

Diseño de rip-rap para un terraplén de acceso al túnel sierra de Marquesado (San Juan, Argentina)

Rip-rap design for access embankment to the Sierra de Marquesado Tunnel (San Juan-Argentina)

MSc. Ing. Óscar Víctor Cordo

Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan (Argentina)

Fecha de recepción: 09/07/2020 - Fecha de aceptación del artículo: 28/08/2020



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: [DOI: 10.18041/1794-4953/avances.2.6502](https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6502)

Cómo citar: Cordo, O. (2020). Diseño de rip-rap para un terraplén de acceso al túnel sierra de Marquesado (San Juan, Argentina). Avances: Investigación En Ingeniería, 17(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6502>

Resumen

Este artículo trata sobre el diseño de material de rip-rap para proteger el terraplén de acceso oeste al túnel que atravesará la sierra de Marquesado, el cual permitirá una vinculación vehicular rápida y directa entre los valles de Tulum y Zonda, al oeste de la ciudad de San Juan (Argentina). Se empleó la teoría de Sverdrup, Munk y Bretschneider, tendiente a determinar la altura de ola y su periodo en función del fetch y velocidad del viento en la zona, y la teoría de Hudson, para definir el tamaño máximo de material de rip-rap que se colocaría como protección a los terraplenes. El artículo consta de dos secciones principales: en una se verificó si el tamaño del rip-rap colocado en el cierre lateral existente de la presa de Ullum, sobre el cual se apoya un tramo del terraplén de acceso al citado túnel, es el correcto y en la otra sección se diseñó el material de rip-rap de protección para un tramo nuevo que se iba a construir en dicho terraplén de acceso al túnel. Por último, mediante el uso de las leyes de filtro de Terzaghi, se diseñó el material de filtro que se colocó entre el terraplén y el rip-rap.

Palabras clave: rip-rap, fetch, velocidad del viento, altura de ola, periodo de ola.

Abstract

This paper addresses rip-rap design to protect the Sierra de Marquesado Tunnel west access embankment. This tunnel will cross the Sierra de Marquesado, which will allow a quick and direct vehicular link between the Tulum and Zonda valleys, west of San Juan city, in Argentina.

Sverdrup, Munk, and Bretschneider's theory was used, aimed at determining the height and period of the wave and its function regarding fetch and wind speed. Hudson's theory was employed to define rip-rap maximum size to place as means of protecting embankments. The article considers two main sections, the first one in which the size of the rip-rap placed in the existing lateral Ullum dam is verified. Also, the second section labels the rip-rap design to protect the new proposed access embankment. Finally, using Terzaghi's filter laws, the filter material is designed to be placed between the embankment and the rip-rap.

Keywords: Rip-rap, fetch, wind speed, wave height, wave period.

Introducción

El artículo se enmarca dentro del proyecto de la conexión vial entre las rutas provinciales 12 y 38, tendientes a vincular los valles de Tulum y Zonda, al oeste de la ciudad de San Juan (Argentina), encarado por la Escuela de Ingeniería de Caminos de Montaña (EICAM), de la Universidad Nacional de San Juan, para la Dirección Provincial de Vialidad de San Juan. Dicho proyecto incluye la construcción de un túnel de aproximadamente 1000 m de largo a través de la sierra de Marquesado, que precisamente divide ambos valles. Se prevé que un tramo del acceso oeste al túnel se levante aprovechando el terraplén de cierre lateral de la presa de Ullum, construido en la década de 1970; pero otro sector de este acceso será construido sobre un terraplén nuevo que, de manera similar al cierre lateral, sea alcanzado por el agua del embalse y, por lo tanto, sometido a la acción del oleaje, en situaciones de nivel máximo de embalse.

En este trabajo se explica la metodología de diseño del material pétreo que se va a colocar sobre los taludes del terraplén, a fin de protegerlo de los efectos del oleaje. Para mayor claridad, en la figura 1 se muestra la ubicación del proyecto.

