

## COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE BARCAZAS EN IMPACTOS CONTRA PILAS DE PUENTES

F. José Luperi<sup>a</sup>, Federico Pinto<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Estudiante Doctoral, F.C.E.F.yN., Universidad Nacional de Córdoba*

<sup>b</sup> *Departamento de Estructuras, F.C.E.F.yN., Universidad Nacional de Córdoba. Casilla de Correo 916, Córdoba, Argentina. [fpinto@efn.uncor.edu](mailto:fpinto@efn.uncor.edu)*

**Palabras Clave:** impacto, barcaza, puente

**Resumen.** El impacto de embarcaciones contra pilas de puentes es una condición de carga extrema a ser considerada en el diseño de puentes sobre vías navegables. Las solicitaciones generadas por el impacto de embarcaciones dependen de una serie de fenómenos entre los cuales se pueden mencionar: la masa y velocidad de la embarcación, la respuesta dinámica de la estructura impactada y el comportamiento carga-deformación de la embarcación. Este último es de una importancia determinante, ya que define la máxima fuerza de contacto y la posible absorción de energía en la proa de la embarcación. Los trabajos actualmente publicados en la literatura internacional describen el comportamiento carga-deformación de ciertos tipos de barcasas para niveles limitados de energía. Debido a esto, existe incertidumbre sobre el comportamiento para casos de impacto de gran energía, tales como los posibles en puentes sobre el Río Paraná. A su vez, es deseable estudiar el comportamiento estructural de barcasas tipo Paraná, de producción y uso a nivel regional.

El propósito de este artículo es, en base a análisis numéricos no lineales, describir el comportamiento carga-deformación de barcasas de tipología regional para impactos contra pilas de puentes que permitan el análisis en casos de gran energía. Adicionalmente, se utilizan los resultados obtenidos mediante modelos numéricos para validar procedimientos de análisis simplificados, que permiten el análisis de impacto de barcasas a nivel de diseño.

## 1 INTRODUCCIÓN

El comportamiento estructural de las barcazas es un aspecto fundamental en el análisis de impactos contra puentes o estructuras de defensas. En las sollicitaciones producidas por el impacto tienen influencia una serie de fenómenos, tales como la masa y velocidad de las barcazas; la respuesta dinámica de la estructura y el comportamiento del grupo de barcazas. Sin embargo, la respuesta estructural de las barcazas es determinante, ya que define la máxima fuerza de contacto posible y la capacidad de absorción de energía en la embarcación. Los trabajos actualmente publicados describen el comportamiento carga-deformación de ciertos tipos de barcazas para niveles limitados de absorción de energía. Debido a esto, existe incertidumbre sobre el comportamiento para casos de impacto de gran energía y para barcazas de producción y uso a nivel regional. En este trabajo se estudia el comportamiento de barcazas regionales para grandes niveles de absorción de energía y se validan métodos de análisis simplificados aplicables a nivel de diseño.

## 2 ESTADO DEL ARTE

Las barcazas estudiadas en las publicaciones existentes son las barcazas de carga general europea tipo Ila y tipo Jumbo Hopper, muy similares entre sí, y la barcaza tipo Oversize Tanker. El primer tipo fue estudiado mediante modelos a escala reducida, mientras que los otros dos mediante modelos numéricos. El objetivo de estos estudios fue caracterizar en forma simplificada el comportamiento de la proa de barcazas para incorporarlo en normativas o en análisis simplificados aplicables a nivel de diseño.

### 2.1 Estudio mediante modelo físico

Uno de los estudios más significativos para la cuantificación de las fuerzas de impacto de barcazas fue el realizado por [Meier-Dörnberg \(1983\)](#). En este estudio se realizaron ensayos de carga en modelos a escala reducida para barcazas europeas tipo Ila. Se realizaron ensayos dinámicos en modelos a escala 1:4.5, con un martillo de forma cilíndrica de 1.7 metros de diámetro y con un martillo plano. Debido a limitaciones de la energía disponible para los impactos se realizaron impactos sucesivos en un mismo modelo acumulando energía de impacto y deformación. También se realizó un ensayo estático en modelo a escala 1:6 con un martillo de 2.3 metros de ancho. En este estudio no se encontraron diferencias significativas entre las cargas estáticas y dinámicas desarrolladas en las barcazas durante los ensayos de abolladura.

En base a los ensayos experimentales se desarrollaron las siguientes relaciones entre energía cinética de impacto (asumida igual a la energía de deformación acumulada), deformación permanente y fuerza máxima de impacto.

$$a_B = 3.1 \left( \sqrt{1 + 0.3E_B} - 1 \right)$$

$$P_B = \begin{cases} 60a_B & a_B < 0.1 \\ 6 + 1.6a_B & a_B > 0.1 \end{cases}$$

donde  $a_B$  es la deformación permanente de la proa en metros,  $E_B$  es la energía absorbida por la barcaza en MNm y  $P_B$  es la envolvente de la fuerza de impacto en MN.

En la Figura 1 se puede observar las relaciones entre la energía cinética inicial, deformación permanente de la proa, el valor medio y máximo de la fuerza de impacto y

algunos resultados de los ensayos desarrollados por [Meier-Dörnberg \(1983\)](#).

