
PUENTES SOBRE VÍAS NAVEGABLES. ¿UNA COMBINACIÓN PELIGROSA SIN SOLUCIÓN?

♦ R E S U M E N ♦

Cualquier estructura en aguas navegables constituye un peligro para la navegación y es vulnerable a daños o destrucción en caso de colisión con un buque. Las colisiones de buques contra puentes, si bien es cierto no son comunes, representan serias amenazas a nivel mundial para la seguridad marítima, el medio ambiente marino, la infraestructura portuaria, las redes logísticas y la vida humana. Por lo anterior, la importancia de la gestión de este tipo de riesgo.

Palabras clave: Seguridad Marítima, colisiones, puentes, IALA.

BRIDGES OVER WATERWAYS: A DANGEROUS COMBINATION WITH NO SOLUTION?

♦ A B S T R A C T ♦

Any structure in navigable waters represents a hazard to navigation and is susceptible to damage or destruction in the event of a ship colliding with them. While ship collisions with bridges are relatively rare, they represent serious dangers to maritime safety, the marine environment, port infrastructure, logistics networks, and loss of life. For this reason, the importance of managing this type of risk.

Keywords: Maritime safety, collisions, bridges, IALA.



JAMES CRAWFORD CRAWFORD

Capitán de navío LT

Master of Science in Maritime Affairs (WMU, Sweden)

(jamcrawf@icloud.com)

Valparaíso, Chile.

Durante los últimos años, se han construido una serie de impresionantes puentes sobre rutas navegables de alto tráfico en varias partes del mundo, como son el puente Hong Kong - Zhuhai - Macao (China), el Vasco da Gama (Lisboa), el puente de Incheon (Corea del Sur), el puente Donghai (China) y el Canakkale (Turquía), entre otros. Asimismo, se han generado una serie de accidentes marítimos, que demuestran que la colisión de un buque contra un puente puede provocar profundas perturbaciones al tráfico marítimo y terrestre, e impactos económicos significativos en sistemas logísticos locales e internacionales.

Lo anterior demuestra que la construcción de un puente sobre una vía navegable incorporará nuevos desafíos, los que podrían hacerla más compleja y de esa forma, aumentar la probabilidad de ocurrencia de accidentes marítimos, ya sea por colisiones, varadas, abordajes, etc. De ahí que el diseño de un puente sobre una ruta de navegación debe considerar una serie de condiciones previas a su

construcción que permitan disminuir los factores de riesgo que se puedan generar ante eventuales errores en la navegación y/o fallas mecánicas que se puedan producir a bordo de los buques.

Los accidentes catastróficos en puentes no son comunes, pero el número y la gravedad de estos causados por colisiones de buques superan con creces los causados por el viento, las olas y los terremotos combinados. En los últimos 64 años, más de 30 colisiones de buques contra puentes erigidos sobre rutas marítimas han generado importantes pérdidas económicas debido al cierre de vías navegables, interrupción de vías de comunicación, reparación, etc. y, lo más importante, la pérdida de más de 340 vidas humanas.

Para el análisis del tema se ha considerado información genérica respecto de las colisiones de buques contra puentes, para posteriormente, enunciar algunos de los aspectos de seguridad que debiesen considerarse para la construcción de



Puente Canakkale, Turquía.
(Fuente: Wikimedia Commons).

puentes sobre vías navegables, aspectos generales de la ruta de navegación que debiesen ser considerados previos a la construcción de este tipo de estructuras sobre vías navegables y otros aspectos de seguridad.

