



Universidad Autónoma del Estado de México
Facultad de Ingeniería

**ANÁLISIS DE MÉTODOS PARA ESTIMAR
DESPLAZAMIENTOS A PARTIR DE ACELERACIONES
MEDIDAS, EN ESTRUCTURAS SOMETIDAS A
DIFERENTES TIPOS DE EXCITACIÓN**

TESIS

Que para obtener el grado de:

Maestro en ciencias de la ingeniería
(acentuación estructuras)

Presenta:

Ing. Damaris Sarahí Arias Lara

Director de tesis:

Dr. Jaime De la Colina Martínez

Toluca, Estado de México

Agosto 2016

<<Esta tesis corresponde a los estudios realizados con una beca de excelencia otorgada por el Gobierno de México, a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores. >>

DEDICATORIA

*Con cariño a mi padre José Angel Arias y
a la memoria de mi madre María Yolanda Lara*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi gratitud hacia mi asesor, el Dr. Jaime De la Colina Martínez, por su invaluable apoyo y acertada guía que me brindó durante el desarrollo de esta investigación y mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma del Estado de México por el apoyo brindado durante esta investigación. Especialmente al cuerpo académico de estructuras de la maestría en ciencias de la ingeniería por las enseñanzas compartidas.

Agradezco al pueblo mexicano quien a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE), me brindó el apoyo económico que hizo posible la realización de este trabajo y la culminación de mis estudios de maestría.

A mi familia por su amor, soporte y comprensión que me dio la fuerzas para culminar esta investigación, y a Zeus Domínguez, por su cariño y apoyo en los momentos más difíciles de esta etapa.

Finalmente, deseo agradecer a todas las personas que contribuyeron al desarrollo de este trabajo con importantes sugerencias, comentarios y con su colaboración en el desarrollo de las pruebas de campo.

RESUMEN

Este trabajo presenta un análisis comparativo de algunos métodos para estimar desplazamientos a partir de aceleraciones medidas, con el objetivo de valorar su bondad para estimar desplazamientos debidos a vibraciones ocasionados por diferentes tipos de excitación (armónica, vehicular, peatonal y sísmica). La importancia de este estudio radica en la falta de consenso entre investigadores respecto a la validez/precisión de los desplazamientos calculados a partir de aceleraciones.

Para este trabajo se midieron desplazamientos y aceleraciones en el mismo punto y dirección. Dichas mediciones se realizaron utilizando transformadores diferenciales de variación lineal (LVDT) y acelerómetros de balance de fuerza (FBA). Los registros medidos fueron comparados con los estimados utilizando tres parámetros: el coeficiente de correlación cruzada, la amplitud del desplazamiento máximo y la raíz cuadrada del error cuadrático medio.

Los resultados muestran que excepto para los casos con mucho ruido y pequeños desplazamientos, es posible estimar desplazamientos con un alto coeficiente de correlación cruzada y con errores pequeños, con respecto a los desplazamientos medidos.

Los resultados obtenidos indican que la selección del método para calcular los desplazamientos depende de la amplitud de los desplazamientos, de la información de la señal que se requiere (el valor máximo o toda la historia de los desplazamientos), y de la magnitud del desplazamiento final esperado.

Los resultados corroboran la hipótesis planteada al inicio de este estudio: es posible estimar desplazamientos a partir de aceleraciones medidas con un coeficiente de correlación cruzada mayor a 0.85 respecto a los medidos para los tipos de señales estudiadas.

ABSTRACT

This study presents a comparative analysis of several methods to estimate displacements from measured acceleration records, with the objective of assessing their performance to compute displacements in vibrations caused by different types of excitation (harmonic, vehicular, pedestrian, or seismic). The relevance of the study is founded on the lack of agreement among researchers in relation to the validity/precision of displacements obtained from acceleration records.

For this study, displacements and accelerations were recorded at the same points using linear variable differential transformers (LVDTs) and force-balance accelerometers (FBAs). The measured displacement records were compared with the computed ones using three parameters: the cross correlation coefficient, the peak displacement and the root mean square error.

Results show that except for cases with both much noise and small displacements, it is possible to compute displacements with high cross correlation coefficients and small errors, with respect to measured displacements.

Results indicate that the selection of a method to estimate displacements depends on displacement amplitudes, the type of information required (either the peak displacement or the whole displacement signal), and the magnitude of the displacements at the end of the record.

The results corroborated the hypothesis stated at the beginning of this study: it is possible to estimate displacements from measured accelerations with a cross correlation coefficient larger than 0.85, with respect to measured ones for the studied signals.

PRESENTACIÓN

El conocimiento de los desplazamientos en estructuras civiles es importante debido a su utilidad en la identificación de las propiedades dinámicas y el monitoreo del daño estructural.

Para la estimación de los desplazamientos, normalmente se utilizan acelerómetros debido a que no requieren de estructuras de soporte adicionales para su instalación, lo que los hace factibles para ser usados en la mayoría de las estructuras civiles. Las aceleraciones registradas por estos instrumentos son posteriormente convertidas a desplazamientos a través de métodos de integración. Sin embargo, debido a los errores o ruido contenido en los registros de aceleración, los desplazamientos estimados en muchos casos resultan irreales.

Por ello, varios autores han propuesto métodos para el procesamiento de las señales de aceleración y la estimación de los desplazamientos, con la intención de reducir los errores presentes en los registros de desplazamiento obtenidos. Sin embargo, no hay suficiente evidencia de que los desplazamientos estimados a partir de aceleraciones medidas puedan ser confiables para usos estructurales.

En este trabajo se realiza un análisis comparativo de los métodos para estimar desplazamientos a partir de aceleraciones medidas, con el objetivo de valorar su bondad para calcular desplazamientos en estructuras sometidas a diferentes tipos de excitación (vehicular, peatonal, cuasi- armónica y sísmica).

Los desplazamientos estimados se comparan con los medidos usando extensómetros tipo LVDT o GPS para el caso de los registros sísmicos. Para la comparación entre ambos registros se utiliza, entre otros parámetros, el coeficiente de correlación cruzada.

Los resultados obtenidos en esta investigación contribuirán a realizar una mejor selección del método que lleve a las mejores estimaciones de desplazamientos para cierto tipo de excitación.

Este documento se organiza de la siguiente manera: En el capítulo 1 se presenta el protocolo de tesis en donde se describe el problema de estudio, los objetivos, la hipótesis de la investigación y los principales aportes que se han realizado para la solución del problema.

