

CENTRAL CANUTILLAR

BARRERA CHAMIZA

INFORME

PROTECCIONES DE ENROCADOS



JUNIO 1988

SECCION OBRAS HIDRAULICAS

E N D E S A

HMM/ammj
10.06.88

1.- ANTECEDENTES GENERALES

La barrera Chamiza de la Central Canutillar, se ubicará sobre el río del mismo nombre, inmediatamente aguas abajo de su confluencia con el río Blanco, aproximadamente a 1 km aguas abajo del nacimiento del río Chamiza en el lago Chapo.

Esta obra permitirá aumentar el volumen de regulación de la central, su altura de caída y además desviar las aguas del río Blanco hacia el lago Chapo, para utilizarlas posteriormente en la central Canutillar.

La obra consistirá en una estructura de vertedero de hormigón que se situará entre 2 muros laterales apoyados en rellenos compactados. Ella tendrá 55 (m) de longitud vertiente y 7 m de altura, con toda desde la protección a la salida de la cubeta y el coronamiento del vertedero. Estará fundada sobre materiales laháricos en los que predomina una matriz arenosa, con intercalaciones de gravas, bolones y bloques. Como los dientes de la estructura se fundarán a una profundidad de 8 m, bajo el terreno de aguas arriba, para efectuar la excavación hasta ese nivel se consulta deprimir la napa mediante un sistema de pozos profundos. Paralelamente será necesario desviar el río Blanco mediante un cauce excavado artificialmente para alejar esta fuente de recarga de la napa.

En el costado derecho de la barrera se dispondrá un vano que se cerrará mediante una compuerta de 3,60 m de ancho.

Aguas arriba y aguas abajo de la estructura de hormigón se han diseñado sendos canalones que permitirán la adecuada circulación de las aguas durante la evacuación de crecidas sobre el vertedero de la barrera. (ver figura N° 1).

Las obras descritas se construirán en seco en una primera etapa, pues no se interfieren mayormente con los cauces y las aguas de los ríos Blanco y Chamiza. No así el muro izquierdo de la barrera, el que quedará fundado directamente sobre el actual cauce del río Chamiza. Este pretíl se construirá en el estiaje de los años 1991/1992, con la Central Canutillar en servicio y habiendo logrado deprimir el nivel del lago Chapo, de tal forma que no haya vertimientos hacia el río Chamiza. Paralelamente, el río Blanco y otros caudales menores que haya recogido el río Chamiza, se habrán desviado hacia el vano existente en el costado derecho de la estructura de hormigón.

El objetivo de este informe es el de establecer las características de los enrocados de protección, de las diversas obras de la barrera Chamiza que quedarán expuestas a escurrimientos y a fenómenos de turbulencia generados por ellos.

La Fig. 1 muestra una planta de las obras ya descritas. Las protecciones que se estudian e indican en este informe son las siguientes :

- Protecciones a la salida de la cubeta de disipación de energía, al pie del vertedero.
- Protecciones a la salida de la compuerta de fondo ubicada en el costado derecho de la obra.
- Protecciones en la entrada a la compuerta de fondo.
- Protección del talud de aguas arriba del muro de tierra que cierra el cauce del río Chamiza.

En los párrafos siguientes se abordan los estudios indicados.

2.- PROTECCIONES A LA SALIDA DE LA CUBETA DISIPADORA DE ENERGIA.

Para proteger a la barrera vertedero de la socavación del terreno a la salida de la cubeta disipadora de energía, ésta tiene dientes de hormigón fundados a la cota 230 m, es decir 6,5 m bajo el terreno adyacente, de acuerdo a la excavación que se efectuará para conducir el agua evacuada hacia el cauce del río Chamiza. Sin embargo esta protección no es suficiente y la obra podría quedar expuesta a fallas por sustentación de aguas abajo y "piping". Una solución, consiste en disponer una carpeta de enrocados hacia aguas abajo de cierta longitud y que termina en un diente que es capaz de absorber la socavación del terreno.

Con el objeto de efectuar el análisis y dimensionar el enrocado de protección, se precisa conocer las características del flujo a la salida de la cubeta. El caudal de diseño de la obra, para la crecida milenaria del río Blanco y de los afluentes al Lago Chapo, sería de 450 (m³/s). Este valor fue entregado por el grupo de Proyecto de la Central Canutillar y fue obtenido de un estudio de tránsito de esta crecida en el lago.

En la sección 15 del río Chamiza, aguas abajo de la barrera Chamiza, de acuerdo con los cálculos del E.H. entregados por el Grupo de Proyecto, se tienen los siguientes valores del nivel y de la velocidad media :

Q	Z	\bar{v}
0 m ³ /s	234,64 m	-
100 "	237,36 m	1,63 m/s
200 "	238,40 m	2,21 "
300 "	239,23 m	2,61 "
400 "	239,91 m	2,89 "
450 "	240,23 m	3,08 "

4.

A partir de esta curva de descarga, es posible calcular una curva de descarga inmediatamente aguas abajo de la cubeta, suponiendo una longitud media del cauce de 125 m con un ancho medio estimado de 61 m y un coeficiente de rugosidad de Manning de $n = 0,050$.

Q	Z	\bar{v}	h
100 m ³ /s	237,76 m	1,30 m/s	1,26 m
200 "	238,82	1,41	2,32
300 "	239,73	1,52	3,23
400 "	240,51	1,63	4,01
450 "	240,88	1,68	4,38

La altura "h" del flujo está medida sobre el fondo a la cota 236,50 m, y como el enrocado a la salida de la cubeta se colocará a la cota 236,00 m, la altura "h" inmediatamente a la salida de la cubeta sería 0,50 m más alta y las velocidades algo menores.

Q	Z	\bar{v}	h
100 m ³ /s	237,76 m	1,03 m/s	1,77
200	238,82	1,28	2,84
300	239,73	1,45	3,75
400	240,51	1,61	4,51
450	240,88	1,67	4,89

La carga de diseño del vertedero es de $H_o = 1,82$ m y corresponde a un caudal evacuado de 292 m³/s. Para evacuar los 450 m³/s se requiere una carga de $H = 2,37$ m.

5.

En el gráfico de la figura 2 se muestran, para distintos caudales, las alturas de agua en la sección de aguas abajo de la cubeta disipadora de energía, en los siguientes casos:

- Altura conjugada del torrente al pie del vertedero.
- Altura de agua sin el diente final de la cubeta.
- Altura de agua con el diente de aguas abajo de la cubeta.

Puede verse la importancia del diente final de 1,20 m de alto para confinar el resalto en el interior de la cubeta. En la figura N° 3 se muestra un corte longitudinal de la Barrera Chamiza - Muro vertedero.

Los investigadores rusos Lipay y Pustovoit publicaron en el XII Congreso de la AIRH, en 1967, los resultados de un estudio experimental sobre las máximas velocidades instantáneas en el fondo, a la salida de un colchón disipador de energía. En ese artículo se recomienda una fórmula para calcular la máxima velocidad instantánea de fondo a la distancia "x" del término del disipador de energía:

$$\frac{V_{fm}}{v} = 1,20 + \frac{0,2 F}{(1+0,07 \cdot \frac{x^2}{h^2})}$$

siendo :

- V_{fm} = velocidad máxima instantánea en el fondo.
- v = velocidad media aguas abajo del disipador.
- F = N° de Froude del torrente en la entrada al disipador.
- h = altura del escurrimiento aguas abajo del disipador.
- x = distancia desde el término del disipador.

6.

En el siguiente cuadro se indican las velocidades máximas instantáneas, a las distancias, $x = 0$, $x = 10$ m y $x = 20$ m, para varios caudales de operación del vertedero.

