

ESTUDIO EN MODELO FÍSICO DE UNA ESTRUCTURA DE TRANSICIÓN EN LA CANALIZACIÓN DEL RÍO TARTAGAL

Bacchiega, Jorge Daniel y Casado, José Miguel

Instituto Nacional del Agua (INA), Laboratorio de Hidráulica

E-mail: dbacchiega@ina.gov.ar- jcasado@ina.gov.ar

RESUMEN

En el laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua se proyectó y construyó un modelo físico en escala reducida (1:40) a los fines de analizar el comportamiento hidráulico de la obra de canalización proyectada sobre Río Tartagal. Mediante la ejecución de ensayos en el modelo físico, se verificó a nivel de diagnóstico, el funcionamiento general la obra propiamente dicha como así también las condiciones aguas arriba y aguas abajo de la misma. A partir de los resultados obtenidos en la etapa de diagnóstico, se plantearon y ensayaron variantes de optimización a los fines de alcanzar un adecuado comportamiento del sistema planteado, estableciendo la factibilidad hidráulica de las mismas.

ABSTRACT

To analyze the hydraulic behavior on the Tartagal River a physical model was projected and constructed at the Hydraulic Laboratory in the National Water Institute. This model has a 1:40 reduced scale. From the different essays the diagnosis level, the general function of the structure and the downstream and upstream conditions were verified. With the diagnosis results an optimization was done to reach a suitable behavior of the system. Also, a hydraulic feasibility complete the work.

Introducción

Como consecuencia de la crecida ocurrida en el Río Tartagal, en los primeros meses del año 2006, se afectó la obra de conducción existente en el tramo del mismo que atraviesa la localidad homónima. Esta afectación se tradujo en un proceso de erosión que determinó el colapso de las obras que conformaban el revestimiento del canal, generando, aguas abajo del puente sobre la Av. Packham, un salto del orden de los 10 m. Asimismo, se produjeron erosiones en los taludes laterales del canal que originaron el colapso de algunas viviendas y colocaron en riesgo de derrumbe a otras.

Como consecuencia de la situación planteada, proyectó una readecuación de la canalización a partir de una transición vertical que permitía vincular los tramos de canal colapsados y dar continuidad a los escurrimientos a través del salto generado por la erosión.

En el proceso de proyecto y optimización de la obra de readecuación, se construyó un modelo físico en escala reducida (1:40) mediante el cual se pudo analizar el comportamiento hidráulico de la obra de canalización proyectada y evaluar potenciales las medidas de optimización necesarias para garantizar un adecuado funcionamiento de la misma.

En el marco antes señalado, se presentan en este trabajo las principales tareas desarrolladas en los estudios sobre modelo físico, las medidas de optimización consideradas y la solución finalmente adoptada para la readecuación de la canalización del río Tartagal.

Antecedentes de las obras proyectadas

El evento de crecida ocurrido en el año 2006 determinó, tal como se dijo anteriormente, la generación de procesos de erosión que dieron lugar a la conformación de un desnivel vertical del orden de los 10 m aguas abajo del puente carretero que atraviesa el río Tartagal.

Para la readecuación de la obra se plantearon inicialmente una serie de alternativas básicas que incluía la ejecución de rápidas de transición con cuencos disipadores intermedios, rápidas de vinculación con elementos de disipación a lo largo de su traza y rápidas de pendiente uniforme de vinculación.

La primera variante considerada planteaba la readecuación de la obra de transición a partir de la materialización de una rápida de fuerte pendiente y un cuenco disipador de energía, con las siguientes características:

- Un canal de 30 m de ancho que se materializaría desde una sección aguas abajo del salto vertical y se extendía hasta la finalización de la curva horizontal existente en el tramo deteriorado.
- Una estructura de transición entre el puente de la Av. Packham (que posee actualmente 13.26 m de ancho libre) y el canal de 30 m de ancho, la cual contaría con un primer tramo horizontal de 30 m y un segundo tramo de 65.44 m

con pendiente 1:6. Al finalizar este último tramo se había previsto un cuenco disipador BASIN II de 60.5 m, con dientes de caída y un umbral final.

El objetivo primario de esta obra fue la de garantizar cierto nivel de disipación de energía y la consecuente disminución de la velocidad del escurrimiento en la zona de ingreso del canal en la curva horizontal existente aguas abajo. Sin embargo, las características propias del canal que debía materializarse a la salida del cuenco, determinan la formación de un escurrimiento supercrítico que tendía a incrementar rápidamente las velocidades del flujo.

En ese marco, las ventajas relativas de producir la disipación de energía en un tramo intermedio del salto vertical no se traducían, debido a la nueva aceleración del flujo, en una reducción sustantiva de la velocidad en el tramo final de la obra, alcanzándose nuevamente velocidades importantes propias de la pendiente del canal.

En el siguiente gráfico se muestra la conformación en corte de la alternativa preliminar analizada.

