ANALES

DEL INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Calle San Martín N.º 352 - Casilla 487 - Teléf. 88841 - Santiago - Chile

Año XXXII — Agosto de 1932 — N.º 8

Julio Jul P.

Perjuicios producidos en canales por exceso de velocidad

SE ha confeccionado este trabajo a base de algunas deducciones desprendidas de aforos hechos en el canal de Colina, construído y entregado al servicio recientemente por la Dirección General de Obras Públicas.

La sección elegida para el aforo fué una parte del canal revestido, en el Kil. 0.200, en un tramo recto sin que se notara perturbación anormal en la cocorriente. Para cerciorarse de la verdadera condición del radier del canal, punto importante según se verá más abajo, porque despeja la incógnita del valor del coeficiente, éste fué secado y la sección medida corresponde a la ilustrada en la Fig. 1.

Las observaciones anotadas establecen que con una altura media de 0.67 mts. el caudal es de 2.200 litros por segundo. El aforo no tenía más objetivo, en ese entonces, que determinar el gasto actual del canal. De él, sin embargo, se deducen algunas apreciaciones interesantes que bien pueden constituir una fuente nueva de experiencia digna de considerarse en proyectos de canales de gran pendiente.

El experimento, según cálculo que se acompaña a continuación, arroja un valor medio para el coeficiente de fricción de Ganguillet y Kutter "n" = 0.0231.

VALOR EXPERIMENTAL DEL COEFICIENTE DE FRICCIÓN SEGÚN LA FÓRMULA DE GANGUILLET-KUTTER, EN LA SECCIÓN REVESTIDA DEL CANAL DE COLINA PARA UNA CARGA DETERMINADA $d = 0.67$ ms.

Siendo la velocidad media deducida de las lecturas del molinete

$$V_m = 1.80 \text{ ms./s.}$$

La sección de agua $$\Omega = \left(\frac{2.22 + 1.55}{2}\right) 0.67 = 1.26 \; m^2 s.$$

El perímetro mojado $P = 1.55 + (2.— \times 0.75) = 3.05$ ms

El radio medio hidráulico $R = \frac{1.26}{3.05} = 0.41$

El valor de "C" conocida la pendiente del canal $S = 0.006$

$$"C" = \frac{V}{\sqrt{RS}} = \frac{1.80}{\sqrt{0.41 \times 0.006}} = 36.1$$

Luego el valor del coeficiente de fricción "n" deducido de la fórmula general

$$C = \frac{23 + \frac{0.0155}{S} + \frac{1}{n}}{1 + \left(23 + \frac{0.0155}{S}\right)\frac{n}{\sqrt{R}}}$$

Sustituyendo los valores correspondientes a $S = 0.006$, $C = 36.1$ y $R = 041$, tenemos, al resolver la ecuación de segundo grado para el coeficiente de fricción,

$$"n" = 0.023$$

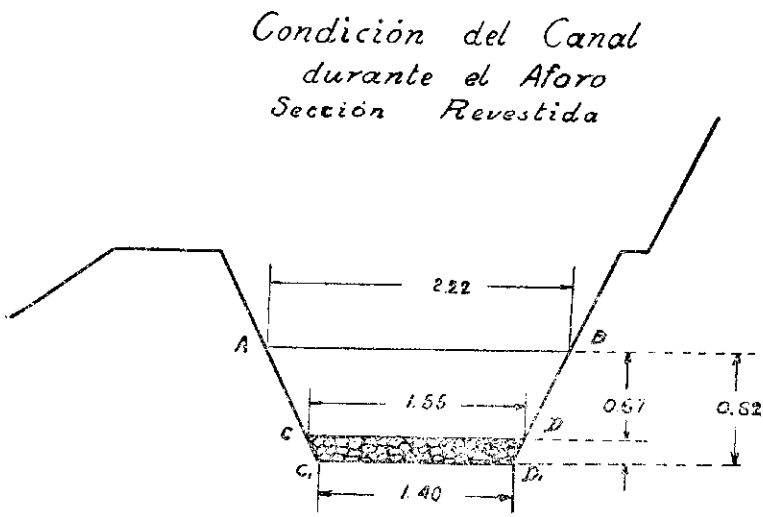


Fig. 1

Este resultado, algo desconcertante para revestimientos de concreto, puede interpretarse para su mejor comprensión en proporción a tramos del perímetro mojado.

Por ejemplo, tenemos el tramo *CD* de 1.55 mts., Fig. 1, la superficie actual que recibe el mayor efecto del coeficiente por su mayor longitud, en este caso, el embanque de ripio delgado y grueso.