Estos ensayos fueron una base importante para la definición de las fuerzas desarrolladas durante el impacto de barcazas y fueron adoptados para el desarrollo de la normativa actualmente vigente (es decir: [AASHTO 2008](#) y [Eurocode 1991](#)). Sin embargo, no se estudió la influencia de la forma y la dimensión de la pila en la fuerza de impacto. Estudios más recientes indican que estos factores tienen una marcada influencia en la relación carga-deformación de la proa de la barcaza.

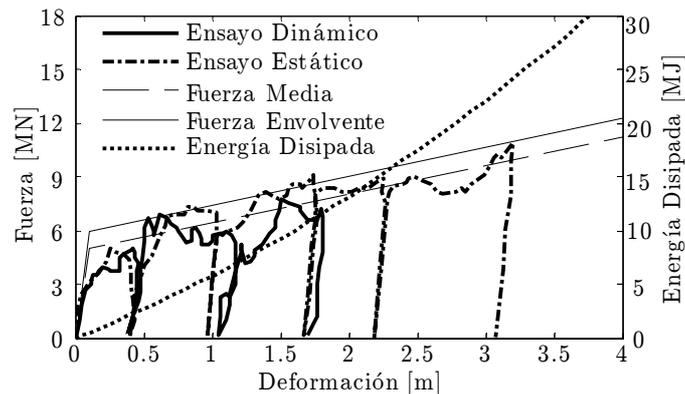


Figura 1. Relación carga-deformación propuesta por Meier-Dörnberg

## 2.2 Estudios mediante modelos numéricos

El comportamiento estructural de barcazas fue estudiado mediante modelos de elementos finitos de manera independiente por [Consolazio y colaboradores \(2008, 2010\)](#) en la Universidad de Florida y por [Harik y colaboradores \(2008a, 2008b\)](#) en la Universidad de Kentucky. En ambos estudios se investigó la relación carga-deformación de la proa de barcazas y su relación con la forma y dimensión del objeto impactado. Además, se utilizaron los modelos de elementos finitos para validar métodos de diseño simplificados propuestos por estos autores.

[Consolazio y colaboradores \(2008, 2010\)](#) modelaron la porción delantera de la proa de la barcaza utilizando sólo elementos de lámina e imponiendo condición de borde de desplazamientos para la sección posterior. [Harik y colaboradores \(2008\)](#) modelaron barcazas completas, utilizando elementos de lámina para el casco y elementos de viga para los refuerzos internos, imponiendo condiciones iniciales de velocidad.

Los autores de ambos estudios indican que la forma y dimensión del objeto impactado tienen influencia significativa en la curva carga-deformación de las barcazas y que no existe un aumento sostenido de carga a deformaciones crecientes como lo indica Meier-Dörnberg. En la Figura 2 se pueden observar los resultados obtenidos por [Consolazio y colaboradores \(2008, 2010\)](#) para impactos centrados de barcazas tipo Jumbo Hopper contra pilas de diferente forma y dimensión. En la Figura 3 se pueden observar los resultados obtenidos por [Harik y colaboradores \(2008\)](#) para condiciones equivalentes. Se observa que los resultados obtenidos por ambos investigadores son similares, donde en general existe un pico inicial de carga para deformaciones del orden de los 0.2 m y luego, para deformaciones mayores, hay un descenso de la fuerza de impacto que corresponde con la inestabilidad de equilibrio de los refuerzos internos y del casco de la barcaza. En general, este pico inicial de fuerza es más marcado para pilas rectangulares respecto a pilas cilíndricas, ya que los refuerzos internos toman carga y se deforman simultáneamente en el caso de las pilas rectangulares y lo hacen progresivamente en el caso de pilas cilíndricas. Además se puede observar que existe mayor

variabilidad de la fuerza en función de la dimensión de la pila para el caso de pilas rectangulares respecto a pilas cilíndricas.

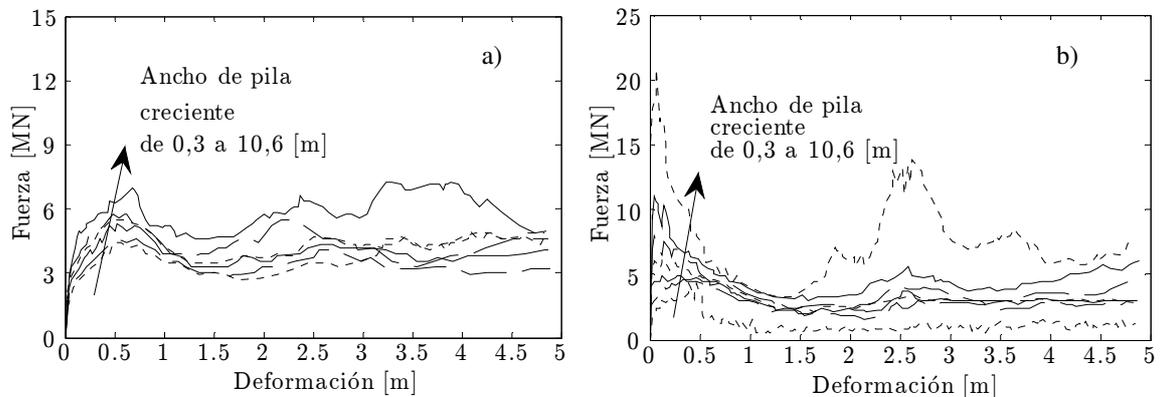


Figura 2. Relaciones carga-deformación propuestas por Consolazio y colaboradores (2008) para a) Pilas cilíndricas y b) Pilas rectangulares

En base a los resultados obtenidos, [Consolazio y colaboradores \(2008, 2010\)](#) proponen una relación elasto-plástica perfecta, con parámetros en función de la forma y dimensión de la pila. Esta relación constituye un límite superior del comportamiento de estructura de la barcaza y fue desarrollada para su utilización en procedimientos simplificados para el diseño de puentes. [Harik y colaboradores \(2008\)](#), por otra parte, linealizan por tramos la relación carga-deformación para su aplicación en modelos simplificados.

