

## **DISEÑO DE SOBREANCHOS PARA LA NAVEGACIÓN FLUVIAL EN UN CANAL CON CORRIENTE TRANSVERSAL**

**Prendes Héctor H., Huespe José, Franco Felipe R. y Zanardi Luis A.**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y CIENCIAS HÍDRICAS – UNIVERSIDAD NACIONAL DEL LITORAL**  
Ciudad Universitaria, Barrio El Pozo, (3000) Santa Fe.

E mail: [hprendes@fich1.unl.edu.ar](mailto:hprendes@fich1.unl.edu.ar), [jhuespe@fich1.unl.edu.ar](mailto:jhuespe@fich1.unl.edu.ar), [ffranco@fich1.unl.edu.ar](mailto:ffranco@fich1.unl.edu.ar)  
TE: 0342 4575 234/244/246 internos 174, 155 y 156.

### **RESUMEN**

El Canal de Acceso al Puerto de Santa Fe se desarrolla entre los Km. 586 y 592 de la Ruta de Navegación, en la Hidrovía Paraná – Paraguay. Une la denominada Boca Exterior (Río Colastiné) con la zona portuaria.

Un Plan de Obras que prevé favorecer el escurrimiento de las crecientes del Paraná mediante la canalización de los aliviadores 3, 5 y 6 de la ruta N° 168, deriva gran parte del caudal de estos aliviadores hacia el Corte Grande, donde se concentra el flujo y es evacuado hacia aguas abajo en forma perpendicular al sentido de navegación, dentro del Canal de Acceso al Puerto.

El trabajo se presenta al simposio como ejemplo de un problema atípico (Navegación con maniobras restringidas en un encuentro de corrientes) el cual se pudo analizar mediante la técnica de la modelación física.

Los ensayos experimentales realizados consistieron en simular la navegación del buque tipo frente al Corte Grande, ante diferentes condiciones más exigentes de maniobra. Los mismos se realizaron con el buque en forma estática para medir el campo de velocidades y esfuerzos resultantes sobre el mismo; y en forma dinámica, desplazando la embarcación a velocidad constante por el canal frente a la brecha, filmando continuamente y midiendo las derivas producidas, ante diferentes opciones de maniobra.

### **ABSTRACT**

The Access Channel to the Port of Santa Fe (Argentina) is located between the Km. 586 and 592 of the Navigation Channel, in the Hidrovía Paraná - Paraguay. It connects the denominated External Mouth (Colastiné River) with the port area.

A Plan of Work in order to allow the flow discharge of the Paraná river by canalization of the relief bridges 3, 5 and 6 of the route N° 168, deriving a large part of the flow of these relief bridges toward the called work "Corte Grande", where the flow concentrates and it is evacuated in the flow direction, perpendicularly to the navigation route direction, into the Access Channel of the Port.

The work is presented in the symposium like an example of an atypical problem (navigation with restricted maneuvers in an encounter currents) which has been able to analyze by physical simulation techniques.

The experimental setup consisted on performing simulations of projects ships navigation in front of the "Corte Grande" in the current situation and including the projected works, with different and more demanding conditions of maneuver. These experimental setups were done with the ship in static form to measure the field of water speeds and resulting efforts on the same one, and in dynamic form, displacing the ship at constant speed into the channel in front of the breach (Corte Grande), filming continually and measuring the produced drifts, with different maneuver options.

## INTRODUCCIÓN

El Canal de Acceso al Puerto de Santa Fe se extiende entre los Km. 586,3 y 592 de la Ruta de Navegación y, con una traza de dirección Sureste – Noroeste, une la denominada Boca Exterior (ubicada en el Río Colastiné) con la intersección de los Canales de Derivación Norte y Sur en la zona portuaria (ver figura 1).

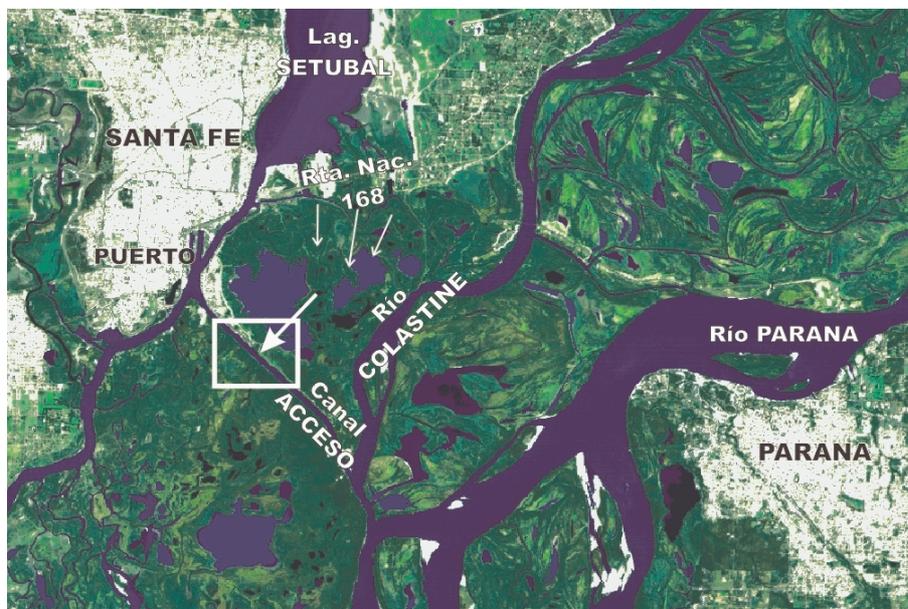


Figura 1

Fue construido con métodos rudimentarios en el período 1905/10, y ya en esa época se advirtió que durante las crecidas importantes las descargas del valle de inundación del Río Paraná, con sentido general de escurrimiento preponderantemente de Norte a Sur, es decir en forma perpendicular al canal de navegación, podrían afectar las condiciones de navegabilidad en este canal artificial.

Con el transcurrir del tiempo, el valle aluvial del Río Paraná, al Este de la ciudad de Santa Fe, ha sido progresivamente ocupado por distintos asentamientos (Barrio El Pozo, Ciudad Universitaria, Ceride, etc.) y, fundamentalmente, por el trazado de la Ruta Nacional N° 168 que une las localidades de Santa Fe y Paraná.

