

MODELACIÓN DE IMPACTO DE CONJUNTOS DE BARCAZAS CONTRA PILAS DE PUENTES

F. José Luperi^a, Federico Pinto^b y Carlos A. Prato^b

^a *Estudiante Doctoral, F.C.E.F.yN., Universidad Nacional de Córdoba*

^b *Departamento de Estructuras, F.C.E.F.yN., Universidad Nacional de Córdoba. Casilla de Correo 916, Córdoba, Argentina. fpinto@efn.uncor.edu*

Palabras Clave: impacto, barcaza, convoy, puente

Resumen. El diseño de puentes sobre vías navegables debe incorporar el posible impacto de las embarcaciones que circulan por las mismas. Las embarcaciones consisten generalmente en grupos de barcazas que pueden estar compuestos por varias filas y columnas amarradas unas a otras mediante cables de acero. Durante el impacto del conjunto contra la pila, se producen desplazamientos relativos y fuerzas de interacción entre las barcazas que componen el grupo. Esta interacción influye en la historia de carga producida sobre la pila de puente, ya que constituye un mecanismo de disipación de energía y de transferencia de carga entre las barcazas que no entran en contacto con la pila y la barcaza que impacta. Investigaciones previas han propuesto modelos simplificados para el rango de bajas velocidades y que no incorporan la repuesta de la pila o modelos unidimensionales válidos para impactos simétricos y ausencia de giros. El propósito de este artículo es mostrar una formulación bidimensional que permite modelar el impacto de un grupo de barcazas de manera más general, incorporando la respuesta de la pila, el comportamiento no-lineal de la barcaza que entra en contacto con la pila y las fuerzas de interacción entre las barcazas que componen el convoy. Esto se logra aplicando principios del método de elementos discretos entre otras consideraciones. Mediante la metodología propuesta, se desarrollan casos de estudio a fines de investigar la contribución de las filas laterales a la fuerza de impacto desarrollada.

1 INTRODUCCIÓN

El transporte fluvial se realiza generalmente mediante grupos de barcazas que pueden estar compuestos por varias filas y columnas de barcazas, amarradas unas a otras mediante cables de acero. Durante el proceso de impacto del conjunto de barcazas contra una pila de puente, se produce una serie de fenómenos que influyen en la historia de carga generada. Estos fenómenos incluyen: la transferencia de energía entre las barcazas que no impactan directamente y las barcazas que entran en contacto con la pila, la posible separación del grupo en dos o más subgrupos debido a la falla de los amarres y la posibilidad de impactos excéntricos o con una componente de velocidad inicial transversal, entre otros. La Figura 1 muestra la conformación típica de un grupo de barcazas.

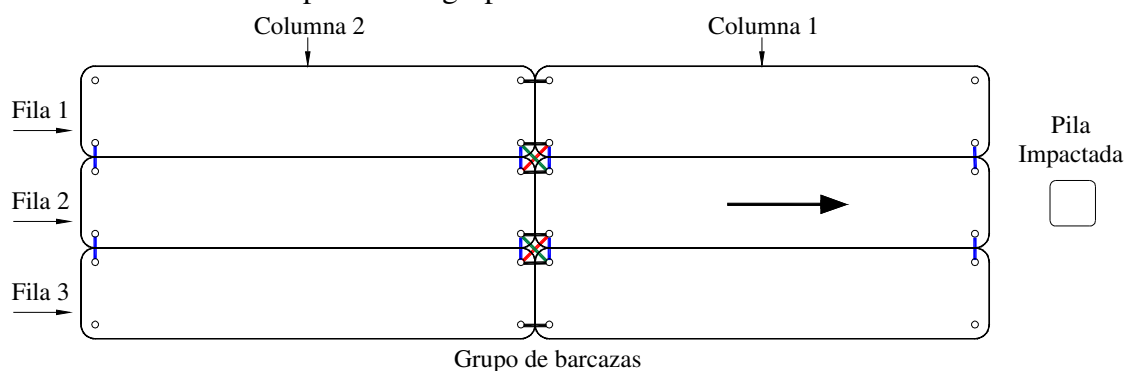


Figura 1. Impacto de grupo de barcazas

Actualmente, los códigos de diseño (e.g., [AASHTO, 2008](#)) no proporcionan herramientas de análisis específicas que permitan dilucidar el efecto de las filas laterales, y muchas veces el diseño ignora el efecto de las filas que no impactan directamente con la estructura de pila.

[Harik y colaboradores \(2008a,b\)](#) desarrollaron un modelo unidimensional de masas y resortes elasto-plásticos válido para grupos de varias filas de barcazas. Una limitación importante del método propuesto es que sólo es válido para impactos simétricos y perpendiculares. Por lo tanto, no es posible modelar impactos excéntricos o con velocidad oblicua al eje del puente.. Además el modelo no considera la falla de los amarres debido a deformación excesiva, lo que no permite modelar la posible separación del conjunto en dos o más porciones.

Con el objetivo de resolver las limitaciones existentes y disponer de un modelo más general, se propone generalizar el modelo propuesto por [Harik y colaboradores \(2008a,b\)](#). En las siguientes secciones de este artículo se detallan algunas consideraciones relativas al desarrollo del modelo y sus aplicaciones.

2 CONSIDERACIONES RELATIVAS AL IMPACTO DE BARCAZAS

En el impacto de grupos de barcazas existen una serie de aspectos fundamentales para el análisis de los mismos: tal como el comportamiento de la proa de barcaza que impacta contra la pila, el comportamiento de los amarres que vinculan a las barcazas y la masa hidrodinámica asociada a las embarcaciones. A continuación se describen brevemente estos aspectos.

2.1 Comportamiento de proa de barcaza

El comportamiento carga-deformación de la proa que impacta es un aspecto primordial en el impacto de barcazas, debido a que es la principal fuente de disipación de energía y que determina la fuerza de impacto máxima posible. Esta relación fue estudiada por [Consolazio y colaboradores \(2008,2010\)](#) mediante un modelo detallado de elementos finitos de alta

resolución. Estos autores realizaron modelaciones pseudo-estáticas de impacto de proas de barcasas a distintos ángulos de impacto y contra pilas de diferentes formas y dimensiones. En base a los resultados los investigadores definieron relaciones elasto-plásticas simplificadas que representan el límite superior de la relación carga-deformación de la proa de barcasas, teniendo en cuenta la forma y dimensión de la pila y el ángulo de impacto. La Figura 2 muestra algunas características de la relación carga-deformación de la proa de barcasas de carga estándar.