Su valor posible parcial es de 0.030. Luego tenemos el tramo *AC* y *BD*, el talud del canal revestido, alisado con mezcla corriente e intacto aun al efecto de erosión con un valor muy aproximado de 0.015 en una extensión de 2 (0.75) = 1.50, o sea, la influencia del coeficiente

0.015 en las dos paredes, 1.50 mts., es de 0.0225
y 0.030 en el fondo, 1.55 mts., es de 0.0465 con un efecto unitario medio para "*n*"

de $\frac{0.0690}{3.05} = 0.0226$, relación aproximada al cálculo experimental y que sugiere esta lógica conclusión: Al elevar la altura de agua se disminuye el valor medio del coeficiente, porque mientras la superficie *CD* permanece constante aumenta en cambio el tramo *AC* y *BD*. Por consiguiente para el cálculo teórico de la velocidad media del canal para cualquiera altura superior a los 0.67 mts. del aforo es preciso considerar un aumento progresivo desde 0.67 a 1.00 mt., la altura máxima contemplada en el proyecto primitivo.

Para comprender mejor el procedimiento anterior seguido representaremos el caso gráficamente y en una ecuación,

$$(a + b + c)\, n_m = (a + b)\, n + c\, n_2$$

$$n_m = \frac{(a + b)\, n + c\, n_2}{a + b + c} \quad \ldots\ldots (1)$$

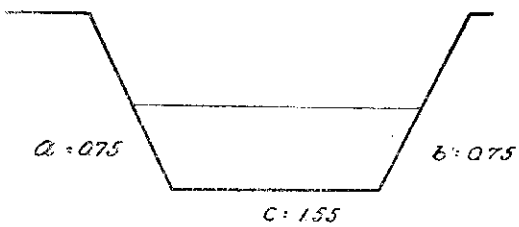


Fig. 2

donde *a*, *b* y *c* representan, respectivamente, las longitudes componentes del perímetro mojado del canal.

"*n*" el valor del coeficiente para las paredes *a* y *b* revestidas: constante inicial 0.015.

n_2 el único valor desconocido en este caso para el fondo del canal embancado y determinante del valor medio n_m para toda la sección. Para llegar a la hipótesis 0.030 se hace variar n_2 procediendo por sucesivos tanteos

$$n_m = \frac{(a + b)\, n + c n_2}{(a + b + c)}$$

donde $a + b = 1.50$
$c = 1.55$
$a + b + c = 3.05$
$n = 0.015$

dejando la ecuación reducida a

$$n_m = \frac{(1.50 \times 0.015) + 1.55\, n_2}{3.05}$$

$$= \frac{0.0225 + 1.55\, n_2}{3.05} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (2)$$

Entonces el valor medio del coeficiente es

$$n_m = \frac{0.0225 + (1.55 \times 0.025)}{3.05} = 0.0200 \text{ cuando } n_2 \text{ es } 0.025$$

$$n_m = \frac{0.0225 + (1.55 \times 0.030)}{3.05} = 0.0226 \text{ cuando } n_2 \text{ es } 0.030$$

$$n_m = \frac{0.0225 + (1.55 \times 0.031)}{3.05} = 0.0231 \text{ cuando } n_2 \text{ es } 0.031$$

$$n_m = \frac{0.0225 + (1.55 \times 0.035)}{3.05} = 0.0252 \text{ cuando } n_2 \text{ es } 0.035$$

Puede verse por este tanteo que el valor medio del coeficiente corresponde a 0.0231, lo que indica que la presunción 0.030 para el fondo del canal no andaba muy errada: en realidad corresponde a la cifra subrayada, $n_m = 0.0231$ cuando n_2 es 0.031.

En el cuatro 3 y en las figuras 3 y 4 se toma el caso más desfavorable, o sea que se acepta un coeficiente 0.0225 como promedio general para toda altura del canal revestido pero embancado en el fondo, en otras palabras, una velocidad media menor a la real, por ende un gasto inferior.

El canal con su base limpia tendría un valor para el coeficiente igual al de las paredes, condición normal, 0.015 en lugar de 0.0225, es decir, la carga de agua necesaria para conducir el mismo volumen actual sería 0.50 en vez de 0.67..... Tal es la influencia del coeficiente y tal es el efecto del embanque. Es muy probable que una altura superior a 0.67 el embanque se escurriría por la mayor velocidad cuya fuerza de trasporte haría rodar todo el material inferior a 6" de diámetro, adquiriendo entonces el canal su coeficiente normal de 0.015. Este proceso podría operarse siempre que la toma del canal trabajara en buenas condiciones, descartando el peligro de un descuido en las compuertas y la entrada de material grueso con el agua.

Planteado el caso en esta forma, bastante hacedero por lo demás, la carga máxima para conducir la dotación de 3.-m³s/s. fijada en el estudio, no alcanzaría a 0.65 en la sección revestida, con una velocidad media de 2.80 mts/s., velocidad siempre bastante mayor a la calculada en el proyecto y que está llamada a producir desperfectos por erosión.