Esta comunicación vial, con desarrollo Este – Oeste, se constituyó, por su escasa transparencia y capacidad de conducción del valle de inundación aguas abajo, durante las crecidas extraordinarias de los años 66, 82-83, 92 y 98 en una suerte de dique de contención, que elevó los niveles de la superficie de aguas arriba y concentró importantes caudales en las luces de paso, situación que obligó a provocar la voladura de parte de la ruta y el colapso de parte de la infraestructura existente (Costanera de Santa Fe, Puente Colgante, Aliviadores 4 y 6, terraplenes de defensa, etc.).

La ampliación de las luces de los aliviadores de la RN168, con posterioridad a la creciente 82-83, no resultan lo suficientemente eficientes pues su capacidad de conducción se encuentra parcialmente limitada por la escasa conductividad de la zona de isla ubicada al Sur de la misma.

A fin de dotar con mayores condiciones de seguridad a la infraestructura emplazada en la Laguna Setúbal y los Canales de Derivación Norte y Sur se ha llevado a cabo un Plan de Obras que prevé favorecer el escurrimiento en el tramo Santa Fe – La Guardia, mediante la canalización de los aliviadores 3, 5 y 6. Pero, gran parte del caudal de estos aliviadores es luego conducido hacia el Corte Grande (figura 2), donde se concentra el flujo y es evacuado hacia aguas abajo en forma perpendicular al sentido de navegación, dentro del canal de acceso al Puerto.

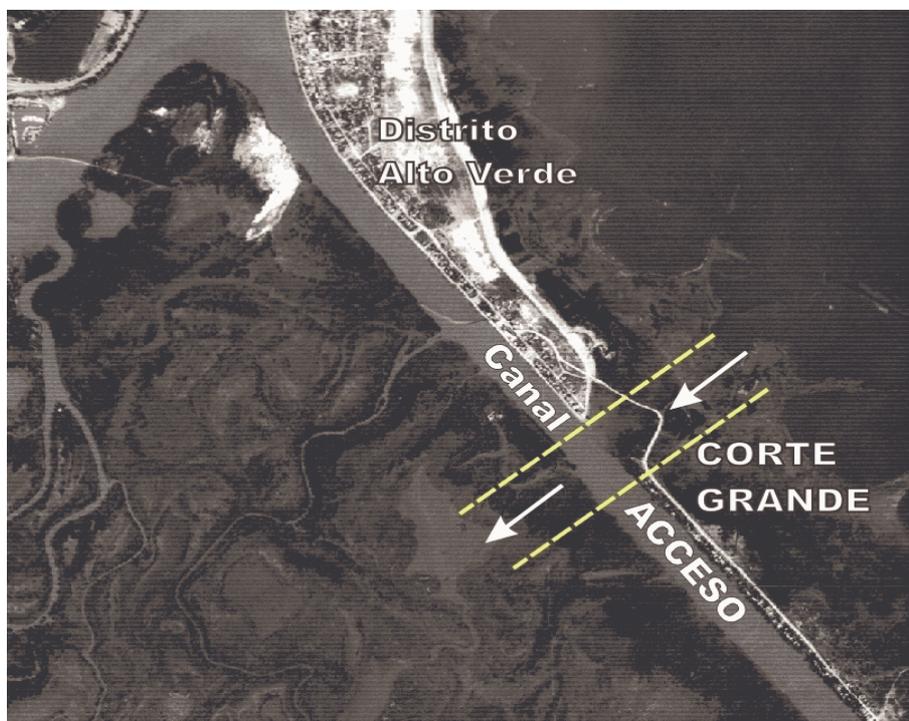


Figura 2

El Corte Grande se generó durante la crecida extraordinaria del año 1983 cuando la presión del agua rompió el terraplén, que se había construido ex profeso, para evitar la existencia de corrientes transversales en el Canal de Acceso.

En este marco conceptual, la canalización de los aliviadores 3, 5 y 6 constituye una alternativa necesaria y promisoría para resolver problemas de inundaciones, pero, ocasiona problemas a la navegación del Canal de Acceso. Por ello fue necesario estudiar el encuentro de los flujos del Corte Grande con el Canal de Acceso, teniendo en cuenta que el aumento del caudal transversal podría acentuar los efectos negativos sobre la navegación, ya padecidas durante la crecida 82-83.

## OBJETIVO DEL ESTUDIO

La Dirección Provincial de Obras Hidráulicas (DPOH) de la Provincia de Santa Fe, suscribió un convenio con la Universidad Nacional del Litoral, para que la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH) realice estudios para determinar las afectaciones a la navegación en el canal de acceso al Puerto de Santa Fe, provocadas por el paso de mayores caudales a través del denominado Corte Grande (Figura 2), como consecuencia de las obras de defensa y regulación de crecidas ubicadas en el Distrito de Alto Verde. El presente trabajo trata sobre la modelación física realizada para resolver las afectaciones a la navegación.

El problema presenta la singularidad de un encuentro de corrientes donde al flujo propio del canal de acceso, por donde navegan las embarcaciones, se agrega una corriente transversal importante, prácticamente perpendicular al sentido de navegación, generando vórtices y velocidades altas que provocan importantes derivas de las embarcaciones.

Para estudiar el problema se realizaron ensayos en un modelo físico donde se analizaron diferentes posibilidades de maniobras de un buque tipo Pánamax en navegación de ingreso y egreso del puerto, para las condiciones hidráulicas más críticas que se pudieran presentar.

El análisis de afectaciones se realizó para crecidas cuyas recurrencias en caudales picos, volúmenes y duraciones son: 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Las mismas se analizaron en forma comparativa para la condición actual (sin obras) y la situación de proyecto (incluyendo las obras en ejecución).

## **METODOLOGÍA**

Los estudios de las afectaciones a la navegación en esta zona (figura 2) estaban previstas originariamente mediante el desarrollo de cálculos teóricos y semiempíricos, asimilando los efectos de una embarcación navegando en un campo de flujo bidimensional homogéneo, donde la trayectoria a recorrer (eje del canal de acceso) presenta un importante sesgo con respecto a la dirección de corriente.