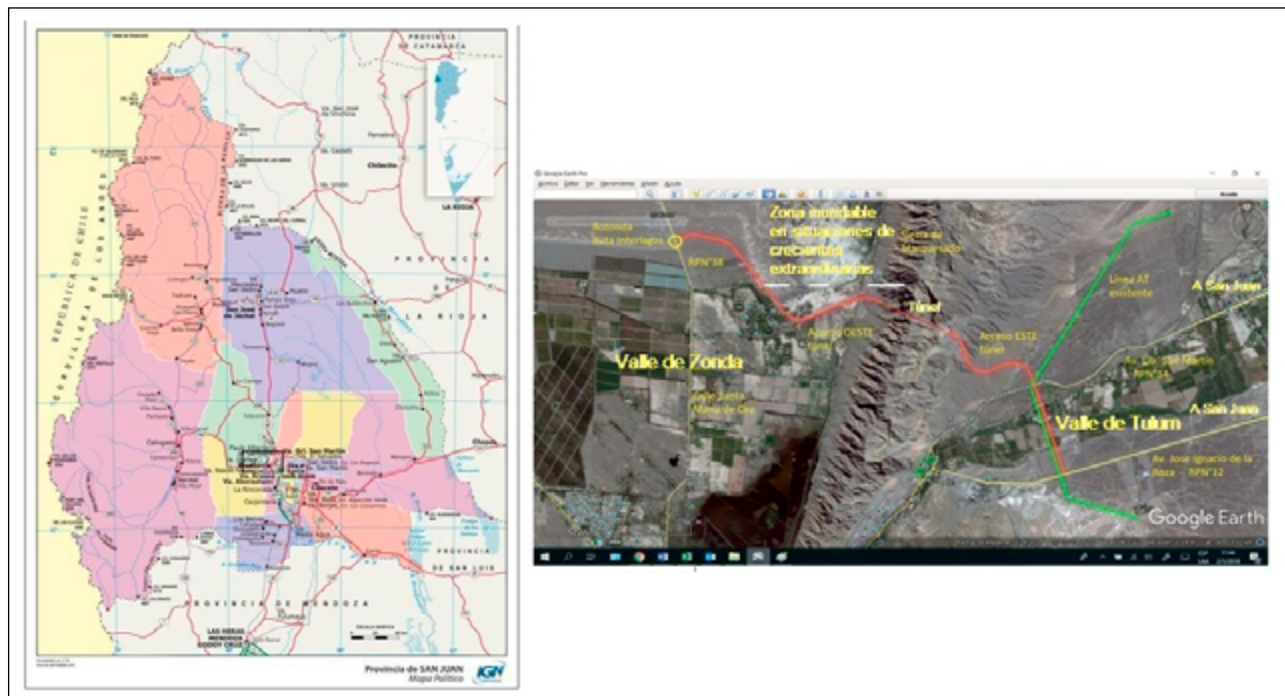


Figura 1. Ubicación de la provincia de San Juan (Argentina) y ubicación del proyecto

Los sectores del acceso al túnel donde se tiene la situación crítica con respecto a la protección frente al oleaje son los comprendidos entre progresivas 960-1920 y 2100-2900, este último va adosado al cierre lateral existente del dique de Ullum (figura 2).



Figura 2. Ubicación del terraplén de acceso oeste al túnel de la sierra de Marquesado. Situación de crecientes extraordinarias. Entre progresivas 960-1920, terraplén nuevo, y entre progresivas 2100-2900, terraplén adosado a cierre lateral existente

1. Verificación del rip-rap existente en el cierre lateral

Se prevé la construcción de un terraplén adosado al cierre lateral del dique de Ullum en el sector entre progresivas 2100-2900.

Eventualmente, el nivel del agua puede alcanzar el espaldón del cierre lateral y someterlo a la acción del oleaje. El rip-rap colocado está conformado por dacitas provenientes del Cerro Blanco. El espesor del rip-rap colocado es de 0,60 m en la parte inferior (hasta cota 770) y el resto es de 0,30 m hasta el coronamiento, a cota 776. Cabe aclarar que el nivel máximo extraordinario previsto por el dique de Ullum es de 774,10 ms.n.m. y el nivel máximo de operación es de 768 ms.n.m. El talud del espaldón aguas arriba del cierre lateral es 1 v: 2,5 h (ángulo con la horizontal = 21,8°) (figura 3).

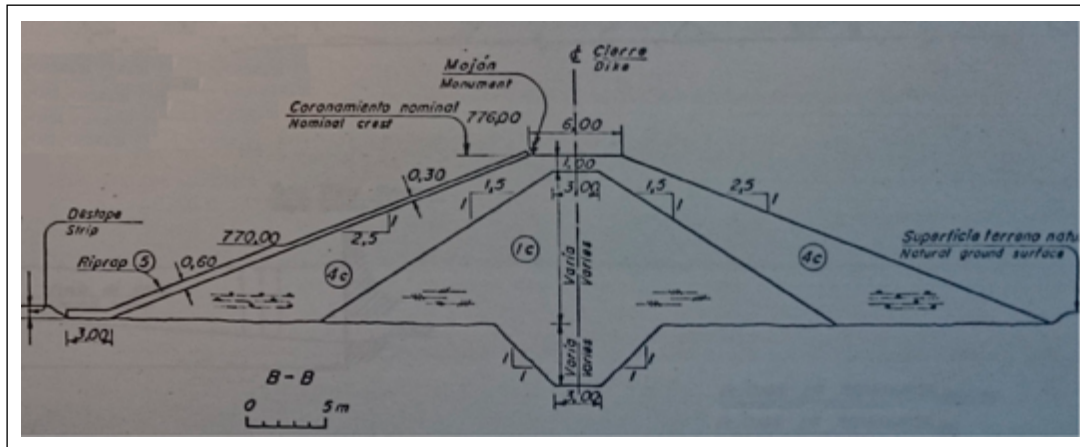


Figura 3. Terraplén del cierre lateral de Ullum. Fuente: Proyecto Presa de Ullum, Dirección de Recursos Energéticos, Pcia de San Juan.

A máxima cota del embalse de Ullum, el espejo de agua tiene el aspecto ilustrado en la figura 4, obtenido del Google Earth, con fecha correspondiente a mayo de 2004, circunstancia en que el embalse estaba a cota máxima. En la parte inferior de dicha figura se ve una línea continua que indica la traza propuesta que va adosada al dique lateral.



Figura 4. Espejo de agua del embalse de Ullum en condiciones de máxima creciente y fragmento de la traza propuesta para el Proyecto adosada al cierre lateral

En la figura 5 se ilustra la forma en que el terraplén de acceso al túnel va adosado al cierre lateral.

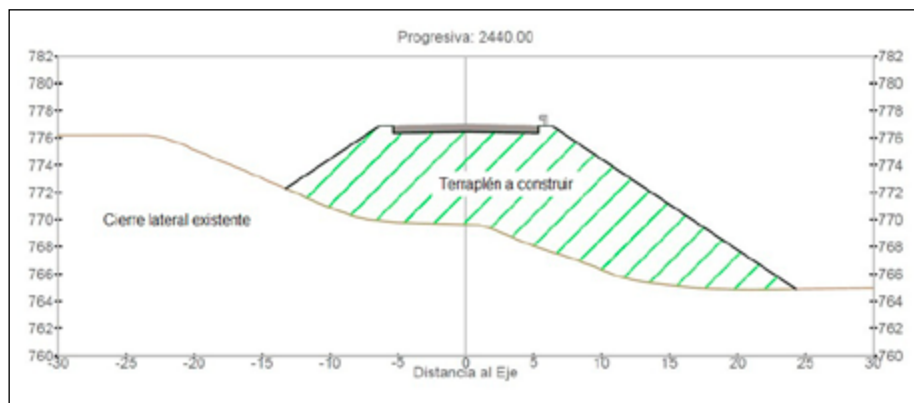


Figura 5. Terraplén adosado al cierre lateral existente. Caso correspondiente a progresiva 2440

