

## **PAPER 04 - CRITERIOS PARA LA ELECCIÓN DE UN BUQUE DE DISEÑO EN EL PROYECTO CONCEPTUAL DE CANALES NAVEGABLES, ÁREAS DE MANIOBRA Y OTRAS INSTALACIONES PORTUARIAS**

**De Vincenzi, Marcos Alejandro**  
**Universidad Tecnológica Nacional**

**marcosdevincenzi@hotmail.com**

---

### **ABSTRACT**

Uno de los principales datos necesarios para avanzar en el proyecto conceptual de un canal de navegación o un área de flotación asociada (rada de fondeo, área de maniobra interna, etc.) es la elección de un buque de diseño. Existe una relación directa entre las dimensiones y propiedades de este buque, y las dimensiones geométricas del canal resultante.

Sin embargo, pese a su reconocida importancia, en los principales códigos y recomendaciones internacionales, los posibles criterios para la elección del buque de diseño no están, a juicio del autor, suficientemente representados.

Por ello, en el presente documento, luego de hacer una revisión sobre las principales publicaciones disponibles (PIANC, USACE, ROM), se mencionan estos posibles criterios, sus ventajas y desventajas, y las implicancias de cada uno de ellos en la integralidad del diseño geométrico resultante, incluyendo aspectos técnicos, económicos y comerciales. También se ponen de manifiesto las distintas soluciones de compromiso que se deben adoptar ante los diversos escenarios en juego, permitiéndole al equipo de proyecto interpretar las variables, riesgos y consecuencias de cada decisión dentro del proceso de selección.

Finalmente, el autor propone un procedimiento práctico-conceptual con la intención de esbozar una hoja de ruta que sirva para la correcta elección del buque de diseño, proponiendo un punto de partida que luego pueda ampliarse en publicaciones especiales sobre el tema.

**Palabras Clave:** Proyecto de canales de navegación, selección del buque de diseño, semejanza de flota, peligrosidad de la carga, atributos de maniobrabilidad, crecimiento en el porte de los buques.

## 1. INTRODUCCION

Los canales navegables de acceso a los puertos y las áreas de flotación asociadas (radas de fondeo, áreas de maniobra interna, etc.) suelen ser uno de los componentes del sistema portuario que mayores inversiones demanda, tanto en su construcción inicial como el mantenimiento posterior a lo largo de toda su vida útil.

En consecuencia, un diseño razonable, eficiente y seguro de un canal de navegación es fundamental para viabilizar la factibilidad técnica y económica de un proyecto portuario. Dado que su vida útil es extensa, y sus usuarios, los buques, experimentan cambios a lo largo de la misma (dimensiones, porte, carga que transportan, sistemas de propulsión, etc.), es habitual que los canales de navegación se adapten progresivamente a los mismos, con cambios en sus dimensiones navegables, radios de curvatura, niveles de referencia o sistemas de señalización y/o ayudas a la navegación.

Tanto el diseño inicial del canal de navegación, como los progresivos cambios u adaptaciones a lo largo de su vida útil, dependen fuertemente de los buques que por el mismo navegan. Sin embargo, los buques suelen ser de naturaleza distinta, tanto por la carga que transportan, sus dimensiones, y los atributos de los que depende su maniobrabilidad, entre otros aspectos.

Por ende, uno de los principales retos que enfrenta un equipo de proyecto a la hora de diseñar un canal de navegación, ya sea en su fase inicial o en una adaptación en su vida útil, es elegir un buque patrón que sirva para representar al conjunto de buques que por el mismo navegan.

A este buque patrón se lo conoce generalmente como “buque de diseño”. Es tal la importancia que tiene que, una vez alcanzado el diseño conceptual del canal, sus dimensiones navegables se expresan en función de las dimensiones del buque de diseño considerado: El ancho del canal se lo expresa en función de la manga del buque, la profundidad en función del calado, y el radio de las curvas en función de la eslora. Hay un vínculo directo, estrecho e indeleble entre el buque de diseño y el canal de navegación que fue proyectado para el mismo.

Llamativamente, pese a la relación directa que existe entre el buque de diseño y el proyecto conceptual de un canal de navegación, los principales códigos y recomendaciones internacionales que atienden el diseño de canales de navegación (en el presente artículo se cita PIANC, ROM y USACE), a juicio del autor, no tratan con el suficiente detalle los pormenores de la elección de este buque.

En los tres textos se dedica un apartado independiente a este tema, con menor o mayor extensión según el caso, pero en ninguno de ellos existe un procedimiento que permita al equipo de proyecto seguir una secuencia ordenada para su elección, al tiempo de permitirle interpretar las variables, riesgos y consecuencias de cada decisión dentro del proceso.

En cambio, los textos proponen un conjunto de recomendaciones organizadas de forma aleatoria, incluso con algún grado de oposición entre las mismas, que al cabo de su análisis no terminan arrojando conclusiones plausibles, sino más bien un compendio de observaciones generales, ciertamente predecibles para quienes están acostumbrados a trabajar en el proyecto de canales de navegación.

La falta de un marco conceptual más concreto puede resultar en una elección incorrecta del buque de diseño y, por ende, quizás en un proyecto erróneo del canal de navegación, sub o sobredimensionado, acarreando consecuencias técnicas, operativas u económicas sobre el sistema portuario en su conjunto.

## **2. REVISIÓN DE CÓDIGOS Y RECOMENDACIONES INTERNACIONALES**

Veremos a continuación la transcripción ordenada de algunas de las principales referencias sobre el buque de diseño que figuran en las publicaciones más reconocidas internacionalmente. Los textos se han recortado en búsqueda de una mejor abreviatura, pretendiendo no alterar la esencia de su significado. Se recomienda la lectura completa de estas publicaciones para su cabal entendimiento.

