



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

CALIBRACIÓN DE MODELOS DE IMPACTO APLICADO A PUENTES ESVIADOS DE HORMIGÓN ARMADO

Memoria de Título presentada por

Benjamín Hiram Eliu Morales Morales

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Ramiro Bazáez Gallardo

Agosto de 2024



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA TESIS:

**CALIBRACIÓN DE MODELOS DE IMPACTO APLICADO A PUENTES
ESVIADOS DE HORMIGÓN ARMADO**

AUTOR:

Benjamín Hiram Eliu Morales Morales

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERIA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Nombre Prof. Guía

Ramiro Bazáez

Nombre Miembro 1 Comisión

Claudio Sepúlveda

Valparaíso, Chile, Agosto de 2024

CALIBRACIÓN DE MODELOS DE IMPACTO APLICADO A PUENTES ESVIADOS DE HORMIGÓN ARMADO

Benjamín Morales¹, Ramiro Bazález¹

¹ Universidad Técnica Federico Santa María

Resumen

Este estudio se enfoca en la calibración de modelos de impacto aplicados a puentes esviados de hormigón armado, un tema crucial debido a la vulnerabilidad sísmica de estas estructuras en Chile. El estudio se centra en el fenómeno de impacto entre el tablero y el estribo, lo cual puede desencadenar en severos daños y colapsos. Para ello, se emplean resultados de una campaña experimental y modelos numéricos en OpenSees.

Los modelos de impacto de Muthukumar y Hertz-Damp se analizan en detalle, ajustando sus parámetros para reproducir las fuerzas de impacto observadas en los experimentos. Se evalúa la influencia del ángulo de esviaje y la masa adicional en la respuesta de los especímenes, destacando la importancia de considerar la flexibilidad del estribo en los modelos numéricos.

Se concluye que el modelo de Hertz-Damp ofrece un mejor ajuste a los datos experimentales que el modelo de Muthukumar, especialmente para masas adicionales elevadas. La calibración de los modelos permite obtener resultados más precisos y confiables, lo que contribuye a un diseño más seguro y eficiente de puentes esviados.

Se encontró una discrepancia sustancial entre los datos numéricos y experimentales, atribuida a la poca rigidez de los elementos de estribo, lo cual destaca la necesidad de mejorar los modelos de análisis estructural. Esto es esencial para minimizar errores y promover un diseño más preciso y seguro de puentes de hormigón armado afectados al fenómeno de impacto.

Palabras claves: modelo de impacto, sismo, impacto, puentes esviados

1 Introducción

Asegurar un comportamiento óptimo de los puentes frente a diversas solicitaciones ha sido el foco de investigación y evaluación durante muchos años. En Chile, el estudio del comportamiento de los puentes ante solicitaciones sísmicas cobra vital importancia luego de observar daños severos, incluso colapso, de un centenar de puentes viales de hormigón armado (MOP, 2018). Cabe destacar que un porcentaje importante de los puentes dañados durante los últimos eventos sísmico en Chile y el mundo son puentes esviados (ver Figura 1). Un ejemplo de esto es el puente Hanshin Expressway ubicado en Nishinomiya, el cual colapsó durante el terremoto de Kobe de 1995 en Japón (Figura 2).

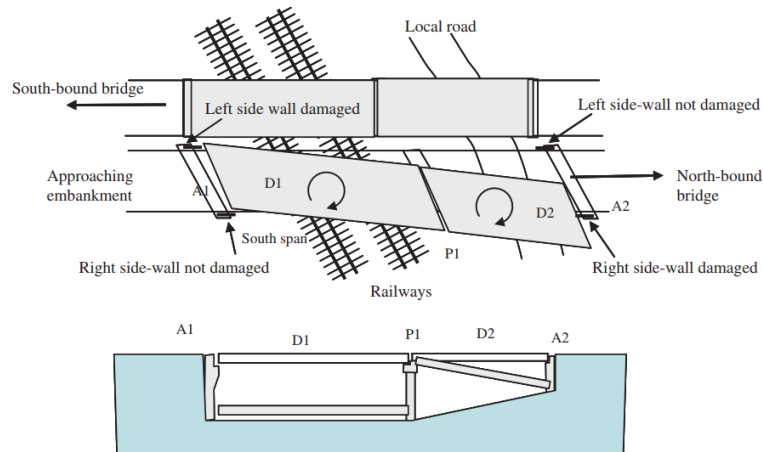


Figura 1: Colapso del Paso Superior Hospital

Fuente: Kawashima et al., 2011.



Figura 2: Colapso del Hanshin Expressway, terremoto de Kobe (1995).

En los puentes esviados, el tablero (la superficie horizontal por donde transitan vehículos o peatones) no está alineado perpendicularmente con los estribos (las estructuras que soportan los extremos del puente y lo conectan con el terreno). En otras palabras, el eje longitudinal del tablero forma un ángulo oblicuo con respecto al eje de los estribos. Esta configuración es común en zonas donde existen restricciones geométricas o topográficas que impiden la construcción de un puente recto convencional. Por ejemplo, en intersecciones de carreteras en ángulo, cruces de ríos en diagonal o terrenos con pendientes pronunciadas.

En los últimos años, muchas investigaciones se han centrado en evaluar los mecanismos de colapso de estas estructuras; especialmente, la pérdida de apoyo entre el estribo y el tablero debido a

desplazamientos y rotaciones excesivas generadas durante sismos de gran intensidad (Aldea et al., 2021; Dimitrakopoulos, 2011; Hube et al., 2010; Navarro, 2019; Miari et al., 2021).

Autores como Wu et al. (2019) o Kun et al. (2017) han realizado estudios numéricos y experimentales, en los cuales se ha determinado que el fenómeno de impacto generado entre el estribo y el tablero podría explicar gran parte del mecanismo de colapso observado en puentes esviados. En la mayoría de estas investigaciones se han llevado a cabo simulaciones numéricas utilizando modelos de impacto calibrados con ensayos experimentales de tableros de acero, lo cual representa una limitación debido a que el fenómeno de impacto depende de la materialidad de los cuerpos impactando. La complejidad que tiene el fenómeno de impacto en la práctica hace que sea aún más difícil su modelación numérica.

La difícil implementación computacional del fenómeno de impacto ha dado cabida a una serie de investigaciones en el tema. En la actualidad, existen modelos de impacto simplificados, como el modelo Lineal, Kelvin-Voight, Hertz y HertzDamp. Jankowski & Mahmoud (2015) concluyeron que los modelos viscoelásticos lineales, HertzDamp y no lineales, proporcionan las leves diferencias en la respuesta dinámica de sistemas que impactan bajo excitación sísmica, con ventajas y desventajas dependiendo de la materia prima de los elementos impactados. Los análisis del modelo viscoelástico indicaron que es ideal para materiales con propiedades viscoelásticas marcadas, como la madera y otros polímeros, proporcionando una mejor predicción de la respuesta dinámica. Los resultados del modelo de Muthukumar indican que es adecuado para aplicaciones en elementos estructurales sometidos a cargas dinámicas y elementos que se ven afectados por el roce, como el concreto y el acero. El modelo HertzDamp es útil para colisiones de acero y hormigón, ya que captura la relación fuerza-deformación y disipación de energía, pero puede no ser preciso para materiales como la madera.

Debido a lo anterior, en esta memoria se realizará un estudio comparativo entre ensayos experimentales y modelos de impacto implementados en el software OpenSees para puentes viales de hormigón armado tanto rectos como esviados sujetos a pulsos de velocidades.

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

Comparar y calibrar modelos presentes en la literatura con resultados experimentales del impacto estribo-tablero en puentes de hormigón armado, teniendo en cuenta las características propias de los puentes chilenos en términos de estructuración, materialidad y geometría.

2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se han propuesto para lograr el objetivo general son los siguientes:

- Comparar fuerzas de impacto experimentales con resultados de simulaciones numéricas que incorporen modelos de impacto presentes en la literatura.
- Calibrar los parámetros de los modelos de impacto de tal manera que se ajusten a los resultados experimentales.
- Determinar relaciones entre el ángulo de esviaje, magnitud de las fuerzas, modelos numéricos de impacto y sus parámetros.

3 Marco teórico

El fenómeno de impacto generado entre el estribo y el tablero en puentes, generalmente, ocurre durante sismos de gran intensidad. Esto se debe a que ambos componentes del puente poseen distintas propiedades dinámicas, por lo que sus desplazamientos relativos son distintos y si la separación no es suficiente, estos componentes podrían impactar. A su vez, el impacto puede provocar daños localizados en los tableros o estribos, desplazamientos y giros del tablero, e incluso el colapso de la estructura. En

algunas investigaciones como la de Wu et al. (2016) se determinó que el ángulo de esviaje puede influir significativamente en la respuesta dinámica que tendrá la estructura.

A continuación, se presenta una profundización del estado del arte sobre este fenómeno aplicado a puentes, considerando los factores que influyen en su respuesta sísmica, desplazamientos y giros relativos.

3.1 Influencia del ángulo de esviaje en puentes

Tras el terremoto del Maule de 2010 diversos autores como Hube et al. (2010), Kawashima et al. (2011) y Schexnayder et al. (2014), basados en inspecciones en terreno, se centraron en identificar los mecanismos de colapsos en puentes. Dichos autores indicaron que las rotaciones excesivas que se producían en el tablero en puentes esviados, como se ilustra en la Figura 3, se puede relacionar a los impactos entre el estribo y el tablero o entre tableros. En la Figura 4 se muestra la rotación del tablero debido a las fuerzas producidas por los impactos, generando así un momento que explica este giro.

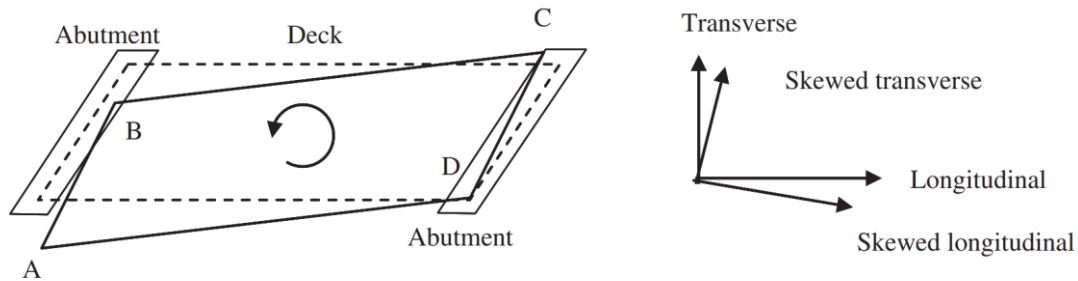


Figura 3: Pérdida de apoyo de un puente esviado debido a la rotación del tablero,
Fuente: Kawashima et al., 2011.

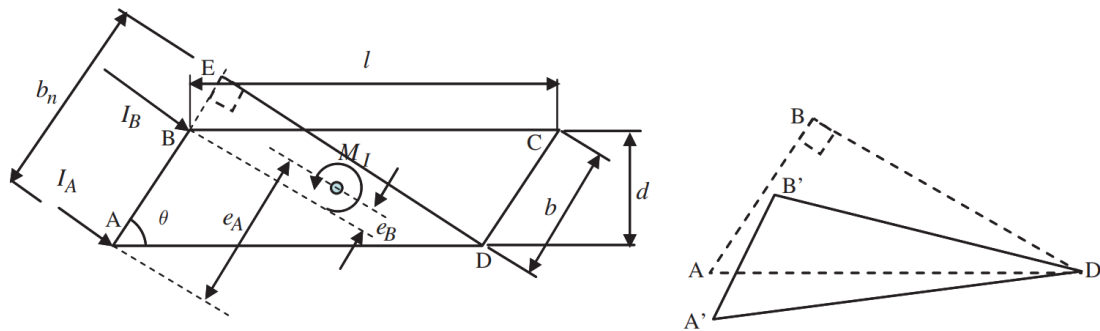


Figura 4: Rotación del tablero debido a las fuerzas de impacto I_A e I_B ,
Fuente: Kawashima et al., 2011.

En el Manual de Carreteras (MOP, 2018), se establecen algunas indicaciones respecto a los parámetros geométricos en puentes esviados. Se señala que los puentes esviados pueden mostrar un comportamiento complejo y experimentar la rotación de la superestructura durante un sismo. Esto ocurre cuando los extremos de los tableros impactan con los estribos o con los tableros contiguos. Particularmente, cuando el ángulo agudo del tablero es menor a 90° , la rotación del tablero puede causar la pérdida de apoyo de los extremos desde las mesas de apoyo o cabezales de la infraestructura, lo que eventualmente puede llevar al colapso del puente.

Para los puentes esviados y curvos, se debe considerar la relación entre el ancho (b) y la longitud continua del tablero (L) en función del ángulo agudo de este. La posibilidad de rotación de una superestructura puede evaluarse en puentes esviados usando la ecuación (1). Esto se presenta gráficamente en la Figura 5, la cual indica que, si la disposición geométrica del tablero y el ángulo de

esviaje se encuentran en un punto por debajo de la línea de referencia, existe la posibilidad de que se produzcan desplazamientos laterales excesivos en el tablero, acompañados de rotaciones que pueden provocar la pérdida de apoyo del tablero.

$$\frac{\sin(2\theta)}{2} > \frac{b}{L} \quad (1)$$

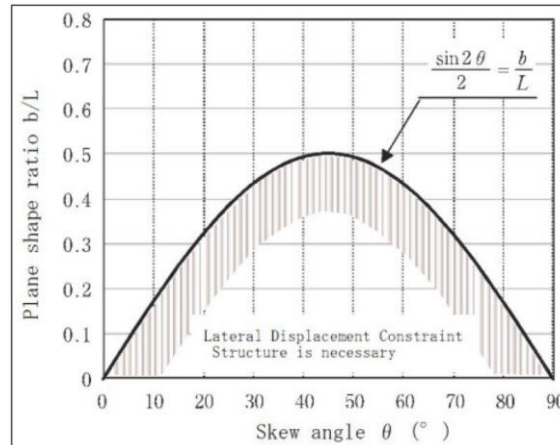


Figura 5: Grafica de susceptibilidad a rotación del tablero de un puente – Limite de rotación libre.
Fuente: MOP, 2018

3.2 Modelación numérica

Para evaluar el comportamiento sísmico de puentes esviados se utilizó el software OpenSees debido a sus ventajas de código abierto y su flexibilidad para realizar análisis no lineal de estructuras. La modelación numérica se subdividirá en dos partes, la modelación de la estructura y el modelo de impacto para evaluar la interacción estribo-tablero.