Q	h	v	V _{fm}		
			x = 0	x = 10 m	x = 20m
100 m ³ /s	1,77 m	1,03 m/s	3,35 m/s	2,04 m/s	1,50 m/s
200 "	2,84	1,28	3,40	2,53	1,92
300	3,75	1,45	3,53	2,92	2,29
400	4,51	1,61	3,68	3,24	2,66
450	4,89	1,67	3,76	3,36	2,81

Para determinar el tamaño del enrocado estable colocado en un fondo horizontal sometido a una velocidad media V_m , puede usarse la relación de Isbash, para las piedras trabadas entre sí :

$$V_m = 1,20 \sqrt{(s-1) 2gD} \quad \text{m/s}$$

siendo D = diámetro de la esfera equivalente en peso.
 s = peso específico relativo del enrocado

En los cálculos indiciados en este Informe se supondrá que $\gamma_s = 2.500 \text{ kg/m}^3$, es decir $s-1 = 1,5$.

Volviendo a la fórmula, puede obtenerse el diámetro necesario del enrocado "D", con la relación :

$$D = \frac{0,69}{s-1} \frac{V_m^2}{2g} \quad \text{m}$$

Puede observarse que el tamaño del enrocado no depende de la altura del escurrimiento, como ocurre con otras relaciones propuestas por otros investigadores. El peso del enrocado se calcula entonces :

7.

$$P_s = \frac{\pi D^3}{6} \cdot 2.500 = 1\,309 \cdot D^3 \quad \text{kg}$$

La fórmula de Isbash debe usarse con la velocidad instantánea máxima de fondo, por cuanto el investigador la dedujo para una distribución uniforme de velocidades, como es la situación usual en los cierres de los cauces de ríos.

Para el caudal de 450 (m³/s) se obtienen los siguientes valores del enrocado, según este investigador :

x	V _m	D	P _s
0 m	3,76 m/s	0,33 m	47 kg
10	3,36	0,27	26
20	2,81	0,19	9

Otra fórmula muy usada es la propuesta por C.R. Neill:

$$\frac{V_m^2}{2g} = (s-1) \cdot D \cdot \left(\frac{h}{D}\right)^{1/3} \quad \text{m.}$$

V_m es la velocidad media del escurrimiento.

Despejando el diámetro del enrocado :

$$D = h \left(\frac{\frac{V_m^2}{2g}}{h(s-1)} \right)^{3/2} \quad \text{m.}$$

La fórmula de Maza y García es la siguiente:

$$\frac{V_m^2}{2g} = 1,125 (S-1) D \left(\frac{h}{D}\right)^{0,3} \quad \text{y de aquí}$$

8.

$$D = h \left(\frac{V_m^2 / 2g}{h(s-1) \cdot 1,125} \right)^{1,43} \quad \text{m.}$$

Resumiendo los valores calculados con estas 2 fórmulas, utilizando las velocidades medias :

x	h	V _m	Neill D	Maza-García D
0 m	4,89 m	3,76 m/s	0,15 m	0,15 m
10	"	3,36	0,10	0,11
20	"	2,81	0,06	0,07

Estas fórmulas dan valores menores que la de Isbash, pero esta última es más confiable por cuanto fue investigada con distribuciones relativamente uniformes de velocidades, no así la de Neill, investigada en un canal de laboratorio.

Dadas las condiciones de factores desconocidos a la salida de la cubeta que pueden incidir en la remoción del material, se ha decidido utilizar un enrocado de 100 kg de peso nominal, lo que equivale a un diámetro equivalente de 0,45 m aproximadamente.

En la figura N° 4 se indica en un corte longitudinal, la disposición del enrocado de protección. En el extremo de la alfombra de enrocados de 10 m de longitud, se propone configurar un diente con el mismo enrocado de Ps = 100 kg y de una profundidad de 2,50 m. La excavación de este diente se rellenará íntegramente con enrocado de Ps = 25 kg (D 0,25 m). Siendo el terreno circundante formado por materiales laháricos, predominando una matriz arenosa y estando el D₉₀ comprendido entre 10 y 50 mm, no tiene resistencia para soportar la acción erosiva del flujo, por lo que este material de relleno podrá estabilizar la profundidad de la excavación.

9.

Según el Ingeniero Ivanissevich, la máxima socavación que podría esperarse, es calculable con la relación:

$$S_{\text{máx}} = \frac{0,34 \times q^{3/4} \cdot \Delta H^{3/8}}{D_{90}} \quad \text{m.}$$

siendo

$$\Delta H = \frac{v^2}{2g} = 0,576 \text{ m} \quad (v = 3,36 \text{ m/s})$$

$$q = \frac{450}{55} = 8,18 \text{ m}^3/\text{s.m}$$

$$D_{90} = 0,25 \text{ m}$$

$$S_{\text{máx}} = 1,90 \text{ m}$$

Esta magnitud está cubierta por la profundidad del diente ubicado al fin de la alfombra de enrocados.

3.- PROTECCIONES A LA SALIDA DE LA COMPUERTA DE FONDO

En la figura 5 se muestra un corte longitudinal del vano de $b = 3,6 \text{ m}$ que se usará como descarga de fondo de la barrera. Esta descarga se utilizará principalmente durante la época de construcción de la barrera de tierra que cerrará el cauce del río Chamiza. Durante esta etapa (supuesta entre Noviembre y Marzo), el máximo caudal evacuado sería de $45 \text{ m}^3/\text{s}$ con un período de retorno de $T_R = 10 \text{ años.}$

El escurrimiento se verificaría con escurrimiento crítico en la entrada, generándose un torrente en la cubeta disipadora de energía el cual quedaría ahogado por el flujo controlado por el diente final de la cubeta (ver figura 5). Suponiendo escurrimiento crítico sobre el diente final, el torrente generado sobre el comienzo de la alfombra protectora de enrocados, al pie de la estructura, tendría una altura de $1,63 \text{ m}$ y una velocidad de $7,67 \text{ m/s}$. Este flujo sufriría una expansión hacia aguas abajo al no estar confinado por el costado izquierdo.

Con este tipo de lámina líquida, que impacta al enrocado y que tiene una velocidad sobre los 7 m/s, no hay enrocado suelto posible de conformar un piso estable. Por esta razón se ha decidido consolidar con hormigón al enrocado, usando rocas de Ps = 300 kg c/u (D=0,60 m). La figura N° 6 muestra un corte longitudinal a través de la protección. Se ha dispuesto un diente, también usando rocas de 300 kg y consolidado con hormigón. El relleno de la excavación de este diente se haría con rocas de 300 kg sueltas. Este radier debe tener barbacanas (4 de Ø 0,10 m por m², con geotextil en el extremo en contacto con el terreno).

La lámina líquida tiene un ancho de 3,60 m saliendo de la cubeta y se expande sobre la alfombra de enrocados consolidado hasta alcanzar un ancho de 8,60 m aproximadamente a 10 m de distancia del diente final de la cubeta y donde se inicia el diente de enrocado consolidado. En esa sección el flujo tiene las siguientes características estimadas :

$$\begin{aligned} q &= 6,60 \text{ m}^3/\text{s} && \text{(caudal por unidad de ancho)} \\ h &= 0,945 \text{ m} && \text{(altura torrencial)} \\ v &= 6,148 \text{ m/s} && \text{(velocidad media del flujo)} \\ \frac{v^2}{2g} &= 1,928 \text{ m} \end{aligned}$$

La máxima socavación local que puede esperarse, admitiendo el $D_{90} = 0,60 \text{ m}$, según la ecuación utilizada en la pág. 9, sería

$$S_{\text{máx}} = \frac{0.34 \cdot \overline{6,60}^{3/4} \cdot \overline{1.928}^{3/8}}{0,60} = 2,30 \text{ m}$$

Este resultado demuestra una profundidad adecuada del diente.

4.- SOCAVACION DEL CANALON ENTRE LA BARRERA-VERTEDERO Y EL RIO CHAMIZA

Se ha estudiado la socavación general que pueda presentar el lecho aguas abajo de la barrera-vertedero, usando el procedimiento propuesto por Lischtvan-Lebediev, para 3 crecidas de períodos de retorno T_R de 10, 100 y 1000 años. Se ha utilizado un diámetro medio del terreno "Dm" de 3,5 mm que corresponde a una arena. Las características del flujo son :

T_R	Q_d	h	Z	β	b	v
10 años	70 m ³ /s	1,30 m	237,80 m	0,90	60,5 m	0,89 m/s
100 "	245	3,25	239,75	1,00	62,45	1,21
1000 "	450	4,85	241,35	1,07	64,05	1,45

" β " es un coeficiente propuesto por los autores del método, que depende del período de retorno T_R y "b" es el ancho supuesto del lecho.