Cabe destacar que los resultados están disponibles para deformaciones máximas del orden de 5 metros, lo que corresponde a niveles de energía de orden de los 30 MJ. Este valor de energía es muy limitado si se tiene en cuenta la velocidad y el tamaño de los grupos de barcazas que circulan en el Río Paraná (e.g., [Pinto y colaboradores, 2008](#)). Estos grupos de barcazas pueden llegar a valores de energía cinética del orden de los 750 MJ, por lo que es necesario investigar el comportamiento estructural de las barcazas para deformaciones mayores.

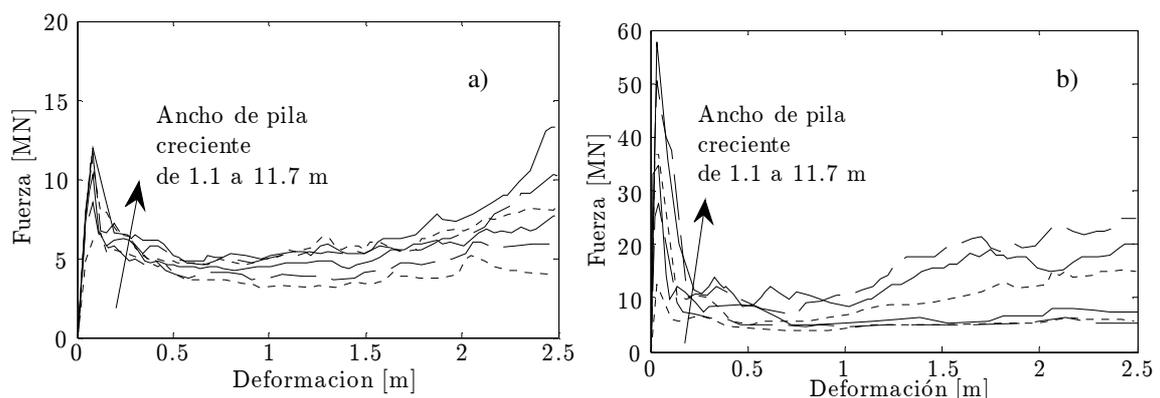


Figura 3. Relaciones carga-deformación propuestas por Harik y colaboradores (2008) para a) Pilas cilíndricas y b) Pilas rectangulares

### 3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE BARCAZAS

En esta sección se describe el análisis del comportamiento estructural de barcazas mediante modelos de elementos finitos. A continuación se detallan características de las barcazas, el modelo utilizado para su análisis y los resultados obtenidos.

### 3.1 Barcazas analizadas

Se estudia el comportamiento de barcazas de carga general y tanque tipo Paraná. Para esto se dispone de planos y especificaciones de las mismas aportados por la empresa Utrapetrol S.A., que fabrica las barcazas a nivel regional. Las barcazas tipo Paraná poseen un eslora de 59.5 m, manga de 16 m y un calado de 3.4 m. Tanto la barcaza de carga general como tanque poseen versiones con proas, que navegan en las líneas delanteras o traseras de grupos de barcazas y tipo cajón que navegan en el interior del grupo de barcazas. Ambos tipos poseen cascos dobles, constituidos por una chapa de acero con rigidizadores en forma de L. A su vez tienen secciones reforzadas formadas por vigas de sección abierta (en forma de L y U) y secciones estancas formadas por mamparas de chapas de acero. En la Figura 4 se puede observar la geometría de las mismas, donde se han realizado cortes para visualizar las secciones reforzadas y estancas. Los espesores del casco varían entre 5/16 a 3/4 de pulgadas.

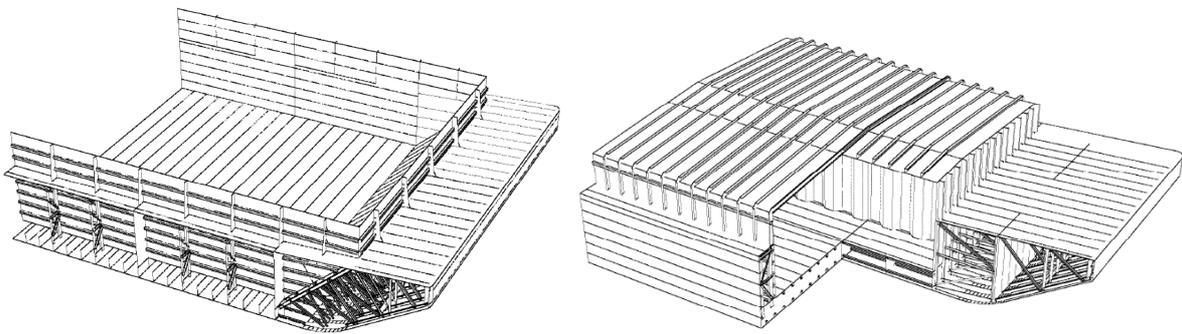


Figura 4. Geometría de proa de barcazas de carga general y tanque tipo Paraná

El acero especificado para la construcción de las barcazas es acero tipo ASTM A36, cuyo diagrama tensión deformación se muestra en la Figura 5.