3.2.1 Modelación numérica de puentes esviados

Según estudios teóricos, como el de Fardis y Tsionis (2013), para representar el comportamiento de la superestructura de puentes en eventos sísmicos, donde se espera un comportamiento lineal de los elementos, se recomienda el uso de elementos elásticos (elastic beam-column elements). En algunos artículos, como los de Xiang y Alam (2019) y Tavares et al. (2013), se emplearon varios elementos elásticos orientados en las direcciones transversal y longitudinal para modelar la superestructura de los puentes. En los modelos numéricos, la superestructura se suele representar mediante elementos elásticos con masas concentradas o distribuidas, dependiendo del enfoque del estudio. Para ello, la implementación numérica se puede realizar con distintos software, siendo uno de los más utilizados en investigación, el software OpenSees (Mazzoni et al., 2006).

En este contexto, el estudio de Navarro (2019) se centró en evaluar las expresiones para determinar las longitudes mínimas de las mesas de apoyo en puentes chilenos. A partir de una modelación no lineal del paso superior Lo Echevers, realizada en el software OpenSees, se llevaron a cabo análisis dinámicos no lineales con registros sísmicos del terremoto de Maule (2010). Como conclusión de su análisis, se determinó que la rotación y los desplazamientos del tablero aumentan en función del incremento del ángulo de esviaje y del coeficiente de fricción.

Aldea et al. (2021) compararon el desempeño sísmico de cuatro puentes chilenos esviados mediante curvas de fragilidad. Para ello, desarrollaron modelos no lineales en OpenSees de cuatro puentes, tanto en su condición original como reparada tras el terremoto de Maule (2010). En su análisis, extrajeron los desplazamientos y giros del tablero con respecto al estribo, concluyendo que estos puentes se ubicaban

bajo la curva de susceptibilidad señalada en la Figura 4, lo que pudo inducir desplazamientos excesivos y la posterior falla de estos durante dicho sismo. Una de sus conclusiones fue que un aumento del ángulo de esviaje incrementa las probabilidades de daño en las estructuras e incluso el colapso.

3.2.2 Modelo del fenómeno de impacto

El fenómeno de impacto entre el tablero y el estribo de un puente es intrínsecamente no lineal debido a la naturaleza del contacto y a los posibles daños que pueden producirse en los elementos estructurales. Sin embargo, con fines comparativos y para establecer una base de referencia, en esta investigación se utilizarán modelos lineal-elásticos de impacto, reconociendo sus limitaciones en la representación precisa del fenómeno.

Una revisión exhaustiva de la literatura revela la existencia de diversos modelos analíticos continuos o simplificados para representar el impacto en puentes. Estos modelos, como los descritos por Jankowski (2015), se clasifican en dos categorías principales: modelos de contacto puntual y modelos de contacto distribuido.

Modelos de contacto puntual: Simplifican la interacción entre el tablero y el estribo como un contacto concentrado en un único punto, donde la fuerza de impacto se transmite directamente. Algunos ejemplos son los modelos de Kelvin-Voigt, modelo de Hertz, y el modelo de Muthukumar.

Modelos de contacto distribuido: Consideran una distribución de fuerzas a lo largo de la zona de contacto entre el tablero y el estribo, permitiendo una representación más realista de la interacción. Un ejemplo es el modelo de Winkler, el cual representa el contacto mediante una serie de resortes distribuidos a lo largo de la superficie de contacto.

La elección del modelo adecuado dependerá de la complejidad del problema, los recursos computacionales disponibles y los objetivos del análisis. En esta investigación, se utilizarán modelos de contacto puntual debido a su simplicidad y eficiencia computacional, reconociendo sus limitaciones en la representación completa del fenómeno de impacto. La Tabla 1 lista los modelos de contacto puntual más utilizados en la literatura (Hughes & Mosqueda, 2020) con sus respectivas formas de cálculo y leyes constitutivas. Además, en la Figura 6 se presentan gráficamente cada uno de los modelos.

Tabla 1: Leyes constitutivas de cada modelo de impacto.

Fuente: Hughes & Mosqueda, 2020.

Model name	Constitutive law	Input parameters
Linear elastic	$f_c = k_{eff}\delta$	$k_{eff} = k_h \sqrt{\delta_{mc}}$
Linear viscoelastic	$f_c = k_{eff}\delta + c_{eff}\dot{\delta}$	$k_{eff} = k_h \sqrt{\delta_{mc}}$ $c_{eff} = 2\xi_{KV} \sqrt{m_{eff} k_{eff}}$ $\ln\left(\frac{1}{e}\right) = \frac{2\xi_{KV}}{\sqrt{1-\xi_{KV}^2}} \arctan\left(\frac{\sqrt{1-\xi_{KV}^2}}{\xi_{KV}}\right)$
Jankowski	$f_c = \begin{cases} k_h \delta^{3/2} + c_J \dot{\delta} & , \dot{\delta} > 0 \\ k_h \delta^{3/2} & , \dot{\delta} \leq 0 \end{cases}$	k_h $c_J = 2\xi_J \sqrt{m_{eff} k_h \sqrt{\delta}}$ $\xi_J = \frac{9\sqrt{5}}{2} \frac{\dot{A}}{\dot{n}} \frac{1-e^2}{c(e(9\pi-16)+16)}$
Hertzdamp	$f_c = k_h \delta^{3/2} + c_h \dot{\delta}$	k_h $c_h = \xi_h \frac{k_h}{\delta_0} \delta^{3/2}$ $\xi_h = \frac{8\dot{A}}{5\dot{n}} \frac{1-e}{e}$
Muthukumar	$f_c = \begin{cases} k_1 \delta & , \dot{\delta} > 0 \text{ and } \delta \leq \delta_y \\ k_1 \delta_y + k_2 (\delta - \delta_y) & , \dot{\delta} > 0 \text{ and } \delta > \delta_y \\ f_m - k_1 (\delta_m - \delta) & , \dot{\delta} \leq 0 \text{ and } \delta_m - \delta_y < \delta \leq \delta_m \\ f_m - k_1 (\delta_m - \delta_y) - k_2 (\delta_m - \delta_y - \delta) & , \dot{\delta} \leq 0 \text{ and } \delta < \delta_m - \delta_y \end{cases}$	$k_1 = \left(1 + \frac{2\dot{A}}{5\dot{n}} \frac{1-e^2}{a}\right) k_{eff}$ $\delta_y = a\delta_{mc}$ $k_2 = \left(1 - \frac{2\dot{A}}{5\dot{n}} \frac{1-e^2}{1-a}\right) k_{eff}$ $0 < a < \frac{2}{5}(1-e^2)$

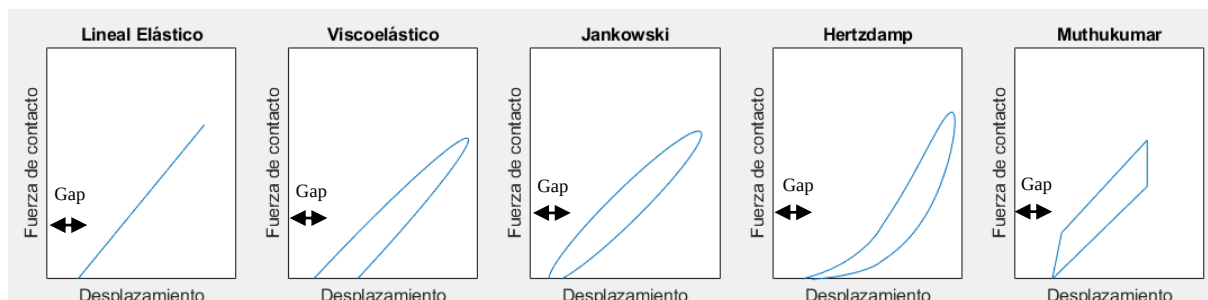


Figura 6: Graficas de modelos constitutivos de modelos de impacto.
Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.1 Modelo lineal elástico

El modelo lineal elástico es uno de los más usados en los estudios de impacto, esto debido a su simplicidad. En este modelo se representan las fuerzas de impacto a partir de la rigidez de los elementos. La separación entre elementos (en nuestro caso la separación entre estribo-tablero) viene representada por el gap.

3.2.2.2 Modelo viscoelástico

La adición de amortiguamiento viscoso al modelo de contacto lineal-elástico da lugar al modelo viscoelástico lineal, a veces denominado modelo de contacto de Kelvin-Voigt. La formulación viscoelástica depende de la velocidad de penetración o deformación durante el impacto (δ).

3.2.2.3 Modelo de Jankowski

El modelo de contacto de Jankowski puede verse como una extensión no lineal del modelo de contacto de Kelvin-Voigt o viscoelástico. Específicamente, el modelo de Jankowski modifica el coeficiente de amortiguamiento para que sea una función de la hendidura que genera, de modo que la fuerza de contacto sea cero cuando la indentación o hendidura sea cero. Además, el modelo de Jankowski solo aplica amortiguamiento durante la fase de aproximación del contacto, cuando la velocidad de deformación es positiva.

3.2.2.4 Modelo Hertzdamp

El modelo de Hertzdamp es una modificación al modelo de Hertz, al considerar la disipación de energía. En este modelo se incluye una expresión asociada al uso del coeficiente de amortiguamiento, el cual representa las pérdidas de energía durante el impacto. Gráficamente el modelo se presenta en la Figura 6 y suele requerir mayor tiempo de análisis debido a su naturaleza no lineal.

3.2.2.5 Modelo de Hertz modificado por Muthukumar

Este modelo bilineal es una modificación del modelo de Hertzdamp desarrollado por Muthukumar (2003), quien realizó aproximaciones en el modelo para permitir una mejor implementación computacional, todo esto tras un estudio de fuerzas de impacto en puentes.

3.3 Relación entre modelos y base experimental

Dimitrakopoulos (2011) fue uno de los primeros investigadores en establecer una base teórica para el análisis de la respuesta sísmica de puentes esviados con impacto entre el tablero y los estribos, validando sus hallazgos mediante comparaciones con resultados experimentales. Su investigación demostró que la tendencia de estos puentes a desplazarse transversalmente y/o rotar tras los impactos no depende únicamente del ángulo de esviaje, sino también de la geometría del tablero y la fricción entre las superficies de contacto.

El estudio también reveló que el acoplamiento de la respuesta sísmica, es decir, la influencia del impacto en un punto sobre el comportamiento global del puente es más pronunciado en el rango bajo del espectro de frecuencia (excitaciones de período corto/estructuras flexibles). Dimitrakopoulos presentó espectros de respuesta adimensionales para los desplazamientos y rotaciones transversales desencadenadas por el

impacto en un tablero de puente esviado. A pesar de la complejidad de la respuesta, estos espectros muestran un patrón claro: las rotaciones resultantes del contacto aumentan con el ángulo de esviaje.

Posteriormente, Shi & Dimitrakopoulos (2017) analizaron datos de un ensayo en mesa vibratoria de un modelo a escala de un puente recto. En dicho trabajo se observaron rotaciones en el plano a pesar de la rectitud del tablero. Estas rotaciones, inducidas por el contacto con el estribo, generaron desplazamientos residuales significativos y daños en ambos elementos. Los autores propusieron un enfoque basado en cuerpos rígidos no suaves para modelar la dinámica del tablero, capturando satisfactoriamente las rotaciones observadas experimentalmente. Los resultados mostraron que las rotaciones se correlacionan con las fuerzas de fricción generadas durante el impacto entre el tablero y el estribo.

En la Figura 7 extraída de su estudio, Shi & Dimitrakopoulos (2017) presentan una simulación de un registro de respuesta de la rotación de la plataforma, donde se evidencia que la rotación está dominada por el contacto con fricción. En general, estos estudios resaltan la importancia de considerar el impacto oblicuo y la fricción en el diseño y análisis de puentes esviados, esto a su vez, ofrece herramientas para predecir y mitigar los efectos adversos de este fenómeno.

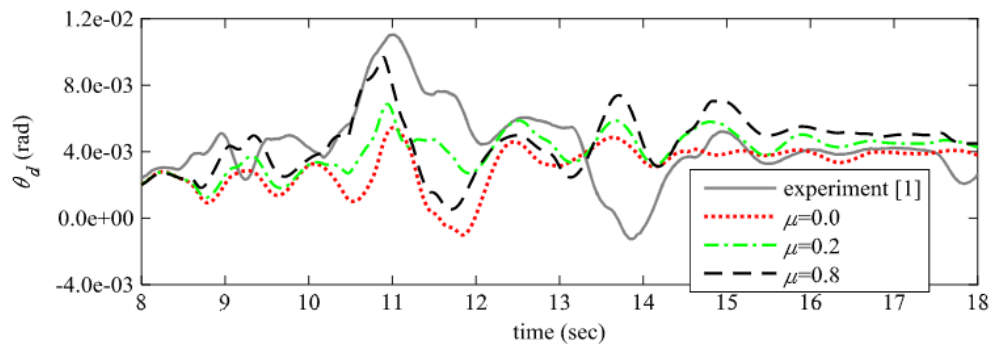


Figura 7: Sensibilidad de la rotación del tablero al coeficiente de roce.

Fuente: Shi & Dimitrakopoulos, 2017.

En otro estudio reciente, Wu et al. (2016) desarrolló modelos numéricos en el software OpenSees, analizando tanto los desplazamientos del tablero como también las fuerzas de impacto entre el tablero y el estribo, comparándolos posteriormente con resultados experimentales. En su análisis realizó la calibración de modelos de impacto para puentes a escala de acero. En las Figura 8 y Figura 9 se muestran los modelos tanto numéricos como experimentales, respectivamente.

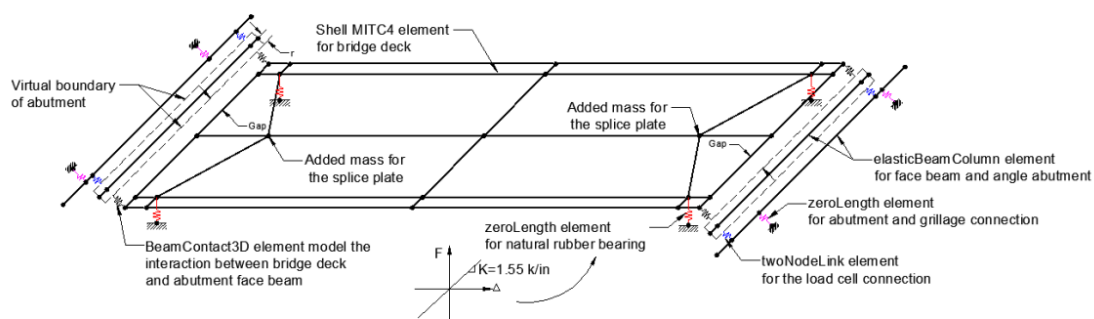


Figura 8: Modelo numérico de puente esviado de acero.