La profundidad " h_s " correspondería a la altura del escurremiento con la sección socavada, al aplicar el método señalado y serían:

T_R	h_s	V_s	Observación
10 años	1,23 m	0,939 m/s	No hay socavación gral.
100	2,78	1,414	" "
1000	4,05	1,741	" "

V_s = velocidad del inicio del arrastre

Como una conclusión importante se debe indicar que no se espera una socavación generalizada del lecho, aguas abajo de la barrera-vertedero. Sólo se presentarán socavaciones locales en la zona de unión entre la protección de enrocados y el terreno natural, esperándose que que den cubiertas por la profundidad del diente final.

5.- PROTECCION EN LA ZONA DE ENTRADA A LA DESCARGA DE FONDO

Esta es una protección local de la zona adyacente a la entrada de la descarga de fondo de la presa. Las velocidades del flujo son relativamente altas en la boca misma de entrada, pero disminuyen considerablemente a una corta distancia de la entrada. Es por esta razón que el radier protegido es de dimensiones reducidas. Se ha adoptado una longitud de 10 m en el sentido del escurrimiento y de 7,20 m (doble del ancho de la descarga) en el sentido de la barrera.

Para determinar el peso del enrocado de protección se utilizarán las características del escurrimiento crítico en la entrada. Es decir, los siguientes valores :

$$q = 12,5 \text{ m}^3/\text{s.m} \quad h_c = 2,515 \text{ m} \quad V_c = 4,969 \text{ m/s}$$

Usando la relación de Isbash :

$$D = 0,60 \text{ m} \quad P_s = 300 \text{ kg}$$

Esta carpeta de enrocados se extenderá por el talud lateral, tal como se indica en la Fig. 8. El contorno de la carpeta terminará en un diente de 2m de profundidad.

6.- PROTECCION DEL TALUD DE LA PRESA DE TIERRA, DE AGUAS ARRIBA

El talud de aguas arriba de la presa estará sometido a la acción del río Chamiza durante las crecidas. El flujo chocará frontalmente con el talud de la presa y girará en 90° para ser evacuado por el vertedero. El cauce del río Blanco será desviado en la zona de su desembocadura con el Chamiza, hacia un punto que se ubicará a unos 200 m aguas arriba de la barrera. Se teme que este río deposite abundante material de acarreo en la zona de aguas arriba de la barrera, de manera que las velocidades del flujo pueden aumentar en forma importante.

De acuerdo a la Fig. 1, el perfil N° 11 transversal al río en su configuración natural, ubicado a unos 60 m aguas arriba del eje de la presa, se muestra en la figura 9. El proyecto de la barrera Chamiza comprende la abertura de un canal lateral al cauce natural, cuyo fondo estaría a la cota 238 y que permitiría un flujo tranquilo hacia el vertedero, por lo que para la crecida milenaria de 450 m³/s, el nivel en la poza estaría a la cota 245,40 m y el área geométrica de la sección total de la masa de agua afluente hacia la presa sería de :

$$S_h = 700 \text{ m}^2$$

Ahora bien, si se supone que la sección lateral excavada prácticamente no colabora con el escurrimiento y el flujo se concentra básicamente en la sección actual del río Chamiza, ésta sería de sólo:

$$S_h = 260,7 \text{ m}^2$$

y la velocidad media del flujo para el caudal de la crecida milenaria sería de :

$$\bar{V} = 1,73 \text{ m/s}$$

Por otra parte, la experiencia recogida en obras en operación, como es el caso del pretil fusible de la barrera en el río Teno y la barrera en el río Laja de la Central Antuco, aconsejan considerar al flujo concentrado básicamente en la sección principal del cauce del río Chamiza.

A continuación se muestran los resultados de un análisis hecho para determinar el peso adecuado del enrocado de protección del talud de aguas arriba de la presa de tierra expuesta al flujo, durante una crecida de los ríos afluentes al lago Chapo.

Para determinar el tamaño del enrocado se utiliza la relación de Lopardo-Estelle:

$$\frac{\bar{V}}{\sqrt{(s-1) g D}} = 1,3 \left(\frac{h}{d}\right)^{1/6} \sqrt[4]{1 - \frac{\text{sen}^2 \theta}{\text{sen}^2 \phi}}$$

En esta relación, el primer miembro representa el N° de Froude del material de diámetro equivalente "D". El ángulo θ es el que forma el talud expuesto a la corriente con la horizontal y ϕ es el ángulo de reposo del material, que para enrocado anguloso puede ser de hasta 70°.

La fórmula anterior se aplica a una corriente tangencial al talud y como en este caso se trata de una corriente normal al talud, para considerar este efecto, se ha multiplicado la velocidad media por un factor de 4/3, según la recomendación del texto "Bank and Shore Protection".

$$V_{\text{máx}} = 4/3 \cdot \bar{V}$$

Además, se supone en el análisis, un embancamiento del lecho desde el fondo natural hasta una cota variable (parámetro) Z_{emb} . Los resultados se indican en la siguiente tabla.

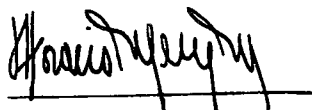
Z_{emb}	Sh	H	\bar{V}	$V_{\text{máx}}$	D		P_s
234,5 m	260,75 m ²	8,20 m	1,73 m/s	2,31 m	0,07 m	0,10 m	1,5 kg
238,0	215,50	6,78	2,09	2,79	0,14	0,15	5
240,0	168,1	5,29	2,68	3,57	0,32	0,32	45
241,0	139,9	4,40	3,22	4,29	0,61	0,60	280

La altura H se ha considerado como la profundidad media en la sección embancada.

En el gráfico de la Fig. 9, se indica en escala logarít mica el peso del enrocado estable para diversas cotas superiores del embanque del lecho principal del río Chamiza (eje vertical a escala natural).