En el capítulo 2 se presenta el artículo de investigación a enviar. En él se detalla la metodología propuesta en esta investigación, los resultados y las conclusiones obtenidas.

En el apéndice A, se presentan algunos conceptos básicos para el procesamiento de las señales, para un mejor entendimiento de los procedimientos y conceptos utilizados en este trabajo.

Finalmente, en los apéndices B-H se presentan los algoritmos para estimación de desplazamientos a partir de aceleraciones medidas empleados en esta investigación. En él se describen los pasos requeridos para su implementación, se presenta el archivo script de Matlab en donde se puede observar el esquema de procesamiento seguido y las instrucciones para su implementación. Finalmente, se muestran algunos resultados de los desplazamientos obtenidos y su comparación con los desplazamientos reales.

CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	VI
RESUMEN	VIII
ABSTRACT.....	IX
PRESENTACIÓN.....	X
CONTENIDO	XII
CAPÍTULO 1. PROTOCOLO DE TESIS.....	1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	1
1.1.1 <i>Resumen</i>	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	2
1.4. OBJETIVOS	2
1.5. HIPÓTESIS	2
1.6. ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE.....	2
1.7. METODOLOGÍA PROPUESTA	5
CAPÍTULO 2. ARTÍCULO ENVIADO	7
APÉNDICE A. ASPECTOS BÁSICOS DEL PROCESAMIENTO DE SEÑALES.....	27
A.1. CONCEPTOS BÁSICOS.....	27
A.1.1. <i>Señales</i>	27
A.1.2. <i>Error de línea base</i>	28
A.1.3. <i>Filtros</i>	28
A.2. RUIDO EN LAS SEÑALES	32
A.2.1. <i>Generalidades del ruido</i>	32
A.2.2. <i>Tratamiento del ruido</i>	33
A.3. TÉCNICAS PARA EL PROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS	35
A.3.1. <i>Ajuste de línea base en los registros</i>	35
A.3.2. <i>Adición de ceros (pads) en la señal</i>	38
A.3.3. <i>Filtrado pasa baja</i>	40
A.3.4. <i>Integración numérica</i>	40
A.3.5. <i>Interpolación de los datos</i>	41
APÉNDICE B. MÉTODO DE TRIFUNAC Y LEE	43
B.1. DESCRIPCIÓN	43
B.2. ALGORITMO	43
B.3. ARCHIVO SCRIPT DE MATLAB®	45
B.4. EJEMPLOS DE APLICACIÓN	50
B.4.1. <i>Pruebas con vibración armónica</i>	50
B.4.2. <i>Pruebas en puente vehicular</i>	52
B.4.3. <i>Pruebas en puente peatonal</i>	53

B.4.4. Pruebas en mesa vibradoras.....	55
B.4.5. Sismo Tohoku, Japón.....	56
APÉNDICE C. MÉTODO DE CHIU.....	58
C.1. ALGORITMO.....	58
C.2. ARCHIVO SCRIPT DE MATLAB®.....	59
C.3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	66
C.3.1. Pruebas con vibración armónica.....	66
C.3.2. Pruebas en puente vehicular.....	67
C.3.3. Pruebas en puente peatonal.....	68
C.3.4. Pruebas en mesa vibradora.....	69
C.3.5. Sismo Tohoku, Japón.....	70
APÉNDICE D. MÉTODO DE CONVERSE Y BRADY.....	71
D.1. ALGORITMO.....	71
D.2. ARCHIVO SCRIPT DE MATLAB®.....	72
D.3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	78
D.3.1. Pruebas con vibración armónica.....	78
D.3.2. Pruebas en puente vehicular.....	79
D.3.3. Pruebas en puente peatonal.....	80
D.3.4. Pruebas en mesa vibradora.....	81
D.3.5. Sismo Tohoku, Japón.....	82
APÉNDICE E. MÉTODO DE BOORE <i>et al.</i>	83
E.1. ALGORITMO.....	83
E.2. ARCHIVO SCRIPT DE MATLAB®.....	84
E.3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	91
E.3.1. Pruebas de vibración armónica.....	91
E.3.2. Pruebas en puente vehicular.....	92
E.3.3. Pruebas en puente peatonal.....	93
E.3.4. Pruebas en mesa vibradora.....	94
E.3.5. Sismo Tohoku, Japón.....	95
APÉNDICE F. MÉTODO DE WANG <i>et al.</i>	96
F.1. ALGORITMO.....	96
F.2. ARCHIVO SCRIPT DE MATLAB®.....	98
F.3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	105
F.3.1. Pruebas de vibración armónica.....	105
F.3.2. Pruebas en puente vehicular.....	106
F.3.3. Pruebas en puente peatonal.....	107
F.3.4. Pruebas en mesa vibradora.....	108
F.3.5. Sismo Tohoku, Japón.....	109
APÉNDICE G. MÉTODO DE DARRAGH <i>et al.</i>	110
G.1. ALGORITMO.....	110
G.2. ARCHIVO SCRIPT DE MATLAB®.....	110
G.3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN.....	117
G.3.1. Pruebas de vibración armónica.....	117
G.3.2. Pruebas en puente vehicular.....	118

<i>G.3.3. Pruebas en puente peatonal</i>	119
<i>G.3.4. Pruebas en mesa vibradora</i>	120
<i>G.3.5. Sismo Tohoku, Japón</i>	121
APÉNDICE H. MÉTODO DE PARK <i>et al.</i>	122
H.1. ALGORITMO	122
H.2. ARCHIVO SCRIPT DE MATLAB®	122
H.3. EJEMPLOS DE APLICACIÓN	125
<i>H.3.1. Pruebas de vibración armónica</i>	125
<i>H.3.2. Pruebas en puente vehicular</i>	126
<i>H.3.3. Pruebas en puente peatonal</i>	127
<i>H.3.4. Pruebas en mesa vibradora</i>	128
<i>H.3.5. Sismo Tohoku, Japón</i>	129
REFERENCIAS	131

CAPÍTULO 1. PROTOCOLO DE TESIS

1.1. Descripción del Proyecto

1.1.1 Resumen

Para estimar desplazamientos en una estructura usualmente se utilizan acelerómetros debido a que no requieren estructuras de soporte adicionales para su instalación. Sin embargo, las aceleraciones obtenidas deben ser procesadas para reducir los errores presentes en ellas, de modo que los desplazamientos estimados resulten reales. Además, existe una falta de consenso entre los investigadores sobre de la validez del uso de desplazamientos estimados para fines estructurales.