Fuente: Wu et al., 2016.

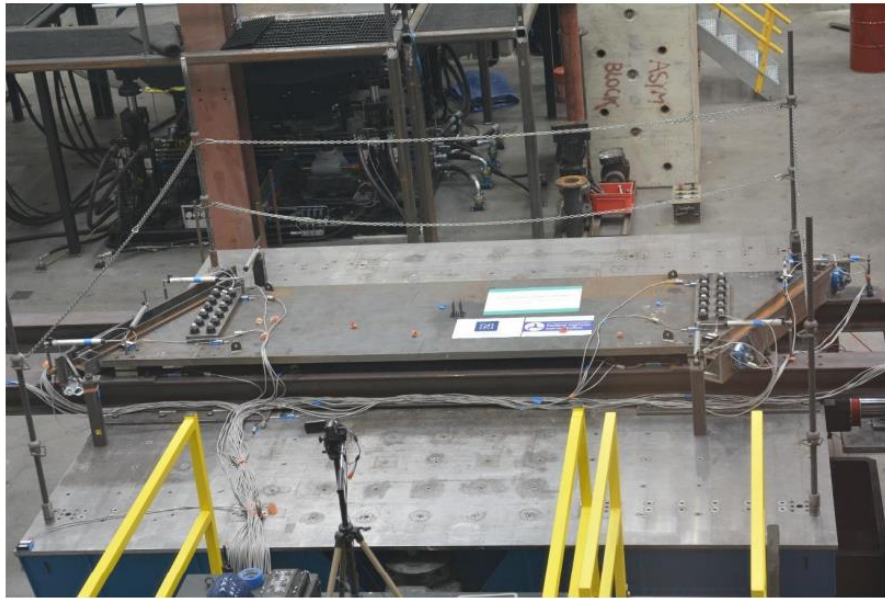


Figura 9: Modelo experimental de puente esviado de acero.
Fuente: Wu et al., 2016.

Al comparar los datos numéricos y experimentales, se observó una buena concordancia en términos de desplazamientos del tablero y fuerzas de impacto. Sin embargo, es importante destacar que la relación entre resultados experimentales y numéricos no es perfecta y existen ciertas discrepancias, especialmente en la magnitud de las fuerzas de impacto, que pueden deberse a simplificaciones en el modelo numérico, incertidumbres en los parámetros del material y diferencias entre el comportamiento del modelo a escala y el puente real.

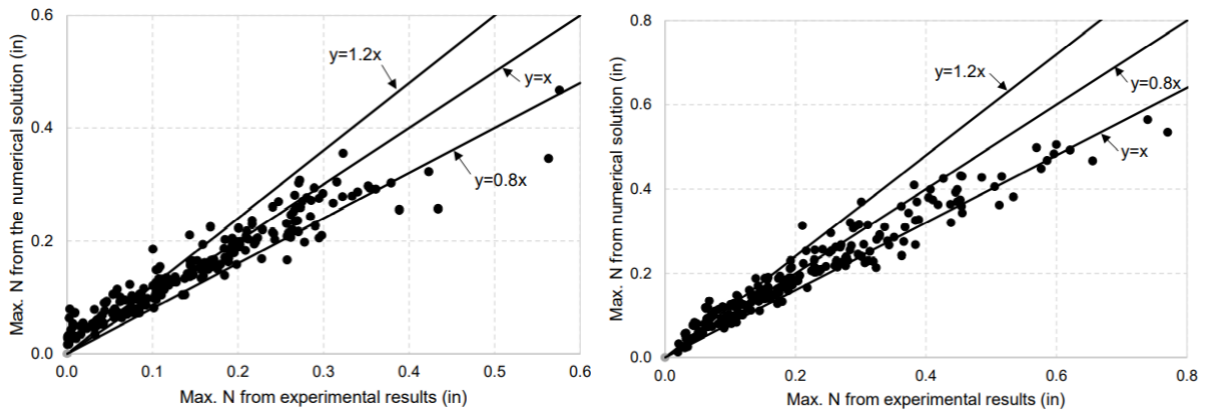


Figura 10: Comparación de desplazamientos de la respuesta numérica con respecto a los resultados experimentales para puentes de 30° y 60° de esviaje.
Fuente: Wu et al., 2016.

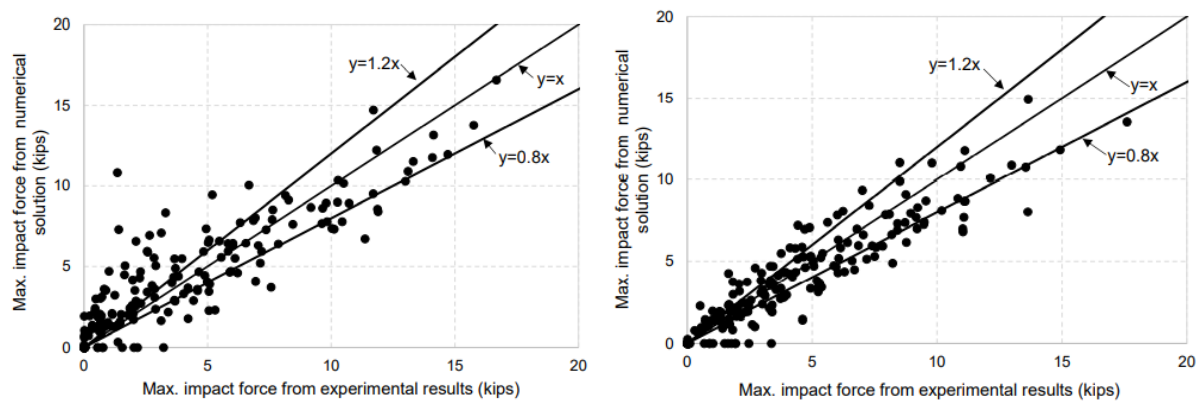


Figura 11: Comparación de fuerzas de impacto numérico con respecto a los resultados experimentales para puentes de 30° y 60° de esviaje.

Fuente: Wu et al., 2016.

Los resultados de Wu et al. (2016) sugieren que los modelos numéricos en OpenSees pueden ser una herramienta útil para predecir el comportamiento de puentes esviados de acero bajo cargas sísmicas. El objetivo principal de esta investigación es extender este análisis a puentes de hormigón, evaluando la aplicabilidad de los modelos numéricos y la calibración de los parámetros del material para este tipo de estructuras.

4 Base experimental

Para la comparación de los datos numéricos se utiliza la base experimental desarrollada por Benavides (2021), posteriormente ejecutada y descrita en la memoria de Arredondo (2023), la cual detalla los ensayos de impacto realizados en el laboratorio del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María para un puente recto y dos puentes esviados de 15° y 30°, respectivamente. Todos estos modelos poseen un tablero de hormigón armado y un solo estribo como se observa en la Figura 12. En estos ensayos, el autor de esta memoria participó activamente desde la generación de las probetas hasta el análisis de los datos experimentales y modelos numéricos.

En los modelos experimentales se utiliza solo un estribo dado que los ensayos que se realizan corresponden a pulsos, en donde los impactos se producen solo en una cara del tablero.

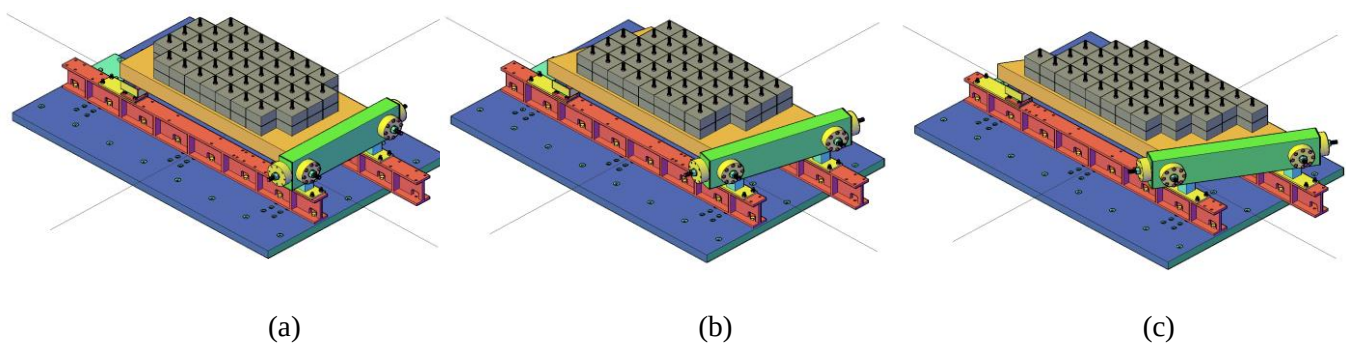


Figura 12: Esquema de los modelos experimentales. Puente (a) recto, (b) esviado 15°, (c) esviado 30°.

Fuente: Arredondo, 2023.

La matriz experimental se presenta en la Tabla 2, siendo las variables relevantes del estudio; el ángulo de esviaje, la masa del sistema, la distribución de la masa, y la amplitud y la frecuencia de la señal. El resto son parámetros constantes en los modelos experimentales.

Tabla 2: Variables a considerar en el modelo a escala de puentes de hormigón para ensayos.
Fuente: Arredondo, 2023.

Variables del modelo	
Ángulo de esviaje del tablero	0 [°] – 15 [°] – 30 [°]
Masa del sistema	Ajustada artificialmente (Masa total = 465 kg)
Distribución de masa adicional	0% - 50% - 100% (Uniforme)
Amplitud de la señal	1 [cm] – 1.5 [cm] – 2 [cm]
Frecuencia de la señal	5 [Hz] - 6 [Hz] - 7 [Hz] - 8 [Hz] - 9 [Hz] - 10 [Hz]
Tipo de carga	Pulsos
Materialidad de los elementos	Hormigón H-30 (G-25) / Acero A36
Número de vanos	1
Número de estribos	1
Relación de aspecto del tablero (Largo/Ancho)	2.1
Separación estribo-tablero	1 cm
Dirección de aplicación de carga	Longitudinal

Los tableros de los modelos de puentes fueron confeccionados utilizando hormigón H-30 armado con una malla electrosoldada (ACMA) en su interior, para la distribución de masas se utilizaron lastres de plomo. Las dimensiones de los tableros son las establecidas en el trabajo de Benavides. S, (2021).

4.1 Fabricación de los especímenes

El proceso de fabricación del tablero de hormigón queda detallado en la Figura 13.

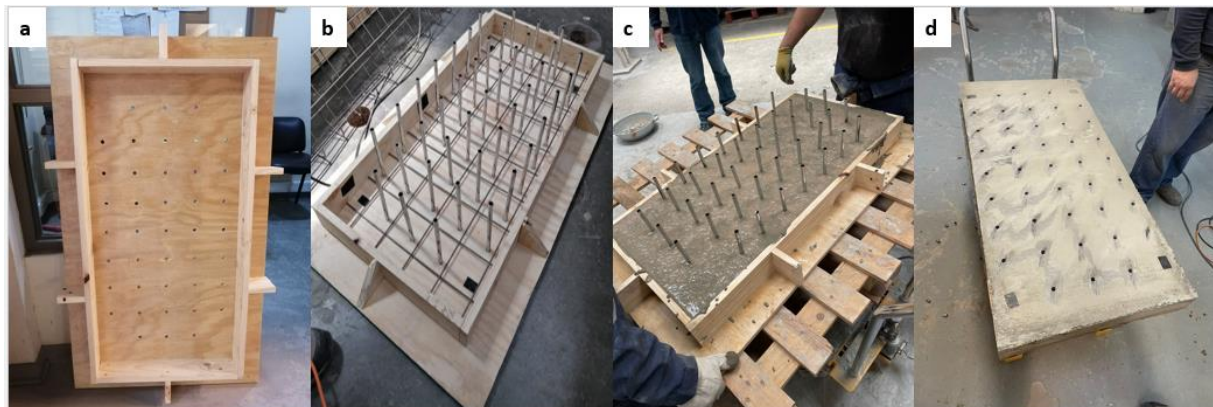


Figura 13: a) Fabricación de moldajes; b) Incorporación de tubos y malla electrosoldada; c) Hormigonado; d) Tablero desmoldado y listo para ensayar. Caso puente recto.

Fuente: Arredondo, 2023.

Los estribos del puente se componen de un sistema estructural de acero-hormigón. Este sistema se confecciona mediante un perfil de acero tipo C150 x 75 x 5 mm que se encuentra soldado en la parte inferior a un perfil tubular de 50 x 50 x 3 mm. Estos perfiles tubulares se encuentran soldados a unas pletinas de 75 x 5 mm que se conectan a las vigas. Lo anteriormente mencionado puede observarse en la Figura 14a). El estribo se compone de un perfil canal 125 x 50 x 3mm relleno de hormigón como se muestra en la Figura 14b).

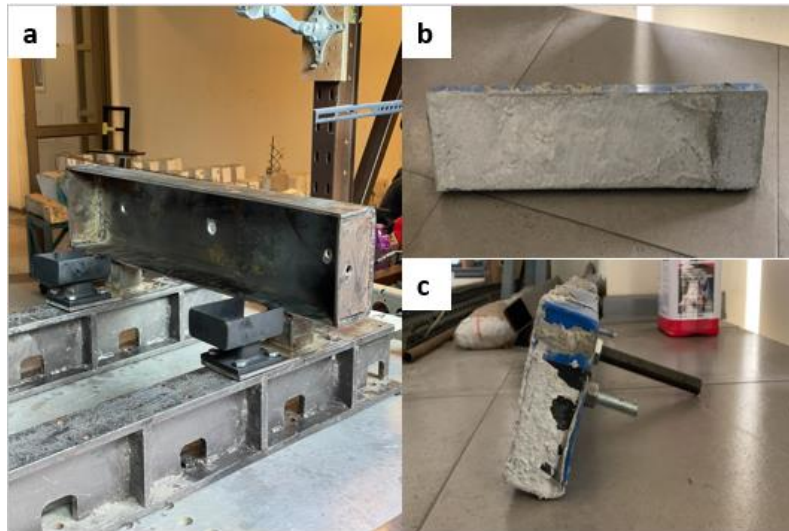


*Figura 14: a) Ejemplo perfil canal externo; b) Vista frontal perfil canal interno relleno con hormigón
c) Vista lateral perfil canal interno relleno con hormigón.
Fuente: Arredondo, 2023.*

Los apoyos del tablero (Figura 15) se componen de elementos de acero rellenos de mortero autonivelante sobre estos se sobreponen placas de apoyo elastoméricas. Estos apoyos son apertados de tal manera que permiten que el tablero quede a una distancia de 1 cm, cumpliendo con el GAP inicial entre el estribo-tablero.

