



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO EN JUNTA DE PUENTE A ESCALA ENSAYADO EN MESA VIBRADORA

Memoria de Título presentada por

Francisco Javier Huete Gomez

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

Ingeniería Civil

Profesor Guía
Claudio Ignacio Sepúlveda Contreras

Julio de 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO EN JUNTA DE PUENTE A ESCALA ENSAYADO EN MESA VIBRADORA.

Nombre del candidato(a): Francisco Javier Huete Gomez

Carrera / Grado: Ingeniería Civil

Campus: Campus San Joaquín **Departamento:** Departamento de Obras Civiles

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Claudio Sepúlveda Contreras, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 11/07/2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 11/07/2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

TITULO DE LA MEMORIA:

**ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO EN JUNTA DE
PUENTE A ESCALA ENSAYADO EN MESA VIBRADORA**

AUTOR:

FRANCISCO JAVIER HUETE GOMEZ

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

Firma

Claudio Sepúlveda

Ramiro Bazáez

Santiago, Chile, Julio de 2026

ESTIMACIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO EN JUNTA DE PUENTE A ESCALA ENSAYADO EN MESA VIBRADORA

Francisco Huete¹, Claudio Sepúlveda²

¹Universidad Técnica Federico Santa María

1 Introducción

Durante terremotos de gran magnitud, los puentes pueden experimentar desplazamientos relativos significativos entre sus componentes estructurales, particularmente entre el tablero y los estribos. Estos desplazamientos pueden dar lugar a impactos repetitivos, fenómeno conocido como *pounding*, el cual ha sido identificado como una de las principales fuentes de daño local en estructuras de puentes.

En ese sentido, la evidencia observada tras el terremoto del Maule de 2010 en Chile da cuenta de la relevancia de este fenómeno, reportándose daños en aproximadamente 300 puentes, incluyendo casos de colapso de vanos y fallas en conexiones entre la superestructura y la subestructura (Buckle et al., 2012). Estos antecedentes ponen de manifiesto la importancia de comprender los mecanismos asociados al impacto estructural y sus consecuencias en el desempeño sísmico.



Figura 1. Colapso del vano en el paso superior Las Mercedes debido a la rotación en planta de la superestructura. Fuente: Buckle et al. (2012)

Desde un punto de vista físico, el fenómeno de *pounding* involucra la generación de fuerzas de contacto de alta intensidad y corta duración, cuya magnitud depende de diversos parámetros, tales como la rigidez de contacto, el coeficiente de restitución y la velocidad relativa entre los cuerpos inmediatamente antes del impacto. En particular, estudios numéricos han mostrado que la fuerza de impacto es altamente sensible a esta última variable, observándose incrementos significativos en las fuerzas máximas a medida que aumenta la velocidad previa al contacto (Naderpour et al., 2016).

La relevancia de esta variable también se ve reflejada en los modelos teóricos utilizados para la simulación del impacto estructural. Formulaciones ampliamente empleadas, como los modelos viscoelásticos no lineales propuestos por Jankowski (2005) y los modelos de contacto tipo Hertz con amortiguamiento desarrollados por Muthukumar & DesRoches (2006), incorporan explícitamente la velocidad de impacto como un parámetro clave en la determinación de las fuerzas de contacto y la disipación de energía durante el choque, evidenciando su rol central en la modelación del fenómeno.

A pesar de su importancia, la velocidad previa al impacto rara vez se obtiene de forma directa en ensayos experimentales, por lo que habitualmente debe inferirse a partir de otras variables de respuesta. Si bien existen instrumentos capaces de medir velocidad de forma directa, estos suelen ser poco accesibles o de difícil implementación en ensayos de menor escala como el presente. En el ámbito experimental, su estimación suele abordarse de forma indirecta a partir de registros de aceleración o desplazamiento, lo que introduce diversas fuentes de incertidumbre. Por una parte, la integración de señales de aceleración puede generar errores acumulativos asociados a desviaciones de la línea base (Iwan et al., 1985), mientras que la derivación de desplazamientos amplifica el ruido presente en las mediciones (Savitzky & Golay, 1964). Estas dificultades se ven acentuadas en ensayos que involucran impactos, donde las

señales presentan variaciones abruptas y contenido de muy altas frecuencias, afectando la estabilidad y precisión de las estimaciones.

En este contexto, las técnicas de procesamiento de imágenes han emergido como una alternativa complementaria para la medición de desplazamientos en ensayos estructurales (Brownjohn et al., 2017). En particular, los métodos de *target tracking* permiten estimar desplazamientos mediante el seguimiento de marcadores en registros de video, ofreciendo ventajas como su carácter no invasivo, su bajo costo de implementación y la posibilidad de medir simultáneamente múltiples puntos del sistema utilizando una única cámara. Asimismo, permiten registrar desplazamientos en más de una dirección, proporcionando información bidimensional del movimiento sin requerir la instalación de instrumentación adicional. De forma complementaria, el uso de múltiples cámaras permite observar el sistema desde distintos ángulos y ampliar la cobertura espacial de las mediciones.

En conjunto, los antecedentes expuestos evidencian un vacío relevante en la estimación experimental de la velocidad previa al impacto, asociado tanto a la diversidad de métodos disponibles como a la falta de criterios claros para evaluar su confiabilidad en condiciones de impacto. En consecuencia, se hace necesario desarrollar metodologías que permitan estimar de forma robusta y consistente la velocidad previa al impacto a partir de mediciones experimentales, considerando explícitamente las limitaciones asociadas a la instrumentación y al procesamiento de señales.

2 Marco Teórico

2.1 Naturaleza del impacto estructural

El fenómeno de impacto estructural, comúnmente denominado *pounding*, corresponde a la interacción dinámica entre elementos estructurales adyacentes —como tableros de puentes y estribos— cuando las deformaciones inducidas por una excitación superan las separaciones disponibles. Este fenómeno se caracteriza por la ocurrencia de eventos de muy corta duración que generan cambios abruptos en la respuesta del sistema. Desde el punto de vista del análisis dinámico, ello da lugar a un comportamiento marcadamente transitorio, asociado a un sistema no lineal y no invariante en el tiempo, lo que limita la aplicabilidad de herramientas de análisis frecuencial basadas en sistemas lineales e invariantes en el tiempo (LTI), como la Transformada de Fourier (Oppenheim & Schaffer, 2010). Como consecuencia, la respuesta asociada al impacto presenta un amplio contenido frecuencial, concentrado principalmente en torno al instante de contacto.

Por lo anterior, el análisis frecuencial aplicado directamente sobre registros que contienen impactos no permite distinguir entre las distintas fases del fenómeno. Por esta razón, en la presente investigación se propone centrar el análisis en la ventana temporal previa al impacto, donde el comportamiento del sistema puede aproximarse de mejor manera a condiciones cuasi lineales. Esto permite aplicar herramientas de análisis frecuencial de forma más consistente y mejorar la estimación de variables relevantes, como la velocidad previa al impacto.

2.2 Limitaciones de medición

Las magnitudes físicas registradas experimentalmente se adquieren de forma discreta, con un intervalo temporal Δt determinado por la frecuencia de muestreo del sistema de adquisición. En consecuencia, el instante exacto en que ocurre el impacto no es directamente observable, ya que el contacto puede producirse en cualquier punto dentro de dicho intervalo. Por ello, la velocidad previa al impacto debe estimarse a partir de las muestras disponibles inmediatamente anteriores al evento, introduciendo una incertidumbre inherente asociada a la discretización temporal de la señal.

Adicionalmente, los sistemas de medición presentan limitaciones asociadas a la instrumentación, tales como ruido electrónico, saturación de sensores y posibles desfases entre canales. Estos efectos pueden distorsionar las señales registradas y afectar la calidad de las mediciones, por lo que deben ser considerados tanto en el procesamiento como en la interpretación de los datos experimentales

2.3 Estimación de velocidad a partir de desplazamientos

La obtención de velocidades a partir de mediciones de desplazamiento requiere la aplicación de técnicas de diferenciación numérica sobre señales discretas. Dado que la derivación amplifica el ruido presente en la señal, resulta necesario incorporar etapas de suavizado previo para obtener estimaciones físicamente consistentes. Entre las distintas alternativas disponibles, los filtros de Savitzky & Golay (1964) resultan particularmente adecuados para este tipo de aplicaciones debido a su carácter local y a su capacidad de suavizar la señal preservando su forma general.

Estos filtros se basan en el ajuste local de un polinomio de grado N mediante mínimos cuadrados sobre una ventana móvil de $2M + 1$ muestras, el cual puede expresarse de forma general como:

$$p[n] = \sum_{k=0}^N a_k n^k \quad (1)$$

Donde a_k corresponden a los coeficientes del polinomio ajustado y n representa la posición relativa de cada muestra dentro de la ventana, centrada en $n = 0$. A partir de este ajuste es posible estimar tanto el valor suavizado de la señal como sus derivadas en el punto central de la ventana.

Sin embargo, realizar un ajuste polinomial independiente para cada posición de la ventana puede resultar computacionalmente costoso. Por esta razón, Savitzky & Golay (1964) demostraron que, para una combinación fija del tamaño de ventana $2M + 1$ y del grado polinomial N , es posible determinar un conjunto único de coeficientes c_k que permanece constante a lo largo de todo el registro. Esto permite reemplazar el ajuste local de un polinomio en cada muestra por una única operación de convolución discreta de la forma:

$$y[n] = \sum_{k=-M}^M c_k x[n + k] \quad (2)$$

Donde $x[n]$ corresponde a la señal original, $y[n]$ a la señal filtrada y c_k a los coeficientes del filtro. Dado que una ventana contiene $2M + 1$ muestras y un polinomio de grado N posee $N + 1$ coeficientes, debe cumplirse que $2M \geq N$ para que dichos coeficientes puedan determinarse de forma única (Schafer, 2011).

En la Figura 2 se muestra el efecto de aplicar un filtro S-G de grado $N = 3$ y ventana de 21 muestras sobre registros de desplazamiento. Se observa que la velocidad obtenida a partir de la señal suavizada presenta menores oscilaciones de alta frecuencia que aquella calculada mediante diferenciación directa.

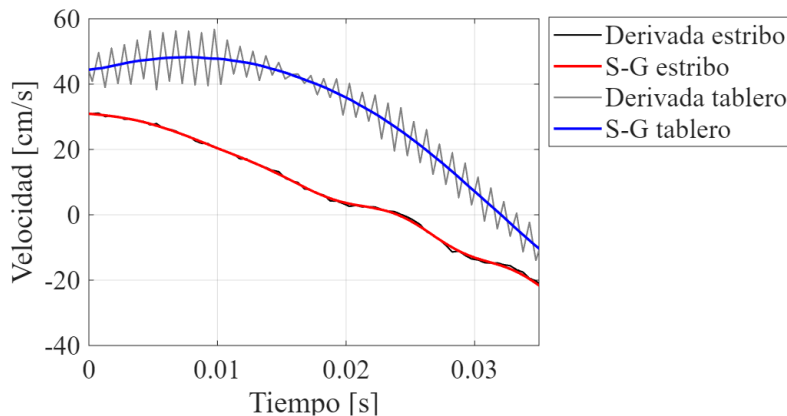


Figura 2. Comparación entre velocidades derivadas y suavizadas.

No obstante, el desempeño de estos filtros depende fuertemente de la elección de parámetros como el tamaño de la ventana y el grado del polinomio utilizado. En particular, existe un compromiso entre el nivel de suavizado y la capacidad de representar adecuadamente variaciones locales: ventanas más

grandes tienden a reducir el ruido de forma más efectiva, pero pueden distorsionar cambios abruptos de la señal, mientras que ventanas más pequeñas preservan mejor dichos cambios a costa de una menor reducción del ruido.

2.4 Estimación de velocidad a partir de aceleraciones

En registros de aceleración, la estimación de la velocidad exige un tratamiento cuidadoso de la línea base, ya que pequeñas desviaciones u *offsets* en la señal pueden inducir errores significativos en las variables integradas. Este problema ha sido ampliamente documentado en el procesamiento de aceleraciones sísmicas, especialmente cuando se busca obtener velocidades y desplazamientos físicamente consistentes.

En este contexto, Iwan et al. (1985) fueron de los primeros en estudiar sistemáticamente este problema a partir del análisis de registros obtenidos con acelerómetros. Los autores observaron que pequeñas variaciones en el nivel base de la aceleración —asociadas, por ejemplo, a efectos de histéresis en el transductor o excitaciones de alta amplitud— pueden generar derivas significativas en la velocidad y el desplazamiento al ser integradas en el tiempo.

Con el objetivo de compensar estas desviaciones, propusieron un procedimiento de corrección basado en una representación simplificada de la línea base, ilustrado en la Figura 3. En ella se definen tres instantes característicos: t_1 , correspondiente al inicio del movimiento fuerte; t_2 , asociado a su término; y t_f , correspondiente al final del registro. El método asume que la deriva de la línea base puede aproximarse mediante una variación lineal durante el intervalo $[t_1, t_2]$, constituyendo una aproximación práctica más que una solución exacta.