Un análisis más detallado de las características hidrodinámicas de este encuentro de flujos, las condiciones de contorno provistas por la morfología de la brecha y el canal de acceso, sumados a la presencia de embarcaciones de gran porte, de dimensiones comparables a la misma brecha, obturando gran parte de la zona de descarga, implican que los resultados obtenidos con esa metodología podrían diferir sustancialmente de la realidad.

Esta situación ha incentivado la decisión de incluir una modelación física que permitiera realizar ensayos experimentales del problema a resolver en esta zona.

A tales fines se ha construido y calibrado un modelo físico (figura 3) que representa la zona de encuentro de corrientes en el canal de acceso frente al denominado Corte Grande. Su utilización ha sido planificada fundamentalmente para evaluar diferentes alternativas de maniobras posibles y analizar las afectaciones a la navegación.



*Figura 3*

Para ello también se ha construido un modelo de embarcación tipo (sin propulsión), en escala compatible con el modelo físico (1:100), para ensayar alternativas de sobrepaso en la brecha y extraer resultados extrapolables al prototipo en situaciones reales. El modelo simula la geometría de un buque oceánico tipo Panamax, de 220 m de eslora y 32 m de manga (figura 4), que representa a las embarcaciones de las mayores dimensiones que podría ingresar y salir con cargas parciales desde el Puerto de Santa Fe.



*Figura 4*

Los ensayos experimentales acordados consistieron en simular la navegación del buque tipo (con carga parcial) frente al Corte Grande, ante diferentes condiciones más exigentes de maniobra, maximizando la descarga de caudales por la brecha en combinación con flujos en ambos sentidos por el canal de acceso, que se podrían producir para diferentes crecidas extraordinarias, en la situación actual y con las obras en ejecución.

Se realizaron con dos objetivos generales. Por una parte en forma estática para medir el campo de velocidades y esfuerzos resultantes sobre el buque, ya sea para programar las posibles maniobras más conveniente y/o controlar los efectos de la corriente sobre el buque mediante remolcadores de apoyo que eviten la deriva. Por otra parte en forma dinámica, navegando la embarcación a velocidad constante por el canal frente a la brecha, filmando continuamente y midiendo las derivas producidas, ante diferentes opciones de maniobra contemplando sugerencias de representantes de la Asociación de Prácticos y Prefectura Naval Argentina.

Para cada uno de estos ensayos, y ante sucesivas posturas estáticas del buque frente a la brecha, se determinaron las condiciones hidrodinámicas inducidas por la presencia de la embarcación. Estas mediciones permitieron determinar las zonas donde la corriente ocasionaría las máximas derivas y en función de ello planificar las maniobras posibles y/o la incorporación de remolcadores de apoyo para superar el tramo.

En el caso de los ensayos dinámicos, como resultado se determinaron las situaciones en que no ha sido posible superar el tramo de navegación sin hacer contacto con los veriles, y en consecuencia las necesidades de mayores anchos de canal. Posteriormente se realizaron ensayos incluyendo el dragado de un sobreancho adicional en la zona. El mismo ha sido diseñado contemplando las sugerencias de expertos de Prefectura Naval Argentina y Asociación de Prácticos.

## **CUENCO EXPERIMENTAL Y SIMULACIONES**

La simulación geométrica del prototipo se realizó en base a relevamientos topográficos y batimétricos disponibles y, si bien fue simplificada en algunos detalles, se respetaron los aspectos más relevantes, como ser: cotas de cauces y valle, taludes de la canalización del Corte Grande y el Canal de Acceso, alineación del encuentro de las corrientes, etc.

El dispositivo experimental se construyó readecuando un cuenco existente y estuvo condicionado por las condiciones de ingreso y descarga de los caudales de ensayo. Teniendo en cuenta el área de laboratorio asignada, los caudales para simular los escurrimientos (Canal de Acceso y Corte Grande) y los recursos disponibles, se adoptó una escala geométrica 1:100.

A los efectos de que el campo de velocidades en la zona de estudio represente lo más fielmente posible las situaciones a analizar, no se introdujeron distorsiones geométricas y se adoptó una escala de velocidades que respetara la relación de fuerzas inerciales y gravitacionales, por lo que el dispositivo experimental construido es Froudiano.

Para simular la interacción del campo de velocidades, producto de la confluencia de corrientes, y el cruce de las embarcaciones frente al Corte Grande, se construyó un modelo de embarcación en escala 1:100 que simulan un buque oceánico tipo con las máximas dimensiones que ingresan a este puerto .

Teniendo en cuenta el carácter Froudiano del dispositivo experimental fue posible medir las distintas fuerzas que se producirían sobre las embarcaciones. Estos valores orientaron el dimensionamiento de eventuales remolcadores que pudieran ser necesarios para minimizar los riesgos de las maniobras.

### Escalas:

Geométrica = 1:100

Velocidades =  $eV = eL^{1/2} = 1:10$

Tiempos =  $eT = eL^{1/2} = 1:10$

Caudales =  $eQ = eL^{5/2} = 1:100.000$

Fuerzas =  $eF = eL^3 = 1:1.000.000$

Las características del Cuenco de Ensayos y los circuitos hidráulicos para el ingreso y egreso de los caudales se presentan en el croquis de figura 5.