### **2.1. Reporte 121 “HARBOUR APPROACH CHANNELS DESIGN GUIDELINES” (PIANC, 2014).**

*“...El buque de diseño debe elegirse para garantizar que el diseño del canal le permita a él, y a todos los demás barcos que probablemente lo utilicen, navegar con seguridad...”*

*“...La elección inicial obvia es seleccionar el barco con las dimensiones más grandes, pero otros criterios pueden ser igualmente importantes...”*

*“...Puede haber varios buques de diseño, cada uno asignado para abordar un aspecto diferente del canal...”*

*“...En los casos en que sea posible designar un buque de diseño determinado se pueden utilizar las dimensiones reales de ese barco. De lo contrario, se pueden usar las dimensiones promedio de los barcos de Lloyd's Register u otras fuentes...”*

*“...Las propiedades de maniobra del barco de diseño generalmente representan un nivel estándar normal para un buque de su tipo y tamaño. Si el buque tiene una elevada maniobrabilidad, esto resultará en dimensiones menores del canal. Para los buques con maniobrabilidad más deficiente, esto requerirá dimensiones de canal más grandes y/o reglas operacionales más estrictas o umbrales operacionales más bajos...”*

### **2.2. Reporte “HYDRAULIC DESIGN OF DEEP-DRAFT NAVIGATION PROJECTS” (USACE, 2006).**

*“...El buque o los buques de diseño se seleccionan sobre la base de estudios económicos de la flota de buques que se espera que utilice el canal de navegación a proyectar, durante la vida del mismo...”*

*“...Para los estudios de mejora del proyecto, se debe incluir como parte del estudio una revisión y un análisis exhaustivo de los buques que actualmente utilizan el proyecto. Generalmente es necesario tener en cuenta las tendencias esperadas de construcción de barcos...”*

*“...El buque de diseño se elige como el buque de mayor tamaño dentro de la flota, o muy cercano al mismo. Las dimensiones del canal serán determinadas para acomodar al buque de diseño, o los buques de diseño, representativos de las distintas flotas que usarán el canal...”*

*“...El ancho y la profundidad del canal no necesitan ser constantes a lo largo del proyecto, pueden variar de ser necesario para que el buque de diseño realice un tránsito seguro, eficiente y rentable bajo el conjunto de condiciones operacionales elegidas...”.*

### **2.3. Reporte “PROYECTO DE LA CONFIGURACION MARITIMA DE LOS PUERTOS; CANALES DE ACCESO Y AREAS DE FLOTACION” (ROM, 1999).**

*“...Dado que los accesos y áreas de flotación serán utilizadas normalmente por distintos tipos de buques, cuyas dimensiones y otras características de maniobrabilidad pueden ser muy diferentes, normalmente será necesario definir como buque de diseño a un conjunto de varios buques representativos de los diferentes tipos de barcos y condiciones de carga con las que operarán en el área que se analice...”*

*“...Es posible que el buque de mayores dimensiones que vaya a operar en un área no sea el buque de diseño, ya que normalmente los criterios de explotación que se adopten para la operación de este buque conlleven unos menores requerimientos de espacio de los que pudieran precisarse para buques algo menores...”.*

*“...Las dimensiones geométricas en planta o en alzado de las áreas de navegación y flotación dependen fundamentalmente de parámetros diferentes del buque, por lo que será necesario considerar como buques de diseño aquellos asociados a las condiciones más desfavorables de las características que sean determinantes en cada caso...”*

*“...Las áreas de navegación y flotación se dimensionarán para los buques de diseño de mayores exigencias que puedan operar en la zona que se considere, según las condiciones de operación de la misma, suponiendo que el buque se encuentra en las condiciones de carga más desfavorables...”*

*“...La utilización de las áreas de flotación, con carácter excepcional, por buques de mayores exigencias de las previstas en el proyecto inicial exigirá la comprobación de las condiciones de operación correspondientes a los nuevos buques, determinándose las condiciones más limitativas en que tendrá que operar dicho buque...”.*

## **3. ANALISIS CRITICO**

### **3.1. CRITERIOS PARA SELECCIONAR UN BUQUE DE DISEÑO**

En primer lugar, para orientarnos sobre el punto de partida al momento de seleccionar un buque de diseño, es importante reconocer cuales son los posibles criterios más usuales. Ellos son:

- 3.1.1.** El buque de mayor porte dentro de los que componen una flota determinada.
- 3.1.2.** Un buque ligeramente más pequeño que el de mayor porte, aunque con una representatividad más elevada que éste sobre el total de los buques de su flota.
- 3.1.3.** El buque que, luego de optar por 3.1.1. o 3.1.2., represente a la flota más numerosa de las que navegan o se espera que naveguen por el canal.
- 3.1.4.** El buque que, luego de optar por 3.1.1. o 3.1.2., represente a la flota con atributos de maniobrabilidad más pobres de las que navegan o se espera que naveguen por el canal.
- 3.1.5.** El buque que, luego de optar por 3.1.1. o 3.1.2., represente a la flota que transporta una carga especialmente peligrosa de las que navegan o se espera que naveguen por el canal.

Para avanzar en el análisis es necesario reconocer si el canal de navegación del que se ocupa el proyecto sirve de acceso a un puerto en el que se opera un solo tipo de carga (monopropósito) o varios tipos de carga (multipropósito). La segunda opción también es válida si el mismo canal de navegación sirve de acceso a varios puertos o terminales, que operan con cargas distintas.

En otras palabras, es necesario reconocer si los usuarios del canal de navegación serán buques de igual o distinta tipología, es decir si transportan el mismo tipo de carga o no.

Por ejemplo, imaginemos un canal de navegación a través del cual se accede a un solo puerto, y que éste opera, fundamentalmente, con dos tipos de carga: Contenedores y petróleo o derivados. Entonces tendremos dos flotas características, una de buques portacontenedores y otra de buques tanque, que deben estudiarse en forma independiente. Luego de este análisis deberemos seleccionar un buque de diseño que actúe de representante de la flota de buques portacontenedores y otro que actúe de representante de la flota de buques tanque.

Para seleccionar el buque que representa a cada una de las flotas, el análisis debe centrarse exclusivamente entre 3.1.1. y 3.1.2.

Es claro que de optar por 3.1.1. se está del lado de la seguridad, dado que el canal de navegación se diseña en ese caso con el buque de mayor porte de los que componen la flota, y, por ende, para todo el resto de los buques de la misma tipología, y en igualdad de condiciones de operación, el canal quedará sobredimensionado. Para la mayoría de los casos, esta opción requiere de mayores inversiones tanto para la apertura del canal como muy probablemente para su mantenimiento.

