

Sedimentos arrastrados por los ríos.-Obras de sedimentación en el canal de Matenas

Por

MANUEL ESPINOSA HERRERA

INTRODUCCIÓN

Pueden distinguirse dos clases de materias arrastradas por los ríos. Las piedras, ripios y arenas que son arrastrados por el fondo o llevados en suspensión, y las materias que acarrean en su superficie.

Las piedras y ripios gruesos como las materias flotantes en general no presentan un problema muy serio al Ingeniero; las primeras dado su peso se precipitan con gran facilidad y pueden eliminarse por medio de dispositivos sencillos, y las materias flotantes son también fácilmente eliminadas por vertederos de superficie.

Por el contrario, las arenas presentan un serio y grave problema a los Ingenieros Hidráulicos. Este problema grave de por sí en las obras de irrigación, presenta tales dificultades en las obras hidro-eléctricas que se puede decir que en los ríos de régimen torrencial, como son los nuestros, no se ha encontrado todavía una solución clásica. Llamo solución clásica de Ingeniería aquella que tiene las siguientes características:

Estructura de fácil y económica construcción y explotación y que satisfaga ampliamente el objeto con que ha sido proyectada.

Quiero insistir en llamar la atención de las dificultades de este problema, porque se presentará con las mismas características en casi la totalidad de las construcciones de plantas hidro-eléctricas que sea necesario proyectar en nuestro futuro desarrollo industrial. Creo que sin exagerar se puede decir que los más experimentados ingenieros, no solamente en nuestro país, sino en todo el mundo, han fracasado al abordar este problema.

Las arenas que arrastran los ríos son generalmente formadas por la desagregación espontánea, o producto de la erosión de las rocas naturales, tales como los cuarzos, los granitos, los basaltos, las calcáreas areniscas, etc.

Las arenas se clasifican según su composición química y por su constitución física. Bajo el primer punto de vista, en general se dividen en tres categorías: «arenas arcillosas, arenas calcáreas y arenas cuarzosas o silicosas», según sean los elementos que predominan en su composición.

Según su constitución física se clasifican por su tamaño, es decir, por su composición granulométrica.

Además se caracterizan por su forma, redondeadas, angulosas, etc. por su peso específico, por su densidad aparente, etc.

Nuestros ríos, especialmente hacia arriba del valle central, de lechos de gran pendiente que les impone un régimen torrencial arrastran una gran cantidad de arenas.

Los estudios y experimentos sobre los sedimentos de nuestros ríos son muy escasos y han sido recientemente impuestos por la construcción de las plantas hidro-eléctricas, y se puede decir que no existen sino de los ríos Cachapoal y Pangal y del río Colorado afluente del Maipo y del Maipo mismo. Se han hecho además observaciones aisladas del río Yeso con el motivo del proyecto del Tranque del Yeso.

Todos estos estudios adolecen del defecto de discontinuidad y en especial de experimentación práctica sobre las estructuras de los canales, destinados a quitar los sedimentos de sus aguas.

Estudios en el Río Cachapoal.—El departamento técnico de la Braden Copper C.º, ha ejecutado una serie de experimentos para determinar las características de los sedimentos arrastrados por los ríos Cachapoal, y Pangal, cuyas aguas aprovecha para sus plantas hidro-eléctricas de Coya y Pangal.

La tabla siguiente muestra el porcentaje de los diferentes tamaños de los granos de los sedimentos de las aguas del río Cachapoal.

SEDIMENTOS EN EL RÍO CACHAPOAL

Dimensiones		N.º del Harnero	Porcentaje
Pulgadas	m|m.		
0.263	6.68	Mayor que 3	1
0.185	4.70	» » 4	1
0.131	3.33	» » 6	1
0.093	2.35	» » 8	1
0.065	1.65	» » 10	0
0.046	1.17	» » 14	0
0.0328	0.83	» » 20	0
0.0232	0.589	» » 28	1
0.0164	0.391	» » 35	2
0.0116	0.294	» » 48	7
0.0082	0.208	» » 65	12
0.0058	0.174	» » 100	30
0.0041	0.105	» » 150	24
0.0029	0.074	» » 200	7
		Menor que 200	13
		Total	100

Por la tabla se puede notar que la mayor cantidad de los sedimentos está comprendida entre los harneros N.º 40 y N.º 150, o sea de 0.1 m|m. a 0.35 m|m de tamaño de sus granos.

Con respecto a la velocidad de sedimentación, las arenas de estos tamaños se precipitan con una velocidad de 20 a 45 m|m. por segundo; en consecuencia, alrededor de los $\frac{3}{4}$ de los sedimentos se precipitan con una velocidad media de 25 m|m. por segundo.

Para determinar la velocidad de sedimentación en el departamento metalúrgico de Sewell, se hicieron experimentos en un tubo de vidrio con mineral pulverizado de las chancadoras, llegando a los siguientes resultados.

Los granos comprendidos entre los harneros Nos. 20 y 40, es decir, los partículas más pesadas (en las cuales había un pequeño porcentaje de óxido de fierro y pirita) tienen una velocidad de sedimentación de 76 m|m. por segundo.

Los sedimentos comprendidos entre los harneros N.º 40 y N.º 60, sus partículas más pesadas se depositan con una velocidad de 50 m|m. por segundo. Algunas par-

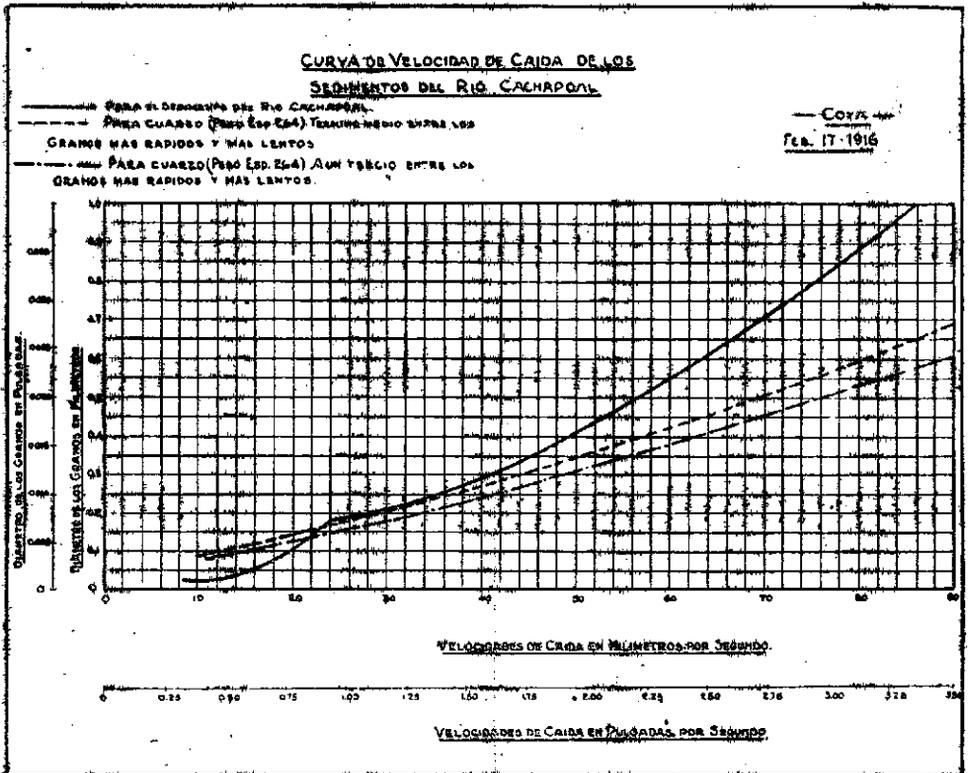


Fig. N.º 1

tículas de biolita se depositan con una velocidad de 26 m|m. por segundo y las hojuelas de mica con una velocidad de 13 m|m. por segundo.

El grueso de sedimento comprendido entre las mallas N.º 60 y N.º 80 se depositan con una velocidad de 56 m|m. por segundo. Las pocas partículas de pirita y óxido de hierro se precipitan con una velocidad de 43 m|m. por segundo; la arena más liviana tiene una velocidad de precipitación que no excede de 22 m|m. por segundo. Estas partículas tienen forma angular y son astillas de cuarzo o placas de feldspato. Las partículas de mica se depositan con una velocidad de 10 m|m. por segundo.

La mayor parte de las partículas comprendidas entre los harneros N.º 80 y N.º 100 se depositan con un velocidad de 43 m|m. por segundo y las partículas más finas con una velocidad de 16 m|m.

El sedimento comprendido entre los harneros N.º 100 y N.º 150 tienen una velocidad de sedimentación de 36 m|m. por segundo para los tamaños mayores, siendo esta velocidad de 16 m|m. para los medios y de 3 m|m. para los más finos.

Estos experimentos indican que la mayor parte del material tiene una velocidad de sedimentación que varía entre 20 y 45 m|m. por segundo.

CANAL DE COYA

Determinación de los sedimentos en la cámara de carga Febr. 26 de 1916.

El sedimento mayor que el harnero N.º 8 fué grava corriente fina, que no contiene material cristalino.

El material comprendido entre los harneros N.º 8 y N.º 20 fué similar al anterior, pero conteniendo unos fragmentos de cuarzo y feldespato y algunas partículas ferruginosas.

La tabla siguiente da el resultado en detalles del análisis del sedimento retenido por el harnero N.º 20.

HARNERO N.º	28	35	48	65	100	150	200
Pirita %	0	0	0	0	0	2	2
Magnetita	0	0	0	0	0	0	10
Cuarzo	1	0	1	8	12	14	10
Feldespato	0	1	3	15	10	13	12
Grupo Fe. Mg.	10	9	6	4	6	6	3
Ferruginoso	61	30	30	18	17	14	11
<i>Material Microscópico</i>							
Con mineral	28	41	31	37	12	11	8
Sin mineral	..	19	29	18	43	40	54

El sedimento retenido por el harnero N.º 200 contiene pirita, chalcopirita, pocos fragmentos de anfíbola, piróxido cristalino y abundantemente cuarzo y feldespato.

VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EN AGUA TRANQUILA

La tabla siguiente da estas velocidades en m/m. por seg.

HARNERO N.º	28	35	48	65	100	150	200	200
Partículas más pesadas	137	104	88	67	52	39	24	16
Grueso de las partículas desde	..	..	67	52	39	26	19	13
Grueso de las partículas hasta	..	..	38	21	14	7	5	1.5
Partículas más livianas	15	12	6	4	3	2	1.5	No det.