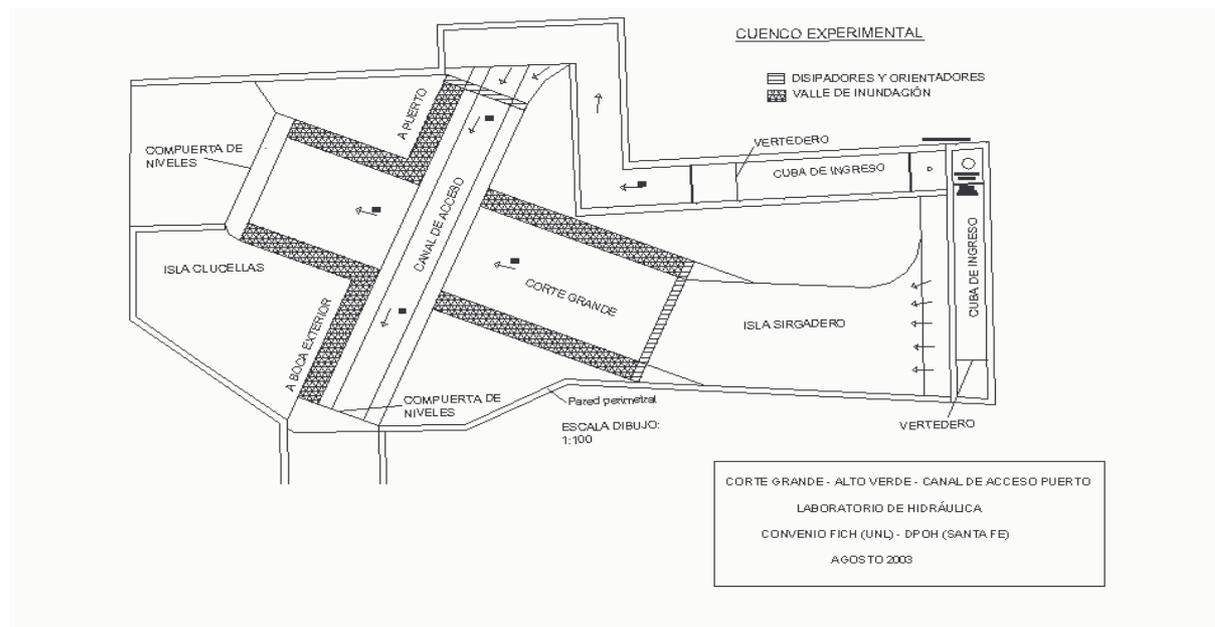


Figura 5

### **Realización de los ensayos experimentales**

En base a los objetivos del estudio se decidió realizar dos tipos de ensayos. Uno de ellos denominados estáticos, en condición del buque fijo ubicado en la posición más comprometida frente a la brecha, es decir cuando el flujo transversal incide plenamente sobre toda la embarcación generando los máximos esfuerzos y en consecuencia las máximas derivas. Los otros denominados dinámicos, en condición del buque en movimiento, simulando una trayectoria resultante producto de una velocidad de navegación constante superando la brecha, en combinación con la deriva que el flujo lateral ocasionaría.

En ambos casos se ensayaron situaciones según la condición actual, de manera comparativa, y considerando las obras de derivación de caudales en construcción. Adicionalmente también se realizaron ensayos experimentales incluyendo una obra de ensanche del canal de acceso frente al Corte Grande.

### **Ensayos estáticos realizados:**

Los ensayos experimentales con posición fija de la embarcación se realizaron con el buque simulando un calado de 30 pies y ubicado sobre el eje del canal frente a la descarga de caudales de la brecha del corte grande para distintas combinaciones de caudales por el corte y

en el canal de acceso. El objetivo de esta serie de ensayos ha sido determinar el campo de velocidades en la zona del canal de acceso frente a la brecha del corte grande sin la embarcación presente, y a modo comparativo el generado por la obstrucción que representa el mismo buque. Los estados analizados se detallan en la tabla siguiente.

Ensayo	Recurrencia (Tr)	Q corte grande (m <sup>3</sup> /s)	Q canal de acceso (m <sup>3</sup> /s)	Observaciones
1	100	2500	0	Sin Buque
2	100	2336	1595	C/s buque
3	50	1546	1227	C/s buque
4	50	1350	630	Sin buque
5	25/50/100	1350	0	Sin buque
6	100	2120	2260	Sin buque

Los caudales ensayados por cada rama del encuentro de flujos responden a la selección de los momentos en los cuales se manifiestan las condiciones más desfavorables desde el punto de vista de la navegación.

#### Instrumental e infraestructura utilizada:

Para la recolección de información y realización de los experimentos se contó con la infraestructura existente en el laboratorio de la FICH, con sistema de bombeo, tanque de nivel constante, dispositivos de aforos de alta precisión, y accionamiento de válvulas para combinar los suministros que simularían los diferentes caudales que llegan al sector de estudio.

Para la medición de las variables correspondientes al flujo se ha utilizado instrumental como: Nivel óptico de precisión, mira milimétrica, cronómetro, medidor de velocidades Doppler acústico ADV marca Sontek, minimolinete A OTT con contador, flotadores, etc.

Los datos recogidos en cada ensayo fueron tomados con dicho instrumental, el ADV Sontek de 25 herz y placa de captura de información para almacenamiento en PC, fue instalado en un carro porta-instrumental a los efectos de barrer una serie de puntos conformando la grilla que se observa en la Figura 6.

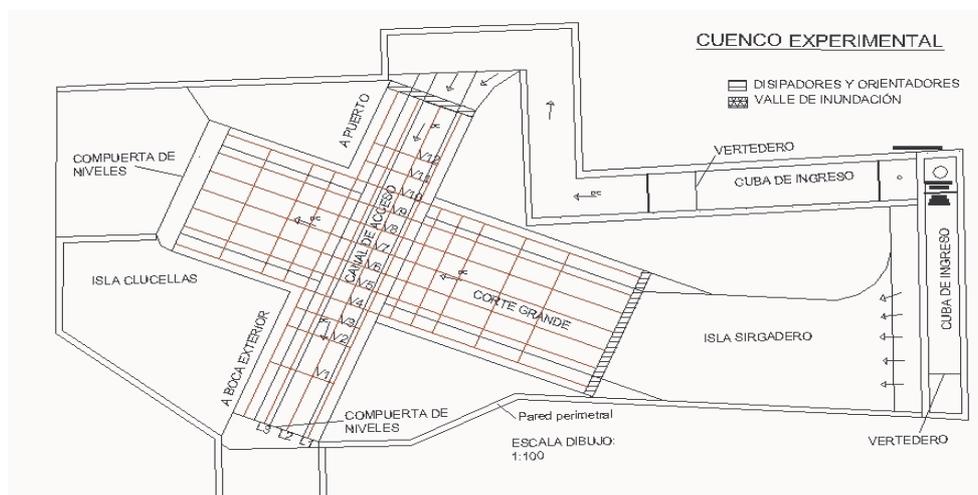


Figura 6



**Ensayo 5:** Para este ensayo se analizó la circunstancia donde las pendientes en el canal de acceso eran despreciables ( $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$ ) tanto entrantes como salientes, del tramo exterior y del puerto. Esta situación sería representativa de promediar caudales ( $1350 \text{ m}^3/\text{seg}$ ) que se producirían para recurrencias de 25, 50 y 100 años, durante las ramas descendentes de los hidrogramas analizados.