1.1. Determinación del fetch efectivo

Las olas sobre una superficie de agua se generan por la transferencia de energía que ejercen los vientos. Dicha transferencia de energía se traduce en una ondulación sobre la superficie del agua que alcanza un máximo en la superficie, y un mínimo en el fondo, que es nulo cuando está muy profundo. En este caso, se tiene una ola de oscilación; mientras que en profundidades someras, donde hay movimientos en el fondo, se tiene una ola de traslación. Para este último, la agitación superficial del agua en zonas de profundidades decrecientes disminuye gradualmente la longitud de onda hasta que sucede el fenómeno de rotura del oleaje, con la proyección del agua en la dirección de su avance.

La altura de la ola es proporcional a la longitud que recorre el viento sobre la superficie del agua. Para determinarla se propone un abanico de segmentos de longitud D_i con direcciones posibles, producto de las irregularidades del contorno del embalse con respecto a la sección en estudio. Se supone que una cierta composición ponderada de tales segmentos, según la distancia de mayor longitud, asigna un valor representativo del parámetro denominado fetch efectivo, que se determina mediante esta expresión [1]:

$$F_e = \frac{\sum_{i=1}^n D_i \cos \alpha_i}{\sum_{i=1}^n \cos \alpha_i} \quad (1)$$

Tal como se muestra en la figura 6, se debe hacer un barrido a partir de una dirección principal hacia ambos lados con un incremento angular constante hasta cubrir 45° a cada lado de esa dirección principal. Se hace el producto de $D_i \cos \alpha_i$ para cada segmento y se suma y se divide por la suma de los $\cos \alpha_i$, tal como indica la expresión (1).

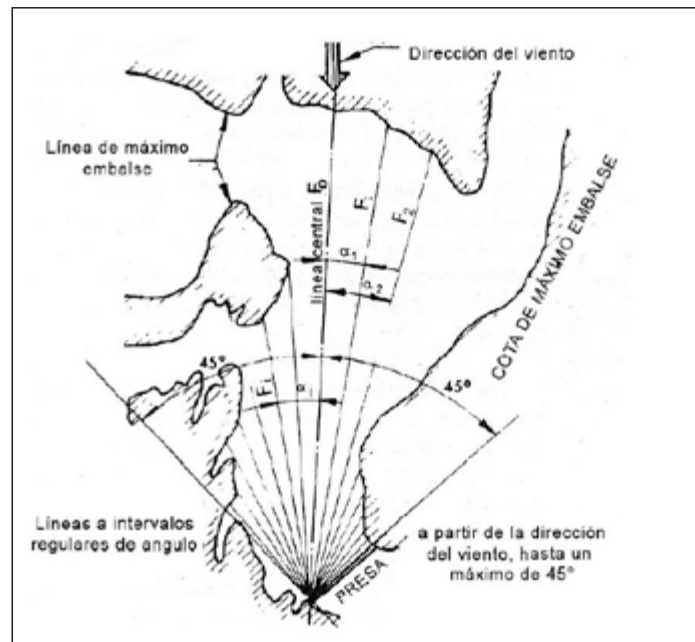


Figura 6. Determinación del fetch efectivo [1]

1.2. Determinación del fetch efectivo máximo

En este caso se analizaron, mediante el Google Earth, distintas situaciones para determinar el caso del fetch efectivo máximos, que se detallan a continuación.

1.1.1. Caso 1

Se toma una dirección determinada (figura 7) tratando de que algunos segmentos abarquen la mayor longitud posible del lago del embalse de Ullum. Tal como se muestra para este caso particular, en la dirección normal al espaldón aguas arriba no hay longitudes muy grandes,

incluso en situación de máxima crecida, lo cual es favorable en cuanto al tamaño de ola previsto. De esta manera, se plantea la tabla 1 para el cálculo del fetch efectivo.



Figura 7. Barrido para la determinación del fetch efectivo: caso 1

Tabla 1. Determinación del fetch efectivo para el caso 1

Segmento	D_i (km)	$\alpha_i(^{\circ})$	$\cos(\alpha_i)$	$D_i \cos(\alpha_i)$
1	0,19	-45	0,707	0,1
2	0,44	-40	0,766	0,3
3	0,48	-35	0,819	0,4
4	0,45	-30	0,866	0,4
5	0,44	-25	0,906	0,4
6	0,44	-20	0,940	0,4
7	0,48	-15	0,966	0,5
8	0,70	-10	0,985	0,7
9	0,73	-5	0,996	0,7
10	0,80	0	1,000	0,8
11	0,88	5	0,996	0,9
12	0,94	10	0,985	0,9
13	1,03	15	0,966	1,0
14	1,16	20	0,940	1,1
15	1,60	25	0,906	1,5
16	6,42	30	0,866	5,6
17	6,42	35	0,819	5,3
18	6,01	40	0,766	4,6
19	1,47	45	0,707	1,0
			16,9	26,6
Fetch (km) 1,57				

1.1.2. Caso 2

Se gira todo el sistema de segmentos de 5° en el sentido horario con respecto al caso 1 (figura 8 y tabla 2).