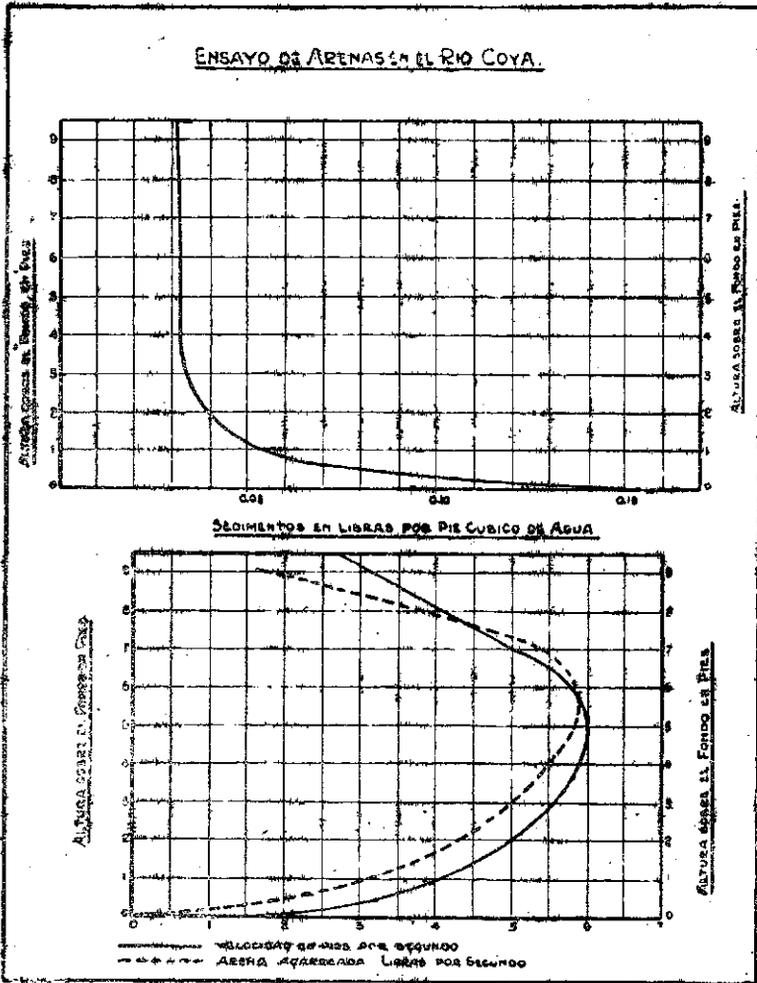


Fig. N.º 2

Determinación de los sedimentos en la boca-toma

Marzo 3 de 1916, Los sedimentos mayores que el harnero N.º 20 estaba formado por grava hasta $\frac{1}{4}$ " de diámetro. Se notó pirita en varias de las partículas, una considerable cantidad de materias ferruginosas y nada de cuarzo y feldespato.

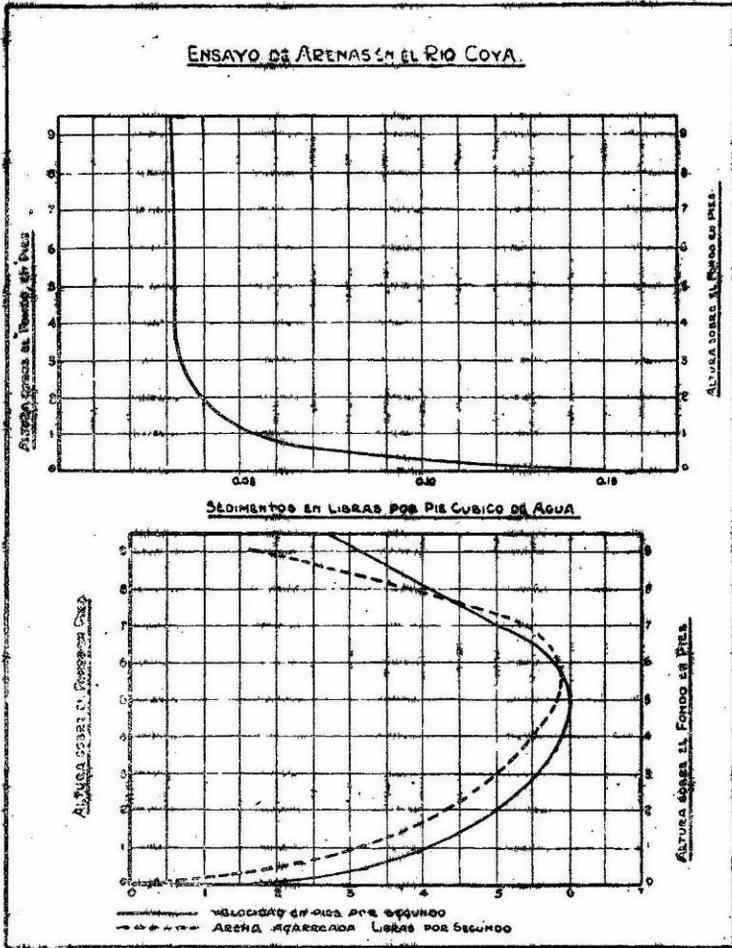


Fig. N.º 2

Determinación de los sedimentos en la boca-toma

Marzo 3 de 1916, Los sedimentos mayores que el harnero N.º 20 estaba formado por grava hasta $\frac{1}{4}$ " de diámetro. Se notó pirita en varias de las partículas, una considerable cantidad de materias ferruginosas y nada de cuarzo y feldespato.

El cuadro siguiente da el resultado del análisis del sedimento más fino que harrero N.º 20.

HARRERO N.º	28	35	48	65	100	150	20
Pirita %	0	0	0	0	0	0	
Magnetita %	0	0	0	1	0	0	
Cuarzo %	0	1	0	5	10	12	
Feldespato %	0	2	10	10	7	6	1
Grupo Fe. Mag. %	12	8	9	4	6	5	
Grupo Ferruginoso %	16	22	15	15	12	5	
<i>Materia Microscópica.</i>							
Con mineral %	42	49	38	29	14	5	
Sin mineral %	30	18	28	36	51	67	6

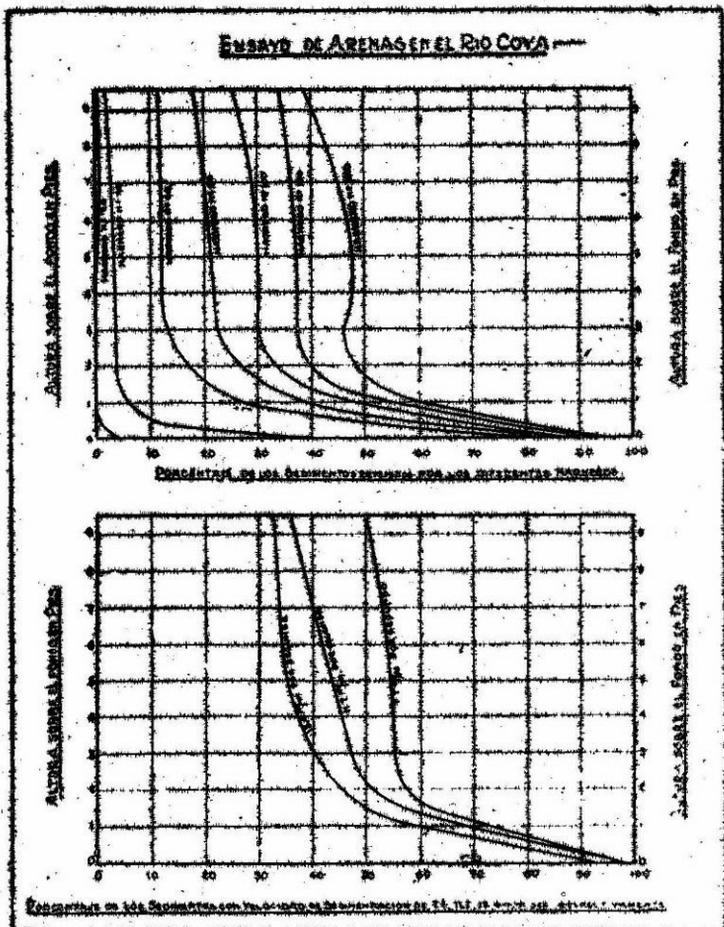


Fig. N.º 3

Los sedimentos menores que el harnero N.º 200 era lógamo muy fino en el que era bastante abundante la pirita, magnetita y minerales ferro-magnéticos.

La tabla siguiente da el resultado de la velocidad de sedimentación en m/m. por segundo.

HARNEROS	28	35	48	65	100	150	200	200
Partículas más pesadas	155	110	88	70	52	30	24	12
Grueso de partículas desde	118	91	73	58	43	24	16	8
Grueso de partículas hasta	64	49	40	18	12	6	4.6	1.5
Partículas más livianas	14	12	8	5	4	2	1.5	..

Experimentos en el canal de descarga. Marzo 3 de 1916.

La tabla siguiente da el resultado del análisis de estos sedimentos.

HARNEROS	35	48	65	100	150	200
Pirita %	0	1	0	0	0	0
Magnetita %	0	0	0	1	2	4
Cuarzo %	2	5	13	10	10	11
Feldespato %	3	9	9	12	13	9
Grupo Fe. Mag. %	8	5	2	8	2	2
Ferruginosas %	21	20	10	6	10	4
<i>Material Microscópico.</i>						
Con mineral %	39	24	25	19	12	8
Sin mineral %	27	36	41	44	51	52

El sedimento más fino que el harnero N.º 200 era lógamo muy fino. El sedimento contenía en abundancia cuarzo, feldespato, mineral, ferro-magnético, pirita y magnetita.

La velocidad de sedimentación en m/m. seg. es dada en la tabla siguiente.

HARNEROS	35	48	65	100	150	200	200
Partículas más pesadas	177	143	79	58	40	27	21
Grueso de las partículas desde	91	82	58	40	30	23	10
Grueso de las partículas hasta	39	27	18	9	5	4	1.2
Partículas más livianas	24	18	5	3	2	1.5	..

La velocidad de sedimentación de las partículas más finas que el harnero N.º 200 no fué terminada, pero se puede tomar como 30 cm. por hora o sea 0.085 mpm. :seg.

Río Yeso.— El señor G. Van Brockmaan, en su proyecto de embalse del río Yeso, refiriéndose a las materias que arrastra el río, dice:

«Pueden distinguirse dos clases de materias arrastradas por el río: Las piedras y arenas que van por el fondo del lecho, y las materias en suspensión.

El estudio y observaciones de arrastre de la primera categoría de materias, costoso y sumamente variable de un río a otro, se limitó al que interesaba directamente al lago, el Yeso en el Valle.

No se puede formular leyes que se refieran a este fenómeno complicado con erosiones y arrastres discontinuos; las observaciones indicaron que sólo habrá arrastre apreciable en los días de crece.

