Año XI Noviembre de 1911 Núm. 11.

ANALES

DEL

INSTITUTO DE INJENIEROS DE CHILE

El Canal Cavour

POR

GUILLERMO AGÜERO

La obra mas importante de irrigacion en el Norte de Italia es el Canal Cavour que, con las obras accesorias, riega una estension de 120 000 hectáreas.

Su boca-toma está ubicada sobre la orilla izquierda del rio Pó en las inmediaciones de Chivaso (véase el plano jeneral), la direccion de su curso es, en jeneral, de S. O. a N. E. i va a terminar en el rio Ticino, alcanzando una lonjitud de 82 230 kilómetros. Esta lonjitud está constituida por 37 trozos rectilíneos con una lonjitud total de 73 330 kilómetros i de 36 curvas con un desarrollo de 8 900 kilómetros, habiendo en consecuencia una razon de 8,2 a 1 entre ámbos elementos, lo que acusa un perfil poco accidentado. Los radios de dichas curvas varian entre 118 i 2 000 metros.

En cuanto al perfil vertical, la inclinacion del fondo del canal varia de cero, es decir, es horizontal, como sucede en los sifones bajo los rios Elvo i Sesia en una estension de 450 metros, hasta un máximo de 0,0005 como se tiene en el comienzo del canal. La inclinacion es, en jeneral, de 0,00025, pero circunstancias especiales han obligado en algunas partes a tomar una pendiente de 0,00030; 0,00034; 0,00036 i 0,00040 todo lo cual justificaremos mas adelante al considerar las obras del canal por separado.

La diferencia de nivel entre la boca en el rio Pó i su desagüe en el Ticino es de 21,73 metros, lo que hace que la pendiente media del canal sea de 0,000 264. El canal corre en escavacion por una estension un poco mayor de 76 kilómetros, alcanzando la entera seccion sólo en 26 kilómetros, en los cuales los cortes no superan la profundidad de 10 metros. En los 6 kilómetros restantes, la seccion del canal va totalmente sobre la superficie del terreno, comprendiendo en esta parte la lonjitud ocupada por los puentes canales.

Para la seccion transversal del canal se han tomado dos perfiles tipos de forma trapecial: uno con las paredes laterales inclinadas de 1 a 10 para aquellas partes en que el canal pasa por obras de arte (acueductos i puentes) i en que, por consiguiente, las paredes son de albañilería, i otro con paredes de 45 grados o sea de 1 por 1 para el

resto, es decir, para las partes en que el canal va en el terreno natural. Este último perfil se completa dándole a 20 o a 30 centímetros sobre el borde del agua, una banqueta de 1.50 m. i se sigue despues con una inclinacion de 45 grados hasta poder formar sobre el terreno un camino de servicio de 4,50 metros de ancho. Cuando la profundidad de escavacion es considerable se disponen banquetas de 1,50 metros de ancho a una distancia vertical de 1,60 m. unas de otras.

Los muros que limitan el canal en los acueductos han sido diseñados tomando en cuenta obtener el perfil mas económico i tienen 0,835 m. de espesor medio con una altura de 3,40 m. Ademas están reforzados esteriormente por macizos de 1,50 m por 0,60 m. de seccion, colocados a 5 metros unos de otros i por un terraplen que se alza hasta el borde del muro pora formar al mismo tiempo un camino de servicio con un ancho de 2,85 m. Para permitir el espedito tránsito de vehículos en estas partes del camino que son mucho mas angostas que aquéllas en que el canal va en escavacion, se han dispuesto a distancias que varian de 350 a 500 metros, ensanchamientos del camino de 6,85 metros de amplitud, lo que constituye tambien un reforzamiento de los muros del canal.

Obras de toma

Las obras de toma están ubicadas, como ya se ha dicho, sobre la orilla izquierda del rio Pó en la vecindad de Chivasso i a 400 metros mas o ménos aguas abajo del gran puente que sirve al camino de Turin a Casale. Desde dicho puente hasta la propia boca, la barranca del rio tiene una inclinacion de 45 grados i está protejida por un revestimiento de piedra que descansa sobre un muro de albañilería. Este revestimiento se desarrolla en línea recta, la direccion de su eje forma un ángulo de 112 grados con el del canal i está unido al muro izquierdo del mismo por un arco de círculo (figuras 1 i 2).

Para conseguir que durante la época de sequía las aguas del Pó se dirijan hácia el canal, se ha construido una represa que cruza todo el cauce del rio i que está constituida de tres partes:

a) Un enrocado A formado por grandes piedras entre las cuales van sacos rellenos con piedras de menores dimensiones i dispuesto en arco de círculo con una lonjitud de mas de 450 metros. Naturalmente no es esta una obra de carácter sólido i estable, pero ha sido una manera de resolver en buenas condiciones de servicio i economía la no construccion de un muro que habria costado sobre medio millon de francos. Los injenieros al servicio del canal estan satisfechos de la solucion, cuyas reparaciones despues de las creces del rio imponen anualmente un gasto reducido.

b) Un gran machon B de mamposteria, sólidamente fundado, de 35 metros de lonjitud i de 7 metros de ancho, sobre el cual se apoya el enrocado que acabo de indicar i sirve de cabezo al desagüe *C*.

c) El desagüe *C* compuesto de 13 aberturas de 2 metros de ancho cada una i de

La lonjitud de este trozo de canal hastá las compuertas *G* es de 200 metros mas o ménos, su fondo en los últimos 40 metros está revestido de un empedrado de grandes trozos de granito que reposan sobre un conglomerado; en el resto, es decir en la parte que se estiende hasta la boca, hai un empedrado de piedras mas pequeñas colocadas en las mismas condiciones que las anteriores. Los muros tienen enfrente a esta última parte una inclinacion de 1 a 10 hácia el lado del agua i dos banquetas de 0,30 m. del lado de la tierra, de manera que se obtiene un perfil de muro que en la base tiene un espesor de 2,30 m. i en la cúspide 0,90, siendo su altura de 8 m. con el objeto de quedar siempre sobre el nivel de las mayores creces. La inclinacion de 1 a 10 desaparece en los últimos 40 m. Estos muros están fundados sobre un relleno de piedras de 3,50 m. de ancho i de 1,40 de profundidad, contenido en una especie de cajon formado por un tablestacado clavado hasta una hondura de 5 metros.

Al término del canal de acceso *D* se encuentra en su orilla izquierda una escala E de servicio i en la orilla derecha un desagüe F, que sirve para regularizar mejor la cantidad de agua que se ha de echar en el canal i para limpiar el canal de acceso D de los depósitos que se forman en él e impedir que pasen por las grandes compuertas, en vista de lo cual se ha dado a su radier la cota 170,90 m. sobre el mar, puesto que en las compuertas se tiene, como se ha dejado establecido, una cota mínima de 171,20 i en el desagüe *C* de la boca una cota de 171,00 m. La boca del desagüe *F* está constituida por un edificio cubierto, semejante a aquel en que se encuentran las compuertas *G* que regulan el acceso del agua en el canal i que describiré enseguida. La boca *F* consta de 9 aberturas de 1,65 m. de ancho i de 8 pilastras de 0,65 m. de espesor i de 7 m. de lonjitud. La altura libre es de 3,04 m. i se cierran con compuertas de madera de construccion bastante sencilla, de 0,07 m. de espesor, siendo su maniobra mui primitiva i molesta. El canal de este desagüe es de seccion trapecial con sus paredes laterales inclinadas de 45 grados, su fondo tiene un ancho constante de 20 m. i termina en el Pó despues de un recorrido de 1 450 m.

Consideraremos ahora la parte mas importante de las obras de toma: el *edificio de las compuertas*, que en la figura 1 está marcado con la letra *G;* en la figura 3 se tiene una vista del edificio mirado de la parte de aguas arriba. Su ubicacion a 200 m. del punto en que el agua es estraida al rio, se justifica por la necesidad de estar a cubierto de cualquier evento en el caso en que fallaran las obras de defensa de la boca. El edificio consta de tres pisos, con una lonjitud igual al ancho del canal, es decir 40 m.; en sus estremidades se han agregado dos casitas para cuidadores, presentando así el conjunto un hermoso aspecto. El primer piso está destinado a dar pasada al agua i se compone de 21 aberturas de 1,50 m. de ancho cada una i de 2,20 m. de altura, de 20 pilastras de 0,40 m. de espesor i de 8,20 m. de lonjitud que soportan el edificio i llevan los marcos de las compuertas, i de dos semi-pilastras en los estremos, de 0,25 m. de espesor. De esta manera tenemos;

Aberturas.....	21×1,50=31,50 m
Pilastras.....	20×0,40= 8,00
Semi-pilastras.....	2×0,25= 0,50
Total.....	40,00 m

dimensiones que justificamos mas abajo.

Las pilastras son de piedra tallada i han funcionado siempre sin ningun desperfecto. Se han colocado dos series iguales i paralelas de compuertas distantes 4,50 m. una de otra, con el doble objeto de poder hacer un buen servicio aun en el caso de que una compuerta se deteriore i de facilitar la maniobra en el caso en que la presion del agua en las primeras compuertas, es decir, en las de aguas arriba, sea fuerte. En efecto, bajando la compuerta de atras se llenará de agua el espacio encerrado entre las dos pilastras i las dos compuertas i la presion sobre la primera compuerta se reducirá notablemente.

Las compuertas son de madera, de 0,07m. de espesor, convenientemente reforzadas con piezas de metal. Su duracion es, término medio, de veinte años, habiendo algunas que prestan sus servicios desde la construccion del canal, es decir mas de cuarenta años.

El segundo piso está destinado a dar cabida a las compuertas cuando son alzadas para dar libre paso al agua. En el piso superior, que es cubierto, están instalados los dispositivos necesarios para la maniobra de las compuertas. Esta se efectúa todavía en la forma primitiva e incómoda con que fué proyectada, pero en la actualidad se piensa hacer para el objeto una instalacion moderna i práctica que esté a la altura de la importancia de las demas instalaciones i de los servicios que está llamada a prestar. El ancho de la parte superior del edificio es de 7,15m.

Consideraremos ahora los cálculos que establecen que efectivamente podrán pasar a lo ménos 110 metros cúbicos por segundo de agua por esta parte del canal:

Se puede suponer primeramente que en los 200m. del canal de acceso D no hai pérdida de carga apreciable i, por consiguiente, podemos contar en las compuertas con una altura de agua al rededor de 2,20m. Ahora, el escurrimiento se considera dividido en dos partes, de las cuales la inferior tiene una altura de 1,87m. con una carga sobre su superficie de 0,33m., i la superior se considera como escurrimiento sobre vertedero con una carga disponible de 0,33m. La contraccion de la vena será naturalmente menor aquí que en el caso jeneral i, por consiguiente, no podemos tomar como coeficiente de contraccion 0,60, sino uno mayor, que determinaremos por medio de la fórmula de Bidone, que es:

$$k' = k\left(1 + 0{,}1523\frac{n}{p}\right)$$

en la cual k' es el coeficiente de contraccion buscado, $k = 0{,}60$, n es la lonjitud del

perímetro de la vena en la cual la contraccion es disminuida i p el perímetro total de la vena considerada. En el presente caso tenemos que $\frac{n}{p}=0,8$, luego:

$$k'=0,60\left(1+0,1523\times0,8\right)=0,673$$

En tal caso, tendremos que la cantidad de agua que puede pasar por las compuertas, será:

$$Q=0,67\times21\times150\left(1,87\sqrt{2g\times0,33}+\frac{2}{3}\times0,33\sqrt{2g\times0,33}\right)$$

$$Q=112,20m^3 \text{ por segundo}$$

Segun esto se observa que el gasto que pueden dar las compuertas es mayor que el exigido, sin tomar en cuenta que por la lonjitud de las pilastras se podrian considerar éstas como tubos adicionales.

