

## MODELACIÓN DE IMPACTOS DE BARCAZAS CONTRA PILAS DE Puentes MEDIANTE ELEMENTOS FINITOS

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.** Las fuerzas desarrolladas durante el impacto de embarcaciones influyen considerablemente en el diseño de puentes sobre vías navegables. Los enfoques que se han propuesto para el diseño han sido variados y la práctica se basa generalmente en normativas internacionales que poseen limitaciones, en particular para estructuras de tipología regional. La modelación numérica permite estudiar los fenómenos involucrados en el impacto de barcasas y evaluar el desempeño de los diferentes métodos de diseño propuestos. Diferentes autores han utilizado modelos de elementos finitos para simular el comportamiento no lineal de las estructuras de barcasas típicas internacionales. El principal objetivo fue estimar el comportamiento carga deformación de las mismas para luego incorporarlo en modelos simplificados para el diseño de puentes. Sin embargo, los resultados presentados en la literatura internacional para un mismo tipo de barcasas difieren de acuerdo a distintos autores. Esto se debe a que se han utilizado diferentes hipótesis para la formulación de los modelos numéricos. En este artículo se discuten una serie de aspectos relacionados a la modelación del proceso de impacto de barcasas de tipología regional y se discute la influencia de éstos en los resultados obtenidos. A su vez se hacen comentarios sobre algunos aspectos de la implementación en situaciones de diseño contra impacto de grupos de barcasas.

## 1 INTRODUCCIÓN

La respuesta estructural de las barcazas juega un rol central en las solicitaciones generadas durante el impacto contra puentes. Si bien existen varios factores que influyen en este tipo de fenómenos, la respuesta estructural de la barcaza que impacta determina la máxima fuerza de contacto posible y la energía disipada por la embarcación durante el impacto. El comportamiento estructural de barcazas fue estudiado con anterioridad, sin embargo los tipos de barcazas estudiadas no coinciden con las barcazas fabricadas a nivel local. Además, existen diferentes enfoques en las hipótesis empleadas para el estudio y los resultados obtenidos difieren en cierta medida. Es por eso que resulta interesante resaltar algunos aspectos relacionados con la modelación de este tipo de fenómenos.

## 2 ESTADO DEL ARTE

Existen dos estudios previos mediante modelos de elementos finitos en lo que respecta al comportamiento estructural de barcazas. Los tipos de barcazas estudiadas anteriormente son las de carga general tipo Jumbo Hopper y la barcaza tipo Oversize Tanker. Los estudios se centraron en determinar la relación global entre deformación y fuerza de contacto con el objetivo de implementarlo en análisis más simples para situaciones de diseño. Uno de los estudios fue llevado a cabo por [Consolazio y colaboradores \(2008, 2010\)](#) en la Universidad de Florida y el otro fue conducido por [Harik y colaboradores \(2008a, 2008b\)](#) en la Universidad de Kentucky. Ambos utilizaron modelo detallados de elementos finitos. Sin embargo existen algunas diferencias en el enfoque utilizado.

[Consolazio y colaboradores \(2008, 2010\)](#) utilizaron modelos constituidos solamente de elementos de lámina para modelar tanto el casco como los refuerzos internos de la barcaza y definieron como dominio la porción delantera de la barcaza. Para forzar la deformación de la proa de la barcaza utilizaron como condición de borde en la sección de corte una velocidad constante. Por el otro lado, [Harik y colaboradores \(2008a\)](#) utilizaron elementos de lámina para el casco y elementos de viga para los refuerzos internos, modelaron barcazas completas y definieron condiciones iniciales de velocidad. Ambos autores estudiaron la influencia de la geometría de la pila impactada en la relación carga-deformación de la barcaza.

Como principal limitación se puede mencionar que las deformaciones máximas que se han alcanzado en estos estudios son del orden de los 5 m, por lo que la energía de deformación asociada es menor que la energía que se disiparía en algunos casos de análisis de interés a nivel regional. Adicionalmente resulta de mayor interés investigar el comportamiento del tipo de barcaza que se fabrica a nivel local y que posee características diferentes a las barcazas estudiadas previamente.

## 3 COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DE BARCAZAS REGIONALES

El análisis del comportamiento estructural de barcazas se realiza mediante modelos de elementos finitos. En las secciones siguientes se muestran algunos aspectos de los mismos.

### 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. El acero especificado para la construcción de las barcazas es acero tipo ASTM A36. 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 1 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. La barcaza tolva tiene un volumen de bodega de 3690 metros cúbicos y un desplazamiento de 3100 toneladas totalmente cargada. La barcaza tanque tiene una bodega de 3124 metros cúbicos dividida en cuatro compartimientos y posee un desplazamiento de 2900 toneladas totalmente cargada.