En ese sentido, es muy importante evaluar la representatividad del buque de mayor porte sobre el total de la flota. Si se tratara de un caso aislado, o incluso de tan solo unos pocos ingresos comparado con el total, es muy probable que no sea conveniente proceder de esta forma.

En ese caso, se recomienda avanzar hacia el concepto de un buque ligeramente más pequeño que el de mayor porte de la flota, aunque con mayor representatividad, expuesto en 3.1.2. En 4.5. se incorpora un criterio numérico sobre este concepto.

De esta forma, si el canal de navegación se diseña para un buque que no es el de mayor porte, a éste último se le deben requerir condiciones adicionales para navegar por el mismo (por ejemplo, un escenario hidrometeorológico más favorable, que puede traducirse en vientos o corrientes más suaves, en olas de menor altura, o en niveles de agua más altos).

Luego, los buques elegidos para representar a cada flota, deben compararse incorporando los conceptos de 3.1.3., 3.1.4. y 3.1.5.

Sobre la intensidad del tráfico (3.1.3.) en 4.2. se propone una clasificación.

La maniobrabilidad de un buque (3.1.4.) es una propiedad que se evalúa en forma cualitativa, normalmente entre buena, moderada y pobre. Depende de factores propios del buque, como los elementos para su maniobra, cantidad y configuración de hélices y palas de timón, potencia disponible en función del desplazamiento, diseño del casco, relación entre sus dimensiones, coeficiente de bloque, etc., y de su interacción con el entorno, tal como la habilidad del timonel, la visibilidad y fundamentalmente la revancha bajo la quilla disponible.

Por su parte, la peligrosidad de la carga (3.1.5.) también se evalúa con términos cualitativos como peligrosidad alta, media y baja. Esta clasificación está basada en su toxicidad para el ambiente y en su potencial facilidad para combustionar y/o explotar.

En la Tabla 5.5. de PIANC WG 30 (1997) se establece como carga de alta peligrosidad a los productos químicos, cualquiera sea su clase, al LNG y LPG, y a la gasolina para la aviación. Dentro de la peligrosidad media se incluye al petróleo crudo y derivados a granel, y dentro de la peligrosidad baja a los graneles sólidos, contenedores, carga general y de proyecto, pasajeros y rodados.

En base a estas últimas consideraciones es que, sobre el conjunto de buques elegidos, cada uno representando a una flota particular, se selecciona aquel con el que debe diseñarse el canal.

### **3.2. SEMEJANZA DE FLOTA**

Desde hace varias décadas los buques se han diseñado para transportar, de la manera más eficiente posible, un determinado tipo de carga.

Por ello es que los buques de carga general, si bien todavía existen para el transporte de cargas especiales o para visitar puertos que no tienen utilaje adecuado, han quedado parcialmente relegados por buques especializados en el transporte de una carga determinada.

Existen buques portacontenedores, petroleros, graneleros, de pasajeros, etc. Entre ellos, comparten características y estándares de diseño que los convierten en semejantes.

Por ejemplo, entre buques que integran la misma flota es de esperar un menor desvío estándar respecto a su antigüedad media, versus el mismo cálculo combinando buques de distintas flotas. La antigüedad relativamente similar entre buques que transportan el mismo tipo de carga, que a su vez compiten entre ellos para captar mayores volúmenes de la misma, con el paso del tiempo ayuda a que estos buques compartan tecnología, estándares de diseño, calidad de materiales, reglas del buen arte en la construcción naval, etc. Lo aprendido para un determinado tipo de buque se replica en otro equivalente, y así sucesivamente.

De esta forma, las relaciones entre sus dimensiones principales también son semejantes (coeficiente de bloque, eslora/manga, etc.), al igual que sus sistemas de propulsión (relación entre potencia disponible y desplazamiento, velocidad crucero, consumo de combustible, autonomía, etc.) y elementos de maniobra (diseño y cantidad de hélices y palas de timón, ayudas electrónicas a la navegación, etc.).

Por esto motivo es que, tal como se explicó en 3.1., el primer paso para seleccionar un buque de diseño para el proyecto de un canal de navegación debe ser identificar claramente cuáles son los distintos tipos de flotas que usarán el mismo, y seleccionar un buque que representa a cada una de ellas.

### **3.3. EL BUQUE DE DISEÑO “DE ESCRITORIO”**

Es habitual pensar que se pueden adoptar varios buques patrón para utilizarlos en el diseño de una determinada sección o tramo del canal.

Así, el ejemplo más clásico, es el de diseñar el ancho del canal con el buque de mayor manga, y diseñar la profundidad del canal con el buque de mayor calado, que esperamos navegue por el mismo.

Es de hacer notar que, para que el buque de mayor manga no sea simultáneamente el buque de mayor calado, generalmente debe ocurrir que pertenezcan a flotas distintas (dado que, de acuerdo al concepto de semejanza de flota descrito en 3.2., existe cierta concordia en las dimensiones de los buques que transportan el mismo tipo de carga).

Es decir que, de proceder, se adoptará la manga de un buque especializado en un tipo de carga (por ejemplo, un portacontenedores) y el calado de un buque especializado en otro tipo de carga, distinta de la anterior (por ejemplo, el de un buque tanque), o cualquier otra combinación posible.

Esta modalidad es, en principio, cuestionable, porque considera tácitamente que el diseño del ancho del canal no está vinculado con el diseño de la profundidad, y por ello estas dimensiones pueden estudiarse de forma independiente.

Sin embargo, es sabido que lo anterior no es generalizado. Por ejemplo, el squat en canales restringidos tanto por profundidad como por ancho (canales tipo "R"), el squat máximo depende del coeficiente de bloque S, dependiente de la manga. De hecho, la clasificación de los canales en "R" (restringido por ancho y por profundidad) y en "U" (restringidos solo por profundidad), depende del ancho efectivo del canal, que a su vez depende de la manga (Barrass, 2004).

Por otro lado, el cálculo de los movimientos verticales del buque inducidos por el oleaje depende, entre varios otros factores, del porte del buque (dwt). Este porte, sin dudas, depende en parte de la manga del mismo.