En Noviembre y Diciembre de 1910, a la entrada del futuro lago se midió en una laguna artificial, cerrada por pies de cabras, el depósito de piedras y arenas gruesas, obteniéndose de 15 a 25 m³. diarios; no puede, pues asignarse al año observado un arrastre total anual superior a unos 2 000 m³.

Debiendo agregarse que el río Yeso va encajonado en una zanja profunda con grandes piedras, al pie de un farellón de roca dura en largo trayecto, que no puede producir material de acarreo en gran cantidad, a no ser en periodos geológicos.

Este volumen acarreado de materias de la primera categoría durante 1910, es incomparablemente inferior al correspondiente a las materias de la segunda categoría.

También la ley de materias en suspensión aumenta en los días de crece. Todas las muestras de los aforos de fines de Marzo y a principios de Abril de 1910, indican con gastos de unos 6 m³. por segundo, menos de 70 mgr. por litro, y término medio de 11 muestras, 40 a 50 mgr. por litro. Las muestras tomadas el 21 y 22 de Diciembre durante una crece que enturbó notablemente las aguas, indican:

A las 5 P. M. del 21 — 3 300 mgr. por litro.

A las 11 P. M. del 21 — 6 100 mgr. por litro.

A las 5 A. M. del 22 — 500 mgr. por litro.

A las 11 A. M. del 22 — 1 200 mgr. por litro.

Algunas hipótesis sobre las leyes de suspensión correspondientes a los diferentes gastos, que en realidad dependen no sólo de los valores absolutos, sino también de valores comparados con los gastos anteriores (creciente y menguante) y de circun-

tancias locales, han permitido calcular aproximadamente el arrastre de materias en suspensión para el año 1910.

Se ha obtenido la cifra probable de 300 000 a 400 000 toneladas, que refería al volumen total de agua pasada por la boca del Valle el año 1910, (230 000 000 m³) da una ley media anual de 1 500 mgr. por litro de agua.

Este peso corresponde a un depósito de materias en suspensión de unos 200 000 m³. para el año 1910, cifra ante la cual el volumen de piedras acarreadas desaparece.

Medidas efectuadas en el invierno de 1911, en el río Maipo, indican un arrastre de 300 mgr. por litro.

Río Maipo.—El señor Alfredo Lynch ha ejecutado interesantes experimentos para determinar la cantidad de sedimentos del río Maipo y especialmente en la parte inferior del canal de «La Florida».

Estos experimentos ejecutados en diferentes épocas usando 500 litros de agua en cada caso, le han permitida llegar a los siguientes resultados:

CANAL DE «LA FLORIDA»

Fecha	Gto. en M ³ .	Arena Gruesa	%	Arena fina Gramos	Total Gramos	%
Enero 20. |13	16.5	78	0.156	1370	1448	2.9
Enero 22. |13	13.7	43	0.086	1262	1305	2.6
Febrero 6. |13	14.7	114	0.228	1745	1860	3.7
Octubre 17. |14	13.6				281	0.5
Diciembre 14. |14	12.1	45	0.090	425	470	0.9
Diciembre 30. |14	14.3	55	0.110	1075	1130	2.2
Enero 27. |15	12.5	48	0.096	1297	1345	2.7
Febrero 15. |15	13.1	97	0.194	1118	1215	2.4
Marzo 1. |15	12.6	90	0.180	630	720	1.4
Término medio			0.142	0.142		2.144

Es necesario considerar que en este canal se tiene un gasto de 20m³ por segundo; desde Octubre hasta Abril inclusive el total del volumen de agua escurrida alcanza a 366 336 000 m³., que con proporción media de sedimentos de 0.142 se tiene 52 019 tons. de sedimentos, o sea 35 000 m³., tomando un peso específico de 1.5.

El señor Lynch en sus experimentos ha usado un harnero de 900 mallas por cm³. para separar la arena gruesa de la fina.

Estos experimentos ejecutados para el canal de la Florida para determinar la eficiencia del desarenador, han dado los siguientes resultados:

N.º	Fecha	Porcentaje de la Arena depositada	Porcentaje de la Arena Gruesa
1	Octubre 17, 1914.....	72.0	.....
2	Diciembre 14, 1914.....	30.0	71.0
3	Diciembre 30, 1914.....	0.0	81.8
4	Enero 27, 1915.....	39.9	97.3
5	Febrero 16, 1915.....	28.0	95.8
6	Marzo 1, 1915.....	43.8	95.0

Estos experimentos muestran que el desarenador de la Florida hace una extracción media de 88% de la arena gruesa, es decir, de la arena que no pase al través de un harnero de 900 mallas por cm².

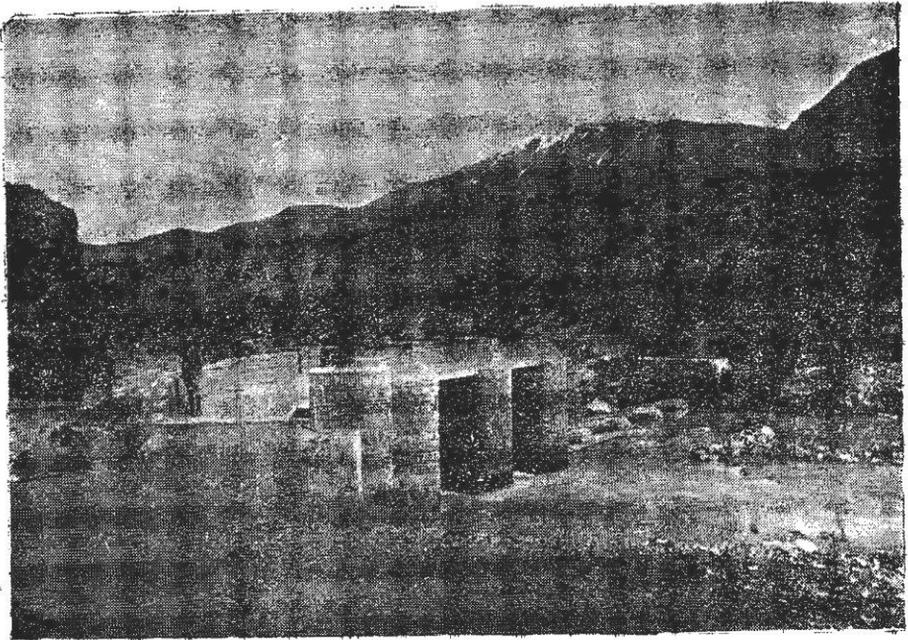
El total de los sedimentos que pasan por el canal de la «Florida» desde Octubre a Abril se puede estimar que es de 2.14 por mil, de éstos 0.142 por mil son de arena gruesa, de la cual un 88% o sea 0.125 son extraídos por el desarenador, el resto extraído por el desarenador hasta hacer un 35% del total de la arena es de arena fina, pasando, en consecuencia, hacia las turbinas el 65% del total de los sedimentos, con las deplorables consecuencias de reducir a uno o dos años la vida de los alabes de las turbinas.

El canal de la Florida estando al margen de la ley de Kennedy debido a su pequeña pendiente 0.50 m. por Km., permite que se deposite en su lecho gran cantidad de arena en el verano, de tal modo que su gasto se reduce de 20 m³. por seg. a 12 m³ por seg. en Marzo. Principiando en Febrero a decrecer la cantidad de arena acarreada por el río Maitén, el agua de este canal principia a arrastrar la arena depositada en su lecho imponiendo el aumento, de los operarios destinados a mantener expedito el desarenador. Siendo en consecuencia más serios los perjuicios que ocasiona cuando el río trae un reducido porcentaje de sedimentos.

El Río Colorado.—En la Planta de Maitén este problema se ha presentado con las mismas características que en las plantas anteriormente citadas.

En el proyecto original se intentó resolver en parte esta dificultad por la construcción de:

La Boca-Toma del canal diseñada para satisfacer las exigencias generales que se le impone a estas estructuras, se tomó especial cuidado y se dispuso en forma que se evitara la entrada de los rípios gruesos al canal.



Bocatoma

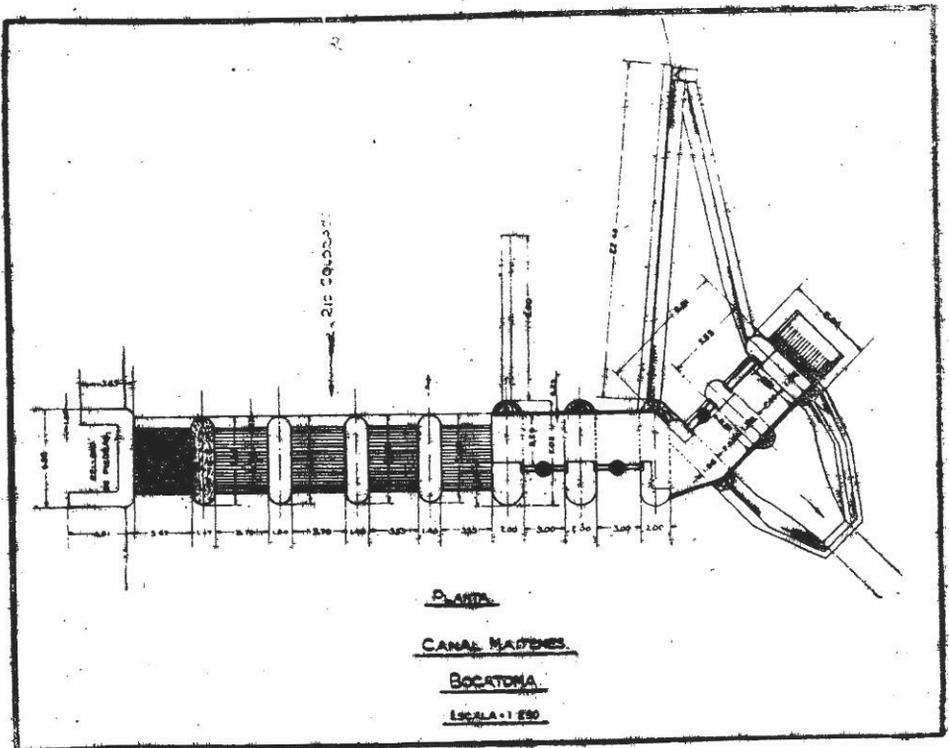
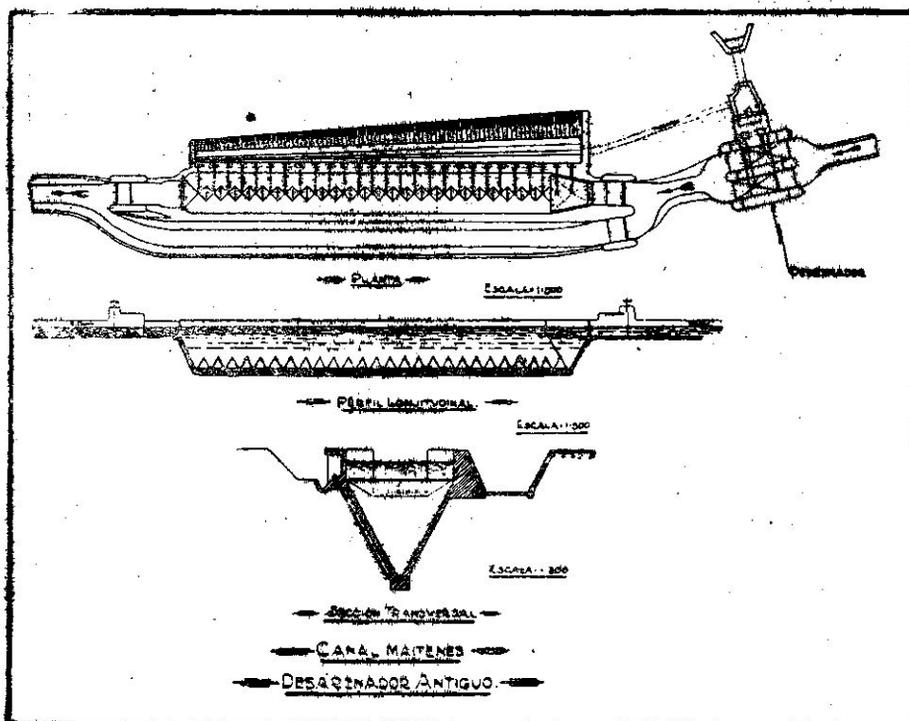


