

OBRAS DE NAVEGACION

por

HÉCTOR GABRIEL SANTARELLI

FUNCION Y UBICACION DE LAS OBRAS DE NAVEGACION EN EL CIERRE FRONTAL

Son las obras que permitirán a las embarcaciones salvar el desnivel entre el embalse y el río en la sección de cierre, y además constituir lugares de resguardo ante condiciones desfavorables de navegación en el embalse.

Las obras ubicadas en el cierre frontal, tienen su eje longitudinal perpendicular al mismo y están emplazadas sobre el actual lecho del Riacho Zapata, brazo del Río Paraná entre las Islas del Chapetón y la margen entrerriana.

Se ha elegido dicho emplazamiento, teniendo en cuenta las ventajas que representa respecto a la conformación de accesos libres de corrientes adversas generadas por la descarga de la Central Hidroeléctrica, Vertedero y de la influencia del oleaje en el embalse. La ubicación adoptada presenta condiciones naturales favorables para la materialización de dichos accesos de la manera más económica, incluyendo el hecho de aprovechar un canal natural como lo es el Riacho Zapata.

Las obras de resguardo ubicadas en el embalse, se han distribuido sobre la margen izquierda en zonas topográfica-

mente favorables, como son las caletas naturales conformadas por drenajes, y en lo posible en correspondencia con poblaciones existentes. La separación entre las mismas se ha fijado de manera que una embarcación, alertada por la posible existencia de malas condiciones para la navegación en el embalse, pueda llegar sin dificultad al resguardo más próximo.

Descripción general

Las obras de navegación ubicadas en el Cierre Frontal están compuestas por la Esclusa y Dársena de acceso a la misma, conformadas por espigones de materiales sueltos en el lado derecho, como límite de separación con la Central Hidroeléctrica, y por las barrancas entrerrianas del lado izquierdo. Sobre éstas y dentro de la dársena superior, habrá una zona de fondeo determinada naturalmente por las condiciones topográficas del lugar.

La esclusa tendrá en sus extremos muros guías, cuya función será la de encauzar las embarcaciones hacia la cámara, evitando de esta manera posibles colisiones, perjudiciales para las estructuras.

Las obras de resguardo previstas en el embalse, consistirán en la conformación de una zona para fondeo y la construcción de amarraderos. En estas zonas las barrancas serán estabilizadas y protegidas convenientemente. En correspondencia con las poblaciones que actualmente poseen muelles y que se verán afectadas por el embalse, se reconstituirán éstos a los efectos que desempeñen sus funciones y las de resguardo.

Disposición de la Esclusa y Acdesos hacia la misma

La ubicación del eje longitudinal de la esclusa, se determinó de manera tal que las embarcaciones que se aproximen a la misma, lo hagan alineadas con dicho eje con suficiente

margen de maniobra. Esta premisa resulta fundamental, teniendo en cuenta la longitud de los mayores buques que circularán a través de la misma.

Determinados los taludes estables de los espigones, se ubicó el eje de los mismos, conformándose las dársenas de acceso. En la dársena de acceso superior, se estableció una línea de amarre para espera de embarcaciones, a una distancia tal de la esclusa que permita a las mismas retomar la ruta principal de navegación antes del ingreso.

En la dársena de acceso inferior se ubicó un muelle (fuera del recinto estanco conformado para la erección de las obras) que, cumpliendo el mismo objetivo que la línea de amarre en el acceso superior, permita la descarga del equipamiento de las obras de control y demás implementación necesaria durante el proceso constructivo.

Áreas adyacentes a la Esclusa

La separación entre la Esclusa y la barranca de la margen entrerriana es de aproximadamente 300 m. Con material proveniente de la remoción de ataguías utilizadas durante la construcción y del perfilado de las barrancas aledañas a las obras de navegación, se efectuará el relleno a lo largo de la esclusa y hasta la cota de coronamiento de la misma, conformando el cierre frontal en el tramo mencionado.