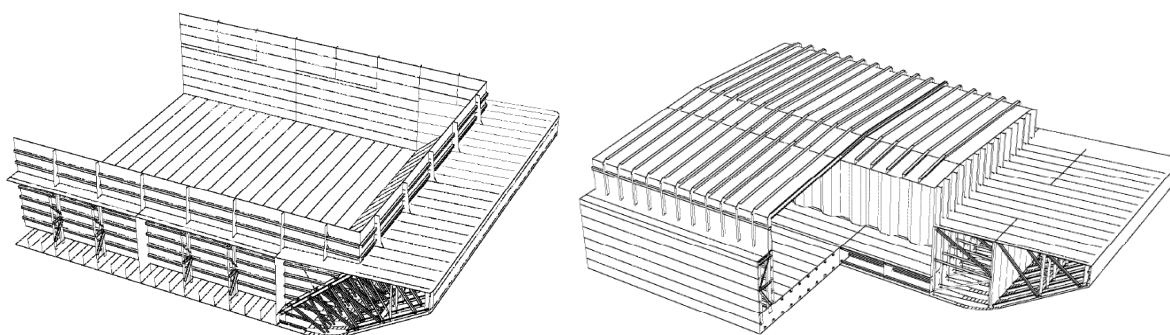


Figura 1. Geometría de proa de barcazas de carga general y tanque tipo Paraná

### 3.2 Modelo de elementos finitos

Se crearon modelos detallados de elementos finitos basándose en los planos y especificaciones de las barcazas tolva y tanque tipo Paraná. Para el presente análisis se utilizó el programa de cálculo [ABAQUS \(2010\)](#). 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 a 15 metros. Se utilizaron elementos de lámina cuadrangulares de 4 nodos y triangulares de 3 nodos (S4R y S3R) para representar el casco, mamparas y vigas internas de refuerzo de las barcazas. Estos elementos, capaces de representar grandes rotaciones y deformaciones finitas, utilizan la técnica de deformación de corte impuesta para el comportamiento flexional y una técnica de estabilización de mecanismos sin energía de deformación para el comportamiento membranal. El comportamiento del material se definió por tramos de acuerdo a los diagramas tensión deformación del acero ASTM A36. Se consideró la falla del material para una deformación plástica equivalente del 20 %, para lo cual se eliminan del análisis los elementos que cumplen con este criterio durante el proceso de cálculo. El análisis incorpora a su vez la no linealidad geométrica.

Se consideró ventajoso modelar las vigas internas de refuerzo, que son de sección abierta, con elementos de láminas para poder capturar el pandeo local de las mismas. La unión entre las vigas internas y las vigas de refuerzo del casco, que se realiza mediante soldadura, se modeló mediante ecuaciones de restricción entre los grados de libertad involucrados en la zona de unión. De esta manera no se considera la posible falla de la unión entre vigas. En los modelos la carga de la barcaza no es modelada pero se tiene en cuenta su masa asignando su inercia a los elementos que representan el casco interno en la zona del contenedor.

La estructura impactada se modeló como totalmente rígida y se la representó mediante elementos de superficie con sus desplazamientos fijos. Se considera adecuada esta hipótesis ya que los objetos impactados generalmente son bloques masivos de hormigón, donde se desprecia la energía disipada por el posible daño.

Se utilizó una definición de contacto general. 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.

Se definieron dos tipos diferentes de análisis:

- Modelo parcial de barcazas
- Modelo de barcazas completas

En el modelo parcial de barcazas se modeló la porción delantera de las barcazas, incluyendo la proa y el cuerpo de las mismas hasta una longitud total de 20 m. En estos casos se utilizó una condición de borde de velocidad constante de 5 m/s en la sección donde se realizó el corte. Para verificar que la velocidad no afectara considerablemente a los resultados se realizaron análisis con diferentes velocidades como condición de borde.

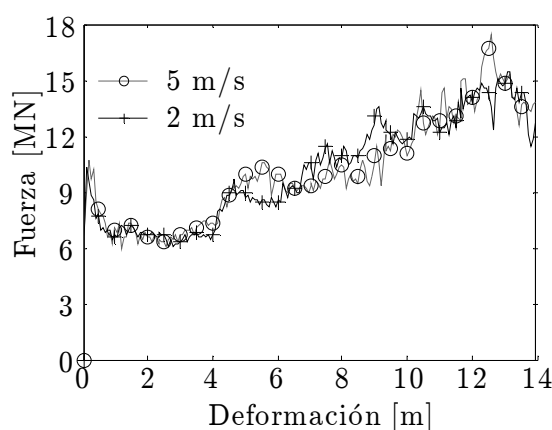


Figura 2. Influencia de velocidad en la relación carga deformación

En la Figura 2 se muestran los resultados del impacto centrado de una barcaza tolva contra una pila cilíndrica de 6 m de diámetro a 2 m/s y 5 m/s calculado mediante el modelo que considera la porción delantera de la barcaza, donde se puede observar que los resultados no varían considerablemente.

En estos modelos se utilizó una discretización uniforme, ya que la deformación abarca una porción considerable del modelo. La relación carga deformación se obtuvo de forma directa, ya que la deformación total es igual al tiempo por la velocidad constante que se utilizó como condición de borde.