Tanto el squat como los movimientos verticales del buque inducidos por el oleaje son dos de los principales componentes en el cálculo de la profundidad necesaria del canal; y su cálculo está vinculado con la manga del buque.

Lo mismo ocurre con el estudio del ancho necesario del canal, que está parcialmente vinculado con la maniobrabilidad del buque en su entorno, y ésta depende fuertemente de la revancha bajo la quilla, que a su vez depende de la profundidad.

Es decir, está demostrado que el cálculo del ancho del canal no es independiente al cálculo de su profundidad, y viceversa. Entonces, ¿Cómo estudiar el ancho y la profundidad necesaria en un canal de navegación, con buques de diseño distintos?

En la resolución de este problema, el proyectista puede imaginar un buque "de escritorio", combinando características o propiedades de dos o más buques distintos, para finalmente utilizarlo como buque de diseño.

Sin embargo, USACE, PIANC y ROM se esmeran en mencionar cuales son las demás propiedades del buque de diseño que resultan importantes, además de sus dimensiones. Entre ellas, destacan sus atributos de maniobrabilidad y la peligrosidad de la carga.

Resulta imposible, entonces, determinar estas otras propiedades para el artificialmente construido buque de diseño, considerando que éste proviene de combinar buques de tipologías distintas (y, por ende, con distintos atributos de maniobrabilidad y distintas cargas transportadas, entre otros aspectos que los diferencian).

En consecuencia, la posibilidad de utilizar distintos buques para el diseño de una misma sección o tramo del canal, a juicio del autor, resulta inconveniente o bien debe realizarse con suma precaución.

### **3.4. LA ELECCIÓN DE VARIOS BUQUES DE DISEÑO**

Distinto al caso anterior resulta si, diferentes buques de diseño, incluso de flotas distintas, se utilizan para proyectar distintos tramos del canal. Sobre esta posibilidad, acuerdan USACE, PIANC y ROM, y el autor (con los comentarios del último párrafo del presente apartado).

Por ejemplo, que un buque de pobre maniobrabilidad o bien el de máxima eslora se utilice para proyectar el radio y sobreamchos de las curvas; o bien el buque con la mayor área expuesta al viento se utilice para diseñar un tramo recto en donde el viento reinante tenga una dirección transversal a la de navegación, o bien el buque de mayor calado se utilice para diseñar la profundidad del canal en un tramo donde, por su ubicación u orientación, se encuentre especialmente expuesto a la incidencia del oleaje.

Como consecuencia de esta técnica, entonces el canal de navegación estará segmentado en diferentes tramos, cada uno con anchos y profundidades calculados ad-hoc para el buque de diseño seleccionado para ese tramo en particular.

La desventaja del canal resultante puede ser, eventualmente, que habrá una sustancial variación de la tasa de sedimentación entre los distintos tramos del canal (por diferente orientación, ancho y profundidad), y por ende, esto puede afectar la regularidad de las campañas de dragado. Por ende, la autoridad del canal debe planificar adecuadamente su dragado de mantenimiento, para minimizar la posibilidad de afectaciones súbitas de los anchos y profundidades navegables.

Sin perjuicio de los anterior, el autor considera que, con excepción de casos naturalmente complejos, en la etapa del proyecto conceptual de un canal de navegación es conveniente adoptar un único buque para el diseño de la totalidad de su longitud, sin diferenciar al buque patrón por tramos o secciones.

Posteriormente, en la etapa de ingeniería de detalle, o bien en algún ajuste durante la vida útil del canal, es posible que con herramientas más sofisticadas (como un simulador de maniobra o hasta ensayos a escala real) se opte por diseñar alguna sección del canal con un buque distinto (tal como una curva muy pronunciada, el pasaje bajo un puente, etc.).

### **3.5. ¿BUQUE DE DISEÑO ACTUAL O BUQUE DE DISEÑO FUTURO?**

Nadie sabe con certeza absoluta como seguirán evolucionando las dimensiones de los buques, pero es de suponer que, con mayor o menor velocidad, seguirán creciendo. Esto se debe a que, cuanto más grande es el buque y por ende cuanto mayor es su capacidad de carga, el costo de transportar una unidad de carga a través de una unidad de distancia, disminuye.

Por supuesto que la velocidad de este crecimiento no es un tema menor. En las últimas dos décadas fuimos testigos del crecimiento en el porte de los buques portacontenedores, que más que triplicaron su capacidad, expresada en TEUs en 20 años, motivado fundamentalmente por el extraordinario desarrollo económico de la República Popular China y otros países emergentes de la región.

Algunas décadas atrás, luego de la fugaz Guerra de los Seis Días, el tráfico en el Canal de Suez se vio interrumpido por alrededor de 8 años (1967-1975). Esto motivó que el tráfico entre los países de Medio Oriente y Estados Unidos o Europa, debe realizarse a través del sur de África,



incrementando sustancialmente los tiempos de navegación. Eso despertó el gigantismo naval fundamentalmente en los buques tanque.

Sin hechos disruptivos tan notorios como los anteriores, en otros tipos de buques el crecimiento en su porte fue más lento.

La autoridad portuaria o del canal debe aprender a gestionar estos cambios. Ante ello, surge la evidente pregunta si, al proyectar un canal de navegación, debemos hacerlo adoptando un buque de diseño que refleja las dimensiones actuales de los mismos, o debemos pensar en un buque de diseño que refleje las dimensiones de la flota sobre el final de la vida útil del canal.

De acuerdo a USACE, "...el buque o los buques de diseño se seleccionan sobre la base de estudios económicos de la flota de buques que se espera que utilice el canal de navegación a proyectar, durante la vida del mismo...".

Está claro que esta discusión, que puede parecer puramente técnica, es en verdad técnica y económica. Si se admite que el porte de los buques, más rápido o más despacio según la circunstancia, crece con el tiempo, entonces un canal proyectado con "el buque de diseño del futuro" será más grande y más costoso que un canal proyectado con el buque de diseño actual, tanto que quizás resulte económicamente inviable.