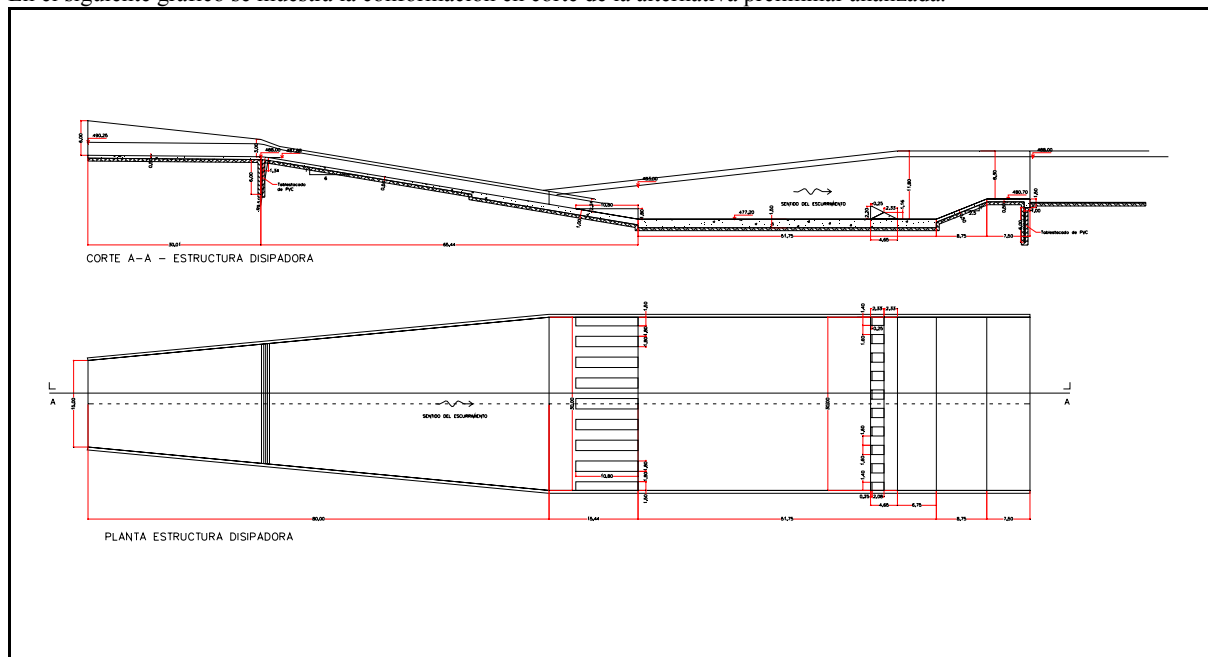


Figura 1.- Plano en planta de la obra analizada

Más allá del condicionante hidráulico antes planteado, existían condicionantes constructivos para la materialización de esta variante. En efecto, el tramo de canal colapsado se encontraba fuertemente urbanizado en sus márgenes, con viviendas que, aún después del colapso del canal, quedaron en una precaria situación de estabilidad. Esta situación limitaba la posibilidad de extender el ancho del canal y dar pendientes más suaves a los taludes laterales del mismo. Dicha limitante condicionaba, también, la posibilidad de profundizar las excavaciones para materializar cuencos disipadores.

Por esta razón se plantearon otras alternativas, las cuales mantenían el condicionante constructivo de no superar los 22 m de ancho para cualquier obra planteada en la zona de la transición vertical. Con estos condicionantes, se planteó una obra alternativa cuyas características se detallan en el siguiente punto y la cual fue, finalmente, analizada en el modelo físico de la obra.

Característica de la obra analizada

La geometría analizada en la etapa de diagnóstico se dividió en dos tramos bien diferenciados, tomando como límite de ambos la sección aguas abajo del puente carretero sobre la Av. Packham. Aguas arriba de esta sección se analizó la geometría de los puentes ferroviario y carretero, los muros de transición entre ambos puentes y la topografía aguas arriba del puente ferroviario, representándose en el modelo las características de todas las estructuras según los relevamientos realizados en obra.

Aguas abajo del puente de la Av. Packham se analizó la geometría del canal proyectado, reproduciendo la transición desde el puente de la Av. Packham hasta el comienzo de la rápida, la rápida propiamente dicha y el tramo de canal curvo hasta el empalme con la estructura de canal trapecial actualmente construido, reproduciéndose de este último unos 100 m.

La geometría analizada se resume de la siguiente manera

- *Aguas arriba de la sección donde termina el puente carretero.*

- Puente de la Av. Packham con una luz libre de 13.26 m de ancho y una altura libre al inferior de la viga de +5.40 m respecto del lecho en la sección del puente.
- Transición entre el puente carretero y el puente ferroviario con muros de 4 m y geometría en planta según planos de obras
- Puente ferroviario con un ancho libre de 47.80 m
- 100 m de topobatemetría aguas arriba del puente ferroviario, según relevamientos de obra.

➤ ***Aguas abajo de la sección donde termina el puente carretero.***

- 39.85 m de canal rectangular de 22 m de ancho con muy baja pendiente
- 111.67 m de canal rectangular de 22 m de ancho con pendiente 8.33 %.
- 309 m de canal rectangular de 22 m de ancho con pendiente 1.27 % y geometría en planta curva.
- Transición entre la obra proyectada y en canal existente
- 100m de canal trapecial de 15 m de base fondo y muros de 3.7m con taludes 1:3.