En cambio, en los modelos de barcazas completas se definió la geometría completa de las barcazas y se utilizó una condición inicial de velocidad. En estos casos se utilizó una discretización más detallada en la porción delantera de las barcazas y más gruesa en el resto de la barcaza. La relación carga deformación se obtiene de interpolar la historia de carga y la historia de desplazamientos, ya que en este tipo de análisis la velocidad de la barcaza cambia en el tiempo. Para simular la acción de la presión hidrostática se utilizaron resortes en la porción inferior de las barcazas. Se utilizan ecuaciones de restricción para que los nodos inferiores de los elementos de resortes tengan los mismos desplazamientos en el plano horizontal que el nodo superior y se fijan los desplazamientos verticales, de esta forma los

resortes siempre actúan en dirección vertical. La rigidez de los resortes se calcula como el peso específico del agua multiplicado por el área de influencia de cada resorte.

Para modelar el efecto de las eslingas en impactos de grupos de barcazas se utilizaron elementos uniaxiales que actualizan su dirección de acción durante el análisis. Estos son elementos toman esfuerzos de tracción solamente, utilizan una relación elasto plástica perfecta y adoptan una deformación límite de falla. Para los casos en donde se estudia el comportamiento carga deformación de la barcaza y con el objetivo de que la deformación alcance la magnitud esperada se modeló una sola barcaza, incorporando la acción de las barcazas posteriores mediante la asignación de masa adicional en los nodos de la parte posterior de la barcaza.

Cabe destacar que el modelo de proas de barcazas fue utilizado por [Consolazio et al. \(2008\)](#) para investigar el comportamiento carga deformación de las mismas, mientras que Harik et al. utiliza el modelo de barcazas completas con el mismo objetivo. Es interesante realizar una comparación de ambos modelos, manteniendo todos los demás parámetros con el objetivo de poner en evidencia el efecto de las condiciones de borde en los resultados.

La Figura 3 muestra la comparación de los resultados para dos casos particulares. En general la fuerza en el modelo parcial de las barcazas es mayor que la fuerza en el modelo de la barcaza completa. Esto se puede atribuir a que la condición de borde de velocidad constante es más restrictiva que la condición de borde elástica en conjunto con la condición inicial de velocidad.

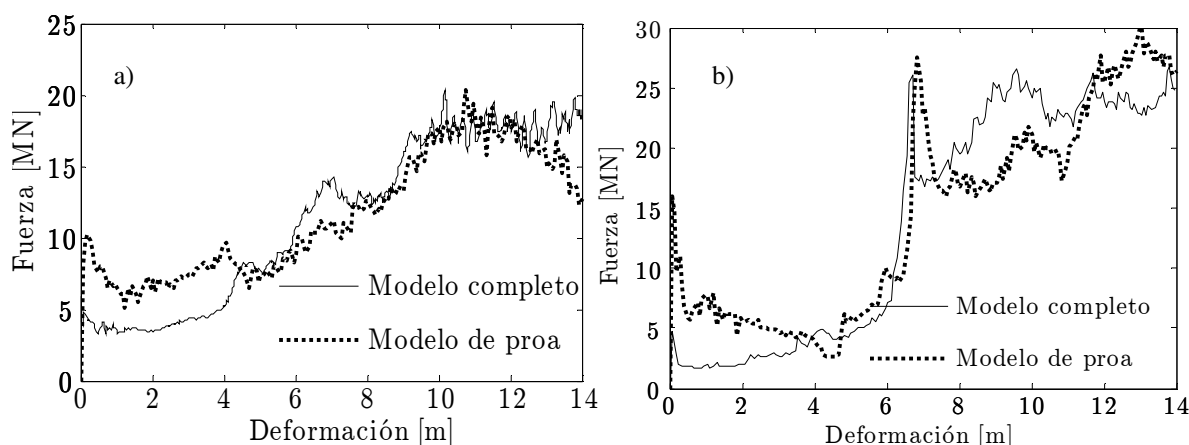


Figura 3. Comparación de resultados de modelo de proa y modelo de barcaza a) Barcaza tolva contra pila cilíndrica de 10 m de diámetro b) Barcaza tanque contra pila rectangular de 6 m de ancho

Cabe aclarar que en el modelo parcial de las barcazas la deformación ocurre en zonas alejadas al límite de dominio simulado para la mayoría de los casos analizados. Sin embargo, para el impacto oblicuo de barcazas tipo Tolva se observó que la deformación se concentra cerca de la zona donde se define la condición de desplazamiento prefijado, como se muestra en la Figura 4a, fenómeno que no ocurre en el modelo completo de barcazas (Figura 4b). Esto indicaría que el modelo parcial de la barcaza Tolva no es adecuado para analizar este tipo de impacto. En cambio en los resultados de los modelos completos de barcazas no existe este inconveniente.