A juicio del autor, y como respuesta general a este interrogante, el buque de diseño que se debe utilizar para el proyecto de un canal de navegación es el que se espera recibir luego de habilitar la navegación por el mismo. De esta manera, se estará limitando la inversión inicial a costa de posibles adaptaciones en el futuro, en la medida que el crecimiento en el porte de los buques sea notorio.

Por supuesto que el buque de diseño que se espera recibir al momento habilitar la navegación en el canal no necesariamente es el mismo que aquel existente, o esperable, al momento de proyectar el mismo. Por ello, es que es aconsejable realizar una proyección de corto plazo (generalmente, del orden de 5 años para cubrir las fases de proyecto y construcción del canal) que puede satisfacerse con un estudio que incluya las tendencias del mercado del shipping y las órdenes de construcción de buques en los principales astilleros del mundo. Estos estudios, al ser de corto plazo, suelen ser razonablemente seguros.

Para que lo expresado en los párrafos anteriores confirme su validez, se debe responder la siguiente pregunta: ¿Es posible adaptar las dimensiones del canal, con medios y recursos razonables, durante el transcurso de su vida útil? Si la respuesta es afirmativa, entonces existe una elevada probabilidad que resulte conveniente adoptar el buque de diseño esperable al momento de comenzar la vida útil del canal, y no aquel esperable al final de la misma.

Si por alguna circunstancia propia del proyecto, se juzga que la adaptación de las dimensiones del canal durante el transcurso de su vida útil no puede realizarse con medios y recursos razonables, entonces es probable que sea conveniente proyectar el canal con el buque de diseño del futuro. Por supuesto que en este caso los estudios sobre el crecimiento de los buques tendrán un margen de error elevado, y por ende las dimensiones del canal de navegación resultante tendrán un alto riesgo de, o bien convertirse en insuficientes en algún momento de su vida útil, o bien resultar exageradas durante toda la vida útil. Ambos son problemas serios.

Se está entonces ante la clasificación de un canal de navegación con dimensiones "flexibles" o con dimensiones "rígidas".

Si bien cada caso tiene sus particularidades, en un canal navegable la eventual rigidez puede tener que ver con alguno de los siguientes aspectos:

- Si se tratara de un canal navegable construido inicialmente sobre sectores con presencia de rocas, en cuyo dragado de apertura se movilizaron equipos de gran porte que no suelen estar presentes en la región y tienen un elevado costo de traslado.
- Si se tratara de un canal navegable para cuya construcción inicial se obtuvo una financiación ventajosa, suficiente para construirlo en sus dimensiones máximas, en una jurisdicción donde se considere que el acceso al crédito es limitado o interrumpido con frecuencia, por motivos ajenos y no controlables por la autoridad portuaria o del canal.
- Condiciones de borde vinculadas al posible uso del canal de navegación que se pretende diseñar, por buques de mayor porte provenientes de otros puertos aledaños (uso compartido de canales).

Un elemento adicional a tener en cuenta al sopesar esta decisión, tiene que ver con el costo anual del mantenimiento del canal, en función de la tasa de sedimentación prevista. Un canal diseñado con una excesiva visión de futuro, en un emplazamiento expuesto a una elevada tasa de sedimentación, puede resultar en dimensiones insostenibles de mantener a largo plazo.

### **3.6. LA DIMENSION COMPARATIVA DEL BUQUE DE DISEÑO**

Tal cual lo dicho en 3.1. y 3.2., la semejanza de flota insta a estudiar en forma independiente cada una de las flotas que utilizarán un canal, y seleccionar un buque que sea representativo de cada una de ellas.

De esos buques, se deben conocer sus dimensiones más representativas (eslora, manga, puntal, calado, calado aéreo) y los indicadores de su porte (desplazamiento, toneladas de porte bruto o neto).

De una primera aproximación, es sabido que entre los buques que integran la misma flota, los atributos de maniobrabilidad se comparten, que la variación respecto a la antigüedad media es relativamente baja, y que existe cierta afinidad en las principales relaciones entre sus dimensiones (por ejemplo, eslora/manga o manga/calado). Por otro lado, por definición, la peligrosidad de la carga es idéntica en todos los buques que componen la misma flota, y, en consecuencia, al compararse entre ellos deja de ser un criterio válido.

Ahora bien, el problema radica en que se debe seleccionar una dimensión o un parámetro que permita comparar los buques entre ellos, aun siendo de la misma flota, e identificar cuáles y cuantos son los buques que ostentan los mayores valores para esa dimensión o parámetro.

¿Qué dimensión elegir como representativa del buque? A continuación, se expone sobre los principales aspectos a tener en cuenta para elegir correctamente.

En el caso general, se admite que se selecciona un único buque patrón para el diseño de la totalidad del canal de navegación, y que no hay distinción de tramos o secciones. Una de las primeras cuestiones a analizar es si canal de navegación estará fundamentalmente conformado por tramos rectos, o tendrá una predominancia de curvas, tal como un canal sinuoso que de desarrolla a lo largo de un curso fluvial.

Si se trata de un canal conformado fundamentalmente por tramos rectos, entonces muy posiblemente se deba elegir entre la manga y el calado como dimensiones más importantes. En cambio, si se trata de un canal sinuoso, con curvas muy próximas, la eslora será determinante.

De encontrarnos en el primer caso, debiendo elegir como dimensión comparativa la manga o el calado, no significa que el dato de la eslora deba descartarse. Significa que se seleccionará el

buque de diseño a partir de la manga o el calado, y una vez hecho, la eslora de ese buque de diseño será utilizada para el diseño de las curvas del canal.

Lo mismo ocurre en el caso opuesto. De decidirse por la eslora para seleccionar al buque de diseño, una vez hecho, se utilizarán la manga y el calado del buque elegido para dimensionar la sección transversal del canal.

En el primer caso, el cálculo de los radios de curvatura será realizado en condiciones de debilidad, priorizando los tramos rectos. En el segundo, lo contrario. Si las diferencias fueran irreconciliables, queda la opción mencionada en 3.4., es decir elegirse distintos buques de diseño para distintos tramos del canal, aun en instancias de proyecto conceptual.