**Ensayo 6:** Este último ensayo consideró la condición más exigente de la recurrencia de 100 años para la situación sin obra, con caudales de  $2124 \text{ m}^3/\text{seg}$  en el corte grande y  $2262 \text{ m}^3/\text{seg}$  en el canal de acceso.

En todos los ensayos se midieron corridas de flotadores abarcando toda la zona del encuentro de corrientes y los cambios hidrodinámicos inducidos por la presencia del buque. En las zonas más críticas se midieron perfiles detallados de velocidades.

### Conclusiones de los ensayos estáticos:

La presencia de la embarcación en el Canal de Acceso frente al corte grande de Alto Verde genera incrementos de velocidades y zonas de vórtices adicionales que tienden a complicar las maniobras aumentando las derivas. La configuración del escurrimiento para las condiciones analizadas adopta una estructura de tipo en curva, ocasionando la deriva de las embarcaciones sobre la Isla Clusellas (veril verde).

Como condición desfavorable a tener especialmente en cuenta en los ensayos dinámicos cabe destacar la situación que se genera cuando el Canal de Acceso presenta una pendiente hidráulica nula (sin flujo en el sentido longitudinal), y es atravesado perpendicularmente por el caudal saliente del Corte Grande.

Los ensayos estáticos permitieron determinar los esfuerzos de la corriente actuando sobre el buque en las sucesivas posiciones de avance del mismo a través de la brecha. Las mediciones detalladas del campo de velocidades inducido por la presencia del buque se realizaron en la posición más crítica, que mayores derivas ocasiona (ver ejemplo en figura 8). La identificación de estos esfuerzos y posiciones del buque más desfavorables fueron luego tenidas en cuenta para planificar las maniobras de sobrepaso más convenientes durante los ensayos dinámicos, dirigiendo la enfilación inicial del buque hacia el veril rojo, para intentar de contrarrestar al máximo posible los efectos de deriva.

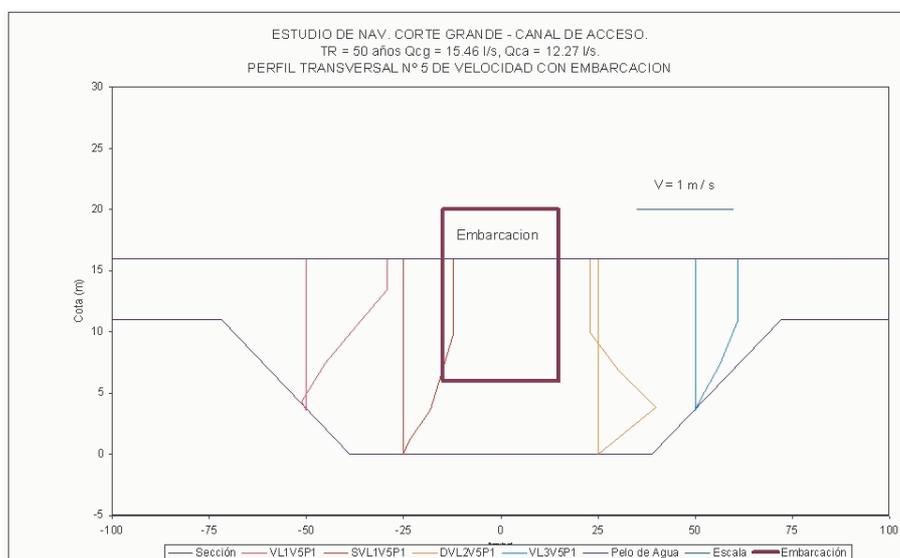


Figura 8

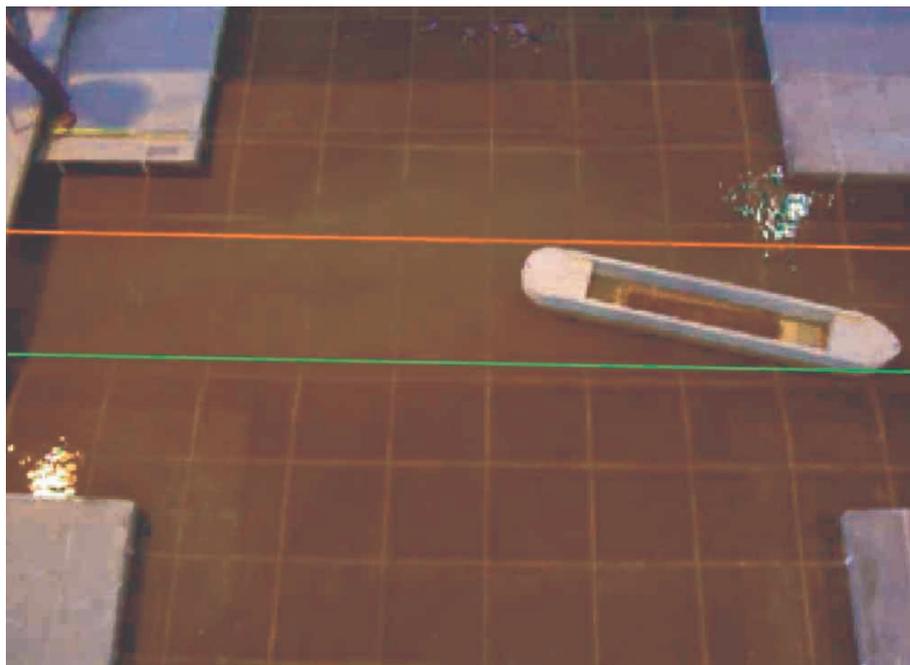
## Ensayos dinámicos realizados

Los ensayos experimentales en la modalidad dinámica se realizaron representando las condiciones más adversas para la maniobra del buque, suponiendo a los efectos del análisis situaciones conservativas. Se lastró el modelo para representar un calado de 30 pies como carga parcial máxima con que el buque podría salir del puerto en condiciones de crecientes importantes.