Figura 8. Barrido para la determinación del fetch efectivo: caso 2

Tabla 2. Determinación del fetch efectivo para el caso 2

Segmento	D_i (km)	α_i (°)	$\cos(\alpha_i)$	$D_i \cos(\alpha_i)$
1	0,19	-45	0,707	0,1
2	0,44	-40	0,766	0,3
3	0,44	-35	0,819	0,4
4	0,43	-30	0,866	0,4
5	0,44	-25	0,906	0,4
6	0,46	-20	0,940	0,4
7	0,50	-15	0,966	0,5
8	0,70	-10	0,985	0,7
9	0,73	-5	0,996	0,7
10	0,80	0	1,000	0,8
11	0,92	5	0,996	0,9
12	1,02	10	0,985	1,0
13	1,14	15	0,966	1,1
14	1,58	20	0,940	1,5
15	6,42	25	0,906	5,8
16	6,42	30	0,866	5,6
17	0,31	35	0,819	0,3
18	0,30	40	0,766	0,2
19	0,29	45	0,707	0,2
			16,9	21,3
Fetch (km) 1,26				

1.1.3. Caso 3

Se gira todo el sistema de segmentos 5° en el sentido horario con respecto al caso 2 (figura 9 y tabla 3).



Figura 9. Barrido para la determinación del fetch efectivo: caso 3

Tabla 3. Determinación del fetch efectivo para el caso 3

Segmento	D_i (km)	α_i (°)	$\cos(\alpha_i)$	$D_i \cos(\alpha_i)$
1	0,20	-45	0,707	0,1
2	0,21	-40	0,766	0,2
3	0,43	-35	0,819	0,4
4	0,45	-30	0,866	0,4
5	0,47	-25	0,906	0,4
6	0,51	-20	0,940	0,5
7	0,72	-15	0,966	0,7
8	0,78	-10	0,985	0,8
9	0,84	-5	0,996	0,8
10	0,92	0	1,000	0,9
11	1,02	5	0,996	1,0
12	1,11	10	0,985	1,1
13	1,55	15	0,966	1,5
14	1,92	20	0,940	1,8
15	6,42	25	0,906	5,8
16	5,99	30	0,866	5,2
17	0,31	35	0,819	0,3
18	0,30	40	0,766	0,2
19	0,29	45	0,707	0,2
			16,9	22,3
Fetch (km) 1,32				

1.1.4. Caso 4

Se gira todo el sistema de segmentos 5° en el sentido horario con respecto al caso 3 (figura 10 y tabla 4).



Figura 10. Barrido para la determinación del fetch efectivo: caso 4

Tabla 4. Determinación del fetch efectivo para el caso 4

Segmento	Di (km)	$\alpha_i(^{\circ})$	$\cos(\alpha_i)$	Di $\cos(\alpha_i)$
1	0,20	-45	0,707	0,1
2	0,21	-40	0,766	0,2
3	0,43	-35	0,819	0,4
4	0,45	-30	0,866	0,4
5	0,50	-25	0,906	0,5
6	0,73	-20	0,940	0,7
7	0,77	-15	0,966	0,7
8	0,84	-10	0,985	0,8
9	0,90	-5	0,996	0,9
10	1,01	0	1,000	1,0
11	1,13	5	0,996	1,1
12	1,57	10	0,985	1,6
13	1,92	15	0,966	1,9
14	6,41	20	0,940	6,0
15	6,00	25	0,906	5,4
16	1,48	30	0,866	1,3
17	0,31	35	0,819	0,3
18	0,31	40	0,766	0,2
19	0,32	45	0,707	0,2
			16,9	23,6
Fetch (km) 1,40				

1.1.5. Caso 5

Se gira todo el sistema de segmentos 5° en el sentido antihorario con respecto al caso 1 (figura 11 y tabla 5).



Figura 11. Barrido para la determinación del fetch efectivo: caso 5

Tabla 5. Determinación del fetch efectivo para el caso 5

Segmento	D_i (km)	α_i (°)	$\cos \alpha_i$	$D_i \cos(\alpha_i)$
1	0,18	-45	0,707	0,1
2	0,44	-40	0,766	0,3
3	0,44	-35	0,819	0,4
4	0,45	-30	0,866	0,4
5	0,46	-25	0,906	0,4
6	0,42	-20	0,940	0,4
7	0,43	-15	0,966	0,4
8	0,47	-10	0,985	0,5
9	0,51	-5	0,996	0,5
10	0,73	0	1,000	0,7
11	0,83	5	0,996	0,8
12	0,87	10	0,985	0,9
13	0,95	15	0,966	0,9
14	1,04	20	0,940	1,0
15	1,15	25	0,906	1,0
16	1,58	30	0,866	1,4
17	6,42	35	0,819	5,3
18	6,42	40	0,766	4,9
19	5,99	45	0,707	4,2
			16,9	24,5
Fetch (km) 1,45				

De las situaciones analizadas se puede concluir que el caso 1, al que le corresponde un fetch efectivo de 1,57 km es el más alto de todos, por lo que se usará para determinar la altura de ola de diseño y posterior diseño del rip-rap.

1.2. Determinación de la altura de ola

La altura de la ola, parámetro necesario para el diseño del tamaño de rocas para rip-rap, depende del fetch efectivo, que en este caso es de 1,57 km y de la velocidad del viento. Para adoptar este parámetro se recurre al reglamento CIRSOC 102, “Reglamento argentino de acción del viento sobre las construcciones” [2], el cual presenta un mapa de la República argentina con diferentes velocidades básicas para diseño (figura 12). Para la zona en estudio corresponde a una velocidad básica del viento para diseño de 40 m/s (144 km/h). Se toma esta velocidad para diseño, dado que no hay mayores obstáculos topográficos en la zona con excepción de la sierra de Marquesado hacia el este.