SECCIÓN REVISTIDA, ANCHO EN EL FONDO 1.40, TALUD 1/2 : 1

Pendiente 0.006

	Altura ms.	Sección m²/s	Perímetro ms.	Radio	VELOCIDAD Media ms/s.	VELOCIDAD Fondo ms/s.	Gasto m³/s.	DIÁMETROS Pulgada	DIÁMETROS Metros	Momento Kilos-Mts/s.	Valor medio general para toda la sección del canal
	α	Ω	P	R	V_m	V_f	Q	D	D	M_m	"n"
CUADRO N.º 1	0.20	0.30	1.67	0.18	1.61	0.71	0.48	0.80	0.02	——	Condición normal "n"—0.015
	0.40	0.64	2.29	0.28	2.22	1.37	1.42	3.—	0.07	0.88	
	0.60	1.02	2.74	0.37	2.68	1.95	2.74	6.—	0.15	10.—	
	0.80	1.44	3.19	0.45	3.08	2.58	4.45	10.60	0.27	74.50	
	1.—	1.90	3.64	0.52	3.38	3.10	6.43	15.50	0.39	269.—	
CUADRO N.º 2	0.20	0.30	1.67	0.18	1.16	0.50	0.35	0.40	0.01	——	Condición anormal embarque grava "n"=0.020
	0.40	0.64	2.29	0.28	1.60	0.95	1.07	1.30	0.03	0.05	
	0.60	1.02	2.74	0.37	1.95	1.40	1.99	3.15	0.08	1.05	
	0.80	1.44	3.19	0.45	2.24	1.85	3.23	5.50	0.14	7.30	
	1.—	1.90	3.64	0.52	2.49	2.29	4.73	8.35	0.21	32.—	
CUADRO N.º 3	0.20	0.30	1.67	0.18	1.—	0.42	0.30	0.30	0.01	——	Anormal embarque grava "n"=0.0225
	0.40	0.64	2.29	0.28	1.39	0.81	0.89	0.95	0.02	——	
	0.60	1.02	2.74	0.37	1.70	1.21	1.74	2.25	0.06	0.33	
	0.80	1.44	3.19	0.45	1.97	1.62	2.84	4.30	0.11	3.06	
	1.—	1.90	3.64	0.52	2.19	2.—	4.16	6.40	0.16	12.50	

Velocidad de fondo y arrastre.—Existe entre otras una proporción empírica para estimar la capacidad de trasporte del agua:

$P \infty V^6$ donde P es la capacidad o fuerza de arrastre
V la velocidad elevada a la sexta potencia.

Es decir, si se expresa esta magnitud de arrastre en términos más gráficos de volumen o diámetros del material movido, se puede llegar a esta simplificación:

$$K d^3 \infty K V^6$$
$$d \infty V^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3)$$

La proporción sugiere que una piedra de forma esférica de diámetro d empezará a rodar ante el impulso de una velocidad de fondo V^2.

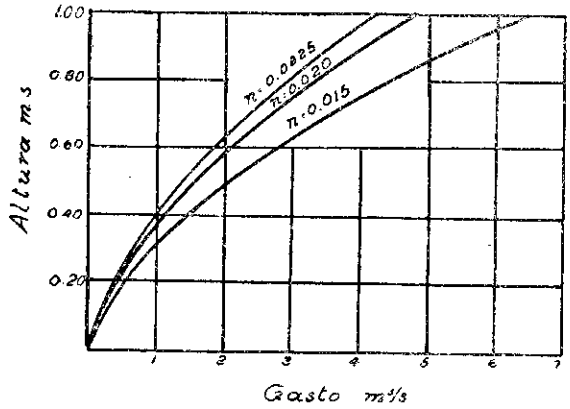


Fig. 3

Si esta velocidad se duplica, su capacidad de arrastre es cuádruple, el diámetro movilizado es $4d$. Una velocidad triple impulsa un volumen con diámetro igual a $9d$, etc.

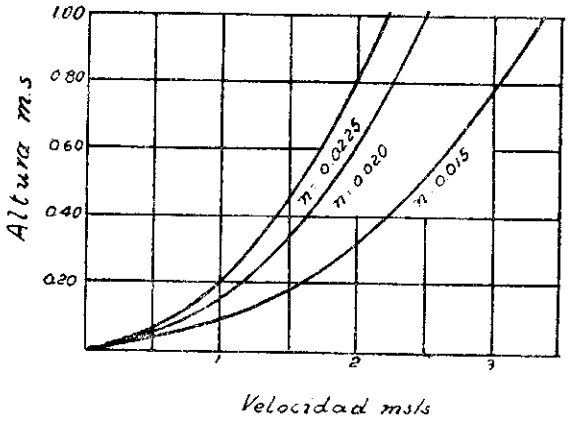


Fig. 4

Esta proporción aplicada a las observaciones obtenidas durante el aforo en Colina, moviliza piedras entre 3 y 4", más o menos el tamaño de la grava encontrada en la base al secarse el canal, cuadro 3. En este último cuadro pueden verse los casos hasta velocidades de 2.20 mts./s. que corresponden a una carga de 1.-mt. con un valor para "n" de 0.0225. En realidad, este cálculo teórico, como se ha insinuado más arriba, será corto en realidad y es probable que con una altura de 1.-mt. el coeficiente medio baje y mejore a 0.020 para una velocidad de 2.50