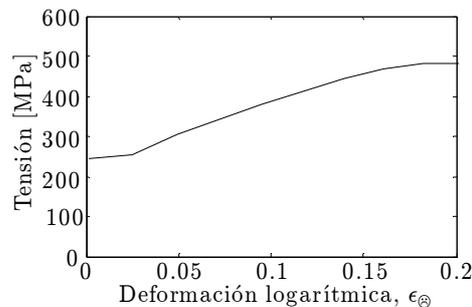


Figura 5. Diagrama tensión deformación de acero ASTM A36

### 3.2 Modelo de elementos finitos

En el presente análisis se utilizaron dos modelos de elementos finitos. El primero para el análisis del comportamiento estructural de las barcazas, donde se modeló en detalle la porción delantera de las barcazas y cuyos resultados se muestran en esta sección. El segundo, donde se modelan grupos de barcazas completas, cuyos resultados se muestran en la sección de validación de modelos simplificados.

Para el presente análisis se utilizó el programa Abaqus (Dassault Systèmes), mediante el cual se modeló la estructura de las barcazas con elementos de lámina tanto para el casco como para los rigidizadores y refuerzos internos. Se utilizaron elementos de integración reducida cuadriláteros y triangulares de 4 nodos y 3 nodos respectivamente (S4R y S3R). Para el comportamiento flexional se utilizan deformaciones de corte impuestas y para el

comportamiento membranial se utiliza una técnica de estabilización de mecanismos sin energía de deformación. Se utilizó material no lineal definido por tramos independiente de la velocidad de deformación de acuerdo a los diagramas tensión deformación del acero ASTM A36, adoptando una deformación plástica equivalente máxima del 20 %, para lo cual se eliminan de la malla los elementos que cumplen con este criterio. Se realizó un análisis dinámico explícito, el cual se considera ventajoso respecto a esquemas implícitos debido a la gran cantidad de contactos que involucra el problema. Se consideró además la no linealidad geométrica.

La estructura impactada es modelada como rígida y se la representó mediante elementos de superficie, fijando sus desplazamientos. Se utilizó una definición de contacto general sin rozamiento entre partes. Esta definición de contacto busca y aplica automáticamente la condición de contacto entre todos los elementos del modelo, ya sean entre diferentes componentes o entre partes de un mismo componente.

Teniendo en cuenta la magnitud de la energía cinética de grupos de barcazas que circulan en la región se estimó necesario disponer de curvas con una deformación máxima del orden de 12 m. Debido a esto y con el objetivo de que las condiciones de borde no afecten los resultados, se modeló la parte frontal de las barcazas hasta una longitud de 20 m. En la sección donde se corta el modelo de la barcaza, se define una velocidad invariante en el tiempo de 5 m/s en la dirección longitudinal y nula en las otras direcciones. Se adoptaron diferentes velocidades como condición de borde y se verificó que los resultados no varíen considerablemente respecto a este parámetro. Se realizaron análisis de impactos centrados y sobre la esquina de barcazas contra pilas cilíndricas, prismáticas rectangulares y contra muros planos, en forma perpendicular y en forma oblicua.

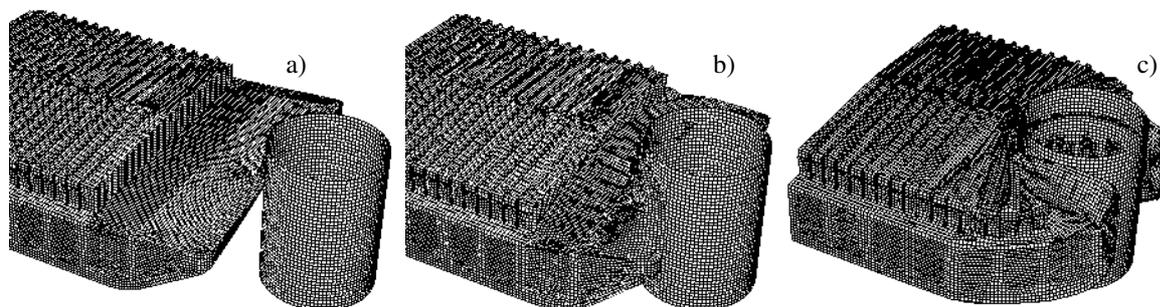


Figura 6. Deformación de barcaza Tanque tipo Paraná contra pila cilíndrica

### 3.3 Resultados

En los resultados del análisis mediante elementos finitos se pudo observar las siguientes tendencias:

- Para impactos contra pilas rectangulares y cilíndricas el valor de la carga máxima alcanzada depende de la forma y dimensión de la pila. Esta tendencia es más marcada en el caso de pilas planas.
- Para la mayoría de los casos analizados existe un pico inicial de carga, que se corresponde con deformaciones del orden de 10 cm. Durante esta etapa, las deformaciones permanentes se ven acotadas a una zona próxima a la pila (Figura 6a).
- Luego del pico inicial, la carga se mantiene en niveles similares o descende, hasta alcanzarse deformaciones del orden de los 5 m (dimensión de la proa). Durante esta etapa,

la deformación se desarrolla de manera generalizada en la proa, la mayoría de los refuerzos internos pandean, y el cuerpo de la barcaza no sufre deformaciones considerables (Figura 6b).