Definida la traza de un canal, y enfocándose en los tramos rectos, el proyecto de un canal de navegación obliga a dimensionar el ancho de solera, la profundidad nominal de la solera, el nivel de referencia a partir del cual se computa la profundidad nominal de la solera, y la pendiente de los taludes. A estos fines, las dimensiones del buque que importan son básicamente la manga y el calado. ¿Cuál de estas dimensiones se debe elegir para comparar los buques que componen una misma flota?

Parte de la respuesta debe hallarse en las condiciones hidrometeorológicas más frecuentes en el canal. Puntualmente en los vientos reinantes, las corrientes habituales en la zona, y el clima de olas. Generalmente, los vientos y las corrientes tienen una mayor influencia sobre el ancho del canal, especialmente de ser transversales, en cambio el oleaje tiene una mayor incidencia sobre la profundidad, por los movimientos verticales que induce en los buques.

Por ende, en ambientes donde los vientos reinantes o las corrientes habituales sean en alguna medida consideradas determinantes, un mayor ancho de canal será requerido, y eso promueve que la dimensión elegida para comparar los buques entre ellos sea la manga.

Por otro lado, en aquellos ambientes donde la mayor problemática radique en el clima de olas, es muy posible que eso genere mayores revanchas bajo la quilla, es decir, mayor profundidad nominal de la solera. Por ende, en tal circunstancia, elegir al calado de los buques como la dimensión comparativa quizás resulte la mejor opción.

Otra parte de la respuesta debemos hallarla en el tipo de flota que estamos analizando. Una clasificación usual de los buques es entre buques que transportan cargas de alta densidad (o “pesados”) y buques que transportan cargas de baja densidad (“livianos” o “voluminosos”). Entre los primeros están los buques de los graneleros, mineraleros, y los buques tanque. Entre los segundos, están los portacontenedores, los RoRo o car carriers, los ferrys o cruceros, y los gaseros.

En los primeros, el calado prevalece por sobre el francobordo, y la cubierta principal del buque suele estar libre de carga estibada sobre la misma. En los segundos, o bien el francobordo prevalece sobre el calado, como un buque de pasajeros, o bien se estiba mucha carga sobre la cubierta principal del buque, como en un buque portacontenedores.

Por ende, los buques “pesados” suelen ser más vulnerables por su calado, requiriendo más profundidad, y los buques “livianos” suelen ser más vulnerables por su área expuesta al viento, donde se generan fuerzas horizontales que normalmente demandan mayor ancho del canal, interponiendo a la manga como dimensión comparativa más conveniente.

Como caso particular, en aquellas secciones del canal que puedan ser atravesadas por un puente, o que ya lo están al momento de proyectar el canal de navegación, el calado aéreo de

los buques también debe ser considerada como una dimensión posible para seleccionar el buque de diseño.

Si no hubiera respuestas tan claras como los casos propuestos en los párrafos anteriores, y los escenarios sean más diversos, la comparación de los buques por su porte (generalmente por su desplazamiento o por sus toneladas de porte bruto) resulta una opción admisible. Por supuesto que luego de elegir al buque de diseño por su porte, se debe traducir el mismo en eslora, manga y calado, a los fines del dimensionamiento del canal, y para ello se debe elegir un buque patrón que lo haga con razonabilidad y dentro de los estándares que representan a la flota, descartando los buques atípicos.

#### 4. PROCEDIMIENTO PRÁCTICO-CONCEPTUAL ORDENADO PARA LA SELECCIÓN DE UN BUQUE DE DISEÑO.

El siguiente procedimiento requiere, para ser utilizado correctamente, disponer de la lista de buques que navega o se espera que navegue por el canal de navegación a proyectar. Esta lista debe incluir las principales dimensiones de los buques, tal cual lo citado en 3.6.

Es evidente entonces que su aplicación es directa en casos en los que se busca adaptar o confirmar las dimensiones de un canal de navegación existente ante variaciones en el porte de los buques (variaciones que pueden estar en curso, o ya efectivamente comprobadas).

En caso de tratarse de un proyecto nuevo, la aplicación del procedimiento es parcialmente indirecta, aunque varios de sus argumentos son igualmente válidos.

Por otro lado, el procedimiento contempla que la totalidad del canal de navegación se proyecta con un único buque de diseño, dado que se limita a la etapa de proyecto conceptual. En tal sentido, se interpreta que las eventuales diferenciaciones en el buque de diseño para distintos tramos del canal quedan relegadas exclusivamente a la etapa de proyecto ejecutivo o de detalle.

Con estas consideraciones, se propone la siguiente secuencia de tareas:

**4.1.** Identificar las distintas flotas de buques, diferenciándolas por carga transportada, que utilizan o utilizarán el canal de navegación.

**4.2.** Descartar del estudio aquellas flotas que tengan escasa participación en el total de buques que naveguen o vayan a navegar por el canal (se propone descartar flotas con el 10 % de participación o menos).

Luego, se propone establecer la siguiente clasificación para la participación en el tráfico global del canal:

- Tienen una participación **baja** aquellas flotas que integran el total de los buques usuarios del canal con un valor superior al 10 %, y menor o igual al 40 %.

- Tienen una participación **media** aquellas flotas que integran el total de los buques usuarios del canal con un valor superior al 40 %, y menor o igual al 70 %.

- Tienen una participación **alta** aquellas flotas que integran el total de los buques usuarios del canal con un valor superior al 70 %, y menor o igual al 100 %.

**4.3.** Identificadas, seleccionadas y establecida la participación de las flotas que integrarán el estudio, en una primera etapa trabajar sobre cada una de ellas en forma independiente, de la siguiente forma.

**4.4.** Incorporando el análisis de 3.6., seleccionar una dimensión o un indicador del porte que sirva para comparar a todos los buques que integran la flota. Una vez hecho, ordenar los buques desde aquel con el mayor valor de esta dimensión, o el de mayor porte, hasta aquel de menor valor de esta dimensión, o el de menor porte.

**4.5.** Incorporando el análisis de 3.1., seleccionar el buque de diseño que represente a flota en cuestión, debiendo optar entre el buque de mayor porte (o el de mayor dimensión comparativa) o uno ligeramente más pequeño con mayor representatividad (criterios 3.1.1. o 3.1.2.)