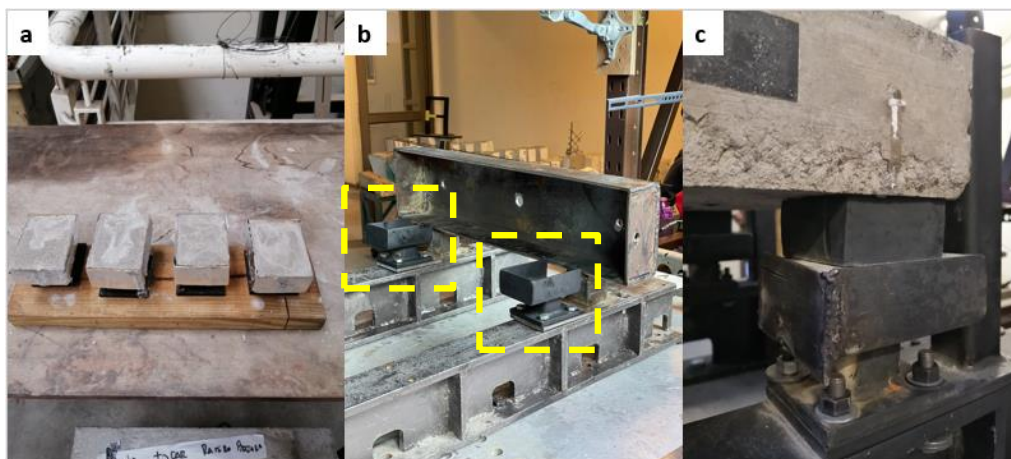


*Figura 15: a) Confección de apoyos; b) ubicación apoyos; c) Tablero montado sobre apoyos
Fuente:Arredondo 2023.*

En la Figura 16 se presenta una ejemplificación del proceso de montaje de los distintos componentes que conformaron los prototipos de ensayo específicamente para el tablero con esviaje 30°.

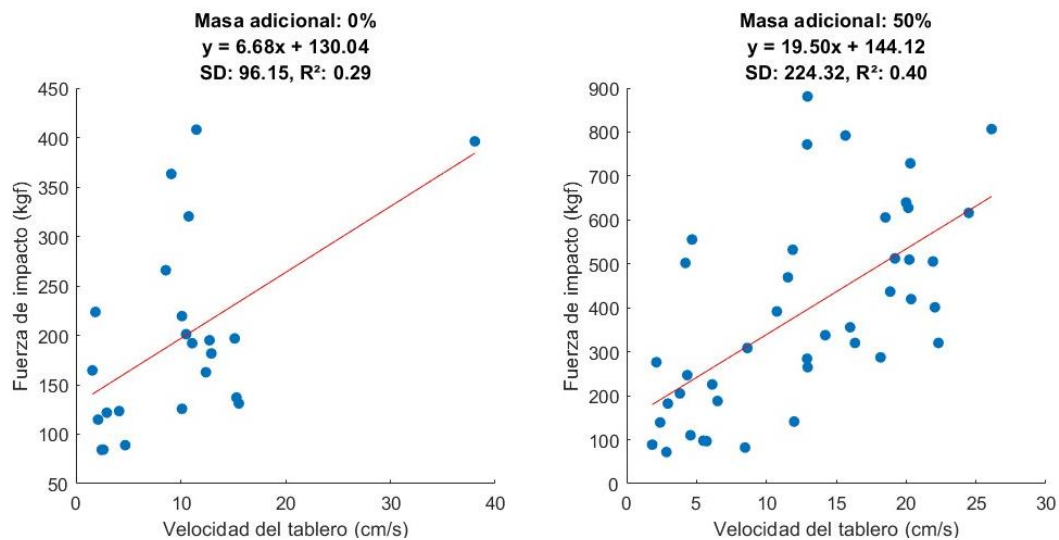


Figura 16: Compilación de imágenes para el montaje del puente esviado 30°.
Fuente: Arredondo (2023)

4.2 Resultados del modelo experimental

4.2.1 Relación entre velocidad del tablero y fuerza de impacto

A continuación, se presentan en las Figura 17, Figura 18 y Figura 19 los resultados de los ensayos experimentales correspondientes a los ensayos de 0°, 15° 30 °, respectivamente. Se observa en estas figuras que la relación entre la fuerza de impacto medida experimentalmente tiene una relación mayormente lineal con respecto a la velocidad del tablero de hormigón previa al impacto.



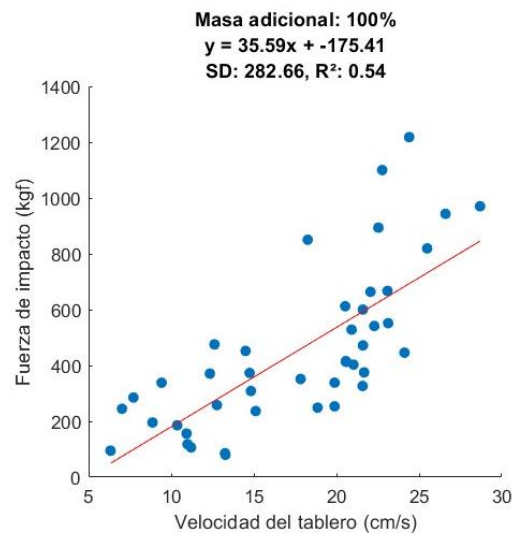


Figura 17: Gráficos fuerza vs. Velocidad del tablero, ángulo de esviaje de 0°.

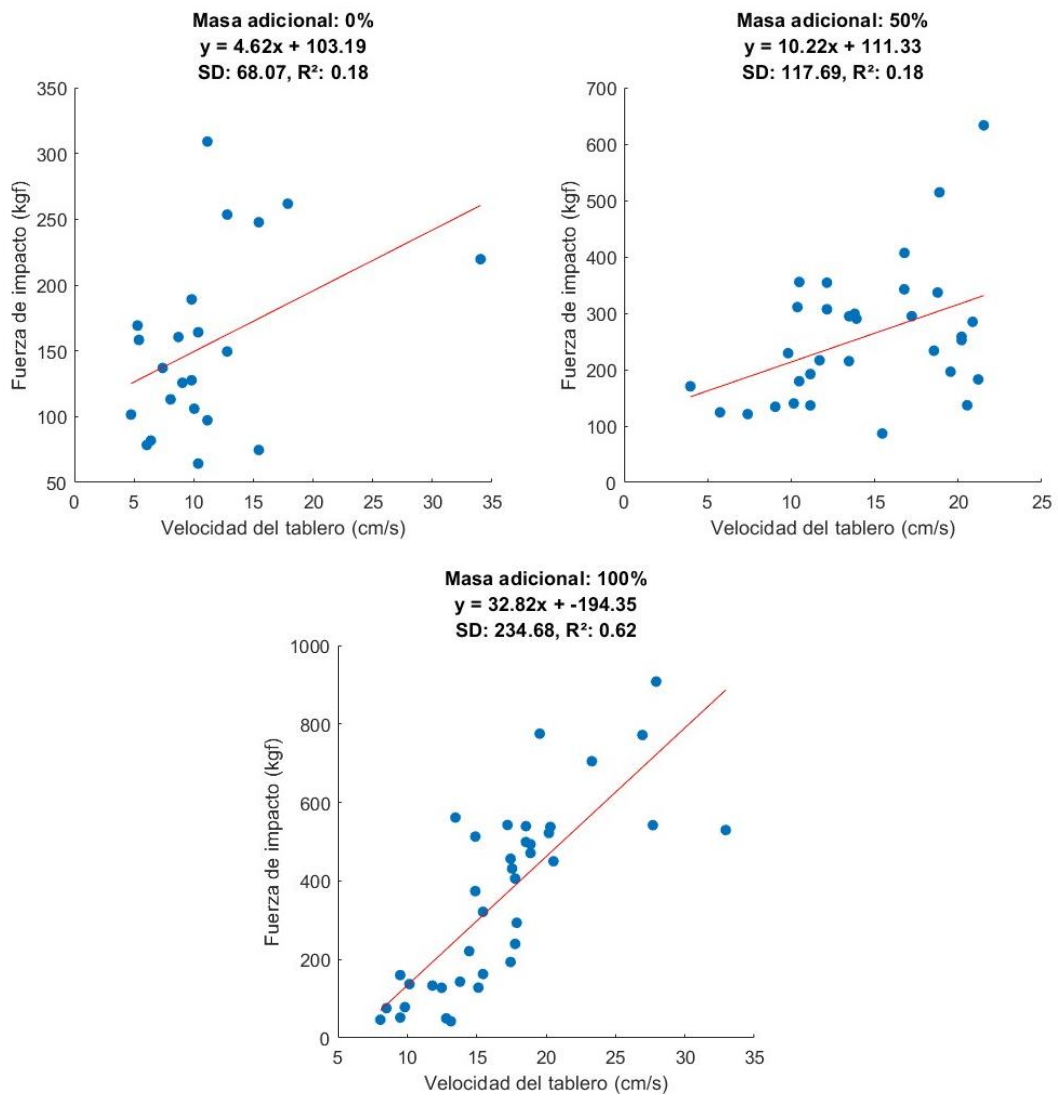


Figura 18: Gráficos fuerza vs. Velocidad del tablero, ángulo de esviaje de 15°.

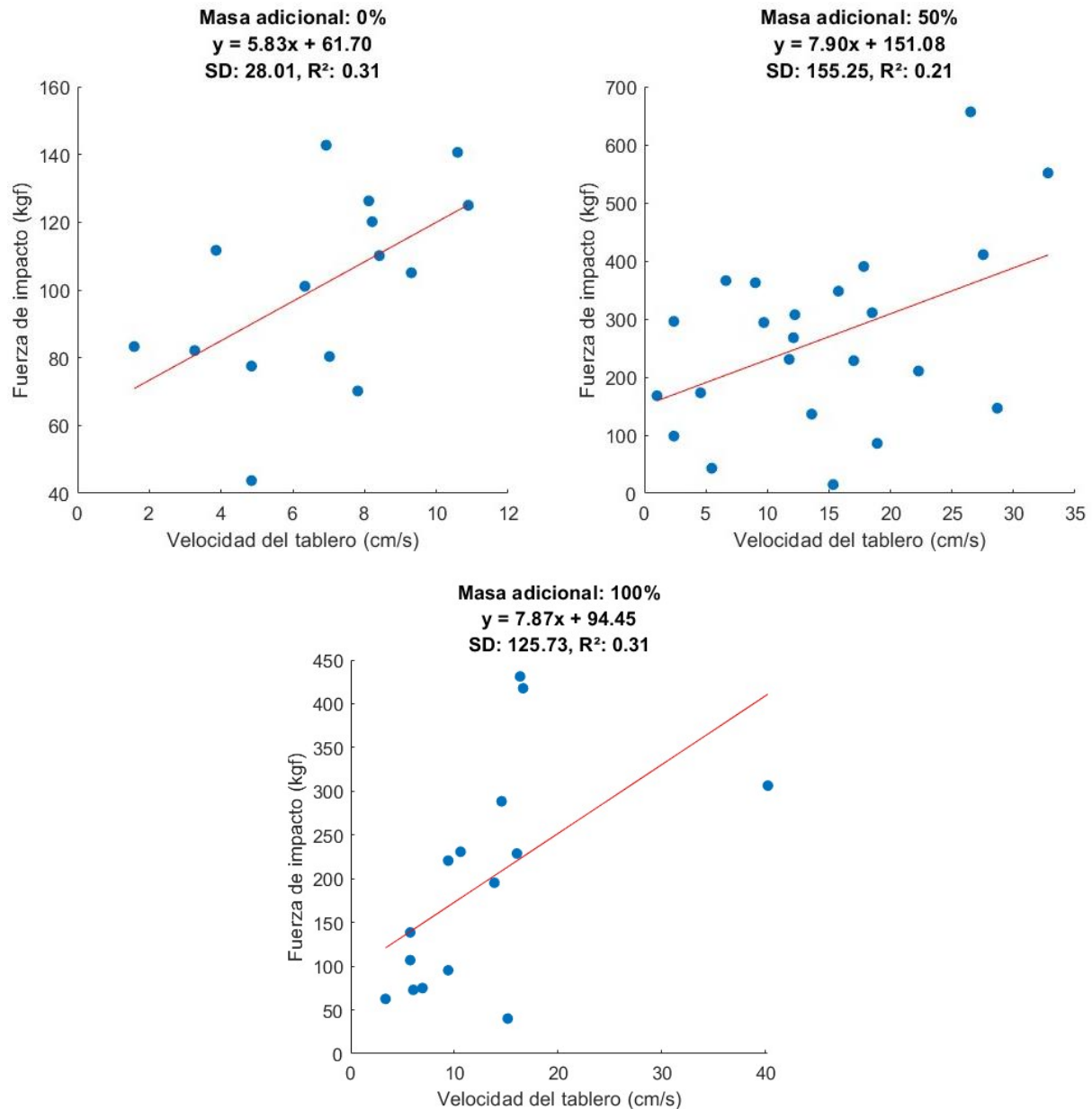


Figura 19: Gráficos fuerza vs. Velocidad del tablero, ángulo de esviaje de 30°.

Los resultados experimentales evidencian la influencia de la masa adicional en la fuerza de impacto. En ausencia de masa adicional y para la probeta de 0° y 15°, la fuerza de impacto muestra una dispersión considerable y relativamente bajos coeficientes de determinación ($R^2 = 0,29$ y $0,18$ respectivamente). Al añadir un mayor porcentaje de masa adicional, se observa un aumento significativo en la fuerza de impacto y una mejora en el coeficiente (R^2), lo que sugiere una relación más lineal entre la fuerza de impacto y la velocidad del tablero a medida que aumentan las masas.

Estos resultados destacan la importancia de considerar apropiadamente la masa en el diseño y análisis de estructuras sometidas a impactos, ya que puede influir significativamente en la magnitud de las fuerzas generadas.

5 Modelo numérico de estudio

En este capítulo, se presenta el modelo numérico desarrollado en OpenSees para simular el comportamiento dinámico de un puente esviado de hormigón armado sometido a cargas de impacto. El modelo se centra en la interacción entre el tablero y el estribo, reproduciendo el fenómeno de *pounding* que puede ocurrir durante eventos sísmicos.