El área así determinada se parquizará y destinará a la infraestructura de administración y explotación de la esclusa y además a zonas de recreación y estacionamiento.

La configuración topográfica natural de la margen izquierda, aguas arriba del cierre determina una zona adecuada para el fondeo de embarcaciones. Para esto se efectuarán estabilizaciones y protecciones de los taludes naturales donde sea necesario.

SISTEMA DE LLENADO Y VACIADO DE LA CAMARA DE LA ESCLUSA

Elección del Tipo de Alimentación

Los criterios generales que se tuvieron en cuenta para el diseño del sistema de llenado y vaciado fueron los siguientes:

- a) Satisfacer los requisitos de las normas referentes a las tensiones de sirga;
- b) Que no se produzcan turbulencias que puedan afectar a las embarcaciones más pequeñas;
- c) Que se mantengan las condiciones del punto anterior, cuando por algún motivo la esclusa deba operar con un solo conducto de alimentación o de descarga, si bien ésto, implica un incremento en el tiempo de operación;
- d) Condiciones sobre la superficie del agua, por encima de las bocas de toma, que no causen peligro a las embarcaciones pequeñas;
- e) Sistema de descarga tal que se minimicen las turbulencias en el canal de acceso inferior a la cámara;
- f) Las presiones en los conductos no deben ser tan bajas como para que se produzcan daños por cavitación;
- g) Los tiempos de llenado y vaciado deben ser los mínimos posibles, teniendo en cuenta la comparación costo - beneficio que se puede obtener de una rápida operación de esclusado.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente y considerando la experiencia de otros países que cuentan con esclusas de similares dimensiones y desniveles a salvar, se adoptó el sistema de llenado y vaciado constituido por conductos longitudinales en los muros y conductos laterales de base distribuidos en la cámara.

También se efectuó un análisis del sistema longitudinal de base con cuatro múltiples de distribución, que según comprobaciones en modelos y en esclusas que lo utilizan satisface con más amplitud los requisitos a), b) y c) anteriores. No obstante, debido a la característica de la fundación, es posible que se produzcan pequeños asentamientos diferenciales entre los bloques que conforman la estructura, lo que provocaría perturbaciones en la circulación del agua, en los múltiples longitudinales ubicados en la cámara y que atraviesan las distintas juntas de contracción asentamiento entre bloques, poniendo en este aspecto, en desventaja este sistema con respecto al adoptado.

Descripción del sistema

Al sistema de llenado y vaciado podemos dividirlo en: obra de toma, conductos de alimentación y vaciado de la cámara y obras de descarga.

1) En cuanto a la obra de toma, se adoptaron dos distribuidores de ocho bocas cada uno, ubicados en la cara interna de ambos muros.

La fijación de la cota del umbral se determinó de manera que no se produzca el arrastre de material que pueda acumularse en la zona cercana a la toma y que el borde superior a la toma debe sumergirse a una profundidad mayor o igual que la máxima altura dinámica, para asegurar presiones positivas en todos los puntos del conducto.

Las áreas requeridas tanto en la entrada como en el angostamiento interno, se obtuvieron mediante relaciones surgidas de experiencias en esclusas de dimensiones similares.

En el abocinamiento interior, las puertas tienen la misma altura que el conducto longitudinal de alimentación.

Cada boca de toma tiene una reja, removible para su mantenimiento y que puede ser limpiada en su posición de servicio mediante un limpiarrejas convencional. A esos efectos y de ser

necesario efectuar una inspección y/o reparación en la zona interna de la toma, se ha previsto la construcción de un juego de ocho compuertas planas, para ser colocadas como cierre provisorio en la misma recata donde se hallan las rejas, previa remoción de éstas.