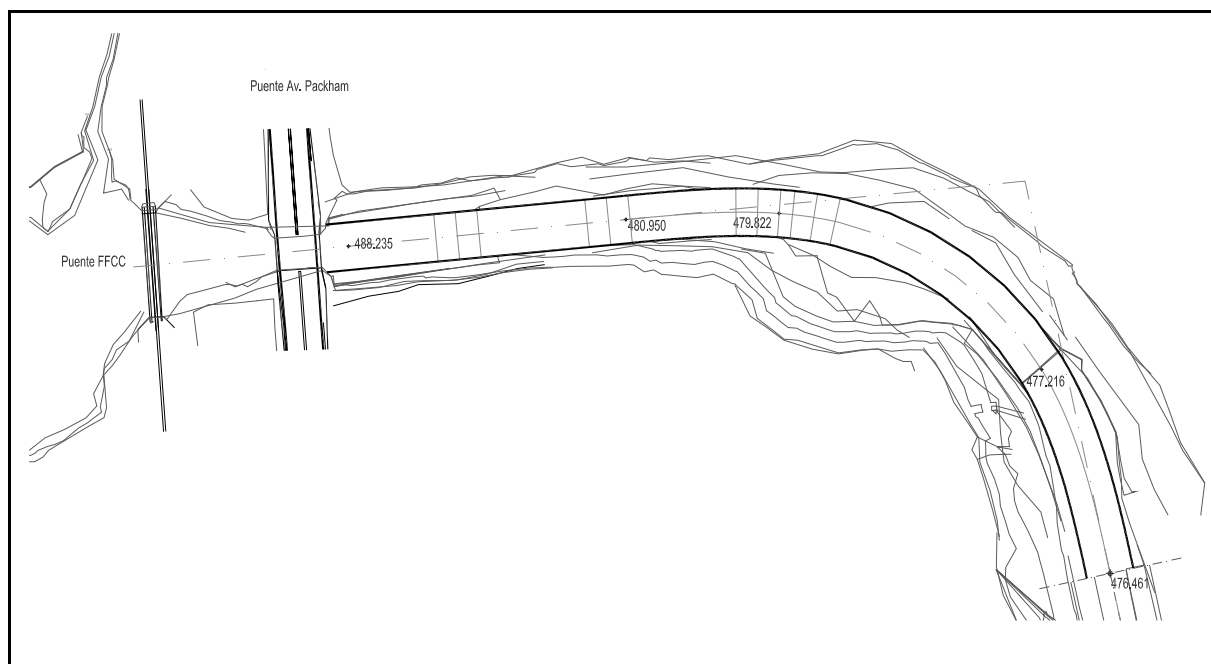


Figura 2.- Plano en planta de la obra analizada en la etapa de diagnóstico

Objetivos y características del modelo físico

Tomando como base la variante antes descrita, se proyectó y construyó un modelo físico en escala de longitudes 1:40, bajo las condiciones de semejanza de Froude, el cual permitía reproducir las siguientes partes de la obra:

- Un tramo aguas arriba del puente carretero y la zona de expansión lateral del curso.
- El estrechamiento impuesto por el puente carretero.
- La rápida proyectada de fuerte pendiente.
- La curva horizontal aguas abajo
- Una estructura de transición entre el canal rectangular proyectado y el canal trapecial existente aguas bajo.

Sobre la base del modelo físico desarrollado, se plantearon los siguientes objetivos básicos para el estudio del mismo.

- Analizar, mediante la ejecución de ensayos en modelo físico, el comportamiento hidrodinámico de la obra de transición vertical sobre el río Tartagal planteada, verificándose, a nivel de diagnóstico, el funcionamiento de la zona de aproximación al puente, el puente carretero propiamente dicho, la rápida y la curva prevista en la zona analizada.
- A partir de los resultados obtenidos en la etapa de diagnóstico, plantear y ensayar variantes de optimización a los fines de alcanzar un adecuado comportamiento del sistema planteado, estableciendo la factibilidad hidráulica de las mismas.

Metodología de Trabajo

Tal como se ha indicado, el estudio tuvo como objetivo básico la ejecución de ensayos en un modelo físico en escala reducida (1:40) para evaluar el comportamiento hidráulico de la obra propuesta y definir las medidas de optimización más convenientes.

Se efectuó una primera etapa de diagnóstico, tendiente a determinar las características del funcionamiento hidrodinámico de la obra de la obra proyectada, contemplándose las siguientes tareas:

- Verificación del comportamiento del flujo en la zona de transición y en los sectores correspondientes a los puentes carreteros y ferroviarios.
- Configuración del escurrimiento en la zona de aproximación, sobre la rápida y en el sector de la curva horizontal existente aguas abajo.
- Variación de niveles líquidos en el desarrollo de la estructura.
- Campo de velocidades medias en distintos puntos de la misma.
- Análisis del riesgo de cavitación en la rápida de transición.

En esta primera etapa se verificó el comportamiento del flujo para el caudal de diseño de 700 m³/s, mediante la cual se pudo visualizar el comportamiento hidráulico del canal en la sección estrechada del puente, y su incidencia tanto aguas abajo como aguas arriba de la misma.

Resultados obtenidos en la etapa de diagnóstico

- Los ensayos permitieron verificar una configuración del flujo en la que se observó que agua sobrepasa la viga del puente para la condición de diseño (700 m³/s). Lo que produce que el mismo funcione a sección llena y que parte del caudal pase por sobre la carretera. En virtud de lo observado se verificó la capacidad de descarga máxima del puente estableciéndose la misma en 450 m³/s, que significa un 65 % aproximadamente del caudal máximo estimado.
- La contracción generada por el puente produce un aumento importante en los niveles provocando un sobrepaso de la cota de los muros que constituyen la transición entre el puente de la Av. Packham y el puente del ferrocarril. Como consecuencia de dicho desborde, en la zona de ingreso al puente carretero, se produce la separación del flujo generándose corrientes de recirculación. Este efecto provoca que la condición del flujo a la entrada del puente no sea la más adecuada.
- En el tramo horizontal y la rápida, debido a la expansión brusca que se produce por un aumento en el ancho de fondo del canal proyectado, se origina una configuración del flujo con presencia de ondas cruzadas y sobreelevación de los niveles.
- Como punto a considerar, dentro del funcionamiento de la estructura en la etapa de diagnóstico, fue el valor de velocidad del flujo en la rápida, siendo el mismo de 18.21 m/s. En virtud de este valor, se llevó a cabo un análisis de los posibles efectos por cavitación, llegándose a la conclusión que para evitar daños por este fenómeno se deberían garantizar, principalmente en la solera del canal, niveles de terminación superficial donde no se observen irregularidades abruptas mayores de 25 mm o graduales con una pendiente 1V:4H.
- En cuanto a las condiciones hidrodinámicas apreciadas en la zona del canal, con un desarrollo curvo en planta, se observó una importante asimetría en los valores de niveles y velocidad generado por su curvatura e incrementado en algunas secciones por el efecto de ondas cruzadas generadas aguas arriba.

