



DISEÑO HIDRÁULICO Y OBRAS DE PROTECCIÓN DEL PUENTE BOCAPÁN – REGION TUMBES

Aquiles Berrocal Rodríguez (aquiles1017@hotmail.com)

Manuel Gómez Rojas (mgomezr@uni.pe)

Cristhian Pérez Guerrero (cjpgg89@hotmail.com)

Curso: Diseño de Obras Hidráulicas (HH 415)

RESUMEN: Se efectuó el diseño hidráulico del Puente Bocapán, ubicado en la región Tumbes, y se planteó como defensa ribereña principal un sistema de diques guía. El río Bocapán no tiene registro de caudales máximos, por lo que se obtuvo los caudales de diseño a partir de datos de precipitación máxima de 24 horas, los caudales de diseño fueron: caudal con un periodo de retorno de 100 años para la determinación de la altura del puente ($Q_{100} = 1814.4 \text{ m}^3/\text{s}$), y caudal de 500 años de periodo de retorno para la verificación de la estabilidad del puente ($Q_{500} = 3389.7 \text{ m}^3/\text{s}$). El cálculo hidráulico del flujo de avenidas en la zona del puente se realizó aplicando el software Hec – Ras. Los cálculos de socavación se efectuaron aplicando los métodos de Lischtván Lebediev y de la Universidad Estatal de Colorado. Se propone un puente de 270 metros de longitud con tres pilares intermedios, con una altura mínima hasta la base de las vigas de apoyo de 6 m metros. El puente contará con un sistema de diques guía, estos tienen una altura de 5 metros y ancho de corona de 4 m, con un talud de 1V:2H. Se diseñó un sistema de enrocado de protección para los pilares del puente y para la protección de los taludes de los diques guía.

1.. INTRODUCCION

El Puente Bocapán está ubicado políticamente en el Distrito de Zorritos, Provincia de Contralmirante Villar, Región Tumbes; en la Ruta Nacional PE-1N Km 1231+871 de la Carretera Panamericana Norte.

La región Tumbes es una de las regiones del país más afectadas por el impacto del Fenómeno El Niño. Las quebradas y ríos de Tumbes, ubicadas en una zona desértica, tienen amplias llanuras de inundación, pequeñas pendientes, y tienen la particularidad de tener caudales intermitentes y activarse solo en épocas de lluvia que ocurren en la parte alta de sus cuencas. Durante la ocurrencia del Fenómeno El Niño, llueve también en la parte baja de las cuencas, en la zona desértica, originando caudales de avenidas extraordinarios.

El diseño de un puente requiere de un correcto análisis de la Hidrología de la región y de la Hidráulica Fluvial del río que atraviesa, pues la presencia de un puente en una corriente con amplias llanuras de inundación origina una contracción en la zona del puente, debido al relleno de las carreteras de acceso y a los pilares del puente.

El análisis también incluye estudios de fenómenos socavación general y de contracción en la zona del puente, pues el puente produce un aumento de la velocidad del flujo debido a la contracción o reducción de la sección natural del río, generando además un remanso aguas arriba en ríos de pequeña pendiente, por otro lado se producen

fenómenos de socavación local en los pilares y estribos. Los estudios de hidráulica en el diseño de puentes son muy importantes para definir la altura y la longitud adecuada del puente, para definir las profundidades de cimentación de la estructura, para diseñar los sistemas de defensa en pilares y estribos. Y también para diseñar defensas ribereñas aguas arriba y aguas abajo del puente debido al incremento de los tirantes máximos, por influencia del puente.