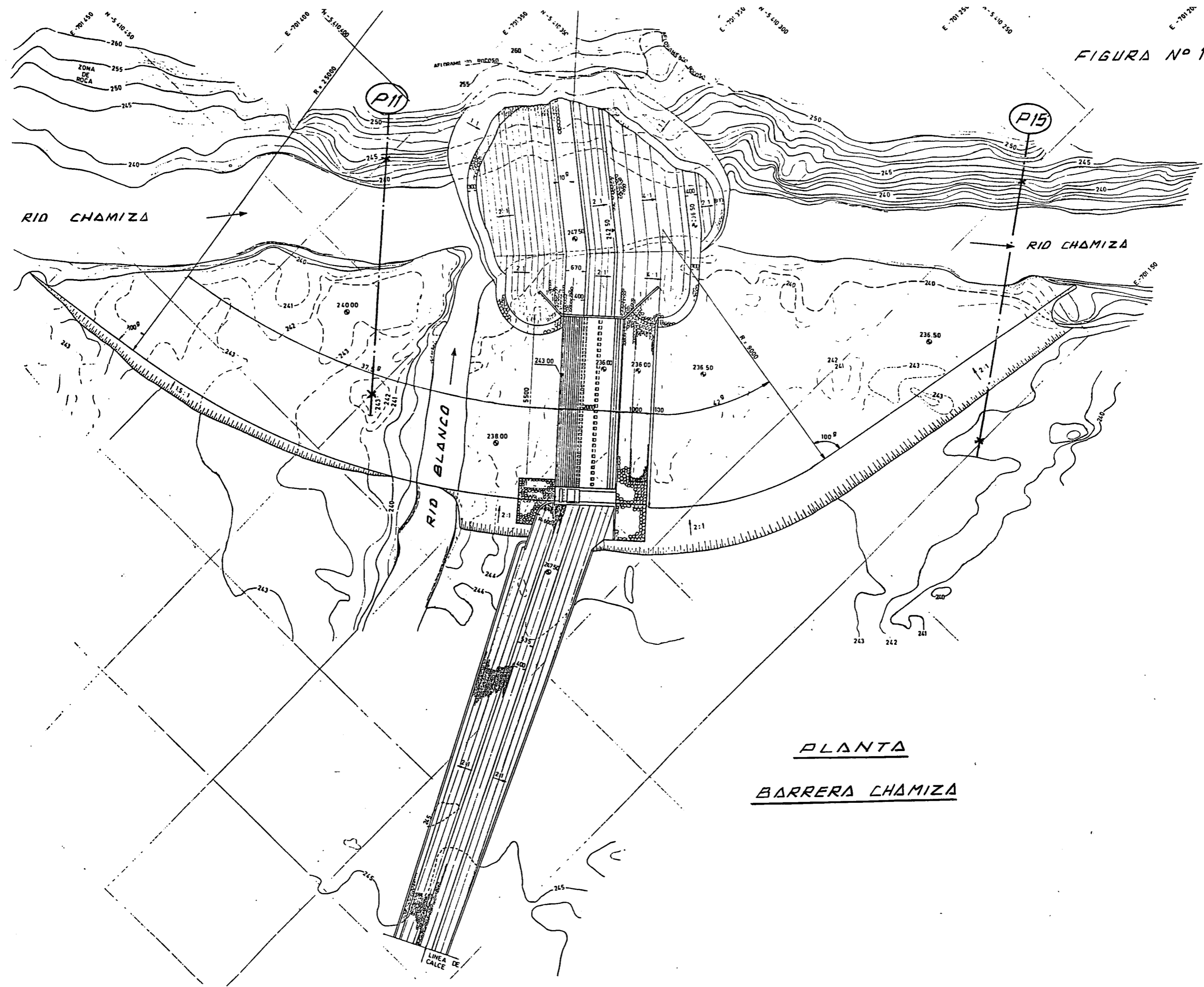
Puede apreciarse que para un embanque que cubriera hasta una cota comprendida entre la 240 m y la 241 m, se requiere un enrocado de peso comprendido entre 50 y 250 kg. Podría ser adecuado utilizar el mismo enrocado de 100 kg que se utilizará a la salida de la cubeta disipadora de energía.

En la Fig.10 se muestra la disposición propuesta para esta protección en la zona de encuentro entre el talud de aguas arriba de la presa y el muro de hormigón, del empotramiento izquierdo de la presa-vertedero de hormigón.



Horacio Mery M.
INGENIERO OICO

SANTIAGO, 13 de Junio de 1988.



PLANTA
BARRERA CHAMIZA

BARRERA CHAMIZA

- (1) ALTURA CONJUGADA DEL RESALTO
- (2) ALTURA DE AGUAS ABAJO. CUBETA SIN DIENTE
- (3) ALTURA DE AGUAS ABAJO. CUBETA CON DIENTE