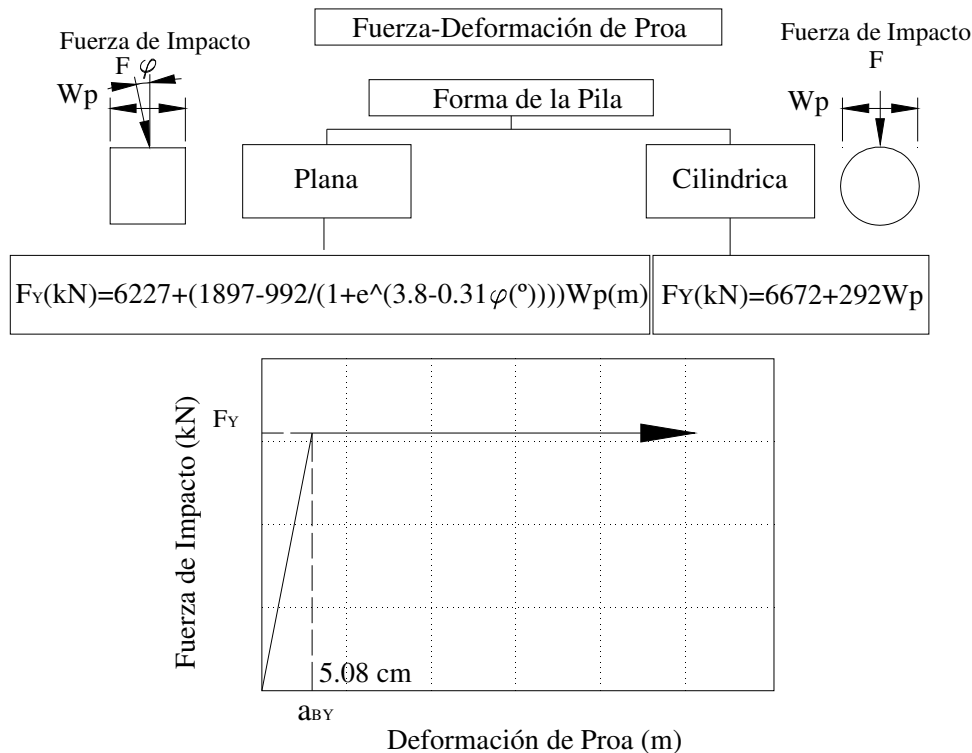


Figura 2. Relación carga-deformación de proa de barcasas. [Consolazio y colaboradores \(2010\)](#)

Este comportamiento carga-deformación es adoptado en este trabajo para las barcasas que entran en contacto con la pila en el modelo propuesto. Los detalles de implementación se muestran en las secciones relativas al modelo propuesto.

2.2 Comportamiento de los amarres

Las características de los cables de acero utilizados para amarrar el conjunto de barcasas y el detallado de las configuraciones usuales de amarre son descriptas por [Arroyo y Ebeling \(2005\)](#). Según estos autores los amarres de acero más utilizados consisten en cables de 7/8 y 1 pulgadas de diámetro, la Tabla 1 resume algunas de las características de los mismos.

Tipo de Cable	Diámetro (plug.)	Resistencia Nominal de Cable Nuevo (kN)	Módulo Elástico (GPa)	Área Nominal (cm ²)	Deformación de Rotura para Cable Nuevo (%)	Resistencia nominal de Cable Usado (kN)	Deformación de Rotura para Cable usado (%)
6 x 19	7/8	308	96	2.39	6	246	5
	1	399		3.10		319	

Tabla 1. Características de cables de acero

Estos autores describen la configuración usual de amarres utilizadas para el armado de conjuntos de barcazas para las vinculaciones internas y en los extremos del grupo. La Figura 3 muestra la disposición usual de las mismas.

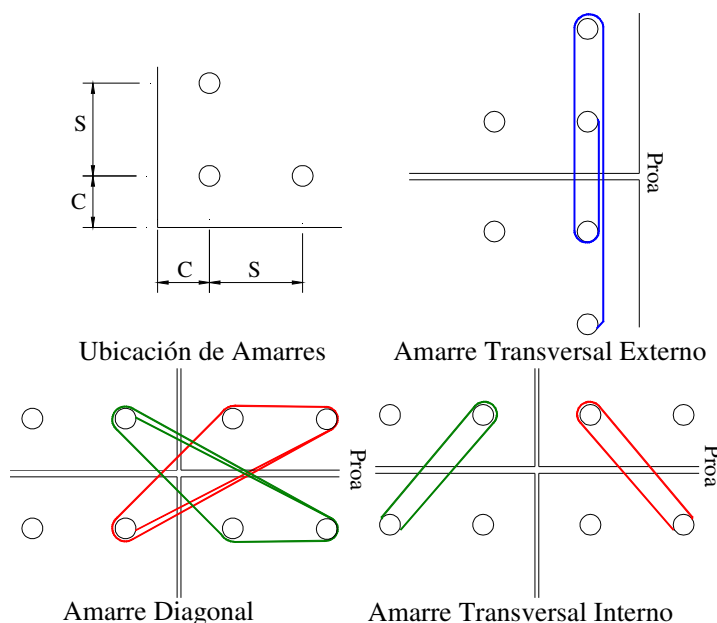


Figura 3. Configuración inicial de amarres entre barcazas

En base a las características de los cables de acero y de la configuración usual de los amarres se definen las propiedades de estos elementos en el modelo propuesto.

2.3 Masa agregada

Cuando una embarcación cambia de velocidad existe un término proporcional a la aceleración, que está asociado a la masa de agua que rodea a la embarcación. Este término se conoce como masa agregada y es generalmente adicionada a la masa de la embarcación. El valor de la masa agregada depende de factores como: la geometría de la embarcación, el calado, la profundidad libre y la dirección de desplazamiento, entre otros (PIANC 1984).

La mayoría de expresiones disponibles para la estimación de la masa agregada son válidas para buques de carga. Se han sugerido diferentes expresiones en base a observaciones de atracamiento de barcos o de modelo físicos a escala reducida de los mismos. Las recomendaciones de la AASHTO (2008), especifican un valor de masa agregada para embarcaciones en general, que para desplazamiento longitudinal varía entre el 5 % de la masa de la embarcación para una profundidad libre importante y 25% para profundidad libre pequeña. Para desplazamientos transversales el rango de la masa agregada sugerida por esta misma norma varía entre 50% y 80% respectivamente. Sin embargo, no se prescriben valores de la masa agregada en el caso de barcazas específicamente.