El modelo de buque utilizado carece de fuerza motriz y timón (propulsión propia) lo cual hace que su trayectoria no sea posible de corregir y dependa exclusivamente de la velocidad de navegación y enfilación al inicio del pasaje frente a la brecha. Tampoco se ha representado la ayuda de maniobra, o retención a los efectos de deriva, que pudiera suministrar un remolcador de apoyo. En todos los casos el pasaje del buque por la brecha se realizó con flujo en el canal en el mismo sentido de avance de la embarcación (como condición más riesgosa de maniobra). En resumen, las situaciones con y sin obra representadas en los ensayos experimentales han sido las más desfavorables.

Para contrarrestar al máximo posible los efectos de la deriva, del flujo cruzado frente a la brecha, la enfilación inicial del buque se ha direccionado hacia aguas arriba, sobre el veril rojo. Esta maniobra hace que el buque durante los ensayos, en algunas situaciones, se haya excedido de los límites del canal por sobre el veril rojo, maniobra que no implica mayores riesgos y se podría realizar aprovechando las condiciones morfológicas actuales que brinda buenos calados en esta zona.

Bajo estas condiciones y manteniendo en todo el trayecto una velocidad neta de avance no superior a 5 nudos (condición de seguridad sugerida por Prefectura Naval Argentina), se realizaron ensayos para diferentes combinaciones de situaciones críticas ocasionadas por crecidas con distintas recurrencias (25, 50 y 100 años), en el escenario actual y con las obras en ejecución. En varias oportunidades la deriva del buque no ha sido posible controlar y la embarcación hizo contacto con los veriles del canal no logrando superar la zona (ver ejemplo en figura 9).



*Figura 9*

Posteriormente y en base a los resultados obtenidos, se agregaron ensayos incluyendo obras de dragado para ampliar el ancho de solera del canal frente a la brecha del Corte Grande. El análisis de estos resultados permitió diseñar el sobreancho necesario para mejorar las condiciones de maniobras.

Los ensayos realizados fueron los siguientes.

- TR 25 CO SE : En la situación de caudal máximo erogado por la brecha durante el pasaje de una crecida extraordinaria de 25 años de recurrencia, con las obras en ejecución funcionando y sin ensanche del canal.
- TR 50 CO SE: En la situación de caudal máximo erogado por la brecha durante el pasaje de una crecida extraordinaria de 50 años de recurrencia, con las obras en ejecución funcionando y sin ensanche del canal.
- TR 50 CO CE: Idem anterior pero con ensanche del canal de 60 a 125 m.
- TR 100 CO SE: En la situación de caudal máximo erogado por la brecha durante el pasaje de una crecida extraordinaria de 100 años de recurrencia, con las obras en ejecución funcionando y sin ensanche del canal.
- TR 100 CO CE: Idem anterior pero con ensanche del canal de 60 a 125 m.
- TR 25,50,100 SQ SE: En situación de caudales importantes erogados por la brecha y flujo nulo en el canal de acceso que se produciría en algún momento durante el pasaje de crecidas extraordinarias de recurrencias mayores a 25 años, con las obras en ejecución y sin ensanche del canal.
- TR 25,50,100 SQ CE: Idem anterior pero con ensanche del canal de 60 a 125 m.
- TR 100 SO SE: En la situación de caudal máximo erogado por la brecha durante el pasaje de una crecida extraordinaria de 100 años de recurrencia, en la situación actual sin las obras en ejecución, y sin ensanche del canal.
- TR 100 SO CE: Idem anterior pero con ensanche del canal.

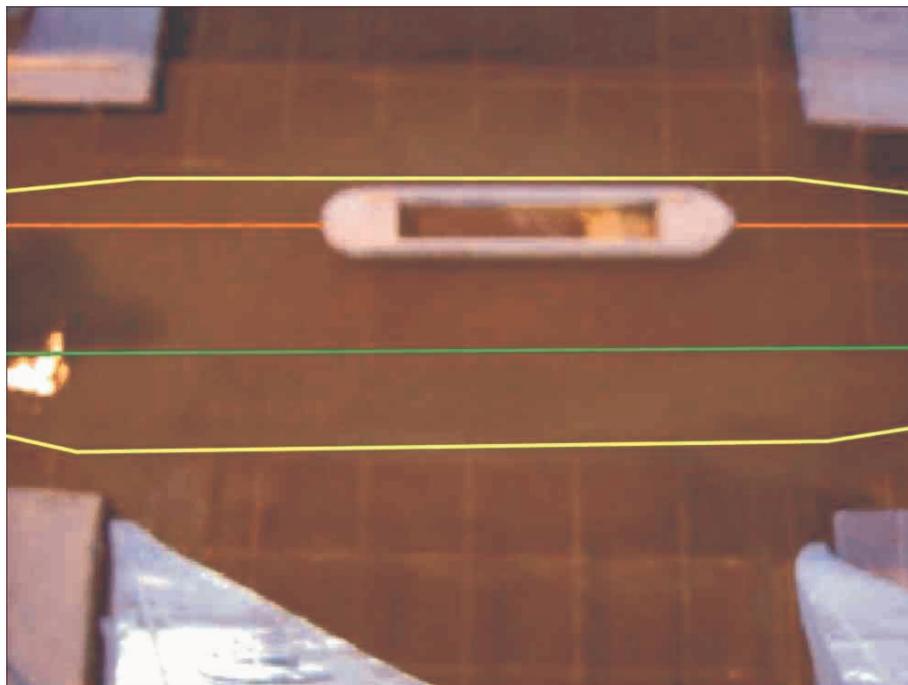
Durante los ensayos se filmó continuamente el avance y cambio de posición del buque sobre una grilla graduada pintada en el modelo, y destacando los veriles del canal de navegación. Se analizó por imágenes secuenciales la evolución de las trayectorias del buque bajo los efectos de las derivas ocasionadas por el caudal transversal en la brecha, en combinación con el flujo propio del canal de acceso.

En cuadros fotográficos obtenidos de la filmación se pudo observar y analizar a intervalos regulares las sucesivas posiciones del buque durante su trayectoria sobrepasando la zona de la brecha. A modo de referencia se incluyeron líneas demarcatorias de los veriles rojo y verde y también, cuando correspondía, los nuevos veriles del canal ampliado por dragado, es decir con sobreanchos (ver figuras 9 y 10 a modo de ejemplo).