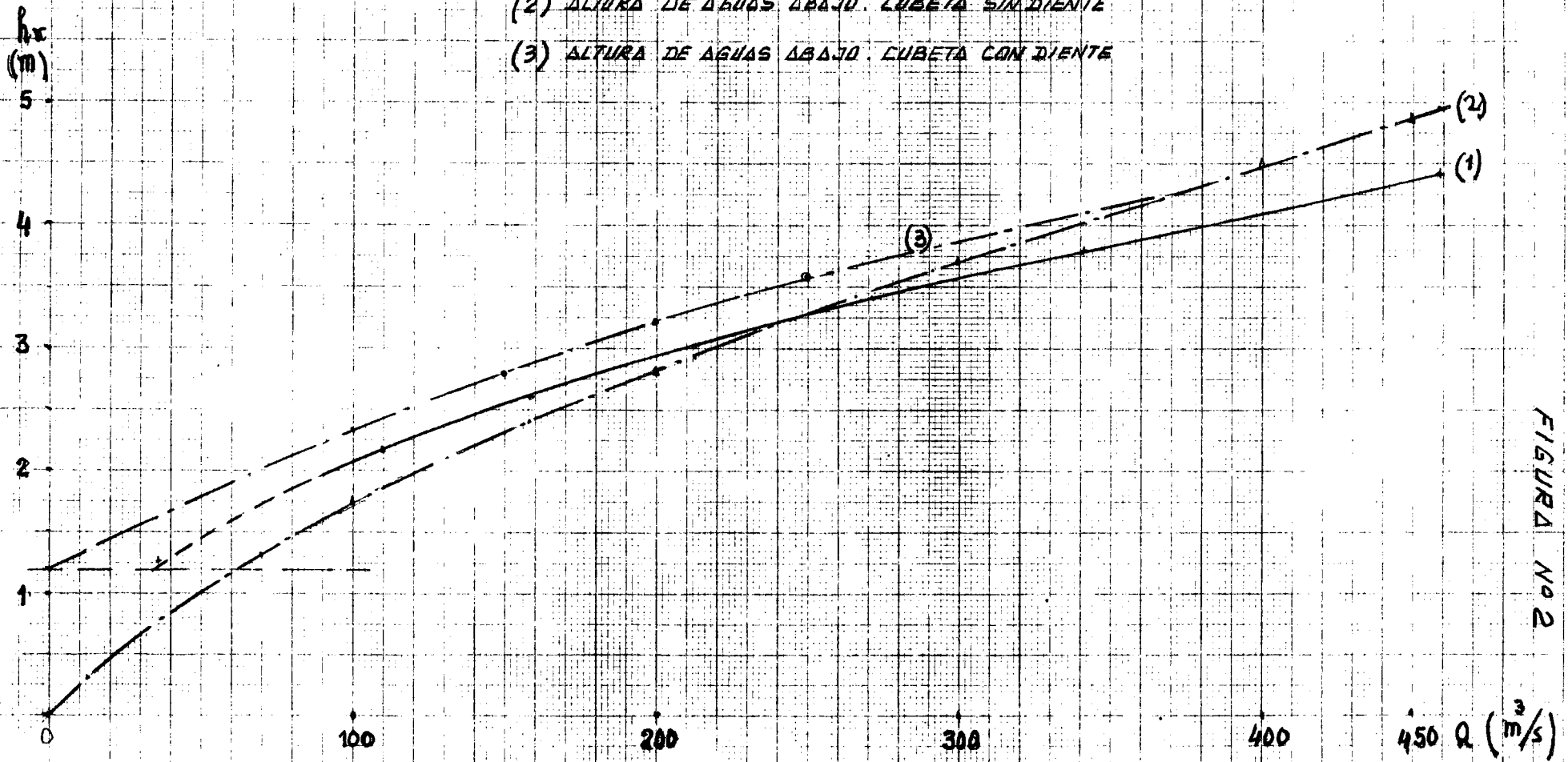


FIGURA No 2

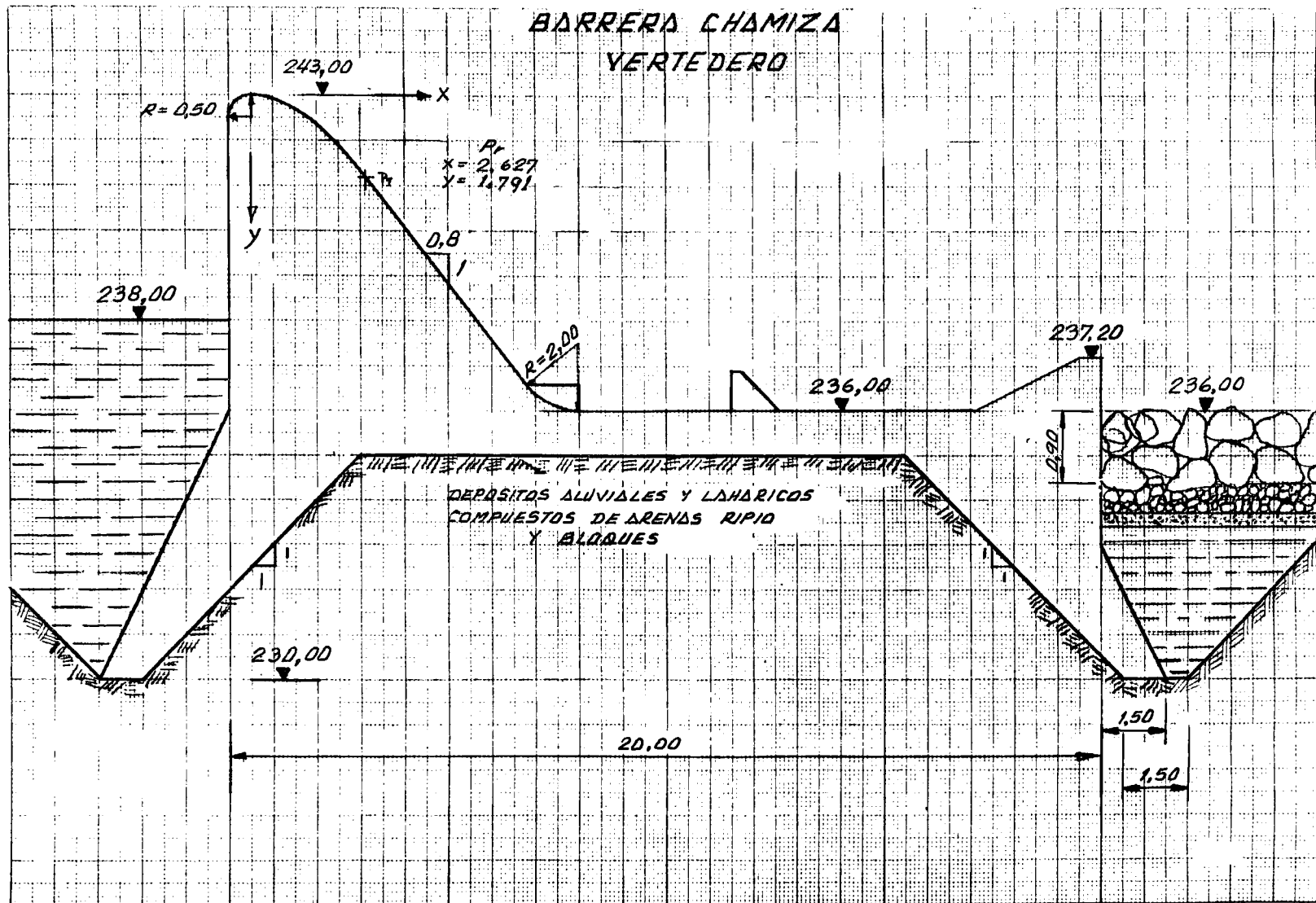


FIGURA N° 3

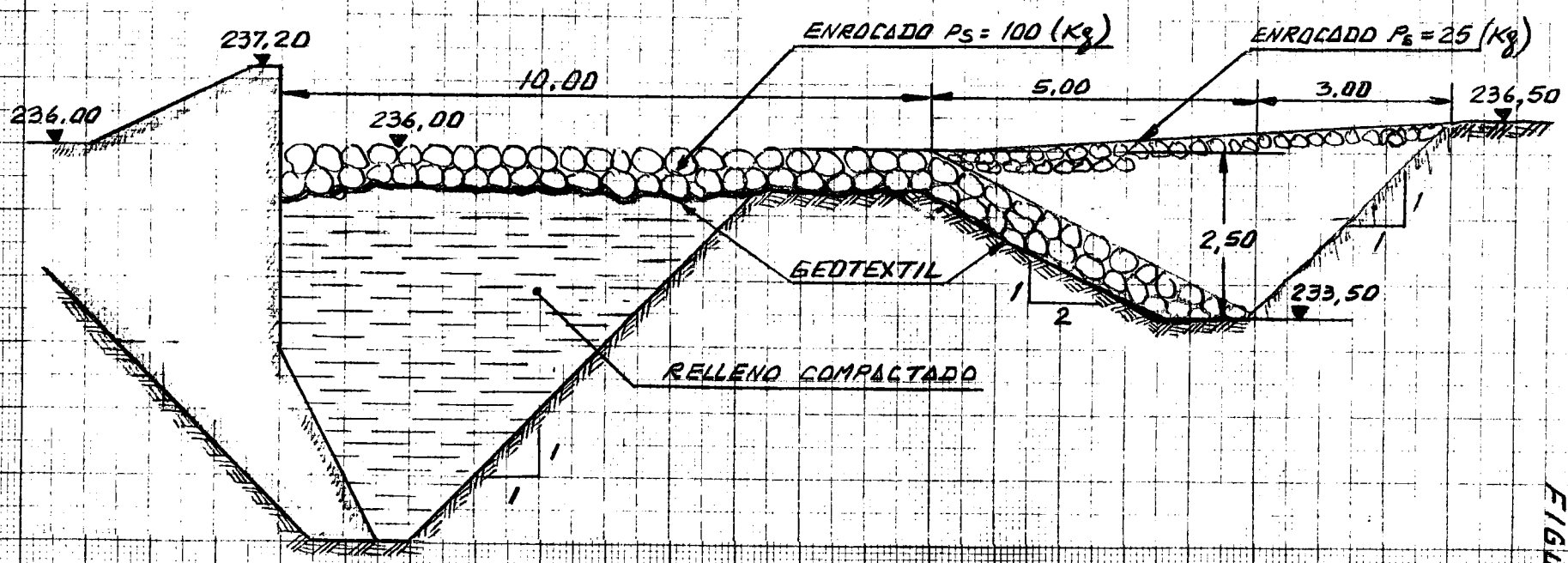


FIGURA No 4

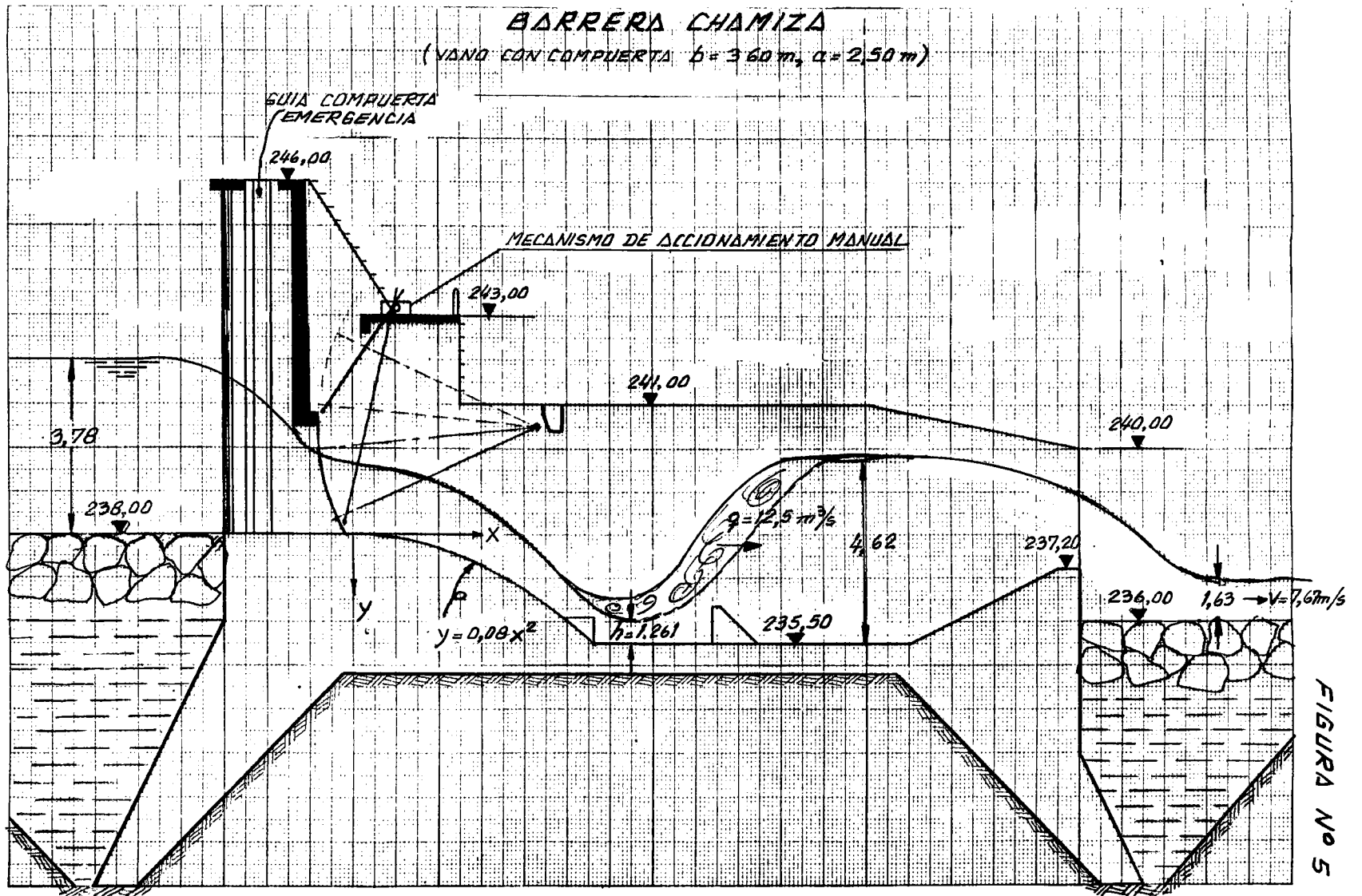


FIGURA No 5

CORTE LONGITUDINAL

