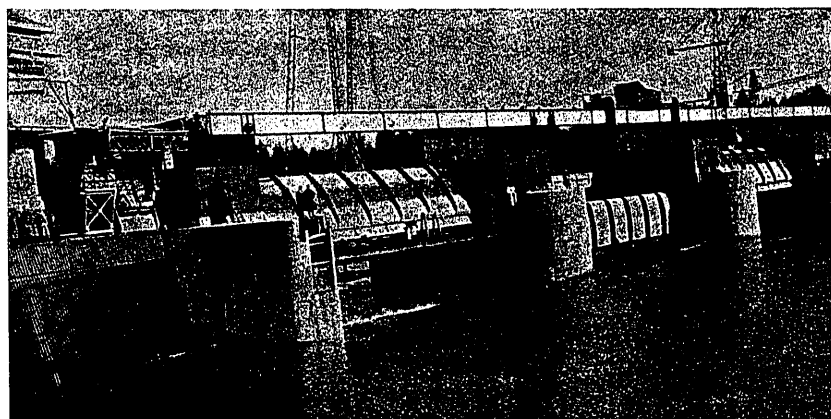
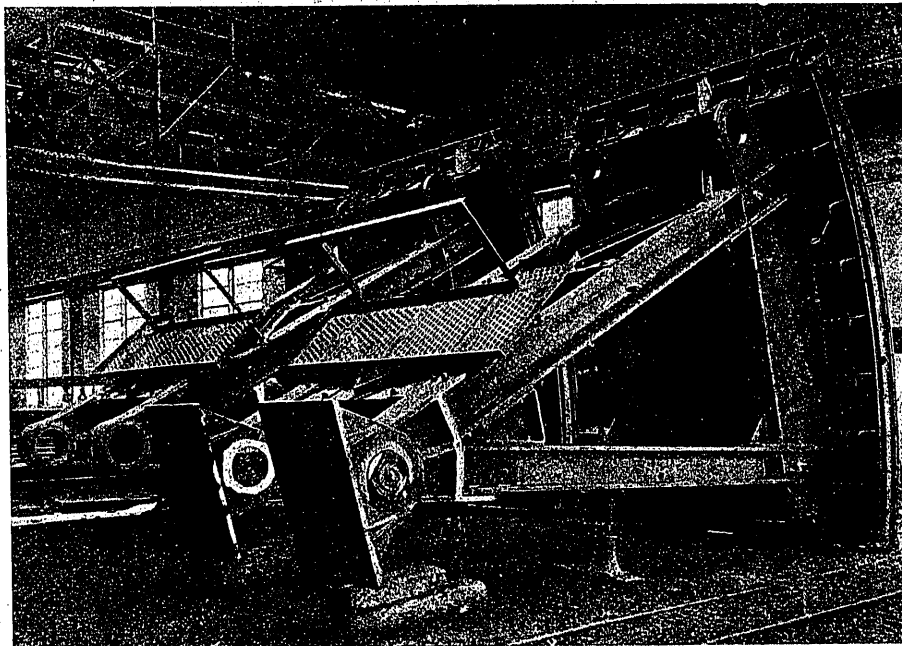
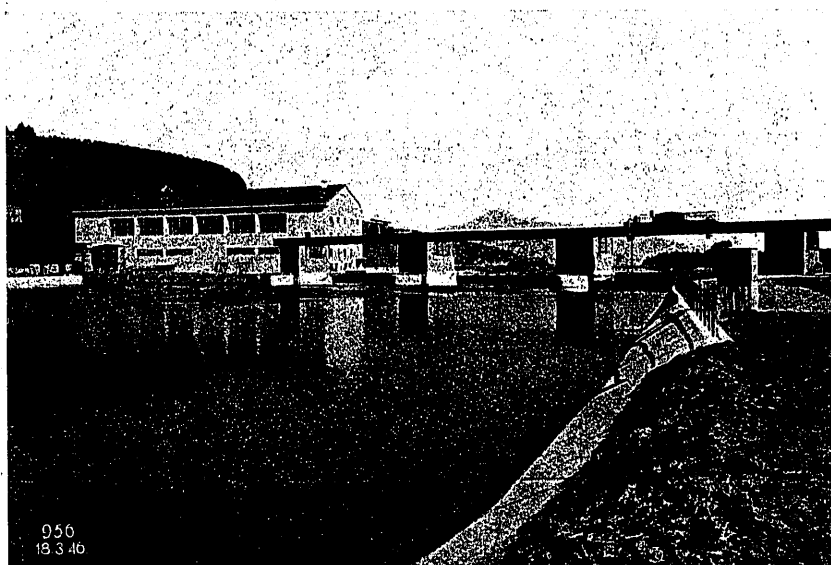


Fig. 8.^a — Compuertas de doble sector, tipo Zschokke, de la presa de Rapperswil-Auenstein, sobre el Aar (Suiza), 1943. Tres vanos de 22,00 m. de luz y 8,00 m. de altura. Fotografía tomada durante el montaje.