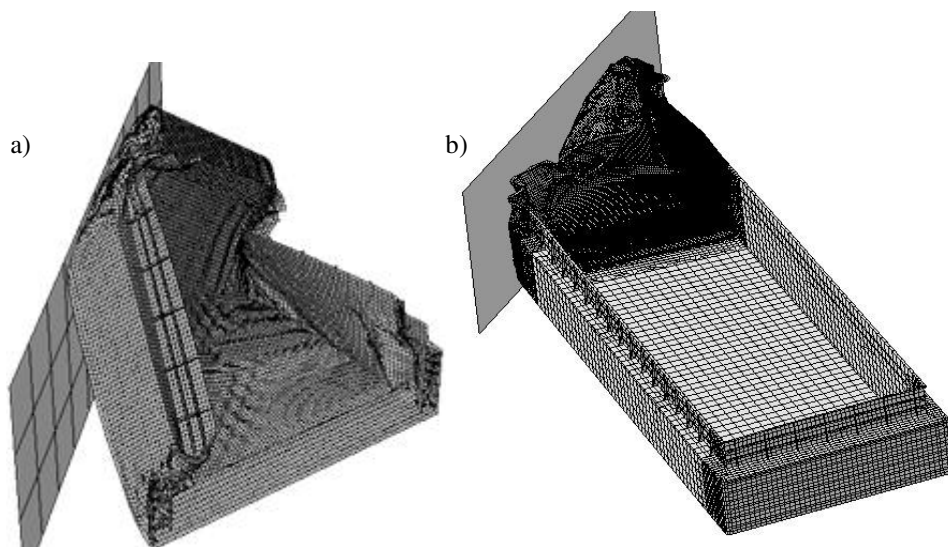


Figura 4. Resultados para impacto oblicuo de barcaza tolva a) Deformación localizada cerca del límite del dominio simulado en modelo parcial de barcaza b) Deformación en modelo completo de barcaza

Los resultados presentados en este trabajo se obtuvieron por medio del modelo de barcazas completas, debido a que se considera que la condición de borde en modelo de barcazas completas es más realista que en el modelo parcial y a que es posible evaluar el comportamiento en casos de impactos contra muros de manera oblicua.

### 3.3 Curvas carga deformación

Las curvas carga deformación obtenidas para los distintos casos considerados muestran en las Figuras 5 y 6 de acuerdo a la dimensión de la pila. En estas figuras se filtraron las longitudes de onda menores a los 0.4 m.

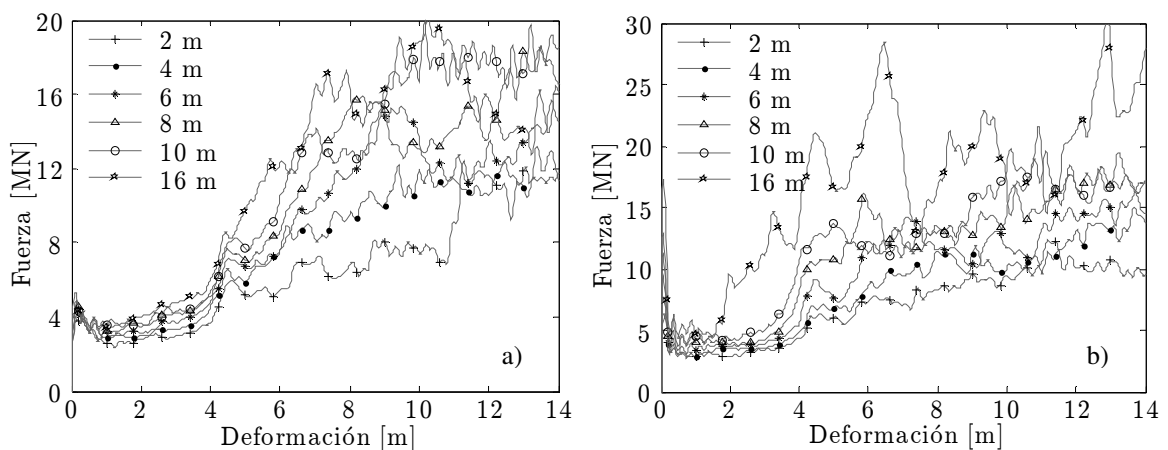


Figura 5. Relación carga deformación de barcaza tolva de acuerdo a la dimensión de pila contra pila a) cilíndrica b) rectangular