5.1 Desarrollo de los modelos numéricos

Como se comentó en la sección 4 la composición, rigidez y forma de los elementos, se plantean con respecto a la base experimental desarrollada por Arredondo (2023) y se muestran en la Tabla 2. El tablero del puente se modeló utilizando elementos tipo "frame" en OpenSees, los cuales simulan el comportamiento del tablero de hormigón armado. Para representar adecuadamente la distribución de masa y la rigidez del tablero, se asignaron áreas tributarias a cada elemento "frame". Estas áreas tributarias se calcularon considerando la geometría del tablero y la ubicación de los elementos "frame", asegurando que cada elemento contribuyera proporcionalmente al peso total y a la rigidez global del tablero.

Los apoyos elastoméricos en los que se apoya el tablero y restringen los desplazamientos longitudinales, transversales y las rotaciones, se modelaron mediante elementos de largo cero, "zeroLength". Estos elementos no tienen longitud física, pero poseen rigidez en las direcciones deseadas. La rigidez de los apoyos se determinó a partir de las propiedades mecánicas de los elastómeros utilizados en el puente real y se ajustó para cada modelo de impacto (Muthukumar y Hertz-Damp) según los resultados obtenidos por Arredondo (2023). El modelo numérico del puente se presenta en la Figura 20.

El estribo del puente se consideró fijo en el modelo numérico. Sin embargo, para representar la interacción entre el estribo y el tablero, se asignó una rigidez dependiendo del modelo de análisis al nodo de apoyo del estribo. Esta rigidez se ajustó para cada modelo de impacto según los resultados experimentales.

Esta modelación del tablero y los apoyos permite simular el comportamiento dinámico del puente esviado bajo cargas de impacto, considerando la distribución de masa, la rigidez y las restricciones de movimiento de los elementos estructurales. La calibración de los parámetros del modelo, como la rigidez de los apoyos y del estribo, se realizó utilizando los datos experimentales obtenidos por Arredondo (2023).

Con el objetivo de comparar las simulaciones con los resultados experimentales se determinan las propiedades dinámicas del modelo las cuales se observan en la Tabla 3, y se ejecutan análisis con pulsos de velocidades, variando las masas, los ángulos de esviaje y la separación inicial que poseen los modelos.

En la Tabla 4 se muestra un resumen de las variables preliminares consideradas en este análisis. No obstante, cabe destacar que la principal variable a evaluar son los parámetros de entrada del modelo de impacto en OpenSees, para su posterior calibración.

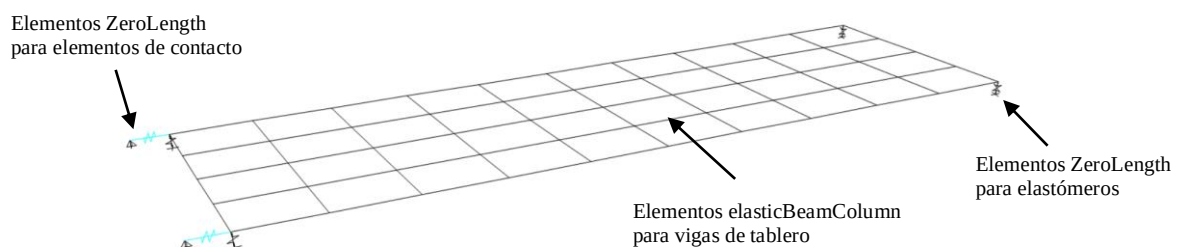


Figura 20: Grafica del modelo de análisis en OpenSees.

Tabla 3: Propiedades dinámicas del modelo

Caso	Masa adicional	Periodo	Frecuencia numérica	Frecuencia experimental	Diferencia porcentual
	[%]	[s]	[Hz]	[Hz]	[%]
Esviaje 0°	0	0,0961	10,41	8,4	23,88
	50	0,1581	6,33	6,8	6,98
	100	0,2019	4,95	5,4	8,28
Esviaje 15°	0	0,0958	10,44	8,6	21,38
	50	0,158	6,33	6,8	6,92
	100	0,2015	4,96	5,4	8,10
Esviaje 30°	0	0,096	10,42	8,6	21,12
	50	0,1577	6,34	6,9	8,10
	100	0,2010	4,98	5,6	11,16

Tabla 4: Variables consideradas

Variables	
Rigidez de los elementos de impacto	Factores de entrada de modelos de impacto
Método simplificado de impacto	Muthukumar – Hertz-Damp
Distribución de masas del sistema	Según Arredondo (2023)

5.2 Resultados Numéricos

En esta sección, se presentan los resultados numéricos obtenidos mediante análisis de elementos finitos en OpenSees, los cuales simulan el comportamiento dinámico del puente esviado de hormigón armado bajo cargas de impacto. Estos modelos matemáticos se basan en parámetros de diseño y propiedades de materiales conocidos, y permiten evaluar la respuesta del puente en términos fuerzas de impacto en los elementos estructurales. Para simplificar el análisis y enfocarse en la interacción tablero-estribo, se asume que el estribo es totalmente rígido, aunque esta simplificación puede introducir ciertas limitaciones en la precisión de los resultados.

5.2.1 Modelos simplificados

La optimización de modelos simplificados en la evaluación de ciertos fenómenos o procesos es esencial en la búsqueda de resultados confiables y reproducibles. En el contexto de esta investigación, se aborda la comparación de dos modelos simplificados, el modelo de Muthukumar y el modelo de Hertz-Damp, en la evaluación de las fuerzas de impacto producidas. Para esto se han evaluado resultados de ambos modelos realizando impactos mediante pulsos de velocidad, variando el porcentaje de masa adicional según lo indicado en las Figura 21 y Figura 22, con un gap de 1 [cm] y ángulo de esviaje de 0°.

- **Parámetros del modelo de Muthukumar**

La formulación de Muthukumar, basada en el modelo de Kelvin-Voigt, describe el comportamiento de materiales bajo impacto combinando elementos elásticos (resorte) y plásticos (amortiguador) en paralelo, considerando un espacio inicial (gap) entre los elementos antes del contacto. Esta formulación se implementa en OpenSees mediante la función (2) “uniaxialMaterial ImpactMaterial”, donde los parámetros “\$K1” y “\$K2” representan las rigideces elástica y plástica, respectivamente, y “\$dy” define el desplazamiento a partir del cual se inicia la deformación plástica.

$$\text{uniaxialMaterial ImpactMaterial \$matTag \$K1 \$K2 \$\delta_y \$gap} \quad (2)$$

El modelo queda descrito mediante las Ecuaciones 3, 4 y 5. En este estudio, se evalúa el modelo utilizando los valores indicados en la Tabla 5.

$$f_c(t) = \begin{pmatrix} k_1 \delta & , \dot{\delta} > 0 & \delta \leq \delta_y \\ k_1 \delta_y + k_2 (\delta_m - \delta) & , \dot{\delta} > 0 & \delta > \delta_y \\ f_m - k_1 (\delta_m - \delta) & , \dot{\delta} \leq 0 & \delta_m - \delta_y < \delta \leq \delta_m \\ f_m - k_1 (\delta_m - \delta_y) - k_2 (\delta_m - \delta_y - \delta) & , \dot{\delta} \leq 0 & \delta \leq \delta_m - \delta_y \end{pmatrix} \quad (3)$$

$$k_1 = \left(1 + \frac{2}{5} \frac{\dot{A}}{n} \frac{1 - e^2}{a} \right) k_{eff} \quad (4)$$

$$k_2 = \left(1 + \frac{2}{5} \frac{\dot{A}}{n} \frac{1 - e^2}{1 - a} \right) k_{eff} \quad (5)$$

Tabla 5: Parámetros del método de Muthukumar considerados

k_{eff}	$k(E * Area/L)\sqrt{\delta_m}$
δ_m	0,63 [in] (Muthukumar, 2003)
a	0,1 (Hughes & Mosqueda, 2020)
e	0,7 (Hughes & Mosqueda, 2020)
n	1,5 (Jankowski & Mahmoud, 2015)

La Figura 21 presenta los resultados numéricos utilizando el modelo de Muthukumar para un ángulo de esvía de 0°. Cabe destacar que en estos análisis se consideró un estribo infinitamente rígido y fueron realizados antes de los ensayos experimentales con el objetivo de diseñar adecuadamente los estribos y las conexiones del sistema. Los resultados revelan una dispersión considerable, el coeficiente de determinación (R^2) para el caso sin adición de masa (0%) es de 0.85, indicando un ajuste relativamente bueno del modelo a los datos. Sin embargo, para el caso con 50% de masa adicional, el R^2 aumenta a 0.97, mostrando una excelente correlación. En contraste, el caso con 100% de masa adicional presenta un R^2 de 0.12, lo que evidencia una pobre capacidad predictiva del modelo en esta condición. Estos hallazgos resaltan la necesidad de una evaluación más exhaustiva del modelo de Muthukumar, especialmente en escenarios con alta masa adicional, donde su desempeño parece ser menos satisfactorio.

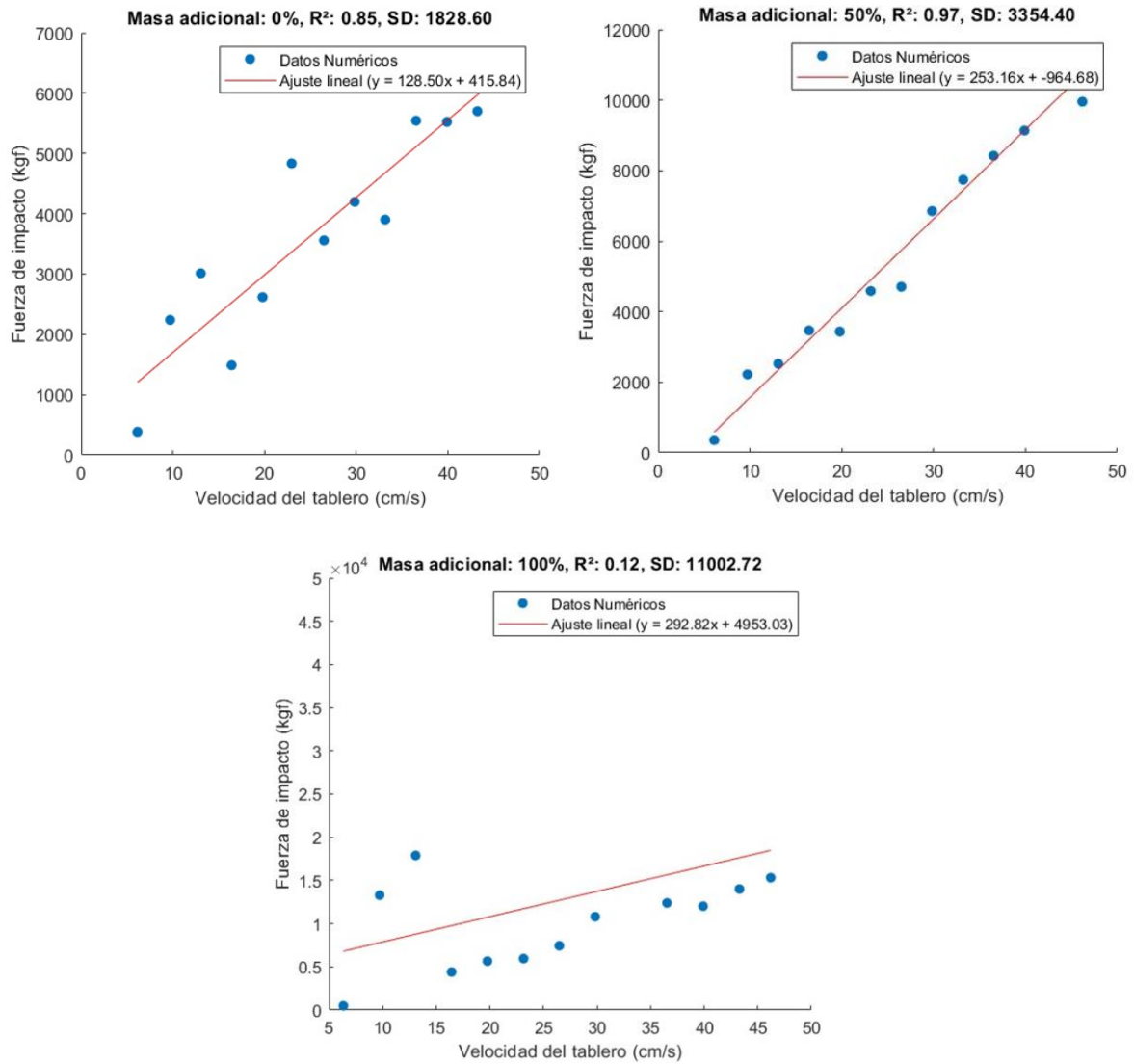


Figura 21: Grafico fuerza vs. Velocidad del tablero, método de Muthukumar.

• Parámetros del modelo de Hertz-Damp

La formulación de Hertz mostrada en las Ecuación (7) y (8), está basada en la teoría de contacto elástico, y describe el comportamiento de materiales bajo cargas de impacto, considerando la deformación local en la zona de contacto. Esta formulación se implementa en OpenSees mediante la función “uniaxialMaterial HertzDamp” (6), donde los parámetros “\$Kh” y “\$xiNorm” representan la rigidez de Hertz y el amortiguamiento normalizado, respectivamente. Por su parte, el “\$gap” define la separación inicial entre los elementos. El parámetro opcional “\$n” controla el exponente de la relación fuerza-desplazamiento, permitiendo ajustar la no linealidad del comportamiento del material bajo impacto.

$$\text{uniaxialMaterial Hertzdamp } \$matTag \$Kh \$xiNorm \$gap <\$n> \quad (6)$$

El modelo Hertzdamp utiliza las expresiones presentadas en la Ecuación (7) el cual se evalúa utilizando los valores mostrados en la Tabla 6.

$$f_c(t) = k_h(\delta(t) - gap)^n + c_h\dot{\delta}(t) \quad (7)$$

$$c_h = \bar{\xi} \frac{k_h}{\dot{\delta}_0} (\delta(t) - gap)^n \quad (8)$$

Tabla 6: Parámetros del método de Hertz-Damp considerados

k_h	$k(E * Area/L)\sqrt{0,36}$
ξ	0,06 (Lankarani & Nikraves, 1990)
n	1,5 (Jankowski & Mahmoud, 2015)

El análisis numérico del modelo de Hertz-Damp, presentado en la Figura 22, muestra una muy baja dispersión en los tres casos de masa adicional (0%, 50% y 100%). El coeficiente de determinación (R^2) para todos los casos es de 0.99, lo que indica un ajuste casi perfecto del modelo a los datos y una alta capacidad predictiva en todas las condiciones de masa adicional consideradas. Estos resultados sugieren que el modelo de Hertz-Damp es una herramienta confiable y precisa para simular el comportamiento de puentes esviados de hormigón armado bajo cargas de impacto.