- Para deformaciones mayores a 5 m, aproximadamente, la carga aumenta a valores incluso mayores al pico inicial. Este incremento de carga es más marcado para las barcazas tanque que para las barcazas tolva y para pilas rectangulares que para pilas cilíndricas. Este fenómeno se debe a que la estructura impactada entra en contacto con el cuerpo de la barcaza una vez deformada la proa (Figura 6c).
- En los casos de impacto en esquina contra pilas rectangulares se observó una respuesta similar a los impactos centrados. Sin embargo, para los casos de impacto en esquina contra pilas cilíndricas se encontró una diferencia significativa respecto a los impactos centrados.

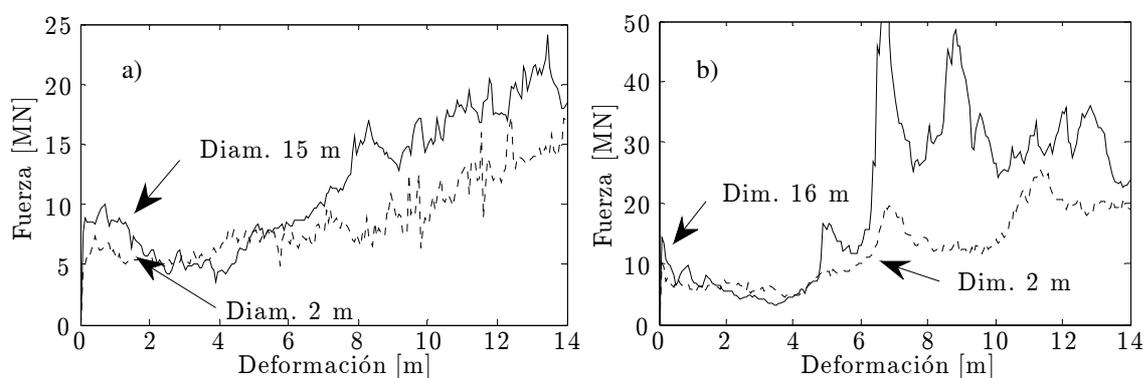


Figura 7. Respuesta estructural de barcaza tanque tipo Paraná para impacto centrado contra a) pila cilíndrica b) pila rectangular

Algunas de estas tendencias concuerdan con las descritas por [Consolazio y colaboradores \(2008\)](#) y [Harik y colaboradores \(2008\)](#) para barcazas tipo Jumbo Hopper y Oversize Tanker. Sin embargo, estos autores investigaron el comportamiento de la proa de barcazas para deformaciones máximas del orden de 5 m, por lo que no capturan el incremento marcado de carga para deformaciones mayores a la longitud de la proa. Algunas de las curvas carga-deformación obtenidas para los distintos casos considerados se muestran en la Figura 7.

### 3.4 Relaciones simplificadas

Con el objetivo de implementar el comportamiento estructural en modelos de análisis simplificados, se linealizan por tramos las distintas curvas carga-deformación de las proas de barcazas. Para esto se utiliza un método de optimización para ecuaciones no lineales con restricciones (Sequential quadratic programming), donde se ajusta la deformación y la fuerza de diez puntos para minimizar el residuo total. Las restricciones utilizadas para la optimización son:

- Todos los valores de fuerza positivos
- Valores de desplazamiento en orden creciente
- Último valor de desplazamiento igual a desplazamiento máximo

La comparación entre los resultados del modelo de elementos finitos y la linealización se muestran en la Figura 8. Este caso corresponde al impacto de una barcaza tanque contra pila rectangular de 2 m de ancho, donde se puede observar que la definición linealizada con 10

puntos no difiere sustancialmente del resultado original.

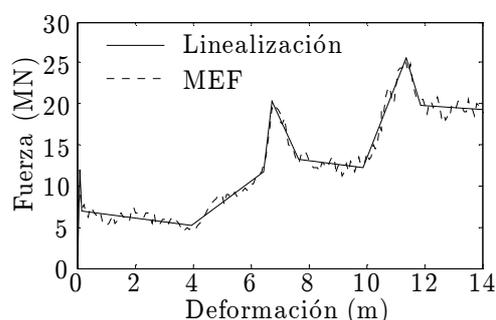


Figura 8. Linealización por tramos de curva carga-deformación

La respuesta estructural linealizada de la proa de barcasas correspondientes a diferentes formas y dimensiones del objeto impactado se muestran en las Tablas 1 y 2.

Pila Rectangular						Pila Cilíndrica					
Ancho 2 m		Ancho 6 m		Ancho 10 m		Diam. 2 m		Diam. 6 m		Diam. 10 m	
Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	12.1	0.1	16.0	0.1	24.7	0.1	6.9	0.1	10.3	0.1	10.8
0.2	6.9	0.4	7.2	0.1	8.1	1.2	5.4	0.4	6.7	0.6	6.1
4.0	5.3	4.5	3.3	4.3	3.6	2.7	7.7	4.3	6.9	1.6	7.5
6.4	11.6	6.6	10.7	6.6	14.1	6.2	9.0	5.0	10.3	3.9	4.2
6.8	20.4	6.8	27.5	6.8	36.9	7.2	21.2	5.9	10.6	5.5	5.2
7.7	13.2	7.4	15.7	7.2	19.8	8.1	12.7	6.9	21.0	6.6	9.3
9.9	12.1	10.0	20.2	9.3	27.2	10.2	12.1	8.6	14.4	6.9	20.6
11.4	25.6	10.8	19.4	10.1	25.7	11.5	22.3	10.4	20.0	8.3	17.2
11.9	19.8	12.9	29.3	12.8	31.1	13.0	16.6	11.2	28.3	8.8	23.8
14.0	19.3	14.0	26.3	14.0	22.0	14.0	19.6	14.0	24.6	14.0	30.9