En este documento se presenta, en resumen, todos aquellos aspectos, criterios, y procedimiento adecuados y necesarios para el diseño hidráulico del puente Bocapán,

2. ESTUDIOS BASICOS.

2.1 Topografía

En la zona de emplazamiento del puente, 350 m aguas arriba y 300 m aguas abajo, se efectuó un levantamiento topográfico con curvas de nivel cada metro. Asimismo, para el cálculo de los parámetros geomorfológicos de la cuenca de la Quebrada Bocapán fue necesario contar con las siguientes cartas nacionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN): Zorritos (8B), Tumbes (8C), Quebrada Seca (9B). Toda la información se trabajó en sistema de coordenadas UTM sobre el datum WGS – 84.

2.2 Geología y Geotécnia

Las colinas de la cuenca del río Bocapán están principalmente constituidas por rocas

sedimentarias (areniscas) friables y deleznales, superficialmente alteradas. En la parte alta de la Cuenca (Cerros Amotape) existen grandes afloramientos de granito, por lo que se cuenta con una cantera asegurada y cercana para sistemas de protección con enrocado. La litología de la cuenca se compone de 6 formaciones: Formación Salinas, Formación Talara, Formación Máncora, Depósitos Eluvio-aluviales, Depósitos Fluviales e Intrusivos

Es importante un estudio de suelos tanto en la zona donde se proyectará el Puente como aguas arriba y aguas debajo de la estructura. Los estudios de geotécnica comprenden principalmente la granulometría del material del lecho, capacidad portante del suelo, permeabilidad del suelo, presencia de sulfatos y cloruros, profundidad del nivel freático. El análisis granulométrico del material del cauce del río indica que se trata de un suelo no cohesivo y homogéneo de material arena limosa.

Tabla 1. Granulometría del material del cauce (mm)

D ₁₅	D ₃₅	D ₅₀	D ₇₅	D ₈₅
0.18	0.42	0.6	1.5	3.1

2.3 Hidrología

En la zona de estudio el clima puede categorizarse como cálido y árido en la zona plana de la cuenca, y monzón tropical en las áreas montañosas. La temperatura media anual varía ligeramente de 25 °C a 27 °C, y a nivel mensual varía de 23 °C a 27 °C. La humedad relativa tiene una variación anual de 70% al 82%, y una variación a nivel mensual de 71% al 85%. En la zona del proyecto las precipitaciones ocurren principalmente entre los meses de enero a abril. La precipitación interanual presenta grandes fluctuaciones, tiene valores extremos mínimos que se aproximan a cero, y tiene valores extremos máximos, principalmente durante la ocurrencia del Fenómeno El Niño.

La cuenca del río Bocapán tiene las características principales que se muestran en la Tabla 2. En la figura 1 se muestra una representación de la forma y relieve de la cuenca, de la cual se generó la curva hipsométrica.

Tabla 2. Parámetros Geomorfológicos de la cuenca del río Bocapán

Parámetros	Característica
Área (km ²)	904.80
Perímetro (km)	169.72
Longitud del Cauce Principal (km)	77.4
Índice de Compacidad	1.59
Pendiente Media de la Cuenca	28.95 %

Pendiente del Cauce Principal	0.57 %
-------------------------------	--------

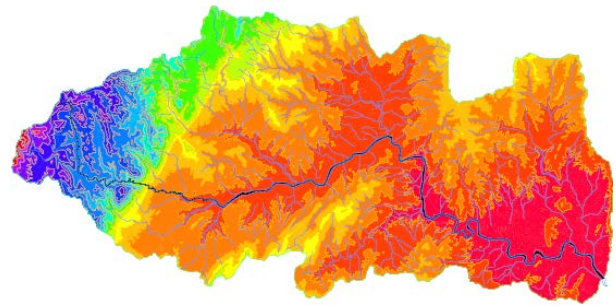


Figura 1. Forma y relieve de la cuenca del río Bocapán desde el punto de ubicación del puente

El río Bocapán no dispone de registro de caudales, pero si existen estaciones con registros pluviométricos, por lo que las estimaciones de los caudales de diseño deben realizarse a partir de datos de precipitaciones máximas de 24 horas. La estación hidrológica usada tiene un rango de registros de precipitaciones desde el año 1960 a 1979. Después de efectuar las pruebas de bondad de ajuste al registro de precipitaciones máximas de 24 horas, se encuentra que la distribución de probabilidad que mejor se ajusta a la muestra es la distribución Log Normal.