Sobre la base de las conclusiones antes expuestas, surgió claramente la necesidad de readecuar y modificar las condiciones hidráulicas de funcionamiento del canal en la zona aguas arriba del puente carretero y debajo de la estructura del mismo, como así también la necesidad de verificar los potenciales riesgos inherentes a la magnitud de las velocidades observadas en el desarrollo del canal. Frente a estas circunstancias, en los siguientes puntos se describirán las alternativas planteadas para alcanzar un funcionamiento óptimo de la estructura proyectada.



Figura 3.- Vista general del modelo en la etapa de Diagnostico. Capacidad del puente carretero Q: 700 m³/s

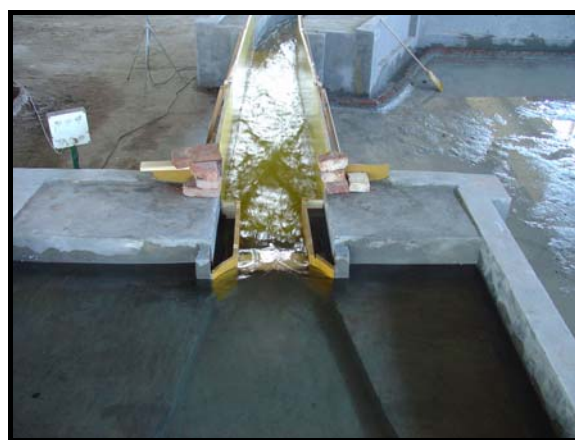


Figura 4.- Vista general del modelo en la etapa de diagnostico

Planteo de Alternativas de optimización

Las pautas de diseño para el planteo de alternativas tuvieron como objetivo principal lograr un adecuado funcionamiento hidrodinámico del conjunto de la obra, para lo cual, y en virtud de los resultados de la etapa de diagnostico, se deberá:

- Permitir el pasaje de la crecida de diseño a través del puente de la Av. Packham.
- Garantizar procesos de no anegamiento aguas arriba del mismo, para evitar cualquier influencia de la estructura hacia aguas abajo.
- Lograr disminuir los niveles a lo largo del canal, para evitar sobrepaso en los cajeros del mismo.
- Plantear alternativas factibles de implementar, que permitan reducir los niveles de velocidad del escurrimiento.

Sobre la base de lo expuesto, y a partir de las condiciones de borde y pautas de diseño antes consideradas, se plantearon dos grupos de alternativas conceptuales:

(I) Alternativas para mejorar la capacidad del puente y la condición aguas arriba, Conformada por aquellas variantes que permitan garantizar un adecuado funcionamiento del puente y obtener un escurrimiento bidimensional y ordenado, previo a la llegada a la estructura del mismo.

(II) Alternativas para optimizar el funcionamiento de la rápida, curva y transición, Este grupo de alternativas plantea la necesidad de lograr uniformizar el flujo, bajar los valores de velocidad y producir una transición adecuada entre el canal proyectado y el actual.

Alternativas del grupo I

Dentro del conjunto de alternativas planteadas para el análisis del comportamiento de la estructura, aguas arriba del puente de la Av. Packham. Se encuentran las siguientes modificaciones a la geometría originalmente proyectada

1. Ampliación del ancho de puente.

Como primera alternativa se planteó ampliar la luz libre del puente, actualmente de 13.26 m, de manera de aumentar la capacidad del mismo, evitando que se produzcan sobrepaso para el caudal de diseño: Esta ampliación se realizó de manera que la luz libre del mismo coincida con el ancho de fondo del canal proyectado aguas abajo, es decir 22 m.