Bajo este supuesto, la señal de aceleración se integra para obtener la velocidad. Posteriormente, se identifica una tendencia aproximadamente lineal en el tramo posterior al movimiento fuerte, es decir, para $t \in [t_2, t_f]$. Sobre este intervalo, se ajusta una recta mediante mínimos cuadrados a la señal de velocidad, cuya pendiente representa el offset residual en la aceleración, denotado como a_f . Así:

$$v_c(t) = v_0 + a_f t. \quad (3)$$

Dado que se asume una variación lineal del desplazamiento de la línea base en el intervalo $[t_1, t_2]$, y que esta es nula en t_1 , el valor medio del *offset* inicial puede estimarse como:

$$a_m = \frac{v_c(t_2)}{t_2 - t_1}. \quad (4)$$

Donde $v_c(t_2)$ corresponde al valor de la velocidad corregida en el instante t_2 , obtenido a partir del ajuste en el tramo posterior. Finalmente, la corrección de la línea base se realiza restando los valores a_m y a_f a la señal de aceleración en los intervalos $t \in [t_1, t_2]$ y $t \in [t_2, t_f]$, respectivamente.

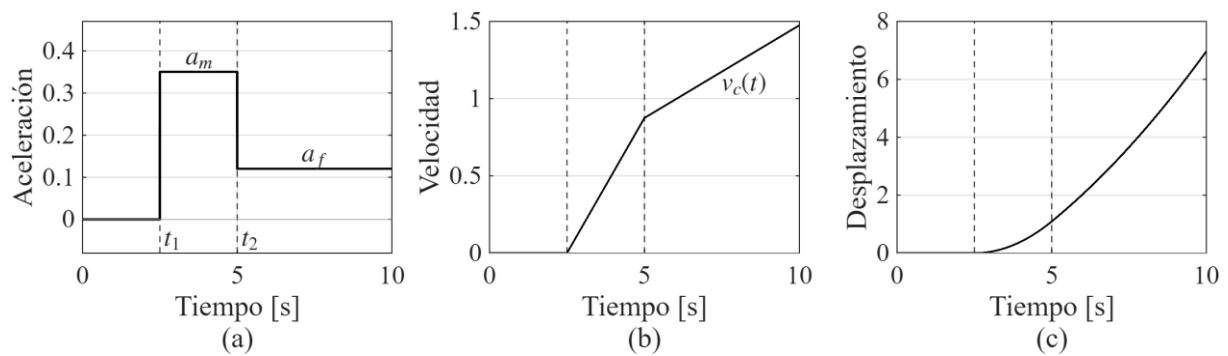


Figura 3. Esquema del procedimiento de corrección de línea base propuesto por Iwan et al. (1985): (a) *baseline shift* en señal de aceleración, (b) deriva de la velocidad obtenida por integración, y (c) deriva del desplazamiento integrado.

No obstante, es importante destacar que la corrección de la línea base no posee una solución única. Tal como señala Boore (2001), distintas funciones pueden satisfacer las condiciones de ajuste impuestas sobre un mismo registro, por lo que la elección del modelo de corrección responde principalmente a criterios de consistencia física más que a una formulación exacta. En particular, la deriva observada en la velocidad posterior al movimiento fuerte no necesariamente presenta un comportamiento lineal, pudiendo existir variaciones más complejas en la línea base de la aceleración.

En este contexto, la adopción de una corrección lineal constituye una aproximación práctica que permite capturar el comportamiento dominante del error sin introducir complejidad adicional en el procesamiento. Por consiguiente, el objetivo del procedimiento no es reconstruir exactamente la señal original, sino obtener estimaciones físicamente consistentes de velocidad y desplazamiento a partir de los registros integrados.

2.5 Estimación de desplazamiento mediante *target tracking*

El uso de técnicas de visión computacional para la estimación de desplazamientos se ha consolidado como una alternativa complementaria a los sensores tradicionales, siendo ampliamente aplicado en el monitoreo de la salud estructural (*Structural Health Monitoring*, SHM). En este contexto, el *target tracking* ha demostrado ser capaz de capturar la respuesta dinámica de estructuras reales sometidas a condiciones operacionales, reproduciendo desplazamientos con buena precisión cuando se controlan factores como la estabilidad de la cámara, las condiciones de iluminación y la calidad del procesamiento de imágenes (Brownjohn et al., 2017). Asimismo, diversos estudios han confirmado que su desempeño es comparable al de instrumentación convencional bajo condiciones controladas (Gioiella et al., 2025).

Para que los desplazamientos observados en una secuencia de imágenes puedan transformarse en magnitudes físicas, es necesario realizar previamente un proceso de calibración de la cámara. Este procedimiento permite estimar los parámetros intrínsecos y extrínsecos que describen la geometría de la cámara y su relación espacial con la escena observada. Los parámetros intrínsecos corresponden a características propias de la cámara, tales como la distancia focal, la ubicación del centro óptico y la posible falta de perpendicularidad entre los ejes de la imagen (*skew coefficient*). Por otra parte, los parámetros extrínsecos describen la posición y orientación de la cámara respecto del objeto o superficie bajo estudio.

Las cámaras reales presentan distorsiones ópticas asociadas al sistema de lentes, las cuales pueden alterar la geometría de la imagen y afectar la precisión de las mediciones. La distorsión radial provoca una deformación de la imagen cuya magnitud aumenta con la distancia al centro de la imagen, alterando la posición aparente de los puntos observados y deformando las líneas rectas. Dependiendo de las características del lente, este efecto puede manifestarse como *barrel distortion* o *pincushion distortion*. En la Figura 4 se presentan esquemáticamente ambos tipos de distorsión radial.

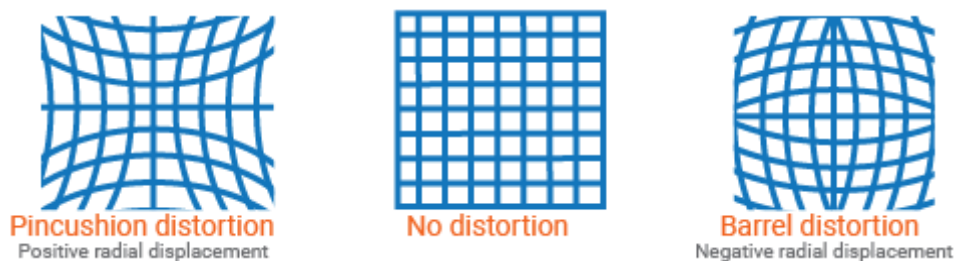


Figura 4. Efecto de la distorsión radial sobre la geometría de la imagen.

La metodología de calibración propuesta por Zhang (2008) utiliza un tablero de geometría conocida, típicamente un patrón *checkerboard*, dispuesto sobre el plano donde posteriormente se realizarán las mediciones y fotografiado desde distintas posiciones y orientaciones. Como se observa en la Figura 5, la detección automática de las esquinas del tablero permite establecer correspondencias entre puntos cuyas coordenadas físicas son conocidas y sus respectivas posiciones en la imagen. Con esta

información se estiman los parámetros de la cámara necesarios para relacionar las coordenadas de la imagen con las dimensiones físicas de la escena observada. La discrepancia entre la posición observada de una esquina y la posición predicha por el modelo calibrado se conoce como error de reproyección y constituye uno de los principales indicadores de la calidad de la calibración.

Una vez obtenidos los parámetros de calibración, las imágenes pueden corregirse para reducir los efectos de las distorsiones ópticas y establecer una relación entre las coordenadas registradas en píxeles y las dimensiones físicas de la superficie observada. De esta manera, el desplazamiento del target puede cuantificarse directamente en unidades de longitud, generando series temporales de desplazamiento que posteriormente pueden emplearse para estimar velocidades y caracterizar la respuesta dinámica de la estructura.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Estimar la velocidad previa al impacto en un sistema tablero–estribo a escala ensayado en mesa vibradora, evaluando la consistencia de distintas metodologías de medición basadas en registros experimentales.

3.2 Objetivos específicos

- Estimar la velocidad previa al impacto a partir de registros de aceleración y desplazamiento obtenidos mediante acelerómetros y sensores láser, utilizando procedimientos de integración y diferenciación.
- Comparar las estimaciones obtenidas mediante los distintos métodos, evaluando su concordancia y diferencias en la determinación de la velocidad previa al impacto.
- Desarrollar y validar experimentalmente una metodología de medición basada en visión computacional mediante target tracking, evaluando el efecto de la calibración geométrica y de la posición del marcador sobre la precisión de las mediciones de desplazamiento.

4 Configuración Experimental

4.1 Descripción general del sistema

El estudio se desarrolla sobre un modelo a escala de un sistema tablero–estribo, ensayado en mesa vibradora en el Laboratorio del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María. El montaje experimental corresponde al desarrollado por Eyzaguirre (2026), para el estudio del impacto tablero-estribo en puentes.

Como se muestra en la Figura 6, el modelo representa un puente de un vano compuesto por un tablero de hormigón armado apoyado sobre cuatro placas elastoméricas de neopreno y un estribo dispuesto en uno de sus extremos. Se consideraron dos configuraciones geométricas: un puente recto y un puente con esviaje de 15° , permitiendo evaluar la influencia de esta condición sobre la respuesta dinámica del sistema.

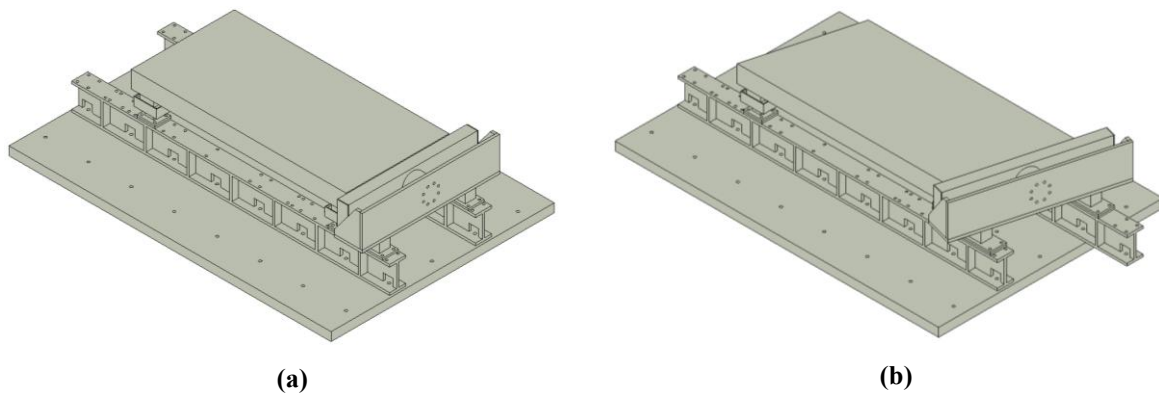


Figura 6. Esquema de modelos experimentales: (a) puente recto; (b) puente con esviaje 15° .

El tablero y el estribo se encuentran inicialmente separados por una distancia libre o *gap* de aproximadamente 0.5 cm. Esta separación permite el movimiento relativo del tablero antes del contacto, produciéndose el impacto cuando los desplazamientos inducidos por la excitación superan dicha distancia.

Las placas elastoméricas se encuentran adheridas tanto al tablero como a los apoyos mediante adhesivo epóxico, permitiendo transmitir el movimiento impuesto por la mesa vibradora y controlar la respuesta dinámica de la superestructura. Por su parte, el estribo fue diseñado para comportarse como un elemento significativamente más rígido que el sistema de apoyos, de modo que sus deformaciones pueden considerarse despreciables frente a las del tablero durante los ensayos.

Adicionalmente, la masa total del sistema puede modificarse mediante la incorporación de lastres de plomo distribuidos sobre el tablero, permitiendo evaluar distintas configuraciones de masa adicional. Esta variable resulta relevante debido a su influencia sobre la inercia del sistema y, en consecuencia, sobre las velocidades desarrolladas durante la excitación dinámica.

4.2 Excitación dinámica

Los ensayos experimentales se realizaron mediante pulsos de desplazamiento de frecuencia controlada aplicados por la mesa vibradora, con el objetivo de generar condiciones de impacto entre el tablero y el estribo.

Con el fin de evaluar la influencia de distintos parámetros sobre la velocidad previa al impacto, se definió una matriz experimental que considera variaciones en la amplitud y frecuencia del pulso de excitación, la masa adicional incorporada al tablero y la geometría del sistema, contemplando configuraciones con esviaje de 0° y 15° . El detalle de las configuraciones evaluadas se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Matriz de ensayos

Parámetro	Descripción
Brecha inicial (<i>gap</i>)	0.5 [cm]
Frecuencias	5 [Hz] – 6 [Hz] – 7 [Hz]
Amplitud del pulso	1 [cm] – 1.5 [cm] – 2 [cm]
Masa (uniforme)	Tablero + 50% / Tablero + 100%
Ángulo de esviaje	0 [°] – 15 [°]
Nº de repeticiones por ensayo	3
Nº total de ensayos	36

4.3 Instrumentación y adquisición de datos

La instrumentación utilizada corresponde a la misma implementada en la campaña experimental de Eyzaguirre (2026), incluyendo sensores de desplazamiento, acelerómetros y un sistema de adquisición de datos sincronizado. La disposición general de los instrumentos en el modelo experimental se presenta en la Figura 4.