Salvo excepciones debidamente justificadas (por ejemplo, que el buque de mayor dimensión comparativa tenga a su vez una representatividad considerable dentro del total de los buques de la flota), a los fines de reducir la inversión en la construcción del canal, y hacerlo económicamente más viable, es buena práctica incursionar en el criterio de un buque más representativo (3.1.2.)

En tal caso, para asegurarse que la diferencia en el porte sea apreciable, más no exagerada, el autor recomienda que la probabilidad de excedencia de la dimensión comparativa no supere el 5 %. El equipo de proyecto debe definir la función de distribución de probabilidad que mejor se ajusta al evento.

**4.6.** Manteniendo el criterio del buque ligeramente más pequeño, pero con mayor representatividad (3.1.2.), se debe reflexionar acerca de las posibles restricciones a requerirle a los buques de mayor porte que éste. Dado que estas restricciones generalmente son de orden hidrometeorológico, en esos buques se incrementará el tiempo de espera medio en la rada de fondeo (para ingresar al puerto) o en el muelle (para salir del puerto). Estas esperas adicionales, de ser prolongadas, pueden afectar severamente el nivel del servicio que el armador del buque perciba sobre el puerto y desencadenar, en el extremo, en la discontinuidad o interrupción del arribo del buque.

En tal sentido, el hecho de proceder tal cual 3.1.2. es válido en la medida que se evalúen las consecuencias para los buques de mayor porte, y éstas se mantengan administradas (es decir, factibles de asumir por estos).

**4.7.** Incorporando el análisis de 3.5., determinar si el canal de navegación bajo estudio debe percibirse como de “dimensiones flexibles” o de “dimensiones rígidas”.

En el primer caso, sobre la flota bajo análisis, realizar un estudio de mercado para estudiar el posible crecimiento en el porte de los mismos con un horizonte de corto plazo (se recomienda 5 años). En el caso de no estar transitando por un evento disruptivo que modifique a un ritmo muy acelerado las dimensiones de los buques, es posible seguir trabajando con este buque.

De tratarse de una canal de “dimensiones rígidas”, el análisis de mercado debe realizarse sobre un horizonte mayor, que bien puede alcanzar el final de la vida útil económica del proyecto, o por lo menos una parte importante de ésta, pensando en una única actualización de las dimensiones del canal durante su servicio. En este caso, el buque de diseño actual seleccionado con el procedimiento descrito desde 4.1. hasta 4.6., debe ser obligadamente comparado con los posibles buques del futuro. Si las diferencias fueran significativas, no hay duda que el canal debe ser diseñado con éstos últimos, asumiendo márgenes de incertidumbre elevados.

**4.8.** Luego de 4.7., cada flota identificada y seleccionada tendrá entonces un buque de diseño que la representa, el de mayor porte o uno más representativo, el actual o el futuro.

Se recomienda mantener la uniformidad de criterio al analizar las distintas flotas. En particular, de haber elegido por la representatividad en una de ellas, se sugiere hacerlo en el resto. Lo

mismo con las proyecciones del porte de los buques a corto, mediano o largo plazo, vinculado a la flexibilidad o la eventual rigidez de las dimensiones del canal de navegación.

El porte de cada uno de estos buques debe clasificarse en mayor, medio o menor. Para ello, bien puede usarse la dimensión comparativa elegida según 3.6., o bien un indicador global de su porte como es su desplazamiento o su peso muerto.

Para esta clasificación, no importa tanto el tamaño absoluto de cada buque, sino más bien el relativo al compararse con los otros buques seleccionados.

De haber dos buques, deben clasificarse como mayor y medio en caso que la diferencia entre sus portes sea apreciable, pero no significativa, y clasificarse como mayor y menor en caso que la diferencia entre sus portes efectivamente sea significativa. En cambio, si hubiera tres buques representantes de tres flotas distintas, emplear las tres opciones de clasificación, mayor, medio y menor, según el tamaño de cada uno.

**4.9.** Luego, incorporando los conceptos de participación de flota, atributos de maniobrabilidad y peligrosidad de la carga, es necesario comparar los buques entre ellos, considerando también la clasificación del porte.

Es decir que resulta necesario comparar estas 4 propiedades de los buques representantes de cada flota, para finalmente elegir cuál de ellos se utilizará para el diseño del canal.

Para ello, se ha pensado en un esquema simple de 3 matrices de 9 celdas, que combinen los aspectos enunciados, otorgando finalmente un orden de prioridad para tal elección.

La primera matriz es la de apreciación del riesgo. Este concepto tiene en cuenta la probabilidad de que ocurra un hecho indeseado (en nuestro caso una pérdida repentina e ingobernable de la maniobra del buque, una varadura, un daño al casco, una colisión contra otro buque, contra una boya o contra una estructura de atraque, etc.) y las potenciales consecuencias negativas en caso de producirse (contaminación ambiental por derrame de la carga, o bien la posibilidad de cierre del canal de navegación por un buque varado sobre su traza).

Esta matriz se integra de la participación de la flota (indicador cuantitativo de la probabilidad de ocurrencia de un hecho indeseado con un buque de esa tipología) y de la peligrosidad de la carga (indicador cualitativo de las potenciales consecuencias negativas en caso de producirse).

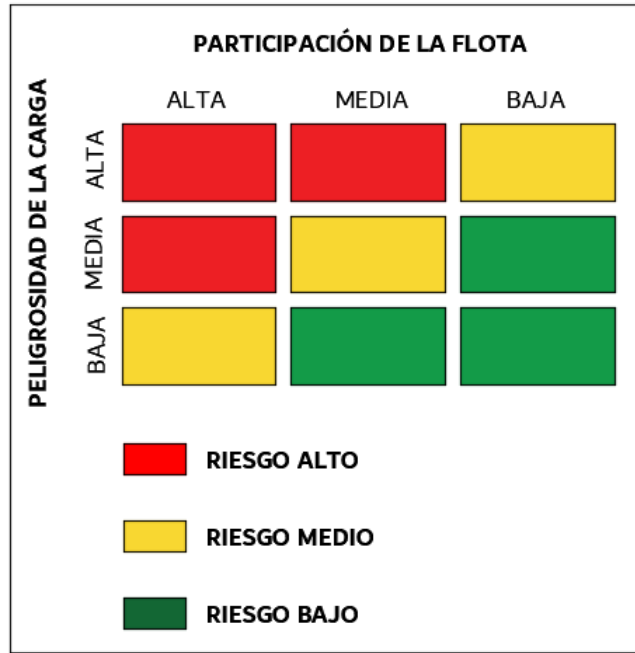
De esta matriz se clasifica el riesgo en alto, medio o bajo, según corresponda.