En base a la distribución de probabilidad Log Normal obtenemos las precipitaciones para diferentes periodos de retorno T (Tabla 3).

Tabla 3. Precipitación máxima de 24 horas

T (años)	P _{máx} 24 horas (mm)
100	310.9
500	515.7

Para determinar los caudales máximos de diseño se aplica el método del Hidrograma Unitario de Snyder, usado para cuencas intermedias, el cual es definido como el hidrograma unitario estándar cuya duración de lluvia tr está relacionada con el retardo de cuenca t_1 , que está dado por:

$$t_1 = C_1 (LL_c)^{0.3}$$

En donde L es la longitud del cauce principal en km, L_c es la longitud del cauce principal hasta la altura del centro de gravedad de la cuenca, en km, y C_1 es un coeficiente que depende del gradiente de la cuenca asociada con su capacidad de almacenamiento, $C_1 = 1.5$. El valor que se obtiene es de $t_1 = 17.8$ horas

El caudal pico para 1 cm de precipitación está dado por::

$$Q_p = \frac{2.78 C_p A}{t_1}$$

El factor adimensional C_p lo estimamos en 0.57. Finalmente para obtener el caudal de diseño,

multiplicamos el caudal pico obtenido por la precipitación efectiva de acuerdo a cada periodo de retorno.

Para el cálculo de la Precipitación Efectiva se utilizó el método del Soil Conservation Service – SCS para cuencas intermedias, que exige determinar el número de curva (CN), característica de la cuenca, para determinar las abstracciones hidrológicas. En la cuenca en estudio se realizó un promedio ponderado de acuerdo al área de participación de cada uso de tierra, y se amplificó para el evento crítico del Fenómeno de El Niño, determinándose un número de curva de CN = 75. En la Tabla 5 se muestra los caudales de diseño obtenidos

Tabla 5. Precipitación efectiva y caudales de diseño

T (años)	P _{efectiva} (mm)	Q (m ³ /s)
100	228.2	1814.4
500	426.4	3389.7

La altura mínima del puente se determina con cálculos hidráulicos con el caudal de 100 años de periodo de retorno, y los cálculos de socavación y el diseño de los sistemas de defensa se hacen tomando en cuenta el caudal de 500 años de periodo de retorno.

3.. DISEÑO HIDRAULICO DEL PUENTE

3.1 Coeficiente de Fricción de Manning

Antes de realizar el modelamiento hidráulico se estimó el coeficiente de rugosidad de Manning del cauce principal y de las llanuras de inundación, mediante los métodos de Stricker y Cowan respectivamente, se obtiene:

Cauce Principal:	n = 0.035
Llanuras de Inundación:	n = 0.060

3.2 Estudio del Flujo de Avenidas en la Zona del Puente Para Determinar las dimensiones Adecuadas de la Estructura

El puente Bocapán, se plantea sea de vigas metálicas por lo que se considera que las luces no deben ser mayores de 80 m, por lo tanto el puente tendrá, además de sus estribos, tres pilares intermedios igualmente espaciados, es decir será un puente de 4 luces. Se considera un número adecuado de pilares intermedios a fin de que la reducción del ancho efectivo sea el menor posible. En cuanto al ancho del tablero de la losa será modelado con un ancho de 8m, típico de una carretera de dos vías.