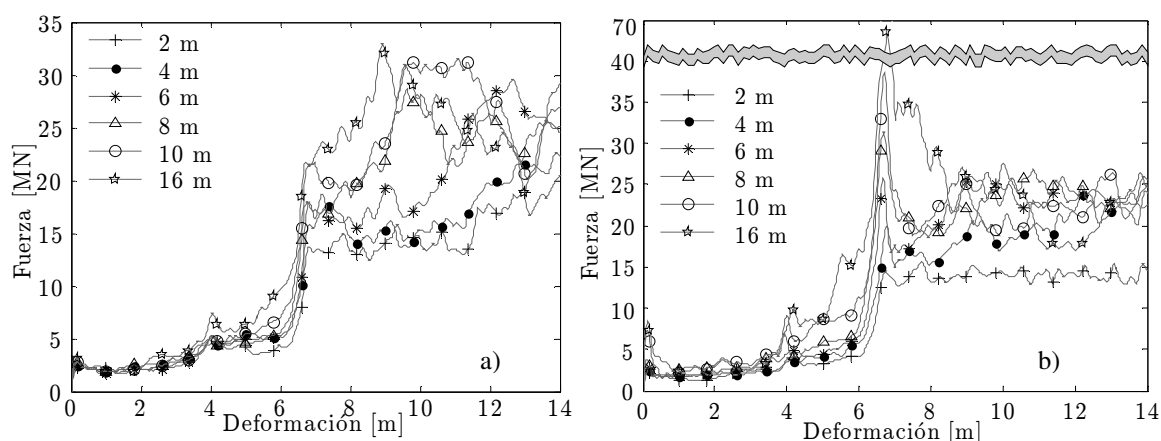


Figura 6. Relación carga deformación de barcaza tanque de acuerdo a la dimensión de pila contra pila a) cilíndrica b) rectangular

En general para deformaciones del orden de 12 m en adelante la fuerza fluctúa alrededor de un valor constante, como se muestra en la Figura 7. Este fenómeno se debe a que en el para este intervalo la deformación se localiza en el cuerpo de la barcaza y que en esta zona las características estructurales son regulares.

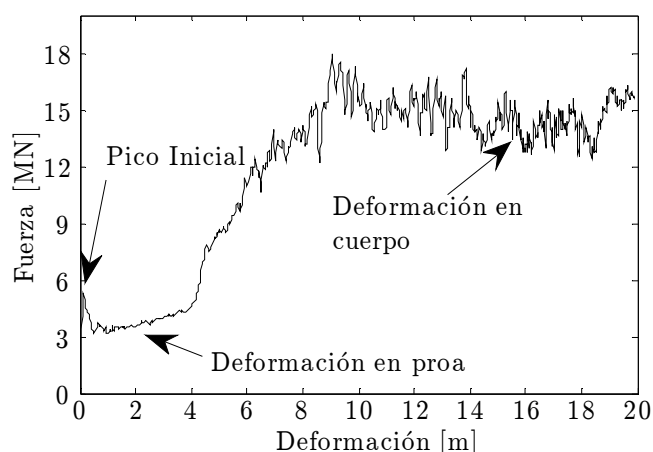


Figura 7. Relación carga deformación extendida barcaza tolvacontra pila cilíndrica de 10 m de diámetro

#### 4 MÉTODO DE HISTORIA DE CARGA APLICADA

En el análisis de impactos de barcasas se han utilizados una serie de distintos enfoques, cada uno con diferentes capacidades y nivel de complejidad. Los modelos más detallados se ha utilizado como una herramienta de verificación, sin embargo debido a la gran cantidad de tiempo que es necesario en su definición y su cálculo es muy probable que su utilización no sea posible en un escenario de diseño. Es por esto que se han propuesto métodos mas simples que permitan estimar razonablemente las solicitaciones generadas por el impacto de barcasas y a su vez sean aplicables en una situación de diseño.

El método de historia de carga aplicada fue propuesto por [Consolazio et. al \(2008\)](#), en el cual se estima la historia de carga directamente, para luego aplicarla al análisis de la estructura del puente, basándose en consideraciones de impulso y cantidad de movimiento.

Una de las hipótesis del método consiste en adoptar una relación elasto perfectamente

plástica para representar la carga deformación de la estructura de la barcaza como un límite superior a los resultados obtenidos mediante modelos de elementos finitos. Esta simplificación no se corresponde con los resultados obtenidos en el caso de las barcazas tipo Paraná para impactos de gran energía donde la deformación supera al largo de la proa de la barcaza.

#### 4.1 Modificación del método de historia de carga aplicada

En los resultados obtenidos para las barcazas tipo Paraná se observó que la fuerza de impacto cambia considerablemente cuando la deformación excede el largo de la proa y alcanza al cuerpo de la barcaza. Teniendo en cuenta este fenómeno se propone utilizar dos niveles de carga de fluencia, uno para la proa y otro para el cuerpo de la barcaza, para implementar una modificación al método de historia de carga aplicada originalmente propuesto por [Consolazio et. al \(2008\)](#).

Para determinar los valores de carga de fluencia y la deformación a la cual se produce la transición, se realizó un ajuste bilineal de la relación energía deformación para los casos investigados, en donde la pendiente de cada tramo representa la carga de fluencia en la zona de proa y del cuerpo de la barcaza respectivamente. En la Figura 8 se puede observar un ejemplo de este ajuste.