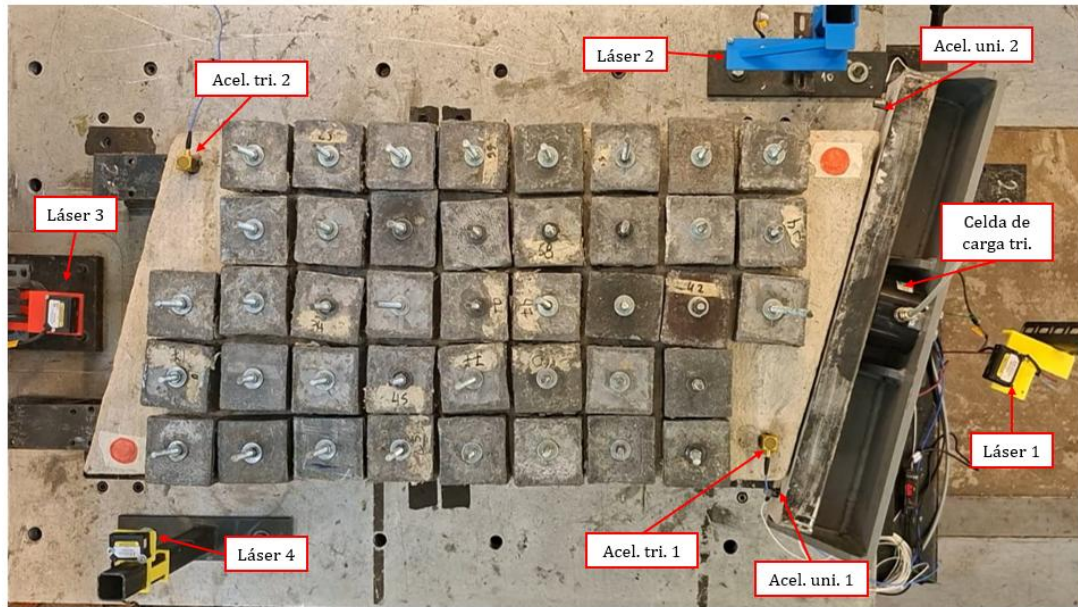


Figura 7. Esquema de la disposición de la instrumentación utilizada. Fuente: Eyzaguirre (2026).

La medición de desplazamientos se realiza mediante sensores láser sin contacto del fabricante Keyence, los cuales entregan una señal de voltaje proporcional a la distancia medida. Para obtener los desplazamientos en unidades de longitud, los registros de voltaje se convierten mediante la siguiente expresión:

$$D = \frac{V - 2.25}{0.0875} \quad (5)$$

Donde D corresponde al desplazamiento medido en [mm] y V al voltaje registrado por el sensor en [V]. La calibración de los sensores se realizó considerando un rango de medición de ± 2 cm respecto de una posición de referencia.

Todos los sensores fueron orientados perpendicularmente a la superficie monitoreada. Los láseres 1 y 3 se utilizaron para medir los desplazamientos del estribo y del tablero, respectivamente, mientras que los láseres 2 y 4 se dispusieron en esquinas opuestas del tablero con el objetivo de estimar su rotación.

Las aceleraciones se registraron mediante acelerómetros ICP® del fabricante PCB Piezotronics, empleándose sensores triaxiales 356B18 y uniaxiales 352C33. Los acelerómetros triaxiales poseen un rango de medición de ± 5 g, mientras que los acelerómetros uniaxiales alcanzan ± 50 g.

Los datos son adquiridos mediante un sistema CompactRIO de National Instruments, el cual permite el registro simultáneo y sincronizado de múltiples señales a una frecuencia de muestreo nominal de 2000 Hz ($\Delta t = 0.0005$ s). La sincronización entre canales resulta fundamental para el análisis conjunto de desplazamientos, fuerzas y aceleraciones.

De forma paralela, durante la campaña experimental se realizaron registros de video mediante una cámara de teléfono móvil instalada sobre una grúa de laboratorio, ubicada aproximadamente sobre la vertical del modelo experimental con el fin de obtener una vista cenital del tablero. Sobre la superficie del tablero se dispusieron marcadores visuales de alto contraste destinados a la aplicación de técnicas de seguimiento de objetivos.

5 Selección de ensayos

5.1 Disponibilidad de registros experimentales

La campaña experimental contempló originalmente la ejecución de 36 ensayos. Sin embargo, durante el proceso de exportación y almacenamiento de los registros, algunos archivos fueron sobrescritos de forma inadvertida, provocando la pérdida de parte de la información adquirida.

Como consecuencia, sólo fue posible recuperar 31 de los 36 ensayos originalmente realizados. La Tabla 2 resume los registros efectivamente disponibles para esta investigación. En la nomenclatura empleada, A representa la amplitud del pulso impuesto (cm), F la frecuencia de excitación (Hz), E el ángulo de esviaje ($^{\circ}$) y M el porcentaje de masa adicional incorporada en el tablero.

Tabla 2. Ensayos disponibles

Registro	E0M50	E0M100	E15M50	E15M100
A1F5	✓	✓	✓	✓
A1F6	✓	✓	–	✓
A1F7	✓	–	✓	✓
A1,5F5	✓	✓	✓	✓
A1,5F6	✓	✓	–	✓
A1,5F7	✓	✓	✓	✓
A2F5	✓	–	–	✓
A2F6	✓	✓	✓	✓
A2F7	✓	✓	✓	✓

5.2 Evaluación de los registros láser

Durante la revisión de los registros de desplazamiento se observó que las mediciones correspondientes a los ensayos con esviaje de 0° presentaban una meseta en la señal del tablero inmediatamente antes del impacto. Como se observa en la Figura 8.a, este comportamiento se produce cuando el desplazamiento excede el rango de medición del sensor láser, provocando la pérdida de información en la zona de interés para la estimación de la velocidad previa al impacto.

En contraste, los ensayos con esviaje de 15° no presentaron este problema. Como se muestra en la Figura 8.b, el desplazamiento del tablero ingresa al rango de medición precisamente en las cercanías del impacto, conservando registros utilizables durante toda la etapa previa al contacto. Por esta razón, el análisis basado en desplazamientos se realizó únicamente utilizando los ensayos con esviaje de 15° .

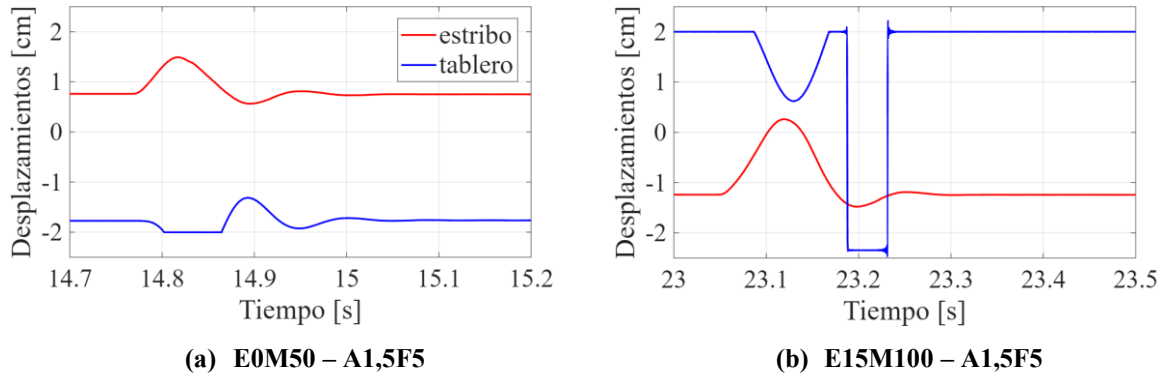


Figura 8. Registros de desplazamiento representativos para ensayos con esviaje de 0° y 15°.

5.3 Evaluación de los registros de video

Los registros de video presentaron diversas limitaciones que impidieron su utilización para la estimación de la velocidad relativa previa al impacto. En primer lugar, los videos sólo se encontraban disponibles para los ensayos con esviaje de 15°. Adicionalmente, los marcadores visuales fueron instalados únicamente sobre el tablero, imposibilitando la medición del desplazamiento del estribo y, por consiguiente, el cálculo de la velocidad relativa entre ambos elementos.

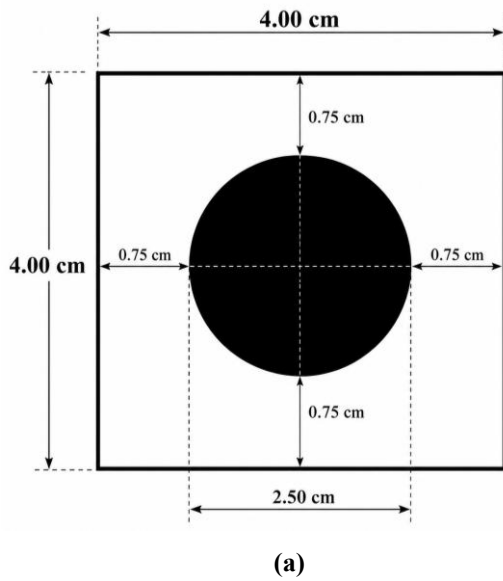
Por su parte, los registros fueron adquiridos a una frecuencia de 30 cuadros por segundo y con una resolución de 478 x 850 píxeles, lo que limitó tanto la precisión temporal como espacial de las mediciones y generó un nivel de ruido significativo en la detección de los marcadores. Asimismo, durante la campaña experimental no se realizó un proceso de calibración de la cámara, por lo que no fue posible corregir potenciales distorsiones ópticas ni establecer una conversión confiable entre píxeles y dimensiones físicas.

Debido a estas limitaciones, los registros de video de la campaña experimental no fueron considerados adecuados para el análisis posterior.

5.4 Ensayo complementario de target tracking

Con el propósito de estudiar el desempeño de un sistema de medición basado en visión computacional bajo condiciones controladas, se desarrolló un ensayo complementario de target tracking. En particular, se evaluó cómo varía la precisión de las mediciones según la ubicación de un marcador dentro del campo visual de la cámara y el efecto de la calibración geométrica en la corrección de posibles distorsiones ópticas. Para ello, se realizaron ensayos estáticos posicionando el marcador en distintas zonas de la imagen, incluyendo regiones centrales, laterales y esquinas. Adicionalmente, se efectuó un ensayo dinámico mediante el desplazamiento manual del objetivo sobre la superficie de medición, con el fin de obtener registros representativos para el análisis posterior.

El montaje experimental consistió en un teléfono móvil iPhone XR instalado sobre un soporte fijo con vista cenital, ubicado aproximadamente a 41 cm sobre la superficie de medición. Los registros fueron adquiridos con una resolución de 1920 x 1080 píxeles y una frecuencia de captura de 120 cuadros por segundo. Como marcador se utilizó un objetivo circular de 25 mm de diámetro, cuya geometría y dimensiones se presentan en la Figura 9.a, mientras que una huincha de medir dispuesta dentro del campo visual permitió establecer la equivalencia entre píxeles y unidades físicas. La configuración general del montaje se presenta en la Figura 9.b.



INSERTAR IMAGEN DEL ENSAYO GENERAL

Figura 9. (a) geometría y dimensiones del marcador utilizado; (b) configuración experimental del montaje.

6 Procesamiento y Corrección de Mediciones

6.1 Identificación de pulsos e instante pre-impacto

6.1.1 Detección automática de pulsos

Para los registros de desplazamiento, la detección automática de pulsos se realizó a partir de las mediciones del estribo, ya que las señales del tablero presentaban pérdidas de información asociadas a la saturación del sensor láser. Debido a que ambos elementos responden simultáneamente ante cada excitación, las ventanas detectadas fueron posteriormente utilizadas en el procesamiento de las señales del tablero y del estribo.

Como indicador de actividad dinámica se empleó el valor absoluto de la velocidad obtenida mediante la derivada discreta del desplazamiento. El nivel de ruido se caracterizó a partir de un tramo inicial del registro libre de excitación e impacto y, a partir de éste, se definieron umbrales de activación y retorno. El inicio y término de cada pulso se identificaron cuando la señal superó o descendió de dichos umbrales durante un número mínimo de muestras consecutivas. La Figura 10 presenta un ejemplo representativo del procedimiento.

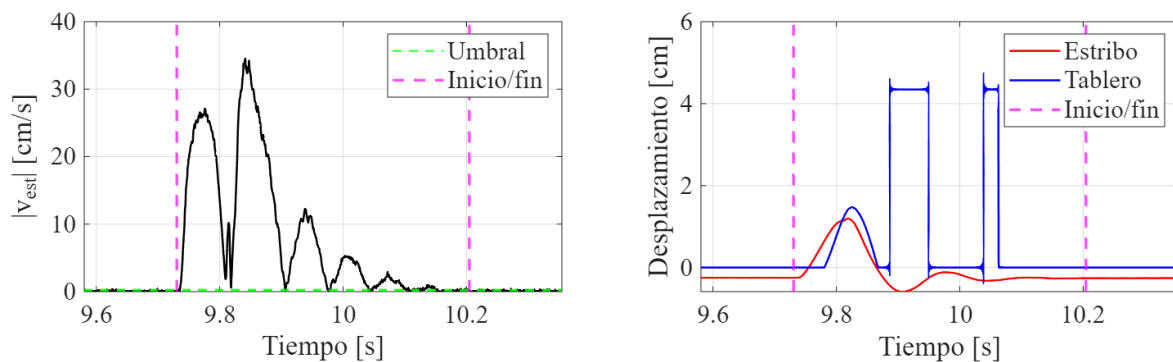


Figura 10. Detección automática de pulsos a partir del RMS de velocidad del estribo.