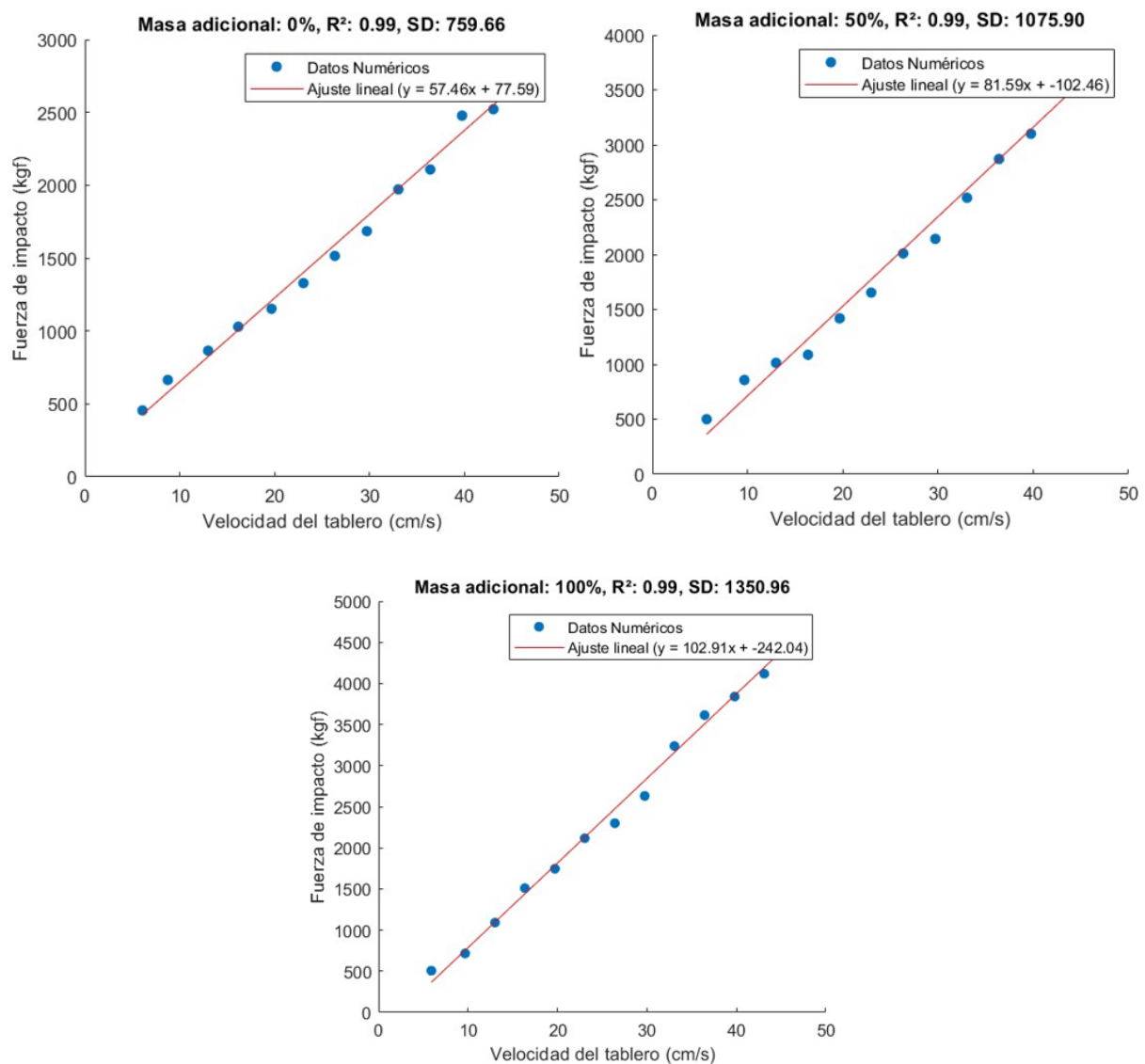


Figura 22: Gráficos fuerza vs. Velocidad del tablero, método de Hertz-Damp.

En el análisis numérico del modelo de Muthukumar, se observó que en varios casos la convergencia de los resultados no era clara, lo que requirió la implementación de métodos de convergencia adicionales, como el método de Newmark modificado, para obtener soluciones estables y precisas.

Comparando los resultados de ambos modelos (Muthukumar y Hertz-Damp), se evidencia un mejor desempeño del modelo de Hertz-Damp en términos de convergencia y ajuste lineal. Mientras que el modelo de Muthukumar presentó dificultades de convergencia en algunos casos y una variabilidad significativa en los valores de R^2 (0.85, 0.97 y 0.12 para 0%, 50% y 100% de masa adicional, respectivamente), el modelo de Hertz-Damp mostró una convergencia estable con un R^2 de 0.99 con respecto al ajuste lineal.

Esta diferencia en el desempeño puede atribuirse a la naturaleza de los modelos. El modelo de Muthukumar, al combinar elementos elásticos y plásticos, introduce una mayor no linealidad en el sistema, lo que puede dificultar la convergencia en algunas condiciones de carga. Por otro lado, el modelo de Hertz-Damp, basado en la teoría de contacto elástico, presenta un comportamiento más estable y predecible, lo que facilita la convergencia y el ajuste a los datos experimentales.

En conclusión, aunque el modelo de Muthukumar puede ser útil para simular el comportamiento no lineal de elementos estructurales bajo impacto, su aplicación en el análisis de puentes esviados de hormigón armado puede requerir ajustes y métodos de convergencia adicionales para garantizar resultados precisos y confiables. En contraste, el modelo de Hertz-Damp demostró ser una herramienta más robusta y precisa en este contexto, lo que sugiere su potencial como modelo de referencia para futuros estudios y aplicaciones.

5.2.2 Rigidez del modelo de impacto

La rigidez es un parámetro crítico en el modelo de impacto de Hertz-Damp, ya que incide directamente en la respuesta de la estructura a las cargas y fuerzas aplicadas. Al ajustar el valor de amplificación "k", se busca comprender cómo dicha modificación influye en la rigidez y la capacidad de absorción de energía de la estructura frente a impactos. La variación de este parámetro es esencial para evaluar su impacto en la integridad y el comportamiento de la estructura, proporcionando información valiosa para futuros diseños y aplicaciones.

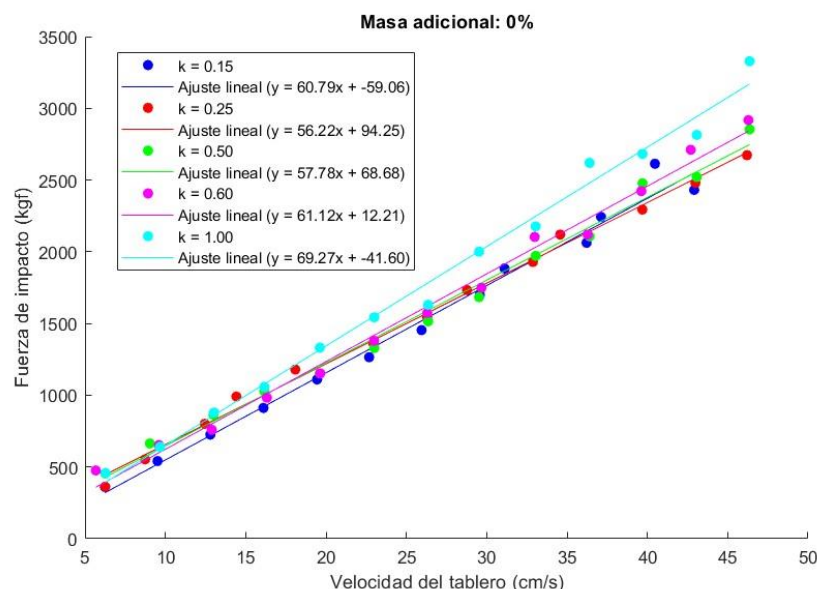


Figura 23: Gráfico fuerza vs. Velocidad del tablero según valor de k, con 0% de masa adicional.

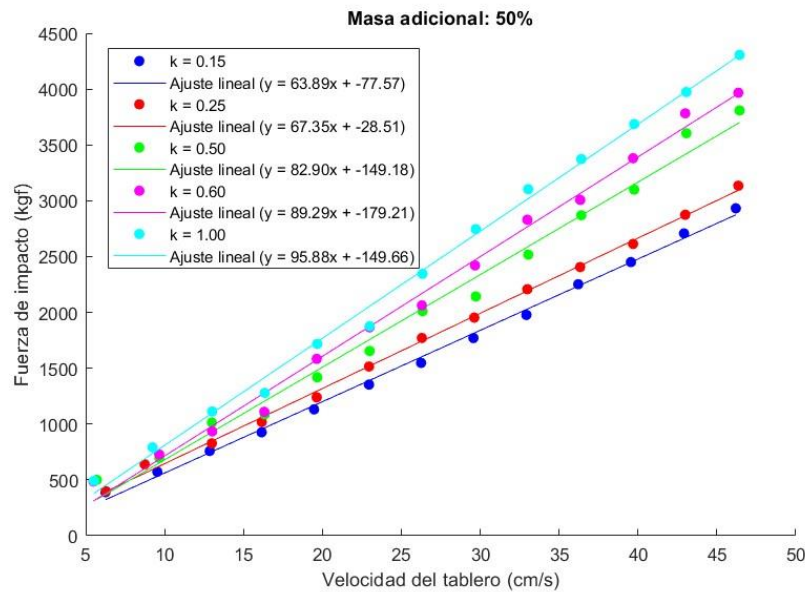


Figura 24: Gráfico fuerza vs. Velocidad del tablero según valor de k , con 50% de masa adicional.

Se observa que el parámetro " k " tiene una influencia limitada en la rigidez de la estructura cuando se trata de masas pequeñas. Sin embargo, esta influencia se acentúa notablemente a medida que aumenta el porcentaje de masa adicional. Este hallazgo sugiere que el efecto de " k " sobre la rigidez se amplifica en condiciones de mayor carga, lo cual es relevante en aplicaciones donde las masas son considerables.

Esta observación puede explicarse por la interacción entre la rigidez del modelo de impacto y la masa del sistema. En el caso de masas pequeñas, la rigidez del modelo de impacto domina la respuesta dinámica del sistema, minimizando el efecto del parámetro " k ". Sin embargo, a medida que aumenta la masa, la inercia del sistema se vuelve más relevante, y las diferencias en la rigidez del modelo de impacto, controladas por " k ", comienzan a manifestarse de manera más evidente en las pendientes de las curvas de fuerza-velocidad. En otras palabras, a mayor masa, la respuesta del sistema se vuelve más sensible a las variaciones en la rigidez del modelo de impacto, lo que se traduce en una mayor diferenciación de las pendientes de las curvas para diferentes valores de " k ".

5.2.3 Comparación según ángulo de esviaje

El ángulo de esviaje es un parámetro crítico en el análisis de puentes, ya que influye directamente en los modos de falla que puede experimentar la estructura bajo cargas sísmicas. Al modificar este ángulo, se busca comprender cómo afecta la resistencia del puente a las fuerzas laterales y su capacidad para mantener su estabilidad y funcionalidad durante eventos sísmicos.

Estudios previos han demostrado que puentes con diferentes ángulos de esviaje pueden presentar distintos mecanismos de falla. Por ejemplo, puentes con un ángulo de esviaje pronunciado pueden ser más propensos al colapso por vuelco o al deslizamiento de los apoyos, mientras que puentes con un ángulo de esviaje menor pueden ser más susceptibles al pandeo de los elementos estructurales (Peralta & Hube, 2018).

Se generaron gráficos para visualizar la respuesta dinámica de los tableros de puentes esviados, analizando la relación entre la fuerza de impacto y la velocidad del tablero justo antes del choque con el estribo. Estos gráficos permiten evaluar cómo el ángulo de esviaje influye en la magnitud de las fuerzas de impacto. Los resultados para este análisis se ilustran en la Figura 25.

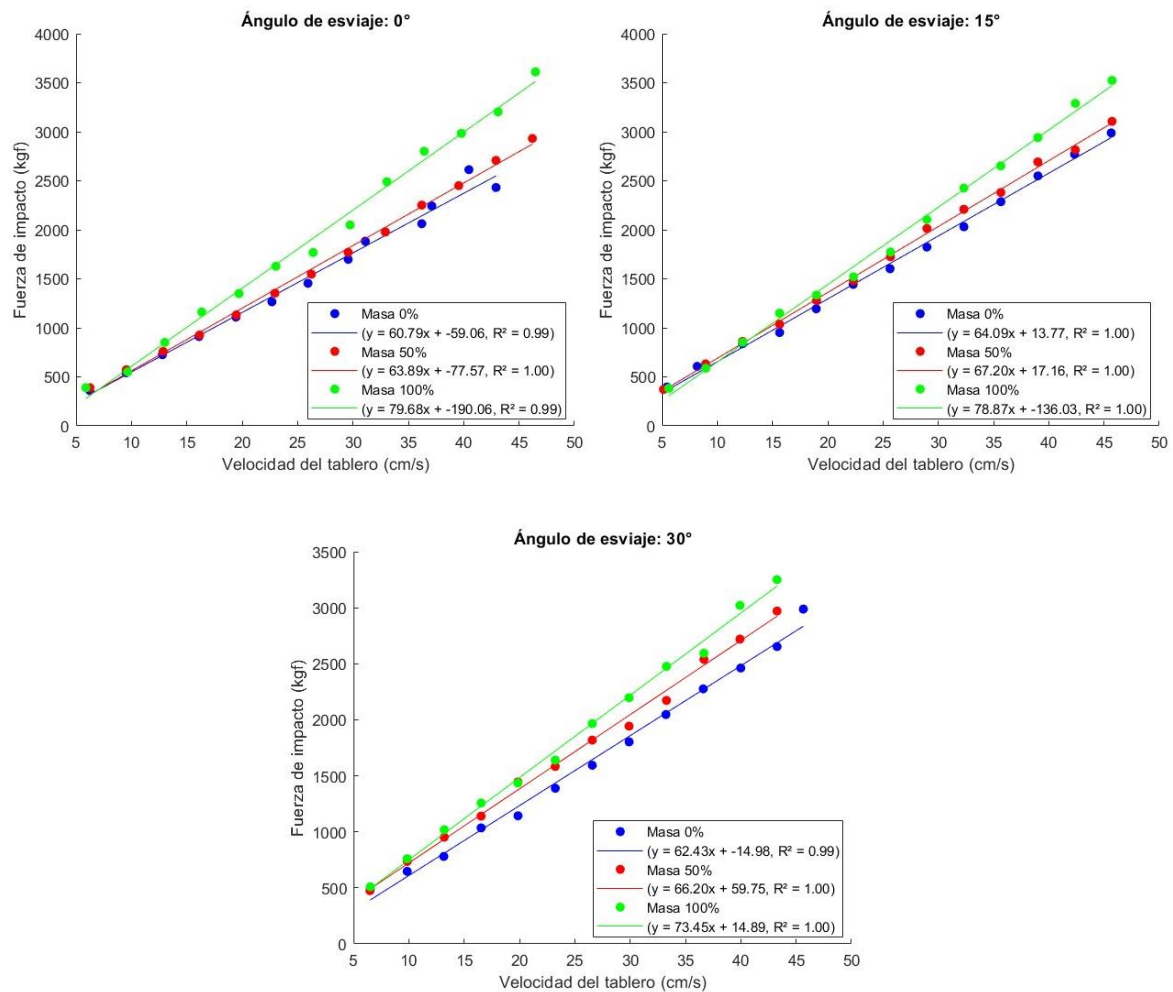


Figura 25: Grafico fuerza vs. Velocidad del tablero para distintos ángulos de esviaje.