Aguas abajo de las compuertas en una estension de 15m. el fondo del canal está pavimentado en las mismas condiciones que el canal de acceso i sus paredes son tambien verticales i revestidas. En esta parte sobre la orilla izquierda se ha instalado un hidrómetro constituido por una cámara de planta rectangular comunicada inferiormente con el canal i que lleva en su interior una regla dividida en centímetros, que indica la profundidad de agua en el canal. Ademas, se ha instalado en esta cámara un flotador conectado por medio de un hilo metálico guiado por pequeñas poleas, con un indicador graduado colocado en la oficina del cuidador, en donde se tiene así tambien la misma indicacion anterior. Por último, una campanilla eléctrica conectada con el mismo disposivo avisa al empleado el momento en que el caudal de agua aumenta sobre el límite de 110 metros cúbicos por segundo, i se evita así que de un momento a otro el agua que entra en el canal no quepa en las secciones en que se tiene el perfil justo i se produzcan accidentes de graves consecuencias.

Ademas de estas instalaciones se ha construido en la vecindad del edificio de las compuertas, una casa que ocupa una superficie de 23,40m. por 5,70m., destinada al jefe de los cuidadores del canal.

Se ha cuidado tambien del embellecimiento de los alrededores de esta gran obra de injeniería, instalando jardines i erijiendo una estatua en memoria del injeniero Cárlos Noe, autor del proyecto del Canal Cavour.

Perfil trasversal del canal

Ya hemos dicho que la seccion de 40m. de ancho i 1,87m. de altura de agua (fig. 4) no es la mas económica, por lo que estableceremos ahora las dimensiones de la seccion mas conveniente. Como regla práctica se ha considerado la establecida por Morin, que dice que la altura máxima de agua debe variar entre un cuarto i un sesto

del ancho del fondo del canal. debiéndose tomar en cuenta, ademas, que la pendiente no debe ser tan pequeña que permita los depósitos, ni tan exajerada que provoque escavaciones.

En nuestro caso se ha tomado una seccion trapecial con las paredes inclinadas de 45 grados, cuyo fondo tiene 20m. de ancho i una pendiente de 0,00025. La altura de agua, segun Morin, deberá estar comprendida entre 5m. i 3,33, siendo en este caso de 3,50m el número que debemos aceptar. En efecto, procediendo análogamente al caso considerado para el canal de acceso, tendremos (fig. 5):

$$W=\left(20,00+3,50\right)3,50=82,25m^2$$

$$\varphi=20,00+2\left(3,50\sqrt{2}\right)=29,90 \text{ m. l.}$$

$$Ri=\frac{W}{\varphi}i=\frac{82,25}{29,90}0,000\,25=0,000\,6876.$$

para lo cual las tablas de Eytelwein dan v=1,348m. por segundo i, por consiguiente:

$$Q=Wv=82,25\times1,348=110,87m^3 \text{ por segundo}$$

Si considerásemos las tablas de Prony, observaríamos que éstas acusan para dicha seccion un gasto aun superior i que bastaria una altura de agua 0,10m. menor para tener mas del gasto requerido. En efecto, siendo 3,40m la profundidad de la vena líquida, se tiene:

$$Ri=\frac{W}{\varphi}i=\frac{23,40\times3,40}{20,00+2\left(3,40\sqrt{2}\right)}\times0,00025=0,0006725$$

en cuyo caso se tiene, segun Prony, que la velocidad media es v=1,40 metro por segundo i luego:

$$Q=Wv=79,56\times1,40=111,38m^3 \text{ por segundo}$$

Tenemos ahora que esta nueva seccion es bastante diferente de la que tiene el canal en las compuertas i, por consiguiente, no se puede pasar directamente de una a la otra sino de una manera progresiva, tratando que esta trasformacion se efectúe en la menor lonjitud posible, tanto para disminuir las dificultades de ejecucion de la obra como por economía. Matemáticamente considerado el problema, el fondo del canal entre las dos secciones límites deberá estar comprendido entre dos líneas curvas, cuya determinacion es complicada como lo seria asimismo el estacado de las mismas en el terreno, sin que esto reportara beneficio. Se han reemplazado, en consecuencia, dichas curvas por trozos de líneas rectas, cuya determinacion se ha efectuado de la siguiente manera:

Se ha considerado el canal dividido en trozos de un kilómetro i se ha ido variando en cada uno de estos escalones la seccion inicial i la pendiente de 0,00050 progresivamente, hasta tener la seccion establecida como normal con la pendiente de 0,00025, para cuyo efecto se ha tomado en cuenta el peralte que se puede obtener de la superficie líquida motivado por el mismo movimiento del agua. Se han reemplazado en seguida estos escalones por una línea recta, de madera que el canal satisfaga siempre las condiciones prefijadas, obteniendo así una economía i facilidad de construccion i una mejor manera de escurrimiento del líquido. La magnitud del peralte se puede determinar por medio de consideraciones del cálculo integral, lo que motiva desarrollos mui largos, en vista de lo cual se ha tomado la fórmula esperimental establecida por Fünk, que efectuó sus observaciones en el rio Weser.

Sea, en efecto, $ABCD$ (figura 6) la superficie de la vena líquida a réjimen uniforme que escurre en un canal cuyo fondo EF tiene una pendiente constante que llamaremos i i supongamos que en la seccion EB se encuentre el obstáculo que provoca el peralte. La superficie del agua en esta seccion se elevará de una cantidad BG que llamaremos h, i la vena de superficie paralela al fondo del canal será reemplazada en el trecho BC por la curva GC. Fünk supone que esta curva es un arco de parábola i la espresa por la siguiente fórmula:

$$h_x = 2h - is_x - \sqrt{h\left(h - i\frac{s_x}{2}\right)}$$

siendo como se ve en la figura, s_x la distancia horizontal de un punto cualquiera de la curva a la seccion en que se provoca el peralte. Segun las designaciones de la misma figura, podremos escribir que:

$$h_x = h - is_x + z_x$$

lo que introducido en la formula anterior da para la curva de la superficie peraltada, la siguiente espresion:

$$\left(z_x + h\right)^2 - h\left(h - \frac{1}{2}is_x\right) = o \qquad \text{(a)}$$

Se observa que ésta es la ecuacion de una parábola de diámetro vertical i convexa hácia arriba, cuya cúspide está situada a una distancia vertical igual a h del punto G, es decir de la superficie peraltada en el punto en que se provoca el peralte i a una distancia horizontal $s' = \frac{2h}{i}$ del mismo punto. En efecto, si en la ecuacion (a) hacemos $z_x = h$, se obtiene:

$$-h^2 + \frac{1}{2}h\,i\,s' = 0$$

de donde resulta $$s' = \frac{2h}{i}$$

Ahora el punto en que la parábola del peralte corta a la recta que representa la superficie del agua a réjimen uniforme, dista $\frac{3}{2}\ \frac{h}{i}$ del punto C, puesto que en tal caso se tiene que $z=is-h$, lo que introducido en la ecuacion (a) da:

$$\left(is-2h\right)^2-h\left(h-\frac{1}{2}is\right)=0 \qquad (b)$$

Si en la figura llamamos a la distancia $C'H$, tendremos:

$$C'H=a=2\ h-is \qquad (c)$$

lo que introducido en la ecuacion (b) da:

$$a^2-\frac{1}{2}ah=0$$

$$a=\frac{1}{2}\ h$$

Reemplazando este valor de a en la ecuacion (c) queda:

$$\frac{1}{2}\ h=2h-is\ ;\quad s=\frac{3}{2}\times\frac{h}{i}$$

De aquí se deduce que $h=\frac{2}{3}\ is$, lo que signifiea que la altura del peralte en el punto en que éste se produce es igual a los dos tercios del desnivel del fondo del canal en la estenston en que se manifiesta el peralte, considerando naturalmente que la pendiente del canal es constante.

Volvamos entónces a la consideracion del canal. Al primer kilómetro se ha dado la pendiente de 0,00050 i la seccion trasversal tiene 40m. de ancho en el fondo. En los primeros 700m. la inclinacion de las paredes es de un tercio i están revestidas por un muró de piedra; despues toman gradualmente la inclinacion de 45 grados i van revestidas entónces con un empedrado ordinario. Al terminar el primer kilómetro podremos contar con un peralte de $\frac{2}{3}\times 0{,}50=0{,}33$m. i, por consiguiente, para la determinacion de la seccion trasversal del segundo kilómetro, se dispone de una altura de agua de $1{,}87+0{,}33=2{,}20$ m.

Si tomásemos para el segundo kilómetro la pendiente de 0,00025, se obtendria con la altura de agua que acabamos de determinar, una seccion cuyo ancho en el fondo seria mayor de 40m., por lo que se ha tomado una pendiente de 0,00030 i en tal caso se tiene para el fondo del canal un ancho de 38m. (figura 7), como lo demuestran las siguientes igualdades:

$$W=(38,00+2,20)\ 2,20=88,44m^2$$
$$\varphi=38,00+2\times(2,20)\ 2=44,22m.$$

$$Ri=\frac{88,44}{44,22}\ 0,0003=0,0006$$

a lo cual corresponde v=1,238m. por segundo, luego:

$$Q=88,44\times1,238=110,37m^3 \text{ por segundo}$$

En consecuencia, la seccion satisface convenientemente su objeto.

Siendo de 0,00030 la pendiente del segundo kilómetro i, por consiguiente, siendo de 0,30m. la diferencia de nivel entre sus estremos, se podrá contar con un peralte de $\frac{2}{3}\times0,30=0,20m.$ para la determinacion de la seccion trasversal del tercer kilómetro, o sea, con una altura de agua de 2,20+0,20=2,40m. Si tomamos tambien 0,00030 como pendiente de su fondo i 33,15m. para su ancho, se verifica que:

$$W=(33,15+2,40)2.40=85,32m^2$$
$$\varphi=33,15+2\times(2,40)\ 2=39,92m$$

$$Ri=\frac{85,32}{39,92}\ 0,00030=0,0006411$$

A esto corresponde v=1,29m. por segundo.

$$Q=85,32\times1,29=110.06m^3 \text{ por segundo.}$$

Con la pendiente de 0,00030 en el tercer kilómetro, tendremos que la altura de agua en su estremidad inferior será de $2,40+\frac{2}{3}\ 0,30=2,60m.$, con lo cual se puede tomar para el cuarto kilómetro sin necesidad de ensanchar el fondo del canal, la pendiente establecida de 0,00025. Tomando, ademas, 32.20m como ancho del fondo, se tiene: $W=90,35m^2$; $\varphi=39,49m.$ l.; Ri=0,0005717; v=1.218m. por segundo i Q=110,04 metros cúbicos por segundo.

Análogamente se tiene para los kilómetros sucesivos:

Quinto kilómetro.—Altura de agua disponible al fin del cuarto kilómetro: $2,60+\frac{2}{3}\ 0,25=2,76m.$

Ancho adoptado para el fondo del canal: 29,35m,

Entónces: $W=88,35m^2$; $\varphi=37,05m.$; Ri=0,0005961; v=1,245m. por segundo, i $Q=110,00m^3$ por segundo.

