

## HISTORIA DE CARGA DEBIDO A IMPACTO FRONTAL DE BARCAZAS CONTRA PILAS DE PUENTES

F. José Luperi<sup>a</sup>, Federico Pinto<sup>b</sup> and Carlos A. Prato<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:** puente, impacto, barcaza, historia de carga

**Resumen.** El impacto de embarcaciones es uno de los escenarios que deben incorporarse en el diseño de puentes que cruzan vías navegables. Esto requiere una estimación confiable de la historia de carga que se genera durante el proceso de impacto. El estado de la práctica actual se centra en la aplicación de las recomendaciones emitidas por la American Association of State Highways and Transportation Officials (AASHTO). Estas recomendaciones utilizan un método “estático equivalente” que posee varias limitaciones. Estudios más recientes (Consolazio et al., RPT-2008/51117 UF 2008) han propuestos métodos más avanzados, desde análisis no-lineales acoplados mediante la fuerza de impacto, hasta métodos de diseño simplificados basados en consideraciones energéticas y de cantidad de movimiento. Los métodos propuestos concuerdan con las estimaciones de la historia de carga, para los casos en que la masa asociada al punto de impacto es despreciable, mientras que de lo contrario, se observan diferencias. Estas diferencias son relevantes para impactos de baja energía. Sin embargo, las diferencias tienden a disimularse para colisiones de alta energía, debido a la duración del impacto. En este artículo se presenta un método de aplicación directa, capaz de incorporar los efectos inerciales en la estructura impactada, produciendo mejores estimaciones para un rango más amplio de condiciones de impacto.

## 1 INTRODUCTION

El impacto de embarcaciones es uno de los posibles escenarios que deben incorporarse en el diseño de puentes que cruzan vías navegables. La literatura indica que ocurre en promedio una colisión contra puentes por año con consecuencias serias a nivel mundial (Larsen, 1993). Esto destaca la importancia del diseño de puentes contra impacto de embarcaciones y la necesidad de contar con herramientas confiables para el análisis de estos eventos.

Si bien en el ámbito internacional existe una normativa para el diseño de puentes frente a colisión de embarcaciones elaborada por la AASHTO, éstas no consideran algunos aspectos importantes que tienen influencia en la magnitud y duración de las fuerzas de impacto. Trabajos recientes realizados en la Universidad de Florida (EEUU) (Consolazio et al. 2008, 2009) y en la Universidad de Kentucky (Harik et al. 2008a, 2008b), han avanzado considerablemente las metodologías de diseño respecto al impacto de barcasas. Sin embargo las tipologías típicas de puentes para las cuales han sido desarrollados los métodos de análisis antes mencionados difieren de la tipología usual de puentes sobre vías navegables en nuestro medio. De esta manera, el presente trabajo se enfoca en analizar la aplicabilidad y posibles modificaciones a los métodos de predicción de historias de fuerza existentes para los puentes correspondientes a la tipología regional.

## 2 DETERMINACIÓN DE FUERZAS DE COLISIÓN

Para la determinación de las historias de carga debido a impacto de barcasas existen actualmente una variedad de métodos de análisis. Éstos van desde métodos simplificados, basados en consideraciones energéticas y cantidad de movimiento, hasta métodos de análisis más sofisticados, de interacción barcaza-pila acoplados mediante la fuerza de contacto entre la pila y el grupo de barcasas. A continuación se hace una breve descripción de estos métodos y sus limitaciones.

### 2.1 Métodos estáticos equivalentes

La norma actualmente vigente en los Estados Unidos para el diseño de puentes contra impacto de embarcaciones elaborada por la AASHTO, determina una fuerza de diseño “estática equivalente”. Esta norma se basa en consideraciones energéticas y relaciones carga-deformación empíricas para proa de barcasas. Entre las limitaciones de este método de diseño cabe mencionar que esta fuerza estática equivalente, no incorpora las características dinámicas del impacto, ni los efectos dinámicos sobre el puente. Las relaciones carga-deformación que utiliza, no tiene en cuenta la forma ni dimensión de la pila, factores que influyen de manera considerable en la fuerza de impacto (Consolazio et al. 2008). Adicionalmente el método AASHTO no considera la influencia de la flexibilidad de la pila ni la interacción entre barcasas para el cálculo de la fuerza de impacto.

### 2.2 Métodos acoplados mediante la fuerza de contacto

*Método acoplado de impacto de embarcaciones (CVIA)*

Consolazio y colaboradores (2008) desarrollaron un método de análisis que utiliza un modelo acoplado del sistema embarcación-pila-suelo, CVIA por sus siglas en inglés. El término acoplado hace referencia al uso de la fuerza de contacto para vincular el sistema de un grado de libertad no-lineal, que representa a una barcaza ó grupo de barcasas, y el sistema dinámico de múltiples grados de libertad no-lineal que representa la estructura del puente. Se puede

observar un esquema de este método en la Figura 1.

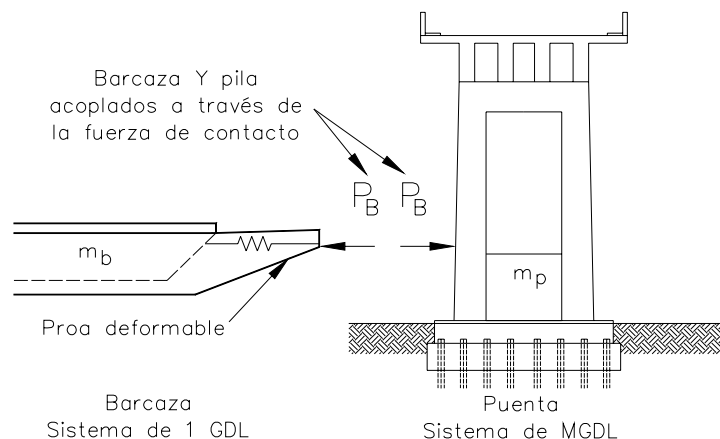


Figura 1. Modelo del método de análisis acoplado CVIA (Consolazio et al., 2008)

Según estos autores, la relación carga-deformación de la proa puede ser incorporada como una relación elasto-plástica, donde la fuerza de fluencia y la deformación asociada se calculan en base a la forma y dimensión de la pila impactada. Los valores que definen estas relaciones se pueden observar en la Figura 2.

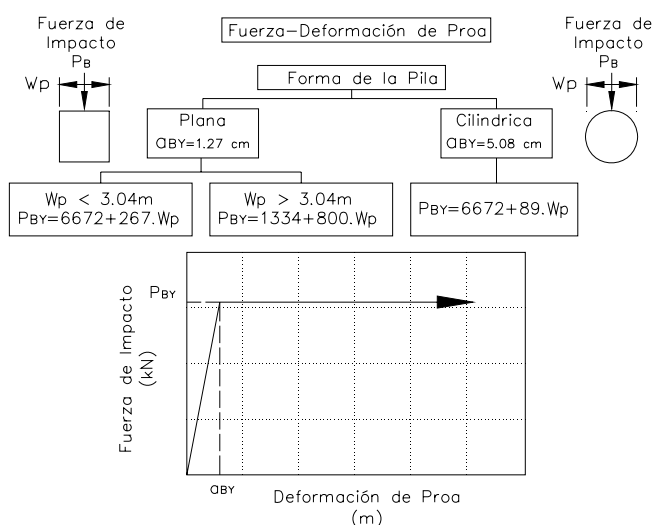


Figura 2. Relación carga-deformación (Consolazio et al., 2008)

El modelo fue implementado en el programa para análisis de puentes, FB-Multipier, desarrollado por el Bridge Software Institute (BSI), dependiente de la Universidad de Florida, capaz de realizar análisis acoplados y modelar la pila y superestructura. Este programa utiliza elementos de viga para representar las pilas, elementos de placas para representar a los cabezales y resortes distribuidos no-lineales para representar al suelo, entre otros. También se puede utilizar materiales de comportamiento lineal y no-lineal. La historia de carga generada por el impacto de barcas surge del procedimiento de cálculo, donde se resuelven las ecuaciones de movimiento del sistema. Los resultados de este método de análisis son considerados por el autor como resultados de referencia para comparar el desempeño de otros

métodos de diseño. Como limitación cabe aclarar que este método considera al grupo de barcazas con un solo grado de libertad, y por lo tanto no tiene en cuenta la interacción entre las mismas.