Con el objetivo de estimar la masa agregada particularmente para barcazas se consideró un fluido incompresible y no viscoso. De estas hipótesis surge que la presión en el fluido se puede obtener resolviendo la ecuación de Laplace y que en el contorno el fluido puede transmitir solo presiones normales y proporcionales a la aceleración normal del mismo.

$$\nabla^2 p = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial n} = -\rho \ddot{u}_n \tag{1}$$

donde p es la presión ρ es la densidad del fluido, n es la dirección normal, y \ddot{u}_n el campo de aceleraciones normales al contorno.

La masa agregada para aceleraciones en sentido longitudinal, transversal y rotacional se estimó resolviendo estas ecuaciones en tres dimensiones mediante diferencias finitas, en donde se consideraron las condiciones de simetría. La Figura 4 muestra la distribución de presión sobre el casco de una barcaza estándar de carga tipo “Jumbo Hopper” para aceleración rotacional unitaria (en este caso, se modela un cuarto de barcaza por simetría). Los valores de la masa agregada con respecto a la masa de la embarcación de acuerdo a la profundidad libre están dados en la Tabla 2.

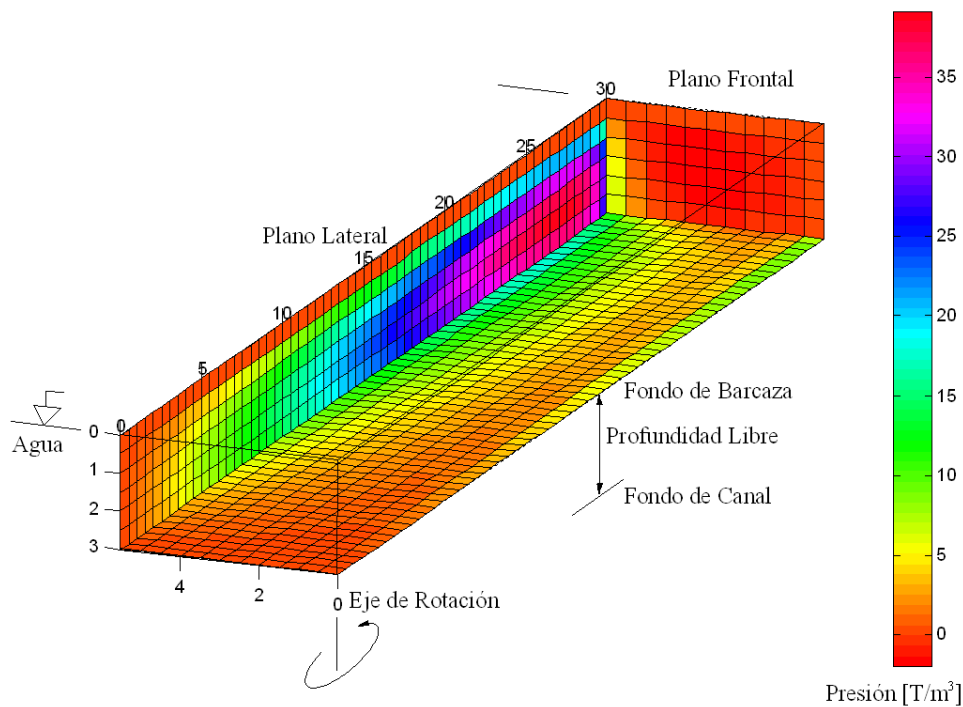


Figura 4. Distribución de presión en contorno de barcaza para aceleración rotacional unitaria. Modelo de un cuarto de barcaza.

Dirección de desplazamiento	Profundidad libre		
	> 0.5 Calado	0.3 Calado	0.15 Calado
Longitudinal	0.037	0.038	0.040
Transversal	0.246	0.252	0.264
Rotación	0.230	0.250	0.263

Tabla 2. Relación entre masa agregada y masa de barcaza

Puede verse que la masa asociada resulta fuertemente dependiente de la dirección del movimiento, mientras que resulta poco sensible a la profundidad libre. El valor de 5% para la dirección longitudinal indicado por la AASHTO (2008) parece estar ligeramente del lado de la seguridad (mayor energía cinética), mientras que la masa transversal es sensiblemente inferior

a la encontrada por [Larsen \(1993\)](#) para el caso de barcos (40 a 50 % de la masa de la embarcación).

2.4 Modelo de MGL unidimensional

[Harik y colaboradores \(2008a,b\)](#) propusieron un modelo para el caso de impacto perpendicular y simétrico de un grupo de barcasas. Este modelo unidimensional consiste en un grupo de masas y resortes elasto-plásticos donde cada masa representa una barcaza, mientras que cada resorte elasto-plástico, representa los vínculos que poseen las barcasas con las demás barcasas circundantes, de acuerdo a la situación que se encuentra dentro del grupo. Se puede observar un esquema de este modelo en la Figura 5.

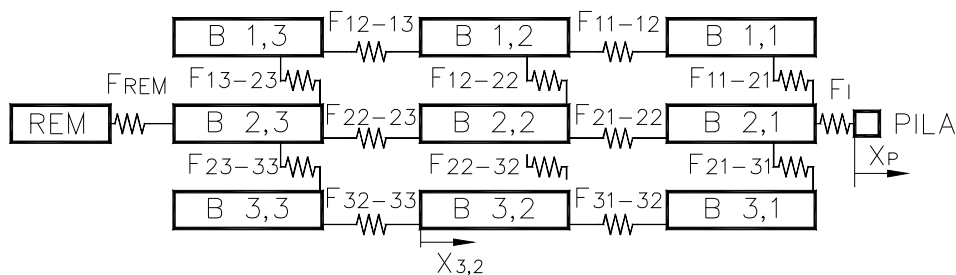


Figura 5. Modelo de grupos de barcasas ([Harik et al., 2008b](#))

En este modelo existen tres tipos de vínculos. El primer tipo es la curva carga-deformación de la proa. Este vínculo solo trabaja a compresión y relaciona la barcaza que impacta con el grado de libertad correspondiente al punto de impacto en la pila. El mismo es incorporado mediante una relación elasto-plástica no-lineal. El segundo tipo corresponde a los vínculos frontales entre barcasas 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). Los mismos son incorporados mediante una relación elasto-plástica con endurecimiento (a compresión) y una relación elasto-plástica (a tracción). El tercer tipo corresponde a los vínculos laterales entre barcasas 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 barcasas poseen una longitud libre (gaps) a partir de la cual empiezan a generar fuerza debido a desplazamientos adicionales. Esta longitud libre pretende modelar las condiciones usuales de la práctica de amarre. Se puede observar un esquema de estos vínculos en la Figura 6.