Fig. 9.^a — Presa y central de Rapperswil-Auenstein, sobre el Aar (Suiza). Presa de compuertas tipo Zschokke. Vista desde aguas arriba.



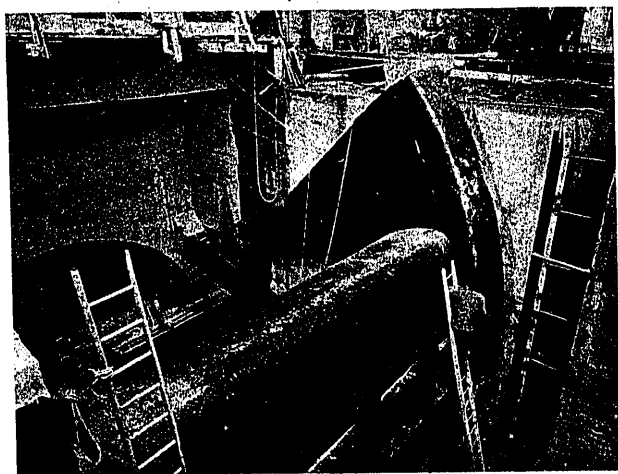


Fig. 10. — Compuerta de doble sector, tipo Zschokke, del aliviadero de la presa de Rössens, sobre el Sarine (Suiza), año 1948.

3.º Las fuerzas de rozamiento opuestas al movimiento de la compuerta, se reducen al rozamiento entre las bandas de impermeabilización y las pilas y a la fricción interna de los ejes de rotación. Esta tiene muy poca importancia, debido al brazo de palanca muy grande de la fuerza de elevación. Las fuerzas de rozamiento de las compuertas de sector son mucho menores que las de compuertas de tablero.

La reducción del esfuerzo necesario para elevar la compuerta tiene varios efectos de lo más favorable. En primer lugar reduce el coste porque reduce la potencia de las instalaciones elevadoras, porque hace superfluo el puente de servicio de construcción corriente, reduciendo, por lo tanto, la duración del montaje, y finalmente porque reduce la altura corriente de las pilas en una fuerte proporción. En segundo lugar, el aspecto general de la presa entera resulta mejorado notablemente, porque desaparecen esas estructuras altas y complicadas, estilo 1900. En su lugar aparece una construcción moderna, en el mejor sentido de esa palabra, es decir, de líneas sobrias y elegantes.

Otra ventaja importante de la compuerta Tainter se debe al perfil hidrodinámico tan favorable del sector, quedando por eso eliminadas toda clase de vibraciones peligrosas, como las que suelen aparecer en ciertas circunstancias en las compuertas de tablero, donde llegan hasta el punto de poner en peligro la presa entera.