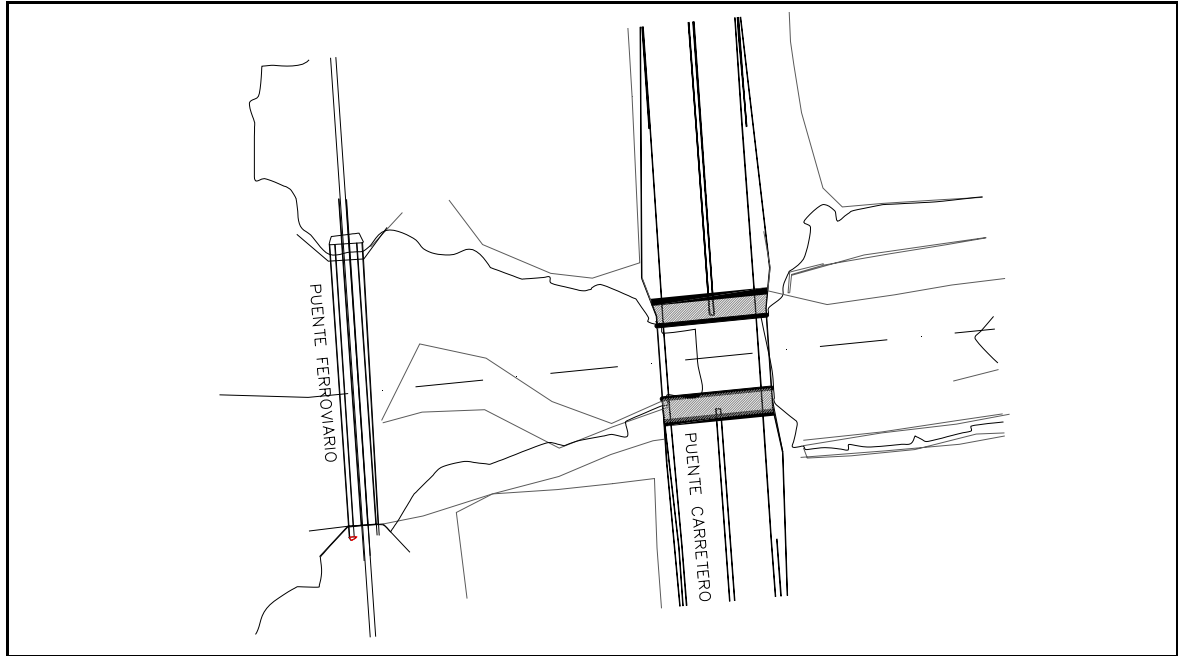


Figura 5.- Plano en planta de ampliación del puente carretero , ancho 22 m

2. Ampliación del ancho de puente y recrecimiento de los muros de transición entre los puentes.

En virtud de lo observado en la alternativa 1, se implemento en el modelo una transición entre ambos puentes, de manera de lograr un escurrimiento bidimensional y ordenado. Cabe mencionar que los muros que conforman la transición fueron representados con una altura suficiente a fin de no permitir el sobrepaso de los mismos.

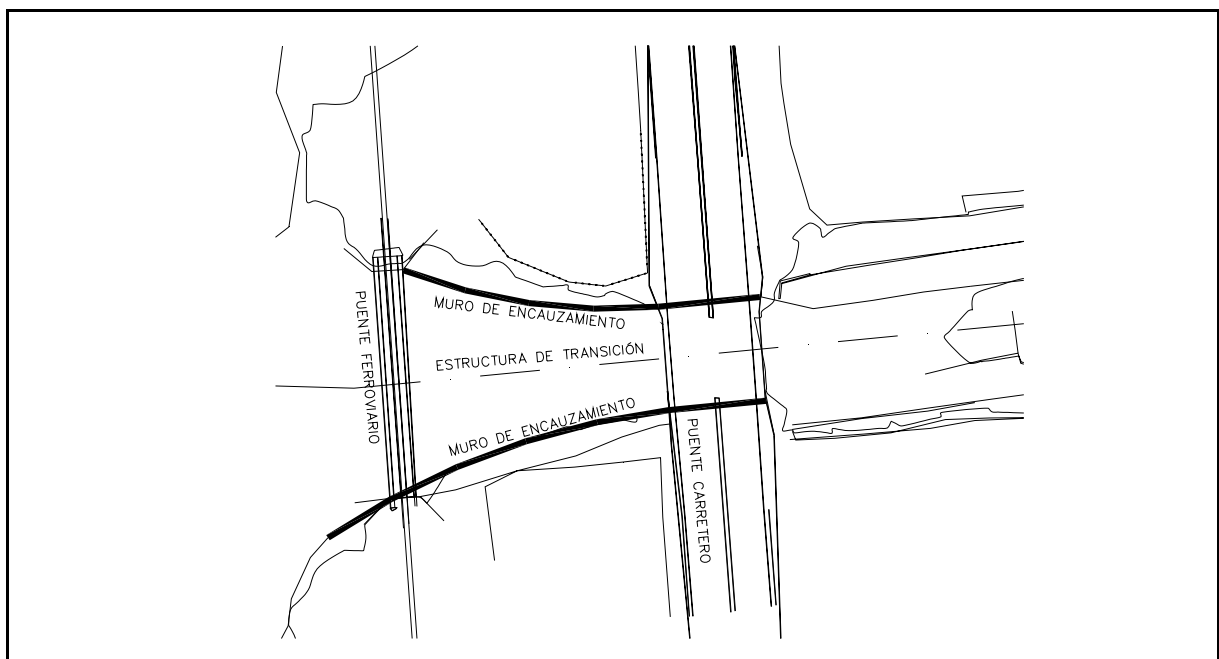


Figura 6.- Plano en planta de ampliación del puente carretero , ancho 22 m y muro entre puentes

3. Ampliación del ancho de puente, recrecimiento de los muros de transición entre los puentes y la implementación de muro guía aguas arriba del puente ferroviario sobre margen derecha.

Debido a que en ese tramo del río se produce un ensanchamiento del cauce, en época de bajante, se genera un sector de depósitos de sedimentos. Esta deposición provoca cauces secundarios que, en época de crecidas, pueden conducir el escurrimiento hacia los estribos del puente generando desbordes a los costados del mismo y un ingreso no ordenado hacia la sección del puente.

Frente a tales circunstancias, se planteó la posibilidad de materializar un muro guía, conformado por un terraplén longitudinal de aproximadamente 325m de largo, sobre la margen derecha del curso natural.