Sesto kilómetro.—Altura de agua disposible al fin del quinto kilómetro: $2,76+\frac{2}{3}\ 0,25=2,92m.$

Ancho adoptado para el fondo del canal: 26.74m.

Entónces: W=86,61m² ; φ=35,00m.; Ri=0,0006190; v=1,27m. por segundo, i Q=110,00m³ por segundo.

Sétimo kilómetro.—Altura de agua disponible al fin del sesto kilómetro: $2{,}92 + \frac{2}{3}\ 0{,}25 = 3{,}08$m.

Ancho adoptado para el fondo del canal: 25,04m.

W = 86,72m² ; φ = 33,75m.; Ri = 0,0006412; v = 1,29m. por segundo, i Q=110,14m³ por segundo.

Octavo kilómetro.—Altura de agua disponible al fin del séptimo kilómetro: 3,24 m.

Ancho adoptado para el fondo del canal: 22,68m.

W=83,98m² ; φ=31,84m; Ri=0,0006590; v = 1,31m. por segundo, i Q = 110,01m³ por segundo.

Noveno kilómetro.—Altura de agua disponible al fin del octavo kilómetro: 3,40 m.

Ancho adoptado para el fondo del canal: 21,00m.

W=82,96m² ; φ=30,62m.; Ri=0,0006772; v=1,33m por segundo, i Q= 110,33m³ por segundo.

Debido tambien al peralte que se puede obtener en este kilómetro, la seccion con un ancho en el fondo de 21,00m. será necesaria sólo en una lonjitud de 500m., puesto que en esta lonjitud se puede tener un solevantamiento del agua de $\frac{1}{2} \times \frac{2}{3}\ 0{,}25 = 0{,}08$m. i, por consiguiente, una altura total de agua de 3,48m., altura que es casi igual a la establecida para la seccion normal.

La figura 8 representa un corte segun el eje del canal en estos nueve primeros kilómetros i muestra el perfil de la superficie del agua despues de esperimentar los sucesivos peraltes indicados, es decir, resume el resultado de los cálculos anteriores. En la figura 9 tenemos representada por la línea quebrada *A B C D*..... *Q S T U* la proyeccion horizontal de la orilla izquierda del fondo del canal establecido segun las consideraciones anteriores. Pero como semejante dispositivo tiene el defecto de presentar salientes bruscos contra la corriente, se le ha reemplazado por otro, uniendo el punto V situado en el término del cuarto kilómetro i que dista 15m. del eje del canal (dando así al fondo del canal en esta parte un ancho de 30m.) con los puntos *C* i *T* por medio de líneas rectas, en los cuales la anchura del fondo del canal es respectivamente de 38m. i de 20m. Pero se puede observar en la figura que si bien esta línea reemplaza satisfactoriamente el conjunto de trozos de la línea quebrada *B C D*..... *Q S T*, no pasa lo mismo con el trozo aislado comprendido en el segundo kilómetro, en el cual el trozo *C X* estrecha el canal en 1,07m. como término medio i, por consiguiente, para que puedan pasar en esta parte los 110 metros cúbicos para los cuales ha sido calculado el canal, será necesario que la altura de agua aumente, o lo que es

lo mismo, es necesario tener un mayor peralte. En este caso, el ancho del fondo del canal quedará reducido como término medio a 38,00—1,07=36,93m., en cuyo caso se necesita una altura de agua de 2,25m., puesto que: W=88,155m² ; φ=43,29m.; Ri=0,0006119, de donde resulta v=1,25m. por segundo i Q=110,193m³ por por segundo.

Se observa, entónces que en el segundo kilómetro se necesita un mayor peralte de 0,05m., debiéndose establecer ahora la influencia que este peralte tendrá en el primer kilómetro, o mejor dicho, en el punto inicial de este primer kilómetro. Para esto se ha considerado la fórmula esperimental de S. Guilhem que es:

$$y = \sqrt[3]{\frac{H^8}{H^5 + \frac{4}{9}(ix)^6 + (ix)^3}} - ix \qquad (d)$$

fórmula que espresa el *peralte residuo y* en funcion del peralte *H* considerado en el punto en que éste es producido, de la distancia *x* a la cual se produce el peralte *y* i de la pendiente *i* del canal. Del análisis de la fórmula (d) se deduce que para tener un pequeño valor de *y* es necesario que el valor de *x* sea mui grande. En nuestro caso tenemos que x=1000m., i=0,00050, i H=0,33+0,05=0,38m; en consecuencia, se tiene que:

$$y = \sqrt{\frac{0,0004378}{0,0079235+0,0138888}} + 0,125 - 0,50 = 0,03\text{m.}$$

valor que, como se ve, es bastante reducido i no tendrá influencia en la cantidad de agua que debe entrar por las compuertas en el canal, en donde hemos establecido que habrá una altura de agua de 2,20m.

En resúmen, se observa que en los 8,5 kilómetros considerados, el canal tiene la forma de un gran embudo en el cual se provoca un conveniente escurrimiento, haciendo una racional distribucion de la pendiente de su fondo.

Tanto la seccion del canal como su pediente de 0,00025 no se conservan rigurosamente constantes en toda su lonjitud a partir del kilómetro 8,5 hasta su desembocadura en el rio Ticino, ya sea porque el caudal de aguas disminuye por las estracciones que sucesivamente va sufriendo, ya sea por las obras de arte que ha sido necesario construir para salvar los cursos de agua que el canal debe forzosamente atravesar, como asimismo su pasaje bajo la línea que une las ciudades de Turin i Milan.

Para la consideracion sucesiva de estos elementos seguiremos el curso de las aguas. Las obras de arte para atravesar los rios i torrentes están constituidas por sifones o por puentes canales, acompañados estos últimos de sus correspondientes acueductos, siendo la línea férrea salvada tambien por un corto sifón. Los cursos de agua

que el canal encuentra en su trazado son el Dora Baltea, el Elvo, el Cervo, el Roasenda, el Marchiazza, el Sesia, el Agogna, el Terdoppio i por último el Ticino en el cual termina.

Obras de arte

Desagüe del Poasso. —A cuatro kilómetros mas o ménos aguas abajo de las compuertas se ha ubicado en la orilla derecha del canal un primer desagüe llamado del Poasso. Su boca consta de ocho aberturas de 1,40m. de ancho cada una i de 2,30m. de altura. Se les cierra con otras tantas compuertas de madera de 1,48m. de ancho, 2,60m. de alto i 0,07m. de espesor. La lonjitud del canal de desagüe es de 1500m. mas o ménos, sus paredes tienen una inclinacion de 45 grados i el ancho en su fondo es de 14,00m.

Puente canal sobre el rio Dora Baltea.—En el kilómetro 11 el trazado del canal encuentra al rio Dora Baltea, al cual atraviesa por el puente mas importante que posee el canal. Su lonjitud es de 192,60m. i está soportado por nueve arcos de 16m. de luz i de 1,60m. de flecha, siendo, en consecuencia, de 1 a 10 la relacion entre ésta i la luz. Tanto los estribos como los machones están colocados cada uno sobre un zampeado de 1,50m. de espesor, limitado por un tablestacado de tablones de 3m. de lonjitud i de 0,10m. de espesor. Las dimensiones de estos zampeados son de 4,50m. por 27,00m. para los machones i de 9,00m. por 27,60m. para los estribos, teniendo todos ellos como ya se ha indicado 1,50m. de espesor. Sobre el zampeado reposa una base de piedra tallada de 0,50m. de altura i sobre esta otra que deja sobre la primera una banqueta de 0,40m. Sobre esta última comienza el machon, dejando a su vez una banqueta de 0,05m. i cuyas paredes se alzan con una inclinacion de 1 por 10. El oríjen de los arcos está a 3,80m. sobre la superficie de los zampeados, su espesor en la clave es de 0,77m. en la parte en que van a resistir el peso del agua i de 1,39m. en la parte en que van colocados los muros que forman el canal, en tanto que en su oríjen estas dimensiones se elevan a 1,15m. i a 1,47m. respectivamente. El canal propiamente dicho está formado por dos muros de 1,75 de espesor i de 3,70m. de altura sobre el fondo del canal. El fondo está constituido por un pavimento de 0,25 de espesor que reposa tanjencialmente sobre el estrados de los arcos i está formado por ladrillos dispuestos en forma de espinas de pescado. El interior del canal va revestido de una capa de cemento de 0,06m. de espesor.

Como ya se ha dicho, los muros tienen interiormente una inclinacion de 1 por 10 i el ancho del fondo del canal es siempre de 20 metros; por consiguiente, para tener el gasto de 110m³ por segundo con la altura de agua establecida de 3,50m, se debe aumentar la pendiente. En efecto, elevando el valor de la pendiente a 0,00036, se tendrá:

$$W = 71{,}225m^2 \; ; \; \varphi = 27{,}00m; \; Ri = 0{,}0009496$$

a lo que corresponde v=1,57m. por segundo i Q=111,82m³ por segundo.

En estas condiciones, el peralte que se puede producir es insignificante. En efecto, cuando determinamos la seccion típica del canal, encontramos que la velocidad del agua es de 1,348m. por segundo, que será la velocidad del líquido ántes de entrar en la nueva seccion, i por otra parte acabamos de determinar que la nueva velocidad será de 1,57m. por segundo. El peralte en estas circunstancias alcanzará un valor dado por la espresion:

$$h = \frac{v'^2}{2g} - \frac{v^2}{2g}$$

$$h = 0,126 - 0,093 = 0,033m.$$

Como se vé, el peralte es sin importancia.

La union del puente-canal con el canal propiamente dicho se efectúa aguas arriba por un acueducto de 227,20m. de lonjitud i aguas abajo por otro acueducto de 1874,60m. lo que hace que la lonjitud total de estas obras sea de 2101,90 metros. La seccion i la pendiente del canal en estos acueductos son las mismas que en el puente canal.

Los muros tienen su pared esterior vertical, el espesor en el coronamiento es sólo de 0,65m. i su profundidad bajo el fondo del canal varia de 0,26m. a 1,15m. Están reforzados de 5 en 5 metros por salientes de mampostería de 0.50m. de espesor i de 1,50m. de lonjitud, alcanzando en casos especiales un espesor de 0,80m. La parte superior de estos salientes está a 0,30m. bajo el borde del canal i se prolongan hasta el pié del muro. Debido a la importancia de la obra se ha querido tener mayor seguridad i se la ha reforzado mas aun construyendo un terraplen que alcanza precisamente hasta el borde de los salientes ya indicados; su parte superior tiene un ancho de 2,85m. i el declive de su cara lateral es de tres de base por dos de altura. Este terraplen, como dijimos en un principio, sirve, ademas, de camino de servicio, para cuyo efecto se le ha agregado cada medio kilómetro una plazoleta de mayor ancho i que tambien hemos mencionado. En el interior del canal, en uno i otro muro, se han dispuesto en esta parte escalas colocadas alternadamente a 250m. unas de otras, es decir que en cada orilla se encuentra una escala cada 500 metros.

Recien construido el canal, las filtraciones que se producian en los 2101,90m. de lonjitud que constituyen esta obra sin contar la lonjitud del puente canal, alcanzaba a la enorme cifra de seis metros cúbicos por segundo, filtraciones que se consiguió disminuir poco a poco, enturbiando fuertemente el agua con arcilla escojida i con lechadas de cal.