En esta investigación se realiza un análisis comparativo de algunos métodos para la estimación de desplazamientos a partir de los registros de aceleración. Los registros de aceleración empleados son obtenidos de pruebas con diferentes tipos de excitación (armónica, peatonal, vehicular y sísmica).

Los métodos que se analizan son los propuestos por: Trifunac & Lee en 1990, Converse & Brady en 1992, Chiu H. C. en 1997, Boore D. en 2001, Darragh *et al.* en 2004, Park *et al.* en 2005 y Wang *et al.* en el 2011.

Los desplazamientos medidos se comparan con los estimados utilizando, entre otros parámetros, el coeficiente de correlación cruzada.

1.2. Planteamiento del problema

El conocimiento de los desplazamientos en estructuras civiles ha tomado importancia debido a sus aplicaciones en la identificación de propiedades dinámicas de estructuras, así como en el monitoreo del daño estructural, entre otras. La identificación de las propiedades dinámicas también permite el ajuste de modelos numéricos, mientras que la identificación del daño estructural contribuye a tomar decisiones sobre intervenciones de mantenimiento en las estructuras.

Para la estimación de los desplazamientos, comúnmente se utilizan acelerómetros, ya que estos instrumentos no requieren un marco de referencia fijo para su instalación como en el caso de los LVDTs (linear variable differential transformers), o los extensómetros de hilo.

Por ejemplo, si se desea conocer el desplazamiento absoluto en la azotea de un edificio de varios niveles, únicamente se instala el acelerómetro directamente al

edificio en una trabe o losa y éste registrará el movimiento. En cambio, si se emplea un instrumento de medición diferente (LVDTs o extensómetros), por su forma de funcionamiento sería necesario construir un marco o estructura adyacente al edificio, en el cual se fijaría el instrumento. Dicho procedimiento resulta poco práctico para la mayoría de las estructuras civiles. Además, las mediciones registradas serían relativas a la estructura de soporte, la cual puede afectar las mediciones por ser deformable. Por lo anterior, los acelerómetros resultan ser prácticos para estimar desplazamientos en la mayoría de las estructuras civiles.

También, han sido utilizados instrumentos de medición de desplazamiento que no requieren contacto directo con la estructura medida. Tal es el caso de los sistemas láser [1], [2], sistemas de radar [3] y sistemas de cámaras de alta resolución y velocidad de escaneo [4]. Sin embargo, estos instrumentos también requieren para su instalación estructuras de soporte adicionales por lo que no han logrado reemplazar el uso de los acelerómetros.

Actualmente, también se utilizan sistemas GPS (Global Positioning System) para la medición de desplazamientos en estructuras [5]–[8]. Éstos no requieren estructuras de soporte fijas, pero la frecuencia de muestreo y la precisión de los sistemas más robustos encontrados en la literatura es actualmente de sólo 20 Hz y 1.0 cm respectivamente. Además, estudios recientes [7] han reportado la pérdida de la señal del GPS durante algunas porciones de los ensayos.

En teoría, las señales de desplazamiento pueden ser generadas a partir de registros de aceleración, por medio de la doble integración. Sin embargo, los registros de aceleración obtenidos usualmente están contaminados con errores (ruido ambiental, ruido inherente al instrumento de medición o a su calibración, entre otros) que normalmente no son apreciables en las aceleraciones. Sin embargo, cuando éstas se integran para obtener las velocidades y desplazamientos, los errores se amplifican causando distorsiones en la línea base de los desplazamientos calculados, principalmente. Por lo anterior, los registros de aceleración deben ser procesados (ajuste de línea base, filtrado), para evitar que los desplazamientos calculados resulten irreales.

Varios algoritmos han sido propuestos para el procesamiento de registros de aceleración y para la obtención de desplazamientos. La mayoría de ellos están enfocados al procesamiento de señales de origen sísmico. Sin embargo, no hay evidencia de que los desplazamientos calculados a partir de aceleraciones medidas sean confiables para otros tipos de excitación

que afecten las estructuras (peatonal, vehicular, vibración eólica, o vibración armónica). Tampoco hay razones para no usar estos algoritmos en el cálculo de desplazamientos ocasionados por fuentes de excitación que no son sísmicas.

Lo anterior motiva el desarrollo de esta investigación, se analizan diferentes algoritmos para la estimación de desplazamientos a partir de aceleraciones medidas en estructuras sometidas a diferentes tipos de excitación (armónica, peatonal, vehicular y sísmica), con el propósito de determinar la validez de los resultados obtenidos. Su validez se analizará en términos de la raíz del error cuadrático medio, del error en el desplazamiento máximo y del coeficiente de correlación cruzada obtenidos al compararlos con los desplazamientos medidos.

1.3. Justificación del proyecto

Este trabajo revela el tipo de errores que se pueden ocasionar al aplicar una técnica de estimación de desplazamientos a diferentes tipos de señales. Sin la comparación con los desplazamientos medidos, la determinación de los errores generados no sería posible.

Este proyecto contribuye a realizar una mejor selección del método que lleve a las mejores estimaciones de desplazamientos para cierto tipo de excitación.

Además que este trabajo hace un compendio de los principales métodos, también presenta los archivos script de cada uno de ellos, lo que complementa su comprensión y facilita su aplicación.

1.4. Objetivos

Objetivo general

Determinar el nivel de error en la estimación de los desplazamientos calculados a partir de aceleraciones medidas, que se obtienen con cada uno de los métodos estudiados para señales típicas con distintos contenidos de frecuencia, amplitud y tipo de excitación.

Objetivos particulares.

1. Hacer un análisis comparativo de los métodos estudiados.
2. Realizar un archivo script en Matlab® para la implementación de cada uno de los métodos.
3. Aplicar métodos desarrollados para movimientos de origen sísmico a otro tipo de excitación.

1.5. Hipótesis

Es posible estimar desplazamientos a partir de registros de aceleraciones medidas con un coeficiente de correlación cruzada mayor a 0.85 respecto a los medidos para los tipos de señales estudiadas.

1.6. Antecedentes y estado del arte

Se han propuesto varios algoritmos para el procesamiento de las señales de aceleración y para la estimación de los desplazamientos, con la intención de reducir los errores presentes en los registros de desplazamiento obtenidos. A continuación se describen los métodos más representativos para el tratamiento del problema aquí planteado.

Trifunac y Lee [9] desarrollaron un programa para la corrección de registros de aceleración. La primera versión de este programa fue creada en 1973, y modificada en 1979, 1984 y en 1990, para incluir los avances en las técnicas de procesamiento de señales. En este trabajo se analiza la versión de 1990 y sus principales procedimientos incluyen filtrado pasa baja para la reducción de las frecuencias altas, corrección por instrumento (en caso de ser necesario), ajuste por línea base mediante la aplicación de filtros pasa alta, y doble integración de los registros mediante la regla trapezoidal.