Para los registros de aceleración se adoptó un procedimiento análogo, aplicado sobre el valor absoluto de la aceleración suavizada mediante una media móvil. Debido a que en algunos registros el nivel basal

de la señal presentaba derivas lentas posteriores al impacto, el nivel de ruido se estimó mediante ventanas móviles de 2 s. En cada ventana se seleccionaron las amplitudes inferiores al percentil 60 de la aceleración suavizada y, sobre ellas, se calcularon la mediana y la desviación absoluta mediana (MAD), utilizadas posteriormente para definir los umbrales locales de activación y retorno. La Figura 11 muestra el resultado de la detección para un evento de aceleración representativo.

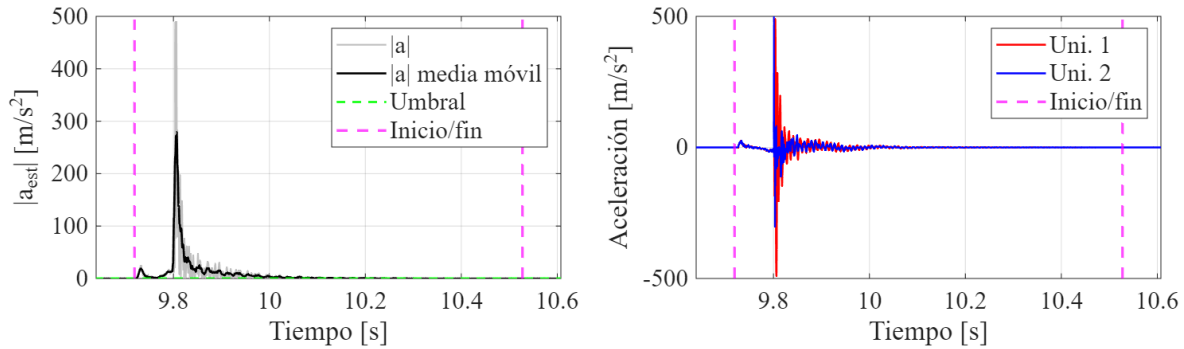


Figura 11. Detección automática de eventos en registros de aceleración.

6.1.2 Determinación del instante pre-impacto

Identificados los pulsos de excitación, se procedió a determinar el instante pre-impacto asociado a cada uno de ellos a partir de los registros de fuerza. Para ello, se obtuvo el máximo valor absoluto en una ventana inicial libre de impactos y, a partir de éste, se definió un umbral de activación como un múltiplo de dicha amplitud. El instante pre-impacto se definió como la última muestra en reposo previa al incremento sostenido de la fuerza asociado al impacto.

Como se observa en la Figura 12, cada componente de fuerza proporciona una estimación individual del instante pre-impacto, denotada como t_{pre} . A partir de estas detecciones se definió un único instante de referencia, denominado $t_{pre,global}$, correspondiente al menor de los valores obtenidos. Este criterio permite identificar el primer indicio del inicio del contacto y fue adoptado como referencia temporal en los análisis posteriores.

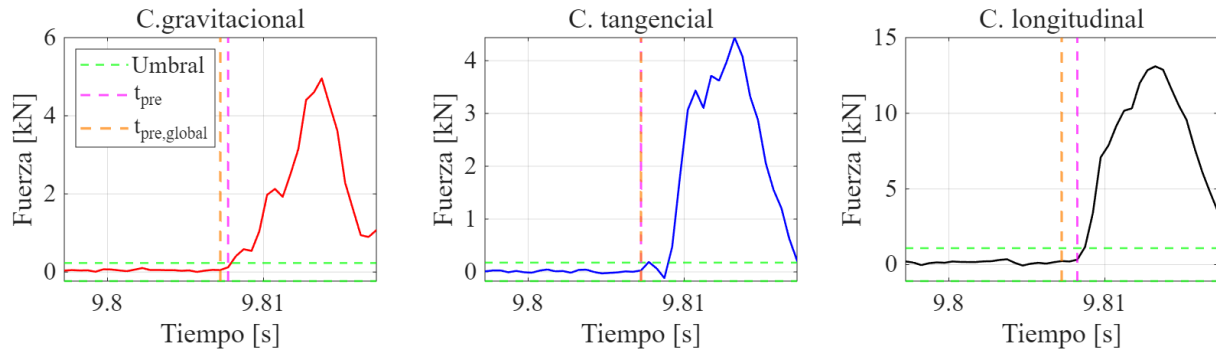


Figura 12. Determinación del instante pre-impacto a partir de registros de fuerza.

En determinados ensayos, las amplitudes de fuerza asociadas al impacto resultaron comparables al nivel de ruido instrumental, impidiendo identificar una transición clara entre el estado de reposo y el inicio del impacto. En estos casos, no fue posible estimar de manera confiable el instante pre-impacto mediante el criterio propuesto, por lo que los registros correspondientes fueron descartados de los análisis posteriores.

6.2 Procesamiento de registros de fuerza

Con el propósito de obtener fuerzas representativas de cada pulso, se adoptó como magnitud de interés la fuerza máxima registrada durante cada impacto. Sin embargo, al analizar el contenido frecuencial de

las señales en un intervalo inicial libre de impactos mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), se observó que en la mayoría de los registros existía un peak espectral cercano a 50 Hz, particularmente en la dirección longitudinal. Si bien esta componente se identificó en la mayoría de los registros, su amplitud relativa fue variable y no constituyó necesariamente la contribución energética dominante en todos los casos. La Figura 13 presenta un ejemplo representativo de los espectros obtenidos.

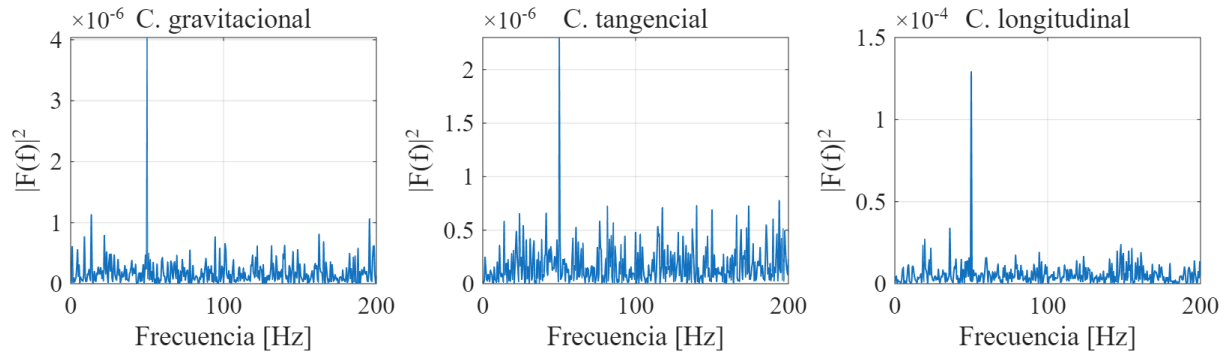


Figura 13. Espectros de potencia de las señales de fuerza.

Dado que esta componente espectral aparece en una ventana temporal libre de impactos, se descartó su asociación con el fenómeno de interacción tablero-estribo, atribuyéndose su origen a posibles interferencias de la red eléctrica o a efectos instrumentales propios de las celdas de carga y del sistema de adquisición de datos. En consecuencia, se evaluó su posible influencia sobre la estimación de las fuerzas máximas de impacto mediante la aplicación de un filtro notch centrado en 50 Hz y la comparación de las fuerzas máximas obtenidas antes y después del filtrado.

La evaluación se realizó sobre la componente longitudinal de la fuerza, dado que se encuentra alineada con la dirección principal de impacto, presentó con mayor recurrencia una componente cercana a 50 Hz y concentró las mayores magnitudes de fuerza registradas durante los ensayos, constituyendo así un escenario conservador para evaluar la incidencia potencial de dicha perturbación. La Figura 14 presenta la comparación entre los espectros originales y filtrados para las tres componentes de fuerza, observándose una atenuación selectiva de la componente de 50 Hz.

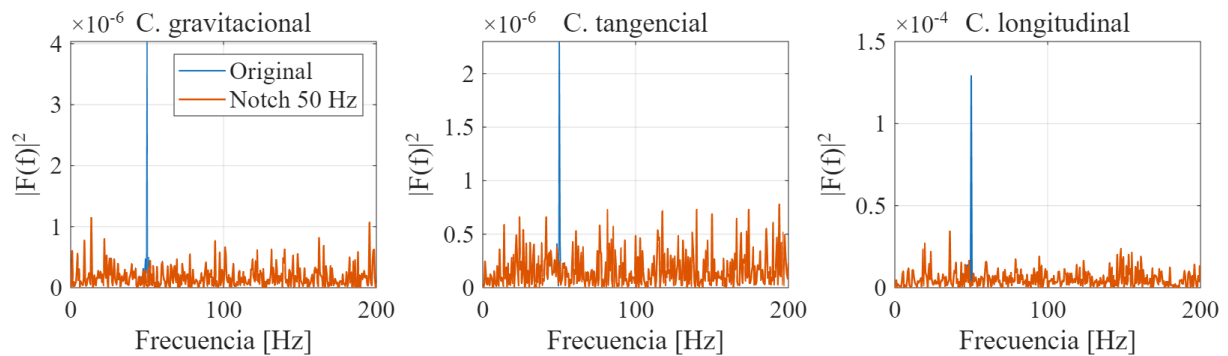


Figura 14. Efecto del filtro notch de 50 Hz sobre los espectros de potencia.

Considerando que la componente cercana a 50 Hz no siempre correspondió al peak espectral dominante, la aplicación del filtro notch tuvo por objetivo evaluar la sensibilidad de las fuerzas máximas ante la eventual presencia de una perturbación asociada a dicha frecuencia. De este modo, el procedimiento permitió cuantificar la variación introducida por la eliminación de esta componente, aun en aquellos registros donde su contribución energética era secundaria.

La Figura 15 presenta las diferencias porcentuales entre las fuerzas máximas obtenidas a partir de las señales originales y filtradas para todos los ensayos analizados. En general, las variaciones fueron inferiores al 1 %, con excepción de un único caso que superó levemente dicho valor. Estos resultados

evidencian que una eventual perturbación cercana a 50 Hz posee una incidencia prácticamente despreciable sobre la estimación de las fuerzas máximas de impacto. En consecuencia, los análisis posteriores se realizaron utilizando los registros originales de fuerza.

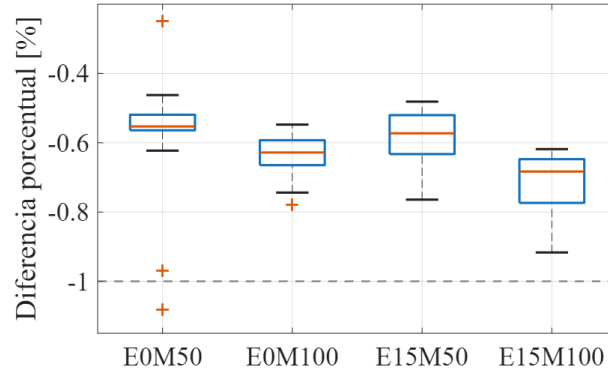


Figura 15. Diferencia porcentual de las fuerzas máximas entre señales originales y filtradas.

6.3 Procesamiento de registros de desplazamiento

Los registros de desplazamiento fueron segmentados en ventanas comprendidas entre el inicio de cada pulso y el instante pre-impacto identificado según el procedimiento descrito en la Sección 7.1.2. Dado que el interés de esta investigación se centra en la velocidad inmediatamente anterior al contacto, el procesamiento se restringió exclusivamente al intervalo pre-impacto, evitando incorporar las discontinuidades introducidas por el fenómeno de impacto.

Sobre dichas ventanas se procesaron los desplazamientos del estribo y del tablero mediante un filtro Savitzky-Golay de orden 3 y ventana de 21 muestras. La selección de estos parámetros se realizó considerando la extensión limitada de los registros disponibles antes del impacto, de manera de disponer de un número suficiente de muestras para el cálculo de la derivada sin exceder el tramo pre-impacto recuperado. Esta combinación permitió atenuar las oscilaciones de alta frecuencia amplificadas por la diferenciación numérica, preservando al mismo tiempo la forma general de las señales de desplazamiento.

Posteriormente, las velocidades del estribo y del tablero fueron estimadas mediante la derivada proporcionada por el filtro Savitzky-Golay aplicado sobre las ventanas de análisis. La velocidad relativa se calculó como la diferencia entre ambas velocidades, evaluada inmediatamente antes del contacto:

$$V_{rel} = V_{tablero} - V_{estribo} \quad (6)$$

La Figura 16 ilustra el procedimiento descrito, comparando las velocidades obtenidas mediante diferenciación directa y aquellas estimadas mediante el filtro Savitzky-Golay en torno al instante de impacto.