Fig. N.º 4



[Fig. N.º 5

Desripiador.—El desripiador está colocado a 330 mts. de la boca-toma y consiste en un ensanchamiento brusco del canal, cuyo fondo se ha rebajado en forma de un embudo de cuyos vértices inferiores parte una alcantarilla por la cual por medio de una compuerta de fondo se devuelven al río los rípios depositados.

Desarenador.—El desarenador estaba formado por un depósito de 60 mts. de largo, 6.20 mts. de ancho, siendo su sección rectangular hasta la altura de 1.60 mts. y el resto de la sección triangular con un ángulo de 60° en el vértice.

La profundidad del agua era de 6 mts. El fondo estaba cortado por conos de 1.80 mts. de base y 1.60 mts. de alto. Del fondo de cada uno de los huecos piramidales que dejaban estos conos salía un tubo de concreto de 0.15 m. de diámetro, se curvaba hacia arriba para desempeñar el papel de sifón que descarga a un canal lateral.

El depósito sedimentante tenía una compuerta de entrada y otra de salida que permitía aislarlo para su limpieza periódica. Mientras esta limpieza se ejecutaba, el agua pasaba por un canal lateral.

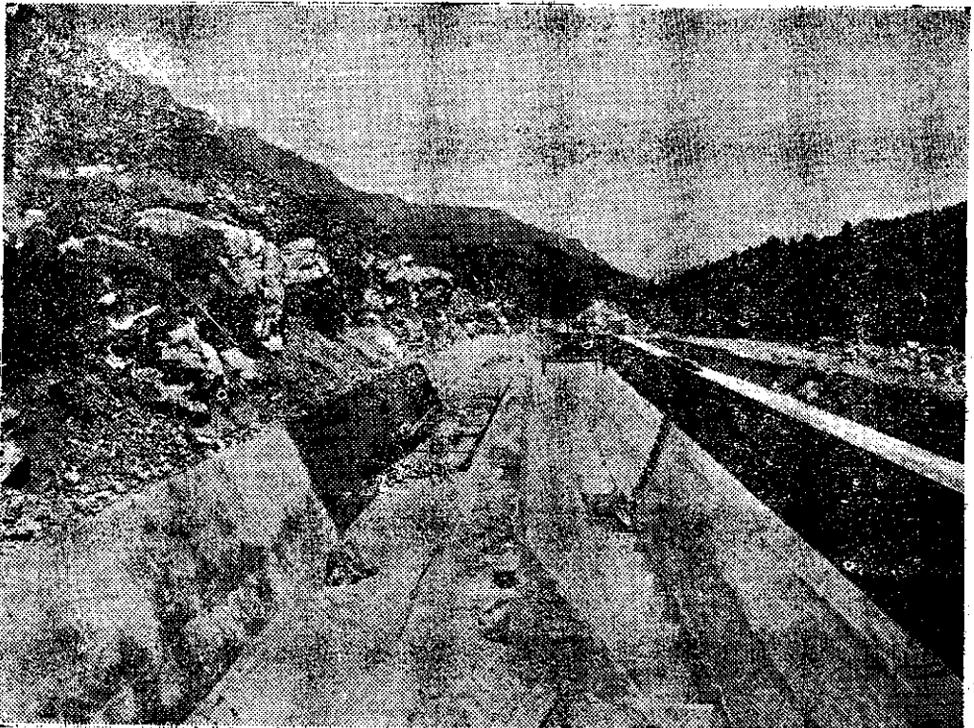
El funcionamiento teórico de esta estructura es muy sencillo: dado el ensanchamiento de la sección a 21,70 m²., la velocidad del agua se reducía a 0.50 mts. por segundo. Con esta reducción de la velocidad, un gran porcentaje del sedimento grueso se precipitaba al fondo de los conos inferiores para ser expulsada hacia el canal lateral por los sifones, los cuales se habían calculado para mantener una velocidad que permitía el arrastre de estos sedimentos.

La cualidad principal de esta estructura, según los que la proyectaron, era en primer lugar su limpieza automática, que reducía casi en su totalidad el costo del manejo. En la práctica resultó un fracaso de tal naturaleza que fué necesario reformarlo antes de poner en explotación la planta.

Las causas de su fracaso han sido:

- 1) La limpieza automática no se realizó por la obstrucción de los sifones.
- 2) Dado su reducida sección y longitud, su capacidad precipitadora no alcanzaba a ser superior a un 30% de los sedimentos.

En dos de los experimentos se taparon 10 sifones en el primero y 15 en el segundo



Desarenador antiguo.

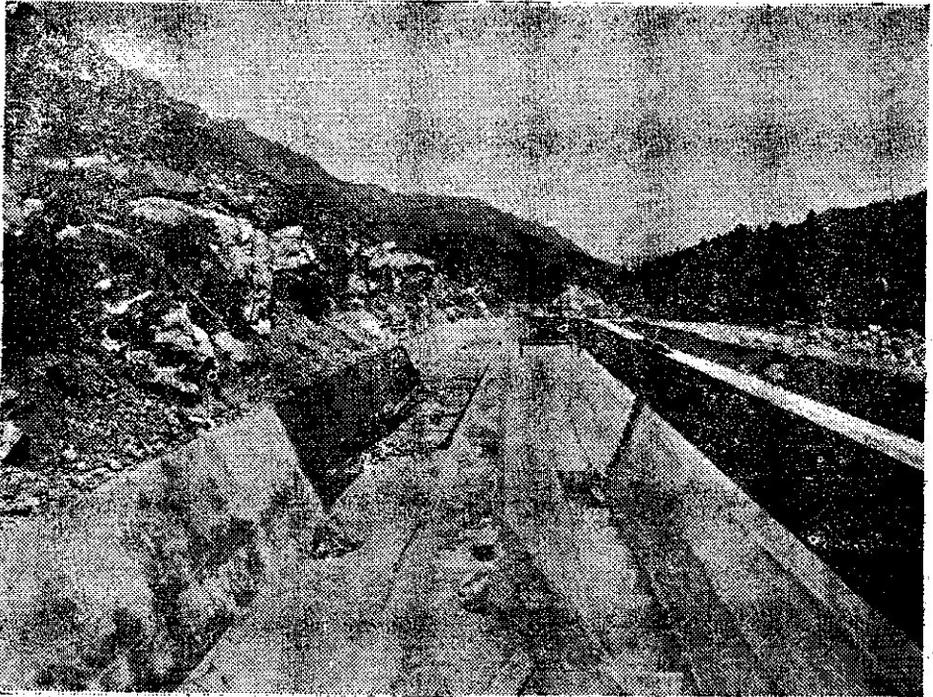
El funcionamiento teórico de esta estructura es muy sencillo: dado el ensanchamiento de la sección a 21,70 m²., la velocidad del agua se reducía a 0.50 mts. por segundo. Con esta reducción de la velocidad, un gran porcentaje del sedimento grueso se precipitaba al fondo de los conos inferiores para ser expulsada hacia el canal lateral por los sifones, los cuales se habían calculado para mantener una velocidad que permitía el arrastre de estos sedimentos.

La cualidad principal de esta estructura, según los que la proyectaron, era en primer lugar su limpieza automática, que reducía casi en su totalidad el costo del manejo. En la práctica resultó un fracaso de tal naturaleza que fué necesario reformarlo antes de poner en explotación la planta.

Las causas de su fracaso han sido:

- 1) La limpieza automática no se realizó por la obstrucción de los sifones.
- 2) Dado su reducida sección y longitud, su capacidad precipitadora no alcanzaba a ser superior a un 30% de los sedimentos.

En dos de los experimentos se taparon 10 sifones en el primero y 15 en el segundo



Desarenador antiguo.

de los 27 sifones que tenía el desarenador. Obstruyéndose con preferencia los sifones de la entrada hasta el N.º 12.

Para salvár estas dificultades se hizo una serie de minuciosos experimentos sobre los sedimentos del río Colorado y los que entraban en el canal.

DETERMINACIÓN DEL SEDIMENTO DE LAS AGUAS DEL RÍO COLORADO (1)

Análisis de sedimento.—Las muestras de agua con las cuales se ha experimentado han sido sacadas del río Colorado en Maitenes a principios de Febrero de 1921, época en que el río bajo condiciones normales debe traer aproximadamente el máximo de sedimentos.

Las muestras de agua fueron sacadas en un punto en que el río tenía 1.00 metro de profundidad y se sacaron muestras a 0.25, 0.60 y 0.90 metros sobre el fondo.

Según los aforos efectuados en el mismo punto, el gasto del río era de 33.00 metros cúbicos por segundo.

Según el análisis químico, los sedimentos del río Colorado tienen la siguiente composición media: óxidos de fierro y aluminio 28,7%, sílice 45,6%, óxido de calcio 9,8%, óxido de magnesia 7,3%, materias orgánicas 7,5% y álcalis 1.1%.