Graizer [10] desarrolló un procedimiento de ajuste de línea base con el fin de obtener los desplazamientos residuales de un evento sísmico a partir de registros de aceleración. Su procedimiento consiste en la aproximación de la línea base del registro por medio de un polinomio de tercer orden, luego el polinomio de ajuste es sustraído del registro de aceleración.

Iwan *et al.* [11], consideraron que el corrimiento de línea base en los registros es causado por la histéresis del transductor usado en las mediciones. Para el ajuste de línea base, propusieron un algoritmo que consiste en remover dos líneas base del registro de aceleraciones, una correspondiente a la porción del evento (entre t_1 y t_2) y otra para la porción del post evento (entre t_2 y el final del registro). En su planteamiento, el valor t_1 es el tiempo en que la aceleración absoluta sobrepasa los 50 cm/s^2 y t_2 es el tiempo después del cual la aceleración absoluta nunca excede los 50 cm/s^2 , o el tiempo para el que se minimizan los desplazamientos finales estimados.

Converse y Brady [12] propusieron en 1992 un procedimiento que fue adoptado por la USGS (U.S. Geological Survey). Su principal aportación consiste en la adición de segmentos de ceros (*pads*) al inicio y final

del registro de aceleración. Este procedimiento se realiza previo al filtrado de la señal para evitar la introducción de errores de baja frecuencia luego del filtrado.

Chiu, H. [13] identificó los principales errores de línea base presentes en los registros y los clasificó de acuerdo a su origen en ruido instrumental, ruido ambiental, errores por valores iniciales y errores por manipulación de los registros. Para la reducción de los errores propuso un algoritmo de sólo tres pasos, evitando de esta manera la manipulación excesiva de los datos. El método realiza el ajuste de línea base de la aceleración por medio de mínimos cuadrados, aplica un filtro pasa altas en la aceleración y sustrae el valor inicial de la velocidad.

Boore [14] generalizó el método propuesto por Iwan *et al.* de modo que los parámetros t_1 y t_2 que determinan el inicio del evento y post evento del registro respectivamente no quedaran restringidos a algún umbral de aceleración, tomando únicamente en cuenta que t_2 debe encontrarse entre t_1 y el final del registro.

Zhu [15] propuso un método para el ajuste de línea base similar al propuesto Graizer. Utiliza un polinomio de cuarto orden para aproximarse a la línea base del registro, posteriormente el polinomio es sustraído del registro de aceleraciones.

Darragh *et al.* [16] propusieron una metodología para el ajuste de línea base, con el objetivo de preservar los desplazamientos estáticos que normalmente son eliminados cuando se utilizan filtros pasa alta. El método propuesto consiste en realizar un ajuste por mínimos cuadrados en el registro de velocidades (obtenidas de la integración de las aceleraciones) usando tres formas funcionales, la mejor función de ajuste es derivada y removida del registro original de aceleraciones. Para reducir las frecuencias altas del registro también aplican un filtro pasa baja.

Boore [17] analizó el efecto de la adición de *pads* al inicio y final de los registros de aceleración como un procedimiento previo al filtrado pasa alta de los registros. Enfatiza en la importancia de adición de *pads* de una longitud adecuada y su retención durante el procedimiento de doble integración de la señal. Boore señala que éste procedimiento elimina la necesidad de ajustes adicionales de línea base y del cálculo de los valores iniciales.

Boore y Boomer [18] analizaron algunas fuentes de ruido en los acelerogramas, así como procedimientos para el ajuste de línea base de los registros, haciendo énfasis en los que permiten obtener los desplazamientos residuales diferentes de cero. En su trabajo también

analizan el efecto que tiene la aplicación de filtros pasa alta como herramienta para el ajuste de línea base de los registros y establecieron recomendaciones para la selección de las frecuencias de corte a emplear.

Park, K. *et al.* [19] propusieron una metodología para la estimación de desplazamientos en puentes vehiculares. Ésta se basa en el ajuste de línea base de los registros y consta de dos enfoques, el primero es un procesamiento básico y consiste en sustraer la media del registro de aceleración y velocidad. En segundo enfoque aplica un filtro pasa alta a las señales asumiendo la velocidad inicial como cero.

Wu y Wu [20] propusieron una mejora al esquema de corrección por línea base planteado por Iwan *et al.* En su propuesta los parámetros t_1 y t_2 son elegidos de forma iterativa de modo que los desplazamientos estimados adopten la forma de una función rampa. Para la elección de t_2 propone un parámetro t_3 como el tiempo en el que el desplazamiento alcanza una posición permanente, y localiza a t_2 entre t_3 y el final del registro.

Chao *et al.* [21] simplificaron el procedimiento propuesto por Wu y Wu, mediante la selección de t_1 y t_3 mediante umbrales de energía acumulada, 25% y 65% respectivamente.

Wang *et al.* [22] plantearon un método de ajuste de línea base con el objetivo de preservar los desplazamientos cosísmicos, basándose en las propuestas realizadas por Iwan *et al.* [11], Boore [14], Wu y Wu [20] y Chao *et al.* [21]. En su propuesta el registro de velocidades (obtenido de la integración de las aceleraciones) es ajustado por medio de una función bilineal continua, que debe ser obtenida de un proceso iterativo de modo que los desplazamientos estimados se ajusten mejor a una función escalón. Para la definición de la función de ajuste, propone varios parámetros entre los cuales sitúa los valores t_1 y t_2 .

En la Tabla 1.1, se identifican las principales características para el procesamiento de los registros de los métodos mencionados en esta sección.

CAPÍTULO 1. PROTOCOLO DE TESIS

Tabla 1.1.