Tabla 1. Respuesta estructural linealizada para impacto centrado de barcaza tanque

Pila Rectangular						Pila Cilíndrica					
Ancho 2 m		Ancho 6 m		Ancho 10 m		Diam. 2 m		Diam. 6 m		Diam. 10 m	
Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)	Dist. (m)	F (MN)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.1	9.9	0.1	15.1	0.1	10.1	0.2	8.7	0.2	10.9	0.1	10.1
1.2	4.6	0.6	12.4	1.0	5.9	1.3	5.6	0.7	6.9	1.0	5.9
4.2	4.7	1.1	6.6	3.1	7.3	2.0	6.3	2.6	6.4	3.1	7.3
6.1	8.0	3.7	5.8	4.1	9.2	3.6	5.0	4.0	7.5	4.1	9.2
9.1	7.6	5.7	10.7	4.7	6.7	5.7	7.5	5.0	10.0	4.7	6.7
9.4	10.8	7.5	9.5	6.7	10.3	8.9	6.6	6.6	9.3	6.7	10.3
10.0	7.0	10.3	14.4	8.3	12.2	9.3	8.2	8.5	10.0	8.3	12.2
11.1	11.2	10.4	16.0	10.7	18.8	10.5	7.3	12.3	14.6	10.7	18.8
13.5	12.9	12.7	19.2	13.5	15.2	11.5	11.5	12.3	16.6	13.5	15.2
14.0	14.7	14.0	14.7	14.0	12.3	14.0	13.8	14.0	12.9	14.0	12.3

Tabla 2. Respuesta estructural linealizada para impacto centrado de barcaza tolva

## 4 MODELOS SIMPLIFICADOS PARA ANÁLISIS DE IMPACTOS

En este trabajo se han utilizado modelos de elementos finitos para el análisis de impacto de barcazas, que se desarrollan en el marco de una investigación. Sin embargo, estos modelos no son aplicables en la práctica a nivel de diseño. Es por esto que se han propuesto en la literatura una serie de modelos o métodos simplificados, que de acuerdo a su nivel de sofisticación, incluyen ciertos fenómenos relacionados con el impacto de barcazas. A continuación se describen brevemente dos modelos simplificados y se compara su desempeño.

### 4.1 Modelo para impactos simétricos

El impacto simétrico de barcazas se puede analizar dinámicamente mediante programas de análisis estructural disponibles comercialmente (por ejemplo, [SAP2000](#)). Este tipo de análisis es conveniente respecto al análisis estático que prescribe la normativa [AASHTO \(2008\)](#), ya que incluye implícitamente el factor de amplificación dinámica de la carga. También es conveniente respecto a métodos de historias de carga predefinidos (es decir, [AVIL, Consolazio y colaboradores, 2008](#); [Eurocode, 1991](#)) ya que la historia de carga se obtiene como resultado del análisis.

El modelo descrito en esta sección posee capacidades similares al método acoplado mediante la fuerza de impacto (CVIA) propuesto por [Consolazio y colaboradores \(2008\)](#) y al modelo unidimensional para análisis de grupos de barcazas propuesto por [Harik y colaboradores \(2008\)](#). Donde el comportamiento de las barcazas se caracteriza mediante su masa y resortes no lineales. Como resultado de este análisis se puede obtener no solo la historia de carga generada durante el proceso de impacto sino también las solicitaciones generadas en la estructura impactada.

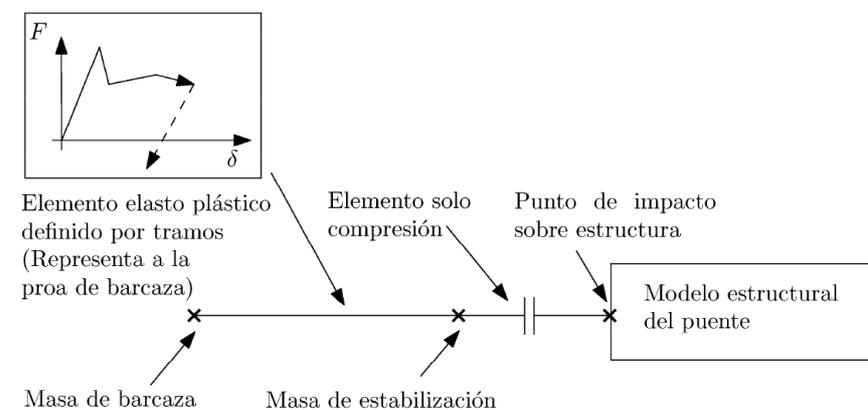


Figura 9. Modelo simplificado para el análisis de impactos simétricos de barcazas