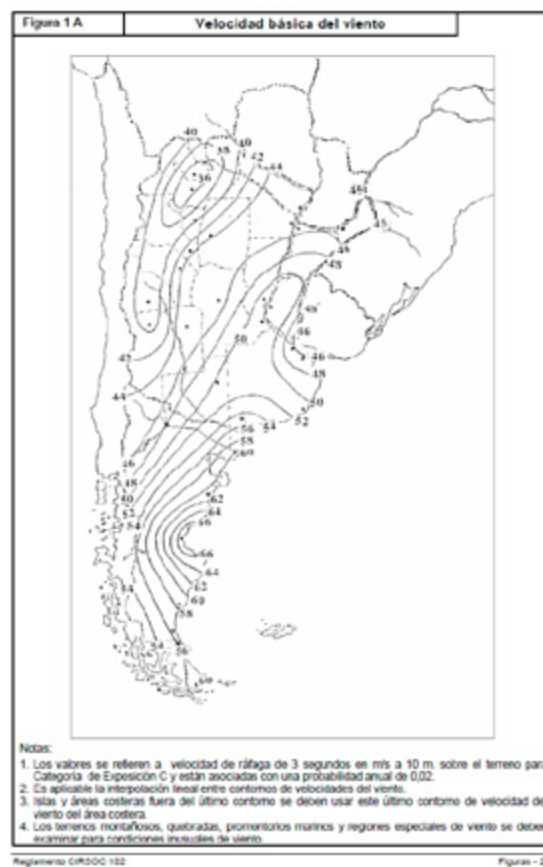


Figura 12. Velocidad básica de diseño según el CIRSOC 102

Hay distintas expresiones que dan valores de altura de ola de diseño en función del fetch efectivo. En este caso, se adopta la expresión de Sverdrup, Munk y Bretschneider [1], recomendada por el US Army Coastal Engineering Research:

$$H = \frac{V^2}{g} \left[0,283 tgh \left(0,0125 \left(\frac{g F_e}{V^2} \right)^{0,42} \right) \right]$$

(2)

Donde:

H: altura de ola (m) (figura 13).

V: velocidad del viento (m/s).

g: aceleración de la gravedad (9,8 m/s²).

Fe: fetch efectivo (m).

Para este caso particular resulta una altura de ola de:

Se adopta por redondeo una altura de ola de 1,50 m.

El periodo de la ola puede obtenerse de una expresión debida a Sverdrup, Munk y Bretschneider [1]:

$$H = \frac{(144/3,6)^2}{9,8} \times \left[0,283 \times \operatorname{tgh} \left(0,0125 \times \left(\frac{9,8 \times 1,57 \times 1000}{(144/3,6)^2} \right)^{0,42} \right) \right] = 1,49 \text{ m}$$

(3)

Donde:

T: periodo de la ola (s).

V: velocidad del viento (m/s).

g: aceleración de la gravedad (9,8 m/s²).

Fe: fetch efectivo (m).

Reemplazando valores:

La longitud de la ola en aguas profundas (véase figura 13) responde a la expresión (4) ([3, p. 129]:

$$T = \frac{2\pi V}{g} \left[1,20 \operatorname{tgh} \left(0,0077 \left(\frac{g F_e}{V^2} \right)^{0,25} \right) \right]$$

(4)

Reemplazando valores:

$$L = 1,56 \cdot 4,152 = 26,8 \text{ m}$$

La altura RS (véase figura 11) que alcanza la ola rota (run up) responde a esta expresión [3]:

$$R_s = \frac{KH}{\left[0,4 + \left(\frac{H}{L} \right)^{0,5} \cot \alpha \right]}$$

(5)

Donde:

K: coeficiente función de la lisura de la superficie del espaldón. K = 1,5.

H: altura de la ola (m).

L: longitud de la ola (m).

α : ángulo del espaldón (°).

Reemplazando valores:

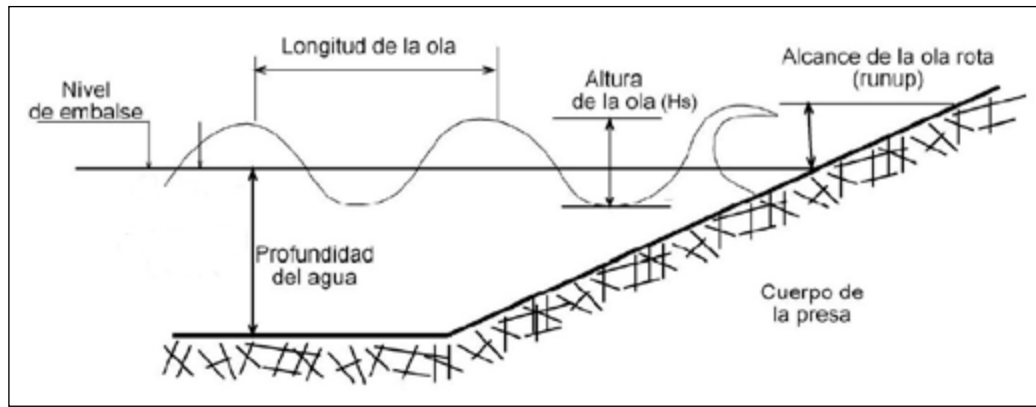


Figura 13. Oleaje frente a una presa. Explicación de cada uno de los términos [3, p. 132]

También se hace una verificación de ola por efecto sísmico teniendo en cuenta la alta sismicidad de la zona. Para ello se utiliza esta fórmula [1]:

$$H = \frac{ST\sqrt{gD}}{2\pi} \quad (6)$$

Donde:

S: coeficiente sísmico horizontal.

T: periodo preponderante del sismo (s).

g: aceleración de la gravedad.

D: profundidad del embalse.

Para este caso se tiene:

$S = 2 \times 0,12 = 0,24$ (zona 4 según NAA-80 [4])

$T = 1$ s

$D = 768 - 765 = 3$ m (en inmediaciones de cierre lateral, dado que la cota del terreno natural en el punto más bajo es aproximadamente 765 m.s.n.m. y la del nivel de agua máximo de operación normal es de 768 m.s.n.m.).

$$H = \frac{0,24 \times 1 \sqrt{9,8 \times 3}}{2\pi} = 0,21 \text{ m}$$

Es un valor mucho menor que la ola debida al efecto de viento (aprox. 1,50 m), por lo que se toma 1,50 m como valor de diseño para el rip-rap.