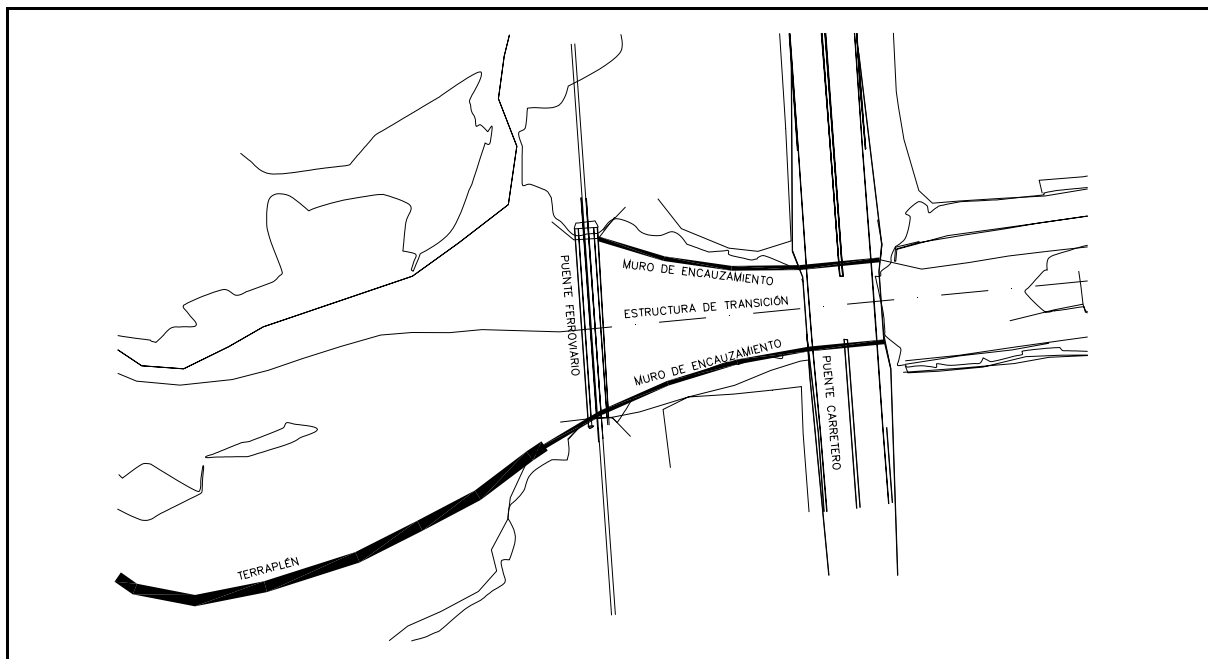


Figura 7.- Plano en planta de ampliación del puente carretero , ancho 22 m, muro entre puentes y muro guia aguas arriba puente ferroviario.

Conclusiones preliminares

En la tabla adjunta respecto a los resultados obtenidos en los ensayos realizados al primer grupo de alternativas planteado, respecto al comportamiento del puente en la situación actual, en la misma se muestran los resultados de los relevamientos de niveles y velocidades en diferentes secciones comparativas de la estructura.

Tabla N°1 Comparacion de resultados de las alternativas propuestas con la situación del puente en condición actual

	Nivel aguas arriba puente	Nivel maximo aguas abajo puente	Nivel maximo tramo canal curvo	Velocidad maxima aguas abajo puente
Condicion actual	9.6 m	4.95 m	4.62 m	18.21 m/s
Alt 1 Puente 22 m.	5.88 m	4.98 m	4.21 m	17.17 m/s
Alt. 2.Puente 22 m con Transicion.	4.58 m	4.78 m	4.068 m	16.93 m/s
Alt..3.Puente 22 m con Transicion y Terraplen	4.53 m	4.7 m	3.92 m	16.92 m/s

Como se aprecia y considerando que la altura de la viga del puente se encuentra en cota 5.40 m , la alternativa 1 registra un nivel por encima de la cota inferior de la viga, provocando que la entrada al puente trabaje a sección llena. Aguas abajo de la

sección del puente los valores de niveles y velocidades no difieren para las alternativas planteadas.

Asimismo, a partir de los valores de velocidad registrados en las distintas alternativas, resulta que las mismas no producen un cambio sustancial en las condiciones de escurrimiento a lo largo del canal, razón por la cual resultan válidas las mismas consideraciones efectuadas en el diagnóstico respecto de la cavitación y la abrasión.



Figura 8 y 9.- Funcionamiento de la estructura en el alternativa 1 (grupo I)



Figura 10 y 11.- Funcionamiento de la estructura en el alternativa 2 (grupo I)



Figura 12 y 13.- Funcionamiento de la estructura en el alternativa 3 (grupo I)

Alternativas del grupo II

1. Implementación de macro rugosidad.

Tal como se ha señalado en el informe de diagnóstico, si bien el campo de velocidades obtenido en el desarrollo del canal proyectado presenta valores elevados, se ha demostrado que los mismos no generan potenciales riesgos de erosión por cavitación.

No obstante, podrían presentarse algunos inconvenientes derivados de procesos de abrasión (dependiendo de las características de los materiales que arrastre el curso) o bien inconvenientes frente a deficiencias en los niveles de terminación de las juntas constructivas del canal.

Por este motivo, y solo a los fines de establecer la existencia de potenciales medidas de mitigación respecto de las elevadas velocidades, se analizó la posibilidad de generar una disminución de dichos valores mediante la implementación de estructuras que generen una macro rugosidad superficial en el sector de la rápida con pendiente 8.33%. Los bloques considerados como alternativas tienen una geometría en corte de forma triangular, con una altura de 0.625 m (considerando 25 % del tirante), la cara aguas arriba del bloque forma un ángulo con la rápida de 16° y la cara de aguas abajo de 43°, siendo la longitud total, en la base de 3.21 m y colocados con separación de 4 m.