Para simular el comportamiento de las barcazas se utiliza un modelo tipo masa - resorte no lineal con un solo grado de libertad en la dirección de la velocidad inicial de las mismas mediante el programa [SAP2000 \(Computers and Structures, Inc.\)](#). Para definir el comportamiento del resorte no lineal se utilizan dos nodos adicionales conectados por dos elementos en serie (tipo Link/Support) que se conectan a su vez al punto de impacto de la estructura. El primero es un elemento de comportamiento elasto plástico (MultiLinear Plastic) definido por tramos con endurecimiento tipo cinemático. Cabe aclarar que el tipo de endurecimiento no influye en el análisis realizado pero está asignado por defecto al elemento utilizado. El segundo es un elemento que soporta esfuerzos de compresión solamente (Gap element) el cual se comporta como un resorte lineal. La rigidez de este elemento se define

mediante un valor dos órdenes de magnitud más grandes que la rigidez del primer elemento con el propósito de que a los efectos prácticos se comporte como un elemento rígido y su flexibilidad no influya sensiblemente en los resultados. El tipo de análisis compatible con las características de los elementos utilizados es un análisis explícito no lineal (Nonlinear Direct Integration History). Debido a que en el programa utilizado no se pueden definir velocidades como condiciones iniciales de análisis se definen dos casos de análisis consecutivos. El programa toma las condiciones del último paso de cálculo del primer caso y se las asigna como condiciones iniciales del caso siguiente. En el caso inicial, se aplica entonces una carga al grado de libertad que representa la barcaza que lo acelera de tal forma que la velocidad al final de esta etapa se corresponde con la velocidad inicial del impacto. Debido a que se desea que el elemento de comportamiento elasto plástico no tome carga durante la etapa inicial en la cual se acelera la barcaza, se asigna al elemento “gap” una separación libre igual al desplazamiento total ocurrido en la esta etapa. Es necesario asignar una masa pequeña al nodo intermedio, ya que en caso contrario el algoritmo de solución del problema no converge. El esquema de este modelo se muestra en la Figura 9.

Este tipo de análisis es válido para impactos simétricos, ya que no representa el comportamiento bidimensional. En el caso de impactos simétricos de filas de barcazas, [Harik y colaboradores \(2008\)](#) indican que la energía disipada en las barcazas posteriores es menor al 10% de la energía total. De esta manera, es posible aproximar en este tipo de impactos al conjunto mediante una masa concentrada. En el caso de impactos de grupos de varias filas de barcazas, se puede asignar una masa equivalente para tener en cuenta el desprendimiento de las filas que no impactan directamente ([Luperi y colaboradores, 2010](#)).

Los resultados obtenidos mediante este tipo de análisis se comparan con resultados obtenidos mediante modelos de elementos finitos de barcazas completas, de características similares a los modelos de proas de barcazas descritos anteriormente. Sin embargo se diferencian en que no se establece una condición de borde de velocidad constante, como en los modelos de proas, sino que se asigna una velocidad inicial a la barcaza. La Figura 10 muestra la malla de elementos finitos de una barcaza tolva completa. En este modelo se utilizan resortes en la porción inferior de la barcaza para simular la acción de la presión hidrostática y se asigna la masa de la carga de la barcaza a los elementos que representan el casco interno en la zona del contenedor.

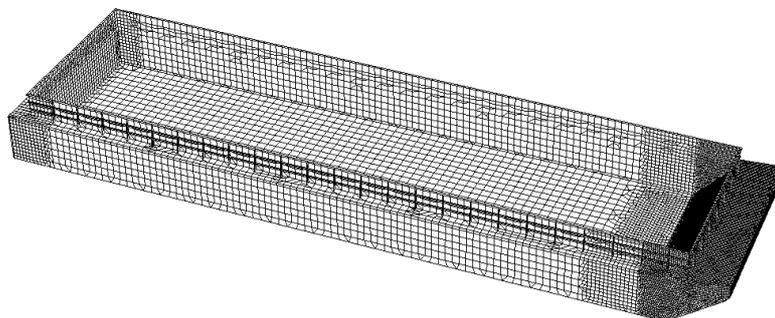


Figura 10. Modelo de elementos finitos de barcaza tolva completa

La Figura 11 muestra los resultados para el impacto simétrico de una barcaza de carga general tipo Paraná de 2800 t contra una pila rectangular de 10 metros de ancho (Tabla 1) con velocidad inicial de 5 m/s, donde se puede observar una aproximación aceptable del modelo simplificado. La deformación permanente de la proa para este caso resulta de 4.5 m.

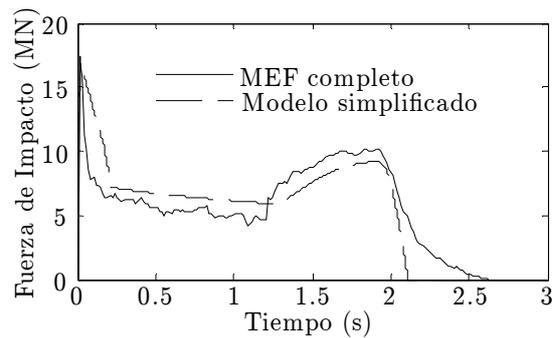


Figura 11. Historia de carga y desplazamiento para impacto simétrico de una barcaza contra pila rectangular de 10 m de ancho