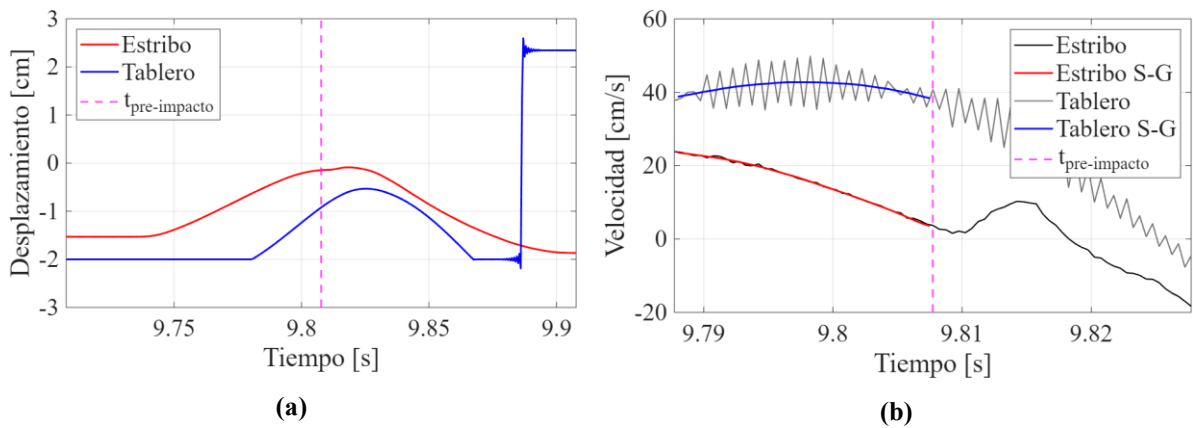


Figura 16. Comparación de velocidades obtenidas a partir de registros de desplazamiento.

6.4 Corrección temporal de los registros

Se identificaron inconsistencias temporales entre las señales de desplazamiento y aceleración. En particular, los distintos sistemas de medición no iniciaban el registro en el mismo instante y utilizaban diferentes periodos de muestreo. Mientras las señales de desplazamiento y fuerza eran registradas con un periodo de $T_s = 0.0005$ s, las aceleraciones fueron adquiridas con un periodo de $T_{s_a} = 0.000488$ s. Al representar todas las mediciones desde $t = 0$ s, según lo indicado por los registros del sistema de adquisición, y sobre un eje temporal común construido con $\Delta t = 0.0005$ s, las señales quedaban desalineadas y presentaban un desfase creciente a medida que avanzaba el registro, tal como se muestra en la Figura 17.a.

Para corregir este problema, se reconstruyeron los vectores temporales de cada tipo de sensor utilizando sus respectivos instantes de inicio y periodos de muestreo. Con ello se obtuvo una representación temporal consistente de todas las mediciones, mejorando significativamente su alineamiento, tal como se muestra en la Figura 17.b. Sin embargo, al comparar posteriormente las velocidades obtenidas mediante derivación de desplazamientos e integración de aceleraciones, se observó la persistencia de un desfase temporal residual.

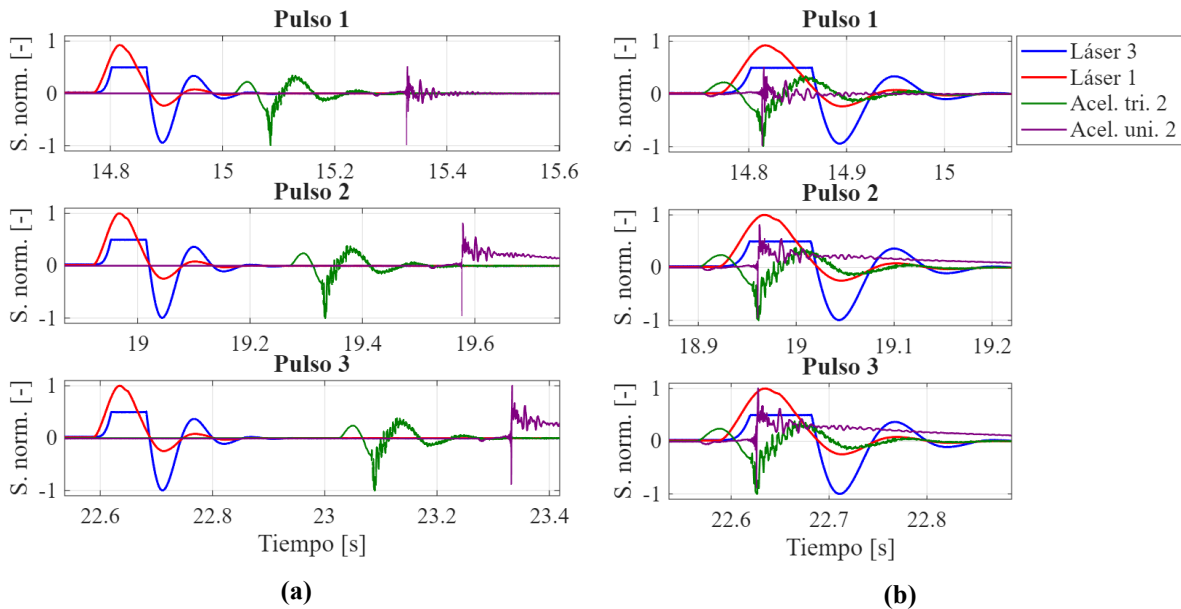


Figura 17. Comparación temporal entre registros de desplazamiento y aceleración.

6.5 Corrección temporal residual mediante correlación

Con el objetivo de cuantificar estas discrepancias, se implementó un procedimiento de alineamiento basado en correlación entre las velocidades obtenidas mediante derivación de desplazamientos e integración de aceleraciones. El corrimiento temporal que maximizó la correlación dentro de la ventana pre-impacto fue adoptado como estimación del desfase residual.

Al repetir este procedimiento para distintos pulsos y ensayos, se observó una tendencia aproximadamente lineal entre el desfase estimado y el tiempo transcurrido desde el inicio del registro. Esto permitió definir relaciones globales de corrección para los acelerómetros uniaxiales y triaxiales, utilizadas posteriormente en el procesamiento de las señales.

Previo al cálculo de la correlación, se aplicaron correcciones sobre las velocidades obtenidas mediante integración de aceleraciones para reducir los efectos de deriva. En primer lugar, se aplicó una corrección por promedio pre-evento para remover el drift lineal asociado al ruido instrumental. La Figura 18 muestra el efecto de esta corrección sobre las velocidades integradas, observándose una reducción importante de la deriva. No obstante, aún persisten tendencias residuales no lineales, las cuales pueden apreciarse tanto en el tramo pre-impacto como en las ventanas post-impacto, siendo más pronunciadas en estas últimas.

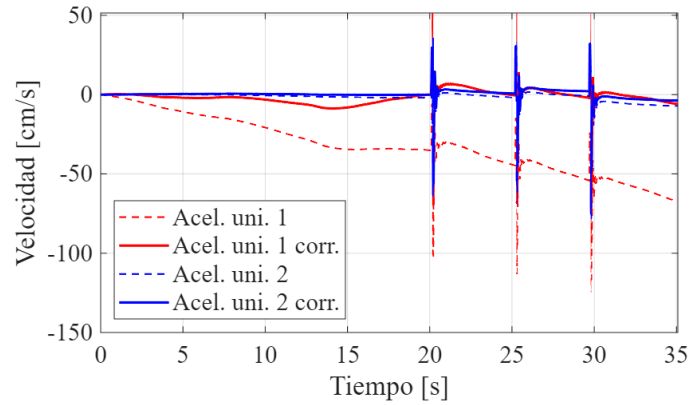


Figura 18. Velocidades integradas antes y después de la corrección por promedio pre-evento.

Luego, las velocidades integradas fueron segmentadas por pulso y centradas asumiendo velocidad nula al inicio de cada evento. Adicionalmente, se ajustó una recta a la velocidad en una ventana de 0.1 s previa al inicio del movimiento. La pendiente obtenida permitió estimar una aceleración residual local, la cual fue sustraída de la señal original antes de realizar una nueva integración, siguiendo un procedimiento inspirado en Iwan et al. (1985). Dado que la corrección se aplicó sobre intervalos temporales reducidos, la hipótesis de una aceleración residual aproximadamente constante se consideró una aproximación razonable.

La Figura 19 presenta las señales utilizadas posteriormente en el cálculo de la correlación para tres pulsos consecutivos. Las velocidades obtenidas mediante integración de aceleraciones corresponden a las señales corregidas descritas anteriormente, mientras que las velocidades derivadas de las mediciones de desplazamiento láser fueron extraídas entre el inicio del pulso y el instante pre-impacto identificado a partir de los registros de fuerza. Para el cálculo de la correlación, las velocidades integradas fueron interpoladas al eje temporal de las velocidades derivadas.

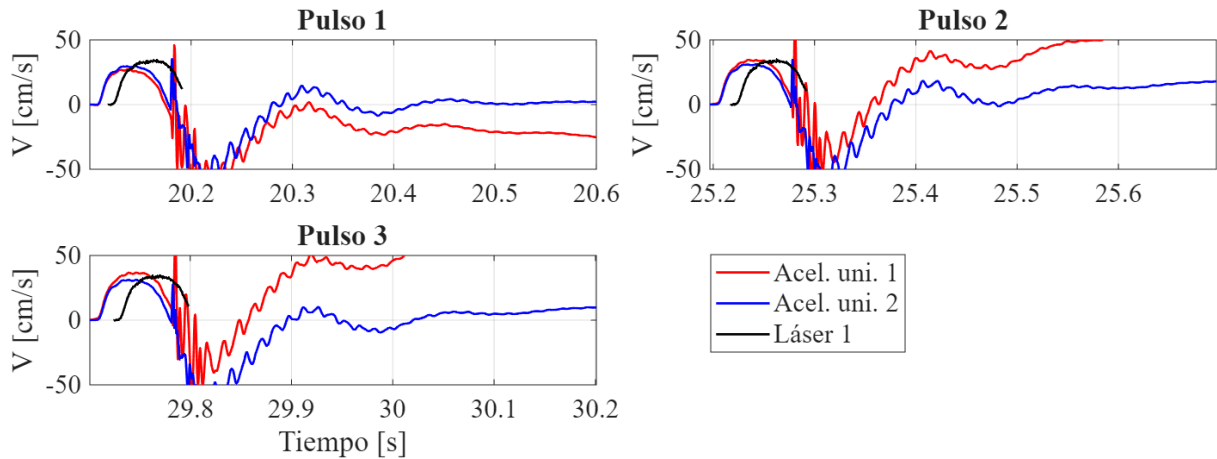


Figura 19. Comparación entre velocidades derivadas e integradas.

La Figura 20 muestra la evolución del coeficiente de correlación en función del corrimiento aplicado, donde dt_{opt} corresponde al desplazamiento temporal que maximiza el coeficiente de correlación entre ambas señales. La búsqueda se realizó utilizando incrementos de 0.0001 s para mayor exactitud. Dado que la curva de correlación presenta una meseta alrededor del máximo, existen múltiples corrimientos que producen niveles de correlación muy similares, por lo que el valor obtenido debe interpretarse como una estimación aproximada del desfase temporal residual y no como una medida exacta.

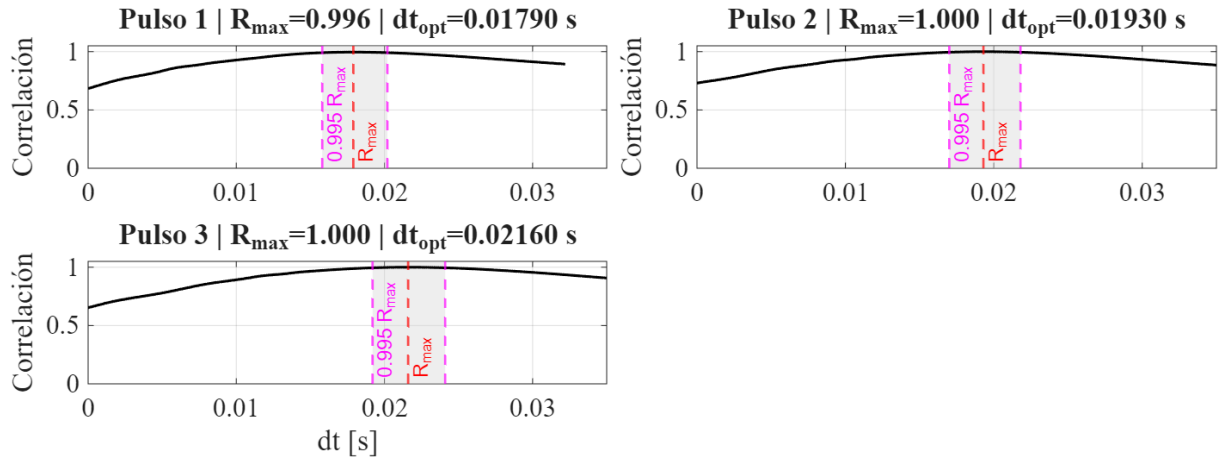


Figura 20. Correlación en función del corrimiento temporal.

El corrimiento asociado al máximo coeficiente de correlación fue adoptado como estimación del desfase residual. La Figura 21 muestra el efecto de aplicar dt_{opt} sobre las señales comparadas. Aunque en algunos casos se observaron diferencias de amplitud, ambas señales conservaron una evolución temporal similar.