*Método de múltiples grados de libertad (MGL)*

Harik y colaboradores (2008b) propusieron un modelo para el caso de impacto perpendicular y simétrico de un grupo de barcazas. Este modelo unidimensional consiste en un grupo de masas y resortes elasto-plásticos donde cada masa representa una barcaza. Y cada resorte elasto-plástico, representa los vínculos que poseen las barcazas con las demás barcazas circundantes, de acuerdo a la situación que se encuentra dentro del grupo. Se puede observar un esquema de este modelo en la Figura 3.

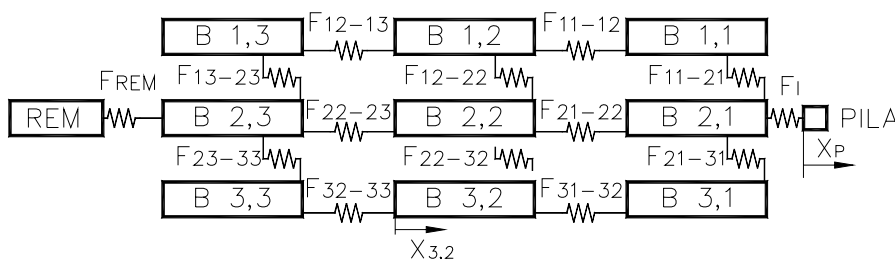


Figura 3. Modelo de grupos de barcazas (Harik et al., 2008b)

En este modelo existen tres tipos de vínculos: El primer tipo es la curva carga-deformación de la proa. Esta solo trabaja a compresión y vincula la barcaza que impacta con el grado de libertad correspondiente al punto de impacto en la pila. Este vínculo se incorpora con una relación elasto-plástica no-lineal. El segundo tipo corresponde a los vínculos frontales entre barcazas de la misma fila. Estos trabajan de forma diferente a compresión (determinado por la rigidez del cuerpo de la barcaza) y a tracción (determinado por los cables de acero). Este vínculo se incorpora con una relación elasto-plástica con endurecimiento (a compresión) y una relación elasto-plástica (a tracción). El tercer tipo corresponde a los vínculos laterales entre barcazas de distintas filas. Estos vínculos modelan los amarres con cables de acero y trabajan solo a tracción, en cada una de las direcciones independientemente. Los vínculos frontales y laterales entre barcazas poseen una longitud libre (gaps) a la cual empiezan a trabajar. Esto corresponde a las condiciones prácticas de amarre. Se puede observar un esquema de estos vínculos en la Figura 4.

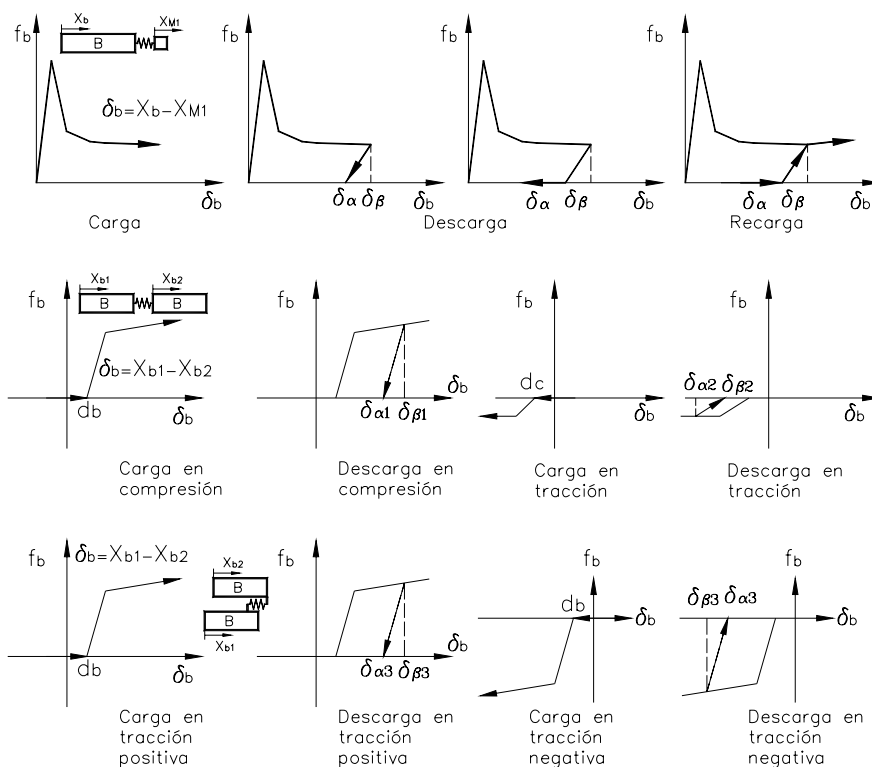


Figura 4. Relaciones carga-deformación del modelo unidimensional para impacto de grupos de barcasas a) proa b) vínculo entre barcasas de misma fila c) vínculo entre barcasas de misma columna. (Harik et al., 2008b)

La pila se modela como una viga en voladizo con dos masas puntuales, un resorte lineal y un resorte rotacional. La primera masa corresponde a la masa asociada al punto de impacto, la segunda masa corresponde a la superestructura y los resortes corresponden a la rigidez que aporta la superestructura. Se puede observar un esquema en la Figura 5.

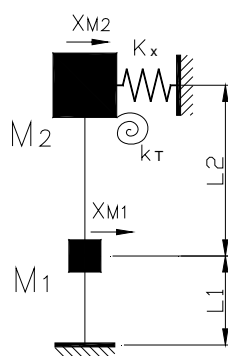


Figura 5 Modelo simplificado de pila. (Harik et al., 2008b)

La historia de carga producida por el impacto, surge como parte del procedimiento de cálculo, donde se resuelven las ecuaciones de movimiento de cada grado de libertad. Esta formulación tiene la ventaja de que incorpora la interacción entre las barcasas del grupo. Como limitación cabe mencionar que la respuesta de la pila se incorpora a través de un modelo simplificado.

### 2.3 Método simplificado

Consolazio y colaboradores (2008) desarrollaron la metodología de Fuerza de Impacto Aplicada, AVIL por sus siglas en inglés. Este método simplificado no requiere realizar un modelo acoplado de interacción barcaza-puente. En éste, se calcula la historia de carga directamente, en base a un conjunto de parámetros y luego se la aplica a la estructura para determinar los esfuerzos generados. El modelo considerado por este método se muestra en la Figura 6.