Para las crecidas de 2, 5 y 10 años de recurrencia no se realizaron ensayos debido a que los caudales erogados por la brecha del corte grande resultaron no significativos y prácticamente no influyentes sobre la navegación.

Para las condiciones ensayadas se obtuvieron los siguientes resultados:

- TR 25 CO SE : El caudal de la brecha produce una deriva apreciable sobre la embarcación pero la misma alcanza a superar el tramo sin requerir mayores anchos de canal.
- TR 50 CO SE : En esta condición a pesar de que el buque inicia la trayectoria con una cierta enfilación hacia aguas arriba para compensar la deriva, la misma no logra contrarrestarse y el buque hace contacto con la margen o veril verde del canal
- TR 50 CO CE: El buque experimenta una importante deriva pero usando el ensanche del canal logra sobrepasar la brecha, sin hacer contacto con los veriles.
- TR 100 CO SE: De todas las condiciones de maniobras analizadas esta resultó ser la más riesgosa, la gran deriva producida por elevados caudales transversales erogados por la brecha desplaza al buque fuera del canal contra el veril verde.
- TR 100 CO CE: A pesar de la importante deriva, el ensanche del canal permite que el buque supere la brecha y continúe su navegación sin quedar varado. (ver ejemplo en figura 10)



*Figura 10*

- TR 25,50,100 SQ SE: Esta condición fue analizada porque el caudal de la brecha atraviesa totalmente el canal de acceso (pasa de largo hacia la Isla Clucellas) en forma perpendicular al eje del buque, y genera cambios bruscos de velocidades en los extremos del flujo. Estos elevados gradientes de velocidades afectan alternadamente la

proa o popa del buque, generando una rotación en su enfilación. A este hecho se suma una importante deriva cuando la masa de agua transversal choca contra toda la superficie lateral del buque. Esta combinación de efectos hace que el buque no logre sobrepasar la brecha sin hacer contacto con los veriles del canal.

- TR 25,50,100 SQ CE: Al incluir en el modelo físico el sobreebanco del canal sugerido (125 m) se observa que el buque puede superar la zona de riesgo frente a la brecha, sin hacer contacto con los nuevos veriles, desplazados por la obra de ensanche sugerida.
- TR 100 SO SE: Esta condición se analizó como referencia y a modo comparativo de una situación que se podría dar actualmente, es decir sin las obras en ejecución. También en este caso las afectaciones a la navegación son importantes. A pesar de que el buque inició su trayectoria con una enfilación hacia el veril rojo para contrarrestar la deriva, la misma ha sido lo suficientemente importante para desplazarlo fuera del canal y vararlo sobre el veril verde.
- TR 100 SO CE: Usando el ensanche del canal el buque logra superar la brecha sin inconvenientes. El ensanche del canal para las situaciones con obra también sería necesario para la situación actual, es decir sin las obras, si se produciría el pasaje de una crecida extraordinaria de recurrencia centenaria, como la considerada en estos estudios.

### **Diseño de un sobreebanco del canal**

En función de los resultados de los ensayos experimentales se pudo comprobar que con las obras en ejecución funcionando, la ocurrencia de crecidas de recurrencias superiores a 25 años generan para la navegación del canal de acceso, en la zona frente al corte grande, situaciones de riesgo. Estas implican maniobras complicadas y derivas muy importantes que obligarían a suspender la navegación de grandes buques en determinados momentos, cuando se producen caudales máximos por la brecha; e incluso aún en situaciones de caudales altos inferiores al pico, pero combinados con probables flujos nulos en el canal de acceso.

Ante esta situación, se analizó la manera de atemperar estos efectos buscando soluciones que eviten la interrupción de la navegación. Para ello se consideró la posibilidad de realizar un dragado de ensanche del canal frente a la brecha.

Se diseñó una modificación del canal de acceso frente a la brecha, que tiene las siguientes características (ver figura 11): Ampliación de 25 m sobre el veril rojo, y ampliación de 40 m sobre el veril verde; en total 65 m de ampliación del ancho de solera en los 340 m de recorrido del Canal de Acceso frente a la amplitud total de afectación por la brecha (incluyendo revancha adicional con respecto a los 240 m de ancho efectivo de la brecha). Transición del nuevo ancho de 125 m al ancho natural actual efectivo del canal (60 m) con una contracción en planta de 1:7,5. Esta relación de contracción de la transición sería la mínima recomendable sugerida por PIANC (Permanent International Association of Navigation Congresses).

Estos anchos de solera del canal de acceso frente a la brecha se efectuarían hasta una cota de fondo, o solera, de 5 m IGM (aproximadamente -3.20 m al cero del hidrómetro local). Esto permitiría que buques con calados de 30 pies, más correspondiente revancha bajo quilla, puedan navegar usando el ensanche con niveles de agua superiores a los 6.55 m en la escala

local (Hidrómetro Puerto Santa Fe). Esto equivale a cotas de pelo de agua superiores a 14.75 m IGM, condiciones en las cuales se producirían los caudales elevados por la brecha del Corte Grande, que afectan a la navegación en el canal..