1.3. Tamaño del rip-rap

Para evitar que el material del rip-rap sea removido por el oleaje, es necesario que tenga un peso suficiente. Puede obtenerse mediante la fórmula de Hudson [1]:

$$W = \left[\frac{1000 H^3 \gamma_r}{K_D (\gamma_r - \gamma_w)^3 \cot \alpha} \right] \quad (7)$$

Donde:

W : peso medio de los bloques (en KN). Los bloques deben tener un peso máximo de $3,5 W$ y un peso mínimo de $0,25 W$.

γ_r : peso específico de la roca. Se adopta $26,5 \text{ KN/m}^3$ (dacita).

γ_w : peso específico del agua ($10,0 \text{ KN/m}^3$).

γ : ángulo que forma el paramento con la horizontal = $21,8^\circ$ (talud 1 v: 2,5 h; figura 3).

H : altura de ola = $1,50 \text{ m}$.

KD : coeficiente que depende de la forma de la piedra, del espesor y métodos de colocación, valores que se pueden obtener de la tabla 6. Para roca angular, proveniente de voladura y en dos capas se tiene $KD = 3,5$.

Tabla 6. Valores del coeficiente KD [1, p. 1690]

Tipo de piedra	Número de capas protección	KD
Redondeada	2	2,1
	3	2,8
Angular	2	3,5
	3	3,9

Reemplazando valores:

$$W = \frac{1000 \times 1,50^3 \times 26,5}{[3,5 \times (26,5 - 10,0)^3 \times \cot 21,8^\circ]} = 2,3 \text{ KN}$$

Tamaño medio piedra:

$$L = \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma_r}} = \sqrt[3]{\frac{2,3}{26,5}} = 0,44 \text{ m}$$

Peso máximo de piedra = $3,5 \times 2,3 = 8,1 \text{ KN}$

Tamaño máximo piedra:

$$L = \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma_r}} = \sqrt[3]{\frac{8,1}{26,5}} = 0,67 \text{ m}$$

Peso mínimo de piedra = $0,25 \times 2,3 = 0,6 \text{ KN}$

Tamaño mínimo piedra:

$$L = \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma_r}} = \sqrt[3]{\frac{0,6}{26,5}} = 0,28 \text{ m}$$

Se recomienda que el espesor del rip-rap sea por lo menos 1,5 veces el tamaño medio de la piedra, vale decir: $1,5 \times 0,44 = 0,66 \text{ m}$. El espesor del rip-rap colocado en el cierre lateral es de $0,60 \text{ m}$ (figura 3). Teniendo en cuenta que la situación de presencia de agua en el espaldón aguas arriba del cierre lateral es solo eventual y que tiene lugar solamente en el caso de máximas crecida del río San Juan, se puede considerar que es aceptable el espesor colocado de $0,60 \text{ m}$, más teniendo en cuenta los embalses recientemente construidos de Punta Negra y Caracoles, situados aguas arriba de Ullum, que actúan como reguladores. En la figura 14 se muestra el aspecto del rip-rap existente y se puede apreciar que el tamaño de piedra coincide aproximadamente con el que se ha obtenido mediante la verificación ya explicada.



Figura 14. Detalle y aspecto general del rip-rap existente en el cierre lateral, donde se puede apreciar el tamaño del material pétreo colocado

2. Rip-rap que se coloca en un terraplén no adosado al cierre lateral

Entre progresivas 960-1920, la traza del camino de acceso al túnel puede entrar en contacto con las aguas de la represa de Ullum en situación de creciente extraordinarias, tal como se ve en figura 2. Esta situación es menos crítica que la anterior, dado que el fetch es considerablemente menor, pero de todas maneras es necesario prever la colocación de material pétreo en el talud del lado del embalse a modo de protección, tal como se muestra en figura 15.

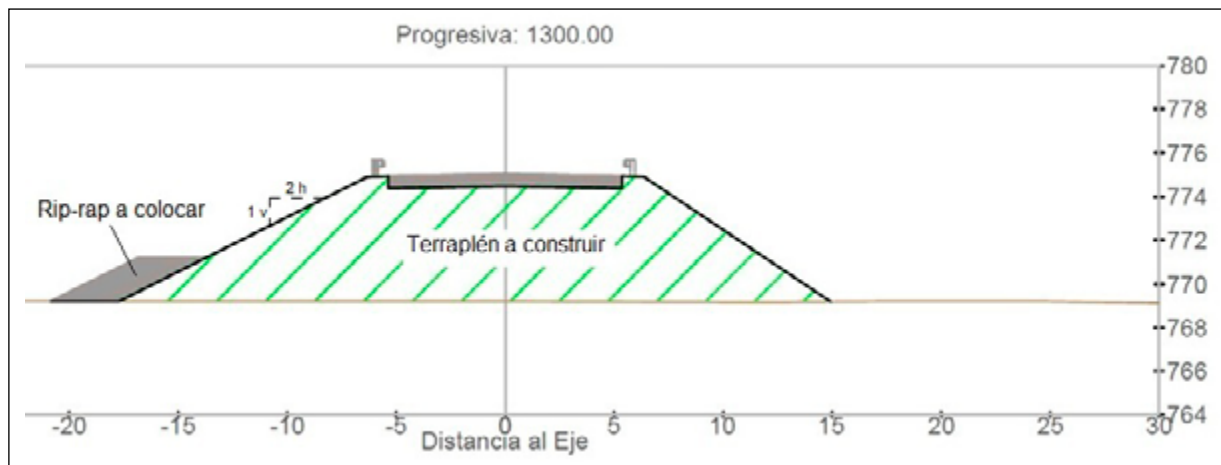


Figura 15. Terraplén que se va a construir con protección del rip-rap, caso correspondiente a la progresiva 1300

2.1. Determinación del fetch efectivo máximo

Por razones de simplicidad en las especificaciones, se prevé que para este sector el material de rip-rap sea de las mismas características que el material colocado en el cierre lateral; criterio que está del lado de la seguridad, dado que el fetch efectivo sobre este tramo del proyecto es mucho menor que el que actúa sobre el cierre lateral existente. En efecto, para este sector del proyecto se tiene (figura 16):



Figura 16. Barrido para determinación del fetch efectivo en el sector entre progresivas 960-1920 (terraplén no adosado a cierre lateral presa de Ullum)

Para este caso, el fetch efectivo es el indicado en la tabla 7.