#### 4.2 Modelo para impactos oblicuos

Con el objetivo de modelar el impacto de grupos de barcazas de manera más general, se desarrolló un modelo de múltiples grados de libertad en dos dimensiones (Luperi y colaboradores, 2011). Este modelo incorpora las fuerzas de interacción entre las barcazas que componen el convoy, la respuesta de la estructura impactada y el comportamiento no-lineal de la barcaza que entra en contacto con la pila. En el modelo se asignan los 3 grados de libertad en el plano a cada barcaza (dos desplazamientos y un giro) y a la pila. El contorno de barcazas y la geometría de pila definidos por una malla en base a los valores de sus grados de libertad globales. En base a la malla que define la geometría de cada barcaza y la pila, se define un algoritmo de búsqueda de contacto de las barcazas entre sí y con la pila. En este modelo las barcazas internas del grupo se comportan elásticamente. La proa de barcazas que impactan con la pila se modelan mediante un elemento macro, que representa el comportamiento estructural de la barcaza mediante una relación elasto-plástica definida por tramos. El comportamiento de este elemento se define de acuerdo a los resultados de los modelos de elementos finitos antes descriptos. Los amarres entre barcazas se modelan mediante elementos elasto-plásticos con capacidad de carga sólo a tracción y con falla por deformación excesiva.

En la Figura 12 se muestra la historia de carga para el impacto oblicuo de una barcaza tolva contra un muro rígido con un ángulo de impacto de  $30^\circ$  y una velocidad inicial de 5 m/s, donde se puede observar una aproximación aceptable del modelo simplificado.

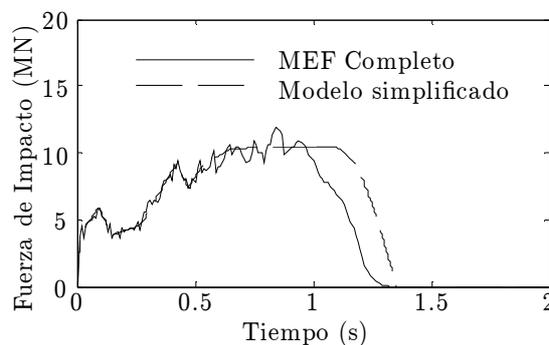


Figura 12. Historia de carga y desplazamientos para impacto oblicuo de una barcaza contra muro plano

## 5 CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el análisis del comportamiento estructural de barcazas mediante modelos detallados de elementos finitos. Las barcazas analizadas son de carga general y tanque tipo Paraná, de construcción y utilización regional. Se consideraron diferentes geometrías y dimensiones de la estructura impactada y se obtuvo como resultado las curvas

carga-deformación de la estructura de barcazas con el objetivo de ser utilizadas en análisis aplicables a nivel de diseño. Estas curvas se obtuvieron para deformaciones totales superiores a las disponibles en la literatura internacional actual, con el objetivo de eliminar la incertidumbre actualmente existente respecto al análisis de grupos de barcazas que circulan con gran energía cinética. Se observa que en este rango extendido de deformaciones la fuerza de impacto aumenta considerablemente y, en algunos casos, duplica o triplica el valor reportado por otros autores en la literatura internacional.

Los modelos de elementos finitos desarrollados se utilizaron para validar modelos simplificados, obteniéndose resultados similares entre ambos, tanto para el caso de impactos simétricos como para el impacto oblicuo.

## 6 REFERENCIAS

- Abaqus FEA 6.10, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, R.I., USA, 2010
- American Association of State Highway and Transportation Officials. Guide Specifications and Commentary for Vessel Collision of Highway Bridges. Volume I, final report. Washington, DC, 2008.
- Arroyo J.R. & Ebeling R.M. Barge train maximum impact forces using limit states for the lashings between barges. Navigation Systems Research Program. US Army Corps of Engineers, 2005.
- Consolazio, G. y McVay, M.C. Development of Improved Bridge Design Provisions for Barge Impact Loading. Report RPT-2008/51117, Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, 2008.
- Consolazio G., M. T. Davidson y D. J. Getter. Vessel Crushing and Structural Collapse Relationships for Bridge Design. RPT-2010/72908/74039, Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida, 2010.
- Eurocode. Eurocode 1 - Actions on Structures - Part 1-7: General Actions – Accidental Actions EN. European Standard, 1991.
- Meier-Dörnberg K.E. Ship collisions, safety zones, and loading assumptions for structures in inland waterways. VDI-Berichte No. 496, pp. 1–9., 1983.
- Pinto F., Prato C.A. and Huerta P.J.F. Vessel Collision Protection for Chaco Corrientes Bridge by Means of Energy Absorbing Drilled Shafts. XVI Congreso sobre Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. San Luis, Argentina., 2008.
- Luperi F. J., Pinto F. and Prato C.A. Historia de carga debido a impacto frontal de barcazas contra pilas de puentes. XX Congreso sobre de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Buenos Aires, Argentina., 2010.
- Luperi F. J., Pinto F. and Prato C.A. Modelación de Impactos de Conjuntos de Barcazas contra Pilas de Puentes. XIX Congreso sobre de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Rosario, Argentina, 2011.
- SAP2000. Structural Analysis Program, Computers and Structures, Inc., University Ave. Berkeley, CA, 1995.
- Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC). Report of the International Commission for Improving the Design of Fender Systems. Brussels, Belgium), 1984.
- Harik I., Yuan P. & Davidson M. Equivalent Barge and Flotilla Impact Forces On Bridge Piers. Kentucky Transportation Center, College of Engineering, University of Kentucky, 2008a.
- Harik I., Yuan P. & Davidson M. Multi-Barge Flotillas Impact Forces on Bridge. Kentucky Transportation Center, College of Engineering, University of Kentucky, 2008b.