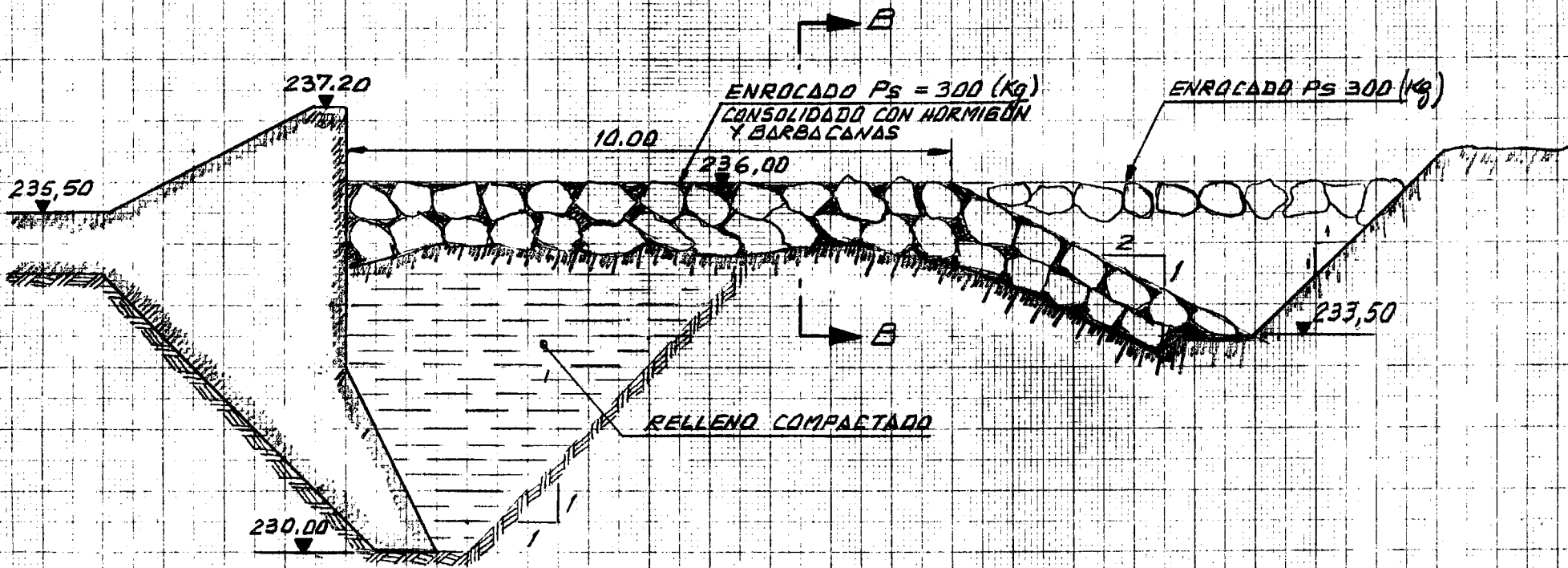


FIGURA Nº 6



PLANTA
CORTE A - A

ENROCADOS PS-300 (Kg)
CONSOLIDADO CON HORMIGON

ENROCADOS SUELTOS PS-300 (Kg)

ENROCADOS CONSOLIDADOS
CON HORMIGON Y BARBICANAS

CORTE B - B (VER FIGURA Nº 6)