Características principales de los métodos mencionados en esta sección

No	Autores	Año	Operaciones realizadas	Forma de ajuste de la línea base	Filtro usado	Tipo de filtro usado	Señal filtrada	Técnica usada para integración
1	Graizer	1979	Ajuste de línea base	Mediante un ajuste polinomial de tercer orden en la aceleración	Ninguno	Ninguno	Ninguna	No lo menciona
2	Iwan et al.	1985	Ajuste de línea base	Se sustrae el promedio del preevento de todo el registro de aceleración (corrección de orden cero), y se sustrae una línea base para el evento y otra para la porción del post evento de la aceleración	Ninguno	Ninguno	Ninguna	No lo menciona
3	Trifunac y Lee	1990	Reducción de frecuencias altas, ajuste de línea base y ajuste por instrumento	Con filtro pasa alta	Pasa baja y pasa alta	Tipo FIR (Finite impulse response)	Aceleración Velocidad Desplazamiento	Regla trapezoidal
4	Converse y Brady	1992	Reducción de frecuencias altas, ajuste de línea base y corrección por instrumento	Con ajuste lineal por mínimos cuadrados y aplicación de filtro pasa alta en la aceleración.	Pasa baja y pasa alta	Butterworth	Aceleración	Regla trapezoidal
5	Chiu	1997	Ajuste de línea base	Con ajuste lineal por mínimos cuadrados en la aceleración, filtrado pasa alta y sustrayendo el valor de la velocidad inicial en el registro de velocidad o desplazamiento	Pasa alta	Filtro con fase cero	Aceleración	No lo menciona
6	Boore	2001	Ajuste de línea base	Mediante corrección de orden cero y la sustracción de dos líneas bases, una para la porción del evento y otra para el post-evento de la aceleración	Ninguno	Ninguno	Ninguna	No lo menciona
7	Zhu	2003	Ajuste de línea base y ajuste por instrumento	Mediante ajuste polinomial de cuarto orden en la aceleración	Ninguno	Ninguno	Ninguna	No lo menciona
8	Darragh et al.	2004	Ajuste de línea base y reducción de las altas frecuencias	Sustrae del registro de aceleración, la derivada de la forma funcional del mejor ajuste realizado en la velocidad	Pasa baja	Butterworth causal	Aceleración	No lo menciona
9	Boore	2005	Reducción de las bajas frecuencias	Mediante adición de segmentos de ceros al inicio y final de la señal de aceleración, previo al filtrado pasa alta	Pasa alta	Butterworth no causal	Aceleración	No lo menciona
10	Park et al.	2005	Ajuste de línea base	Sustrae la media del registro de aceleración y velocidad	Ninguno	Ninguno	Ninguna	Regla de Simpson de 1/3
11	Wu y Wu	2007	Ajuste de línea base	Sustrae del registro de la velocidad, una función bilineal de ajuste	Ninguno	Ninguno	Ninguna	No lo menciona
12	Chao et al.	2010	Ajuste de línea base	Sustrae del registro de la velocidad, una función bilineal de ajuste	Ninguno	Ninguno	Ninguna	No lo menciona
13	Wang et al.	2011	Ajuste de línea base	Por corrección de orden cero en la aceleración y sustrae de la velocidad, una función bilineal continua	Ninguno	Ninguno	Ninguna	No lo menciona

1.7. Metodología propuesta

Para el desarrollo de esta investigación se plantea las siguientes actividades:

1. Selección de los métodos para estimar desplazamientos a partir de aceleraciones medidas a evaluar.
2. Selección y obtención de señales de aceleración y desplazamiento medidas en el mismo punto y en la misma dirección, ante diferentes tipos de excitación.
3. Procesamiento de los datos obtenidos usando los métodos seleccionados. Realizar un análisis del ruido para la elección de las frecuencias de corte a emplear durante el filtrado pasa alta, para los métodos que lo requieran.
4. Comparación de los desplazamientos medidos (lvdt o gps) con los estimados, por medio del coeficiente de correlación cruzada, el error porcentual entre los desplazamientos máximos y la raíz cuadrada del error cuadrático medio (RSME).

CAPÍTULO 2. ARTÍCULO ENVIADO

Thank you for your submission to measurement

Measurement <measurement@elsevier.com>
Para: dasariasl@gmail.com

28 de junio de 2016, 14:42

Dear Miss. Arias-Lara,

Thank you for sending your manuscript Assessment of methodologies to estimate displacements from measured acceleration records for consideration to Measurement. Please accept this message as confirmation of your submission.

When should I expect to receive the Editor's decision?

We publicly share the average editorial times for Measurement to give you an indication of when you can expect to receive the Editor's decision. These can be viewed here: http://journalinsights.elsevier.com/journals/0263-2241/review_speed

What happens next?

Here are the steps that you can expect as your manuscript progresses through the editorial process in the Elsevier Editorial System (EES).

1. First, your manuscript will be assigned to an Editor and you will be sent a unique reference number that you can use to track it throughout the process. During this stage, the status in EES will be "With Editor".

2. If your manuscript matches the scope and satisfies the criteria of Measurement, the Editor will identify and contact reviewers who are acknowledged experts in the field. Since peer-review is a voluntary service, it can take some time but please be assured that the Editor will regularly remind reviewers if they do not reply in a timely manner. During this stage, the status will appear as "Under Review".

Once the Editor has received the minimum number of expert reviews, the status will change to "Required Reviews Complete".

3. It is also possible that the Editor may decide that your manuscript does not meet the journal criteria or scope and that it should not be considered further. In this case, the Editor will immediately notify you that the manuscript has been rejected and may recommend a more suitable journal.

For a more detailed description of the editorial process, please see Paper Lifecycle from Submission to Publication: http://help.elsevier.com/app/answers/detail/a_id/160/p/8045/

How can I track the progress of my submission?

You can track the status of your submission at any time at <http://ees.elsevier.com/MEAS>

Once there, simply:

1. Enter your username: Your username is: dasariasl@gmail.com

If you need to retrieve password details, please go to: http://ees.elsevier.com/MEAS/automail_query.asp

2. Click on [Author Login]. This will take you to the Author Main Menu

3. Click on [Submissions Being Processed]

Many thanks again for your interest in Measurement.

Kind regards,

Professor K.T.V. Grattan

If you require further assistance, you are welcome to contact our Researcher Support team 24/7 by live chat and email or 24/5 by phone: <http://support.elsevier.com>

A manuscript number has been assigned: MEAS-D-16-01132

Measurement <measurement@elsevier.com>
Para: dasariasl@gmail.com

29 de junio de 2016, 5:29

Measurement
Ref: MEAS-D-16-01132
Title: Assessment of methodologies to estimate displacements from measured acceleration records
Authors: Damaris Arias-Lara; Jaime De-la-Colina
Article Type: Research Paper

Dear Miss. Damaris Arias-Lara,

Your submission entitled "Assessment of methodologies to estimate displacements from measured acceleration records" has been assigned the following manuscript number: MEAS-D-16-01132.

You may check on the progress of your paper by logging on to the Elsevier Editorial System as an author. The URL is <http://ees.elsevier.com/meas/>.

Your username is: dasariasl@gmail.com

If you need to retrieve password details, please go to: http://ees.elsevier.com/meas/automail_query.asp.