El peso específico de sedimento obtenido fué 2.5 y la cantidad en peso a las diversas alturas se encontró que estaba distribuido como sigue:

Tabla N.º 1

Altura sobre el fondo	Sedimentos por mts. cúbico de agua
0.25 Mts.	4,611 Kgls.
0.60 »	3,725 »
0.90 »	3,966 »

Como se puede ver en el diagrama N.º 1 que muestra los kilogramos de sedimentos por metro cúbico de agua a diferentes profundidades, en la mitad superior la cantidad de sedimento en suspensión está distribuida uniformemente. Desde la mitad hacia abajo la cantidad de sedimento aumenta y se hace mucho más pronunciadas cerca del fondo.

(1) Experimentos ejecutados por el departamento Hidráulica de la Cía. Chilena de Electricidad Ltda., bajo la dirección del Ingeniero señor A. Gatti.

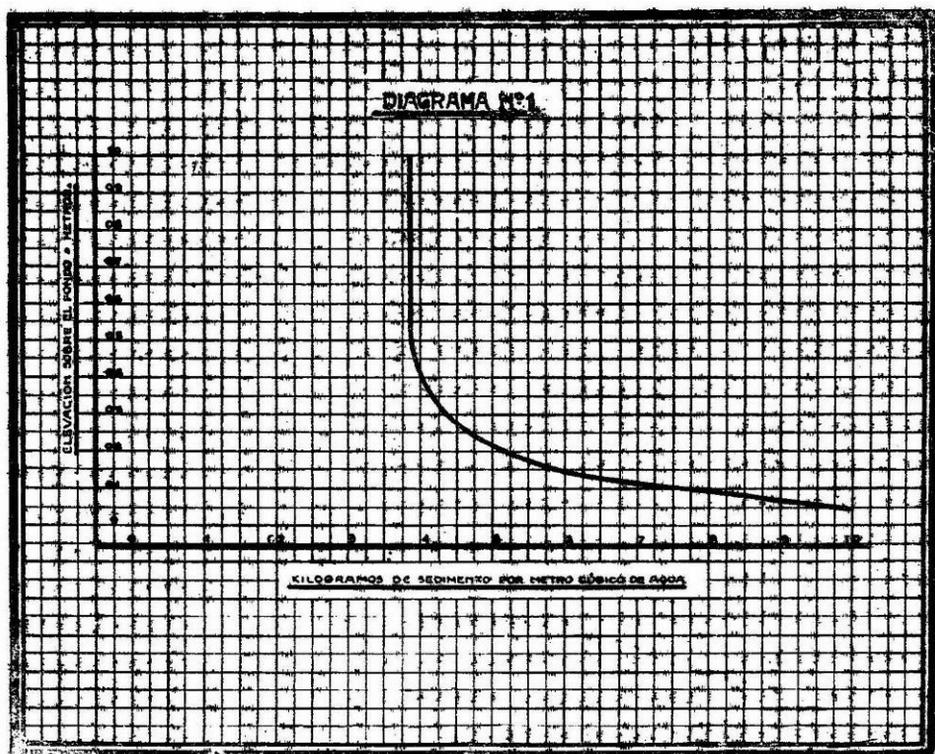


Fig. N.º 6

Para hacer la clasificación de sedimento de los acuerdos con su tamaño se ha empleado un juego de harneros US. Standard Testing Sieves, cuyas características se expresan a continuación Tabla N.º 2.

Tabla N.º 2

Harnero N.º	Diámetro de los orificios mjm
40	0.381
60	0.221
80	0.173
100	0.140
120	0.117
150	0.104
200	0.074

En la tabla siguiente va expuesto en detalle el resultado de la clasificación del sedimento según su tamaño y considerando las distintas profundidades separadamente.

Tabla N.º 3

Harrero N.º	Porcentaje	Retenido	
	a 0.25	a 0.60	a 0.90
40	8.20	4.84	5.04
60	17.48	22.63	18.09
80	27.88	34.33	31.45
100	35.23	45.87	37.89
120	40.41	49.80	41.04
150	46.60	53.73	45.28
200	81.50	62.75	55.77

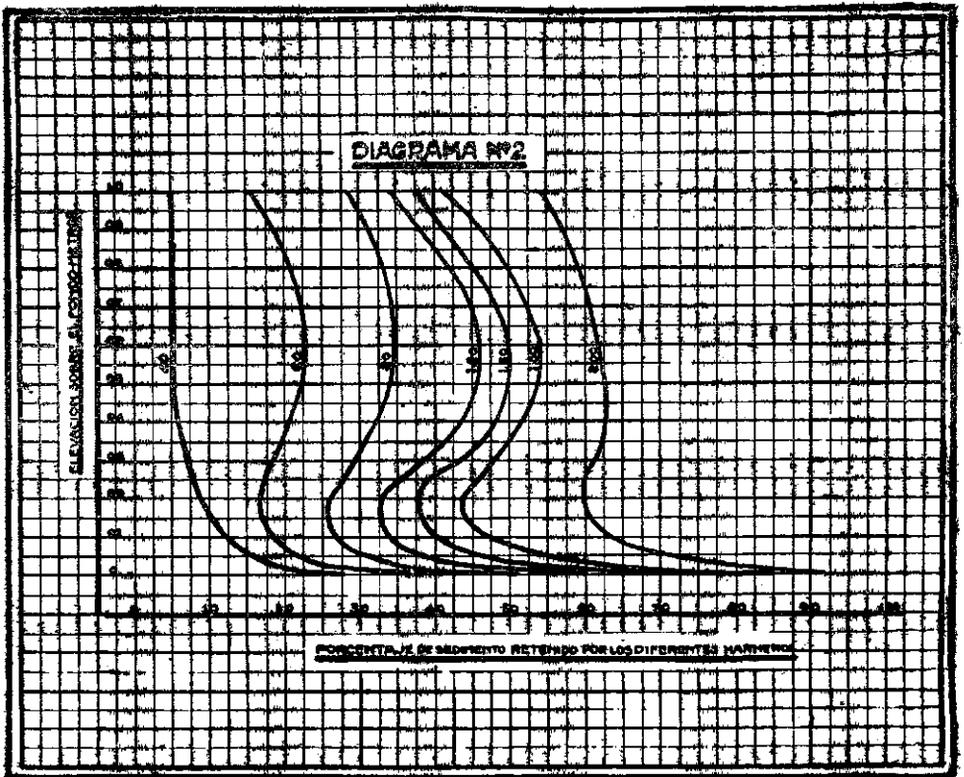


Fig. N.º 7

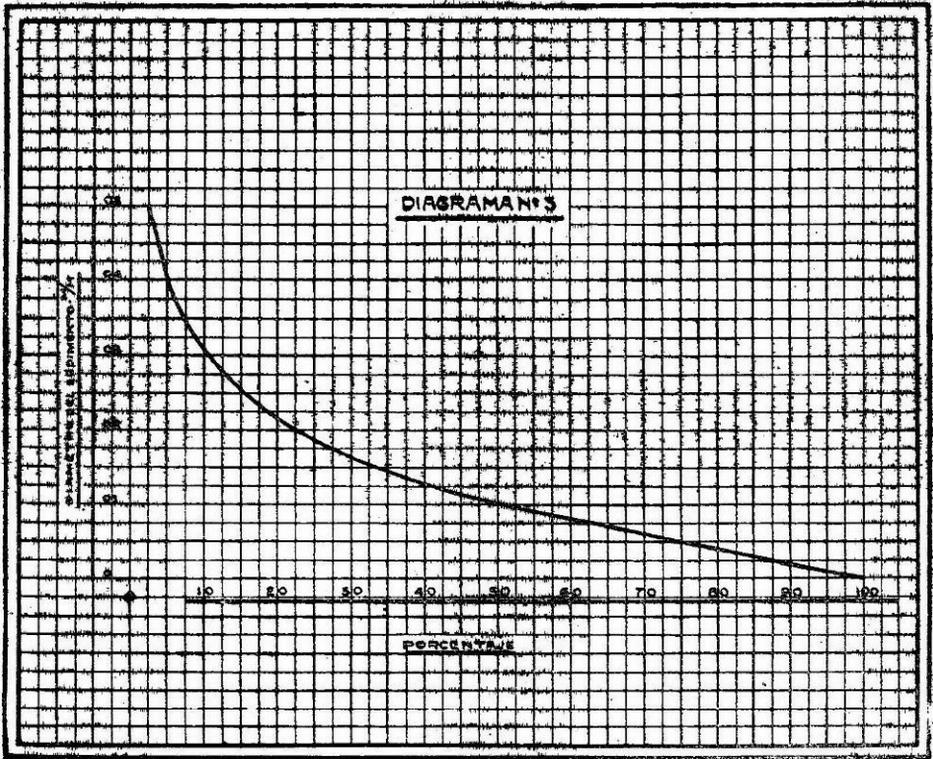


Fig. N.º 8

Del diagrama N.º 2 se desprende que el sedimento más grueso, retenido por el harnero N.º 40, está uniformemente distribuido en la mitad superior y que su porcentaje aumenta rápidamente hacia el fondo; este aumento rápido hacia el fondo es general a todos los tamaños del sedimento, pero no así la distribución uniforme de las capas de más arriba. Para los sedimentos menores, que han atravesado el harnero N.º 40, el porcentaje cerca de la superficie es aproximadamente igual al porcentaje del sedimento del mismo tamaño que se encuentra a $1/5$ de la profundidad sobre el fondo. En cambio, entre $1/2$ y $2/3$ de la profundidad sobre el fondo se nota un marcado aumento en el porcentaje del sedimento grueso, lo que seguramente se debe a que más o menos a esa profundidad se produce la velocidad mínima.

Combinando los resultados obtenidos a distintas profundidades se llega a la Tabla siguiente, que está gráficamente representada en el Diagrama N.º 3 y que muestra el porcentaje de cada tamaño de sedimento contenido en su volumen de agua que abarque desde la superficie hasta el fondo del río.

Tabla N.º 4

Harnero N.º	Porcentaje retenido	Porcen. de cada tamaño
40	6.17	6.17
60	19.25	13.08
80	30.99	11.74
100	39.26	8.30
120	43.47	4.18
150	48.35	4.88
200	60.38	12.03
		39.62

Sin error apreciable puede estimarse que el grueso del sedimento está comprendido entre tamaños de 0.05 m/m a 0.4 m/m diámetro, o sea un 70% más o menos está entre estos límites según se desprende del diagrama N.º 3.

Tabla N.º 5

Harnero N.º	Porcentaje retenido
40	5
60	20
80	33
100	41
120	44
150	49
200	53

Como puede observarse, los porcentajes correspondientes a diferentes tamaños de sedimentos según la Tabla N.º 5 son prácticamente los mismos que figuran en la Tabla N.º 4 y por lo tanto puede usarse el Diagrama N.º 3 como representativo de la Tabla anterior sin introducir ningún error apreciable.