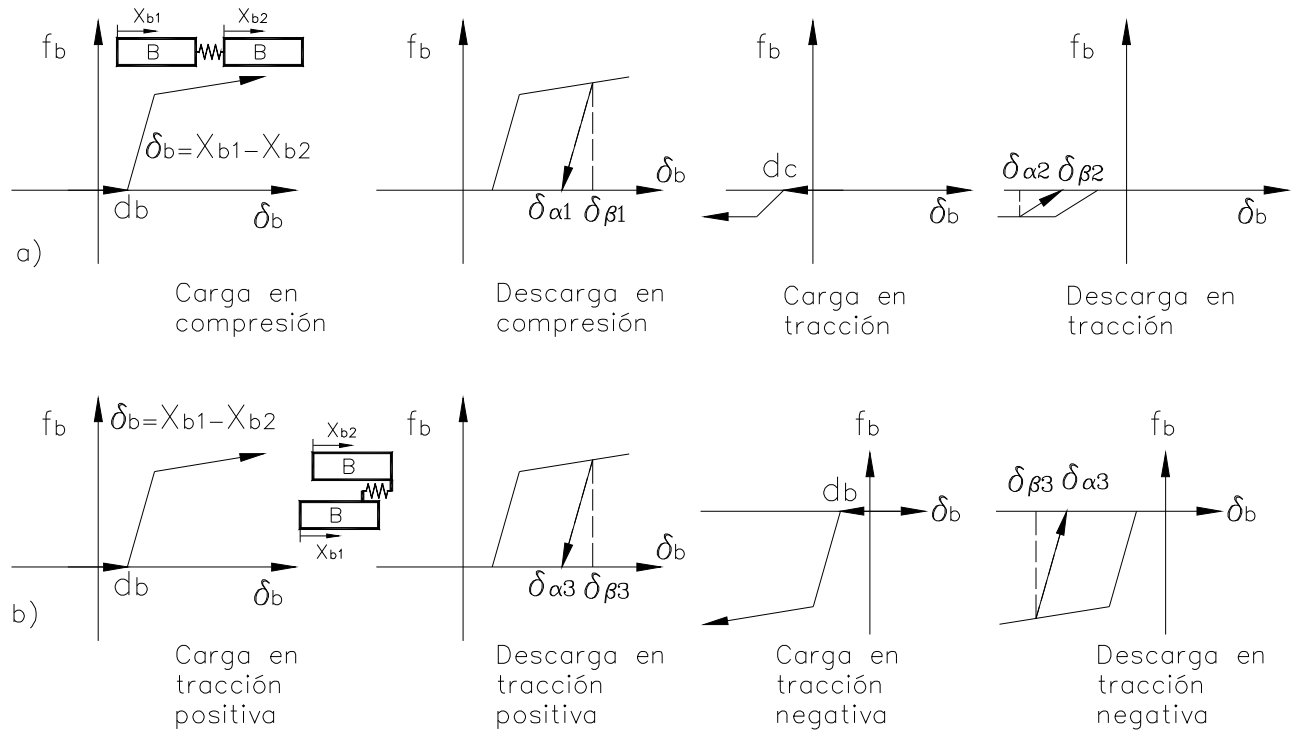


Figura 6. Relaciones carga-deformación del modelo unidimensional para impacto de grupos de barcas a) vínculo entre barcas de misma fila b) vínculo entre barcas de misma columna. (Harik y colaboradores, 2008a,b)

Harik y colaboradores (2008a,b) consideran un modelo de pila mediante 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 7.

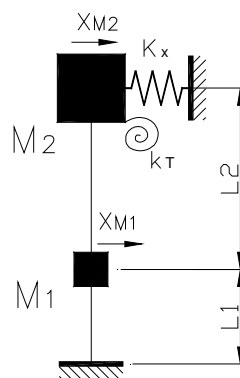


Figura 7. Modelo simplificado de pila. (Harik et al., 2008b)

La historia de carga producida por el impacto, surge del procedimiento de cálculo, donde se resuelven las ecuaciones de movimiento de cada grado de libertad a partir de la velocidad inicial del conjunto de barcas. Una observación importante realizada por los autores es que la deformación plástica de las barcas se produce principalmente en la proa que impacta, siendo despreciable en el cuerpo las barcas interiores al grupo.

Una limitación importante del método propuesto es que sólo es válido para impactos simétricos y perpendiculares. Por lo tanto no se pueden modelar impactos excéntricos, con velocidad oblicua o posibles inestabilidades por efectos geométricos. Además el modelo no considera la falla de los amarres debido a deformación excesiva, lo que no permite modelar la posible separación del conjunto en dos o más porciones.

3 GENERALIZACIÓN DEL MODELO DE MGL A DOS DIMENSIONES

Con el objetivo de modelar el impacto de grupos de barcazas de manera más general, se propone un modelo de múltiples grados de libertad en dos dimensiones. 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 globales 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. De acuerdo a lo observado mediante el modelo de MGL en una dimensión, el contacto de las barcazas que no entran en contacto con la pila se comporta elásticamente. Sin embargo, la proa de barcazas que impactan con la pila, que pueden sufrir grandes deformaciones plásticas, por lo tanto, estas proas se modelan mediante un elemento macro capaz de reproducir este fenómeno. A su vez los amarres entre barcazas se modelan con elementos elasto-plásticos con carga solo a tracción y con falla por deformación excesiva. En las siguientes secciones se describen algunas consideraciones del modelo propuesto.

3.1 Algoritmo de contacto

Debido a que en el impacto de grupos de barcazas es posible que ocurran grandes desplazamientos, es necesario aplicar un algoritmo que determine si existe contacto entre las diferentes unidades, y defina la posición y dirección de las fuerzas de contacto.