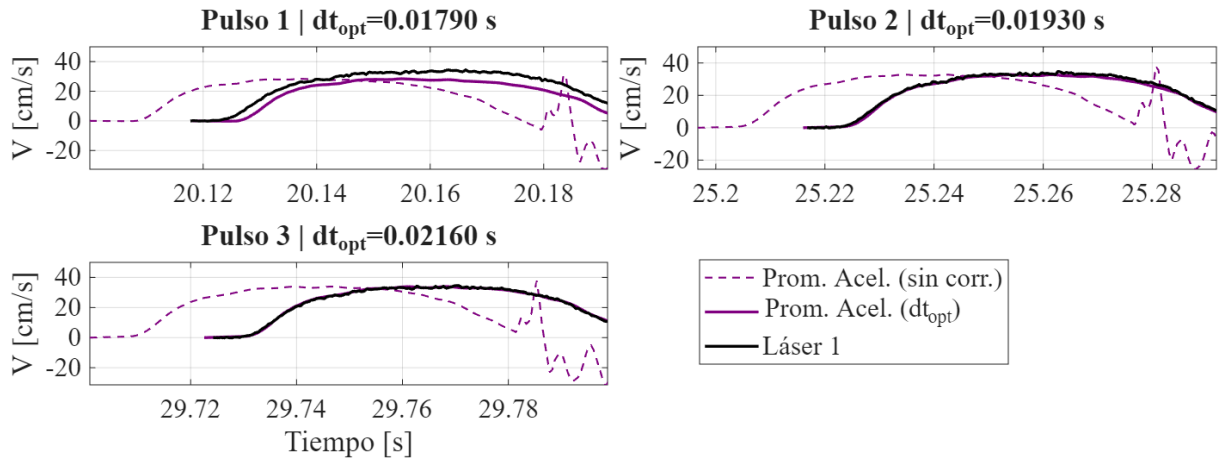


Figura 21. Aplicación del desfase óptimo dt_{opt} .

El procedimiento descrito anteriormente fue aplicado a todos los pulsos que cumplieron con los criterios de detección establecidos en 7.1.2. A partir de ello, se observó una relación aproximadamente lineal entre el desfase temporal corregido, dt_{opt} , y el tiempo transcurrido desde el inicio del registro, indicando que el desfase entre las señales aumenta progresivamente durante el ensayo.

La Figura 22 presenta los ajustes obtenidos para la correlación entre las mediciones del estribo, utilizando las velocidades estimadas a partir del acelerómetro uniaxial y del sensor láser instalado en el estribo.

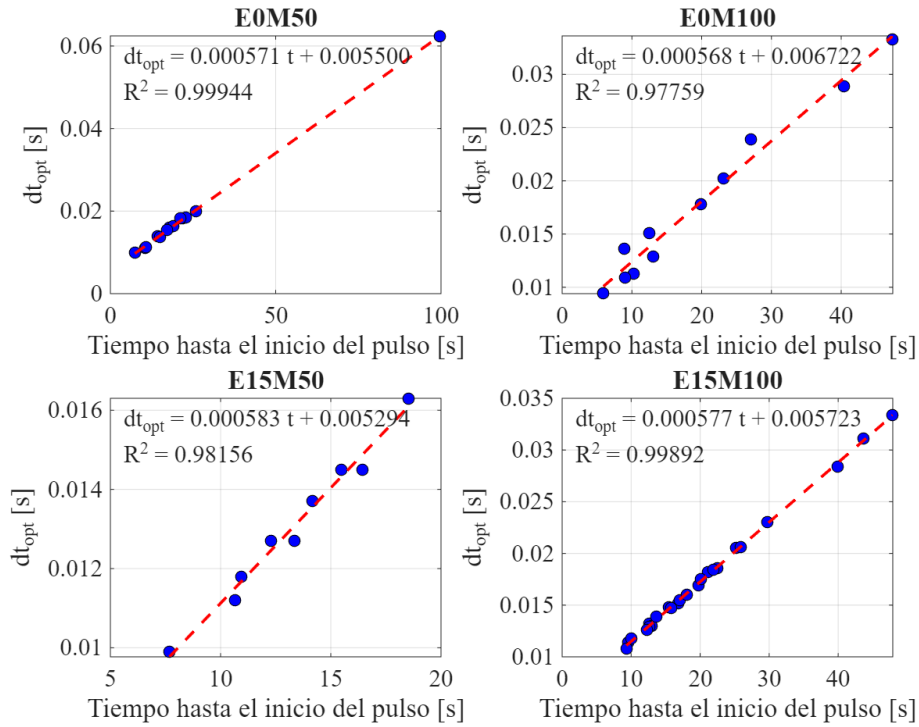


Figura 22. Desfase temporal residual en mediciones del estribo.

Por su parte, la Figura 23 muestra los resultados correspondientes a las mediciones del tablero, obtenidas a partir del acelerómetro triaxial y del sensor láser del tablero. En los registros *E0*, las mediciones de desplazamiento del tablero conservaron el tramo inicial asociado al comienzo del movimiento, lo que permitió realizar la correlación desde el inicio del pulso hasta el ingreso de la señal a la meseta de saturación. En cambio, en los registros *E15* este tramo no se encontraba disponible, ya que las mediciones sólo contenían información en torno al impacto. Por esta razón, no fue posible obtener ajustes temporales equivalentes para dichos casos. Dado que las correcciones obtenidas para los registros *E0* presentaron pendientes e interceptos prácticamente idénticos, se adoptó como aproximación para los ensayos *E15* el promedio de ambas correcciones globales.

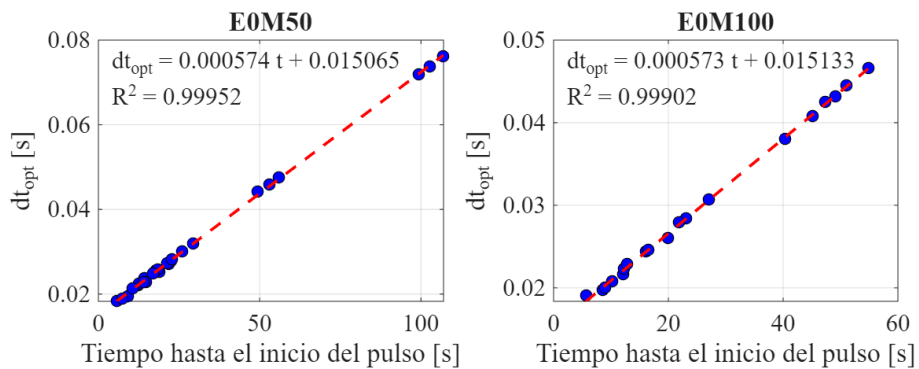


Figura 23. Desfase temporal residual en mediciones del tablero.

6.6 Procesamiento de registros de aceleración

6.7 Procesamiento de registros del ensayo complementario de target tracking

6.7.1 Calibración geométrica de la cámara

Previamente al procesamiento mediante *target tracking*, se realizó una calibración geométrica de la cámara utilizando un patrón tipo *checkerboard*. Para ello, se registraron múltiples videos del patrón desde distintas posiciones y orientaciones dentro del campo visual de la cámara, procurando abarcar diferentes zonas de la superficie de medición y reproducir las condiciones de adquisición empleadas posteriormente en los ensayos de seguimiento.

A partir de cada video se extrajo un único fotograma representativo, sobre el cual se aplicó un procedimiento de detección automática de las esquinas internas del tablero de calibración. Considerando las dimensiones conocidas del patrón, con cuadrados de 22,5 mm de lado, se estimaron los parámetros de calibración de la cámara a partir de la correspondencia entre las coordenadas de las esquinas detectadas en la imagen y sus respectivas posiciones físicas.

Finalmente, los parámetros obtenidos fueron utilizados para corregir la distorsión geométrica presente en las imágenes, generándose versiones rectificadas de los fotogramas que posteriormente fueron empleadas en el procesamiento mediante *target tracking*. La Figura 24 muestra un ejemplo del procedimiento de calibración aplicado sobre una de las imágenes utilizadas, incluyendo la detección automática de las esquinas internas del patrón y el efecto de la corrección geométrica obtenida a partir de los parámetros estimados.

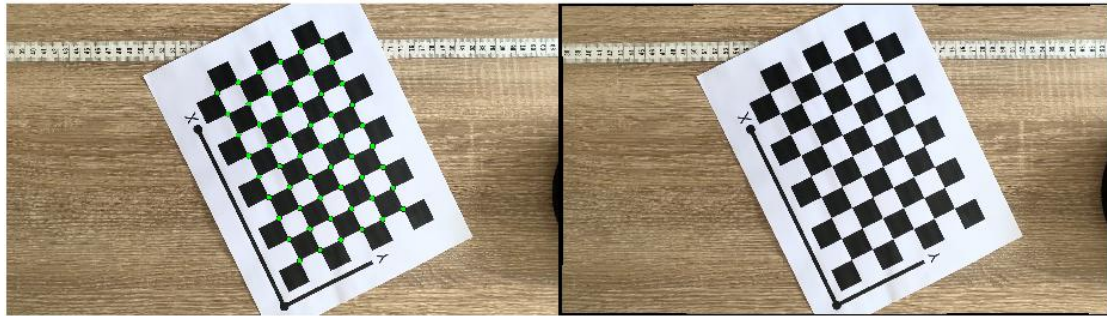


Figura 24. Etapas de proceso de calibración geométrica de la cámara.

6.7.2 Seguimiento del marcador

Una vez estimados los parámetros de calibración y corregidas las imágenes correspondientes, se procedió al seguimiento del marcador circular en los videos del ensayo de *target tracking*. Con el propósito de evaluar posteriormente el efecto de la calibración geométrica sobre las mediciones, el procedimiento fue aplicado tanto sobre los videos originales como sobre sus correspondientes versiones corregidas.

En primer lugar, se seleccionó manualmente una región de interés (*Region of Interest*, ROI) alrededor del marcador en el primer cuadro del video. Esta ventana fue utilizada posteriormente para restringir el análisis a la zona donde se encontraba el objetivo, reduciendo la influencia de elementos ajenos al ensayo y disminuyendo el costo computacional del procesamiento. Posteriormente, cada cuadro de la ROI fue convertido a escala de grises con el fin de incrementar el contraste entre el marcador negro y el fondo blanco y facilitar su identificación automática. Sobre estas imágenes se aplicó un procedimiento de detección circular, obteniéndose en cada cuadro las coordenadas del centro del marcador y su radio en unidades de píxeles. La Figura 25.a muestra un ejemplo de la región de interés empleada durante el seguimiento, mientras que la Figura 25.b presenta la detección del marcador circular y del centro identificado durante el procesamiento.



Figura 25. (a) selección de la región de interés; (b) detección del marcador.

A partir de las coordenadas registradas se construyeron las series temporales de posición horizontal, posición vertical y diámetro aparente del marcador. Finalmente, las magnitudes expresadas en píxeles fueron transformadas a unidades físicas mediante una escala mm/px obtenida a partir de una distancia conocida medida sobre una huincha de referencia presente en el campo visual. En este caso, la escala se determinó seleccionando manualmente dos puntos separados por una distancia de 100 mm.

Las series temporales obtenidas fueron posteriormente empleadas para evaluar la precisión del procedimiento de seguimiento en los ensayos estáticos y dinámicos.

7 Resultados

7.1 Estimación de la velocidad pre-impacto mediante registros experimentales

7.1.1 Efecto de la frecuencia del pulso

La Figura 26 presenta las velocidades pre-impacto obtenidas a partir de registros de desplazamiento del tablero, del estribo y la velocidad relativa en función de la frecuencia del pulso impuesto por la mesa vibradora, considerando distintas amplitudes de excitación.

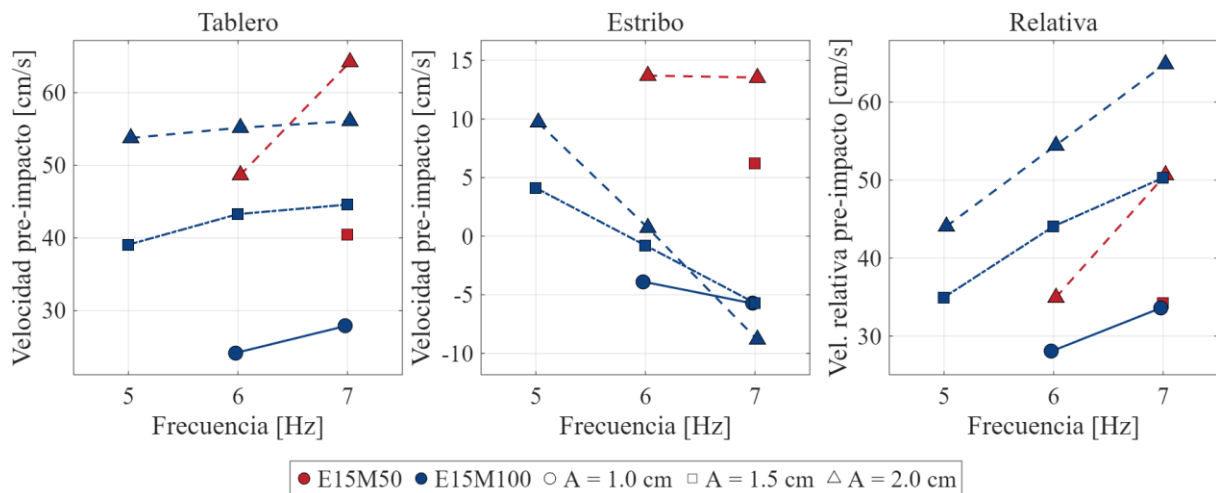


Figura 26. Velocidades pre-impacto en función de la frecuencia del pulso impuesto.