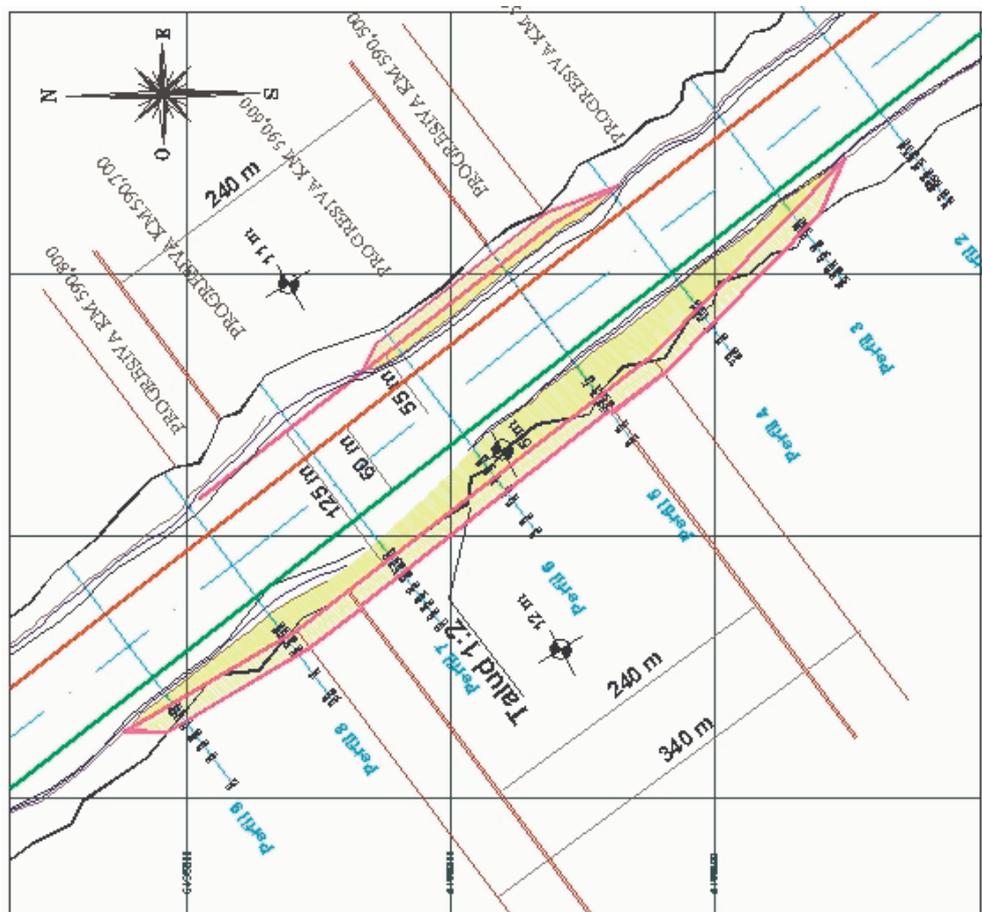


Figura 11

## CONCLUSIONES

Se ha podido determinar que en la situación actual, es decir sin las obras de derivación en ejecución, la navegación de grandes buques también se vería interrumpida en determinados momentos del pico de una crecida centenaria, cuando por la brecha se producirían caudales elevados superiores a los  $2.000 \text{ m}^3/\text{seg}$ . Incluso también los anchos actuales del canal serían insuficientes para caudales por el corte grande superiores a aproximadamente  $1.350 \text{ m}^3/\text{seg}$  combinados con flujos prácticamente nulos en el canal.

El funcionamiento de las obras en ejecución implicará descargas de caudales transversales al sentido de navegación mayores con respecto a la situación actual (sin las obras), para todas las crecidas analizadas. En estas condiciones, se producen varias situaciones en las cuales la deriva de los buques complica la maniobra de sobrepaso de la brecha, aumentando riesgos de accidentes y/o varaduras. Los ensayos experimentales realizados para las situaciones consideradas más críticas, con un modelo de buque tipo de las máximas dimensiones (Panamax), y con máxima carga parcial posible, han mostrado que para crecientes extraordinarias, con recurrencias superiores a los 25 años, las posibilidades de sobrepasar la

zona implican altos riesgos de contacto y varadura del buque con el veril verde, o margen de la Isla Clucellas.

Ante esta situación se ha diseñado, e incluido en los ensayos experimentales, una obra de ensanche de la solera del canal de acceso, en la zona frente al corte grande de Alto Verde. La misma consiste en llevar el ancho útil actual del canal (60 m) a más del doble (125 m), para que durante las crecientes importantes las embarcaciones más grandes puedan navegar con calados de hasta 30 pies.

La repetición de los ensayos experimentales con las obras en ejecución, e incluyendo el ensanche del canal sugerido, ha dado como resultado que en todas las situaciones, e incluso para el momento más crítico (caudal pico) de una crecida centenaria, el buque tipo simulado ha experimentado una importante deriva hacia el veril verde o costa sur del canal, pero, utilizando el sobreancho diseñado el mismo ha podido superar el tramo frente a la brecha, sin hacer contacto con la margen.

Es importante destacar que todos estos ensayos experimentales se realizaron simulando el pasaje de un buque tipo Panamax en las peores condiciones de maniobra: sin propulsión propia, sin timón y sin la ayuda de remolcadores. La utilización de máquina y gobierno del buque, como así también la ayuda “obligatoria” de un remolcador adecuado mejorarán considerablemente las condiciones de maniobra, minimizando los riesgos de accidentes. También brindará una mayor seguridad en las maniobras la implementación de un sistema de señalización adecuado, que permita visualizar con precisión los veriles del nuevo canal ensanchado.

Los ensayos experimentales realizados, limitaciones mediante, representan las condiciones más desfavorables en cuanto a tamaño de embarcación y gobierno de la misma, motivo por el cual el diseño del ensanche podría considerarse conservativo. No obstante, sería recomendable verificar que el sobreancho adoptado también sea suficiente para el tránsito por la zona con embarcaciones de menor porte, pero, que pudieran presentar mayores restricciones de maniobra, como por ejemplo formaciones de barcazas, etc. En tal sentido la simulación física de las maniobras de navegación incluyendo propulsión y timón (gobierno) de la embarcación, constituye un estudio más avanzado factible de ejecutarse con la finalidad de optimizar el diseño del ensanche.

El trabajo realizado a través de ensayos experimentales utilizando modelación física permitió resolver un problema atípico para la navegación planificada, que se produciría en el Canal de Acceso al puerto de Santa Fe. En un tramo del mismo las embarcaciones repentinamente se someten a una fuerte corriente transversal, que les ocasiona importantes derivas, en un canal de navegación con limitadas dimensiones para maniobrar.

## **RECONOCIMIENTO**

*al Profesor Luis Alberto Zanardi :*

*Quien, además de coautor de este trabajo, ha sido un incansable y entusiasta líder en la planificación y desarrollo de las tareas del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas. Desde el 19 de Noviembre de 2003 no contamos con su presencia, pero su memoria y sus invaluable contribuciones al hacer científico y a la docencia de la Hidráulica Fluvial e Hidráulica Experimental, permanecerán vivas en el corazón de este grupo de trabajo.*