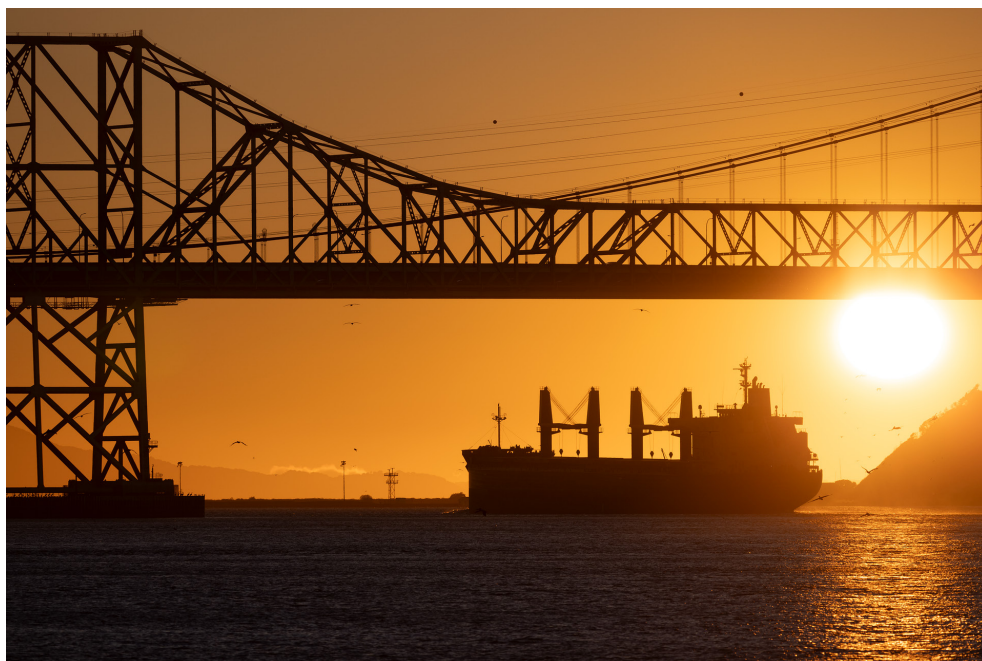
Respecto de las colisiones

La incidencia mundial de accidentes graves que consideran buques y puentes, entendiéndose como grave la destrucción total o parcial de los puentes y la pérdida de vidas humanas, aumentó de 0,5 en 1960 - 1970 a 1,5 en 1971 - 1982 y disminuyó a 1,3 en el periodo comprendido entre los años 1983 al 2024. No obstante lo anterior, al respecto cabe señalar que solo en los primeros 4 meses del año 2024 ya se registraron 3 accidentes graves de este tipo en diferentes partes del mundo.

En las últimas décadas, las dimensiones de los buques han aumentado a pasos agigantados, solamente limitadas por los anchos y profundidades de las rutas

de navegación. Los buques de grandes dimensiones, completamente cargados con muy poco espacio libre bajo su quilla, pueden ser más susceptibles a pérdidas de control, representando la fuerza de impacto más alta posible a la cual se pueden ver sometidas las estructuras de los puentes. Por otro lado, debe considerarse que los buques que navegan en lastre o los buques porta contenedores, son particularmente sensibles al viento, lo que también puede favorecer a que estos se salgan de su track de navegación y generen condiciones de riesgos a infraestructuras cercanas a las rutas habilitadas.

Conforme a datos estadísticos, los 3 accidentes que han involucrado puentes y buques, y que han generado la mayor cantidad de pérdida de vidas humanas, han sido las ocurridas en el río Volga (Rusia) el año 1983, que cobró la vida de 176 personas, en circunstancias que un tren de carga cayó sobre un crucero que se estrelló contra un puente ferroviario; la ocurrida el año 1983 en Alabama (USA) en la cual murieron 47 personas producto de la colisión de una barcaza contra una



Buque mercante navegando.
(Fuente: Wikimedia Commons).

Puentes sobre vías navegables, ¿Una combinación peligrosa sin solución?

J. Crawford

de las estructuras soportantes de un puente instalado sobre el "Big Bayou", que generó la caída y posterior incendio de un tren rápido de pasajeros; y los accidentes ocurridos en la bahía de Tampa, Florida (USA) el año 1980, el primero ocurrido el día 28 de enero, en el que un buque boyero colisionó con un petrolero, provocando el hundimiento del buque boyero y la pérdida de 23 tripulantes, y el segundo, que se produjo en la mañana del 9 de mayo de 1980, cuando un buque de carga chocó con un muelle de apoyo cerca del centro del puente, lo que provocó la muerte de 35 personas, producto de la caída de varios vehículos a las aguas de la bahía.

Aspectos de seguridad a considerar para la construcción de puentes sobre vías navegables

La vulnerabilidad de un puente a la colisión con un buque se puede ver condicionada por una serie de factores tales como, la forma de la vía de navegación, las variaciones en el nivel del agua, la velocidad de las corrientes, y el clima. Otros factores asociados a las naves, tales como su forma de navegación, dimensiones, velocidad, carga, forma de estiba de la misma, procedimientos, etc., también influyen. Por otro lado, la estructura del puente, su tamaño, ubicación, resistencia al impacto, redundancia y sistemas de protección son importantes al momento de evaluar su nivel de riesgo.