Tabla 7. Determinación del fetch efectivo para el cierre lateral

Segmento	Di (km)	$\alpha_i(^{\circ})$	$\cos(\alpha_i)$	Di $\cos(\alpha_i)$
1	0,13	-45	0,707	0,1
2	0,14	-40	0,766	0,1
3	0,14	-35	0,819	0,1
4	0,12	-30	0,866	0,1
5	0,12	-25	0,906	0,1
6	0,12	-20	0,940	0,1
7	0,18	-15	0,966	0,2
8	0,39	-10	0,985	0,4
9	2,61	-5	0,996	2,6
10	1,96	0	1,000	2,0
11	1,72	5	0,996	1,7
12	1,52	10	0,985	1,5
13	1,37	15	0,966	1,3
14	1,10	20	0,940	1,0
15	0,70	25	0,906	0,6
16	0,30	30	0,866	0,3
17	0,27	35	0,819	0,2
18	0,15	40	0,766	0,1
19	0,14	45	0,707	0,1
			16,9	12,7
Fetch (km) 0,75				

Se puede ver que el fetch efectivo es de solo 0,75 km, la mitad del correspondiente al cierre lateral, con lo que la altura de ola prevista es, aplicando la expresión (2):

$$H = \frac{(144/3,6)^2}{9,8} \times \left[0,283 \times tgh \left(0,0125 \times \left(\frac{9,8 \times 0,75 \times 1000}{(144/3,6)^2} \right)^{0,42} \right) \right] = 1,10 \text{ m}$$

El periodo de la ola es, según la expresión (3):

$$T = \frac{2\pi \times (144/3,6)}{9,8} \times \left[1,20 \times tgh \left(0,0077 \left(\frac{9,8 \times 0,75 \times 1000}{(144/3,6)^2} \right)^{0,25} \right) \right] = 3,45 \text{ seg}$$

La longitud de la ola en la zona de agua profunda es, según expresión (4):

$$L = 1,56 \times 3,45^2 = 18,6 \text{ m}$$

La altura RS que alcanza la ola rota (run up), según la expresión (5), teniendo en cuenta que el ángulo del talud adoptado para el rip-rap es, en este caso, de 26,6° (talud 1 v:2 h) (véase figura 15):

$$R_s = \frac{1,5 \times 1,10}{\left[0,4 + \left(\frac{1,10}{18,6} \right)^{0,5} \times \cot 26,6^\circ \right]} = 0,37 \text{ m}$$

El peso medio de la piedra, según la expresión (7) es, teniendo en cuenta la altura de ola H=1,10 m, y el coeficiente por forma, espesor y método de colocación es KD = 3,5:

$$W = \frac{1000 \times 1,10^3 \times 26,5}{\left[3,5 \times (26,5 - 10,0)^3 \times \cot 26,6^\circ \right]} = 1,10 \text{ KN}$$

Tamaño medio piedra:

$$L = \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma_r}} = \sqrt[3]{\frac{1,1}{26,5}} = 0,35 \text{ m}$$

Peso máximo de piedra = 3,5 × 1,1 = 3,9 KN

Tamaño máximo piedra:

$$L = \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma_r}} = \sqrt[3]{\frac{3,9}{26,5}} = 0,53 \text{ m}$$

Peso mínimo de piedra = 0,25 × 1,1 = 0,3 KN

Tamaño mínimo piedra:

$$L = \sqrt[3]{\frac{W}{\gamma_r}} = \sqrt[3]{\frac{0,3}{26,5}} = 0,22 \text{ m}$$

Espesor recomendado de rip-rap: 1,5 × tamaño medio piedra = 1,5 × 0,35 = 0,53 m

Estos valores resultan menores que los correspondientes al rip-rap del cierre lateral existente, vale decir, con 1 m de espesor de rip-rap, tamaño máximo de 0,60 m y una capa de filtro de 0,40 m entre el cuerpo del terraplén y el rip-rap se está a cubierto de la acción del oleaje sobre el

terraplén, la que se reitera que será muy eventual, especialmente ahora que están construidos los diques reguladores de Punta Negra y Caracoles.

3. Diseño de la capa del filtro

Se hace una verificación mediante las leyes de Terzaghi para el diseño de filtros.

$$\frac{D_{15}^F}{D_{85}^M} \leq 5$$

(8) para evitar el arrastre de finos

$$\frac{D_{15}^F}{D_{15}^M} \geq 5$$

(9) para asegurar una buena permeabilidad en el filtro

Por otro lado, el US Corp of Engineers sugiere agregar una tercera condición, tendiente a lograr un paralelismo entre curvas granulométricas de filtro y material de relleno. La misma es:

$$\frac{D_{50}^F}{D_{50}^M} \leq 25$$

(10)

Nota aclaratoria: el supraíndice M se refiere siempre al material que se va a proteger (situado aguas arriba), y el supraíndice F, al material de filtro (situado aguas abajo).