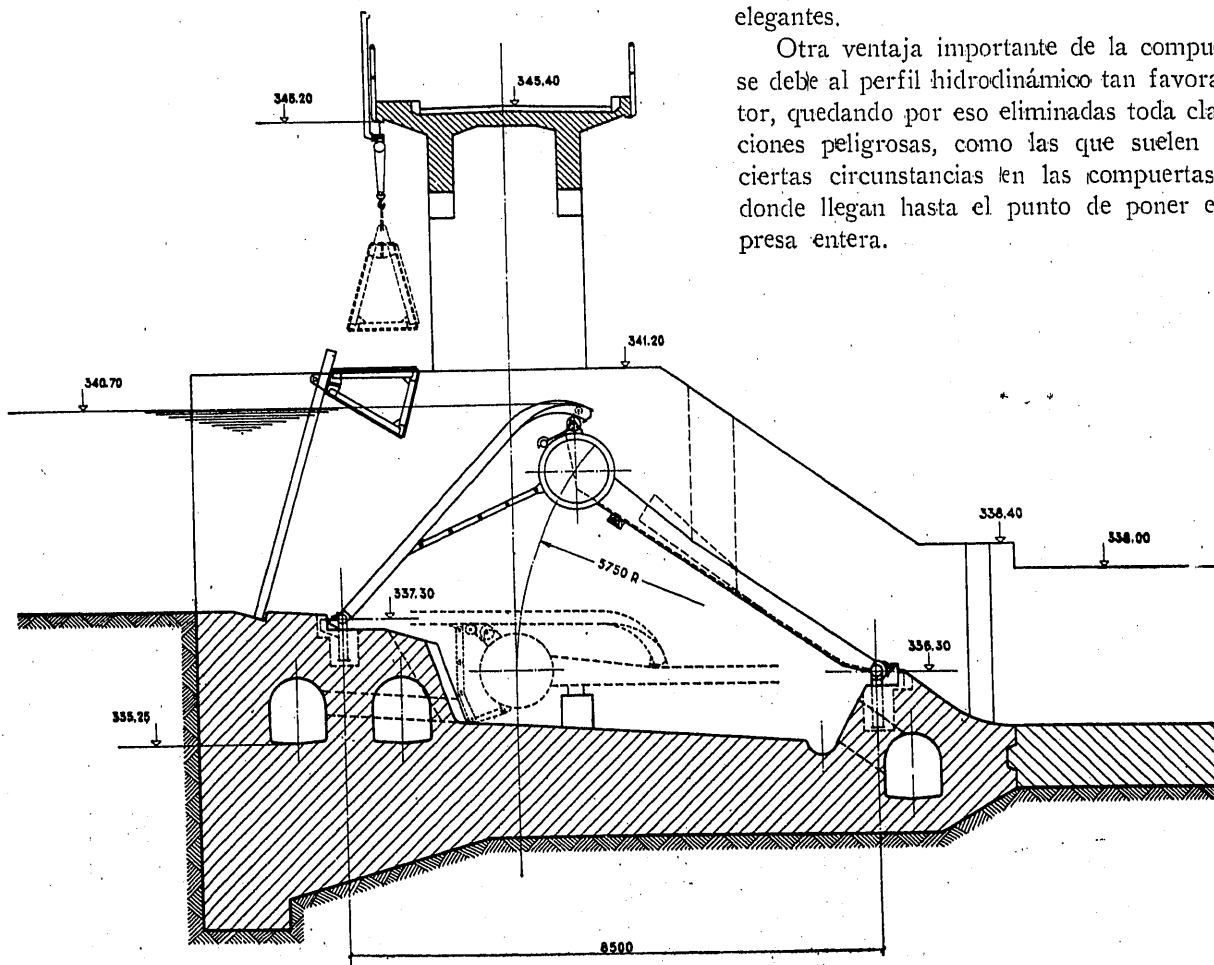


Fig. 11. — Compuerta basculante de la presa auxiliar de Schinznach-Band, sobre el Aar (Suiza), actualmente en construcción. Sección vertical.

Para satisfacer a los variados requisitos de las centrales hidroeléctricas modernas, la Casa Conrad Zschokke ha desarrollado un tipo muy eficiente de compuerta Tainter: la compuerta de doble sector. Este tipo de alza es, sin duda, la compuerta de construcción más moderna hasta la fecha, porque reúne las ventajas de las compuertas de doble tablero, y en particular, de la compuerta de la Casa M.A.N., con las ventajas propias de las compuertas Tainter.

d) COMPUERTAS DE TAMBOR.

En países nórdicos, donde los hielos y las temperaturas excesivamente bajas ponen en peligro el buen funcionamiento de muchos tipos de compuertas, en particular de las compuertas de tablero, las compuertas de tambor han demostrado su utilidad. Las instalaciones de elevación son muy sencillas y relativamente baratas, y el buen funcionamiento de las alzas queda asegurado, aun en las condiciones más adversas.

La elevación de las compuertas de tambor requiere menos potencia motriz que en las compuertas de tablero. El tambor tiene una gran rigidez a la torsión, de modo que es posible accionar dicho tambor de un solo lado.

Como no es posible construir compuertas de doble tambor (en analogía a las compuertas de doble tablero de la Casa M.A.N., y a las compuertas de doble sector de la Casa Zschokke), se han construí-

do compuertas de tambor sumergibles, es decir, compuertas que funcionan por descenso, pero hasta la fecha sin lograr mucho éxito, debido a que tales sistemas suelen tener defectos de impermeabilidad en el borde inferior.

e) COMPUERTAS BASCULANTES.

Agrupamos bajo este título a las compuertas giratorias alrededor de un eje horizontal situado en la solera de la presa y en el mismo plano que el paramento de las alzas. Las compuertas basculantes son de una aplicación más bien limitada, porque resultan económicas solamente para grandes vanos y pequeños desniveles.

En las compuertas basculantes de un solo tablero, la fuerza necesaria para elevar el alza crece con la tercera potencia de la altura de remanso. Por esta causa se usan, en general, contrapesos. Más ventajosa es la compuerta basculante de doble tablero, conocida generalmente bajo la denominación: compuerta americana ("bear-trap gate", en inglés; "Dachwer" de los alemanes). Dicho sistema, que consta de dos alzas formando techo, utiliza la diferencia de presión entre aguas arriba y aguas abajo para funcionamiento, y para esto basta disponer de un desnivel muy pequeño. Cuando las alzas están abatidas, la presa constituye un vertedero de pared gruesa, el cual no es, como es sabido, el tipo ideal de vertedero.