Las colisiones de buques contra puentes son eventos extremos con muchas incertidumbres, sobre todo en cuanto a las cargas de impacto involucradas; su consideración en los parámetros de diseño podría ser demasiado cautelosa o costosa. De lo anterior, la importancia de definir y determinar el nivel de riesgo aceptado.

El concepto de diseño ampliamente aceptado es reducir (de manera rentable) el riesgo de error catastrófico de una parte

del puente y, al mismo tiempo, disminuir el riesgo de daños a los buques y al medio ambiente por la contaminación generada. Vale decir que, lo que se debe buscar, es la capacidad de resistencia "adecuada" ante choques con buques y otros tipos de naves.

Las fuerzas de impacto dependen de la energía cinética disponible del buque y del intervalo de tiempo durante el cual se produce la colisión. De esta forma, la energía cinética de un buque varía con el calado del buque y su velocidad. Para los buques con poco calado, la mayor parte de esta energía se disipa en un impacto grande. La duración del impacto depende de la rigidez y deformación, tanto del buque como de la estructura del puente. Cuanto más largo sea este intervalo, menor será la fuerza máxima de impacto.

La ubicación de estructuras sobre vías navegables debe realizarse en función de una serie de consideraciones, tales como el impacto medioambiental, el derecho de paso, los costos, la geometría de la ruta y consideraciones políticas/comerciales. Estas podrían organizarse en al menos las siguientes cinco áreas: selección del emplazamiento del puente; selección del tipo, configuración y trazado del puente; altura libre horizontal y vertical; vanos de aproximación y sistemas de protección.

Respecto de la selección del emplazamiento del puente, los expertos sugieren seguir las siguientes directrices, en la medida de lo posible:

- Los puentes deben estar situados lejos de las curvas del canal de navegación.
- La distancia al puente debe ser tal que los buques puedan enfilarse (o alinearse) antes de pasar el puente, normalmente al menos ocho veces la eslora (largo) del buque. Es preferible una distancia aún mayor cuando sea probable que se produzcan corrientes y vientos fuertes en el lugar.
- Los puentes deben diseñarse de forma que crucen el canal de navegación en ángulo recto y deben ser simétricos con respecto al canal.

- Debe existir una distancia adecuada entre las ubicaciones de los puentes y las zonas con navegación congestionada, instalaciones portuarias, maniobras de atraque de buques u otros problemas de navegación.
- Son preferibles las ubicaciones en las que la vía navegable sea poco profunda o estrecha, de modo que los pilares del puente puedan situarse fuera del alcance de los buques.

Respecto de la selección del tipo de emplazamiento del puente, en la medida de lo posible, deberían seguirse las siguientes directrices:

- La selección del tipo y la configuración del cruce de un puente debe tener en cuenta las características de la vía navegable y el tráfico de embarcaciones, de modo que el puente no suponga un peligro innecesario para la navegación.
- El trazado del puente debe maximizar los espacios libres horizontales y

verticales para la navegación, y los pilares del puente deben situarse lejos del alcance de los buques.

- La configuración y el trazado óptimos para los distintos tipos de puentes y grados de protección es un proceso iterativo en el que se deben considerar los costos que conlleva la reducción del riesgo, incluidos los aspectos políticos, sociales y ambientales.

Respecto de la selección de la altura libre horizontal y vertical, en la medida de lo posible, deberían aplicarse las siguientes consideraciones:

- La separación horizontal del vano de navegación puede tener un impacto significativo en el riesgo de colisión de buques con los pilares principales. El análisis de accidentes de colisión ocurridos en el pasado ha demostrado que los puentes con un vano principal inferior a dos o tres veces la longitud de diseño del buque o inferior a dos veces la anchura del canal son especialmente vulnerables a la colisión de buques.



Puente Hong Kong Zhuhai, Macao, China.
(Fuente: Wikimedia Commons).

Puentes sobre vías navegables. ¿Una combinación peligrosa sin solución?

J. Crawford

- La separación vertical prevista en el vano de navegación suele basarse en la embarcación más alta que utiliza la vía navegable con lastre y durante los periodos de alta marea.
- Los requisitos de espacio vertical deben tener en cuenta los datos específicos del lugar sobre los buques reales y previstos, y deben coordinarse con la respectiva autoridad marítima.