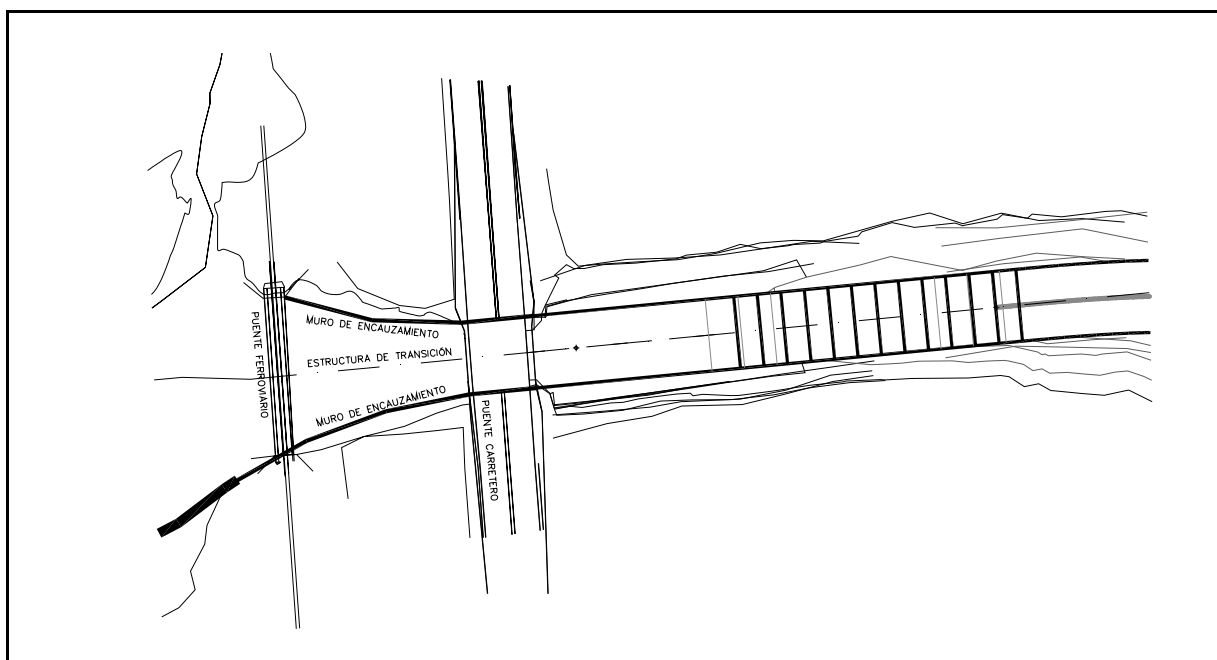


Figura 14.- Plano en planta de la implementación de la rugosidad en la rapida.

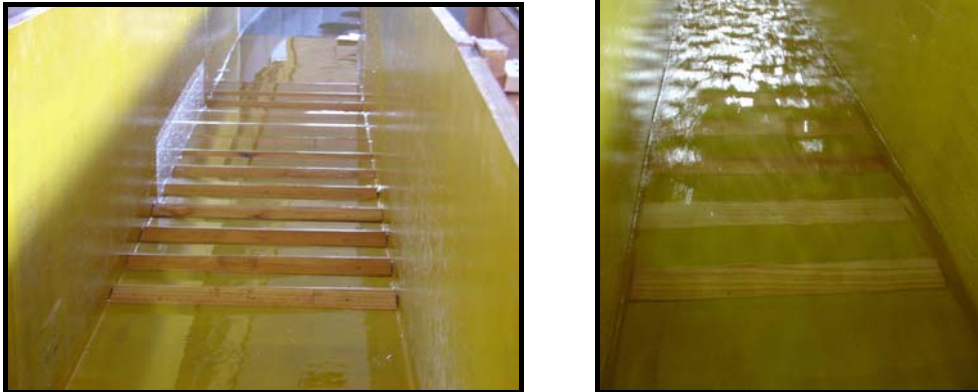


Figura 15 y 16.- Características y Funcionamiento de la estructura en el alternativa 1 (grupo II)

Analizado el comportamiento hidrodinámico de la alternativa planteada en el modelo físico, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Para la condición de diseño, la colocación de macro rugosidad superficial en la rápida, genera sobreelvacion de los niveles, pero con valores admisibles para la estructura proyectada. En el sector de la curva se mantuvieron los valores máximos, observados para las alternativas anteriores, observándose en este caso una menor diferencia entre los niveles del lado interno y los del lado externo de la curva
- Los valores de velocidad registrados, aguas abajo de la zona con macro rugosidad, muestran una reducción del valor máximo en el sector de la rápida, siendo el mismo cercano al valor de velocidad calculado en régimen uniforme con la pendiente natural del terreno.
- La implementación de bloques dentro de un flujo de alta velocidad, puede producir efectos de erosión por cavitacion, para lo cual se realizo un registro de presiones fluctuantes a lo largo de la rápida. El registro de presiones determino valores muy por encima de la presión de vapor, descartándose de esta manera la posibilidad de erosión por cavitacion.
- No obstante, la implementación de este tipo de estructuras suelen estar sujetas a riesgos de sufrir daños cuando son sometidas a flujos con cargas sólidas de cierta magnitud. Esta circunstancia, si no se cuenta con un nivel de mantenimiento y reparación adecuado, generaría, frente a nuevos eventos de crecidas, condiciones críticas que si podrían dar lugar a procesos de erosión por cavitación y deterioros progresivos en el tiempo.