2) Mediante una expresión matemática que vincula las siguientes variables: área de los conductos longitudinales, área de la cámara, coeficiente de descarga del sistema de alimentación, salto máximo de cálculo, tiempo de apertura de compuertas de control de llenado o vaciado y el tiempo total de llenado o vaciado, y procediendo por tanteos, de manera que el tiempo de llenado o vaciado oscile entre 10 y 15 minutos, y que el caudal de punta que fluye a la cámara sea lo más bajo posible, ya que las tensiones de sirga entre otros factores depende de este caudal, se determinó la sección de cada conducto longitudinal alojado en los muros.

La ubicación en altura de las compuertas principales de control del llenado o vaciado, se fijó como para evitar presiones negativas y la entrada de aire en los conductos, que podría irrumpir en forma brusca en la cámara. Estas compuertas son de segmento invertidas, y se hallan ubicadas en los cabezales superior e inferior, cerca de los extremos de cada conducto de alimentación. Para la inspección y/o reparación de éstas, aguas arriba y abajo, se ubicarán compuertas auxiliares planas, las que permanecerán colocadas en las recatas correspondientes, sobre la cota del intradós de los conductos.

Los conductos longitudinales se hallan unidos a la cámara mediante aberturas en las paredes de la misma, que comunican con los distribuidores laterales de base. Estos se encuentran conectados en forma alternada, de manera que conductos laterales adyacentes son alimentados por distintos conductos longitudinales. La separación, áreas y números de conductos laterales de base, como el número y área de las aberturas en cada conducto lateral, fueron determinadas tomando como

referencia la experiencia en otras esclusas con similares sistemas de alimentación.

3) Para la descarga se utilizan dos distribuidores con 6 salidas cada uno, ubicados en las paredes laterales y en forma enfrentada.

Las transiciones del conducto hasta la salida, se determinaron en base a relaciones obtenidas de ensayos sobre modelos efectuados en otros países.

En el área de la esclusa, en correspondencia con la descarga, así como en la delimitada por los muros guías del acceso inferior, no deberán permanecer embarcaciones cuando se produzca el vaciado de la cámara, ya que esta zona sufrirá las mayores perturbaciones. Fuera de ésta las secciones del acceso inferior son tales que desaparecen los efectos que puedan perjudicar la navegación.

Análisis hidráulicos del sistema de llenado y vaciado de la cámara

Se ha elaborado un programa de computación que para distintos tiempos de apertura de compuerta (T_v) y coeficiente globales de descarga del sistema hidráulico (C), permite evaluar los siguientes parámetros característicos: tiempo total de llenado o vaciado, variación del nivel de agua en la cámara, velocidad de ascenso o descenso del pelo de agua en la misma (V_p) y variación del caudal ingresante o saliente durante el llenado o vaciado, respectivamente para las dos posibles longitudes de cámara con que se puede operar la esclusa.

Se determinaron gráficos que permiten obtener el tiempo de llenado o vaciado para distintos T_v y coeficientes C .

Considerando una gama de coeficiente C entre 0,55 y 0,85 y para T_v variando de 240 a 420 seg. se obtuvieron tiempos de llenado o vaciado variables entre 7,6 y 11,5 minutos. Para esclusa de dimensiones similares la práctica muestra que

los tiempos de vaciado superan en el orden del 10 % a los de llenado.

Con el máximo V_p obtenidos en los cálculos se verificó comparando con valores experimentales, que las turbulencias creadas por este tipo de llenado y vaciado no provocan inconvenientes a las embarcaciones pequeñas esclusadas.

Todas las determinaciones precedentes elaboradas mediante modelos matemáticos y basados en experiencias, no excluyen la necesidad de efectuar un especial análisis sobre modelo físico, que podrá modificar las dimensiones y el diseño del sistema hidráulico adoptado.

Se plantea la exigencia de verificar mediante modelo a escala reducida: los valores máximos admitidos para las tensiones de sirga durante los esclusajes, los tiempos de llenado y vaciado y las presiones en puntos diversos del circuito hidráulico, fundamentalmente en las cercanías aguas abajo de las compuertas de control.

Efecto del vaciado de la cámara en el canal de acceso inferior

Se realizó un análisis simplificado del fenómeno generado por la descarga de la esclusa, determinándose con los caudales erogados por el vaciado, la curva envolvente de la cresta de la onda propagada en la dársena de acceso inferior.