Respecto de la selección de los vanos de aproximación, en la medida de lo posible, deberían seguirse las siguientes directrices:

La planificación inicial del trazado del puente también debe tener en cuenta la vulnerabilidad de los vanos de aproximación a la colisión de buques. Las colisiones históricas de buques han demostrado que los vanos de aproximación a los puentes resultaron dañados en más del 60% del total de accidentes. Por lo tanto, debe minimizarse el número de pilas de aproximación expuestas a la colisión de buques, y también deben aplicarse consideraciones de espacio libre horizontal y vertical a los vanos de aproximación.

Finalmente, respecto de los sistemas de protección y/o mitigación, en la medida de lo posible, deberían seguirse las siguientes directrices:

Las alternativas de protección de puentes deben ser consideradas durante la fase inicial de planificación, ya que el costo de los sistemas de protección de puentes puede ser una porción significativa del costo total de los mismos. Por lo anterior, para mitigar las consecuencias del impacto de los buques y proteger los pilares del puente se pueden considerar varios métodos. Estos métodos pueden dividirse en dos teniendo en cuenta el tamaño del buque. Los métodos utilizados para buques pequeños y medianos de eslora inferior a 100 Mts. y velocidades reducidas durante el paso son los siguientes: guías, defensas guía, y "dolphins". Las protecciones de los puentes para los grandes buques de eslora superior a 100 Mts. y velocidad marítima podrían dividirse de la siguiente manera: "dolphins" y grupos de "dolphins",

islas artificiales, cables de acero anclados, pontones flotantes, etc. El uso de uno u otro método dependerá también de la profundidad a la que se encuentren los pilares del puente. Las islas artificiales son más fiables, pero pueden situarse a menos de 20 Mts. de profundidad.

La elección de los sistemas deberá realizarse en base a las características específicas del lugar y dependerá del análisis de varios factores, los que básicamente se podrían clasificar en tres grupos: naval, externo y ambiental. Los problemas críticos en las colisiones entre puentes de buques se encuentran en todos estos grupos: buque o cualificaciones profesionales, formación y experiencia del piloto y capitán o equipo de navegación a bordo o inspección y mantenimiento de los instrumentos, comunicaciones, navegación y equipos técnicos críticos del buque, entre otros.

Aspectos de la ruta a considerar para la construcción de puentes sobre vías navegables

La construcción de puentes sobre vías navegables, además de las condiciones anteriormente señaladas, debe considerar las características de la vía navegable en las proximidades del emplazamiento del puente, tales como el ancho y profundidad del canal de navegación, la velocidad y dirección de la corriente, la alineación y sección transversal del canal, la elevación del agua y las condiciones hidráulicas, que tienen una gran influencia en el riesgo de colisión de embarcaciones y deben tenerse en cuenta.

Por ejemplo, el trazado y geometría del canal deberán considerarse en la delimitación de las condiciones de navegación de las naves, la eslora máxima de las mismas, como, asimismo, sus condiciones de carga y velocidad límites. La presencia de curvas e intersecciones con otras vías navegables en las proximidades del puente aumentan

la probabilidad de que se pueda perder el control sobre la derrota de las naves. Asimismo, la navegación de remolques de barcasas río abajo a través de las curvas se vuelve una faena especialmente compleja. También debe prestársele atención a la profundidad del agua del canal o ruta, puesto que esta limitará la eslora y el calado de los buques que transitarán por la vía navegable. Además, la profundidad útil del canal juega un papel crítico en la accesibilidad de los buques a los muelles fuera de la ruta de navegación principal. La condición de la marea y la profundidad de la ruta, junto con las condiciones de carga de los buques, influirá también en el lugar del puente donde se apliquen las cargas de impacto de los buques y en la susceptibilidad de la estructura a los golpes de estos. Las corrientes de la columna de agua próximas a los puentes, sin duda que pueden tener un efecto significativo en la navegación y en la probabilidad de colisión de las naves. Por lo anterior, las magnitudes de las corrientes de diseño utilizadas, deberán ser los valores extremos detectados y no los valores medios anuales.