Frente a la posibilidad que se produzcan procesos de arrastre de material sólido grueso o cualquier otro elemento que genere impactos sobre los bloques, se consideró conveniente no implementar esta solución en la

2. Transición entre el canal proyectado y el actual.

Para lograr una adecuada transición entre el canal proyectado y el canal actual se proyecto una transición de aproximadamente 40 m de longitud, con inicio dentro del canal proyectado y tomando una altura de cajero, en el canal, de 5m. Es decir, la transición permite pasar de un canal rectangular de 22 m de ancho y 5 m de altura a un canal trapecial de 15 m ancho de fondo y muros de 3.7m con taludes 1:3 al que se le adicione unos muros laterales de 1 m de altura.

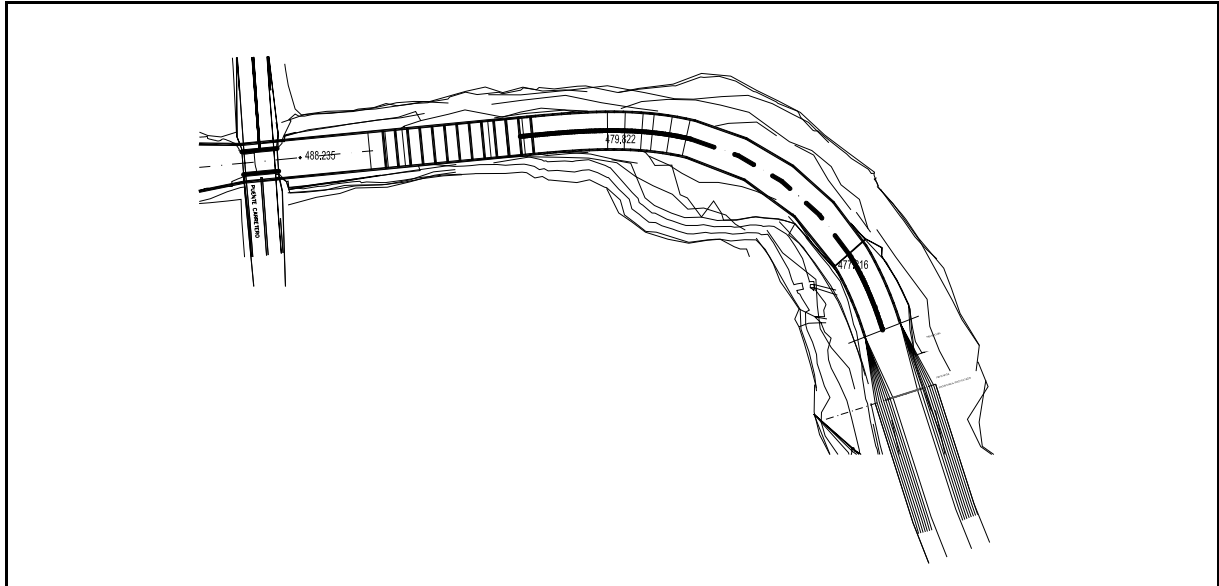


Figura 17.- Plano en planta de la implementación de la transición entre la estructura proyectada y la estructura antigua



Figura 18 y 19.- Funcionamiento de la estructura en el alternativa 2 (grupo II)

El funcionamiento de la transición, se verificó para todas las alternativas planteadas anteriormente, observándose en general un comportamiento adecuado, sobre todo en las alternativas con la rápida sin macro rugosidad, en donde los valores de velocidad, a la llegada de la transición son superiores.

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos en los ensayos sobre modelo, se consideró adecuado establecer como óptima para implementar en obra la alternativa 3 del grupo I analizada.

Desde el punto de vista hidráulico, la alternativa garantiza el pasaje de la crecida de diseño de $700 \text{ m}^3/\text{s}$ sin generar procesos de anegamiento en los terrenos aledaños ni desbordes en ninguna sección de la traza del canal. Los niveles de escurrimiento resultan compatibles con las alturas de los muros laterales proyectados y con los niveles del puente carretero existente en la Av. Packham.

Asimismo, los niveles de velocidad y de tirantes que se registran, tanto para el caudal máximo como para caudales intermedios dentro del rango operativo del sistema, son compatibles con los niveles de seguridad requeridos respecto de los riesgos de erosión por cavitación. En tal sentido, resultan admisibles los niveles de terminación previstos para la materialización de las losas y muros que conformarán el canal.

En la tabla adjunta se muestra un resumen de los parámetros característicos registrados, en el modelo físico, para esta condición de diseño.

Tabla N°2 Resultados de la alternativa seleccionada

	Nivel aguas arriba puente	Nivel maximo aguas abajo puente	Nivel maximo tramo canal curvo	Velocidad maximo aguas abajo puente
Alt. 3. Puente 22 m con Transición y Terraplen	4.53 m	4.7 m	3.92 m	16.92 m/s

Desde el punto de vista constructivo y de acuerdo a los análisis realizados, se adoptó como alternativa de obra definitiva, la modificación del ancho del puente a 22 m, con la implementación de una transición entre este último y el puente ferroviario y un terraplén longitudinal aguas arriba del mismo.

Cabe destacar que las dimensiones finales del canal, en cuanto a su ancho y cotas de fondo, resultan compatibles con relación a las obras existentes y a las posibilidades reales de excavación que se presentan en el desarrollo de la traza del canal.



Figuras N° 20 y 21.- Vista general de la alternativa seleccionada