La mayor amplitud del frente de onda se registra en el extremo del canal, en la intersección de éste con el cauce principal del Río Paraná, resultando del cálculo valores del orden de 25 cm.

Este análisis se profundizará durante el proyecto ejecutivo, utilizando un modelo matemático más elaborado.

Respecto al estudio de la influencia de las descargas de la Central Hidroeléctrica y del Vertedero sobre las embarcaciones a ingresar a la dársena de acceso inferior, se ha dis-

puesto realizarlo mediante modelo físico, que podrá introducir modificaciones en la longitud, traza y configuración del espigón inferior, definidas en esta etapa de Anteproyecto.

ESTRUCTURA DE LA ESCLUSA Y MUROS GUIAS

Criterios generales de diseño y descripción de la esclusa

La estructura en toda su longitud tiene una sección con forma de U, con los muros monolíticamente unidos a la losa de fondo.

Teniendo en cuenta el equipamiento electromecánico para el control de operaciones y los circuitos hidráulicos necesarios, se dividió la esclusa en el sentido longitudinal, en diecisiete bloques, separados por juntas.

En el bloque nº 1 (BN1) se ubican las obras de toma del sistema de llenado; en los BN2, BN4 y BN15, las compuertas de servicio; y en el BN17, la compuerta de reparación. En los BN3 y BN14 se hallan las compuertas de control del llenado y vaciado respectivamente, con sus correspondientes compuertas auxiliares, y las barreras de protección de las compuertas de acceso. El tramo conformado por los BN6 al BN12 se destina a ubicar el sistema lateral de base del circuito hidráulico, en tanto que los BN5 y BN13 completan las exigencias que imponen las dimensiones de cámara adoptadas. Finalmente, el BN16 que se encuentra en correspondencia con el eje del cierre frontal, actúa como apoyo del puente ferro-vial y además se ubican las bocas de las descargas del sistema de vaciado.

En el área de la cámara en ambos muros, se desplazan verticalmente bitas flotantes, en ranuras construidas en cada bloque, que permitirán que las embarcaciones se amarren a los muros durante el esclusaje, acompañando al ascenso o descenso de las mismas.

A cota de coronamiento de ambos muros, y distribuidos de igual manera que las bitas se ubican bolardos de amarre, que completan los dispositivos destinados a evitar colisiones de las embarcaciones con los paramentos.

La ubicación de la cámara aguas arriba del cierre frontal, permite disponer un despeje de 19 m entre la parte inferior del puente y el nivel medio del agua en el acceso inferior. Esto significa que prácticamente los trenes de empujes podrán circular por la esclusa sin necesidad de levantar el puente, el que se operará únicamente ante la presencia de buques de gran calado y elevada superestructura o arboladura.

En la parte central de la cámara y sobre el muro izquierdo del BN9, se ubica la torre de regulación del tránsito y control de la navegación, donde se centralizarán las operaciones en forma automática.

Estabilidad Global y Análisis Estructural de la Exclusa

De sucesivos planteos de dimensiones de los muros y losa de fondo, de los diversos bloques en que subdividió la Exclusa, donde se efectuaron cálculos de estabilidad general a la flotación y al deslizamiento de los bloques en peores condiciones, para la situación más desfavorable de cargas exteriores, como así también la determinación de las tensiones internas en la estructura, se llegaron a definir las secciones que cumplen de manera más económica las condiciones de seguridad a la estabilidad y a la resistencia, que estipulan las normas para este tipo de obras.

Se consideraron cuatro estados de carga extremos; la verificación de tensiones por parte de la estructura proyectada, implica la verificación para los estados de carga intermedios. Estos fueron los siguientes:

Estado Ia: se produce al final de la construcción, sin relleno lateral con suelo, estando la napa de agua deprimida bajo la cota de fundación.