Velocidad de sedimentación: Según los experimentos hechos en tubo de vidrio, las velocidades de sedimentación obtenidas para los diferentes tamaños de sedimentos fueron las siguientes:

Tabla N.º 6

Tamaño del sedimento	VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN EN M/M. POR SEGUNDO		
	De las partículas más grandes	De las partículas más chicas	El grueso del sedimento
más 40—40	100	45	69
40—60	64	11	36
60—80	45	7.5	23
80—100	37	6.4	18
100—120	30	5.0	16
120—150	24	3.5	14
150—200	16	2.0	11
menos —200	11	0.3	6

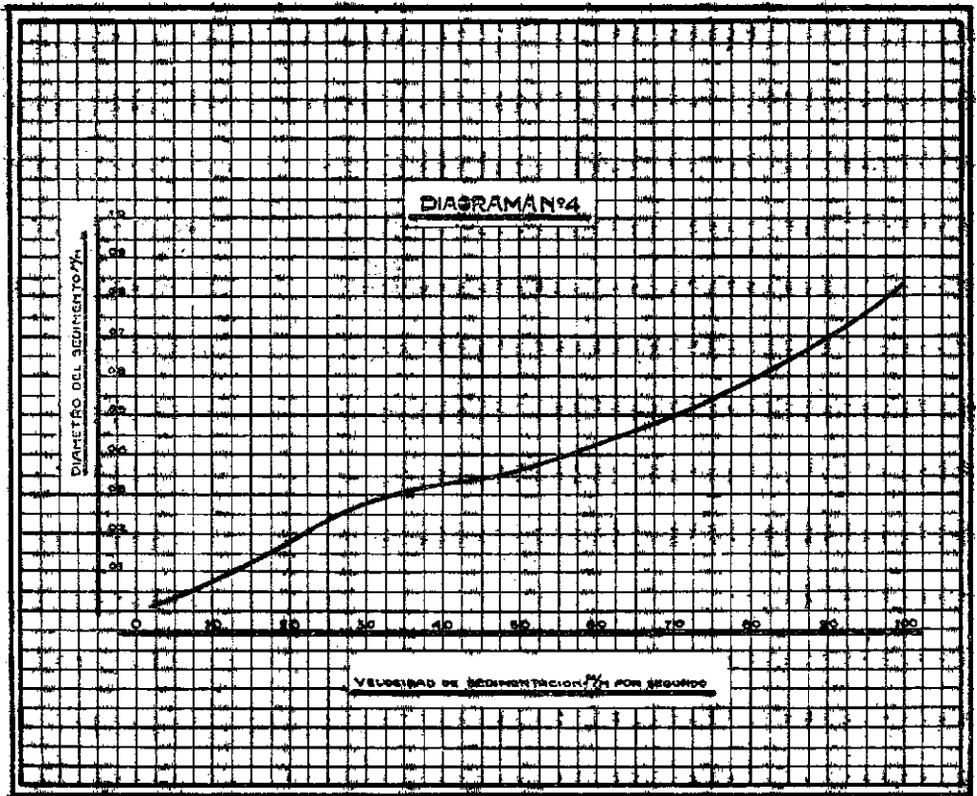


Fig. N.º 9

En el diagrama N.º 3 se ve que el 50% del sedimento tiene un diámetro mayor que 0,1 m/m; por consiguiente, una velocidad de sedimentación mínima de 13 m/m por segundo. Siendo la velocidad media de 39 m/m aproximadamente.

El otro 50% del sedimento, cuyo diámetro es menor de 0,1 m/m tiene una velocidad de sedimentación de 13 m/m como máximo y una media de 11 m/m por segundo.

El grueso del sedimento varía como ya se ha dicho anteriormente, entre 0,05 y 0,4 m/m de diámetro a los que corresponden velocidades de sedimentación de 8 a 56 m/m por segundo y una velocidad media de 25 m/m por segundo.

Como se ve en la Tabla N.º 5, un poco más del 50% del sedimento es de un diámetro mayor que 0,074 m/m, es decir, es retenido por el harnero N.º 200 y para eliminarlo se tendría que reducir la velocidad a 11 m/m por segundo; el resto del sedimento, es decir, del que pasa por el harnero N.º 200 tiene una velocidad de sedimentación de 6 m/m por segundo.

Experimentos en el Canal de Maitenes

El 23 de Enero de 1922 se ejecutaron experimentos sobre los sedimentos arrastrados en el canal de Maitenes para determinar la eficiencia de las obras destinadas a quitar estos sedimentos.

Con este fin se tomaron muestras:

- 1) En el río.
- 2) En el canal entre el vertedero de entrada y las compuertas del canal.
- 3) En el canal entre el desrripiador y el desarenador.
- 4) En el canal abajo del desarenador.

Por medio del análisis de estas muestras se ha determinado la cantidad de sedimentos eliminados por el vertedero de superficie, el desrripiador y el desarenador.

La cantidad de sedimentos encontrados en las aguas del río fué de 3,33 por mil, en peso. Con el objeto de hacer una comparación en mejores condiciones de las cantidades de sedimento encontrado a lo largo del canal, se ha tomado la cantidad total del sedimento en el río como un 100%.

Se obtuvieron los siguientes resultados:

- A. Sedimentos en el río, 100%.
- B. Sedimentos abajo del vertedero de superficie, 89,32%.
- C. Sedimentos entre el desrripiador y el desarenador, 78,59%.
- D. Sedimentos abajo del desarenador, 48,92%.

La Tabla siguiente da la distribución detallada de estos porcentajes de acuerdo con los tamaños de los sedimentos.

Harnero N.o	Muestra A.	Muestra B.	Muestra C.	Muestra D.
40	35.70	13.43	5.35	0.54
40 a 60	14.76	12.39	11.08	0.69
60 a 80	8.71	8.35	8.35	1.82
80 a 100	7.63	7.35	6.79	2.30
100 a 120	5.41	4.11	3.67	2.30
120 a 150	3.78	3.03	2.91	2.25
150 a 200	5.84	5.50	5.35	6.52
200	18.17	35.16	35.00	32.30
Total	100	89.32	78.59	48.92

En el diagrama adjunto se ha hecho una representación gráfica de la tabla precedente.

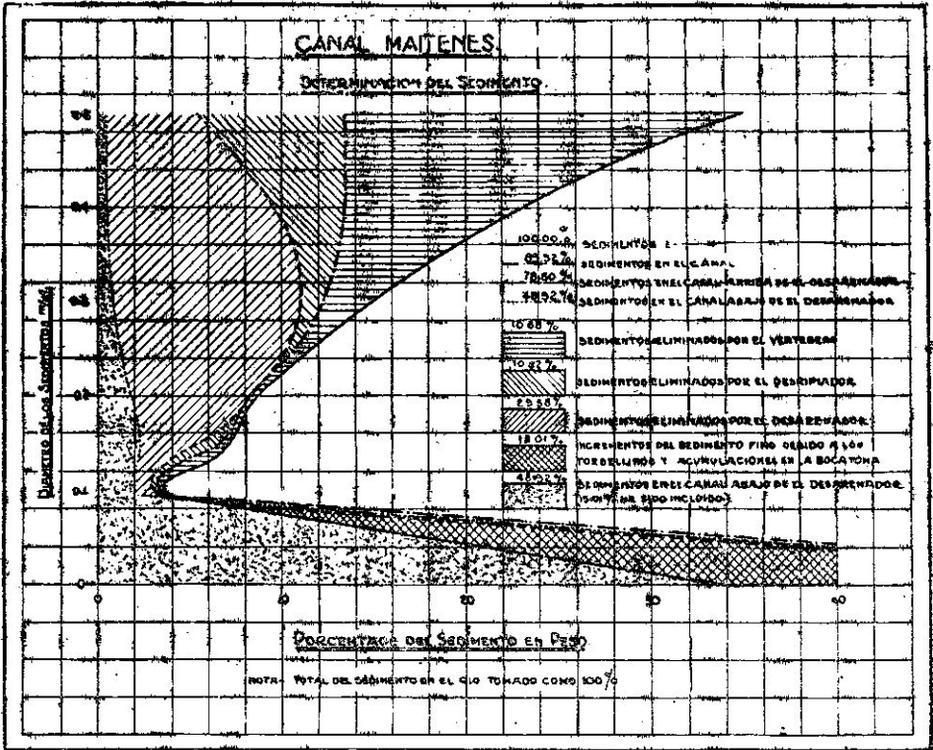


Fig. N.º 10

Es necesario hacer notar el marcado incremento de los sedimentos finos en el agua del canal, comparados con los del mismo tamaño contenido en el río. Este resultado irracional es indudablemente debido a las malas condiciones de la boca-toma. Considerables torbellinos se producen justamente debajo del vertedero de superficie y como una consecuencia de esto se produce una acumulación de sedimentos finos que son arrastrados hacia el canal incrementando su porcentaje.

Entre el vertedero de superficie y el descripiador se produce una eliminación de 10,82%.

El desarenador redujo los sedimentos de tamaño grueso y medio de totalidad.

El diagrama muestra que el porcentaje de sedimentos desde 0,5 m/m de diámetro hasta 0,1 m/m que pasaron hacia abajo del desarenador fueron un 0,5% para el sedimento grueso y 2,3% para el sedimento fino.

Las partículas menores de 0,1% tienen una velocidad media de sedimentación de 8% por segundo y para que tenga tiempo de caer 2 mts. verticalmente, el desarenador debía haber tenido 137,50 mts. de largo.

De estos experimentos se desprende que el único medio de producir una sedimentación eficiente es haciendo pasar el agua por una laguna de gran sección, para reducir la velocidad del agua tanto como sea posible y de un largo tal que permita que estos sedimentos en sus movimientos de avance y descendente lleguen a depositar en el fondo.

MODIFICACIONES DE LAS OBRAS

Después de estos estudios se llegó a la conclusión que había necesidad de modificar algunas de las obras existentes en el canal y proyectar otras nuevas. Se modificó la boca-toma y el desarenador, se proyectó un nuevo desripador y una laguna de sedimentación.

Boca-toma.—La boca-toma tenía dos defectos manifiestos.