240,00

2,50

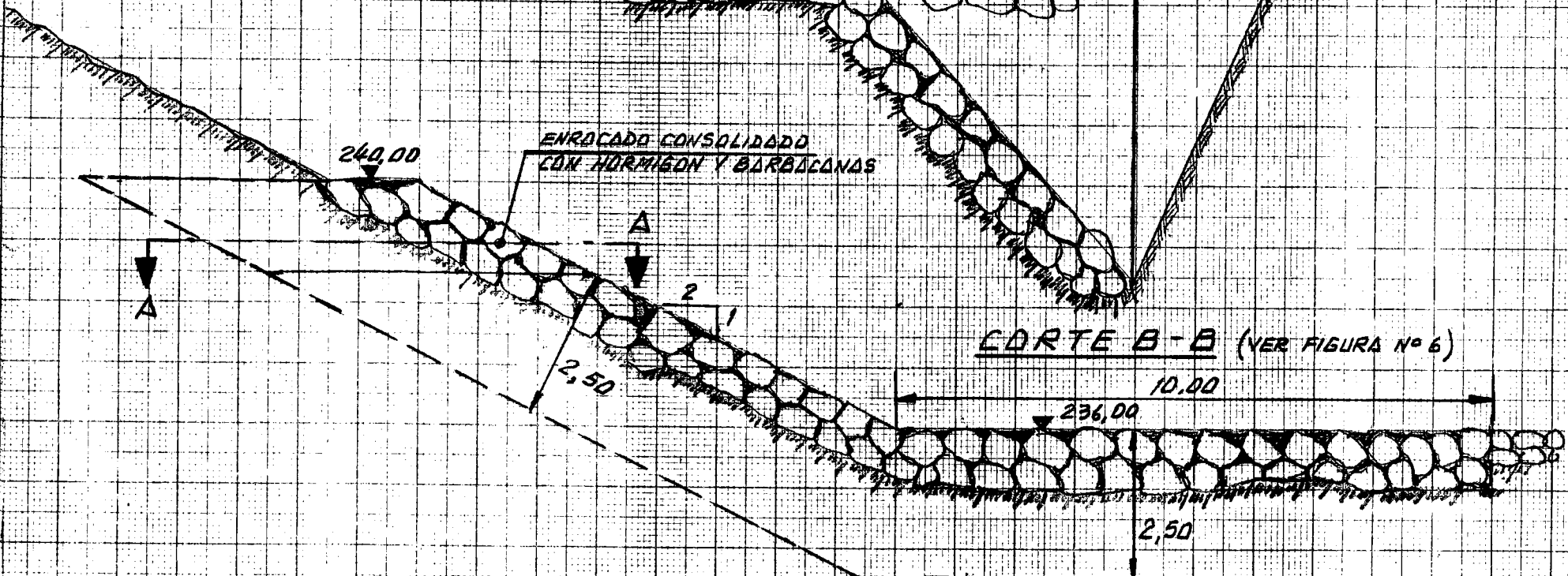
10,00

236,00

2,50

LOTA FUNDACION DIENTE DEL ENROCADO

FIGURA Nº 7



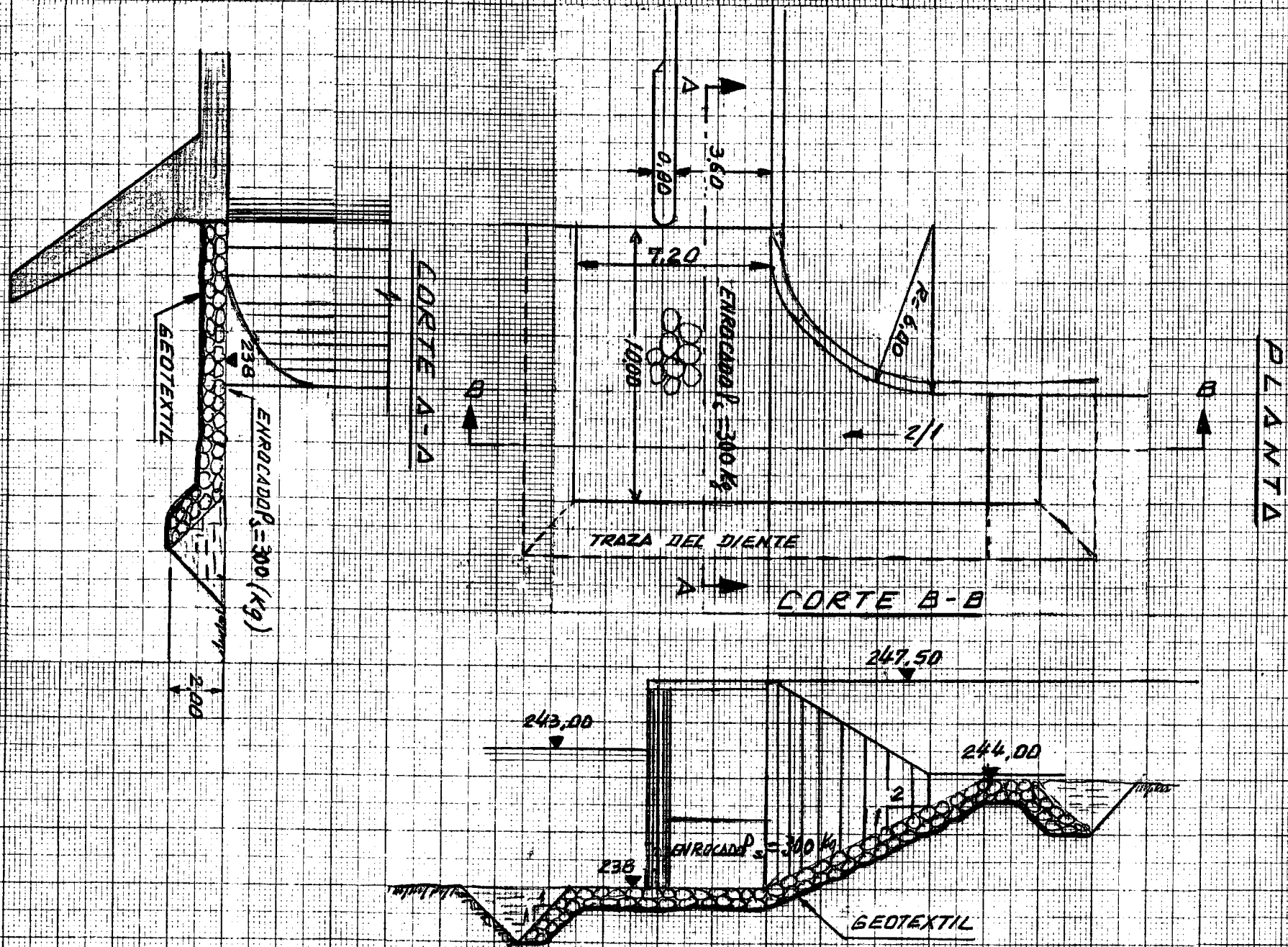
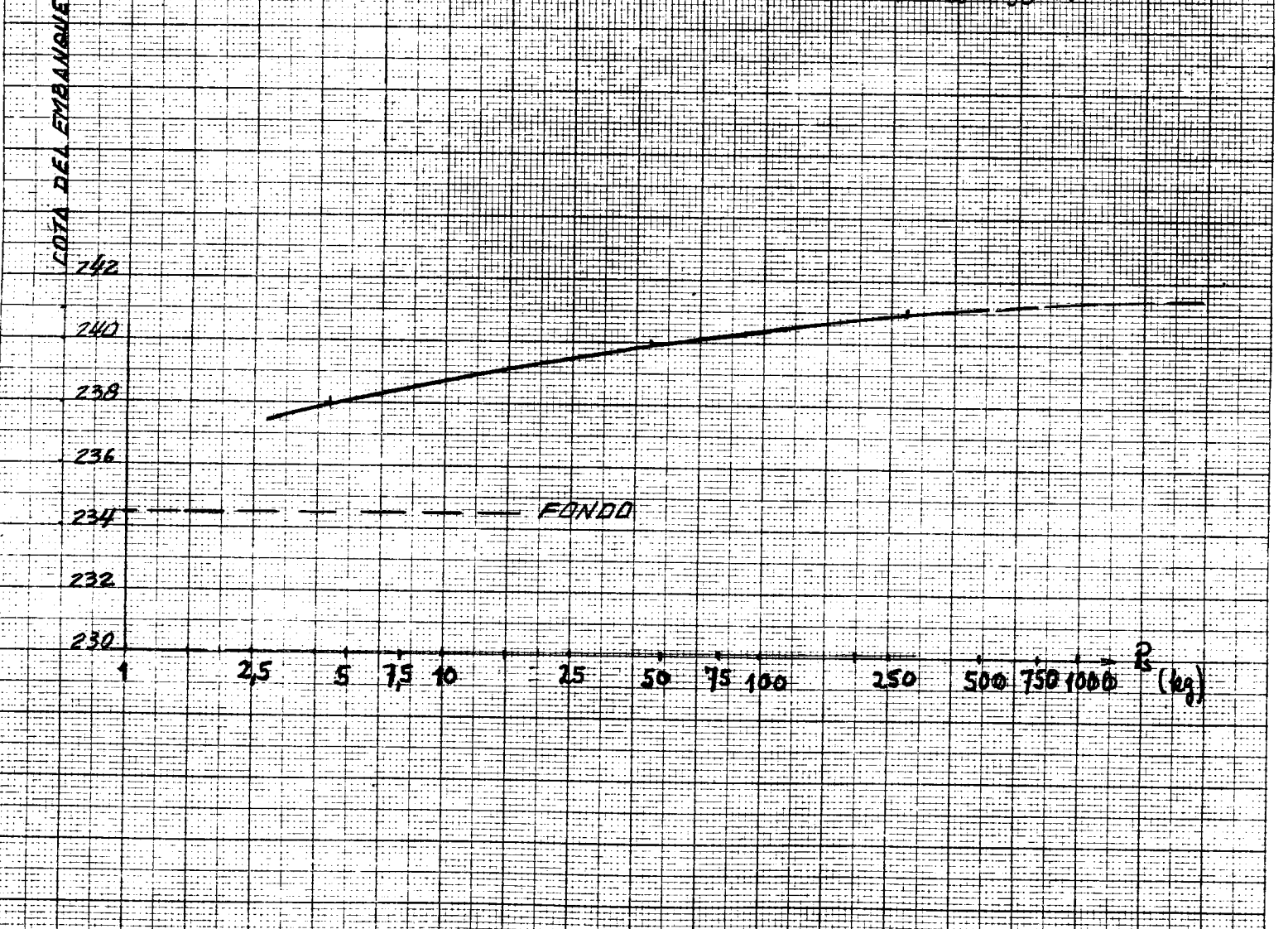
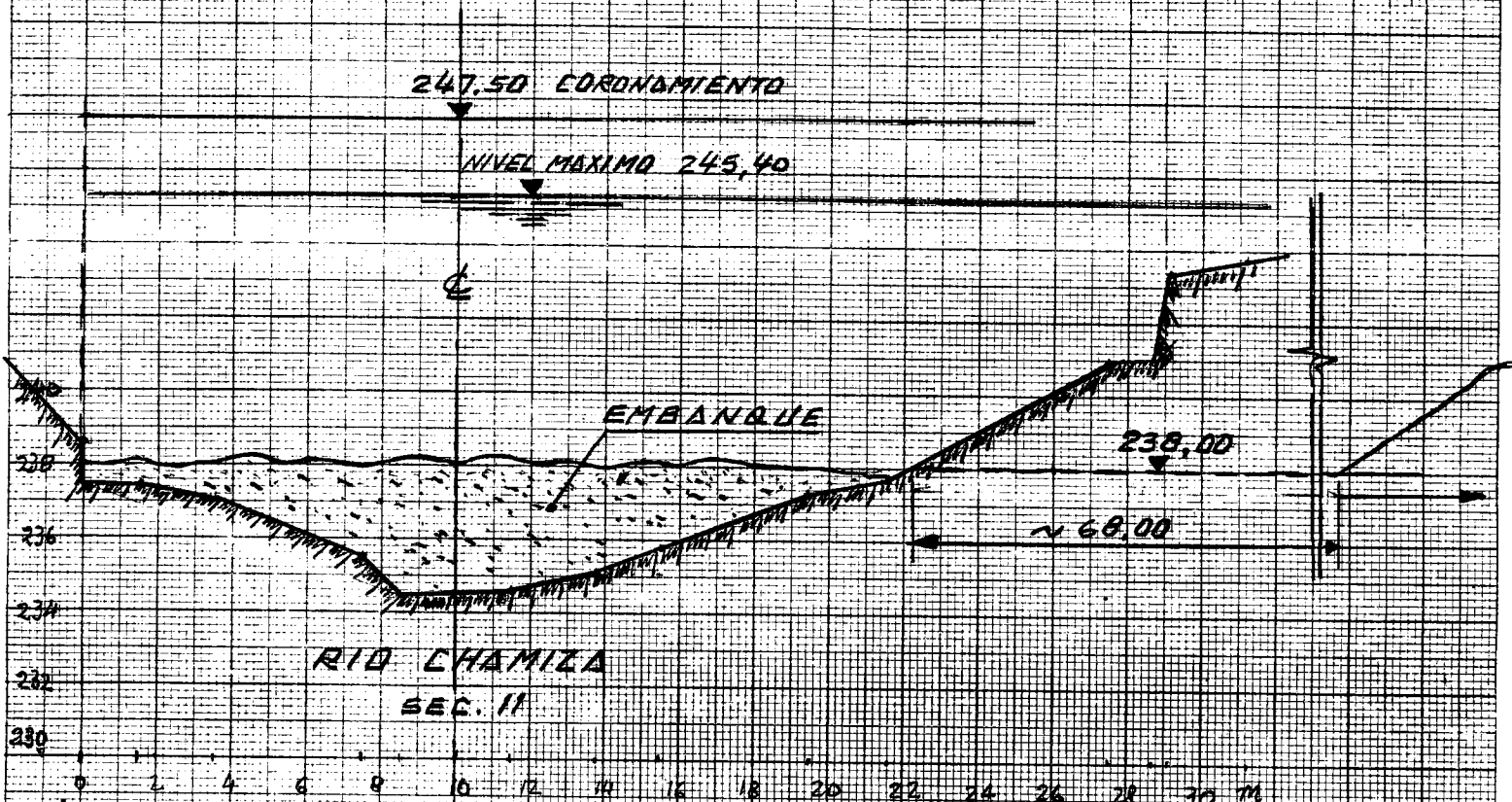