En el tablero, las velocidades pre-impacto se mantuvieron siempre positivas y presentaron magnitudes considerablemente superiores a las registradas en el estribo, indicando que este elemento domina la velocidad relativa previa al contacto. Asimismo, en la mayoría de los casos analizados, la velocidad del tablero tendió a incrementarse al aumentar la frecuencia del pulso impuesto. Sin embargo, las pendientes

observadas fueron moderadas, sugiriendo una respuesta más amortiguada del sistema de apoyo del tablero frente al movimiento impuesto por la mesa vibradora.

Por el contrario, las velocidades del estribo mostraron una tendencia generalmente decreciente con la frecuencia, alcanzando incluso valores negativos en algunos casos. Este comportamiento sugiere que, a mayores frecuencias, el estribo alcanza antes la fase de retorno del movimiento impuesto y registra velocidades en sentido opuesto al tablero en el instante previo al impacto.

Como consecuencia de lo anterior, la velocidad relativa presentó una tendencia global creciente con la frecuencia del pulso impuesto. Mientras el tablero mantiene velocidades positivas hacia el impacto, el estribo disminuye su velocidad e incluso se desplaza en sentido contrario, incrementando la velocidad de aproximación entre ambos elementos y sugiriendo la posibilidad de impactos potencialmente más severos.

La Figura 27 presenta las velocidades pre-impacto obtenidas mediante la integración de registros de aceleración en función de la frecuencia del pulso impuesto para las distintas configuraciones experimentales analizadas.

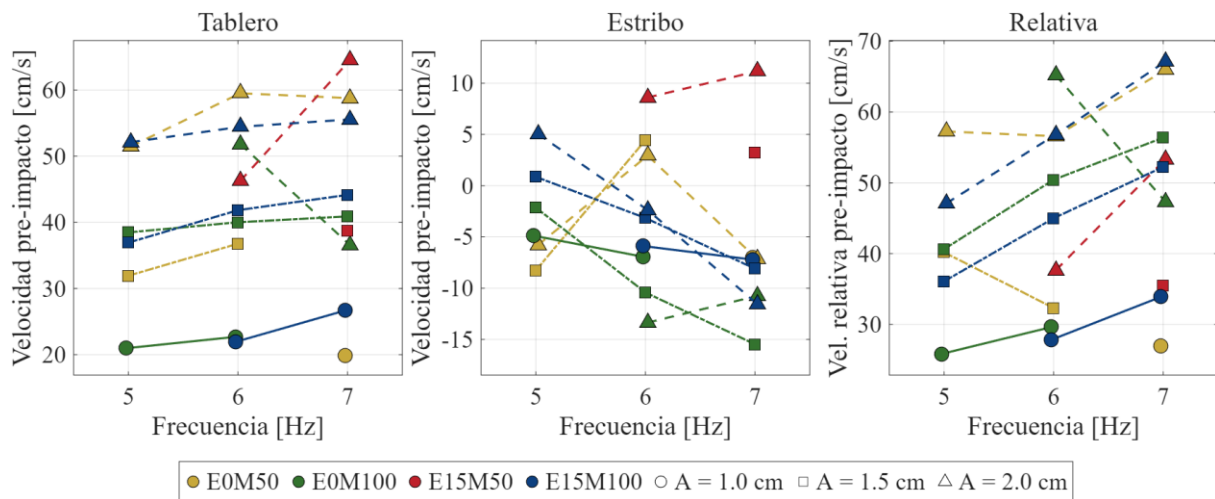


Figura 27. Velocidades pre-impacto en función de la frecuencia del pulso impuesto.

En términos generales, las velocidades obtenidas mediante aceleraciones reprodujeron las tendencias observadas previamente a partir de los registros de desplazamiento. Las velocidades del tablero se mantuvieron predominantemente positivas y tendieron a incrementarse con la frecuencia del pulso impuesto, mientras que las velocidades del estribo presentaron una mayor dispersión y, en diversos casos, alcanzaron valores negativos.

Como consecuencia de lo anterior, la velocidad relativa exhibió una tendencia global creciente con la frecuencia de excitación, registrándose las mayores magnitudes para las configuraciones de mayor frecuencia y apreciándose con mayor claridad la separación entre los distintos casos de ensayo debido a la mayor cantidad de registros válidos disponibles.

7.1.2 Efecto de la amplitud del pulso

La Figura 28 presenta las velocidades pre-impacto obtenidas a partir de registros de desplazamiento del tablero, del estribo y la velocidad relativa en función de la amplitud del pulso impuesto por la mesa vibradora, considerando distintas frecuencias de excitación.

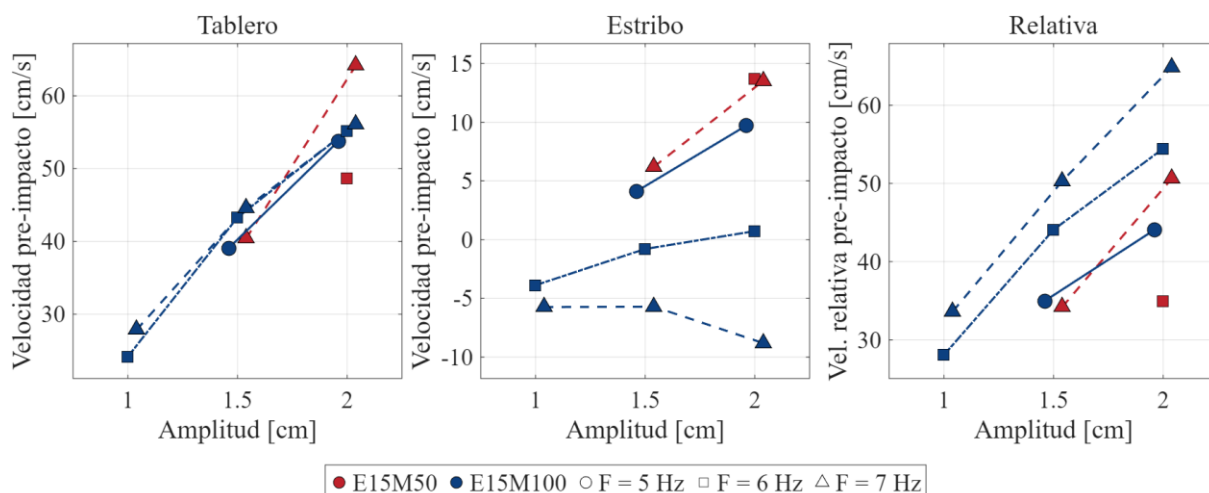


Figura 28. Variación de las velocidades promedio pre-impacto con la amplitud de excitación.

A diferencia de lo observado en el análisis anterior, las velocidades pre-impacto del tablero mostraron una dependencia más marcada con la amplitud que con la frecuencia del pulso. En la configuración E15M100, las curvas correspondientes a las distintas frecuencias presentaron pendientes prácticamente idénticas e incluso llegaron a superponerse en algunos tramos, evidenciando que la amplitud constituye el parámetro predominante en el desarrollo de la velocidad pre-impacto del tablero.

Por el contrario, las velocidades del estribo no presentaron una tendencia bien definida. Los resultados sugieren que su respuesta depende simultáneamente de la amplitud y la frecuencia de excitación, sin evidenciar una relación monotónica general.

Como consecuencia de lo anterior, la velocidad relativa presentó una tendencia creciente y aproximadamente lineal al aumentar la amplitud del pulso impuesto para todas las frecuencias analizadas. Asimismo, se observó una separación sistemática entre las curvas correspondientes a cada frecuencia, registrándose las mayores velocidades relativas para 7 Hz y las menores para 5 Hz. En conjunto, estos resultados indican que, aunque la frecuencia modifica el nivel de las velocidades alcanzadas, la amplitud constituye el parámetro predominante en el desarrollo de la velocidad de aproximación entre tablero y estribo y, por consiguiente, favorece el desarrollo de impactos potencialmente más severos.

Con el propósito de corroborar las tendencias observadas previamente, la Figura 29 presenta las velocidades pre-impacto obtenidas mediante la integración de registros de aceleración en función de la amplitud del pulso impuesto.

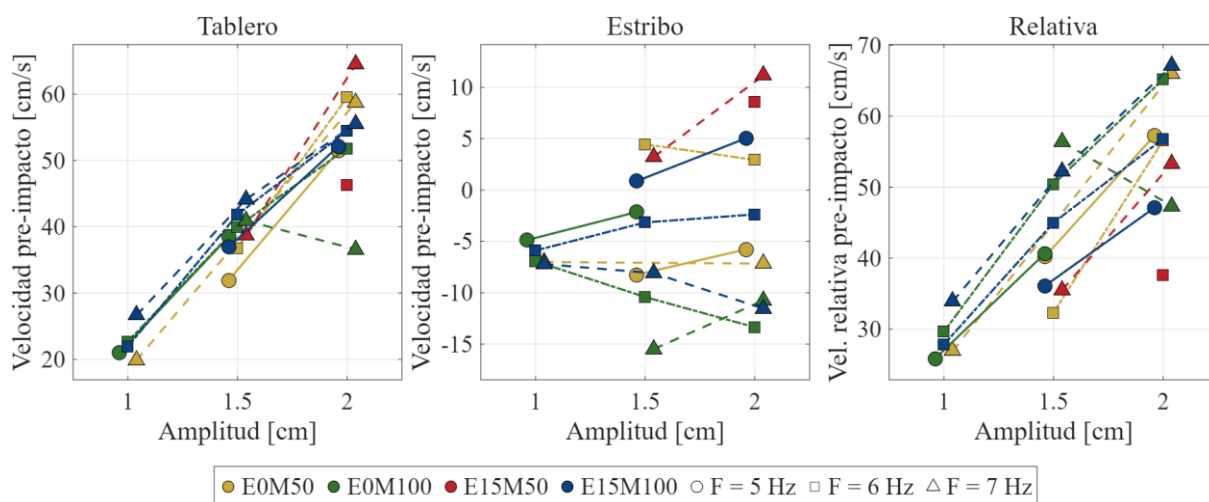


Figura 29. Variación de las velocidades promedio pre-impacto con la amplitud de excitación.

Las velocidades del tablero continúan agrupándose principalmente en función de la amplitud del pulso impuesto y presentan pendientes muy similares entre las distintas configuraciones experimentales. Esto sugiere que el incremento de la velocidad pre-impacto con la amplitud ocurre de manera aproximadamente uniforme, sin evidenciar una dependencia sistemática respecto del esviaje ni de la masa adicional considerada.

Asimismo, las velocidades relativas mantienen una separación sistemática entre las distintas frecuencias de excitación, registrándose las mayores magnitudes para 7 Hz, valores intermedios para 6 Hz y las menores velocidades para 5 Hz. La mayor cantidad de registros disponibles permite distinguir de manera más definida esta diferenciación entre frecuencias y apreciar con mayor nitidez el efecto simultáneo de la amplitud y la frecuencia sobre la velocidad de aproximación entre tablero y estribo.

En conjunto, las velocidades obtenidas mediante aceleraciones reprodujeron las mismas tendencias globales identificadas a partir de los registros de desplazamiento, otorgando mayor confianza a la estimación de la velocidad relativa pre-impacto y a la interpretación de la influencia de la amplitud y la frecuencia de excitación.

7.2 Consistencia y relevancia de la velocidad pre-impacto

7.2.1 Comparación de velocidades obtenidas mediante desplazamientos y aceleraciones

7.2.2 Relación entre velocidad pre-impacto y fuerzas de impacto

La Figura 30 presenta la relación entre la velocidad relativa previa al impacto y las fuerzas máximas registradas durante el contacto, considerando las componentes gravitacional (F_{grav}), tangencial (F_{tang}) y longitudinal (F_{long}). Para cada ensayo se representan las velocidades relativas obtenidas mediante registros de desplazamiento y aceleración, indicándose mediante tonos claros y oscuros las estimaciones obtenidas a partir de ambas metodologías, respectivamente.