Con el objetivo de reducir el esfuerzo de cálculo, se definen las barcazas entre las que es posible el contacto, teniendo en cuenta barcazas adyacentes y diagonales. A su vez se definen zonas del contorno de cada barcaza a verificar, según la posición relativa de éstas, con el objetivo de reducir aún más el esfuerzo de cálculo.

El algoritmo de contacto se basa en determinar cuáles puntos de la malla de una barcaza se encuentran dentro del contorno de una segunda barcaza. Para esto, se traza una recta desde el punto que interesa verificar del primer contorno en una dirección determinada y se la prolonga indefinidamente. Si la recta así definida intersecta al contorno de la segunda barcaza un número impar de veces significa que el punto se encuentra dentro del contorno y existe contacto en ese punto, de lo contrario el punto se encuentra fuera del contorno y no existe contacto. Este procedimiento se repite para todos los puntos previamente definidos. La Figura 8 muestra un esquema del algoritmo usado.

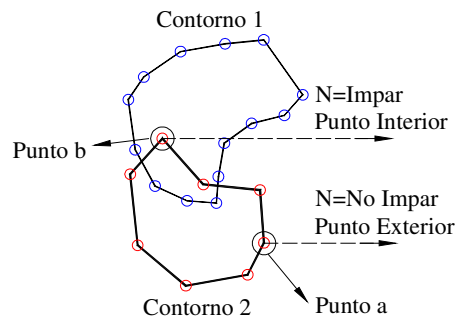


Figura 8. Funcionamiento de algoritmo de contacto. Punto a) Exterior b) Interior

Una vez definida la zona de contacto, se calculan: la dirección normal al contorno, la posición media, el área de contacto y la velocidad tangente relativa de las barcazas que entran en contacto. Se determina luego la magnitud, dirección y sentido de la fuerza normal, y la fuerza de fricción:

$$\begin{aligned}
 F_N &= Ak \\
 F_F &= F_N \mu_B
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

donde F_N es la fuerza normal de contacto, A es el área de solapamiento, k es la rigidez normal calibrada en base a los resultados detallados de elementos finitos, F_F es la fuerza de fricción y μ_B es el coeficiente de fricción entre barcazas.

3.2 Comportamiento de proa de barcaza

Para la proa de las barcazas que impactan contra la pila se adopta la relación carga-deformación definida por [Consolazio y colaboradores \(2008\)](#), que tiene en cuenta el ángulo de impacto y la forma y dimensión de la pila impactada. El comportamiento de la proa se incorpora en el modelo propuesto mediante un elemento macro, que determina la carga de impacto en base a los parámetros calculados por el algoritmo de contacto. La Figura 9 muestra un esquema de la incorporación del comportamiento de la proa en el modelo propuesto.

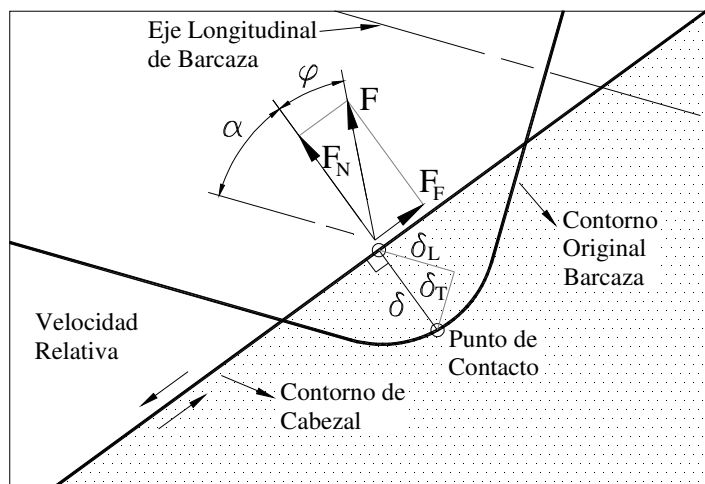


Figura 9. Comportamiento de proa de barcaza

La fuerza de impacto se calcula de la siguiente manera:

$$F_N = \begin{cases} 0 & \text{si } \delta - \varepsilon < 0 \\ k(\delta - \varepsilon) & \text{si } k(\delta - \varepsilon) < F_Y \\ F_Y & \text{si } k(\delta - \varepsilon) > F_Y \end{cases} \quad (3)$$

$$F_F = \mu_p F_N \quad (4)$$

$$F = \sqrt{F_N^2 + F_F^2} \quad (5)$$

donde F_N es la fuerza normal a la superficie de contacto, δ la distancia de penetración del contorno original en la pila, ε la deformación plástica ocurrida hasta el momento, k la rigidez elástica de la proa, F_Y la fuerza de fluencia de la proa. F_F la fuerza de fricción, μ_p el coeficiente de fricción entre barcaza y pila y F la fuerza de contacto resultante.

3.3 Comportamiento de los amarres

En el modelo propuesto los amarres que unen a las barcazas se modelan mediante elementos elasto-plásticos. Estos trabajan solo a tracción, y una vez que llegan hasta la deformación de rotura se elimina su capacidad de tomar carga. De acuerdo a la práctica usual de amarre, se definen amarres longitudinales, transversales y diagonales, donde tipo de amarre se modela individualmente. Notar que para un desplazamiento relativo dado, sólo uno de los amarres diagonales toma carga. La Figura 10 muestra la disposición de los diferentes tipos de amarres.

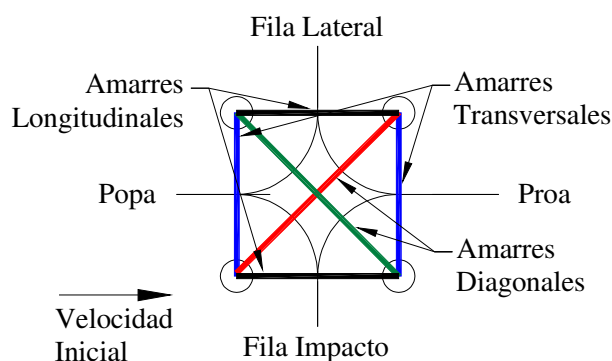


Figura 10. Modelo de amarres entre barcazas

3.4 Respuesta de la estructura

La historia de carga que se genera durante un impacto depende tanto del comportamiento del grupo de barcazas como de la respuesta de la estructura. En el modelo propuesto, la posición de la pila en un instante dado se calcula mediante la convolución de la historia de cargas sobre la estructura y la respuesta a impulso unitario de la misma. De esta manera, se incorpora la respuesta de la estructura completa, lo cual representa una mejora con respecto a al modelo simplificado propuesto por [Harik y colaboradores \(2008b\)](#). Este enfoque es válido sólo para sistemas lineales. Sin embargo, este planteo se considera adecuado debido a que en el diseño de puentes se busca generalmente una respuesta elástica en la estructura. Por otra parte, la duración de un impacto es muy corta como para que el amortiguamiento tenga un efecto considerable en la historia de carga.