FIGURA N° 8

FIGURA Nº 9



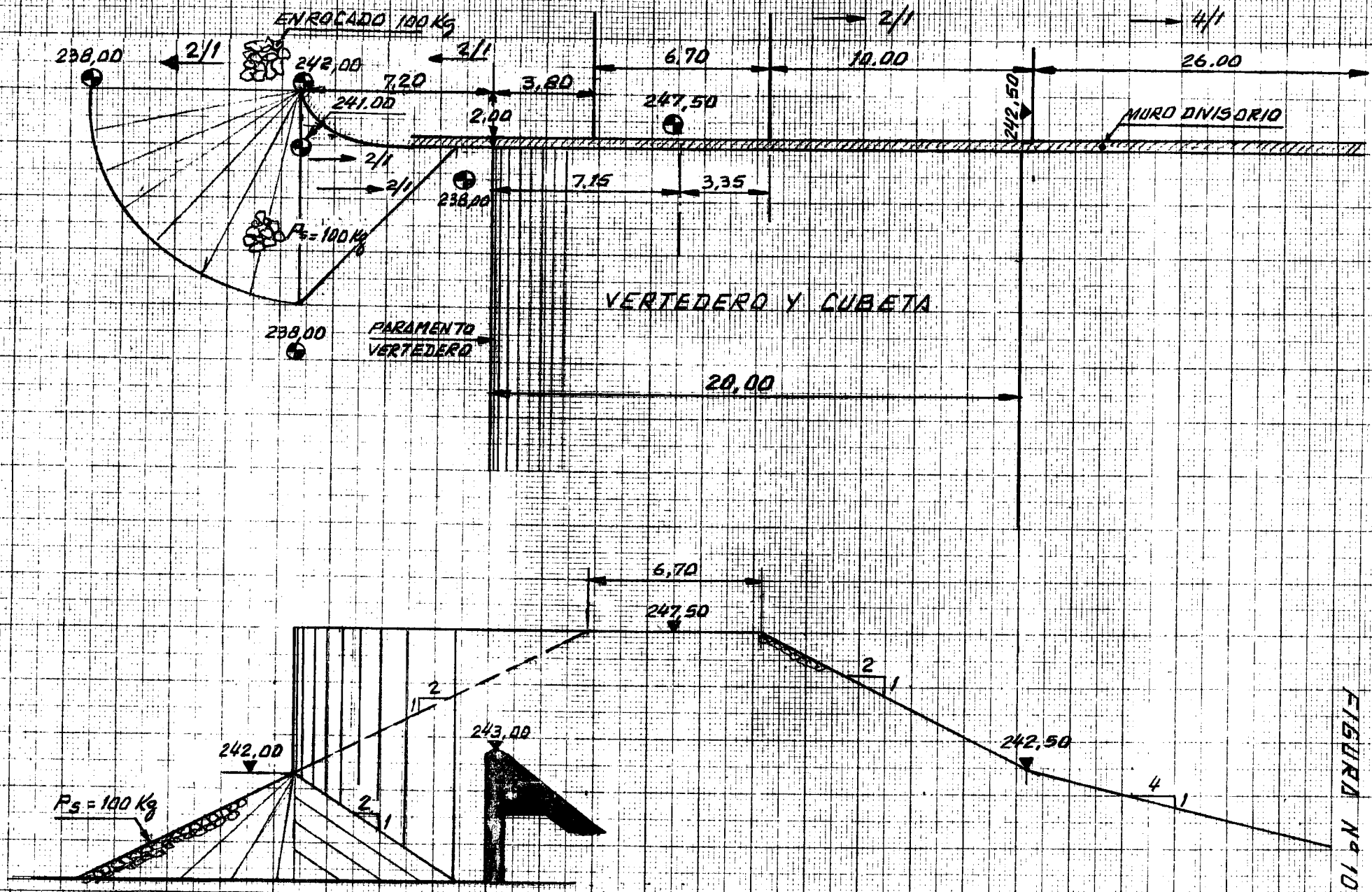


FIGURA N° 10

CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS HIDRICOS



3 5617 00009 3898