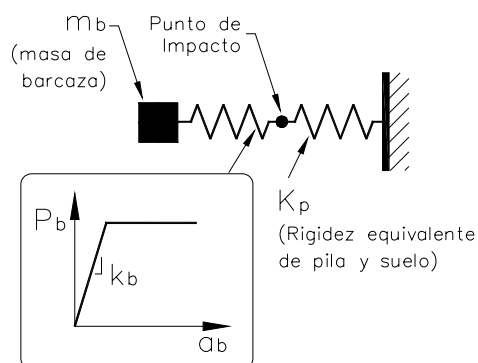


Figura 6 Modelo de Barcaza-Pila-Suelo. Método AVIL. (Consolazio et al., 2008)

El método se basa en la conservación de energía y en la cantidad de movimiento. Para casos elásticos asume una historia de carga con forma de mitad de onda sinusoidal. Para casos elasto-plásticos, el método adopta una historia de cargas de tres etapas. Una primera etapa en la cual las cargas en la proa de la barcaza aumentan hasta que se produce fluencia con forma de un cuarto de onda seno. Una segunda etapa durante la cual la carga se mantiene constante e igual a la carga de fluencia. Y una tercera etapa de descarga elástica al final del proceso de colisión. La forma de la historia de carga se puede observar en la Figura 7.

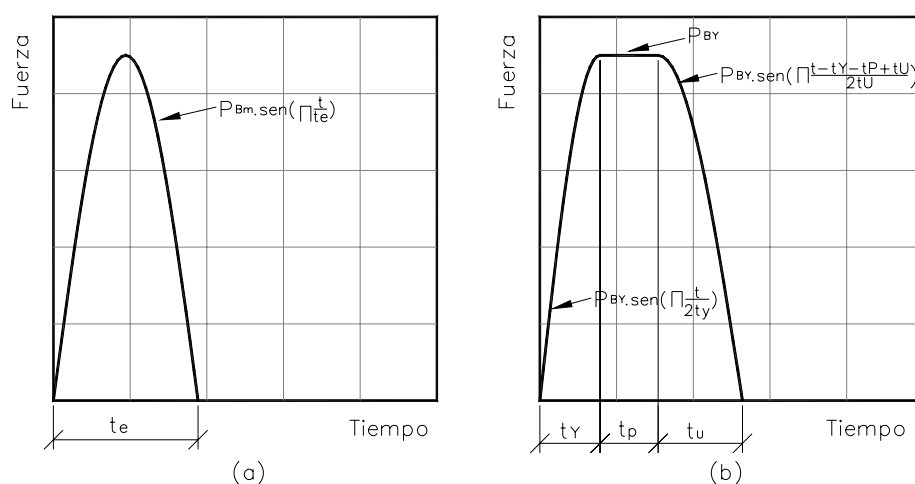


Figura 7 Historias de carga Método AVIL a) Caso elástico b) Caso elasto-plástico. (Consolazio et al., 2008)

Los resultados de este método simplificado son comparados por [Consolazio y colaboradores \(2008\)](#) para impactos de baja, media y alta energía cinética con los resultados del CVIA, encontrándose que ambos métodos producen historias de cargas muy similares para los casos estudiados.

## 2.4 Limitaciones de los métodos existentes

La tipología regional de puentes sobre vías navegables consiste principalmente en puentes atirantados, cuyas pilas principales están soportadas por masivos cabezales flotantes; es decir, ubicados a la altura del nivel de aguas normal del río. Las fundaciones consisten en grupos de pilotes excavados con camisa, que poseen una considerable longitud libre hasta el lecho de arenas del río, particularmente para los escenarios en los que se prevé la presencia de socavación.

Por otra parte, los puentes generalmente considerados para el desarrollo de metodologías en la literatura internacional, poseen una tipología un tanto diferente, consistiendo en general en puentes cuyos cabezales se hayan enterrados en el lecho, produciéndose el impacto directamente sobre la estructura de la pila. Los cabezales se encuentran frecuentemente enterrados debido a la utilización de pilotes metálicos hincados de pequeñas dimensiones, los cuales, debido a su baja rigidez lateral, deben encontrarse completamente inmersos en el lecho para prevenir problemas de pandeo. Estas diferencias constructivas resultan en que los puentes sobre vías navegables en nuestra región, posean una rigidez estática lateral generalmente menor, y una masa asociada al punto de impacto muy alta, respecto al caso de puentes con cabezales enterrados.

Debido a estas diferencias, es de esperar que la flexibilidad de la pila y la masa asociada al punto de impacto cumplan un rol importante en el proceso de impacto y que la interacción entre barcazas tenga influencia más marcada en la historia de carga.

| Método        | Tipo     | Curvas carga-deformación de proa | Influencia de flexibilidad de pila | Interacción entre barcazas |
|---------------|----------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| <b>AASHTO</b> | Estático | Meir-Dörnberg                    | No                                 | No                         |
| <b>CVIA</b>   | Dinámico | Consolazio                       | Si                                 | No                         |
| <b>MGL</b>    | Dinámico | Harik                            | Modelo Simplificado                | Si                         |
| <b>AVIL</b>   | Dinámico | Consolazio                       | Solo rigidez estática              | No                         |

Tabla 1 Características de los métodos existentes

La Tabla 1 resume las características salientes de los métodos de análisis actualmente disponibles en la literatura internacional. Como puede observarse, cada modelo tiene distintas capacidades y limitaciones. En general, para una situación de diseño es deseable disponer de un método que sea directo y simple. A su vez, este método tiene que producir historias de carga que concuerden con métodos más rigurosos.

Resulta de interés, entonces, estudiar el comportamiento del método simplificado AVIL en casos de aplicación sobre puentes de tipología regional. Adicionalmente, se estudian los resultados de un método simplificado propuesto, basado en la metodología AVIL, capaz de incluir en el análisis la masa asociada al punto de impacto.

### 3 IMPLEMENTACIÓN DE MÉTODO DE ANÁLISIS (MGL)

Para la verificación de los resultados se implementa un modelo de múltiples grados de libertad, basado en el modelo propuesto por Harik y colaboradores (2008b), incorporando modificaciones que serán descriptas a continuación. Una primera modificación consiste en utilizar una relación elasto-plástica para la rigidez de proa de la barcaza, propuesta por Consolazio, con el objetivo de obtener resultados comparativos con los obtenidos mediante el método simplificado AVIL. Otra modificación que se incorpora, es la utilización de la función respuesta a impulso de la estructura completa a fines de calcular el desplazamiento del punto de impacto, a diferencia del método original que considera un modelo simplificado de la pila.

Los siguientes párrafos describen el comportamiento de los distintos componentes del modelo.

#### *Comportamiento del cuerpo de las barcazas*

El comportamiento de los vínculos entre barcazas de la misma fila se define en base al comportamiento del cuerpo de las barcazas a compresión. Para éstas, se adoptan las recomendaciones de Harik y colaboradores (2008b) en base al estudio mediante elementos finitos. Según estos autores, el comportamiento puede ser descrito mediante una relación elasto-plástica con endurecimiento. Los parámetros que definen esta relación se muestran en la Tabla 3.

#### *Comportamiento de los cables de acero*

Los cables de acero utilizados generalmente para el armado de los grupos de barcazas son cables de acero inoxidable de  $\frac{3}{4}$  a 1 pulgada de diámetro. Estos se sujetan mediante sucesivas vueltas alrededor de las bigornias de las barcazas. Las propiedades mecánicas de los mismos se muestran en la Tabla 2.

| Tipo de Cable | Diámetro (plug.) | Resistencia Nominal de Cable Nuevo (kN) | Módulo Elástico (GPa) | Área Nominal (cm <sup>2</sup> ) | Deformación de Rotura para Cable Nuevo (%) | Resistencia nominal de Cable Usado (kN) |
|---------------|------------------|---|-----------------------|---------------------------------|--|---|
| 6 x 19        | 7/8              | 308                                     | 96                    | 2.39                            | 6  | 246                                     |
|               | 1                | 399                                     |                       | 3.10                            |  | 319                                     |