Una vez definida la historia de carga, se podrá evaluar los esfuerzos generados en la estructura

realizando un análisis dinámico, considerando o no el amortiguamiento en la respuesta final.

3.5 Implementación

En base a las consideraciones explicadas en las secciones anteriores se implementa la resolución del modelo mediante integración numérica de las ecuaciones de movimiento. Se definen las condiciones iniciales: conformación del grupo de barcazas, velocidad inicial del conjunto de barcazas, excentricidad de impacto, geometría de pila y demás parámetros necesarios. Para la integración numérica de las ecuaciones de movimiento, se utiliza el método de los impulsos concentrados o de velocidad constante, considerando un intervalo de tiempo Δt fijo, donde la integración es del tipo explícita de dos pasos. La posición en el paso $n+1$ del grado de libertad considerado, a excepción de la correspondiente a la posición de la pila, se determina mediante la siguiente expresión:

$$\mathbf{u}_{n+1} = 2\mathbf{u}_n - \mathbf{u}_{n-1} + \left(\frac{\Delta t^2}{m} \right) \mathbf{F}_n \quad (6)$$

donde: \mathbf{u}_{n+1} , \mathbf{u}_n y \mathbf{u}_{n-1} son la posición del grado de libertad en el siguiente paso de tiempo, en el paso actual y el anterior, respectivamente; m es la masa del grado de libertad considerado y \mathbf{F}_n es la fuerza aplicada en el paso actual. El grado de libertad correspondiente a la posición de la pila se calcula en base a la historia de carga ocurrida hasta el paso correspondiente como se explicó en la sección anterior.

El intervalo de tiempo máximo, se calcula como la mitad del período de vibración más corto del sistema:

$$\Delta T \leq \frac{\pi}{\omega_{\max}} \quad (7)$$

donde ΔT es el intervalo de tiempo elegido para el cálculo, ω_{\max} es la mayor frecuencia de vibración. Sin embargo, dado que el intervalo de tiempo elegido influye en resolución de los resultados obtenidos, se adopta un intervalo menor al intervalo máximo definido anteriormente. El término de carga se evalúa en cada paso en base a las consideraciones explicadas en secciones anteriores.

4 ANÁLISIS DE IMPACTO DE GRUPOS DE BARCAZAS

Investigaciones previas han propuesto modelos simplificados para el rango de bajas velocidades y que no incorporan la repuesta de la pila ([Arroyo y Ebeling 2005](#)), modelos que desprecian la influencia de las filas de barcazas que no impactan con la pila ([Consolazio y colaboradores 2008](#)) o modelos de grupos de barcazas unidimensionales válidos para impactos simétricos y ausencia de giros ([Harik y colaboradores, 2008b](#)).

En párrafos anteriores se ha explicado el desarrollo de un modelo para el análisis de impacto de grupos de barcazas contra pilas de puentes que es más general a los modelos propuestos anteriormente. El objetivo de este modelo es estudiar ciertos aspectos que pueden tener influencia en la historia de carga producida por un grupo de barcazas.

El principal aspecto que se estudia en este trabajo mediante el modelo propuesto, es la influencia que generan las filas que no impactan directamente con la pila en la historia de carga producida durante el impacto.

Durante el impacto de un convoy de barcazas contra una pila, las filas laterales aportan cierta cantidad de energía a la fila que impacta a través del contacto y los amarres que las unen entre

sí. El efecto principal de las filas laterales en la historia de carga de un impacto simétrico es el de aumentar la duración del impacto. Este comportamiento se puede observar en la Figura 11, donde se compara el impacto de una única fila de 3 barcazas y el impacto de un convoy compuesto por 3 filas de 3 barcazas viajando a 2 m/s.

En esta sección se estudiará la influencia de las filas laterales en impactos simétricos de grupos de barcazas. Con el fin de cuantificar el efecto de las pilas laterales se define el coeficiente de aporte como la relación entre el impulso entregado por las filas laterales durante el impacto y la cantidad de movimiento inicial de la fila central.

$$C_L = \frac{I}{P} = \frac{(V_i - V_f)M_L}{V_i M_C} \quad (8)$$

donde C_L es el coeficiente de aporte de las filas laterales, I es el impulso que entrega la fila lateral, M_C y M_L es la masa de la fila central y de las filas laterales respectivamente, V_i es la velocidad inicial del conjunto y V_f es la velocidad final de las filas laterales.

De acuerdo a esta definición, la historia de carga de un impacto simétrico de un grupo formado por varias filas de barcazas se puede estimar aproximadamente como el impacto de una sola barcaza pero con una masa equivalente de la siguiente manera:

$$M_E = M_{FC} (1 + C_L) \quad (9)$$

donde M_E es la masa equivalente, M_{FC} es la masa de la fila central y C_L es el coeficiente de aporte de las filas laterales.

La Figura 11 muestra la historia de carga estimada para el impacto de un conjunto formado por 1 fila de 3 barcazas y el impacto centrado de un conjunto de 3 filas de 3 barcazas. Se puede observar el efecto de las filas laterales comparando la curva a), que desprecia la influencia de las filas laterales, y la curva b), que tiene en cuenta la transferencia de energía mediante las amarras y el contacto entre barcazas. Se puede observar que el método equivalente propuesto, curva c), representa adecuadamente la influencia de las filas laterales. En contraposición, se puede observar que si se consideran amarras elásticas curva d), se sobreestima considerablemente el impulso generado durante el impacto, el cual es menor debido a la falla de las amarras. En los casos analizados se consideró una pila plana de 4 metros de ancho, rígida a los efectos de limitar la discusión al efecto de las filas laterales, una velocidad inicial de 2 metros por segundo y con coeficiente de rozamiento de 0.35 entre barcazas. En este caso el coeficiente de aporte de filas laterales obtenido es igual a 0.206, por lo que la masa de las filas laterales incrementan la cantidad de movimiento entregado en un 20.6%.