- 1) Permitía la entrada de ripios gruesos.
 - 2) Se acumulan en gran cantidad piedras y ripios frente al vertedero de entrada.
- Para subsanar la primera dificultad se agregó sobre el vertedero de entrada un

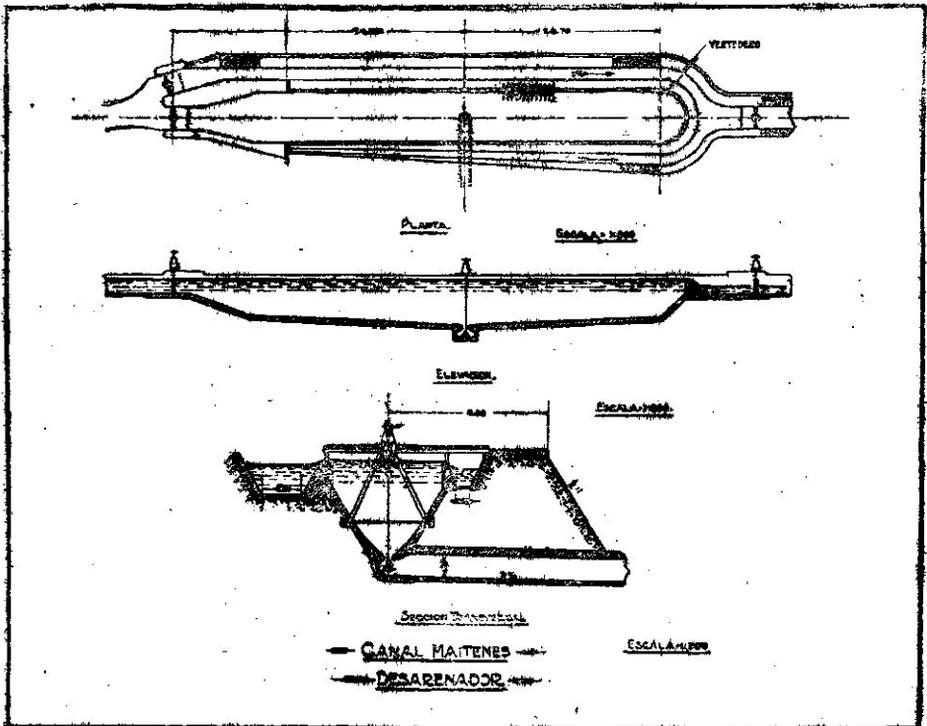
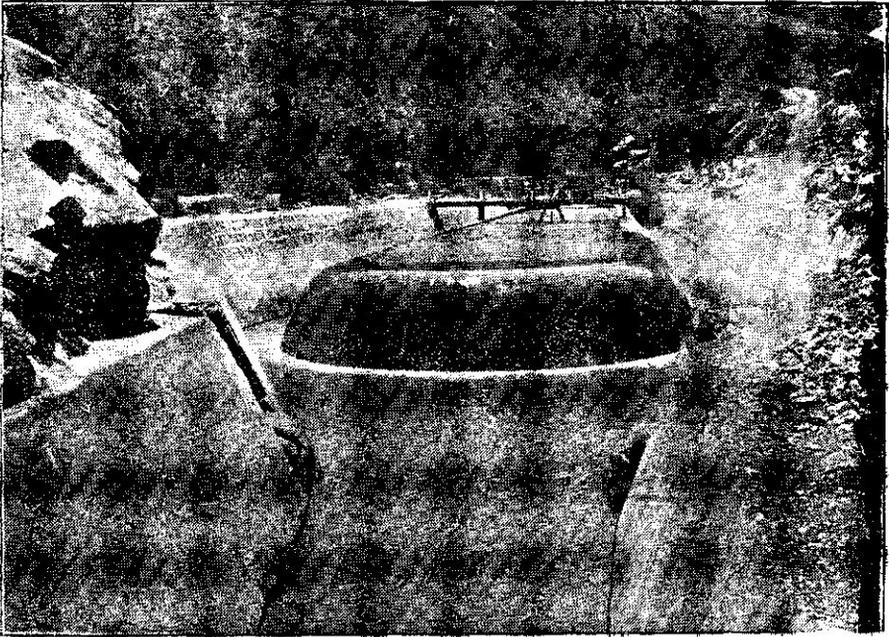


Fig. N.º 11

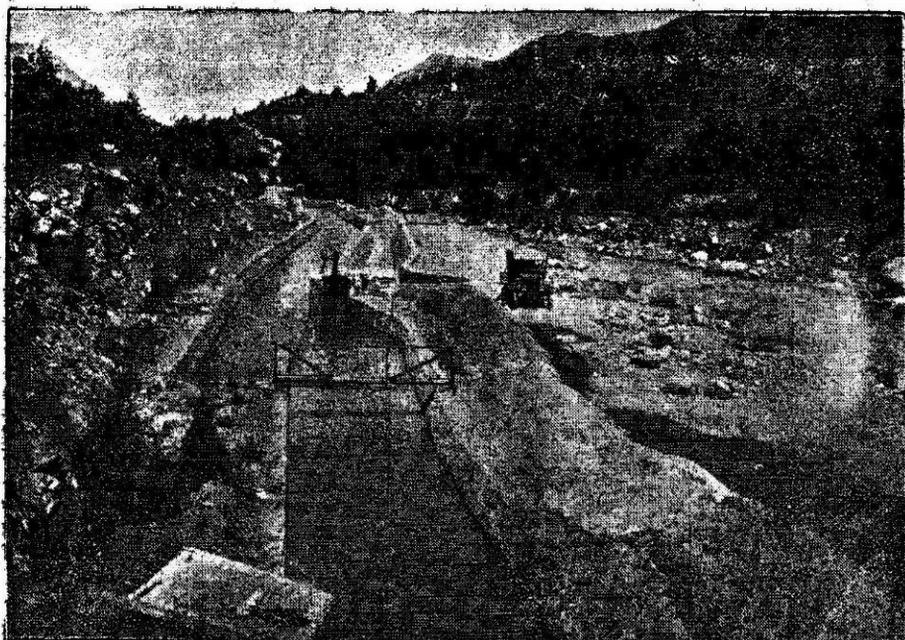
rebalse movable de tablonés que permite levantar este vertedero en épocas de gastos máximos del río y tomar así una napa de aguas superficiales, y se agregó antes de estos tablonés una rejilla de fierro que impide la entrada de ripios mayores de $1\frac{1}{2}$ ".

La segunda dificultad se subsanó cambiando las compuertas de la presa del río por otras de manejo rápido, que permiten producir bruscos cambios de velocidad para que sean arrastrados los ripios depositados frente al rebalsadero de entrada y se agregó un muro de 11 mts. de largo que sale del último machón de las compuertas de la presa, lo que facilita el arrastre de los ripios por la canalización de la parte que queda frente al vertedero de entrada.



Desarenador. Vertero de salida.

Desarenador.—Al desarenador se le suprimieron los sifones, se le hizo un vertedero en casi toda su longitud, se redondeó su fondo y hacia el centro se le dejó una fuerte pendiente desde ambos extremos, se colocó una válvula coniva invertida que descarga en un túnel de gran pendiente que conduce los sedimentos al río. Para facilitar su limpieza se agregó una compuerta en la parte inferior del canal que permite levantar el nivel del agua y rebalsar por el vertedero en sentido inverso.



Desripiador

Nuevo desripiador.—Este desripiador está colocado inmediatamente antes del vertedero regulador y a la salida del túnel N.º 1 y consiste simplemente en un ensanchamiento del canal, un vertedero de superficie y una compuerta de fondo que permite la descarga de los rípios depositados en su fondo.

LAGUNA DE SEDIMENTACIÓN

Como resultado de los experimentos efectuados en el río Colorado y en el canal de Maitenes, se encontró que la boca-toma eliminaba 10,7%, el desripiador 10,8% y el desarenador 29,5% de los sedimentos lo que hacía un total de 51% siendo arrastrado hacia abajo un 49%.

Con las modificaciones de las obras y el nuevo desripiador se calculó que la boca-toma eliminaría un 15%, el desripiador 15% y el desarenador 35%, quedando en consecuencia un 35% que debía ser eliminado en la laguna de sedimentación. Este 35% está constituido por el sedimento más fino.

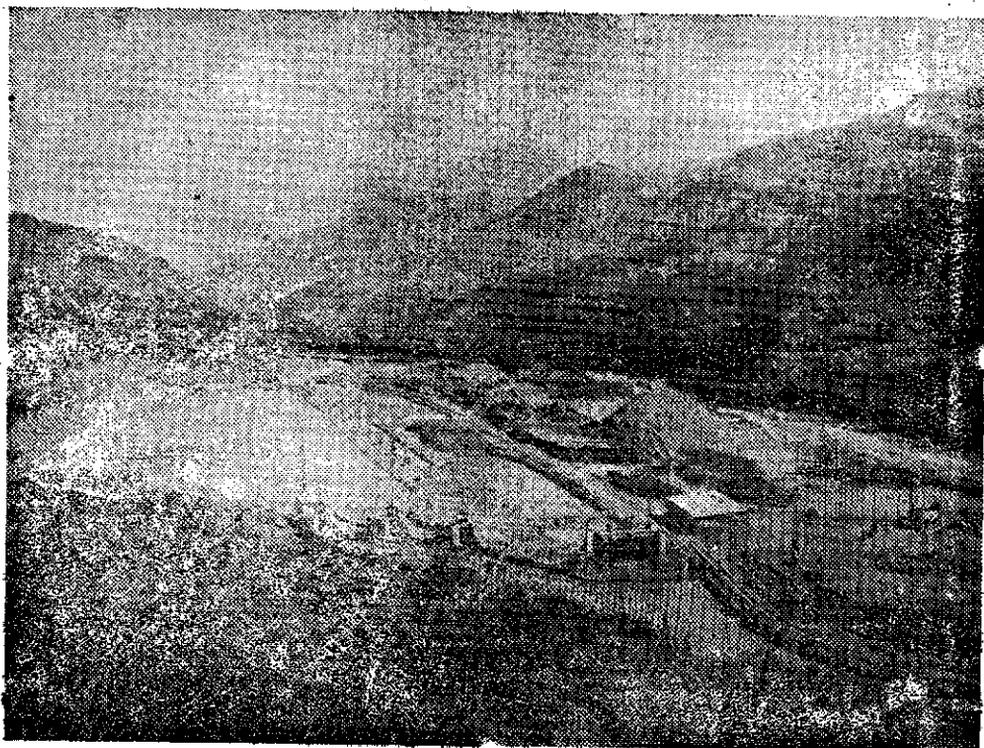
Este proyecto de laguna de sedimentación debe tener las siguientes cualidades.

1) Gran capacidad de precipitación para que deposite estos sedimentos que tienen una pequeña velocidad de sedimentación (4 m/m por segundo de velocidad mínima y 11 m/m por segundo de velocidad media).

2) Gran facilidad de limpieza que permita un aseo rápido y económico.

3) No interrumpir el funcionamiento de la planta ni dejar pasar los sedimentos cuando se ejecute su aseo.

La laguna de sedimentación se ha proyectado en el Km. 1,10, lugar que ofrecía una topografía apropiada al objeto.