Otros aspectos de seguridad a considerar para la construcción de puentes sobre vías navegables

Los componentes de los puentes expuestos a la colisión de buques pueden estar sometidos a una amplia gama de cargas de impacto. Debido a limitaciones económicas y estructurales, puede ser que el diseño de estos frente a su colisión por buques, no se base en el peor de los casos, y lo considere como un nivel de riesgo aceptable. Los criterios de aceptación del riesgo deberán tener en cuenta tanto la probabilidad de que se produzca una colisión con un buque como las consecuencias de la misma, y deberán dar cumplimiento a las normas locales establecidas y/o deberán considerar a modo referencial otras normas internacionales.



Puente Grand Bridge, Incheon, South Korea.
(Fuente: Wikimedia Commons).

Puentes sobre vías navegables. ¿Una combinación peligrosa sin solución?

J. Crawford

Dado que cerca del 80% de los accidentes marítimos se producen debido al error humano y entre el 60% y el 85% de todas las colisiones de embarcaciones se deben a errores durante la navegación, se estima importante considerar además la evaluación y exigencia de ayudas a la navegación que permitan mantener y/o mejorar la seguridad de la navegación en la vía navegable próxima al puente. Estas ayudas a la navegación podrán ser básicas como boyas y linternas, hasta la utilización de dispositivos más sofisticados como esquemas de separación de tráfico marítimo, ayudas del tipo electrónicas como Racones y AIS, como asimismo estaciones VTS (Vessel Traffic Services) o LPS (Local Port Services), similares a las estaciones de control de tráfico aéreo, pero en el ámbito marítimo. Al respecto cabe señalar que existen estudios que demuestran que las mejoras en las ayudas a la navegación cerca de un puente pueden proporcionar soluciones extremadamente rentables para reducir el riesgo de colisiones a niveles aceptables.

Reflexiones finales

Las colisiones de buques contra puentes, si bien es cierto no son comunes, representan una seria amenaza para la seguridad marítima, el medio ambiente marino, la infraestructura portuaria y la vida humana. Este tipo de situaciones superan con creces el número y gravedad, en comparación con la afectación generada por fenómenos naturales, y ha generado a la fecha la pérdida de más de 341 vidas humanas.

En relación con lo anterior, se puede establecer la importancia de la generación de análisis de riesgos con una perspectiva marítima que considere la utilización de herramientas cualitativas y cuantitativas utilizadas a nivel internacional, que debe realizarse para las estructuras existentes y futuras sobre rutas de navegación, y el establecimiento y exigencia de protocolos de seguridad que deben aplicarse ante situaciones de amenazas y/o emergencia que permitan disminuir la probabilidad de ocurrencia de este tipo de situaciones.



LISTA DE REFERENCIAS

1. Committee on ship-bridge collisions. Marine Board. Commission on Engineering and Technical Systems. National Research Council. *Ship Collisions with bridges. The Nature of the accidents, their prevention and mitigation*, 1983.
2. Dai, Ty., Nie, W., Liu, Yj. et al. Statistical analysis of ship collisions with bridges in China waterway. *JMSA* 1, 28-32 (2002).
3. Department of Homeland Security (1986). *Bridge lighting and other signals*.
4. Gluver, H., & Olsen, D. (2017). Current practice in risk analysis of ship collisions to bridges. In *Ship collision analysis* (pp. 85-96). Routledge.
5. Guema, Lucjan. (2009). *Methods of ship-bridge collision safety evaluation*. 132.
6. International Association of Lighthouse Authorities (2022). G1172 "The marking of bridges and other structures over navigable waters".
7. International Association of Lighthouse Authorities (2017). R1001 The IALA Maritime Buoyage System.
8. Knott, M., Pruca, Z. "Vessel Collision Design of Bridges." *Bridge Engineering Handbook*. Ed. Wai-Fah Chen and Lian Duan. Boca Raton: CRC Press, 2000.
9. Nagasawa, H., Arita, K., Tani, M., & Oka, S. (1977). A study on the collapse of ship structure in collision with bridge piers. *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, 1977(142), 323-332.
10. Pedersen, P. T., Chen, J., & Zhu, L. (2020). Design of bridges against ship collisions. *Marine Structures*, 74, 102810.
11. Sha, Y., Amdahl, J., & Dørum, C. (2017). Dynamic responses of a floating bridge subjected to ship collision load on bridge girders. *Procedia engineering*, 199, 2506-2513.
12. Tronsli, Sindre. (2022). A study on ship-bridge collisions and the significance of the collision energy and impact angle for the probability of collapse.