Comparando cuantitativamente, mientras en el ángulo de esviaje de 0° la pendiente de la recta para 0% y 100% de masa adicional es 57.46 y 102.91, respectivamente, en el ángulo de esviaje de 15° las pendientes para los mismos porcentajes de masas son 64.09 y 78.87, mostrando una menor diferencia entre ellas. Esta tendencia se acentúa en el ángulo de esviaje de 30° , donde las pendientes para 0% y 100% de masa adicional son 62.43 y 73.45, respectivamente, exhibiendo una diferencia aún menor. Se evidencia una disminución de las fuerzas a mayor esviaje, sobre todo para porcentajes de masas mayores, pero a bajos ángulos de esviaje esta tendencia desaparece. Esto podría deberse a que el modelo no considera fricción, por lo que las fuerzas aumentan en algunos casos para alcanzar el equilibrio en dirección longitudinal.

Esta observación sugiere que, a medida que aumenta el ángulo de esviaje, la influencia del porcentaje de masa adicional en la rigidez del sistema disminuye, lo que se traduce en una menor variación de las pendientes de las curvas de fuerza de impacto. Esta tendencia es consistente con los resultados experimentales reportados en la literatura (Dimitrakopoulos, 2011; Wu et al., 2016).

6 Resultados

6.1 Calibración de parámetros

La calibración de los modelos numéricos de impacto (Hertz-Damp) se realizó mediante un proceso iterativo de ajuste de parámetros, buscando minimizar el error cuadrático medio (MSE) entre los resultados numéricos y los datos experimentales. A continuación, se detalla el paso a paso del proceso de calibración:

1. **Análisis de Sensibilidad:** Se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de cada parámetro en la respuesta del modelo. Esto permitió identificar los parámetros más críticos para mejorar la eficiencia del proceso de calibración.
2. **Selección de Parámetros a Calibrar:** Se identificaron los parámetros de los modelos de impacto que tienen mayor influencia en la respuesta del puente bajo cargas de impacto. Para el modelo de Hertz-Damp, los parámetros a calibrar son la rigidez de Hertz (Kh).
3. **Definición de la Función Objetivo:** Se estableció el MSE como la función objetivo a minimizar. El MSE se calcula como la media de los cuadrados de las diferencias entre las fuerzas de impacto simuladas y experimentales para un conjunto de velocidades de impacto.
4. **Evaluación de la Convergencia:** Se estableció un criterio de convergencia cuando el MSE alcanzara un valor mínimo aceptable o cuando se alcanzara un número máximo de iteraciones, para este caso 85.
5. **Validación del Modelo Calibrado:** Una vez obtenidos los parámetros óptimos, se validó el modelo calibrado comparando sus resultados con un conjunto de datos experimentales independiente. Se calcularon nuevamente el MSE y otras métricas de error para evaluar la capacidad del modelo calibrado para predecir la respuesta del puente bajo diferentes condiciones de carga.

El proceso de calibración se realizó para cada ángulo de esviaje y masa adicional considerados en el estudio, obteniendo así un conjunto de parámetros óptimos para cada configuración. Es importante destacar que el proceso de calibración es iterativo. La elección adecuada del algoritmo de optimización, la definición de la función objetivo y la selección de los parámetros a calibrar son aspectos cruciales para obtener un modelo numérico preciso y confiable.

La correlación entre los resultados experimentales y numéricos es esencial para evaluar la calidad de los modelos analíticos y comprender mejor el comportamiento real de las estructuras. En el contexto de esta investigación, se realiza una comparación entre los resultados experimentales y numéricos para evaluar el comportamiento de la estructura bajo condiciones de impacto. Se presentan resultados en ángulos de esviaje de: 0, 15 y 30 grados. Las iteraciones se realizan variando el valor de "k" partiendo desde 1 y reduciéndolo 0.01 cada vez hasta un mínimo de 0.15. Se encontró que el menor error cuadrático medio se produce con un factor de amplificación de rigidez "k" igual a 0.15, modelando el fenómeno de impacto a través del método matemático de Hertz-Damp. Estos resultados pueden provenir de la suposición de que el estribo es completamente rígido, por lo tanto, la rigidez del sistema y de la relación de impacto en la Ecuación 7 es menor que la modelada, lo que a su vez reduce en gran manera las fuerzas de impacto por su relación lineal con respecto a la rigidez. En la Figura 26 se grafican los errores cuadráticos medios para ángulo de esviaje 0 con 50% de masa adicional, se aprecia que a medida que baja el parámetro "k" también se reduce el error aun así los órdenes de magnitudes del error son significativos para los valores de rigidez más bajos. Los resultados para el caso optimizado se ilustran en las Figura 27, Figura 28 y Figura 29.

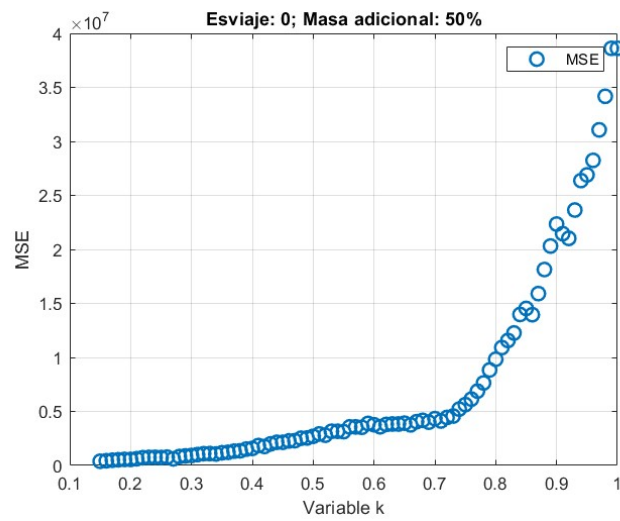


Figura 26: Error cuadrático medio según variable “k”.

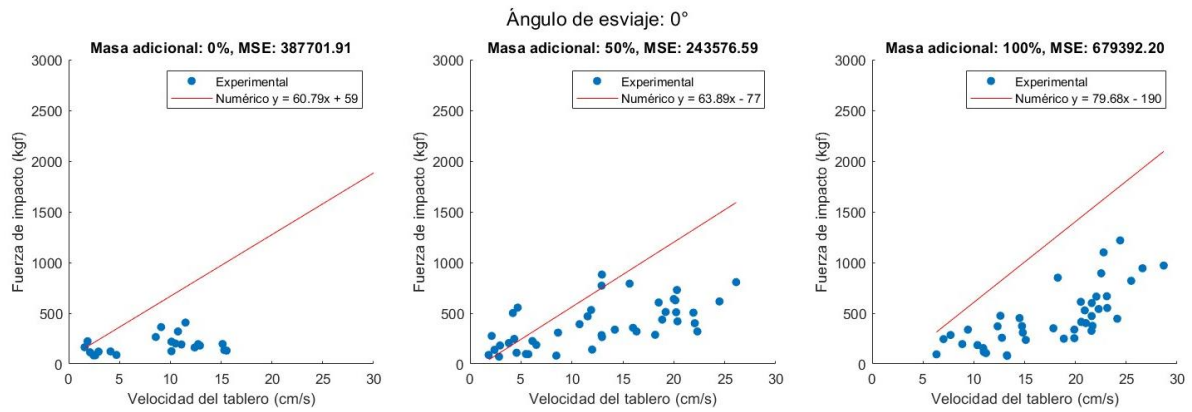


Figura 27: Comparación de resultados numéricos y experimentales, ángulo de esviaje 0°.

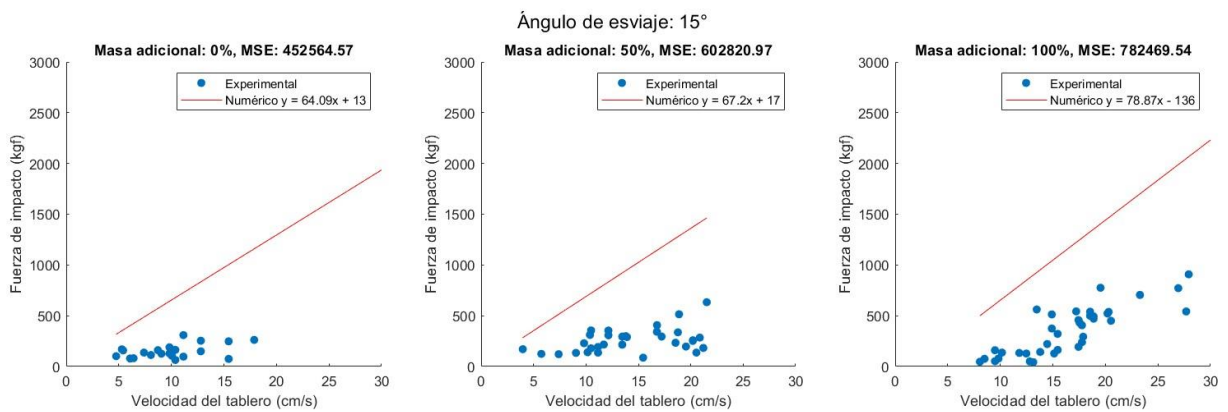


Figura 28: Comparación de resultados numéricos y experimentales, ángulo de esviaje 15°.

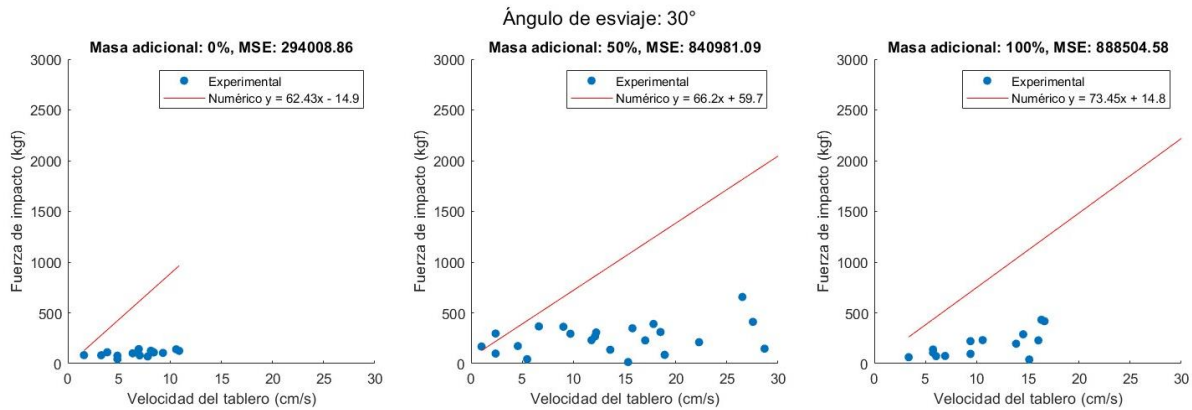


Figura 29: Comparación de resultados numéricos y experimentales, ángulo de esviaje 30°.

El análisis de los resultados numéricos en comparación con los datos experimentales, como se muestra en la Figura 27 para un ángulo de esviaje de 0°, revela una discrepancia significativa. Los valores de fuerza de impacto obtenidos numéricamente son considerablemente más elevados que los registrados experimentalmente, especialmente a medida que aumenta la velocidad del tablero.

Esta disparidad puede atribuirse, en gran medida, a la rigidez de los elementos del estribo en el modelo numérico. Observaciones de Arredondo (2023), respaldadas por documentación audiovisual, evidencian una deformación considerable de estos elementos durante los ensayos experimentales. Esta deformación no se considera en el modelo numérico, donde el estribo se asume como infinitamente rígido, lo que conlleva a una sobrestimación de la rigidez global del sistema y, por consiguiente, de las fuerzas de impacto generadas.

Además, es importante señalar que el error cuadrático medio (MSE) aumenta significativamente con la masa adicional, pasando de 387701.91 kgf² para 0% de masa adicional a 679392.20 kgf² para 100% de masa adicional. Esto sugiere que la influencia de la rigidez del estribo en la respuesta del modelo se acentúa a medida que aumenta la masa del tablero, lo que resalta la importancia de considerar la flexibilidad del estribo en modelos numéricos más precisos.

6.2 Análisis de rigidez del estribo

La correlación insuficiente entre los resultados experimentales y numéricos resalta la necesidad de mejorar los modelos de análisis estructural, teniendo en cuenta la rigidez de los elementos de estribo para minimizar el error. Una representación más precisa del comportamiento del puente bajo cargas de impacto puede lograrse mediante la incorporación de modelos numéricos más sofisticados, como el análisis de elementos finitos no lineales, que consideren las imperfecciones estructurales, las propiedades y comportamiento real de los materiales. Estos modelos avanzados permiten simular con mayor detalle la interacción entre el tablero y el estribo, así como la distribución de esfuerzos y deformaciones en la estructura, lo que puede conducir a una mejor comprensión de los mecanismos de daño y a un diseño más seguro y eficiente.