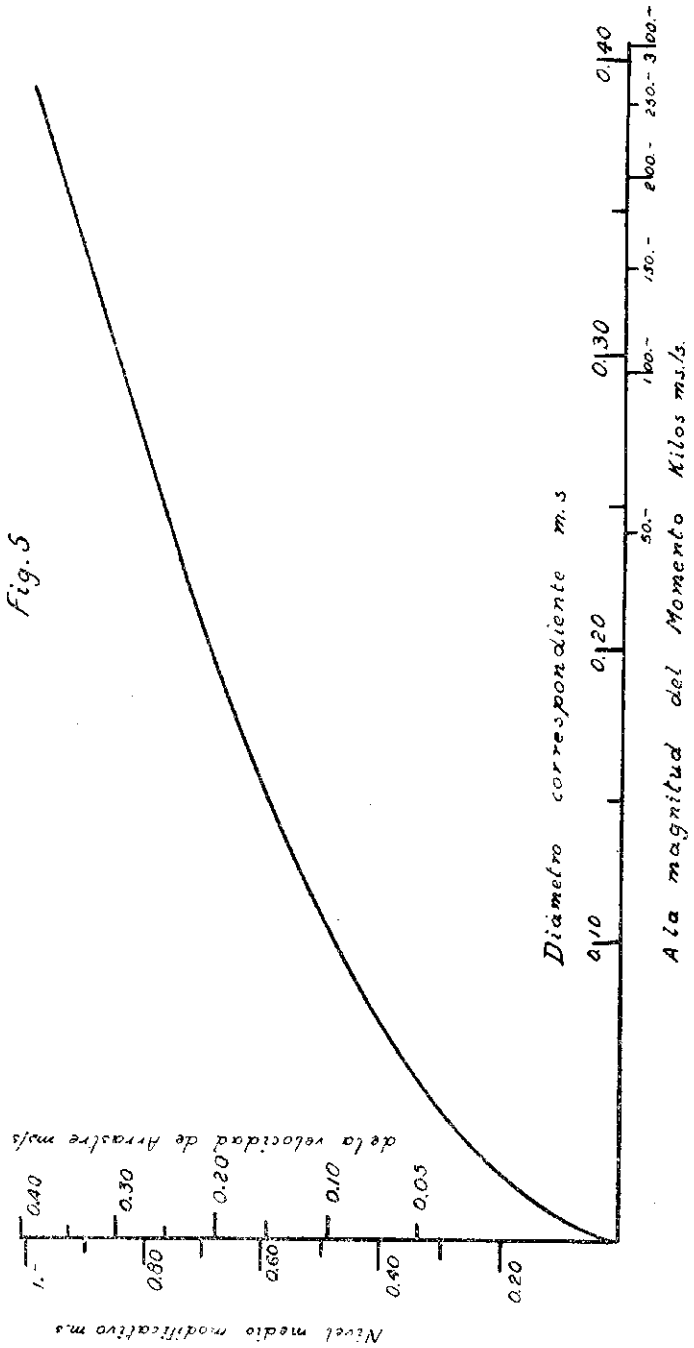


Fig. 5
Diámetro correspondiente m.s
0.10
0.20
0.30
0.40
A la magnitud del Momento Kilos m.s/s.
50.-
100.-
150.-
200.-
250.-
300.-
Nivel medio modificativo m.s
1.-
0.80
0.60
0.40
0.20
de la velocidad de Arrastre m.s/s
0.40
0.30
0.20
0.10
0.05

cuadro 2, con un gasto de 4.750 lts/s. y velocidad de fondo de 2.29 mts/s. con capacidad de arrastre de 8″ de diámetro y un momento de 32 Kls. mts./seg. Limpia la base del canal de todo embanque tendríamos para la misma altura una velocidad media de 3.38 mts/seg. (cuadro 1) con un gasto de 6.430 lts./seg., arrastre de 15.5″ de diámetro y un momento de 269 Kls. mts./seg. El efecto de una velocidad tan alta como es esta última, muy superior a la estimada en el proyecto, es evidente, porque si con una carga de 0.85, condición actual embancado, se produce una velocidad de fondo de 1.76 para mover un diámetro de 5″ con una altura de 1.-mt., y el canal limpio, condición normal, $n=0.015$, la velocidad de fondo arrastraría diámetros hasta de 15″, es decir, que el solo aumento de 0.15 ms. en altura, de una condición a otra, es suficiente para producir un cambio de momento de 5 a 269 kls. mts./seg.