En el principio de este acueducto i sobre su orilla derecha se encuentra tambien un desagüe de construccion análoga al desagüe del Poasso. Consta de seis claros de 1,40m. de ancho cada uno i de 2,20m. de altura, i permite echar las aguas del canal al rio Dora Baltea por intermedio de un corto canal de mampostería de 20m. de lonjitud i de 10,40 de ancho, en cuya estremidad se provoca un salto de 5 metros. El

agua cae entónces en un pequeño estanque de 21m. de largo, 18,40m. de ancho i 2m. de profundidad, i de aquí el agua pasa al rio, todo lo cual está convenientemente defendido por un enrocado.

En el rio se han efectuado, ademas, importantes obras para conseguir que las aguas se dirijan siempre hacia el puente canal, obteniéndose así una eficaz defensa de las obras.

Despues de esta importante obra sobre el Dora, debemos andar hasta el kilómetro 40 para encontrar otra obra realmente importante, como es el sifon bajo el rio Elvo. Hai, sin embargo, otras de importancia secundaria, como ser el corto sifon por el cual pasa el Canal Cavour cerca de Santhia, bajo la línea férrea que une Turin con Milan i del cual nos ocuparemos en seguida, i algunas boca-tomas, como ser por ejemplo: la del canal Saluggia que recibe 12 metros cúbicos por segundo; la del canal Asigliano que toma 4 metros cúbicos por segundo; la del canal Cascina Naja por el cual van 8 metros cúbicos por segundo i tres otras boca-tomas de menor importancia.

Sifon bajo la vía férrea.—La seccion trasversal de este sifon consta de tres elementos cuya forma está indicada en la figura 10, siendo su lonjitud igual a 15,00m. En jeneral, el pasaje del agua por un sifón origina una pérdida de carga i si se mantiene constante la inclinacion de la rasante del canal i el gasto, se formará en la boca de entrada del sifon un peralte que contrarrestará la pérdida de carga que se produce entre los dos estremos del mismo. Necesitamos, en consecuencia, determinar esta pérdida de carga, lo que haremos primero de una manera jeneral para aprovechar así una misma fórmula para los diferentes sifones.

Consideremos la figura 11 en la cual queremos determinar el valor de h que es la diferencia entre el nivel del líquido ántes de entrar en el sifon i el que tiene a su salida, esto es: $h = H - h'$. Adoptaremos las siguientes designaciones:

O' i V respectivamente la seccion i la velocidad de la vena líquida en el canal ántes de entrar en el sifon;

O i W los mismos elementos en la boca de entrada del sifon;

m el coeficiente de contraccion en esta boca de entrada;

C, w i v, respectivamente, el perímetro, la seccion i la velocidad en la mitad del sifon, es decir, estos elementos correspanden a su seccion media; i por último,

L, la lonjitud del sifon

Consideremos el movimiento de la unidad de masa de agua en el sifon i como el desnivel que esta masa pierde al atravesarlo es igual a h, el trabajo producido será gh. Este trabajo debe ser igual a la mitad de la fuerza viva que el líquido pierde al atravesar el conducto, i para valorizarla consideraremos separadamente los elementos de que se compone. En efecto, la entrada del agua en el sifon produce una disminucion de fuerza viva igual a $\left(\frac{W}{m}\right)^2 - V^2$, i, por consiguiente el trabajo será $\frac{1}{2}\left(\frac{W}{m}\right)^2 - \frac{V^2}{2}$. Tan pronto como el líquido salva la boca, la contraccion desaparece i la veloci-

dad disminuye su valor de $\frac{W}{m}$ a W; la pequeña pérdida de fuerza viva que aqui se produce queda considerada en el valor del coeficiente de contraccion m que ha sido determinado por esperiencias directas con tubos adicionales i para el cual se ha encontrado el valor m=0,80. En seguida debemos tomar en cuenta los rozamientos, los cuales demandarán un trabajo que será directamente proporcional a g, a la lonjitud L del sifon i a su perímetro medio C, e inversamente proporcional a la seccion media w. En cuanto a la parte que corresponde a la velocidad, se considera que ésta influye proporcionalmente a la espresion $(a v + B v^2)$ en la cual v es la velocidad media en el sifon i a i B son coeficientes que se han deducido de esperiencias prácticas i cuyos valores han sido fijados en: a=0,0000173 i B=0.0003482. En consecuencia, el trabajo debido a los rozamientos será espresado por:

$$T_r = g\,L\,\frac{C}{\omega}\,(av + Bv^2)$$

En cuanto a la salida del agua del sifon, se hace que ésta se verifique tranquilamente, por lo que no habrá un consumo de fuerza viva apreciable. Por consiguiente, el trabajo total que consume la unidad de masa al atravesar el sifón será:

$$gh = \frac{1}{2}\left(\frac{W}{m}\right)^2 - \frac{1}{2}V^2 + g\,L\,\frac{C}{\omega}\,(a\,v + B\,v^2)$$

Por otra parte, observando la figura 11 se puede establecer que.

$$O'V = OW = \omega\,v$$

$$V = \frac{\omega}{O'}\,v;\quad W = \frac{\omega}{O}\,v$$

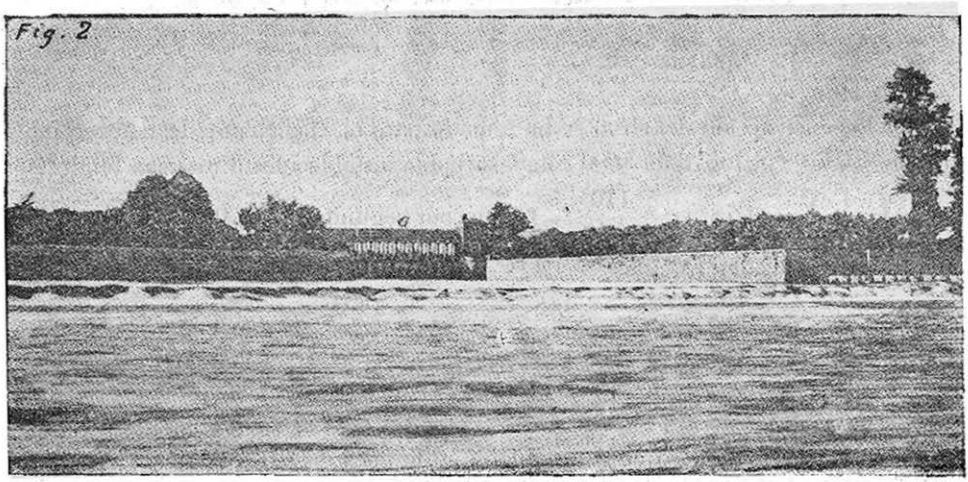
Introduciendo estos valores de V i de W en la ecuacion anterior, queda:

$$h = \frac{v^2}{2g}\left\{\frac{1}{m^2}\left[\frac{\omega}{O}\right]^2 - \left[\frac{\omega}{O'}\right]^2 + 2g\,L\,\frac{C}{\omega}\left[B + \frac{a}{v}\right]\right\}$$

Ademas, el valor de $\frac{a}{v}$ es mui pequeño, por lo que se le desprecia, i obtendremos como espresion jeneral de la diferencia de nivel de la superficie líquida al esterior de ambas bocas del sifon, la siguiente igualdad:

$$h = \frac{v^2}{2g}\left\{\frac{1}{m^2}\left[\frac{\omega}{O}\right]^2 - \left[\frac{\omega}{O'}\right]^2 + 2g\,B\,L\,\frac{C}{\omega}\right\}$$

Poncelet ha establecido que g B=0,0035 e introduciendo este valor numérico i los ya establecidos para a, B i m en la ecuacion anterior, se tiene;



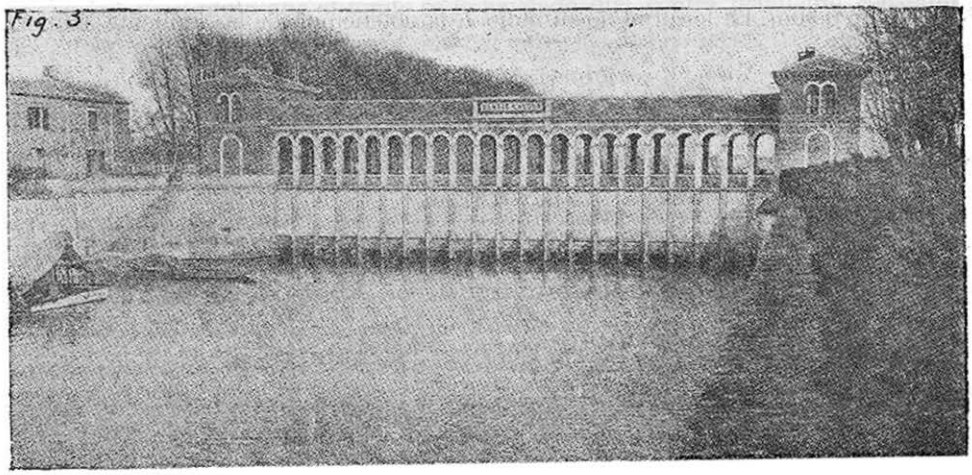
$$h = \frac{v^2}{2g}\left\{1{,}5625\left[\frac{\omega}{O}\right]^2 - \left[\frac{\omega}{O'}\right]^2 + 0{,}007\,L\frac{C}{\omega}\right\} \cdots (A)$$

que es la espresion que buscábamos.

Aplicaremos ahora estas consideraciones al sifon por el cual pasa el Canal Cavour bajo la línea férrea. Segun lo anteriormente establecido i observando la figura 11, se puede escribir:

$$O' = 26{,}00 \times 3{,}50 = 91\,m^2$$

$$O = \omega = 3\left(8{,}00 \times 2{,}90 + \frac{2}{3} \times 8{,}00 \times 0{,}80\right) = 82{,}40\,m^2$$



$$C = 3 \{ 8{,}00 + 2 \times 2{,}90 + 10{,}40 \text{ (arc } 45^\circ 30') \} = 66{,}15\text{m.}$$

$$L = 15{,}00 \text{ m.}$$

Por la construccion del sifon se ha tomado para el coeficiente de contraccion el valor $m = 0{,}75$ en lugar de 0,80 como se habia establecido. Entónces tendremos: $\frac{1}{m^2} = \left(\frac{1}{0{,}75}\right)^2 = 1{,}78$; $v = \frac{110}{82{,}40} = 1{,}34$m. por segundo; $\frac{v^2}{2g} = 0{,}09$, lo que introducido en la ecuaccion (A), da:

$$h = 0{,}09 \left\{ 1{,}78 - \left(\frac{82{,}40}{91}\right)^2 + 0{,}007 \times 15{,}00 \times \frac{66{,}15}{82{,}40} \right\} = 0{,}094\text{m.}$$

Como se ve, el peralte que se producirá en la boca del sifon será de 9 centímetros mas o ménos, lo que naturalmente no tiene importancia.