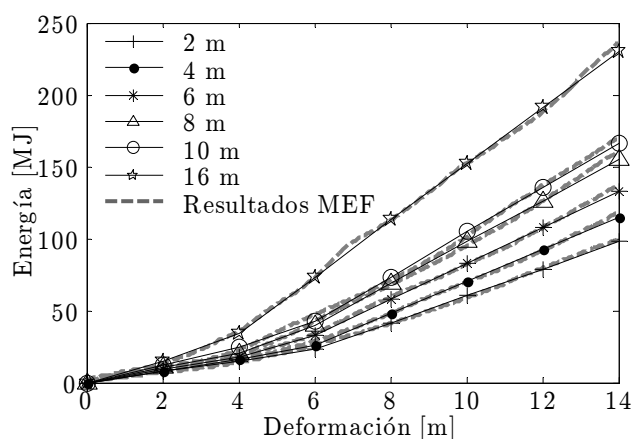


Figura 8. Ajuste bilineal de energía de deformación, barcaza tolva contra pila rectangular de acuerdo a la dimensión de pila

En base a los resultados obtenidos se pueden estimar los valores de carga, el punto de transición y la rigidez inicial mediante la siguiente regresión lineal en función del tipo de barcaza y de la forma y dimensión de la pila, en unidades de metros, con los valores indicados en la Tabla 1 y donde A es el término independiente y B el término lineal:

$$F = A + B.D \quad (1)$$

donde d es la deformación en el punto de transición en m,  $F_1$  y  $F_2$  son los valores de carga de fluencia en zona de proa y cuerpo de la barcaza respectivamente en MN, D es la dimensión de la pila en m y  $k_b$  es la rigidez inicial expresada en MN/m.



Barcaza Tolva				
Pila Cilíndrica	d [m]	F <sub>1</sub> [MN]	F <sub>2</sub> [MN]	k <sub>b</sub> [MN/m]
A	6.54	3.44	8.95	264
B	-0.07	0.08	0.55	69
Pila Rectangular	d [m]	F <sub>1</sub> [MN]	F <sub>2</sub> [MN]	k <sub>b</sub> [MN/m]
A	6.29	2.94	8.15	212
B	-0.15	0.27	0.73	81
Barcaza Tanque				
Pila Cilíndrica	d [m]	F <sub>1</sub> [MN]	F <sub>2</sub> [MN]	k <sub>b</sub> [MN/m]
A	6.81	2.7	15.06	79
B	-0.03	0.04	0.85	-3
Pila Rectangular	d [m]	F <sub>1</sub> [MN]	F <sub>2</sub> [MN]	k <sub>b</sub> [MN/m]
A	6.88	2.28	16.37	35
B	-0.13	0.08	0.61	8

Tabla 1. Coeficientes de fuerza de fluencia y rigidez para impactos centrados

De esta manera se puede calcular la historia de carga mediante el método propuesto por [Consolazio et al. \(2008\)](#) y evaluar si la deformación de la proa es menor al punto de transición definido previamente. En este caso la historia de carga se determina mediante el procedimiento original. La deformación de la proa en este caso se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$\delta = V_0^b t - \frac{1}{2} \frac{m^b}{F_1} t^2 \quad (2)$$

$$t = \frac{m^b}{F_1} \sqrt{(V_0^b)^2 - \left( \frac{F_1}{\sqrt{k_s m^b}} \right)^2} \quad (3)$$

$$k_s = \left( \frac{1}{k_b} + \frac{1}{k_p} \right)^{-1} \quad (4)$$

donde  $\delta$  es la deformación permanente de la barcaza,  $V_0^b$  es la velocidad inicial de la barcaza;  $m^b$  es la masa de la barcaza;  $F_1$  es la fuerza de fluencia de la proa de barcaza;  $t$  es el lapso de tiempo de fluencia;  $k_s$  es la rigidez equivalente del sistema barcaza-puente-suelo;  $k_b$  es la rigidez inicial de la barcaza y  $k_p$  es la rigidez del puente y fundación.

En el caso que la deformación de la barcaza exceda al punto de transición, la historia de carga se puede aproximar de manera más ajustada mediante dos etapas con diferente fuerza de fluencias, en cuyo caso es necesario realizar los siguientes pasos para determinar la historia de carga:

a) Se calcula el lapso de tiempo en la etapa de fluencia en la proa de la barcaza de la siguiente manera:

$$t_1 = \frac{V_0^b - \sqrt{(V_0^b)^2 - 2 \frac{F_1 \delta}{m^b}}}{\frac{F_1}{m^b}} \quad (5)$$

b) Se calcula la velocidad remanente de la barcaza el instante en el que la deformación alcanza el punto de transición:

$$V_1 = V_0^b - \frac{F_1 t_1}{m^b} \quad (6)$$

c) Se calcula el lapso de tiempo en la etapa de fluencia en el cuerpo de la barcaza:

$$t_2 = \frac{m^b V_1}{F_2} \quad (7)$$

d) Se calcula el lapso de tiempo de descarga:

$$t_d = \frac{\pi}{2} \frac{m^b}{\sqrt{k_s m^b}} \quad (8)$$

e) Se determina la historia de carga como indica la Figura 9:

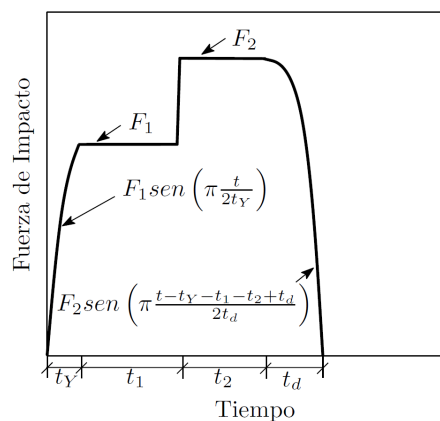


Figura 9. Historia de carga para impacto de gran energía

## 4.2 EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MÉTODO SIMPLIFICADO

Con el objetivo de evaluar el desempeño del método simplificado propuesto en un caso real, se comparan los desplazamientos de la pila principal del proyecto de puente entre las ciudades de Reconquista y Goya sobre el río Paraná. Para esto se aplica la historia de carga calculada mediante el método simplificado y el método acoplado mediante la fuerza de contacto, [Luperi et. al \(2013\)](#) y se evalúan los resultados.