El sello y gran parte del talud del canal estaría sujeto a un golpe intermitente de una masa de 15″ de diámetro. El efecto erosivo de este momento es, sin discusión, formidable, y es una explicación, si se quiere, a lo que puede ocurrir en el túnel y derivados del río de Colina como en otros canales proyectados a base de ese gasto y con pendientes tan atrevidas.

Como un dato sugestivo podría estimarse la cantidad de sedimento probable transportado en suspensión en porcentaje del volumen de agua. Si este sedimento alcanzara a llegar a la zona de riego, sería o no lo sería un beneficio (depende de la calidad del sedimento como abono), al no llegar constituiría un peligro tan grande o peor para las obras de arte que la misma erosión

Tendríamos entonces que la fórmula para mejorar las deficiencias del canal o canales proyectados a gran pendiente, donde la apreciación inicial del coeficiente discrepa mucho del valor real que recupera en la práctica, consiste en un ensanche de la sección. Esta solución, aparentemente para muchos ingenieros costosa, en el caso citado tiene sus ventajas porque el mínimun de ensanche puede hacerse a expensas de una reducción en la altura de agua, con lo que se disminuye la velocidad, objetivo principal de la mejora, eligiendo para ésta un valor que corresponda a la idea moderna de las «velocidades admisibles».

Se presenta aquí la sección más racional para mantener el canal en mejores condiciones respetando la fuerte pendiente, el talud y el gasto considerado en el estudio primitivo. Para evidenciar más esta solución del problema consideraremos el canal de tierra y piedra, es decir, el canal tal cual se encuentra en la actualidad, más abajo de la sección escogida para el aforo,

Predominaría el valor máximo del coeficiente ya que en gran parte este canal trabaja en roca, con paredes de superficie irregular, resultado normal del desarrollo de la construcción a dinamita. Estas paredes, cuya aspereza inicial, sin lugar a dudas, alcanzaría a un valor de "n" de Kutter, de 0.035 se traduce a 0.025, porque cualquier cambio anterior de velocidad, producto de una baja en la altura de agua, concibe un proceso natural de precipitación, quedando el sedimento más fino adherido al talud.

Si este sedimento es de contextura areno-arcillo-limosa, el proceso que se opera es el siguiente: El sedimento más pesado, que es la arena, trabaja con la velocidad más alta y pule las puntillas de la piedra, mientras el más liviano, el de arcilla y limo, al reducirse la carga de agua, se impregna en los intersticios ubicados en las

partes menos salientes de la roca, bajando o mejorando entonces el valor del coeficiente hasta llegar en cierto grado al «revestimiento natural de greda» que con el tiempo adquiere consistencia suficiente para una carga de agua cuya velocidad no rebalse los límites de la llamada velocidad «admisible».

Puede afirmarse como principio que los coeficientes mejoran en canales de gran velocidad cuando parte del sedimento en suspensión es de arcilla y limo, mientras que en el canal normal proyectado dentro de la velocidad «admisible» el mismo principio no tiene mayor trascendencia porque no alcanza ni necesita verificarse.

También es preciso tener presente que las velocidades laterales en el canal, salvo cuando éste se desarrolla en curvas fuertes y sin peralte, en igualdad de carga, son inferiores a la velocidad media.

El caso ocurre en Colina más bien por la poca carga durante el aforo ya que, en general, el canal bien construído adolece, en cambio, de las normas inherentes a un buen proyecto, habiéndose desestimado la importancia del eje hidráulico en los puntos críticos y el radio mínimo de las curvas, factores ambos influyentes y que contribuyen a acentuar más el efecto de la fuerte pendiente 0.006.