Sifon bajo el rio Elvo.—El pasaje del canal bajo los rios Elvo, Sesia, Agogna i Terdoppio se efectúa por medio de sifones compuestos de varios conductos, cuyo número depende de la cantidad de agua que el canal debe conducir en el punto en que están ubicados. Estos conductos tienen su seccion normal al eje de forma ovalada; ésta está constituida por dos semi-óvalos, los cuales en el caso en que se quiera obtener mayor seccion se alejan paralelamente a su eje mayor i se unen sus estremos por líneas rectas. Los dos semi-óvalos no son iguales; tienen el eje mayor de la misma lonjitud pero los radios de los arcos que forman sus perímetros son diferentes, como se puede observar en la figura 12. Como lonjitud del eje mayor se ha fijado la de 5,00m., i para el eje menor se ha tomado 2,30m. Las características del semi-óvalo superior son las siguientes: la lonjitud de la cuerda EF se ha tomado de 4,00m. i su flecha es de 0,30m. La lonjitud de su radio R la obtenemos de la siguiente manera,

$$EG^2 = (2R - CG)\,CG$$

$$4{,}00 = (2R - 0{,}30)\,0{,}30$$

$$R = 6{,}817\text{m.}$$

Por otra parte: $OG = 6{,}817 - 0{,}30 = 6{,}517$m

$$\text{tanj. } \alpha = \frac{2}{6{,}517} = \text{tg } 17^\circ 4'$$

$$OS = 6{,}817 - 1{,}15 = 5{,}667\text{m.}$$

$$SH = OS \text{ tg } \alpha = 1.739$$

$$OH = \sqrt{OS^2 + SH^2} = 5{,}928m$$

$$FH = R - OH = 0{,}889m.$$

El radio del arco que pasa por B se ha tomado igual a 2,00m. i su centro I se encontrará sobre S B.

$$IH = 2{,}00 - (SB - SH) = 1{,}239m.$$

Llamemos r el radio del arco F L, entónces $IM = 2{,}00 - r$. En el triángulo M H I se tiene:

$$IM^2 = IH^2 + MH^2 + 2\,HM \times IH \cos(90 - \alpha)$$

de donde: $r = 0{,}687m$.

Para tener la lonjitud del perímetro se necesita conocer todavía el valor de los ángulos M I H i F M L, que segun la figura, son respectivamente de 8°28′ i 64°28′.

Para tener el área de este semi-óvalo se necesitan los siguientes elementos: cuerda $FL = 0{,}733m$; flecha de $FL = 0{,}106m$; $LP = IL \operatorname{sen} 8°28' = 0{,}294m$; $FN = SC - GC - LP = 0{,}556m.$; $PB = 2{,}00 - 2{,}00 \times \cos LIP = 0{,}022m$.

Procediendo análogamente para el semi-óvalo inferior, se obtiene que el área total del óvalo es de $9{,}948m^2$ i su perímetro es de 12,57m.

El sifon del Elvo consta de cinco conductos cuya boca de salida tiene la seccion indicada en la figura 12, en tanto que en su boca de entrada los dos semi-óvalos se han alejado de 0,50m., i por consiguiente, la altura del conducto alcanza en esta parte 2,80m. en vez de 2,30m. que tiene en su otra estremidad, teniendo así el conjunto una forma tronco cónica. En la construccion del sifon se ha dejado horizontal su arista superior, en tanto que al fondo se le ha dado una contra pendiente constante hasta salvar los 0.50m. de diferencia que hai entre las dos bocas.

La lonjitud total del sifon es de 218 m, los conductos reposan sobre un conglomerado artificial de un metro de espesor sostenido lateralmente por un tablestacado de tablones de 3 m de lonjitud i de 0,10 m de espesor. En contacto con el tablestacado en todo el contorno, el relleno se prolonga 0,75 m mas abajo que el resto, formando un macizo de seccion trapecial cuya base inferior tiene un metro de lonjitud i la superior 2,50 m. Los conductos son de albañilería de ladrillo; en su parte superior la pared tiene un espesor de 0,69 m, en la parte inferior 0,40 m, los arcos laterales 0,54 m, siendo el espesor de la pared que separa un conducto del vecino de 0,70 m. Sobre los conductos va un relleno de conglomerado, el cual va cubierto con un pavimento de trozos de madera de 0,15 por 0,10 m de seccion. Sobre éste va un tablonado de roble alquitranado de 0,08 m de espesor, sólidamente unido entre sí i destinado a formar el fondo del rio Elvo en esta parte; su ancho total es de 32,80 m.

Consideraremos ahora la parte teórica del sifon. Determinemos primero el valor de h considerado en la figura 11, valor que ha sido determinado en la ecuacion (A). Se sabe que la seccion del sifon en su boca de salida es de 9,948 m² ; la seccion en la boca de entrada ha sido aumentada de $5{,}00 \times 0{,}50 = 2{,}50$ m² . En cuanto al perímetro se tiene que el mas pequeño, que es de 12,57 m, ha sido aumentado de $0{,}50 \times 2$ en la boca de entrada. Constando el sifon de 5 elementos iguales, tendremos que la seccion total en el comienzo del tubo, es decir en la seccion A B de la figura 13, será: $O = 5\ (9{,}948 + 2{,}50) = 62{,}24$ m² ; la seccion media será $\omega = 5\ (9{,}948 + 1{,}25) = 55{,}99$ m² , i el perímetro de esta seccion media tiene por lonjitud: $C = 5\ (12{,}57 + 0{,}50) = 65{,}35$ m. Se necesita determinar ademas la velocidad media v que entra en la fórmula. Para esto se supone que por el sifon van a pasar 100 metros cúbicos por segundo, a pesar de que de los 100 metros cúbicos que conducia el canal en un principio, se le han estraido ya 20 metros cúbicos para la irrigacion del Vercellese, el canal Casalese i otros, sin tomar en cuenta las pérdidas por evaporacion i filtracion. Se tiene entónces que la velocidad media es $v = \frac{100}{55{,}99} = 1{,}786$ metros por segundo i por consiguiente, $\frac{v^2}{2g} = 0{,}163$ Por último tenemos para la seccion O′ fuera del conducto un ancho de 28 m i una altura de agua de 5,21 m. Introduciendo todos estos valores en la ecuacion (A) se obtiene:

$$h = 0{,}163 \left\{ 1{,}5625 \left[\frac{55{,}99}{62{,}24}\right]^2 - \left[\frac{55{,}99}{28 \times 5{,}21}\right]^2 + 0{,}007 \times 218 \frac{65{,}35}{55{,}99} \right\} = 0{,}47 \text{ m}$$

que sera la diferencia de nivel de la superficie del agua a ámbos lados del sifon.

A la salida del sifon se ha dado al agua una profundidad de 2,50 m i se debe determinar ahora las dimensiones del canal, tomando en cuenta que su gasto es solo de 100 metros cúbicos por segundo. Siendo las paredes verticales i dando al canal un ancho de 27 m que es mas o ménos la distancia a que estan los muros en ala con que termina el sifon, se tiene como anteriormente:

$$W = 27{,}00 \times 2{,}50 = 67{,}50 \text{ m}^2$$

$$\varphi = 27{,}00 + 2 \times 2{,}50 = 32{,}00 \text{ m}$$

$$v = \frac{100}{67{,}50} = 1{,}48 \text{ m por segundo}$$

$$i = \frac{a\,v + B\,v^2}{R} = 0{,}00040.$$

La desembocadura del sifon está a 150 metros del kilómetro 40 i, por consiguiente, adoptando la pendiente de 0,00040 se podrá obtener un peralte de $\frac{2}{3} \times 0{,}40 \times 0{,}15 = 0{,}04$ m i, en consecuencia, la altura de agua en este punto será de

2,54 m. Para el kilómetro 41 se han adoptado las paredes del canal a 45 grados i la pendiente se ha conservado de 0,00040. En estas condiciones el ancho del fondo mas conveniente será de 23,70 m como se comprueba con las siguientes relaciones:

$$W=(23,70+2,54)\ 254=66,649\ m^2$$

$$\varphi=23,70+2,54\ \sqrt{2}\times 2=30,88\ m$$

$$Ri=\frac{66,649}{30,88}\ 0,00040=0,0008633$$

a lo que corresponde v=1,504 m por segundo; Q=100,24 m³ por segundo;

Análogamente, se tiene para los siguientes kilómetros:

Kilómetro 42.—Altura de agua disponible al comenzar este kilómetro: $2,54+\frac{2}{3}\ 0,40=2,80$ m.

Ancho adoptado para el fondo del canal: 21,40.

Pendiente de su fondo: i=0,00036. Entónces se tiene:

$$W=67,76\ m^2\ ;\ \varphi=29,32\ m;\ Ri=0,0008326;$$
$$v=1,475\ m\ por\ segundo;\ Q=100,01\ m^3\ por\ segundo.$$

Kilómetro 43.—Altura de agua disponible al comenzar este kilómetro: $2,80+\frac{2}{3}\ 0,36=3,04$ m.

Ancho adoptado para el fondo del canal: 20,76 m,

Pendiente de su fondo: i=0,00030.

$$W=72,35\ m^2\ ;\ \varphi=29,36\ m;\ Ri=0,0007392;$$
$$v=1,387\ m\ por\ segundo;\ Q=100,35\ m^3\ por\ segundo.$$

Kilómetro 44.—Altura de agua disponible al comenzar este kilómetro: $3,04+\frac{2}{3}\ 0,30=3,24$ m.

Ancho adoptado para el fondo del canal: 20 m.

Pendiente de su fondo: i=0,00025.

$$W=76,093\ m^2\ ;\ \varphi=29,24\ m;\ Ri=0,0006506;$$
$$v=1,301\ m\ por\ segundo;\ Q=100,019\ m^3\ por\ segundo.$$

La figura 14 resume gráficamente en un plano vertical estos resultados i se tiene en ella que la línea A B C D E F será la superficie del líquido peraltado, en tanto que P R representa el fondo del canal. La figura 15 por su parte representa con la línea quebrada A B C..... G H I la forma del fondo del canal (en proyeccion horizontal) obtenida por el cálculo, línea que, por idénticas consideraciones a las estable-

cidas en la figura 9, ha sido reemplazada por la línea recta J I, de manera que el punto J diste 12,50 m del eje del canal, es decir, se ha dado en esta parte al fondo del canal un ancho de 25,00 m.

Desagüe en el Elvo.—Antes de entrar el canal en el sifon del Elvo, se ha dispuesto un desagüe que permite vaciar el canal en dicho rio i tambien surtir otros canales que toman el agua en la orilla derecha del Elvo, cuando el caudal de este disminuye tanto que no los puede alimentar convenientemente. La construccion de la boca de este desagüe es análoga a las ya descritas: consta de seis luces de 1,35 m de ancho cada una i de 2,50 m de altura, alcanzando el canal de desagüe una lonjitud de 1,200 metros ántes de entrar en el Elvo.

Acueducto sobre el rio Cervo.—Este tiene una lonjitud total de 2872,20 metros. La pendiente de su fondo es de 0,00036, siendo sus paredes muros que tienen interiormente una inclinacion de 1 por 10. El fondo del canal tiene en esta parte 20,00 m de ancho, a lo que corresponde una altura de agua de 3,23 m, altura que es menor en 0,04 m a la que tiene el canal ántes de entrar en el acueducto (3,27 m) i, por consiguiente no existe el temor de que se produzca un peralte sensible.