Thank you for submitting your work to this journal. Please do not hesitate to contact me if you have any queries.

Kind regards,

Measurement

Assessment of methodologies to estimate displacements from measured acceleration records

Damaris Arias-Lara (dasariasl@gmail.com), Jaime De-la-Colina* (jcolina@uaemex.mx)
 Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de México
 Ciudad Universitaria – Cerro de Coatepec, Toluca, Estado de México. México.
 *Corresponding author

Abstract

This study presents a comparative analysis of several methods to estimate displacements from measured accelerations records, with the objective of assessing their performance to compute displacements caused by different types of excitation (harmonic, vehicular, pedestrian, or seismic). The study relevance is founded on the lack of agreement among researchers in relation to the validity/precision of displacements obtained from accelerations. Results show that there are two main groups of methods: one applies to signals with zero end displacements, and the other applies to more general movements. Except for cases with both much noise and small displacements, it is possible to compute displacements with high cross correlation coefficients and small errors, with respect to measured displacements. Results also indicate that the selection of the method to estimate displacements depends on: displacement amplitudes, type of information required (either the peak displacement or the whole displacement signal), and magnitude of the displacements at the record end.

Keywords:

Displacement computation, baseline adjustment, acceleration-record processing, bridge displacement, strong-motion displacement.

1. Introduction

The knowledge of displacements in civil engineering is important because they are useful for identifying structural dynamic properties [1], and monitoring structural damage [2], among others applications. Identification of dynamic structural properties is also used to calibrate and improve numerical models. Usually, displacements are obtained from acceleration records because in this way, a fixed structure of reference/support is not required, as in the case of linear variable differential transformers (LVDT's) or laser systems. Currently, global positioning systems (GPS) can also be used to measure displacements but their sampling frequencies are low (1-20 Hz) and their accuracy is below 1.0 cm, approximately. Moreover, recent studies [3], [4] have reported that in some cases the GPS signal can be lost during some portions of the recording.

Acceleration records should be processed (*e.g.*, using baseline adjustment, filtering or double integration) to obtain displacement histories. Without this processing, the computed values after double integration result unreal [5], [6]. This occurs because acceleration records normally include noise and errors that cause distortions of the baseline and can be amplified during integrations.

Signals have either low-frequency and/or high-frequency errors. According to Chiu [5], low-frequency errors affect the baseline and they are generated by instrumental noise, background noise, initial values, and/or manipulation errors.

To cope with these errors, several algorithms have been proposed for both the processing of acceleration records and the estimation of displacements. For instance, the procedure proposed by Trifunac and Lee [7] has been considered as a basic one from which other recent algorithms have been developed (*e.g.*, Converse and Brady [8] and Chiu [5]). These processing approaches are based on baseline adjustment by the application of high-pass filters mainly. As stated by Wang *et al.* [9], a disadvantage of using high-pass filters is that they not only remove the baseline errors but also eliminate the low-frequency content within the signal, including the residual displacements. For this reason, high-pass filtering does not seem to be a recommended procedure for cases with nonzero permanent or pseudo-static displacements.

To avoid the low-frequency noise after high-pass filtering, Converse and Brady [8], as well as Boore [10], suggest the addition of segments of zeros (*pads*) at both the beginning and the end of the acceleration record.

For signals with pseudo-static or nonzero residual displacements, the use of other methodologies is preferred. These alternative methodologies are based on

baseline adjustments of either acceleration or velocity records using linear, polynomial or continuous bilinear functions [9], [11]–[17].

In this paper, the methodologies proposed by the following authors are studied: Trifunac and Lee [18], Converse and Brady [8], Chiu [5], Boore *et al.* [19], Darragh *et al.* [15], Park *et al.* [20], and Wang *et al.* [9]. Each method is evaluated with several types of excitation in order to assess their capabilities to estimate displacements. It is important to highlight that the Converse-and-Brady method [8] was adopted by the US Geodetic Survey (USGS) for processing strong-motion acceleration records as well as for estimating displacements. Similarly, the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) adopted the method proposed by Darragh *et al.* [15].

These methods were studied in this paper because they are clearly different each other. Although other methods can be available, they can be seen either as variations of the previously referred methods or as part of more general methods. For instance, the method proposed by Wang *et al.* includes ideas presented by Iwan [12], Boore [13], Wu and Wu [16], and Chao *et al.* [17], among others.

The selected methods are initially assumed as general proposals for the computation of displacements of any type of movement because they use techniques (filtering, baseline adjustment, integration, etc.) that are not specific of a particular type of movement (*e.g.*, seismic). Other methods cannot be assumed as general. For instance, the method proposed by Arraigada [21] is not taken as a method of broad application because it includes procedures which are specific of signals typical of vehicular bridges.

The main objective of this work is to identify the methods that lead to the best estimations of displacements for different types of excitation. A secondary objective is to illustrate the errors that can be obtained in the estimation of displacements when these methods are applied to acceleration signals taken from different sources (seismic, vehicles on bridges, pedestrian on bridges, harmonic vibrations, etc.). In all cases, however, only excitations with frequencies typical of ordinary civil engineering structures are studied.

2. Methodologies

In this section, the selected methodologies to estimate displacements from measured accelerations are briefly described.

2.1. Trifunac and Lee (1990)

This method was developed in 1973 for processing earthquake signals. Later, it was modified in 1979, 1984 and 1990 to incorporate the latest techniques of the digital signal processing.

The scheme used in this paper only considers the part II of the 1990 version, which includes a detailed description of the steps proposed by Trifunac and Lee to process digital accelerograms. The method is based on baseline adjustments, carried out with high-pass filtering of acceleration, velocity and displacement signals.

2.2. Converse and Brady (1992)

For the baseline adjustment of records, this method has two main steps that apply to the acceleration record: a least squares linear fit and a high-pass filtering. Before filtering, the method recommends the addition of pads at both the beginning and the end of the acceleration record.

2.3. Chiu (1997)

This method was developed to estimate seismic displacements and, according to Chiu, it was aimed at fixing the main errors of the acceleration-record baseline, including those caused by the manipulation of data.

The algorithm consists of three main steps: an acceleration-record least squares fit, an acceleration-record high-pass filtering, and a subtraction of the velocity initial value. The last step can be carried out in three ways. Herein, the least squares adjustment of velocity was selected because it was initially assumed that nonzero coseismic displacements could be obtained.

According to Chiu [5], this method reduces the necessary steps for adjusting the baseline errors, reducing in this way the side effects due to data manipulation.