La segunda matriz es la de apreciación de la vulnerabilidad del buque en el canal. Este concepto tiene en cuenta la magnitud de los márgenes de seguridad existentes, entre el buque y el canal por el que navega. Cuando la vulnerabilidad es alta, los márgenes de seguridad se corresponden con los mínimos admisibles por el estándar de diseño. Cuando la vulnerabilidad es baja, los márgenes de seguridad tienden a ser los máximos.

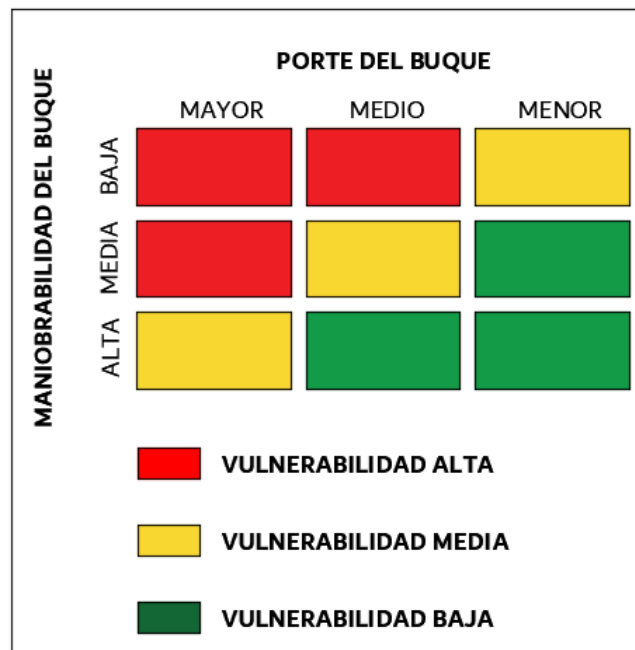
Esta matriz se integra por un lado con el porte del buque (de acuerdo a la clasificación de mayor, medio o menor) y por otro lado con sus atributos de maniobrabilidad (de acuerdo a la clasificación de alta, media o pobre).

De esta matriz se clasifica la vulnerabilidad en alta, media o baja, según corresponda.

Por último, la tercera matriz es aquella que, combinando las dos anteriores, devuelve el orden de prioridad con el cual elegir al buque de diseño.



Matriz N° 1. Apreciación del Riesgo.



Matriz N° 2. Apreciación de la Vulnerabilidad.

		RIESGO		
		ALTO	MEDIO	BAJO
VULNERABILIDAD	ALTA			
	MEDIA			
	BAJA			

	<b>ORDEN DE PRIORIDAD N° 1</b>
	<b>ORDEN DE PRIORIDAD N° 2</b>
	<b>ORDEN DE PRIORIDAD N° 3</b>

Matriz N° 3. Orden de Prioridad.

**4.10.** Finalmente, se propone elegir como buque de diseño aquel con primer orden de prioridad, dado que combina en las posibilidades más desfavorables la apreciación del riesgo y de la vulnerabilidad.

Sin embargo, no se descarta que se pueda seleccionar para el proyecto del canal un buque con otro orden de prioridad, con razones debidamente justificadas y propias del caso particular que se estudia, a criterio del equipo de proyecto.

Por ejemplo, que el buque que representa a una de las flotas que forman parte del estudio, tenga un porte sustancialmente mayor al de los buques que representan al resto de las flotas, y aun contando éste con buenos atributos de maniobrabilidad y transportando una carga de baja peligrosidad, su porte es tal que por defecto lo convierte en el buque mas vulnerable. En ese caso, se tratará de una decisión intuitiva, basada en datos inexpugnables, que por su dimensión predominarán por sobre el resultado del procedimiento presentado anteriormente.

## 5. CONCLUSIONES

Se ha señalado que la elección del buque de diseño es un tema muy relevante en el proyecto de canales de navegación y áreas de flotación asociadas, y que, pese a su reconocida importancia, no se encuentra suficientemente representado en la bibliografía internacional más divulgada en la materia.

La elección de un buque de diseño es una decisión muy compleja, dado que involucra diversos aspectos que no solo están referidos a las dimensiones de los buques, sino a su interacción con el entorno, el tipo de carga que transportan, sus atributos de maniobrabilidad, la participación en el tráfico del canal, etc. Por otro lado, la vida útil técnica y económica de un canal de navegación, en general supera la velocidad con la que se producen cambios en el diseño de los buques, interponiendo la necesidad de readecuar la infraestructura a las demandas cambiantes.

Es por ello, que la elección del buque de diseño no debe ser una decisión puramente intuitiva. Se debe contar con un procedimiento ordenado que brinde un marco más preciso para tal elección.



Para ello, el autor ha esbozado una primera propuesta. Seguidamente evaluará algunos estudios de caso que permitan validar el método, o bien modificarlo o ampliarlo.

Se propone que organizaciones como PIANC, ROM o USACE conformen grupos de trabajo que desarrollen bibliografía exclusiva sobre el tema, como complemento a los reportes principales que se ocupan del diseño de canales de navegación.

## **6. REFERENCIAS**

- Reporte 121 “HARBOUR APPROACH CHANNELS DESIGN GUIDELINES” (PIANC, 2014).
- Reporte “HYDRAULIC DESIGN OF DEEP-DRAFT NAVIGATION PROJECTS” (USACE, 2006).
- Reporte “PROYECTO DE LA CONFIGURACION MARITIMA DE LOS PUERTOS; CANALES DE ACCESO Y AREAS DE FLOTACION” (ROM, 1999).