Segun los números establecidos se tiene que:

$$W=65{,}63 \text{ m}^2;\ \varphi=26{,}46 \text{ m};\ Ri=0{,}000893;$$
$$v=1{,}53 \text{ m por segundo};\ Q=100{,}419 \text{ m}^3 \text{ por segundo.}$$

Los detalles de construccion del puente, de los canales de aceeso, del correspondiente desagüe i de las defensas, son análogos a los del rio Dora Baltea, por lo cual me limitaré a indicar las principales características en el cuadro que va al final de esta relacion, en el cual estan recopilados estos datos para los cuatro acueductos que posee el canal, esto es, los correspondientes a los rios Dora i Cervo i a los torrentes Roasonda i Marchiazza.

Sifon bajo el rio Sesia.—Efectuaremos el cálculo de este sifon de idéntica manera que lo hemos hecho para el sifon del Elvo. Este consta tambien de cinco conductos, cuya lonjitud es de 250 m; el fondo tiene una contra-pendiente total de 0,10 m, por lo que la boca de entrada tiene una altura de 2,40 m en vez de 2,30 m que tiene la de salida. Su aumento de seccion será de $5{,}00 \times 0{,}10 = 0{,}50$ m² i el aumento de perímetro será de 0,20 m.

Para aplicar la ecuacion (A) que da el valor de h, se necesita establecer los siguientes valores:

Seccion del sifon en su boca de entrada: $O=5\ (9{,}948+0{,}50)=52{,}24$ m²
Seccion media del sifon: $\omega=5\ (9{,}948+0{,}25)=50{,}99$ m²

Velocidad media: $v=\frac{100}{50{,}99}=1{,}961$ m por segundo

Perímetro medio: $C=5\ (12{,}57+0{,}10)=63{,}35$ m.

El fondo de la boca del sifon está a 0,62 m mas bajo que el fondo del canal (figura 16) i, por consiguiente, la altura de agua en esta parte será de $3,27+0,62=3,89$ m i su ancho es de 28,00 m, lo que hace que su seccion sea: $O'=108,92$ m². Introtroduciendo estos valores en la ecuacion (A), se obtiene:

$$h=0,68 \text{ m.}$$

De aquí deducimos que la altura de agua a la salida será de $3,27-0,68=2,59$ m.

Ahora debemos considerar los elementos del canal despues del sifon. Como se debe tener que el gasto del canal sea de 100 metros cúbicos por segundo, su ancho se toma de 28,00 m, con paredes verticales i altura de agua de 2,59 m. Se debe determinar entónces la pendiente para lo cual se tiene:

$$W=28,00\times 2,59=72,52 \text{ m}^2$$
$$\varphi=28,00+2\times 2,59=33,18 \text{ m}$$

$$v=\frac{100}{72,52}=1,38 \text{ m por segundo}$$

$$a\,v+B\,v^2=0,0007296$$

$$i=\frac{a\,v+B\,v^2}{R}=0,00034.$$

Ahora se debe trasformar poco a poco esta seccion i esta pendiente del canal hasta obtener que estos elementos sean iguales a los que tiene el canal ántes de entrar en el sifon, esto es, paredes inclinadas de 45 grados, ancho del fondo igual a 20,00 m, una altura de agua de 3,27 m i la pendiente de su fondo igual a 0,00025.

La desembocadura del sifon está a 500 m del kilómetro 56 (fig. 17) i en las condiciones en que ha quedado establecido el canal se podrá producir en el comienzo del kilómetro 57 un peralte igual a $\frac{2}{3}\times\frac{1}{2}\times 0,34=0,11$ m i, por consiguiente, la altura de agua será de $2,59+0,11=2,70$ m. Conservando al kilómetro 57 la pendiente de 0,00034, se comprueba análogamente a los casos anteriores que el ancho del fondo del canal debe ser de 23,50 m. Al comenzar el kilómetro 58 la profundidad de agua será $2,70+\frac{2}{3}0,34=2,92$ m, i dando a este kilómetro la pendiente de 0,00030, el ancho de su fondo será 22,20 m. El kilómetro 59 se encuentra con una profundidad de agua de $2,92+\frac{2}{3}0,30=3,12$ m, al cual se da una pendiente de 0,00027, en cuyo caso el fondo alcanzará un ancho de 21,08 m. Este kilómetro termina con una altura de agua de $3,12+\frac{2}{3}0,27=3,30$ m; por consiguiente, se tiene ya la altura necesaria para dar al canal la seccion i la pendiente establecidas.

Análogamente al caso del sifon del Elvo, las figuras 17 i 18 contienen los resultados de estos cálculos. En la fig. 18 se ha reemplazado tambien la línea quebrada ABCDEFG por la recta HG, de manera que en el punto H el canal tiene 25,00 m de ancho.

En cuanto a los detalles de construccion son en un todo similares a los del sifon bajo el Elvo, sólo con diferencias de dimensiones, por lo que, en homenaje a la brevedad, los hemos resumido en un cuadro análogo al relativo a los acueductos.

Lo mismo se puede decir de las obras de defensa i de desagüe. Este último tiene su boca compuesta de seis aberturas de 1,38 m de ancho cada una i una altura de 2,40 m. La lonjitud del canal de desagüe es de 1 360 m. sus paredes están inclinadas a 45 grados i su fondo alcanza un ancho de 8,00 m.

A partir del kilómetro 59 el canal toma la seccion establecida hasta llegar a la Roggia Busca en donde cede 45 metros cúbicos para la irrigacion del Novarese, de la Lomellina i otros. Desde esta parte, para servir un gasto de 55 metros cúbicos por segundo, se le han dado las siguientes dimensiones: ancho del fondo, 12,50 m; altura de agua, 3,00 m; paredes inclinadas de 45 grados, i pendiente del fondo 0,00025. En estas condiciones el líquido toma una velocidad de 1,108 m por segundo.

Sifon bajo el Agogna.—Pasado el kilómetro 70 el trazado del canal encuentra el Agogna, bajo el cual pasa tambien por un sifon de mucho menor importancia que los ya tratados. El fondo del canal llega a esta parte a la profundidad necesaria para no exijir ni un descenso brusco como en los casos anteriores ni un aumento de la pendiente. Este sifon consta de tres conductos, cuya seccion, como consecuencia de lo dicho anteriormente, queda constante en toda la lonjitud e igual a la representada en la figura 12.

Determinaremos primero el valor de h. En este caso se tiene que el ancho del canal a entrada del sifon es de 17,00 m i su lonjitud total es de 50,00 m. Ademas se pueden establecer las siguientes relaciones: $O'=17,00\times3=51$ m^2 ; $O=w=3\times9,948=29,844$ m^2 ; $C=3\times12,57=37,71$ m; $v=\frac{Q}{w}$ 1,84 m por segundo; $\frac{v^2}{2g}=0,173$. Introduciendo estos valores en la ecuacion (A), se obtiene:

$$h=0,173\left\{1,5625-\left(\frac{29,844}{51}\right)^2+0,007\times50\frac{37,71}{29,844}\right\}=0,30 \text{ m.}$$

En consecuencia, la altura de agua a la salida del sifon será de 3,00—0,30=2,70 m. Se debe pues, hacer tambien la transformacion hasta obtener una altura de agua de 3,00 m con pendiente de 0,00025 i ancho de fondo de 12,50 m. Con la profundidad de agua de 2,70 m se ha tomado para la pendiente i=0,00030 i paredes a 45 grados; así se tiene que el ancho del fondo será de 13,35 m i la velocidad del líquido tendrá por valor v=1,268 m. El término del sifon se encuentra a 250 m del kilómetro 71 i,

conservando el canal en estas condiciones hasta el comienzo del kilómetro 73, se tendrá que en este punto se podrá producir un peralte de $\frac{2}{3} \times 0{,}30 \times 1{,}25 = 0{,}25$ m, i la profundidad del agua será de $2{,}70 + 0{,}25 = 2{,}95$ m. Dando entónces al canal la pendiente de 0,00025, el ancho del fondo será de 12,70 m i la velocidad tendrá por valor $v = 1{,}193$ m por segundo. En estas condiciones se ve que en 300 metros se puede conseguir un peralte de $\frac{2}{3} \times 0{,}3 \times 0{,}25 = 0{,}05$ m i se tiene así la profundidad normal de 3 m. Las figuras 19 i 20 condensan estos resultados. En la figura 20 la línea quebrada ABCD se ha reemplazado por la recta ED en la cual el punto E dista 7,50 m del eje del canal.

Sifon bajo el Terdoppio.—La última obra de arte importante del Canal Cavour ántes de su término en el rio Ticino es el sifon bajo el Terdoppio. Por las estracciones que el canal ha sufrido i tomando en cuenta las pérdidas por evaporacion e infiltracion, se supone que el sifon debe ser capaz de conducir solamente 35 metros cúbicos por segundo. Las condiciones en que se presentaba el problema obligaron tambien a quebrar el perfil del fondo del canal como lo indica la figura 21, bajándolo de su primitivo nivel de 1,164 m i dándole despues una contrapendiente de 0,05 m. La lonjitud del sifon es de 42 metros i consta de dos conductos cuya seccion obedece a las bases ya establecidas.

Determinaremos ahora el valor de h, para lo cual tenemos que: $O' = 17{,}00 \times 4{,}164 = 70{,}784$ m²; $O = 2 \times 9{,}948 + 2\ (5{,}00 \times 0{,}05) = 20{,}396$ m²; $w = 2 \times 9{,}948 + \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot (5{,}00 \times 0{,}05) = 20{,}146$ m²; $C = 2 \times 12{,}57 + 2\ (2 \times 0{,}05) = 25{,}34$ m; $v = \frac{35}{20{,}146} = 1{,}737$ m por segundo; $\frac{v^2}{2g} = 0{,}154$. Introduciendo estos valores en la ecuacion (A) se obtiene:

$$h = 0{,}154 \left\{ 1{,}5625 \left(\frac{20{,}146}{20{,}396} \right)^2 - \left(\frac{20{,}396}{70{,}784} \right)^2 + 0{,}007 \times 52{,}00 \frac{25{,}34}{20{,}146} \right\} = 0{,}28\text{m}.$$

En consecuencia, la altura de agua en el canal despues del sifon será de 3,00—0,28=2,72m., altura que se debe tratar de elevar a 3,00m. Dando al fondo una pendiente de 0,00025, para tener un gasto de 35 metros cúbicos por segundo, será necesario que dicho fondo tenga un ancho de 8,89m., como se comprueba con las siguientes espresiones: $W = (8{,}89 + 2{,}72)\ 2{,}72 = 31{,}5792$m²; $\varphi = 8{,}89 + 2 \times 2{,}72 \sqrt{2} = 16{,}59$m²; $Ri = 0{,}000476$; $v = 1{,}108$m por segundo; $Q = 34{,}99$ metros cúbicos por segundo.

La desembocadura del sifon está a 960m. del kilómetro 75, punto en el cual se puede obtener un peralte de $\frac{2}{3} \times 0{,}00025 \times 960 = 0{,}16$m., alcanzándose así una altura

de agua de 2,88m. Con esta altura i la misma pendiente anterior el ancho del fondo será de 8,00m., puesto que en tal caso v=1,119m. por segundo i Q=35,063 metros cúbicos por segundo. Así se puede obtener en 700 metros mas o ménos el peralte necesario para alcanzar los 3,00m. de altura de agua, desde donde se da al fondo un ancho de 7.50m, el cual se conserva hasta el término del canal, puesto que se tendrá que v=1,129m. por segundo i Q=35,56 metros cúbicos por segundo.