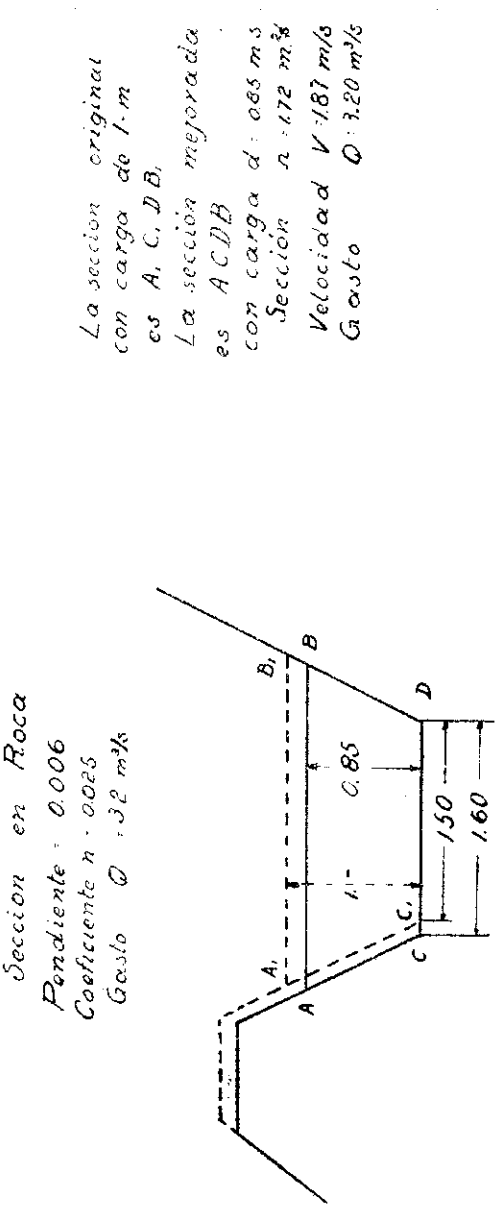


Fig. 6

En la fig. 6 puede verse la mejor sección dentro de la fórmula de ensanche propuesta. Este ensanche no debilita el talud inferior del canal aún en rasgos de fuerte inclinación, porque al mismo tiempo que se reduce la altura, la berma

mantiene su dimensión de acuerdo al proyecto trabajando por otro lado a menor presión de agua.

Se sacrifica en esta forma la mejor sección a expensas de la velocidad admisible, es decir, se acepta un mayor gasto en mejoramiento que se recupera repetidas veces con la evidente economía en la partida regular y permanente de gastos de conservación del canal.

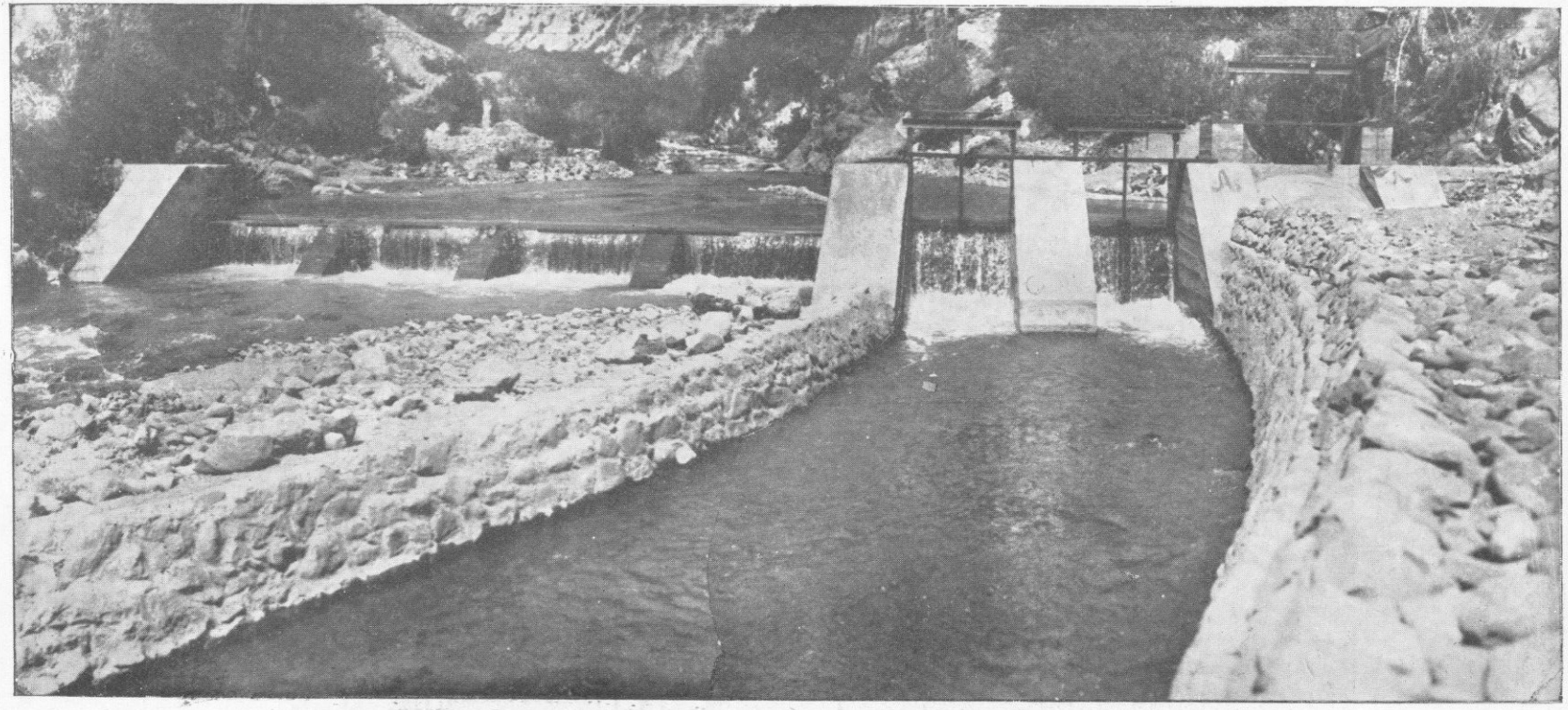
Resumen.—En general, el proyecto bien desarrollado por el contratista, bien dirigido por el Departamento de Riego, falla en la práctica por la fuerte pendiente elegida y el mejoramiento recuperado por el coeficiente como resultado del sedimento de las aguas. Se desprende del aforo que al fijarse el valor del coeficiente para el cálculo de la velocidad se optó por la cifra máxima que predominaría en la sección de piedra como solución para amortiguar la fuerte velocidad. Esta falla en el proyecto que refleja en cierto modo el sistema antiguo de calcular canales, si no se arbitran antes medios para reducir la pendiente con rebajes y caídas parciales siempre más difíciles en el sello que en el talud, constituirá un peligro permanente para el canal y será un factor decisivo en el ítem conservación.