Tabla 2 Propiedades de cables de acero utilizadas para armar grupos de barcazas



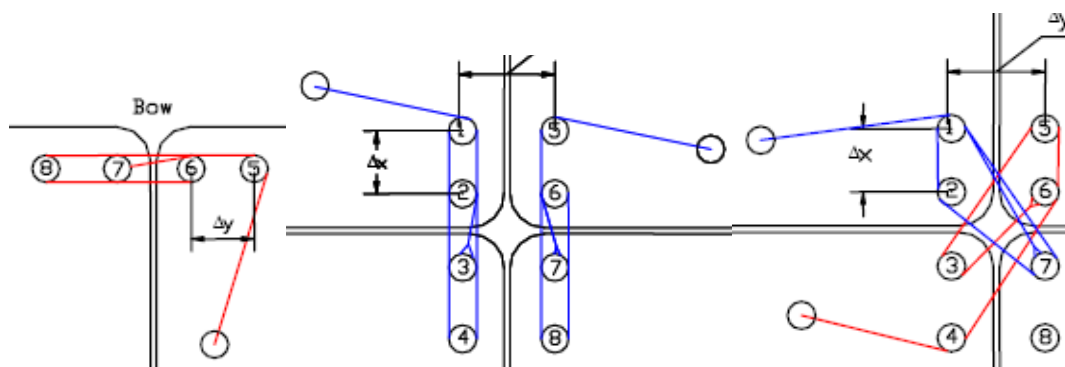


Figura 8 Configuraciones usuales de amarre entre barcasas. Arroyo et al. (2005)

Arroyo y colaboradores (2005) describen la práctica usual de amarre entre barcasas. La configuración usual se puede observar en la Figura 8. De acuerdo a esta disposición se determina la rigidez y resistencia de las amarras según el número de vueltas, longitud entre extremos y ángulo formado con la dirección de deformación, según la siguiente ecuación:

$$K = n \frac{EA}{L} \cos(\alpha)$$

$$F_y = nR \cos(\alpha)$$

Donde n es el número de lazos, E, el módulo elástico del acero, A área neta de sección, L longitud entre extremos, R la resistencia última del cable, y  $\alpha$  ángulo formado con la dirección de deformación.

El comportamiento de los vínculos entre barcasas de la misma fila a compresión y a tracción se muestra en la Figura 9. Los valores que definen estas relaciones se muestran en la Tabla 3.

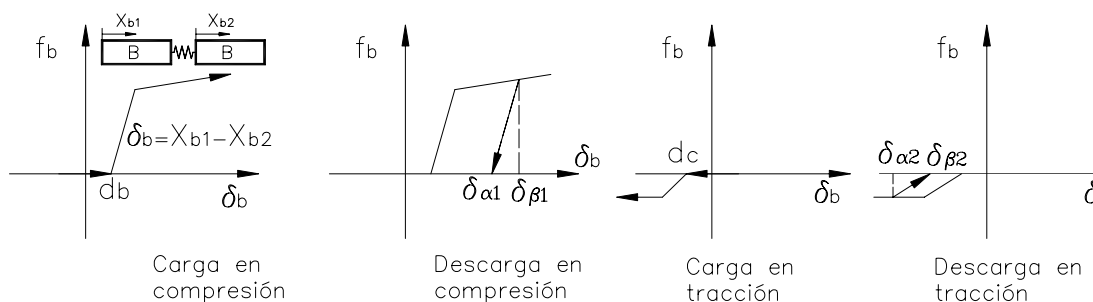


Figura 9 Comportamiento de vínculos entre barcasas de la misma fila. Método MGL

| Parámetros de vínculos entre barcazas | Tracción | Compresión |
|---------------------------------------|----------|------------|
| Rigidez (MN/m) =                      | 89.6     | 1200       |
| Fuerza de fluencia (MN)=              | 1.9      | 147.0      |
| Índice de endurecimiento (MN/m)=      | -        | 17.6       |
| Longitud libre (m) =                  | 0.02     | 0.005      |

Tabla 3 Parámetros de vínculos entre barcazas. Modelo de MGL

### Comportamiento de proa de la barcaza

Para el comportamiento de proa de la barcaza se adopta la relación carga-deformación desarrollada por [Consolazio y colaboradores \(2008\)](#). Se considera adecuado adoptar esta relación elasto-plástica debido a que se desea evaluar el comportamiento de los métodos simplificados, que utilizan esta relación. La fuerza de fluencia y la rigidez inicial en base a la forma y dimensión de la pila. Se puede observar un esquema del comportamiento de la proa en la Figura 10.

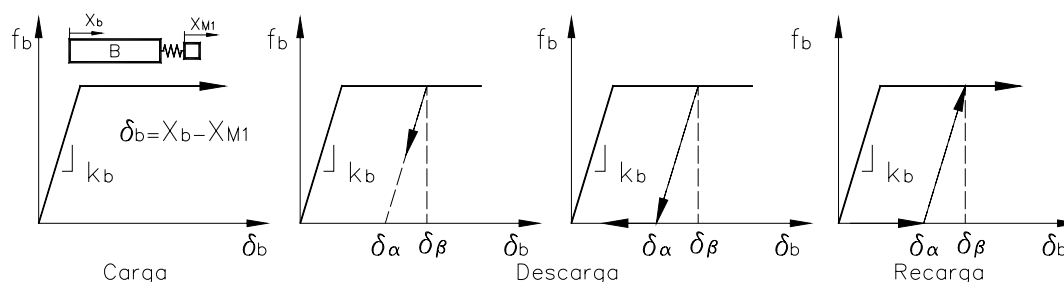


Figura 10 Comportamiento de vínculo de proa. Método MGL

### Implementación numérica

La expresión matricial general del sistema elasto-plástico de  $n$  grados de libertad puede expresarse mediante la siguiente sistema de ecuaciones diferenciales:

$$[M]\{\ddot{x}\} + \{f(x)\} = 0$$

Donde  $[M]$  es la matriz de masa de rango  $n \times n$ , donde  $n$  es la cantidad de barcazas mas uno,  $\{x\}$  es el vector de desplazamientos absolutos de rango  $n \times 1$  y  $\{f(x)\}$  el vector de fuerzas resultantes del sistema. Para un grupo de 3 filas y 3 columnas y un remolcador, el vector de fuerzas resulta:

$$\{f(x)\} = \begin{pmatrix} -F_{11-12} + F_{11-21} \\ -F_{12-13} + F_{11-12} + F_{21-22} \\ F_{13-23} + F_{12-13} \\ F_1 - F_{21-31} - F_{11-21} + F_{21-31} \\ -F_{22-23} + F_{21-22} - F_{12-22} + F_{22-32} \\ -F_{Rem} + F_{22-23} - F_{13-23} + F_{23-33} \\ F_{21-31} - F_{31-32} \\ -F_{32-33} + F_{31-32} - F_{22-32} \\ F_{32-33} - F_{23-33} \\ F_{Rem} \\ -F_1 \end{pmatrix}$$

Donde  $F_1$  es la fuerza de impacto entre la pila y barcaza que impacta y las demás fuerzas se muestran en la Figura 3. Designando  $F$  a la cantidad de filas,  $C$  a la cantidad de columnas y  $R$  (1 o 0) a la existencia del remolcador, la cantidad de grados de libertad del sistema  $n$  y la cantidad de vínculos en el sistema  $nf$  resultan:

$$n = F.C + R + 1$$

$$nf = F(C - 1) + C(F - 1) + R + 1$$

A fines de determinar las fuerzas generadas por los vínculos, se define una matriz  $[W]$  que convierte el vector de posición en un vector de desplazamientos relativos.

$$\{\Delta\}_{nf} = [W]_{nf \times n} \{x\}_n$$

A partir del vector de desplazamientos relativos para un instante  $t$  y para el instante anterior, se calculan los esfuerzos y las variables internas de los elementos. En caso de fluencia, se hace variar la deformación plástica en ese intervalo de acuerdo a la diferencia de desplazamientos relativos entre el instante  $t$  y el instante anterior. La posición del punto de impacto se calcula mediante la convolución con la función respuesta a impulso y la historia de fuerza hasta el tiempo  $t$ , calculada en pasos anteriores.

$$\{\Delta\}_{nf} \Rightarrow \{F_b\}_{nf}$$

Una vez obtenido el vector de esfuerzos, se premultiplica por la inversa de la matriz  $[W]$  para calcular la resultante de fuerzas entre barcazas sobre cada grado de libertad.