Las figuras 22 i 23 resumen estos resultados. En la figura 23 la línea teórica ABCDE ha sido reemplazada por la FGE de manera que en F el canal tiene 12m. de ancho i la línea GE es la prolongacion del fondo normal del canal, es decir, en GE el ancho del fondo tambien es de 7,50m.

Se puede observar que, una vez salida el agua del sifon del Terdoppio, su altura en el canal será siempre menor que la calculada, aun en el caso en que escurra por el canal la cantidad máximaprevista, debido a que al desembocar el canal en el Ticino, el escurrimiento es más fácil provocará una mayor velocidad en todo el trozo del canal.

OBRAS SECUNDARIAS

Hasta ahora he considerado solamente la parte teórica i algunos detalles de construccion de las partes importantes de la obra. Hai, ademas, una cantidad de pequeños elementos cuya consideracion por separado habria sido excesivamente larga, como ser por ejemplo, los puentes de los caminos què atraviesan el canal i los pequeños puentes canales i sifones de los cursos de agua, ya sean naturales ya de otros canales que no conviene que entren en él. Consideraremos en conjunto todas estas pequeñas obras de arte, tomando por separado cada uno de los trozos del canal en que el gasto permanece constante. Así tenemos:

1.° Desde su boca en el Pó hasta el Elvo.—Gasto, 110 metros cúbicos por segundo; lonjitud, 39,400 kilómetros; 144 obras de arte.

2.° Desde el Elvo hasta la Roggia Busca.—Gasto, 100 metros cúbicos por segundo; lonjitud, 23,150 kilómetros; 85 obras de arte.

3.° Desde la Roggia Busca hasta el Terdoppio.—Gasto, 55 metros cúbicos por segundo; lonjitud, 11,220 kilómetros; 70 obras de arte.

4.° Desde el Terdoppio hasta el término del canal.—Gasto, 35 metros cúbicos por segundo; lonjitud; 8,460 kilómetros; 16 obras de arte.

Esto da un total de 316 obras de arte. A continuacion apuntaré algunos datos sobre estas pequeñas obras.

Puentes de caminos.—Las dimensiones de estos puentes varian segun esten colocados en uno o en otro de los trozos del canal en que su caudal permanece constante, puesto que la seccion del canal tambien varia.

En la parte en que el canal alcanza su máximo de 110 metros cúbicos por segundo, estos puentes jeneralmente están constituidos por tres o mas arcos cuya cuerda tiene una lonjitud de 7,97m. i su flecha varia entre 0,80m. i 1,10m.; el espesor de

las bóvedas es constante e igual a 0,54m.; la altura de los machones es de 3,65m., su espesor en la base es de 1,40, teniendo sus caras una inclinacion de 1 por 20. Los estribos tienen en su base un espesor de 2,40m.

Los puentes del segundo trozo son similares a los anteriores, con la diferencia que la altura de los machones es sólo de 3,40m. En el tercer trozo los puentes son jeneralmente de dos arcadas, cuya cuerda es de 7,95m. i cuya flecha varia entre 1,00m. i 1.21m., teniendo las bóvedas un espesor de 0,52m.; la altura de los machones es de 3,32m. i su espesor en la base es de 1,00.; los estribos tienen en la base un espesor de 2,40m, En el último trozo, en que la seccion del canal es mínima, los puentes son jeneralmente de un arco de 10,55m. de luz i de 1,00m. a 1,20m. de flecha; las bóvedas tienen 0,54m. de espesor. El nacimiento del arco en los estribos está a 3,35 del fondo del canal.

Sifones.—Estos estan construidos de manera a dejar completamente libre la seccion del canal. Sus dimensiones varian con las cantidades de agua que están destinadas a conducir. Constan de dos pozos verticales i de una galería cubierta por una bobedilla cuyo espesor en la clave varía entre 0,40m. i 0,54. Su lonjitud es de 28,00m. para el primer trozo i de 28,40m. para el segundo.

Casas para cuidadores.—Ademas de la casa que hemos mencionado en las obras de toma para el jefe de cuidadores, se encuentran repartidas a lo largo del canal otras 18 casas para cuidadores. Estas son de dos pisos con dos piezas en cada piso, separadas por la escala, siendo las dimensiones de las del piso bajo de 4,97m por 3,73m. i las del piso superior de 5,25m. por 3,88. Las dimensiones esteriores del edificio son de 12,60m. por 6,62m. Hai, ademas, un patio i un galpon que tienen ámbos la misma lonjitud del edificio, es decir 12,60m., i un ancho respectivamente de 10,00m. i 6,62m.

La construccion de las obras que he descrito ha costado mas o ménos 44 millones 375,000 francos. A esto se deben agregar los canales secundarios que sirven para repartir las aguas sobre las 120,000 hectáreas que riega el Canal Cavour, lo que hace que el precio total de estas obras de irrigacion alcance a sesenta millones de francos.

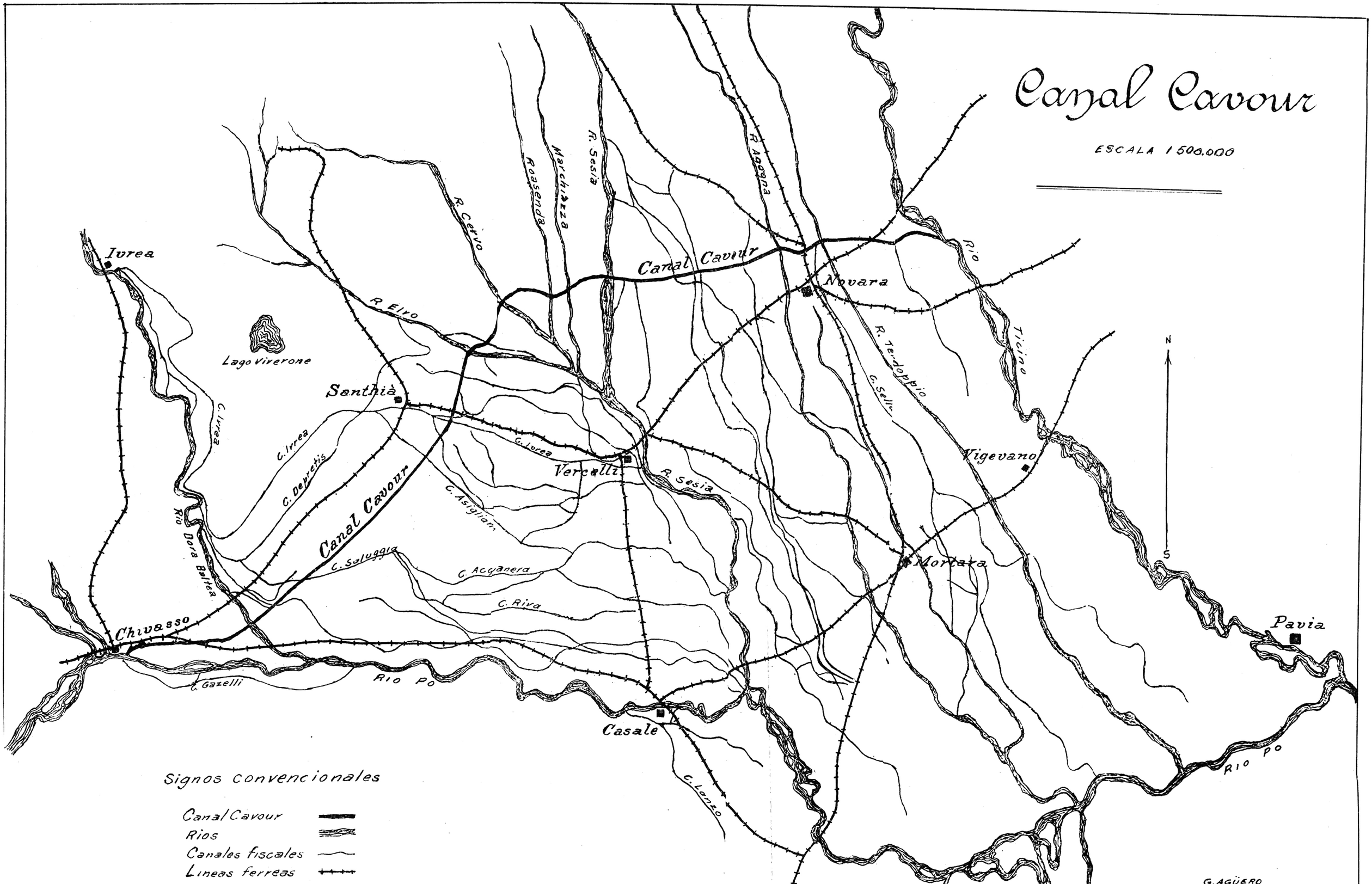
Turin, Noviembre de 1911.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SIFONES DEL CANAL CAVOUR

INDICACIONES	CURSOS DE AGUA			
	Elvo	Sesia	Agogna	Terdoppio
Distancia progresiva al punto medio del sifon (metros)	39 509	55 273	70 601	74 012
Lonjitud del sifon (m)	218	250	50	42
Ancho total de las obras del sifon (m)	32,80	32,80	22,10	16,40
Número de conductos	5	5	3	2
Espesor de la pared superior del sifon (m)	0,69	0,52	0,52	0,52
Altura de agua del canal ántes de entrar en el sifon (m)	3,40	3,27	3,20	3,00
Altura de agua del canal a la salida del sifon (m)	2,50	2,60	2,70	2,80
Profundidad de las fundaciones bajo el fondo del curso de agua atravesado	8,50	7,45	6,00	5,20

CARACTERÍSTICAS DE LOS PUENTES CANALES DEL CANAL CAVOUR

INDICACIONES	CURSOS DE AGUA			
	Dora	Cervo	Roasenda	Marchiazza
Distancia progresiva al punto medio del puente canal (metros)	10 833	44 875	40 865	51 287
Lonjitud del puente canal	192,60	150,20	52,20	31,20
Lonjitud de los canales de acceso — superior	227,30	204	80	70
Lonjitud de los canales de acceso — inferior	1 874,60	2 518	574	32
Número de arcos	9	7	3	3
Luz de los arcos (m)	16	15	9	4,80
Flecha — absoluta (m)	1,60	2,66	1,60	0,50
Flecha — relativa a la luz	1/10	1/6	1/6	1/9
Altura de agua (m)	3,50	3,20	3,20	3,20
Espesor de los arcos en la clave (m)	0,77	0,70	0,65	0,65
Altura del nacimiento de los arcos sobre el zampeado (m)	3,80	3,00	2,00	1,24
Profundidad de las fundaciones bajo el fondo del curso de agua atravesado (m)	3,80	2,50	3,75	4,40


Canal Cavour
ESCALA 1:500.000
Ivrea
Lago Viverone
Santhià
Vercelli
Novara
Vigevano
Mortara
Pavia
Chivasso
Casale
Canal Cavour
Canal Cavour
R. Cervo
Roasenda
Marchiazza
R. Sesia
R. Agogna
R. Elvo
R. Terdoppio
C. Sella
Rio Ticino
C. Ivrea
C. Depretis
C. Asigliano
C. Saluggia
C. Acquanera
C. Riva
C. Gazelli
C. Lanzo
Rio Dora Baltea
Rio Po
Rio Po
N
S
Signos convencionales
Canal Cavour
Rios
Canales fiscales
Lineas ferreas
G. AGÜERO