Estado Ib: se produce al final de la construcción con relleno lateral hasta la cota de coronamiento, y la napa deprimida bajo la cota de fundación.

Estado II: se produce para un caso de reparación y/o inspección durante la explotación.

La napa en los rellenos laterales se halla a nivel mayor que el de embalse normal (por sobreelevación por marea de viento), en tanto que la cámara se encuentra vacía.

Estado III: se produce para el caso de explotación normal y con la cámara llena a nivel máximo de embalse estimado, considerando efecto por marea de viento y con la napa en los rellenos laterales a igual nivel.

a) *Estabilidad a la flotación*: Los bloques en correspondencia con la cámara son los que están en peores condiciones en este sentido.

– Condiciones excepcionales: corresponden al estado II de cargas. Se tuvo en cuenta una disminución de carga por efecto sísmico, considerando $C_0 = 0,05$

Resultó $C = 1,17 > 1,1$ (mínimo coeficiente de seguridad para condiciones excepcionales)

– Condiciones normales: Corresponde al Estado III, con el nivel de la cámara igual al mínimo garantizado para navegación.

Resultó $C = 1,31 > 1,2$ (mínimo coeficiente de seguridad para condiciones normales)

b) *Estabilidad al deslizamiento*: Los bloques Nros. 15, 16 y 17 en conjunto deben ser estables al deslizamiento, cuando se tiene el máximo nivel en la cámara y el mínimo nivel navegable en el río. Se despreció el efecto favorable de la presa sobre los muros de la esclusa y se consideró un coeficiente de fricción entre el hormigón y el terreno de fundación

de 0,3. Se supuso una variación lineal de la subpresión a lo largo de los tres bloques; igual que en la verificación a la flotación se consideró el efecto sísmico.

Resultó $C = 3,1 > 1,5$

c) *Cálculo de resistencia*: Se efectuaron las determinaciones de las solicitaciones: momentos flectores, esfuerzos de corte y normales, en una sección en correspondencia con la cámara de la esclusa, para los cuatro estados de carga extremos ya enumerados. En primera instancia se calcularon en la unión de la solera con los muros y en el centro de la losa de fondo. A su vez, para cada estado de carga se consideraron seis hipótesis distintas de configuración de la reacción del terreno de fundación. En un caso se supuso a la estructura flexible apoyada sobre medio elástico, resultando las fuerzas de reacción de la fundación proporcionales a la deformación de la solera. En los otros cinco casos, se supuso a la estructura rígida, con el diagrama de reacción del suelo con forma rectangular; de doble trapecio; de parábola hueca rectificada; y de dos tipos de parábolas huecas, surgidas de mediciones tomadas de esclusas fundadas en terrenos similares. Se determinaron luego las tensiones en las fibras superior e inferior como si fuese hormigón sin armar. De esta manera se fueron haciendo ajustes en las dimensiones y en el predimensionamiento de las armaduras. Luego, con uno de los diagramas de reacción con forma de parábola hueca, el que generaba las tensiones más altas y que se estima por el tipo de fundación será el más factible que se produzca, se procedió en segunda instancia a efectuar un cálculo más ajustado de solicitaciones y tensiones, considerando la sección armada. Se determinaron las tensiones cada 3,35 m en el hormigón y en el acero de la losa de fondo, y en cuatro secciones de los muros. Fue necesario variar el espesor de la solera, aumentándolo hacia los muros, a los efectos de lograr una suficiente uniformidad en las tensiones del hormigón, tanto en la fibra superior como en la inferior.

En la etapa de Proyecto Ejecutivo, se efectuarán ensayos fotoelásticos y cálculos por métodos más analíticos que permitirán ajustes en el diseño de las distintas secciones de la esclusa.

*Criterios generales de diseño y descripción
de los muros guías*

Los muros guías son de fundamental importancia para facilitar el encauzamiento de las embarcaciones hacia la esclusa, permitiendo que éstas se “apoyen” en sus paramentos y corrijan su rumbo en el acceso a la cámara. Los pilotos de buques y de los grandes trenes de empujes tienen en estas estructuras una referencia insustituible.