Nota del autor.—Formando la esencia de esta pequeña exposición parte de un artículo «Comentarios y sugestiones sobre la velocidad admisible para canales en Chile» que se publicará en otra ocasión, no se presentan todas las curvas del caso ni se investiga esta vez el origen de la proporción $D \propto V^2$, la más apropiada para ilustrar el problema a base de una velocidad de arrastre de 0.70 mts./seg. y diámetros de ¾ de pulgada.

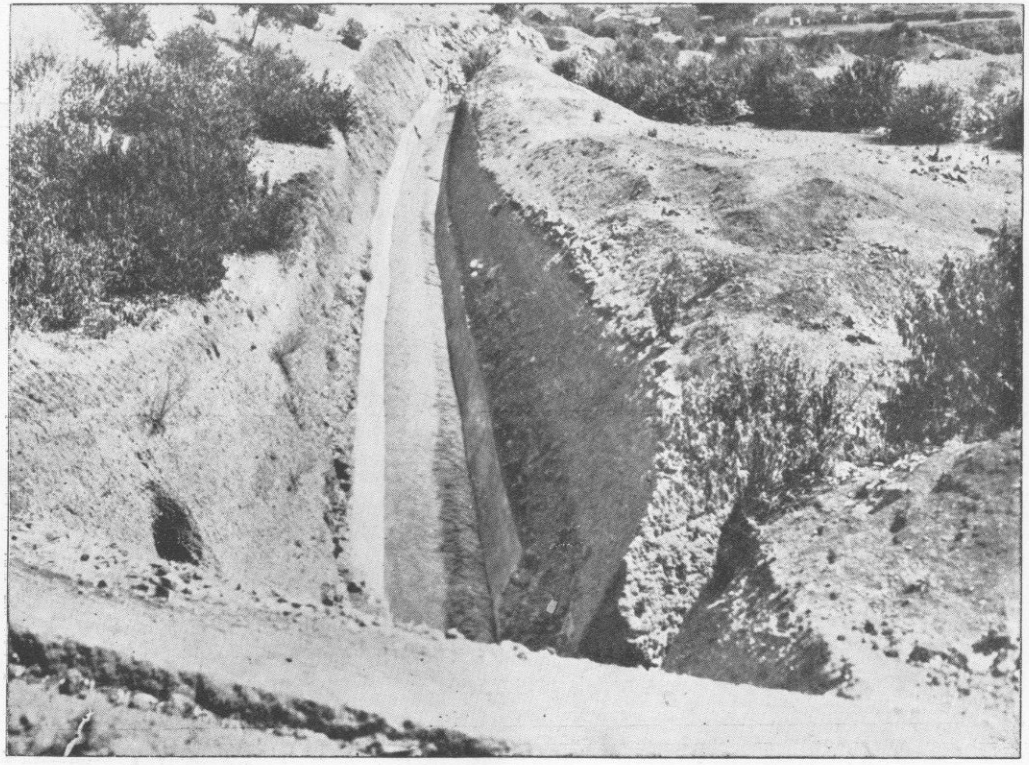
También la columna de los momentos de los cuadros es hasta cierto punto ilustrativa si se quiere, porque en el procedimiento de cálculo seguido se presume como nivel medio modificativo para producir la fuerza de arrastre, la altura máxima total de la carga.

Se desestima asimismo por su escasa influencia la variedad del material grueso transportado, fijando como cifra media determinante el peso corriente de la piedra.