La integración numérica de las ecuaciones de movimiento se realiza mediante el método de los impulsos concentrados o de velocidad constante, con un intervalo  $\Delta t$  fijo. El intervalo de tiempo elegido influye en la estabilidad del proceso de cálculo y la calidad de los resultados. Por este motivo se adopta un intervalo menor a la mitad del menor período natural del sistema.

Dado que es necesario definir los dos primeros pasos del proceso, se considera que el primer estado es  $\{x\}=0$ , el segundo es igual a la velocidad por el intervalo de tiempo elegido para

todos los grados de libertad, excepto la pila. Esto no es estrictamente exacto, pero genera un error despreciable para el intervalo de tiempo adoptado.

De esta manera, se realiza el análisis numérico en el tiempo mediante el modelo de múltiples grados de libertad, el cual es capaz de incorporar tanto la respuesta completa de la estructura como la interacción entre barcazas. Como limitación cabe aclarar que para la aplicación de este método es necesario disponer de un programa de cálculo, que en una situación de diseño puede no encontrarse disponible. Por lo tanto se considera relevante disponer de un método de aplicación simple y directa, que conduzca a resultados de similar validez.

#### 4 MÉTODO MODAL SIMPLIFICADO

Se propone un procedimiento de cálculo simplificado basado en el análisis modal que, a diferencia del modelo de múltiples grados de libertad, es de aplicación directa. Sin embargo, y a diferencia del método AVIL, el método es capaz de incorporar la rigidez dinámica de la masa asociada al punto de impacto.

Para casos elásticos el método propuesto no difiere de un análisis modal clásico, sin embargo para casos inelástico el análisis se separa en tres etapas. Una primera etapa de carga elástica en la que se utiliza análisis modal. Una segunda etapa plástica en la que la barcaza se considera como una masa libre y la pila se considera como un oscilador simple con carga. Y una tercera etapa de descarga elástica, donde se utiliza análisis modal con condiciones iniciales modificadas. Luego del cálculo, la historia de fuerza y desplazamientos final se calcula adicionando las tres etapas, incorporando la deformación plástica ocurrida durante la etapa de fluencia. El modelo considerado se encuentra esquematizado en la Figura 11.

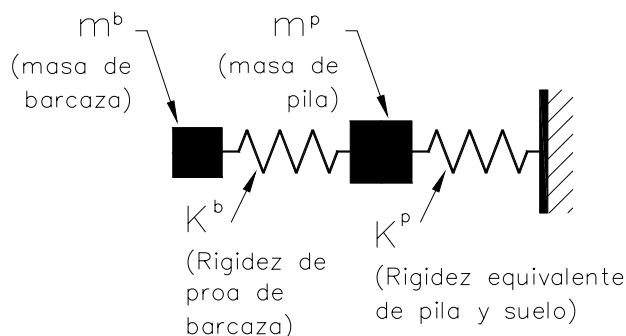


Figura 11 Modelo de barcaza y pila. Método modal simplificado

El sistema dinámico descrito en la figura anterior puede ser descrito mediante la ecuación de movimiento:

$$KU + M\ddot{U} = 0$$

donde  $U$  es el vector posición,  $K$  la matriz de rigidez, y  $M$  la matriz de masa. El sistema de dos grados de libertad tiene dos modos de vibrar, que se calculan definiendo:

$$\begin{vmatrix} k^b - m^b \lambda & -k^b \\ -k^b & k^b + k^p - m^p \lambda \end{vmatrix} = 0$$

En una primera instancia, suponiendo comportamiento lineal, puede determinarse la historia de carga mediante un análisis modal convencional. Las condiciones iniciales se determinan de la siguiente manera:

$$q_0^i = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{q}_0^i = \frac{\phi^i M \begin{bmatrix} V_0^b \\ 0 \end{bmatrix}}{M_i}$$

Donde  $q^i$  son las coordenadas modales generalizadas,  $\phi^i$  es el modo  $i$ ,  $M_i$  es la masa generalizada del modo  $i$  y  $V_0^b$  es la velocidad inicial del conjunto de barcazas.

La posición de la barcaza y de la pila,  $x^b$  y  $x^p$ , respectivamente, pueden escribirse como:

$$x^b(t_e) = \phi_1^1 \frac{\dot{q}_0^1 \text{sen}(\omega_1 t_e)}{\omega_1} + \phi_1^2 \frac{\dot{q}_0^2 \text{sen}(\omega_2 t_e)}{\omega_2}$$

$$x^p(t_e) = \phi_2^1 \frac{\dot{q}_0^1 \text{sen}(\omega_1 t_e)}{\omega_1} + \phi_2^2 \frac{\dot{q}_0^2 \text{sen}(\omega_2 t_e)}{\omega_2}$$

donde  $\omega_i$  es la frecuencia natural del modo  $i$  y  $t_e$  es tiempo en rango elástico.

Para el caso de comportamiento lineal, la fuerza de impacto puede calcularse mediante la diferencia de posición y la rigidez de proa de la barcaza. La fuerza de impacto puede ser calculada en cualquier instante mediante la siguiente expresión:

$$F(t_e) = [x^b(t_e) - x^p(t_e)] k^b$$

Una vez calculada la historia de fuerza suponiendo linealidad se verifica si supera a la fuerza de fluencia de la proa de la barcaza. Si el valor máximo no supera la fuerza de fluencia, la historia calculada no necesita modificaciones. En el caso contrario, el análisis anterior no es válido, y el caso corresponde a un impacto del tipo elasto-plástico. De esta manera, la historia de carga se calculará como la conjunción de tres etapas diferentes: una primer etapa elástica de carga, que coincide con lo calculado anteriormente, válida hasta el instante en que se alcanza la fluencia; una segunda etapa plástica donde la fuerza de contacto es igual a la fuerza de fluencia; y una tercera etapa de descarga elástica.

Para definir la duración de la primera etapa se determina numéricamente el instante  $t_1$  en que la fuerza entre la barcaza y la pila iguala al valor de fluencia. En este instante se puede calcular la posición de la barcaza y de la pila ( $x_1^b, x_1^p$ ) y sus velocidades ( $V_1^b, V_1^p$ ) para ser

utilizadas como condiciones iniciales para la segunda etapa. A partir de este instante, comienza la etapa de fluencia, durante la cual el comportamiento de la barcaza se adopta como el de una masa libre con fuerza aplicada. Y el comportamiento de la pila se adopta como un oscilador con desplazamiento y velocidad inicial y con una fuerza aplicada, como se muestra en la Figura 12.

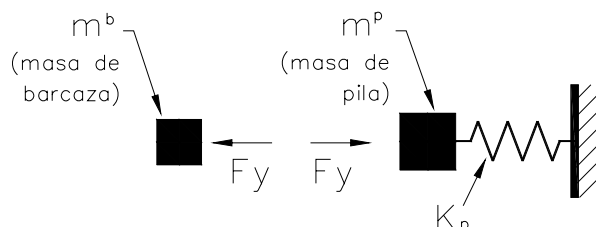


Figura 12. Modelo adoptado en estado de fluencia. Método modal simplificado.