F. PAYÁ

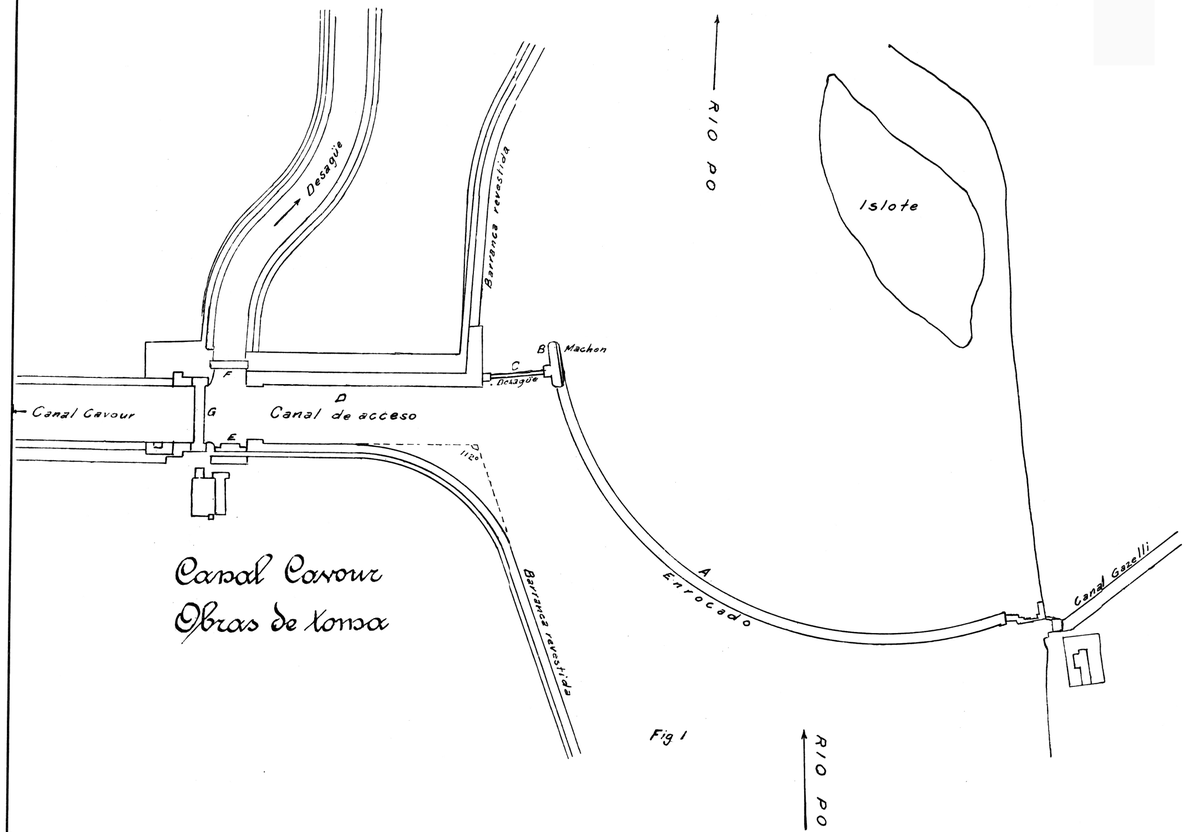


Fig 1

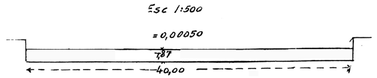


Fig 4

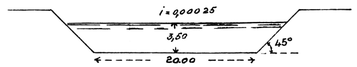


Fig 5

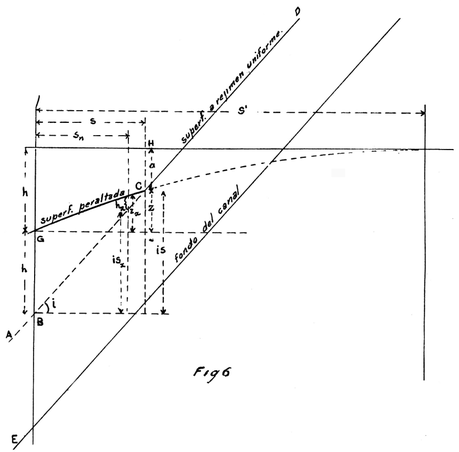


Fig 6

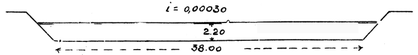


Fig 7

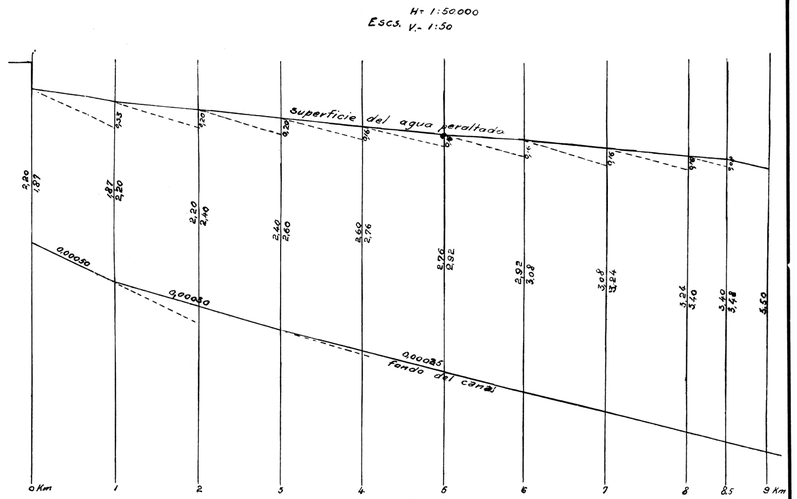


Fig 8

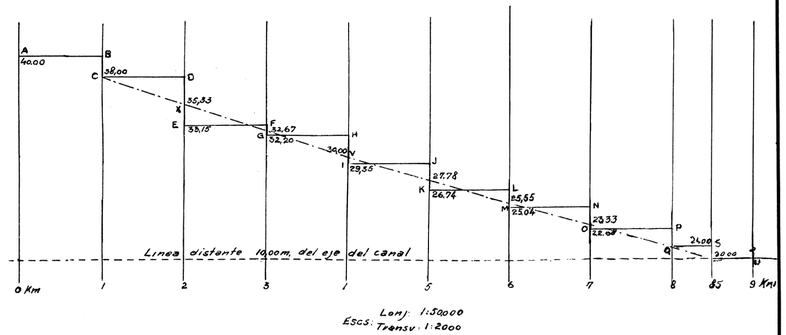


Fig 9

Anales del Instituto. - Noviembre 1911.

Canal Cavour

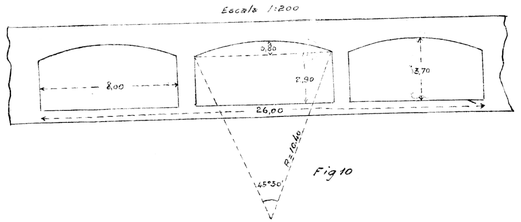


Fig 10

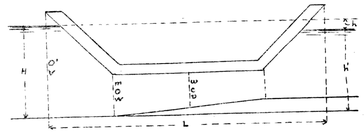


Fig 11

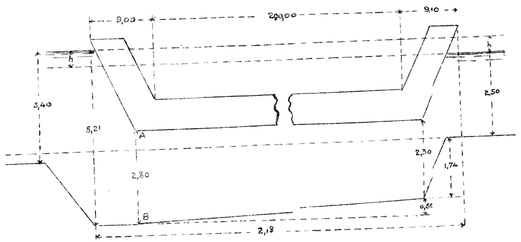


Fig 13

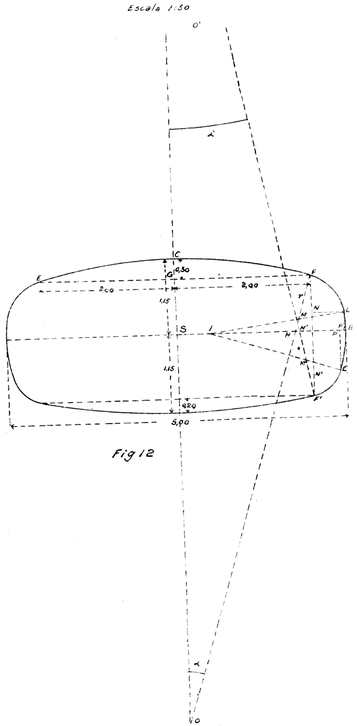


Fig 12

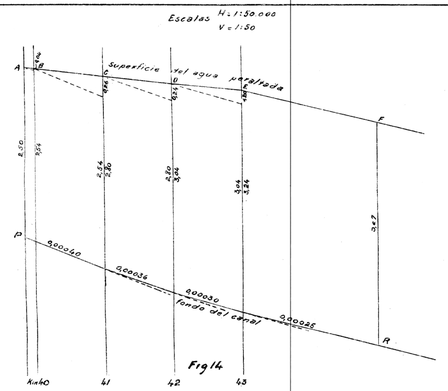


Fig 14

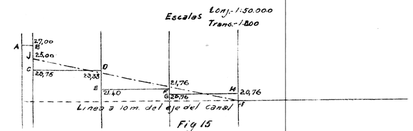


Fig 15

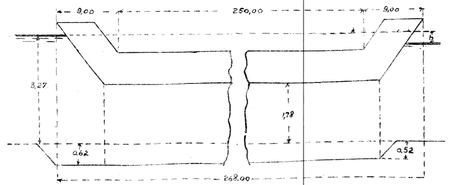


Fig 16

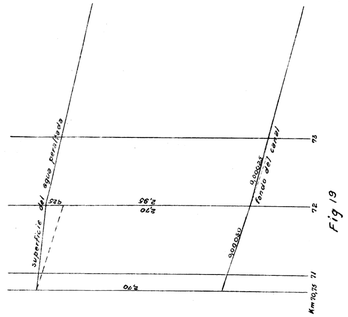


Fig 19

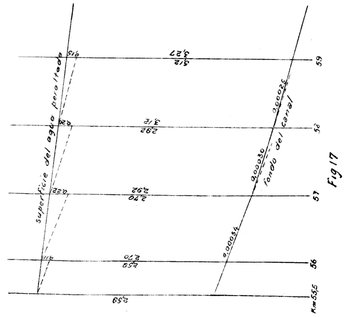


Fig 17

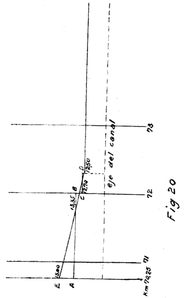


Fig 20

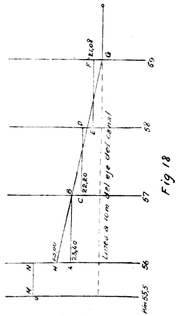


Fig 18

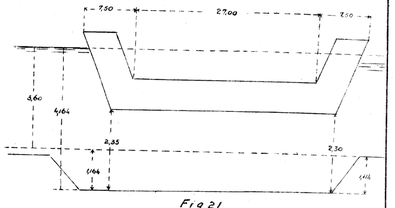


Fig 21

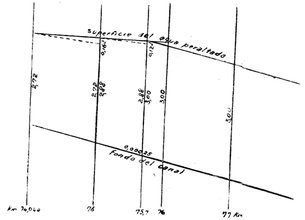


Fig 22

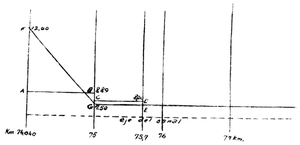


Fig 23