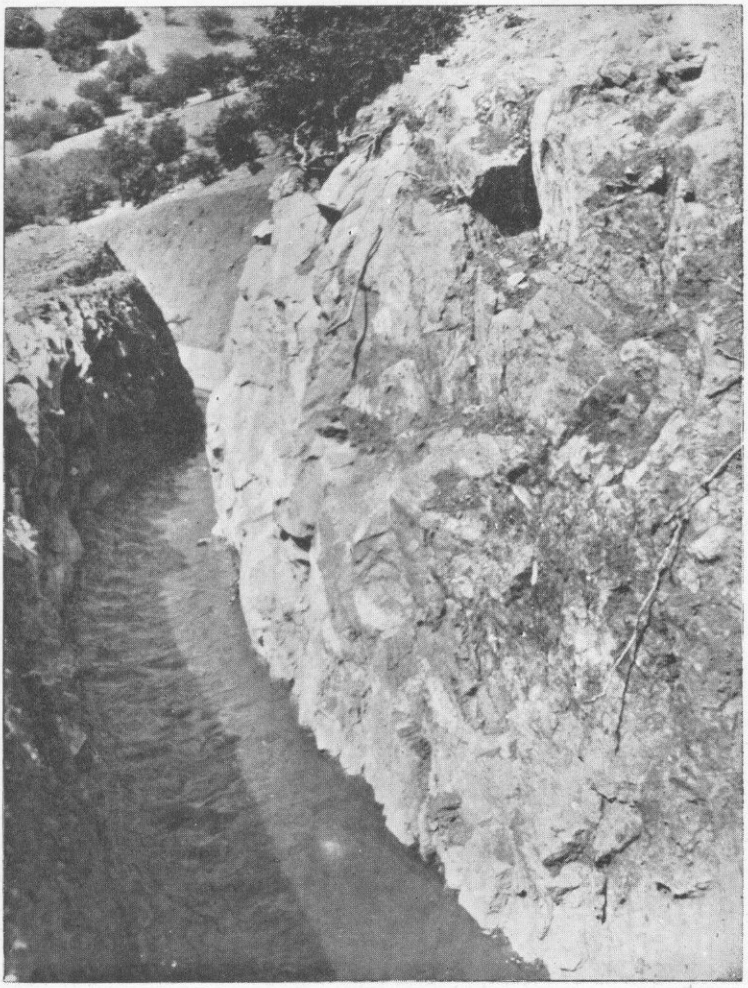
Por último, creo oportuno agradecer al distinguido profesor de la Universidad de Chile y consocio del Instituto, don Guillermo Agüero Delgado, su opinión sobre la interpretación gráfica que he creído más adecuada para corroborar el cálculo experimental del coeficiente de fricción "*n*", opinión basada en que, sin apartarse de un principio falso es buena porque no existe otra.



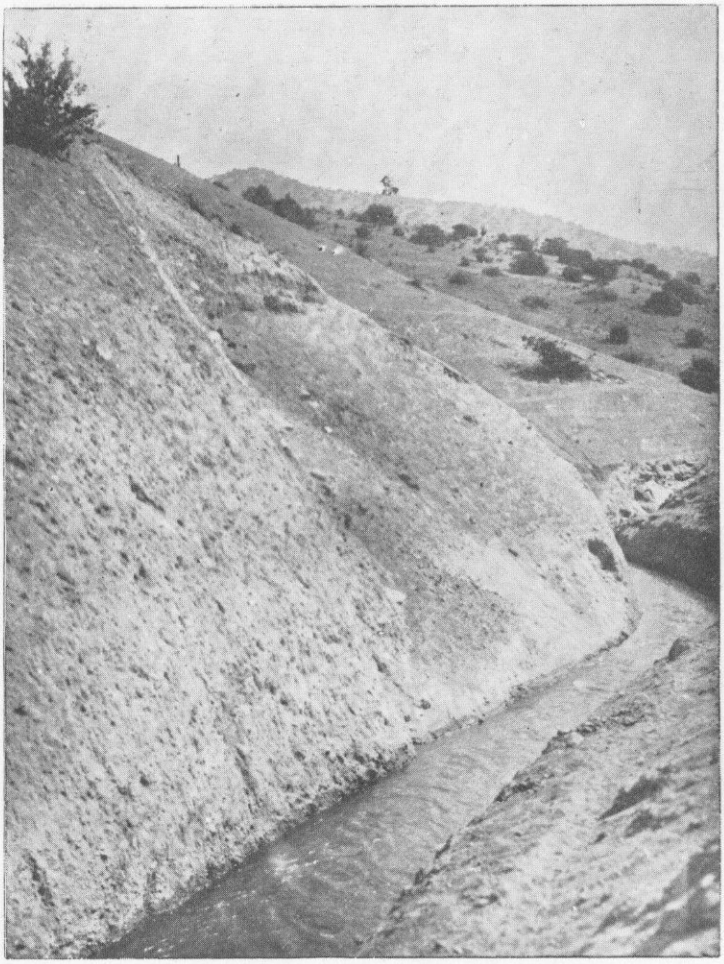
Obras de toma del canal de Colina



Sección revestida después del túnel



Sección típica de roca



Sección de tierra dura