Durante la etapa de fluencia, la velocidad y posición de la barcaza y de la pila se calculan de la siguiente manera:

$$V^b(t_f) = V_1^b - \frac{F_Y}{m^b} t_f$$

$$V^p(t_f) = -x_1^p \omega^p \text{sen}(\omega^p t_f) + V_1^p \cos(\omega^p t_f) + \frac{F_Y}{\omega^p m^p} \text{sen}(\omega^p t_f)$$

$$x^b(t_f) = x_1^b + V_1^b t_f - \frac{F_Y}{m^b} \frac{t_f^2}{2}$$

$$x^p(t_f) = x_1^p \cos(\omega^p t_f) + \frac{V_1^p}{\omega^p} \text{sen}(\omega^p t_f) + \frac{F_Y}{(\omega^p)^2 m^p} (1 - \cos(\omega^p t_f))$$

donde  $t_f$  indica tiempo desde comienzo de fluencia,  $\omega^p$  es la frecuencia natural de la pila no amortiguada.

Durante la etapa de fluencia la deformación de la proa es la suma de la deformación elástica (constante e igual a la deformación de fluencia) y la deformación plástica. La deformación plástica no se recupera, por lo tanto, la etapa plástica existirá mientras el movimiento relativo entre barcaza y pila sea de acercamiento. Es decir, la etapa plástica se termina en el instante en que la velocidad de la barcaza y la pila son iguales. En este instante en que se termina la etapa de fluencia ( $t_2$ ) se podrá calcular la posición de la barcaza y la pila ( $x_2^b, x_2^p$ ) y sus velocidades ( $v_2^b, v_2^p$ ). Estos valores se utilizarán para plantear las condiciones iniciales de la siguiente etapa de descarga elástica. Durante la etapa plástica se ha producido una deformación plástica igual a:

$$E_p = \Delta x_b - \Delta x_p = (x_2^b - x_1^b) - (x_2^p - x_1^p)$$

Para el cálculo de la etapa de descarga elástica, se puede adoptar otra vez el análisis modal, pero teniendo en cuenta la deformación plástica ocurrida en la etapa anterior. De esta manera, la variable que se toma para realizar el cálculo es  $x^{b*}$ , donde:

$$x^{b*} = x^b - E_p$$

De esta manera, las condiciones iniciales para la etapa de descarga elástica, resultan:

$$q_2^i = \frac{\phi_i M \begin{bmatrix} x_2^{b*} \\ x_2^p \end{bmatrix}}{M_i} \quad \dot{q}_2^i = \frac{\phi_i M \begin{bmatrix} V_2^b \\ V_2^p \end{bmatrix}}{M_i}$$

Con las condiciones iniciales así calculadas, se realiza el análisis modal similarmente a lo realizado en la primera etapa, y se calcula la fuerza correspondiente a esta etapa con la posición modificada de la barcaza mediante la siguiente expresión:

$$F(t_d) = [x^{b*}(t_d) - x^p(t_d)] k^b$$

donde  $t_d$  es el tiempo desde el inicio de descarga elástica.

Luego de obtener la fuerza y los desplazamientos en la etapa de descarga, se corrige la posición de la barcaza para obtener el desplazamiento real:

$$x^b(t_d) = x^{b*}(t_d) - E_p$$

La historia de carga, la posición de la barcaza y pila se obtienen superponiendo los resultados de las distintas etapas con sus respectivos valores. Luego de este pulso de carga, existe la posibilidad que se presenten rebotes, dependiendo de la velocidad y masa de la barcaza y de las propiedades de la pila. Es por esto que se debe verificar una etapa libre posterior. Para esto, se calcula la posición de la barcaza considerándola una masa libre, y la posición de la pila considerándola como un oscilador libre. En esta etapa se producirá el contacto entre la barcaza y la pila si la diferencia de posición entre ambas es mayor a la deformación plástica, esto es:

$$x^b - x^p \geq E_p$$

En el caso en que se verifique el contacto, se deberá repetir el proceso de cálculo de la misma manera en que se calcula el primer impulso de carga. La historia de carga final resulta igual a la superposición consecutiva de las diferentes etapas de cálculo, como se muestra en la Figura 13.

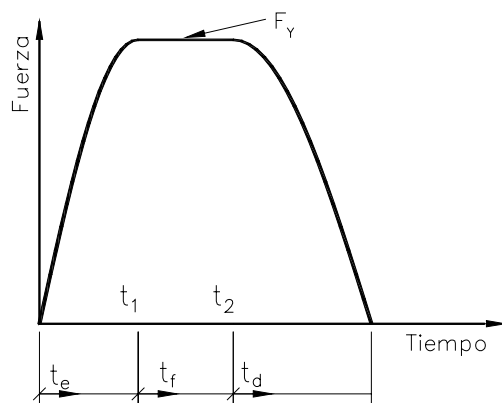


Figura 13. Historia de carga, caso elasto-plástico. Modelo modal simplificado

De esta manera, se han propuesto dos métodos para la determinación de la historia de carga producida por el impacto de barcazas: el método de múltiples grados de libertad y el método modal simplificado. El primero de éstos es más riguroso, ya que incorpora un menor número de simplificaciones. El mismo se utiliza como una herramienta para verificar historias de carga estimadas mediante otros métodos. El segundo método (modal simplificado), es de aplicación directa. Si bien no incorpora en forma exacta la respuesta completa de la estructura del puente, ni la interacción entre barcazas, es capaz de incorporar la rigidez dinámica de la masa asociada al punto de impacto. Las características de ambos métodos están dadas en la Tabla 4.

| Método                           | Tipo     | Curvas carga-deformación de proa | Influencia de flexibilidad de pila | Interacción entre barcazas |
|----------------------------------|----------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| <b>Método Modal Simplificado</b> | Dinámico | Consolazio                       | Si                                 | No                         |
| <b>Modelo de MGL</b>             | Dinámico | Genéricas                        | Si                                 | Si                         |

Tabla 4. Características de los métodos de análisis propuestos

En los párrafos siguientes se presenta un ejemplo de aplicación, a fines de ilustrar la influencia de las capacidades y limitaciones de los diferentes métodos en la generación de las historias de cargas producidas por impacto de grupos de barcazas.

#### 4.1 Ejemplos de aplicación

A fines de ilustrar los distintos aspectos de las metodologías discutidas en este trabajo, se consideran los distintos métodos disponibles en una estructura que se corresponde con la tipología regional de puentes sobre vías navegables. Para esto se selecciona la alternativa de hormigón del puente proyectado entre las ciudades de Reconquista (Santa Fe) y Goya (Corrientes) sobre el Río Paraná.

Se estudian cuatro casos de impacto, cada uno con distinta energía cinética. El primer y segundo caso corresponden a un caso de baja energía debido al impacto de una barcaza viajando a 0.35 y 1.2 m/s respectivamente. Los dos casos restantes corresponden a casos de



media y alta energía debido al impacto de grupo de 4 barcazas en fila viajando a velocidades de 2 m/s (velocidad de aberración) y de 5 m/s. Este último caso corresponde a la velocidad usual de grupos de barcazas en el Río Paraná.

En las Figuras 14 a 17, se muestran las historias de carga calculadas mediante el método AVIL, el método modal simplificado (MMS) y el modelo de múltiples grados de libertad (MGL).