El estudio de la erosión fluvial, se analiza en tres etapas. Para la erosión por contracción se analiza antes la velocidad crítica, es decir la velocidad por

encima del cual el material del lecho de tamaño D_{50} y menor será transportado, este análisis previo es importante pues nos indicará si el estudio se realizará con agua limpia (sin transporte de sedimentos) o con lecho móvil (con transporte de sedimentos). Un análisis con agua limpia es el que genera mayor socavación por la alta capacidad de transporte de sedimentos del agua. La velocidad crítica se calcula de:

$$V_c = 6.19y^{1/6}D_{50}^{1/2} \quad (6)$$

Donde y es la profundidad del flujo. Luego de este análisis previo se calcula la erosión por contracción, en el caso de agua limpia se tiene.

$$y_2 = \left[\frac{0.025Q^2}{D_m^{2/3}W^2} \right]^{3/7} \quad (7)$$

$$y_s = y_2 - y_0 \quad (8)$$

Donde Q es el caudal, $D_m = 1.25D_{50}$, W es el ancho de la contracción, y_0 es la profundidad de la contracción antes de la erosión, y_s socavación por contracción.

La erosión de los pilares se calcula con el Método de la Universidad Estatal de Colorado (CSU). Esta ecuación fue desarrollada con base en análisis dimensional de los parámetros que afectan la socavación, y análisis de datos de laboratorio. Este método está en función de la profundidad del flujo aguas arriba del pilar y_1 , del ancho del pilar a , número de Froude Fr , la corrección para la forma de pilar k_1 , y de la corrección para el ángulo de ataque del flujo k_2 .

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0k_1k_2k_3 \left[\frac{a}{y_1} \right]^{0.65} Fr_1^{0.42} \quad (9)$$

La socavación al pie de los estribos de los estribos se calcula con el Método de Froehlich. Basada en un análisis dimensional y en un análisis de regresión de laboratorio para 170 mediciones de socavación en lecho móvil. Este método está en función de la longitud del estribo L y de la profundidad media en la llanura de inundación y_a , la fórmula de cálculo está dada por:

$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27k_1k_2 \left[\frac{L}{y_a} \right]^{0.42} Fr_1^{0.61} + 1 \quad (10)$$

La socavación total se obtiene de la suma de las erosiones de cada caso, para esto se utilizó el programa HEC-RAS 4.1 para el análisis de velocidades, profundidades del flujo y análisis de la erosión para diferentes longitudes del puente. En

la Tabla 6 se observan los resultados del análisis, que permiten definir una luz adecuada del puente.

Con respecto a las secciones transversales que requiere el modelo HecRas para simular el río durante la avenida, fueron primero trabajadas en el programa Civil3D. La topografía fue analizada para después crear una superficie, en donde se trazaron las secciones transversales más representativas del río (en total 26). Luego se exportaron estas secciones del Civil3D al HecRas.

En la Figura 2 se muestra la ubicación de las secciones transversales del río usadas para la aplicación del Modelo Hec Ras, y en la Figura 3 se muestran las secciones transversales en la zona del puente, donde se observan tres pilares intermedios

En la Tabla 3 se muestra los resultados del análisis, que permiten definir las dimensiones adecuadas del puente