## 4.3 Modelo de puente

El puente proyectado entre las ciudades de Reconquista y Goya, es un puente atirantado, constituido por un plano de obenques central, con dos pilas principales de más de 120 m de altura sobre el nivel del agua. El tablero está formado por una viga cajón trapezoidal de 4.5 m de altura, 8 m de ancho inferior y 11.9 m de ancho superior. Esta viga continua tiene luces de, 90 – 180 – 390 – 180 – 90 m, formando una longitud total de 930 m. La separación típica de los obenques es de 6 m. Las pilas principales tienen forma romboidal y están constituidas por columnas de hormigón de sección hueca. El tablero apoya en las pilas principales, sobre una viga horizontal. En la parte superior, los brazos de las pilas principales se unen y dan lugar al anclaje de los obenques. La pila apoya sobre un gran cabezal, que se encuentra al nivel medio del Río Paraná. El cabezal de las pilas principales tiene 50 m de largo, 23 m de ancho y 5 m de alto. Está soportado por un grupo de 46 pilotes, de 2 m de diámetro y de 50 m de largo, fundados en arenas limpias y densas. Con el objetivo de disminuir el ancho plano susceptible al impacto de embarcaciones, el cabezal tiene forma trapezoidal.

A fines de estudiar la respuesta de la estructura, se considera un modelo del puente

principal, desarrollado en el programa de análisis SAP2000 (1995). El tablero es modelado mediante una viga con propiedades de rigidez y masa equivalentes, con apoyos verticales para incorporar la acción de los obenques; simplificación que se considera adecuada dado que el modelo sólo es utilizado en este trabajo a fines de representar la respuesta frente a un impacto lateral de embarcación a nivel de pila principal.

Para el análisis del comportamiento a carga lateral de los pilotes, se utiliza el método p-y, donde se considera al pilote inmerso en resortes no lineales. Donde se discretiza al pilote en segmentos y se le aplican resortes no-lineales en los extremos de cada elemento. Estos resortes son relaciones fuerza-desplazamiento, que representan la reacción que ofrece el suelo al ser desplazado por el pilote. En el modelo considerado se utilizaron curvas p-y del tipo Reese y colaboradores (1974) realizó el análisis para una carga monótonamente creciente. Los parámetros que definen las curvas p-y son representativos de la arenas del Río Paraná, para lo cual se consideró un ángulo de fricción interna de 38 grados y un peso específico seco de  $17.1 \text{ kN/m}^3$ . En la Figura 10 se muestra una representación del modelo numérico utilizado, donde los pilotes son modelados mediante elementos de viga, el cabezal es modelado mediante un emparrillado equivalente, y la pila es modelada mediante segmentos de viga con deformación de corte. La fundación de las pilas de retención es modelada mediante resortes longitudinales y de rotación equivalentes.



Figura 10. Esquema del modelo numérico del puente Reconquista-Goya

El proceso de colisión es analizado mediante análisis dinámico modal, donde se consideraron los primeros 12 modos naturales de vibración. Dada la naturaleza transitiva del proceso de impacto, en el modelo se desprecia el amortiguamiento.

#### 4.4 Resultados

En esta sección se analiza el impacto de una fila de 4 barcazas tanque tipo Paraná viajando a  $4.15 \text{ m/s}$  contra una pila rectangular de  $2 \text{ m}$  de ancho. La historia de carga correspondiente obtenida mediante modelo acoplado mediante la fuerza de contacto y método de historia de carga aplicada se muestra en la Figura 11.

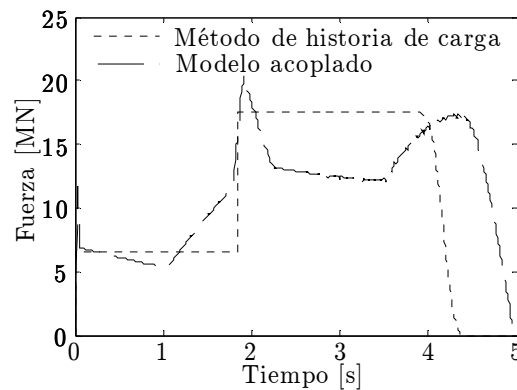


Figura 11. Historia de carga para impacto de una fila barcazas tolva

El desplazamiento del cabezal calculado mediante ambas historias de carga se muestra en la Figura 12 donde se puede observar que el desplazamiento máximo del cabezal calculado mediante el método acoplado mediante la fuerza de contacto es un 27 % mayor al calculado mediante el método de historia de carga.