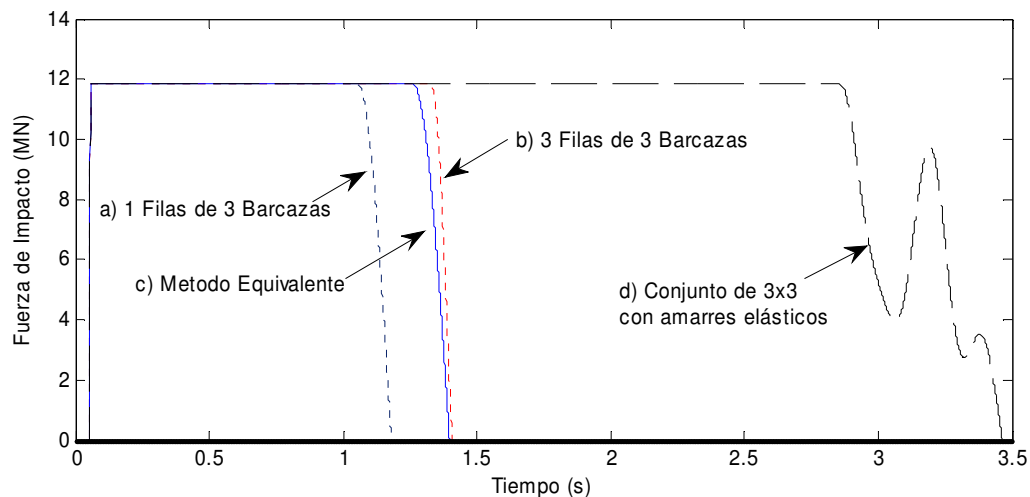


Figura 11. Historia de carga de impacto de un grupo de a) una fila de 3 barcazas b) 3 filas de 3 barcazas c) historia de carga mediante método equivalente d) Conjunto de 3 filas de 3 barcazas con amarres elásticos. Velocidad 2 m/s contra pila rígida plana de 4 metros de ancho.

Debido a que en el aporte de las filas laterales influyen una cantidad de diferentes aspectos, se realiza un análisis paramétrico para determinar el coeficiente de aporte para distintos escenarios posibles en nuestro medio. Los parámetros considerados en el análisis son: la configuración de los amarres; cantidad de barcazas que componen una fila del grupo; coeficiente de rozamiento entre barcazas; la velocidad inicial del conjunto y la fuerza de fluencia de la proa que impacta (se define en base al ancho de una pila plana y las relaciones propuesta por [Consolazio y colaboradores, 2008](#)).

En un primer estudio se incluyó también como parámetro la rigidez y la masa asociada al punto de impacto pero estudios de sensibilidad indicaron que la respuesta de la pila tiene una influencia despreciable respecto al aporte de las filas laterales para el rango de la tipología típica de los puentes sobre el Río Paraná ([Luperi y colaboradores, 2010](#)). La Tabla 3 muestra la combinación de valores de los parámetros utilizados.

Parámetro	Valores adoptados
Velocidad inicial del conjunto (m/s)	1 - 2 - 3 - 4 - 5
Tamaño de la pila plana impactada (m)	2 - 4 - 6 - 8 - 10
Coeficiente de rozamiento	0.2 - 0.35 - 0.5
Cantidad de barcazas en una fila	2 - 3 - 4 - 5
Configuración de amarres	Débil - Media - Robusta

Tabla 3. Selección de parámetros de estudio

La Tabla 4 muestra la consideraciones realizadas respecto a los distintos tipos de configuraciones de amarres utilizadas en el estudio paramétrico.

Configuración de amarres	Número de secciones Amarres			Diámetro (pulgadas)	Condición
	Transversales Externas	Transversales Internas	Diagonales		
Débil	2	1	2	7/8	Usada
Media	3	2	3	1	Usada
Robusta	4	3	4	1	Nueva

Tabla 4. Configuraciones de amarres

En caso de impacto contra pila circular se puede utilizar los resultados de este análisis ingresando con el ancho de pila plana que produzca la misma fuerza de fluencia según la definición de [Consolazio y colaboradores \(2008\)](#).

La combinación de estos parámetros proporciona una cantidad total de 900 casos, de los cuales se pueden diferenciar dos tipos de situaciones; a) casos donde se produce la falla de los amarres entre filas y la correspondiente separación de las filas laterales y b) casos donde no se produce la separación de las filas laterales.

La separación de las filas laterales tiene un efecto considerable en el valor del coeficiente de aporte de filas laterales. A tal efecto, se define el índice de separación de las filas laterales en base a los resultados, con el propósito de separar los casos donde se produce o no la ruptura de los amarres:

$$I_n = \exp(a_1 \cdot Col + b_1 \cdot V_i + c_1 \cdot \mu + d_1 \cdot W_p + e_1) \quad (10)$$

donde I_n es el índice de separación de las filas laterales, Col es la cantidad de barcasas que componen una fila, V_i es la velocidad inicial en metros sobre segundos, μ es el coeficiente de rozamiento entre barcasas, W_p es el ancho de la pila plana en metros y a_1 , b_1 , c_1 , d_1 , e_1 son constantes que tienen los valores indicados en la Tabla 5.

	Configuración de amarras	Parámetros de Índice					Valor de Comparación	
		a_1	b_1 [s/m]	c_1	d_1 [1/m]	e_1	Inferior (Vci)	Superior (Vcs)
Convoy de 3 Filas	Débil	1.970	-0.032	11.369	-1.035	-12.655	1	1
	Media	0.463	-0.036	0.683	-0.242	-0.964	0.85	1
	Robusta	0.386	-0.040	0.406	-0.079	-0.769	0.95	1.6
Convoy de 5 o más Filas	Débil	-	-	-	-	-	Separación	
	Media	0.701	-0.034	0.256	-0.353	-1.168	1.1	1.4
	Robusta	0.417	-0.029	0.242	-0.138	-0.062	1.75	2.1

Tabla 5. Parámetros de Índice de separación

Una vez determinado el caso de estudio, se calcula el valor del índice de separación. Valores del índice mayores al valor de comparación superior indican que no se producirá la falla de los amarres. En estos casos se debe considerar la masa del grupo de barcasas en su totalidad, ya que todo el convoy actúa como un solo conjunto.

Valores de índice intermedio a los valores de comparación indican una situación límite donde se tendrá que considerar ambos casos. Esta situación se observó en el 9% de los casos estudiados.