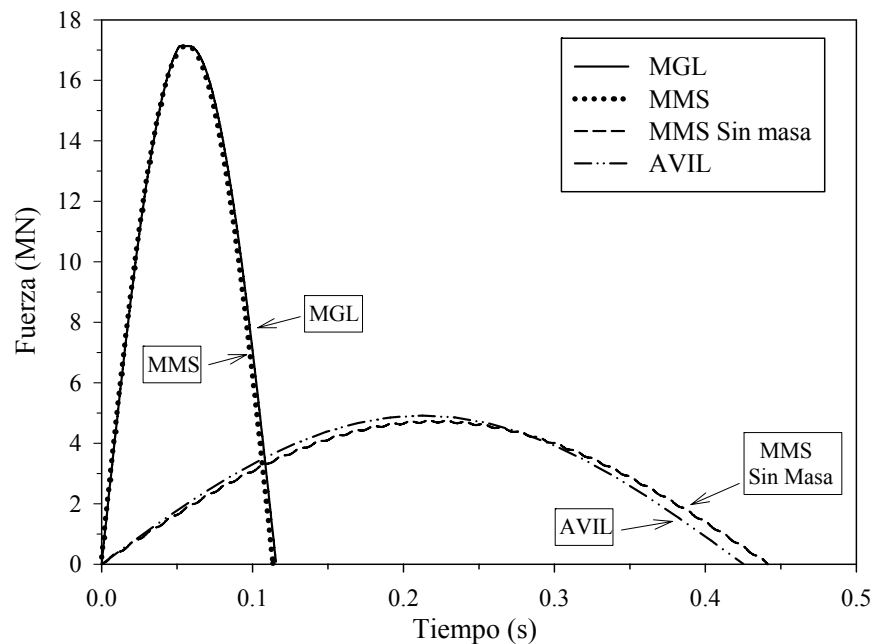


Figura 14. Historia de carga. Caso de 1 barcaza viajando a 0.35 m/s

En el primer caso el impacto resulta elástico tanto en el método AVIL como en el método modal simplificado. Se puede observar que el modelo de múltiples grados de libertad (MGL) y el método modal simplificado (MMS) dan resultados muy similares. Según estos, la duración del impacto se aproxima a 0.12 segundos [s] y la fuerza máxima es aproximadamente 17 MegaNewtons [MN].

El método AVIL da como resultado una historia de carga más prolongada en el tiempo 0.42 [s] y de menor valor máximo, 5 [MN]. Cabe mencionar que para el método AVIL, la duración de impactos elásticos no depende de la velocidad inicial.

Con el propósito de comprobar que el método modal simplificado se aproxima al AVIL cuando la masa del punto de impacto se aproxima a cero, se asigna una masa pequeña y se comparan los resultados. Se puede observar en la figura precedente una muy buena aproximación.

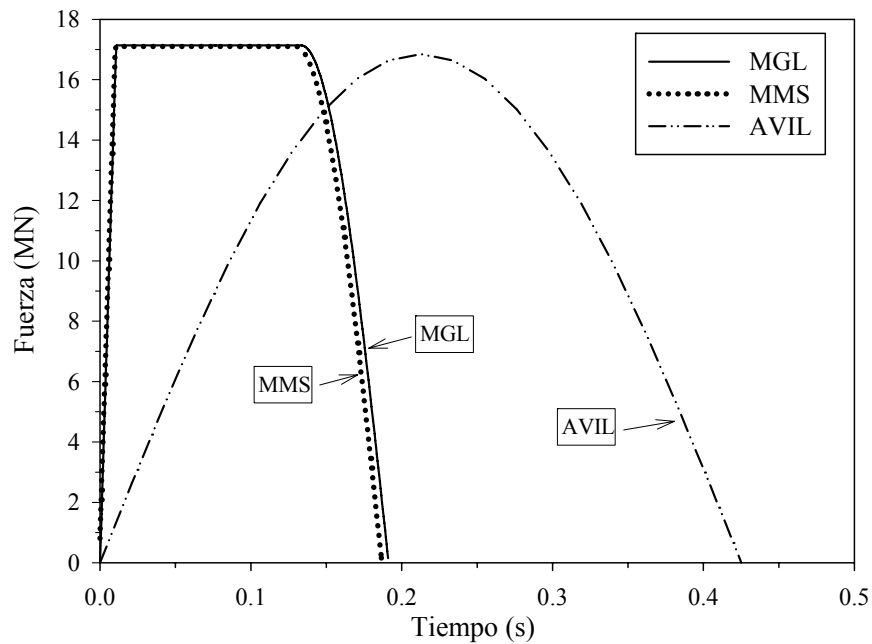


Figura 15. Historia de carga. Caso de 1 barcaza viajando a 1.2 m/s

En el segundo caso, el impacto resulta elástico según el método AVIL. La duración del impacto es igual al caso anterior 0.42 [s] pero la fuerza máxima resulta igual a 17 [MN]. A diferencia del método AVIL, puede observarse que el MGL y el MMS dan como resultado un impacto inelástico. Ambos métodos producen resultados muy similares, con fuerza máxima igual a la fuerza de fluencia, de 17.1 [MN] y una duración de fluencia de 0.19 [s].

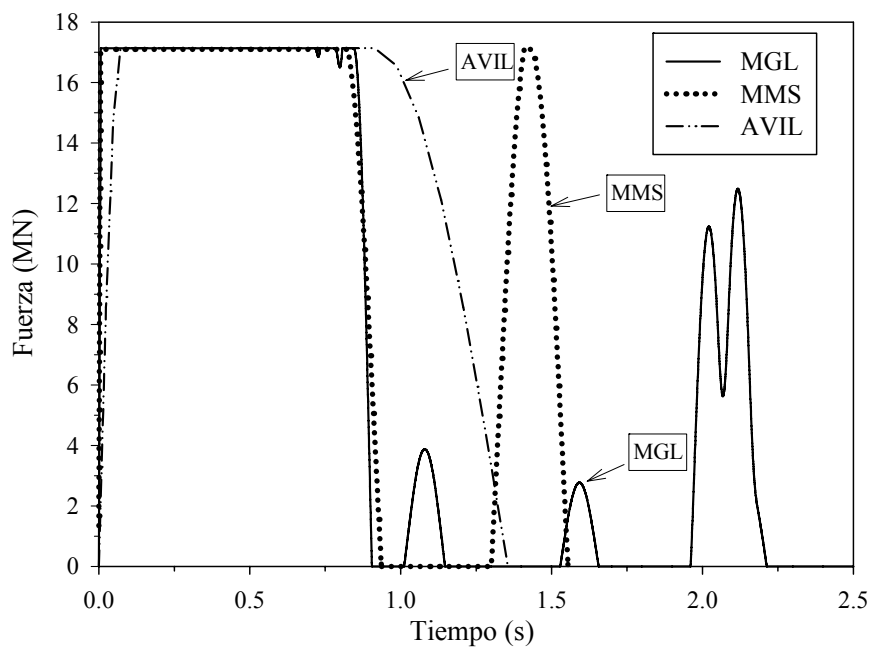


Figura 16. Historia de carga. Caso de 4 barcazas viajando a 2 m/s

En el tercer caso, para el caso de un impacto de un tren de cuatro barcazas, se puede observar que el MGL y el MMS concuerdan muy bien en el primer pulso (hasta los 0.9 [s]). Luego del mismo, ambos métodos predicen rebotes. No obstante, la cantidad y posición temporal de los mismos difieren según el método considerado. Estas diferencias se deben a que el MMS no tiene en cuenta la interacción entre barcazas y considera la respuesta de la pila en forma simplificada. Ambos métodos predicen un lapso de fluencia más corto, y un proceso de carga y de descarga más rápido que el método AVIL. Esto se debe a que el método AVIL desprecia la rigidez dinámica que aporta la masa asociada al punto de impacto.