2.4. Boore *et al.* (2002)

The purpose of this methodology was to estimate the permanent or residual displacements from seismic acceleration records by adjusting the baseline. To achieve this, a quadratic fit of velocity by least squares is performed first. Then, the adjustment function is differentiated and subtracted from the acceleration record. Finally, a high-pass filter is applied to the acceleration record.

2.5. Darragh *et al.* (2004)

The objective of this methodology was to fix the baseline errors included in the records by maintaining the static permanent displacement (coseismic displacements).

To achieve such goal, an adjustment of velocities is carried out by one of the following three functional forms: linear fit, bilinear piecewise continuous fit and quadratic fit.

Later, the method differentiates the best fitting function and removes it from the original acceleration signal. This approach does not use high-pass filtering. According to Darragh *et al.* [15], the lack of filtering allows to preserve the coseismic displacements.

2.6. Park *et al.* (2005)

Although this methodology was developed for vehicular bridges, its procedures are general and can be applied to other types of excitation. Its purpose was to fix the baseline errors found in the records caused by initial conditions, such as the initial velocity.

The Park's proposal consists of two approaches. The first one adjusts the baseline by subtracting the means of both the acceleration and the velocity records. This approach should be considered as a basic method for signal improvement.

The second solution uses a high-pass filter and it assumes the initial velocity equal to zero. Because the second solution is included in other methods [5], [8], [18], [19], only the first approach is addressed here.

According to Park *et al.* [20], the proposal can be effectively applied for displacement monitoring in the cases of bridges.

2.7. Wang *et al.* (2011)

The purpose of their investigation was to compute the permanent displacement (coseismic) from acceleration seismic records. It is based on the baseline adjustment of the velocity record using a continuous function that should be obtained with an iterative process that best fits the history of corrected displacements to a step function.

According to Wang *et al.* [9] the coseismic displacements obtained with this methodology agree within 10% - 20% with direct GPS measurements.

2.8. General characteristics of the methods

Table 1 summarizes the main techniques that each methodology uses. To simplify the presentation, an identifier in column 2 is used for each method.

Table 1
Main characteristics of the methods

Method	Method ID	Baseline adjustment	Filters	Force final displacement to zero	Number of main steps*	Iterative
Trifunac and Lee	TL	With high pass filter	High pass and low pass	Yes	6	No
Converse and Brady	CB	With high pass filter and least squares adjustment	High pass and low pass	Yes	4	No
Chiu	CH	With high pass filter and least squares adjustment	High pass	Yes	3	No
Boore <i>et al.</i>	BO	Subtracting from the acceleration record the derivative of the quadratic least squares adjustment of velocity, and high pass	High pass	No	3**	No
Darragh <i>et al.</i>	DA	Subtracting from the acceleration record the derivative of the best fitting function	Low pass	No	2**	Yes
Park <i>et al.</i>	PA	Subtracting the mean of the record from the hole record	None	Yes	2	No
Wang <i>et al.</i>	WA	With a sectional bilinear continuous function	None	No	6	Yes

* The double integration to obtain displacements is not considered as an additional step.

** The adjustment of the velocity record, the derivative of the adjustment function and the subtracting from the acceleration record are considered as a single step.

A fundamental characteristic of the methods is the approach used to carry out the baseline adjustment. As can be seen (Table 1), the methods TL, CB, CH and BO use a high-pass filter, while the methods DA, PA and WA use other techniques. In addition to the filtering, the BO method uses a least squares fit to velocity. The DA method however uses a least squares fit without filtering. The PA method only removes the mean values of both the acceleration and velocity records. The WA method fits the baseline of velocity so that the resulting displacement signal closely adjusts to a step function.

Another interesting point of the methods is that some of them (TL, CB, CH y PA) drive the computed final displacements close to zero. Obviously, these methods are not able to estimate nonzero permanent displacements (*e.g.*, coseismic displacements).

It is important to notice that some methods (DA and WA) require an iterative procedure to compute the entire displacement record, therefore their processing times are significantly larger than those for other methods. The time required for each method to complete the computation of displacements was less than 2 minutes, except for the method WA that required between 2 and 20 hours in Matlab®, depending on the acceleration record length.

2.9. Selection of filtering cut-off frequencies

For the selection of cut-off frequencies for high-pass filtering, the recommendations by Boore and Bommer [6] were considered, particularly the signal-to-noise ratio in the frequency domain of the Fourier spectrum. The cut-off frequency was selected using a signal-to-noise ratio equal to 2.0, according to [6]. Here, the pre-event signal (ambient vibration) was taken as the noise.

Fig. 1 shows the frequency for a signal-to-noise ratio = 2.0.

Boore and Bommer [6] also recommend a visual inspection of the records to discard those cases where the computed displacements, based on the selected signal/noise ratio, result unreal.

Applying such a visual inspection, Table 2 summarizes the selected cut-off frequencies that led to the best adjustment between measurement and computed displacements, for those methods that use high-pass filters for the adjustment of the baseline. This inspection was possible in these cases because the measured displacements were available; however, in those cases where these displacements are unknown, the cut-off frequencies based on both the signal-noise ratio equal to 2 and the analyst judgment should be used.

Given the differences among procedures, the cut-off frequencies that led to the best adjustments resulted different.

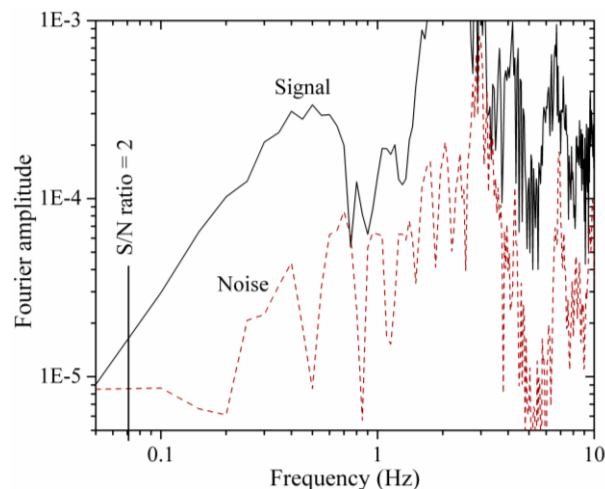


Fig. 1. Fourier amplitudes for acceleration and noise signals.