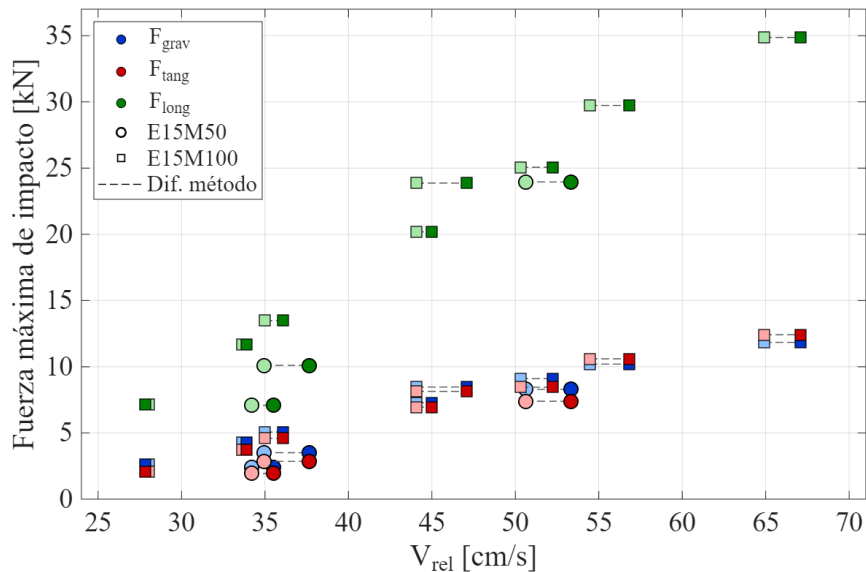


Figura 30. Relación entre la velocidad relativa pre-impacto y las componentes máximas de la fuerza de impacto.

En términos generales, las tres componentes de fuerza presentan una tendencia creciente con la velocidad relativa pre-impacto, observándose una relación aproximadamente lineal en todo el rango de velocidades analizado. Este comportamiento sugiere que mayores velocidades de aproximación entre tablero y estribo dan origen a interacciones progresivamente más severas, evidenciando que la velocidad relativa previa al impacto constituye un parámetro adecuado para caracterizar la intensidad del contacto entre ambos elementos.

Asimismo, se observa que la componente longitudinal presenta magnitudes considerablemente superiores a las componentes gravitacional y tangencial para todos los niveles de velocidad analizados, alcanzando valores cercanos a 35 kN para las mayores velocidades registradas. Por el contrario, las componentes gravitacional y tangencial se mantienen por debajo de aproximadamente 13 kN y exhiben pendientes menores, aunque conservan igualmente una tendencia creciente con la velocidad relativa. Lo anterior indica que el impacto se desarrolla predominantemente en la dirección longitudinal del sistema, sin perjuicio de que mayores velocidades de aproximación incrementan simultáneamente las fuerzas máximas en las tres direcciones de medición.

Por otra parte, las velocidades relativas obtenidas mediante desplazamientos y aceleraciones producen únicamente pequeños desplazamientos horizontales entre los puntos correspondientes a un mismo ensayo, manteniéndose las tendencias generales observadas entre fuerza y velocidad. En consecuencia, la relación creciente entre las fuerzas máximas de impacto y la velocidad relativa previa al contacto resulta prácticamente independiente del procedimiento empleado para su estimación.

7.2.3 Efecto de la rotación

7.3 Validación experimental de la metodología de target tracking

7.3.1 Calidad de la calibración geométrica

La Figura 31.a muestra la distribución espacial de las distintas posiciones consideradas durante la calibración. Se observa que la geometría reconstruida reproduce adecuadamente la configuración experimental, apreciándose una distancia aproximada de 41 cm entre la cámara y la superficie de medición, consistente con la disposición utilizada durante los ensayos.

Por su parte, la Figura 31.b muestra los errores medios de reproyección obtenidos para cada imagen utilizada en la calibración. El error medio global fue de 0.47 píxeles, valor inferior a un píxel y consistente con una calibración satisfactoria para la estimación de desplazamientos a partir del seguimiento de marcadores.

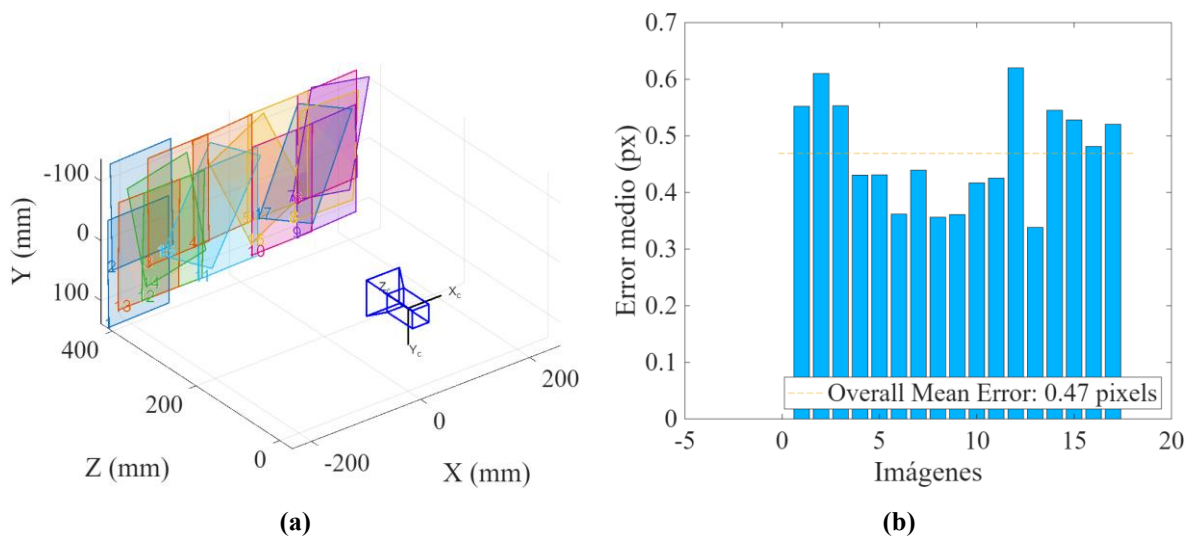


Figura 31. (a) Visualización de parámetros extrínsecos; (b) Error de reproyección medio por imagen.

7.3.2 Evaluación mediante ensayos estáticos

La Tabla 3 resume los resultados obtenidos en los ensayos estáticos realizados en distintas zonas del campo visual de la cámara. Para cada caso se determinaron las desviaciones estándar de las coordenadas del centro del marcador y el error asociado a la estimación de su diámetro, considerando tanto las imágenes originales como las imágenes corregidas geoméricamente.

Tabla 3. Ensayos disponibles

Zona	Caso	Nº ensayos	σ_x [mm]	σ_y [mm]	Error diámetro %
Centro	Sin calibración	1	-	-	-
	Con calibración	1	-	-	-
Lateral	Sin calibración	2	0.046	0.056	1.50
	Con calibración	2	0.046	0.052	1.25
Vertical	Sin calibración	2	0.058	0.057	2.46
	Con calibración	2	0.048	0.058	2.31
Esquina	Sin calibración	4	0.062	0.060	2.54
	Con calibración	4	0.054	0.055	2.24

Las desviaciones estándar obtenidas para las coordenadas del centro del marcador se mantuvieron del orden de centésimas de milímetro en todos los casos analizados. Asimismo, las diferencias observadas entre imágenes calibradas y no calibradas resultaron reducidas, sugiriendo que la corrección geométrica tiene una influencia limitada sobre la estabilidad de la detección del centro del marcador. Estas bajas magnitudes indican que el procedimiento presenta niveles de incertidumbre inferiores a 0,1 mm bajo las condiciones experimentales evaluadas, evidenciando una elevada precisión en la determinación de la posición del marcador.

Por otra parte, el error asociado al diámetro detectado tendió a aumentar al desplazar el marcador hacia regiones más alejadas del centro del campo visual, alcanzándose las mayores magnitudes en las esquinas, con valores cercanos al 2,5 % en las imágenes originales. Este comportamiento es consistente con una mayor influencia de las distorsiones geométricas hacia las zonas periféricas de la imagen.

En conjunto, los resultados sugieren que la principal contribución de la calibración geométrica radica en mejorar la consistencia geométrica de las mediciones realizadas en distintas zonas del campo visual, más que en reducir la dispersión asociada a la detección del centro del marcador. En consecuencia, las reducciones observadas en el error de diámetro indican que el sistema de medición presenta errores geométricos acotados y bajos niveles de incertidumbre bajo las condiciones experimentales evaluadas.

7.3.3 Ensayo dinámico

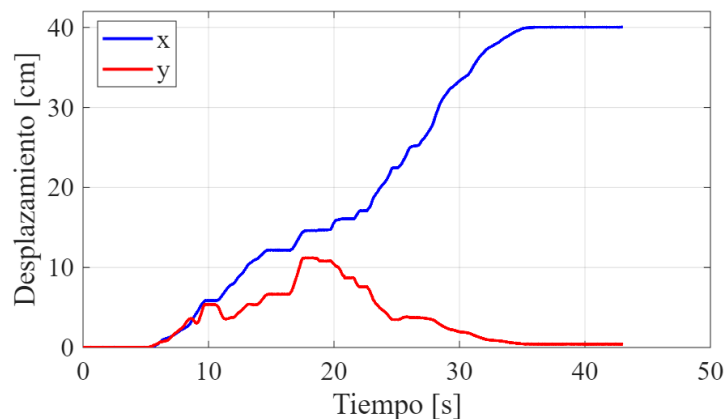


Figura 32. Ensayo dinámico

8 Conclusiones

- Las velocidades obtenidas mediante desplazamientos y aceleraciones presentaron tendencias similares frente a las variaciones de frecuencia y amplitud, permitiendo una caracterización consistente de la velocidad relativa pre-impacto.
- La velocidad relativa pre-impacto aumentó sistemáticamente al incrementar la amplitud y la frecuencia de excitación, alcanzándose las mayores magnitudes para las combinaciones de mayor amplitud y frecuencia.
- La respuesta del tablero mostró una dependencia más definida con los parámetros de excitación, mientras que la respuesta del estribo presentó una mayor dispersión y dependió simultáneamente de la amplitud y la frecuencia del pulso impuesto.
- Las fuerzas máximas de impacto presentaron una relación creciente y aproximadamente lineal con la velocidad relativa pre-impacto, independiente del procedimiento empleado para su estimación, evidenciando que la velocidad relativa constituye un parámetro adecuado para caracterizar la severidad del impacto entre tablero y estribo.
- Bajo las condiciones experimentales evaluadas, la metodología de target tracking presentó errores geométricos acotados e incertidumbres reducidas, observándose únicamente diferencias menores entre las mediciones obtenidas con y sin calibración geométrica.

9 Recomendaciones

- Incorporar sistemas de medición de desplazamiento con un rango operativo mayor para evitar la saturación observada en las mediciones láser del tablero.
- Realizar ensayos con una mayor cantidad de registros válidos y ampliar el rango de amplitudes y frecuencias de excitación, con el fin de fortalecer las tendencias identificadas en la velocidad relativa pre-impacto.
- Implementar el sistema de visión computacional en ensayos dinámicos del modelo estructural, evaluando su desempeño para la estimación directa de desplazamientos y velocidades relativas durante el impacto.

10 Referencias

- Eyzaguirre, K. (2026). *ESTIMACIÓN DE LA FUERZA DE FRICCIÓN EN EL IMPACTO ESTRIBO-TABLERO DE PUENTES. ENFOQUE EXPERIMENTAL*.
- Boore, D. M. (2001). Effect of Baseline Corrections on Displacements and Response Spectra for Several Recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, Earthquake. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 91).
- Brownjohn, J. M. W., Xu, Y., & Hester, D. (2017). Vision-based bridge deformation monitoring. *Frontiers in Built Environment*, 3. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2017.00023>
- Buckle, I., Hube, M., Chen, G., Yen, W. H., & Arias, J. (2012). Structural performance of bridges in the offshore maule earthquake of 27 February 2010. *Earthquake Spectra*, 28(SUPPL.1). <https://doi.org/10.1193/1.4000031>
- Gioiella, L., Micozzi, F., McBain, M., Morici, M., Zona, A., Dall'Asta, A., Simpson, B., & Barbosa, A. (2025). *Multi-Target Computer-Vision Monitoring of Multi-Story Buildings During Shake Table Tests*.
- Iwan, W. D., Moser, M. A., & Peng, C.-Y. (1985). SOME OBSERVATIONS ON STRONG-MOTION EARTHQUAKE MEASUREMENT USING A DIGITAL ACCELEROGRAPH. In *Bulletin of the Seismological Society of America* (Vol. 75, Number 5).
- Jankowski, R. (2005). Non-linear viscoelastic modelling of earthquake-induced structural pounding. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 34(6), 595–611. <https://doi.org/10.1002/eqe.434>
- Muthukumar, S., & DesRoches, R. (2006). A Hertz contact model with non-linear damping for pounding simulation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 35(7), 811–828. <https://doi.org/10.1002/eqe.557>
- Naderpour, H., Barros, R. C., Khatami, S. M., & Jankowski, R. (2016). Numerical Study on Pounding between Two Adjacent Buildings under Earthquake Excitation. *Shock and Vibration*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1504783>
- Oppenheim, A. V. ., & Schafer, R. W. . (2010). *Discrete-time signal processing*. Pearson.
- Savitzky, A., & E, M. J. (1951). Smoothing and Differentiation of Data by Simplified Least Squares Procedures. In *Z. Physiol. Chem* (Vol. 40, Number 2).
- Zhang, Z. (2008). *A Flexible New Technique for Camera Calibration; a typo in Appendix B) (last updated on Aug A Flexible New Technique for Camera Calibration* (Vol. 13). <http://research.microsoft.com/~zhang><http://research.microsoft.com/~zhang>