Laguna de sedimentación.

Existen muy escasos estudios que permitan determinar en forma más o menos precisa las dimensiones generales de una laguna de sedimentación.

Se han efectuado minuciosos estudios con el fin de determinar la velocidad del agua que impide el depósito de los sedimentos, llegándose a formular la ley de Kennedy; pero no se han ejecutado experimentos para determinar la velocidad límite a la cual se depositan cada tamaño de sedimento y sólo se ha determinado la velocidad de sedimentación de cada tamaño de ellos en aguas tranquilas.

El mejor estudio sobre esta materia es el publicado por «Allen Hazen», titulado «On sedimentation» in «Transactions of the American Society of Civil Engineers» Diciembre 1904.

Según los resultados de Hazen, la velocidad a la cual las partículas se depositan

en aguas tranquilas, aproximadamente debe ser la velocidad con que pueden depositarse en un escurrimiento uniforme a esta velocidad; según esto, la velocidad en fondo debe ser igual o menor que esta velocidad de precipitación. Siendo V la velocidad media del agua en la sección de la laguna, esta velocidad debe ser f veces mayor que la velocidad del fondo, f varía de 20 a 40. Hazen llega a la conclusión que el largo L que se obliga a recorrer al agua debe ser la distancia que el agua recorrería mientras una partícula se precipita desde la superficie al fondo.

Sea:

S = Sección transversal en m^2 .

Q = Gasto en m^3 . seg.

v = velocidad de sedimentación.

V = Velocidad media del agua.

w = Ancho de la laguna.

d = Profundidad de la laguna.

L = Largo de la laguna.

Tenemos

$$S = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{fv} = wd$$

$$L = 1.5 \text{ fd}$$

Debemos adoptar un valor de d que depende de la profundidad anterior a canal, condiciones topográficas del terreno, altura disponible para su descarga a fondo, porcentaje de sedimentos arrastrados por las aguas, porcentaje de sedimento que se quiera eliminar, cantidad de arenas que se permite acumular en la laguna es decir, de tiempo a que se puede ejecutar cada limpieza y por consideración económicas.

En Maitenes se tomó $d = 5$ m. como profundidad media.

Siendo:

$Q = 11$ m^3 . seg.

$v = 0.004$ m. seg.

$V = 0.068$ m. seg.

$f = 22$

El valor de v se determina por la cantidad de sedimentos que se desea eliminar que en nuestro caso se fijó un 90% comprendida hasta los sedimentos de 0.022^m .

Se fijaron a la laguna las siguientes características generales:

	Dos bases	Una base
Largo efectivo	150 mts.	150 mts.
Profundidad media	5 »	5 »
Ancho medio	50 »	25 »
Sección transversal	250 m ² .	125 m ² .
Velocidad media	0.044 m: seg.	0.088 m: seg.
Tiempo que demora el agua en pasar por la lag.	56.8 m.	28.4 seg.
Capacidad	27 400 m ³ .	13 700 m ³ .

En una estructura de esta naturaleza requiere especial cuidado la entrada del agua, de modo que permita una distribución uniforme para que la corriente no se localice y pierda de este modo su eficiencia. Haciendo el ensanchamiento en forma progresiva es necesario darle a las paredes una inclinación divergente no mayor de

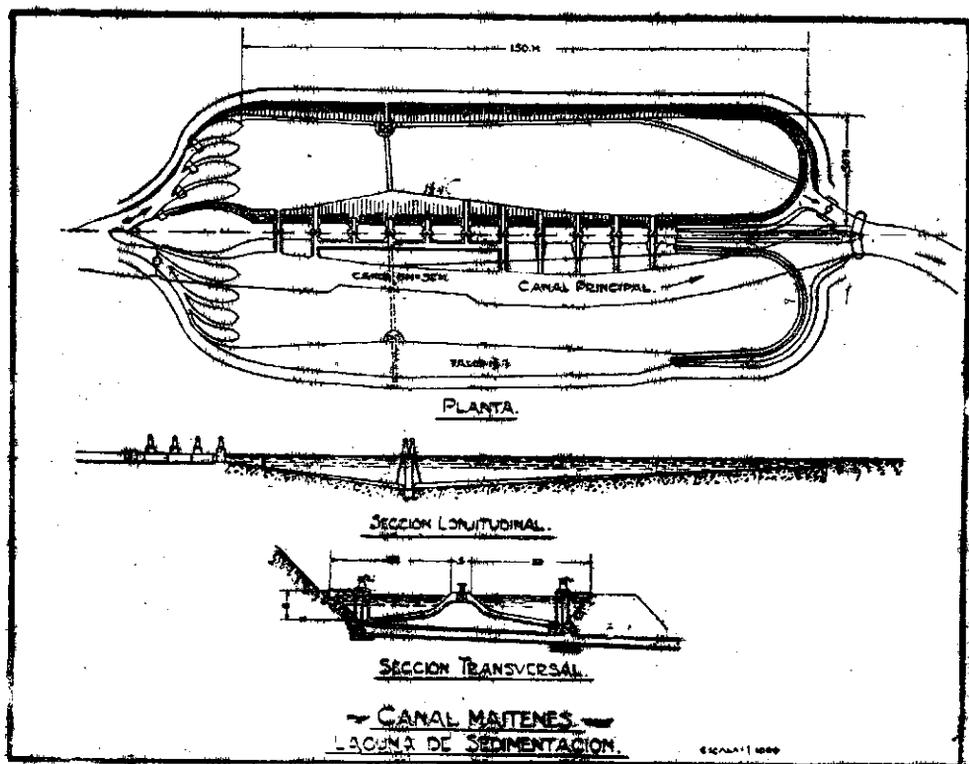


Fig. N.º 12

	Dos bases	Una base
Largo efectivo	150 mts.	150 mts.
Profundidad media	5 »	5 »
Ancho medio	50 »	25 »
Sección transversal	250 m2.	125 m2.
Velocidad media	0.044 m: seg.	0.088 m: seg.
Tiempo que demora el agua en pasar por la lag.	56.8 m.	28.4 seg.
Capacidad	27 400 m3.	13 700 m3.

En una estructura de esta naturaleza requiere especial cuidado la entrada del agua, de modo que permita una distribución uniforme para que la corriente no se localice y pierda de este modo su eficiencia. Haciendo el ensanchamiento en forma progresiva es necesario darle a las paredes una inclinación divergente no mayor de

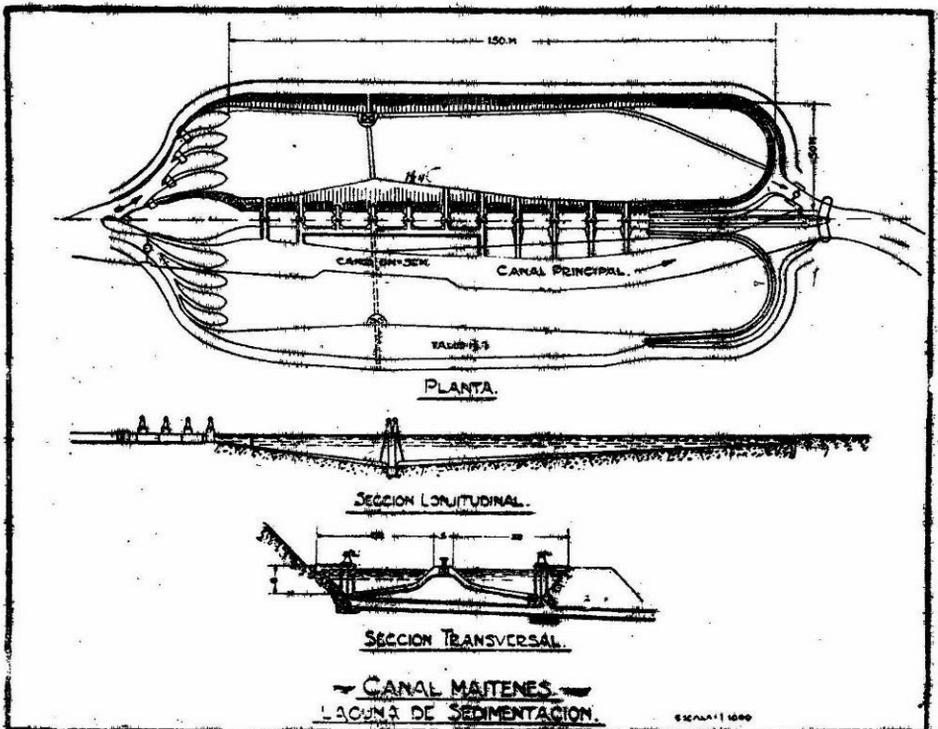


Fig. N.º 12

10°, lo que impone un largo excesivo a la parte destinada a la regularización de la velocidad. Esta dificultad impuso la construcción de canales de distribución que adoptaron 5 para cada base.

Siendo la sección del canal antes de la laguna de 7,59 m². y la velocidad del agua de 1,47 mts. por segundo, los canales de entrada se diseñaron para mantener la misma velocidad que impide el depósito del sedimento en ellos.

Para permitir solamente el paso hacia el canal principal de una delgada capa de agua superficial, al final de la laguna se diseñó un vertedero curvo de 80 mts. de largo. No habiendo altura disponible, este vertedero se tuvo que proyectar como vertedero sumergido y su cálculo se hizo por la fórmula Basin, dando un espesor de la napa de 0,21 m.

Con el objeto de facilitar la limpieza, además de las compuertas de entrada, que permiten producir golpes de agua en sentido longitudinal, se colocaron 11 compuertas sobre la verja que separa al canal de la base y que permiten producir descargas transversales. Para la limpieza de la parte próxima al vertedero se colocaron sobre él 5 compuertas, pudiéndose además rebalsar el agua en sentido inverso. El fondo de la laguna totalmente revestido de piedra en seco se ha dado pendiente hacia un grupo de dos válvulas cónicas invertidas que descarga sobre un tunel de fuerte pendiente que los conduce al río. Para el aislamiento de la base se colocó una compuerta en la parte inferior.

Se ha constituido solamente una de las bases de los dos proyectados.

Esta laguna de sedimentación es una de las tentativas más grandes ejecutadas con objeto de resolver el problema de los sedimentos en las plantas hidro-eléctricas.

Actualmente se encuentra en servicio, pero su eficiencias sólo se podrá evidenciar en el verano próximo, época de gasto máximo en el río Colorado. En este período de explotación se ha visto que los resultados esperados han sido obtenido ampliamente, su capacidad principitadora es de la amplitud que se había calculado y su facilidad de limpieza se ha comprobado dejando acumularse en ella 4300 m³. de arena sin que se ofreciera ningún inconveniente para su limpieza, por los dispositivos proyectados con este objeto.