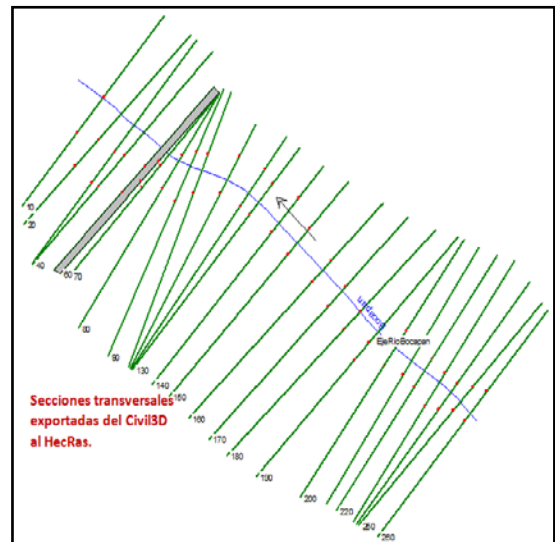


Figura 2 Secciones transversales para la aplicación del Modelo Hec Ras

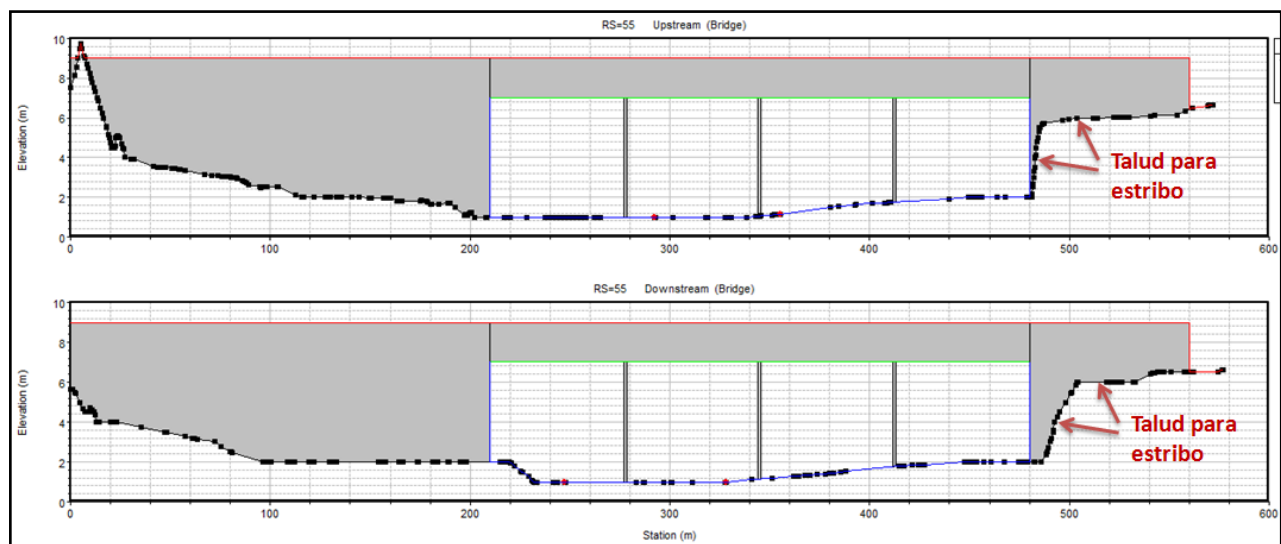


Figura 3 Secciones transversales en la zona del puente Bocapán

Tabla 3 . Características del flujo para $Q = 1814 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T=100$ años), y profundidades de socavación para $Q = 3390 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T=500$ años) para diferentes longitudes del puente Bocapán

Luz del Puente (m)	# Pilares	Luz libre entre 2 pilares (m)	Ancho efectivo Be (m)	Q = 1814.4 m3/s (Tr=100 años)			Q = 3389.7 m3/s (Tr=500 años)					
				Tirante (m)	Cota del Nivel de Agua (msnm)	Cota Mínima del Puente (msnm)	Tirante Aguas Arriba (m)	Velocidad Aguas Arriba (m/s)	Froude	Erosión general mas contracción (m)	Erosión local (m)	Erosión total (m)
210	2	69	207	3.96	4.96	7.46	4.59	3.95	0.59	6.48	16.63	23.11
230	2	75.7	227	3.63	4.63	7.13	4.06	4.08	0.65	6.34	14.14	20.48
250	2	82.3	247	3.48	4.48	6.98	3.99	3.79	0.61	5.72	13.36	19.08
270	3	66.4	265.5	3.43	4.43	6.93	3.96	3.53	0.57	5.2	12.82	18.02
290	3	71.4	285.5	3.39	4.39	6.89	3.99	3.25	0.52	4.69	12.51	17.2
310	3	76.4	305.5	3.35	4.35	6.85	3.98	3.07	0.49	4.37	12.16	16.53
330	3	81.4	325.5	3.33	4.33	6.83	4.03	2.87	0.46	4.03	12.03	16.06