Valores del índice menores al valor de comparación inferior indican que se producirá la falla de los amarres y la correspondiente separación de las filas laterales. En estos casos se define una regresión para determinar el coeficiente de aporte de filas laterales, que se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$C_L = \exp(a \cdot Col + b \cdot V_i + c \cdot \mu + d \cdot W_p + e) \quad (11)$$

donde se utilizan los mismos parámetros y unidades que en la definición del índice de separación y a , b , c , d , e son constantes que tienen los valores indicados en la Tabla 6. Se puede observar en esta tabla que el coeficiente de ajuste de la regresión es superior a 0.93 en todos los casos.

	Configuración de amarras	Parámetros de Regresión					Ajuste R^2
		a	b [s/m]	c	d [1/m]	e	
Convoy de 3 Filas	Débil	0.329	-0.364	0.983	-0.162	-2.195	0.938
	Media	0.372	-0.327	1.155	-0.143	-1.640	0.937
	Robusta	0.601	-0.264	1.403	-0.175	-1.448	0.933
Convoy de 5 Filas o más	Débil	0.309	-0.363	1.096	-0.152	-2.223	0.956
	Media	0.353	-0.330	1.099	-0.139	-1.599	0.933
	Robusta	0.543	-0.312	1.206	-0.163	-1.242	0.938

Tabla 6. Parámetros de regresión y coeficiente de ajuste

La Figura 12 resume la manera de implementar el método de coeficiente de aporte en el cálculo de la historia de carga de conjuntos de varias filas de barcazas.

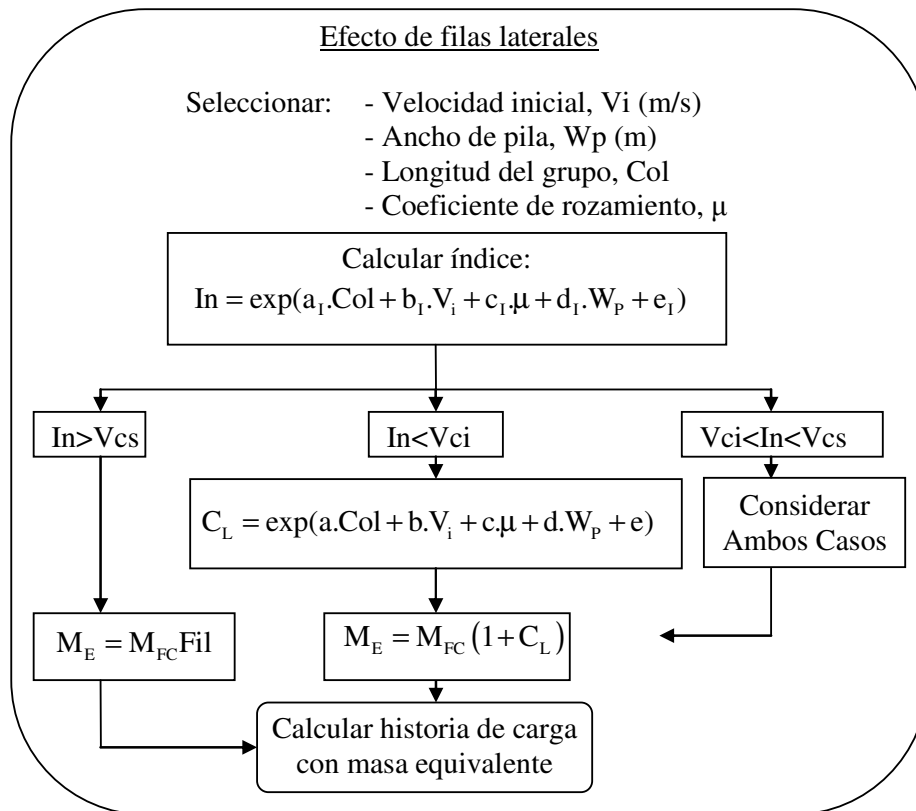


Figura 12. Implementación del coeficiente de aporte en el cálculo de la historia de carga

5 CONCLUSIONES

En el impacto de un conjunto de barcasas contra una pila de puente influyen una serie de fenómenos que repercuten en la historia de carga que el puente debe soportar. Para determinar de forma fehaciente esta historia de carga es necesario incorporar, entre otros aspectos, la respuesta de la estructura impactada, la geometría de la pila, el comportamiento elasto-plástico de la o las proas que impactan, la interacción entre las barcasas que componen el grupo y el efecto de la masa hidrodinámica.

Investigaciones previas han propuesto modelos simplificados que poseen limitaciones para el análisis del impacto de grupos de barcasas, como por ejemplo; incapacidad de incorporar adecuadamente el efecto de las filas que no impactan directamente con la pila o imposibilidad de modelar impactos no simétricos. Los códigos de diseño disponibles no proporcionan herramientas de análisis específicas que permitan tener en cuenta estas situaciones particulares pero frecuentes en el diseño. A su vez, la masa hidrodinámica definida por los códigos se basa en estudios sobre barcos y no sobre la geometría de barcasas. Se encontró que la masa hidrodinámica estimada para barcasas tiene un valor inferior al descrito por los códigos de diseño, especialmente para la dirección transversal.

En este artículo se propone un modelo de múltiples grados de libertad en dos dimensiones con el objetivo de modelar el impacto de grupos de barcasas de manera más general. Este modelo incorpora las fuerzas de interacción entre las barcasas que componen el convoy, la geometría de la pila, la respuesta de la estructura impactada y el comportamiento no-lineal de la barcaza que entra en contacto con la pila. A su vez los amarres entre barcasas se modelan con elementos elasto-plásticos con carga solo a tracción y con falla por deformación excesiva.

Mediante el modelo propuesto se estudia el efecto de las filas que no impactan directamente con la pila para casos de impacto simétricos. Se realizó un estudio paramétrico en el rango de variables esperable a nivel local. En base a este estudio se definió un método simplificado que permite estimar el comportamiento del grupo de barcasas y la influencia de las filas laterales en la historia de carga generada por el impacto.

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.

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.

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

F. José Luperi, Federico Pinto and Carlos A. Prato. "Historia de carga debido a impacto frontal de barcasas contra pilas de puentes". *Mecom-Cilamce, Buenos Aires, Argentina 2010*.

Permanent International Association of Navigation Congresses (PIANC), "Report of the

International Commission for Improving the Design of Fender Systems," *Brussels, Belgium, 1984.*

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*