Para el material de terraplén, conformado por suelo A-1-a, presente en la zona del proyecto, entre progresivas 0 y 2300, se supone:

$$D_{15} = 0,42 \text{ mm (TN}^\circ 40)$$

$$D_{50} = 9,5 \text{ mm (T } 3/8\text{")}$$

$$D_{85} = 38,1 \text{ mm (T } 1 \frac{1}{2}\text{")}$$

$$D_{15}^{\text{Filtro}} > 5 \times D_{15}^{\text{Terraplén}} = 5 \times 0,42 = 2,10 \text{ mm}$$

$$D_{15}^{\text{Filtro}} < 5 \times D_{85}^{\text{Terraplén}} = 5 \times 38,1 = 190 \text{ mm} = 19 \text{ cm}$$

$$D_{50}^{\text{Filtro}} < 25 \times D_{50}^{\text{Terraplén}} = 25 \times 9,5 = 237 \text{ mm} = 23,7 \text{ cm}$$

Se adopta para el filtro:

$$D_{15} = 7 \text{ mm} = 0,7 \text{ cm}$$

$$D_{50} = 20 \text{ mm} = 2 \text{ cm}$$

$$D_{85} = 120 \text{ mm} = 12 \text{ cm}$$

$$D_{100} = 300 \text{ mm} = 30 \text{ cm}$$

De acuerdo con lo dicho, para el rip-rap se tiene:

D100 = 60 cm

D85 = 50 cm (valor estimado)

D50 = 35 cm

D15 = 25 cm, teniendo en cuenta que el tamaño mínimo es aproximadamente 20 o 22 cm.

Verificando las leyes de filtro entre el rip-rap y el filtro se tiene:

$D_{15Rip-rap} > 5 \times D_{15Filtro} = 5 \times 0,7 = 3,5 \text{ cm}$

$D_{15Rip-rap} < 5 \times D_{85Filtro} = 5 \times 12 = 60 \text{ cm}$

$D_{50Rip-rap} < 25 \times D_{50Filtro} = 25 \times 2 = 50 \text{ cm}$

En figura 17 se muestran las granulometrías para el material de terraplén, de filtro de transición y de rip-rap.

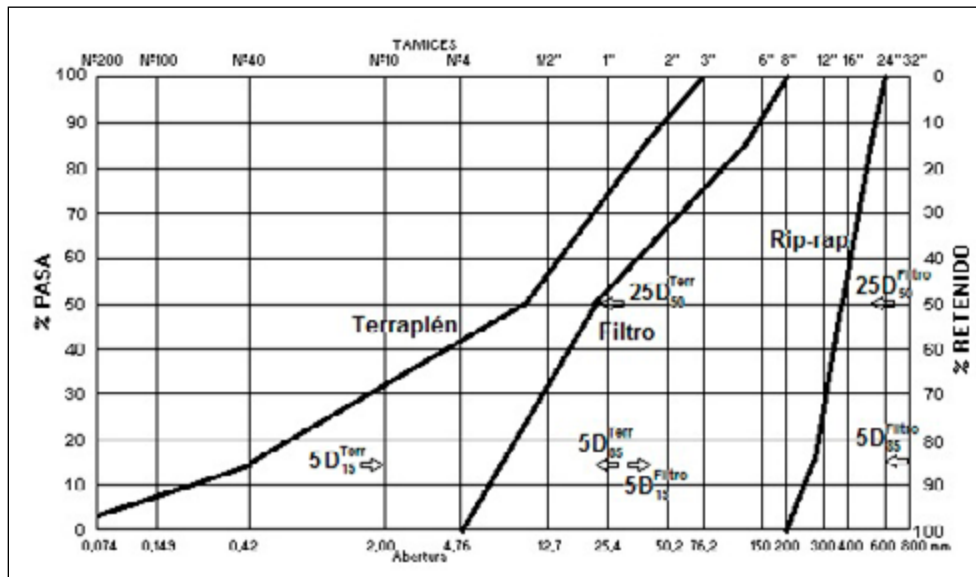


Figura 17. Granulometrías propuestas para material de terraplén, de filtro y de rip-rap y verificación de las condiciones de filtro de una capa con respecto a la otra.

Finalmente, se especifica para el rip-rap lo siguiente:

Tamaño máximo: 60 cm

Tamaño medio: 35 cm

Tamaño mínimo: 20 cm

Para el material de filtro:

PT 8": 100 %

PT 1": 30-70 %

PT 3/8": 0-10 %

Conclusiones

- Se aplicaron criterios conocidos de diseño de rip-rap y se verificó que el rip-rap existente en el cierre lateral del embalse de Ullum es el adecuado; no es necesario agregar material adicional en el espaldón aguas arriba del cierre lateral para incrementar su protección frente al oleaje.
- Se adoptó el mismo material para el sector del terraplén que no está adosado al cierre lateral, por cuestiones de seguridad. Allí la acción del oleaje es menos exigente.
- Es necesario remarcar que la acción del oleaje será muy eventual, especialmente ahora, dado que ya están construidos los diques reguladores de Punta Negra y Caracoles.

Agradecimientos

Al Dr. Ing. Yasmany D. García Ramírez, docente de la Universidad Técnica Particular de Loja (Ecuador) y exalumno de la EICAM, Universidad Nacional de San Juan (Argentina), por su invitación a publicar este artículo en la revista Avances. Investigación en Ingeniería.

Al director de la EICAM, Dr. Ing. Aníbal L. Altamira, por su apoyo y aliento para publicar este artículo en la revista Avances. Investigación en Ingeniería.

Al colega y compañero de trabajo, MSc. Ing. Gustavo Núñez, por su buena disposición para facilitarme datos sobre el proyecto y construcción del cierre lateral de la presa de Ullum, que fueron muy valiosos para encarar este trabajo.

Referencias

- [1] J. A. Jiménez Salas et al., Geotecnia y cimientos, tomo III. Madrid: Rueda, 1980.
- [2] J. C. Reimundín y R. Cudmani, Reglamento argentino de acción del viento sobre las construcciones-CIRSOC 102. Buenos Aires: Instituto Nacional de Tecnología Industrial, 2008.
- [3] M. E. Espinosa, Ingeniería de presas de escollera. Mendoza, Argentina: Universidad Nacional de Cuyo, 2010.
- [4] Normas antisísmicas argentinas-NAA-80. San Juan, Argentina: Instituto Nacional de Prevención Sísmica (INPRES), 1980.