Se adoptaron secciones de hormigón armado en toda la altura, pensando fundamentalmente en tal elección en los muros superiores, la paulatina elevación del nivel de agua en el embalse durante las etapas constructivas y el excelente comportamiento ante el impacto de las embarcaciones y del oleaje generado por éstas y el viento. En cuanto a los muros guías inferiores, también se pueden presentar fluctuaciones en los niveles del río, de acuerdo a los caudales de aporte, oscilando aproximadamente 10 m.

En el coronamiento se instalarán columnas de iluminación gradual en toda la longitud, para conformar una transición suave hacia la esclusa en horas nocturnas.

*Estabilidad Global y Análisis Estructural
de los Muros Guías*

El estudio realizado consiste en:

a) Verificación de la estabilidad de la construcción al deslizamiento y volcamiento, tanto bajo la acción de las cargas por impacto de las embarcaciones, como el empuje del suelo al que le sirve como sostén.

b) Verificación de la resistencia de la construcción y selección de armaduras.

Las hipótesis de cálculo fundamentales consideradas fueron:

- 1) Fundación de muros rígida. El diagrama de reacción del terreno sigue una variación lineal.
- 2) Coeficiente de seguridad mínimo en operación:
 - al vuelco 1,1
 - al deslizamiento 1,5
- 3) Fuerzas consideradas:
 - peso propio de la construcción
 - empuje lateral del suelo
 - fuerza de impacto de la embarcación de máximo desplazamiento. Esta fuerza se toma en dirección normal a la cara del muro guía, en un plano horizontal a la cota del máximo nivel navegable, en ambos accesos.

CONSTRUCCIONES DE MATERIALES SUELTOS

Espigón superior

El acceso superior a la esclusa está emplazado en el embalse, donde por efecto del viento se generan olas que pueden hacer muy dificultoso el ingreso de las embarcaciones a la misma. Para asegurar las condiciones normales de navegación, fue proyectado un espigón de materiales sueltos, que conforma una dársena.

Efectuado un análisis de estabilidad de diversos perfiles transversales, se determinaron las inclinaciones de los taludes que conforman el espigón.

Los taludes del espigón del lado del embalse, en la zona de influencia de las olas, se protegieron con las losas de hormigón armado sobre una capa de filtro; más abajo, donde la influencia del oleaje es menor, el espesor de las losas dismi-

nuye y en el pie del talud, las losas se introducen en un relleno de gravilla.

Del lado de la dársena, se ha recubierto de cota + 33,5 m a + 15 m I.G.M. con losas de hormigón armado, sobre capa de filtro y con un arrojado de roca de sobrecapa de filtro en la parte inferior.

A 700 m del ingreso a la cámara se ha ubicado una línea de amarre de 200 m de largo, constituido por una estructura resistente metálica, fundada en el cuerpo del espigón.

Espigón inferior

Del lado del río se encuentra el acceso inferior a la esclusa. Es necesario construir un espigón a los efectos de proteger dicho acceso de corrientes adversas provenientes de las descargas de la Central Hidroeléctrica y del Vertedero. Hasta tanto se efectúen los ensayos sobre modelos físicos previstos, se ha considerado una longitud del espigón de 1.500 m.

De igual manera que para el espigón superior, se determinaron los taludes estables, y proyectaron las protecciones de los mismos.

Del lado del río y en la parte superior, se colocará un recubrimiento de losas de hormigón armado sobre una capa de filtro en la parte superior del mismo, y en la inferior con un arrojado de roca sobre una capa de filtro.

Se ha proyectado un muelle para la descarga del equipamiento de las obras de control y como línea de amarre para espera de embarcaciones, ubicado a 800 m del acceso inferior a la cámara de la esclusa.

La construcción de ambos espigones se efectuará mediante una combinación de métodos hidromecánicos (refulado) y convencionales, utilizando para el cuerpo materiales sin clasificar.