3.3 Selección de la longitud y altura adecuada del puente

Analizando los resultados de la Tabla 3, se recomienda que la longitud adecuada del puente está en el orden de 270 m. Para la elección de la longitud más apropiada se debe observar también que los fenómenos de socavación deben ser aceptables para ser controlados con un sistema de defensas ribereñas, se observa que con longitudes del orden de magnitud mayor a 270 m la socavación total tiene poca variación. Además con luces mayores a la recomendada los tirantes de flujo sufren variaciones pequeñas, es decir ya no son significativas. Luego al revisar la tabla de niveles de agua máximas para el caudal de $Tr=100$ años, determinamos que la cota mínima de la parte más baja del puente es de 6.93 msnm, considerando un borde libre de 2.5 m.

4. SISTEMAS DE DEFENSA

4.1. Protección en la base de los pilares

La solución que se adaptó para proteger a los pilares de la socavación es la colocación de manto de escollera. Esta debe efectuarse por lo menos hasta la profundidad que alcanza la socavación general y por contracción, y en lo posible hasta una profundidad de tal manera que no se desarrolle la socavación local.

Para realizar el dimensionamiento de las rocas a usar en la escollera existen varios métodos, en el presente estudio se ha estimado el método de Maza Álvarez y el método del HEC-18. Los diámetros medios de roca obtenidos son 0.20 m y 0.60 m respectivamente. Se considera el valor más conservador de 0.60 m como diámetro medio de la roca para la escollera. En la Figura 4 se muestra en perfil la ubicación recomendada del enrocado

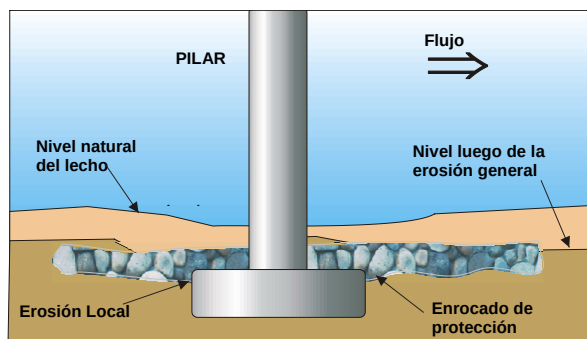


Figura 4. Colocación de enrocado en el pilar

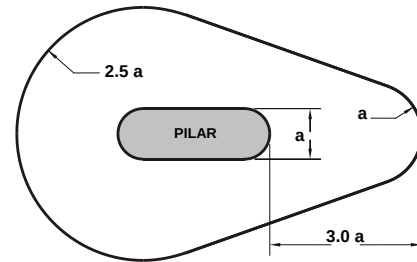


Figura 5. Esquema de la escollera en planta (espesor $a=1.5$ m)

4.1 Diques Guía

Se debe colocar un sistema de protección a los estribos. Dado que el río tiene llanuras de inundación se propone colocar un sistema de Diques guía. Estos diques cumplen con las siguientes funciones:

- Hacen que las velocidades del flujo sean perpendiculares al puente.
- Protegen los estribos de los fenómenos de socavación.

Se colocarán diques guía aguas arriba y aguas abajo del puente, en ambos estribos. En la figura siguiente se muestra un esquema de un dique guía típico:

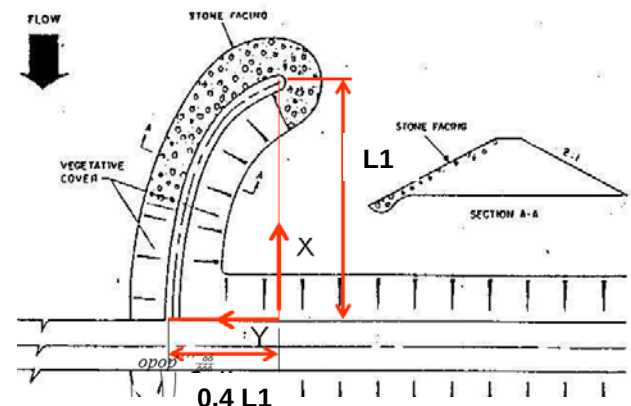


Figura 6. Esquema de un dique guía

Para el puente Bocapán se selecciona las siguientes longitudes:

$L_1 = 270$ m (aguas arriba)

$L_2 = 90$ m (Longitud del dique aguas abajo del puente, se recomienda $L_2 = L_1/3$)

La orientación de los diques en planta sigue la siguiente ecuación:

$$\frac{X^2}{L_1^2} + \frac{Y^2}{(0.4L_1)^2} = 1$$

La altura del dique guía se determina agregando una altura de borde libre (1.0 m) al nivel máximo de agua (3.43 m), dando un total de 4.43 m. Se tomara como altura de diseño del dique guía: 5.0 m

El ancho de corona del dique guía se determina de acuerdo al caudal de diseño, en nuestro caso para el caudal de 1815.0 m³/s se escoge la ancho de 4.0 m.

Para el diseño del enrocado se aplicó los métodos de Maynard y el del U.S. Department of Transportation, el valor más conservador al aplicar ambos métodos resultó 1.7 m., por lo que se escogerá como tamaño $d_{50} = 1.5$ m.

En la figura 6 se muestra la sección transversal del dique guía.

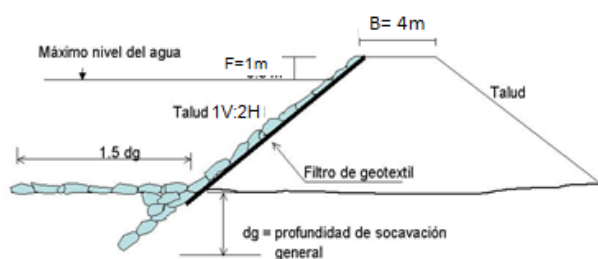


Figura 6 Sección transversal recomendada para el dique guía

CONCLUSIONES

- Tras realizar el estudio hidráulico se concluyó que las dimensiones adecuadas del puente son: Longitud = 270m con 3 pilares intermedios equidistantes, y la cota mínima de la base de la viga de apoyo del Puente debe ser de 6.93 msnm.
- Los cálculos de socavación se efectuaron para un caudal de diseño $Q = 3389.7$ m³/s correspondiente a un periodo de retorno de $T = 500$ años. Para este caudal y la longitud del puente recomendada se obtiene una erosión general más contracción de 5.20 m., y una erosión local en los pilares de 12.8 m.
- El sistema de defensas ribereñas más óptimo por la presencia de amplias llanuras de inundación es la colocación de Diques Guía en ambos estribos del puente. De acuerdo al diseño la altura del dique es $H = 5$ m y ancho de corona de $B = 3$ m con un talud de 1V : 2H

- Se protege con enrocado el pie de los pilares, y el talud de aguas arriba en los diques guía. El diámetro medio de las rocas es de 0.6 m

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Aparicio F. "Fundamentos de Hidrología de Superficie". México 1992
- [2] Maza J. "Socavación en Puentes". Universidad Nacional Autónoma. México 1977
- [3] Ministerio de Agricultura, INAF, "Estudio Hidrogeológico para el Abastecimiento de Agua con fines de Riego en la Quebrada Casitas-Bocapán-Tumbes". Lima, Setiembre 1986.
- [4] Rocha A. "Introducción a la Hidráulica de las Obras Viales", ICG PT-44. Lima 2010.
- [5] Ven Te Chow, D. Maidment, L. Mays; "Hidrología Aplicada". Bogotá 1994.
- [6] Ven Te Chow, "Hidráulica de Canales Abiertos". Bogotá 2004.