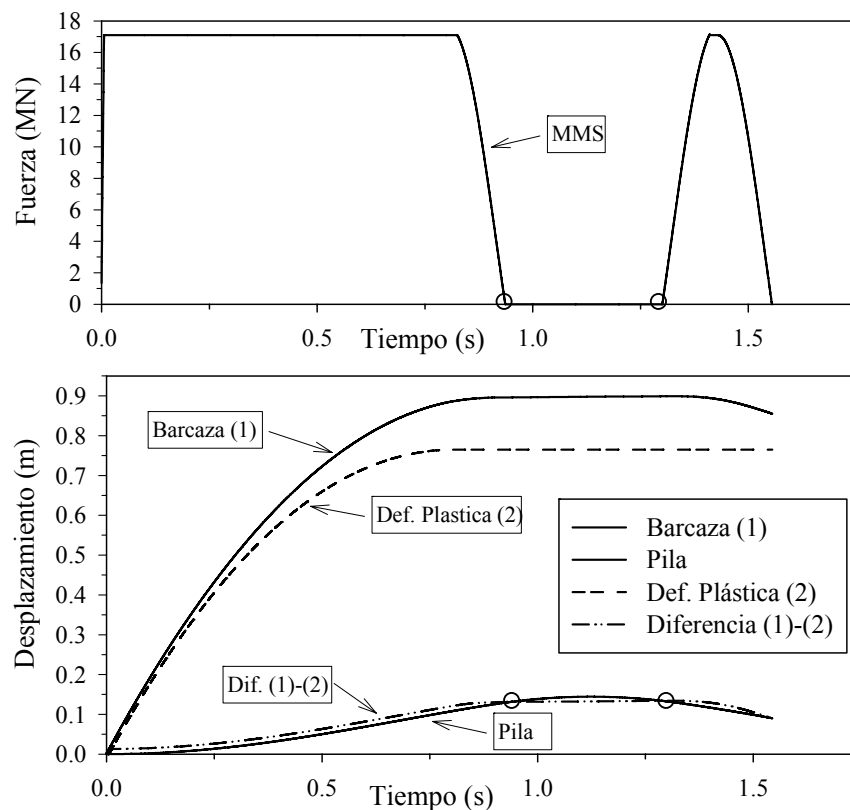


Figura 17. Historia de carga y desplazamientos del MMS. Caso de 4 barcazas viajando a 2 m/s.

En la Figura 17 puede observarse la historia de carga y de desplazamientos calculados mediante el MMS. Luego del primer impulso, la velocidad de la barcaza es cercana a cero. Durante este período, la pila sigue desplazándose en el mismo sentido por efecto de la inercia y se separa de la barcaza para luego regresar e impactar nuevamente con la misma. Esto puede verificarse si se compara la curva que muestra el desplazamiento de la barcaza menos la deformación plástica ocurrida, con la curva de desplazamiento de la pila.

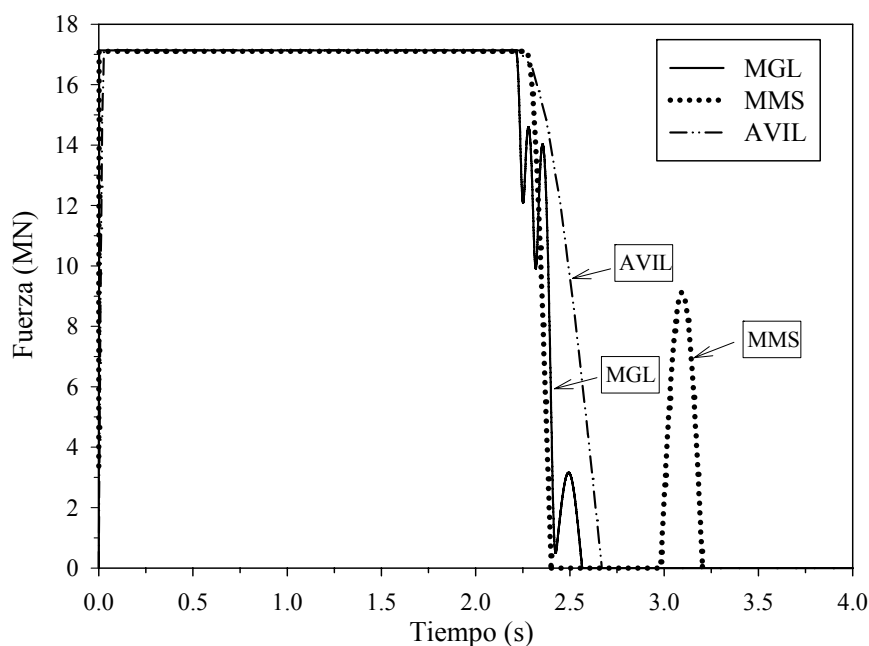


Figura 18. Historias de carga. Caso de 4 barcazas viajando a 5 m/s

El caso de la Figura 18, de mayor energía cinética, corresponde a una posible hipótesis de diseño del ámbito local. En este caso el proceso de carga inicial sigue siendo más rápido según los métodos propuestos respecto al método AVIL, y se producen una serie de rebotes debido a la interacción entre barcazas y la respuesta de la pila. Sin embargo, las diferencias entre los distintos métodos se ven opacadas por la duración del impacto principal.

## 5 CONCLUSIONES

La tipología de puentes sobre vías navegables en nuestro ámbito difiere generalmente de la tipología principal considerada por los métodos de evaluación de historia de cargas previamente estudiada por otros investigadores. Frecuentemente, los puentes regionales poseen una gran masa asociada al punto de impacto y una rigidez estática relativamente baja. Esto hace que los métodos de análisis existentes, produzcan historias de carga diferentes a las calculadas mediante métodos, que sí tienen en cuenta la masa asociada al punto de impacto.

La rigidez dinámica que aporta la masa asociada al punto de impacto afecta la historia de carga de distintas maneras. Para impactos elásticos, a medida que la masa impactada es mayor, la duración de la historia de carga es menor, siendo mayor la carga máxima desarrollada. Para impactos elasto-plásticos, la duración de la etapa de fluencia es también generalmente menor, debido a que una parte de la energía cinética inicial es transmitida a la masa impactada. Otra consecuencia de considerar la masa impactada, es la aparición de múltiples pulsos de carga separados. Estos múltiples pulsos están asociados a sucesivos impactos que pueden ocurrir en función de las características dinámicas de la pila y del grupo de barcazas.

Este trabajo propone un método modal simplificado de aplicación relativamente simple y directa. Este método es una generalización del método AVIL, originalmente propuesto por [Consolazio y colaboradores \(2008\)](#), incluyendo en el análisis, la rigidez dinámica que aporta la masa asociada al punto de impacto. Cuando la masa de la pila es despreciable, el método

modal simplificado tiende a producir los mismos resultados que el método AVIL. Cuando la masa de la pila es importante, el método propuesto y AVIL producen resultados diferentes, particularmente para impactos de baja energía cinética. A medida que la energía cinética inicial crece, la gran duración del pulso principal de la historia de fuerzas suaviza las diferencias entre ambos métodos, ya que la masa del conjunto de barcasas tiende a dominar el proceso.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

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 JR & Ebeling RM, 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.

McVay, M.C., Wasman, S.J., Consolazio, G.R., Bullock, P.J., Cowan, D.R., & Bollmann, H.T., Dynamic Soil-Structure Interaction of Bridge Superstructure Subject to Vessel Impact, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol. 14, No. 1, pp. 7-16. 2009

Larsen. O. D., Ship Collision with Bridges - The Interaction between Vessel Traffic and Bridge Structures, *Structural Engineering Documents 4, International Association for Bridge and Structural Engineering*, 132 pp., 1993

Yuan, P., Harik, I. & Davidson M., Equivalent Barge and Flotilla Impact Forces On Bridge Piers, *Kentucky Transportation Center, College of Engineering, University of Kentucky*, 2008a.

Yuan, P., Harik, I. & Davidson M., Multi-Barge Flotillas Impact Forces on Bridge, *Kentucky Transportation Center, College of Engineering, University of Kentucky*, 2008b.