Para comprender el comportamiento estructural del estribo bajo cargas de impacto, se realizó un análisis de rigidez utilizando el software SAP2000 (Figura 30). La modelación del elemento se llevó a cabo mediante elementos tipo shell para el estribo, capturando así su geometría tridimensional y la distribución de esfuerzos en el plano. Las barras de soporte de las celdas de carga se representaron como elementos tipo barra, simplificando su comportamiento a esfuerzos axiales. Se emplearon acero A36 para las armaduras y hormigón G25 para el concreto, asignando sus propiedades mecánicas según las especificaciones técnicas.

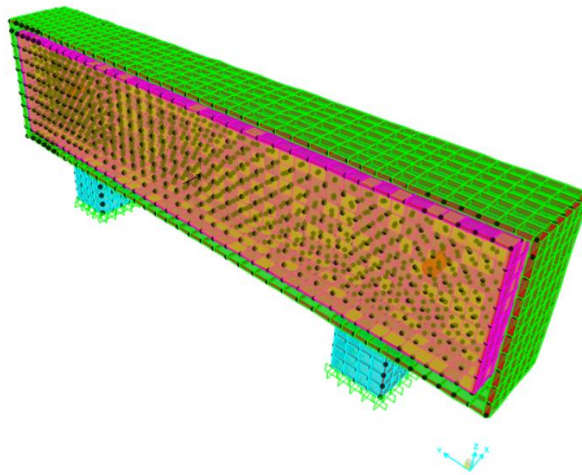


Figura 30: Modelo del estribo de puente desarrollado en software SAP2000

El análisis de rigidez se realizó mediante un método pushover, aplicando una carga lateral incremental hasta el colapso de la estructura. A partir de este análisis, se obtuvo la curva fuerza-deformación del sistema de estribo, que representa la relación no lineal entre la fuerza lateral aplicada y el desplazamiento lateral del punto de control. La rigidez inicial se determinó como la pendiente de la curva en el tramo elástico, mientras que la rigidez secante se calculó en diferentes puntos para considerar el comportamiento no lineal de la estructura.

Los resultados de este análisis son fundamentales para la calibración del modelo numérico en OpenSees. La rigidez del estribo, influye directamente en la respuesta dinámica de la estructura bajo cargas de impacto. Al conocer la rigidez del estribo, se pueden ajustar los parámetros del modelo numérico, para que las simulaciones reproduzcan de manera más precisa el comportamiento real de los especímenes ensayados.

Del análisis del sistema de estribo en Sap2000 se obtuvo un periodo de 0,026 [s], y un comportamiento de la estructura que se aprecia en la Figura 31. La rigidez inicial del estribo es aproximadamente 2,13 [ton/cm].

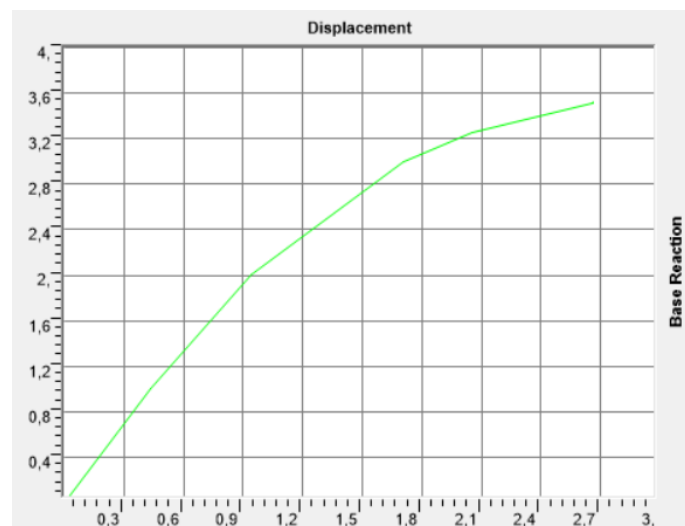


Figura 31: Comportamiento de la estructura mediante análisis PushOver (Desplazamiento en centímetros y reacciones en la base en toneladas).

Los resultados experimentales y numéricos presentados en este estudio resaltan la importancia de considerar la flexibilidad del estribo en los modelos de impacto en puentes. Asumir un estribo infinitamente rígido puede conducir a una sobreestimación significativa de las fuerzas de impacto, lo que podría resultar en diseños excesivamente conservadores. En cambio, incorporar la rigidez real del estribo en el modelo numérico permite obtener resultados más precisos y representativos del comportamiento real de la estructura bajo impacto. Estos resultados se ven respaldados por el trabajo realizado por Navarro et al., (2024) este documento concluye que es de suma importancia considerar la flexibilidad del estribo en los modelos numéricos de impacto en puentes. Al comparar los resultados experimentales con simulaciones numéricas utilizando el modelo de Muthukumar, se observó que asumir un estribo infinitamente rígido llevaba a fuerzas de impacto significativamente mayores que las registradas en los experimentos. En cambio, al incorporar la flexibilidad del estribo en el modelo, las fuerzas de impacto simuladas se alinearon mejor con los datos experimentales (Figura 32).

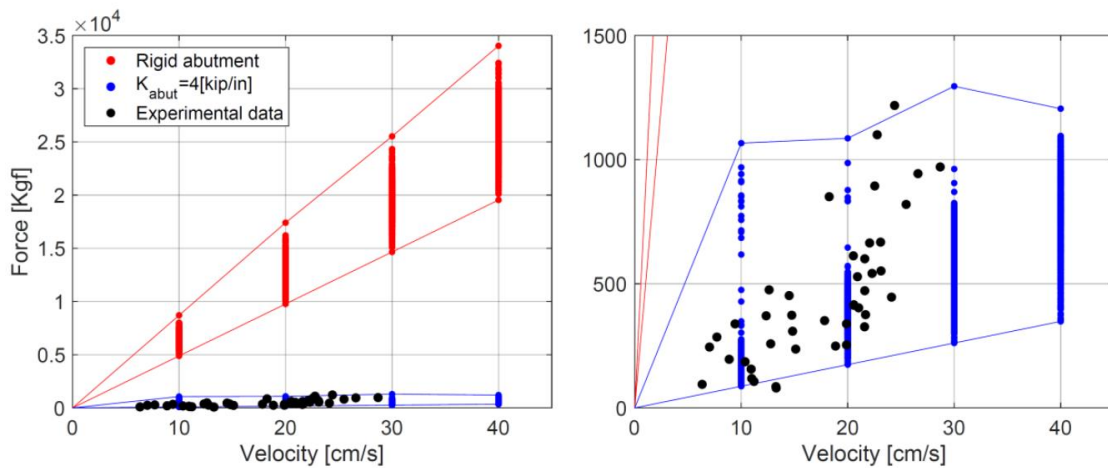


Figura 32: Comparación de resultados teóricos y numéricos para las fuerzas de impacto.
Fuente: Navarro et al., 2024

El análisis comparativo entre los datos experimentales y las simulaciones numéricas (modelo de rigidez) revela la influencia significativa de la rigidez del estribo en la fuerza de impacto, especialmente evidente en rigideces bajas donde las fuerzas simuladas superan considerablemente las experimentales. Aunque una mayor rigidez mejora la precisión del modelo, persisten discrepancias, particularmente a velocidades bajas, lo que subraya la dispersión inherente a los datos experimentales y las limitaciones del modelo de rigidez para capturar la complejidad del fenómeno de impacto. Estos hallazgos resaltan la necesidad de desarrollar modelos numéricos más sofisticados que incorporen factores como la deformación del estribo, la fricción y la amortiguación para lograr una predicción más precisa de las fuerzas de impacto.

7 Conclusión

Los análisis realizados en el marco de este estudio sobre el fenómeno de impacto en puentes de hormigón armado entre el estribo y el tablero han arrojado resultados preliminares para la estimación de las fuerzas de impacto mediante modelos numéricos. El ángulo de esviaje se ha destacado como un parámetro crucial, donde se ha observado que su aumento conlleva una tendencia a homogeneizar las pendientes de los gráficos de la Figura 25, y a una disminución en las fuerzas de impacto, especialmente para análisis con mayor porcentaje de masa en el sistema. Estos resultados se explican principalmente al no considerar la fuerza de roce entre elementos durante el contacto de los elementos, lo que generaría una componente de fuerzas en el sentido transversal al estribo. Esta correlación entre el ángulo de esviaje y la reducción de fuerzas ha sido respaldada por análisis experimentales, destacando su importancia en la respuesta estructural ante cargas dinámicas y la relevancia de medir las fuerzas de roce durante el impacto.

Asimismo, se ha identificado que el valor de " k " (factor de amplificación de rigidez) tiene un impacto relativamente bajo en la rigidez de la estructura cuando las masas son pequeñas. No obstante, a medida que el porcentaje de masas aumenta, la influencia de " k " se magnifica de manera significativa, lo que sugiere que este parámetro puede ser de gran importancia en aplicaciones donde las masas son sustanciales.

En cuanto a la elección del modelo de impacto, los resultados han indicado que el modelo de Muthukumar, muestra una considerable variabilidad en los resultados, lo que plantea interrogantes sobre su capacidad para proporcionar estimaciones consistentes y precisas. Por lo tanto, se ha explorado la viabilidad de utilizar el método de Hertz-Damp como una alternativa más confiable y estable en la evaluación de este fenómeno, con implicaciones significativas en la convergencia de los resultados de fuerzas de impacto. El modelo de Muthukumar, al combinar elementos elásticos y plásticos, introduce una mayor no linealidad en el sistema, por consiguiente, puede generar alteraciones en las fuerzas de impacto bajo algunas condiciones de carga, lo que puede dificultar el análisis para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas como se observa en la Figura 21.

Finalmente, la discrepancia entre los datos numéricos y experimentales, que se atribuye principalmente a la poca rigidez de los elementos de estribo, resaltan la necesidad de mejorar los modelos de análisis estructural mediante una correcta estimación de la rigidez y comportamiento del estribo. Esta mejora en los análisis numéricos es crucial para minimizar los errores y promover un diseño más preciso y seguro de puentes de hormigón armado con estribos independientes auto-estables.

Se agradece el apoyo del proyecto interno PI_LII_24_07, titulado Estimación del efecto bidireccional generado durante el impacto tablero-estribo en puentes viales ante sismos de gran intensidad.

8 Referencias

- Aldea, S., Bazaez, R., Astroza, R., & Hernandez, F. (2021). Seismic fragility assessment of Chilean skewed highway bridges. *Engineering Structures*, 249. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113300>
- Arredondo, L. (2023). *Estudio experimental del impacto estribo-tablero en modelos a escala de puentes de hormigón armado con diferentes ángulos de esviaje*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Benavides, S. (2021). *Bases para un programa experimental que permita el estudio del fenómeno de impacto estribo-tablero en puentes esviados*. <https://repositorio.usm.cl/handle/11673/52621>
- Dimitrakopoulos, E. G. (2011). Seismic response analysis of skew bridges with pounding deck-abutment joints. *Engineering Structures*, 33(3). <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.12.004>
- Hube, M., Santa María, H., & Villalobos, F. (2010). Preliminary analysis of the seismic response of bridges during the Chilean 27 February 2010 earthquake. *Obras y Proyectos* 8, 48-57.
- Hughes, P. J., & Mosqueda, G. (2020). Evaluation of uniaxial contact models for moat wall pounding simulations. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 49(12). <https://doi.org/10.1002/eqe.3285>
- Jankowski, R., & Mahmoud, S. (2015). *Earthquake-Induced Structural Pounding*. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-16324-6>
- Kawashima, K., Unjoh, S., Hoshikuma, J. I., & Kosa, K. (2011a). Damage of bridges due to the 2010 Maule, Chile, earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(7). <https://doi.org/10.1080/13632469.2011.575531>
- Kawashima, K., Unjoh, S., Hoshikuma, J. I., & Kosa, K. (2011b). Damage of bridges due to the 2010 Maule, Chile, earthquake. *Journal of Earthquake Engineering*, 15(7). <https://doi.org/10.1080/13632469.2011.575531>
- Kun, C., Jiang, L., & Chouw, N. (2017). Influence of pounding and skew angle on seismic response of bridges. *Engineering Structures*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.07.024>
- Lankarani, H. M., & Nikraves, P. E. (1990). A contact force model with hysteresis damping for impact analysis of multibody systems. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 112(3), 369–376. <https://doi.org/10.1115/1.2912617>
- Miari, M., Choong, K. K., & Jankowski, R. (2021). Seismic Pounding Between Bridge Segments: A State-of-the-Art Review. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 28(2), 495–504. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09389-x>
- Ministerio de Obras Publicas Dirección de Vialidad. (2018). Manual de Carreteras, Volumen N°3 Instrucciones y Criterios de Diseño. *Mop*, 3(1).
- Muthukumar, S. (2003). *A contact element approach with hysteresis damping for the analysis and design of pounding in bridges*. <https://search.proquest.com/openview/179a6fb46fcb2f8492981bde0fa83b97/1?pq-origsite=gscholar&cbl=18750&diss=y>
- Navarro, N. (2019). *Evaluación de las expresiones para determinar las longitudes mínimas de apoyo en puentes chilenos mediante análisis no lineales*. Universidad Técnica Federico Santa María.
- Navarro, N., Bazaez, R., Astroza, R., & Hernandez, F. (2024). *Evaluation of structural pounding using shake-table experiments and Fe models of bridges*.

- Peralta, L., & Hube, M. A. (2018). Deck rotation of straight bridges induced by asymmetric characteristics and effect of transverse diaphragms. *Engineering Structures*, 173. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.06.107>
- Schexnayder, C., Alarcón, L. F., Delpiano Antillo, E., Cifuentes Morales, B., & López, M. (2014). *Observaciones de Desempeño de Puentes durante el Terremoto de Chile en 2010*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000632](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000632)
- Shi, Z., & Dimitrakopoulos, E. G. (2017). Nonsmooth dynamics prediction of measured bridge response involving deck-abutment pounding. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 46(9). <https://doi.org/10.1002/eqe.2863>
- Wu, S., Buckle, I. G., Ahmad Itani, A. M., Member Emmanuel, C., Member Gokhan Pekcan, C., Member John Anderson, C., & Zeh, D. W. (2016). *Effect Of Skew On Seismic Performance Of Bridges With Seat-Type Abutments be accepted in partial fulfillment of the requirements for the degree of DOCTOR OF PHILOSOPHY*.
- Wu, S., Buckle, I. G., Itani, A. M., & Istrati, D. (2019). Experimental Studies on Seismic Response of Skew Bridges with Seat-Type Abutments. II: Results. *Journal of Bridge Engineering*, 24(10). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001469](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001469)