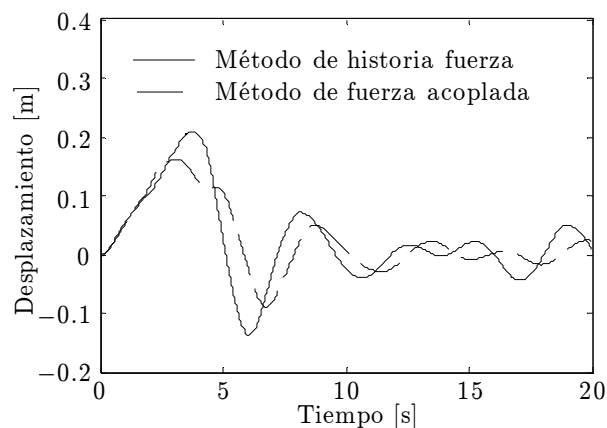


Figura 12. Historia de carga para impacto de una fila barcazas tolva

Esto se puede explicar si se observan las transformadas de Fourier de las historias de carga de ambos métodos propuestos y se comparan con la función de transferencia entre la fuerza y el desplazamiento del punto de impacto que se muestran en la Figura 13. Se puede observar que las primeras frecuencias naturales de la estructura son de 0.21, 0.26 y 0.34 s y que para el rango de las dos primeras frecuencias naturales existe una diferencia entre las transformadas de las historias de cargas calculadas mediante el modelo acoplado y el método de historia de carga, siendo este último valor aproximadamente el doble.

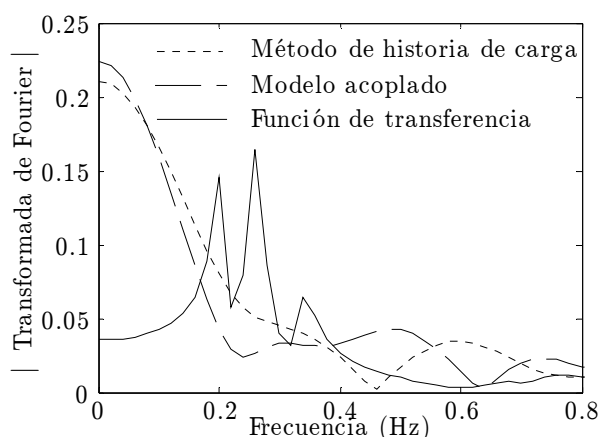


Figura 13. Historia de carga para impacto de una fila barcazas tolva

## 5 CONCLUSIONES

En este artículo se presenta el análisis estructural de barcazas tipo Paraná, con el objetivo de su aplicación al diseño de puentes. En función de esto se comenta sobre la influencia de algunos aspectos en los modelos numéricos utilizados, incluyendo el efecto del dominio modelado y las condiciones de borde utilizadas.

En base a los resultados de los modelos de elementos finitos se propone un método simplificado aplicable a nivel de diseño, el cual puede captar el cambio en la fuerza de impacto para deformaciones mayores a la dimensión de la proa asociados a impactos de gran energía.

Se evalúa el desempeño del método simplificado respecto a un método de análisis más riguroso, en un ejemplo que corresponde con las características de los puentes existentes a nivel regional. En este ejemplo se puede observar que existen diferencias en las solicitaciones en la fundación del puente calculado mediante el método de historia de carga aplicada y mediante el modelo acoplado mediante la fuerza de contacto. Esto se debe a las limitaciones del método de historia de carga aplicada, es por esto que en la opinión del autor es deseable que se utilice el método acoplado mediante la fuerza de contacto para impactos de grupos de barcazas. Sin embargo, el método de historia de carga aplicada se propone para los casos de diseño en que no sea posible otro tipo de análisis.

## 6 REFERENCIAS

- Abaqus FEA 6.10, Dassault Systèmes Simulia Corp., Providence, R.I., USA, 2010
- Consolazio, G. y McVay, M.C. Development of Improved Bridge Design Provisions for Barge Impact Loading. Report RPT-2008/51117, Department of Civil y Coastal Engineering, University of Florida, 2008.
- Consolazio G., M. T. Davidson y D. J. Getter. Vessel Crushing y Structural Collapse Relationships for Bridge Design. RPT-2010/72908/74039, Department of Civil y Coastal Engineering, University of Florida, 2010.
- Harik I., Yuan P. & Davidson M. Equivalent Barge y 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.
- Luperi F. J. y Pinto F. Comportamiento Estructural de Barcazas en Impactos contra Pilas

de Puentes. XXI Congreso sobre de Métodos Numéricos y sus Aplicaciones. Salta, Argentina, 2013.

Reese L. C., Cox W. R. & Koop F. D. (1974) "Analisis of Laterally Loaded Piles in Sand" Paper No. OTC 2080, Proceedings, Fifth Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas. (GESA Report No. D-75-9).

SAP2000. Structural Analysis Program, Computers y Structures, Inc., University Ave. Berkeley, CA, 1995.