Table 2

Cut-off frequencies (Hz) used in high-pass filters

Method	Quasi-harmonic signal	Shaking table	Pedestrian bridge	Vehicular bridge	Tohoku earthquake
Trifunac and Lee	0.07	0.12	0.14	0.06	0.07
Converse and Brady	0.10	0.20	0.20	0.07	0.07
Chiu	0.20	0.20	0.20	0.20	0.07
Boore <i>et al.</i>	0.15	None	None	None	None

Table 3

Information of noise within the signals

Type of test	Maximum acceleration of signal (cm/s ²)	Maximum acceleration of noise (cm/s ²)	Mean noise acceleration (cm/s ²)	Maximum noise/Maximum signal (%)
Quasi-harmonic signal	302.0	0.11	0.02	0.04
Shaking table	533.1	5.34	1.21	1.00
Pedestrian bridge	46.2	1.48	0.21	3.20
Vehicular bridge	27.1	0.77	0.10	2.84
Tohoku earthquake AKTH10 station	10.7	0.05	0.01	0.47

It is also important to identify the level of noise within the signals because the results of the methods are dependent on the signal-noise ratio. Table 3 presents information on the noise level in the time domain of each signal. Notice that the maximum amplitude of noise corresponds to the pedestrian bridge with 3.20% of the signal amplitude.

3. Methodology

To assess the accuracy of the methods presented in the previous section, it was necessary to obtain both acceleration and displacement records measured in the same point and along the same direction (corresponding signals). The measured acceleration records are used to estimate the corresponding displacement records using the previously described techniques. Then, these computed displacement records are compared with the corresponding measured values.

For all methods, the double integration procedure was carried out using both the 1/3 Simpson's integration rule and spline interpolation. The interpolation was incorporated to generate convenient estimations of intermediate values (central values) required by the 1/3 Simpson's rule [22].

3.1. Study cases

For the computation of displacements, the input data (acceleration) were obtained from four types of dynamic tests and from one seismic record of the Tohoku, Japan earthquake of 2011. The measured displacements obtained from GPS stations provided the information of the corresponding displacements for this earthquake.

3.1.1. Quasi-harmonic vibration tests

Eleven experiments with quasi-harmonic vibrations were carried out using a pendulum test [23] working at excitation frequencies that varied from 0.5 to 5.5 Hz, with increments of 0.5 Hz. In this paper, and for brevity reasons, only the test for 3.0 Hz, which is typical of the other tests, is reported. More information of the other tests are reported by Alvarez [24].

The instrumentation setup consisted of three accelerometers and two LVDT's (Fig. 2). Just for these tests, readings from LVDT's were corroborated with readings from cable extension transducers (Celesco® extensometer). To obtain both acceleration and displacement readings at the same point and direction, records were lineally interpolated (geometric adjustment).



Fig. 2. Instrumentation setup for the quasi-harmonics tests.

3.1.2. Vehicular bridge tests

The selected bridge (Fig. 3) for these tests is located in the city of Toluca (in Central Mexico). For each span, the structure consists of 14 simply supported prestressed AASTHO beams (type IV). The selected span had a length of 30 m. One truck with an estimated weight of 35 t excited the bridge (in this research, the precise weight of the truck is not relevant).



Fig. 3. Vehicular bridge.

In order to obtain significant displacement amplitudes, the instrumentation was placed at the beam next to the center of the lane and at the center of its span. The accelerometer was fixed with steel angles and the LVDT was supported at a metallic scaffold resting on the ground. The tip of the LVDT was hold against the bottom of the prestressed beam.

3.1.3. Pedestrian bridge tests

The bridge used for these tests is shown in Fig. 4. It consists of steel trusses supporting a composite (steel deck with concrete) slab. The span of the bridge was equal to 20 m.



Fig. 4. Pedestrian bridge.

Fig. 5 shows the instrumentation setup placed at the center of the bridge span. Groups of people passing through the bridge excited the bridge.



Fig. 5. Instrumentation setup of the pedestrian bridge.

3.1.4. Shaking table tests

These tests were carried out on the shaking table of the Institute of Engineering of the National Autonomous University of Mexico (UNAM). A synthetic strong motion with three levels of peak acceleration was used. Fig. 6 shows the acceleration record of the intermediate-intensity motion reported here. Its main characteristics are: record's duration = 15 s., peak acceleration = 533 cm/s² and Arias's intensity = 456 cm/s. The Fourier spectrum reveals that the main frequencies of the record are between 3 and 11 Hz. For these tests, the shaking table was moved along one direction only and the displacement at the end of the record was equal to zero.

The instrumentation setup for this test is shown in Fig. 7. The LVDT was supported with a steel angle to a fixed point outside of the shaking table, while the

accelerometer was fixed at the shaking table, just below the LVDT.

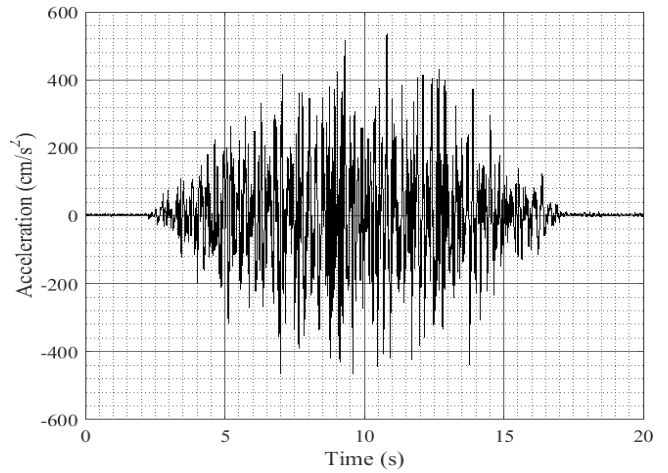


Fig. 6. Artificial acceleration record of the shaking table.



Fig. 7. Instrumentation setup of the shaking table.

3.1.5. Tohoku earthquake, Japan (March 11, 2011).

The acceleration records of the Tohoku earthquake (Japan, March 11, 2011) were obtained from the database of the Center for Engineering Strong Motion Data (<http://www.strongmotioncenter.org>) and correspond to the Oodate station (AKTH10). Fig. 8 shows the E-W acceleration record that is used in this paper. Its main characteristics are: record's duration = 300 s., peak acceleration = 10.73 cm/s² and Arias's intensity = 2.3 cm/s. The Fourier spectrum indicates that the main frequencies of the record are between 2 and 11 Hz.

The displacements used for comparison with the computed displacements were acquired from GPS stations that report the information with a sample rate of 1 Hz. This information was provided by the Geospatial Information Authority of Japan (GSI) via Nippon GPS Data Services Company (NGDS) and it was downloaded from <http://www.gps-solutions.com>. In contrast to the shaking table tests, in this real earthquake the coseismic displacements were nonzero.

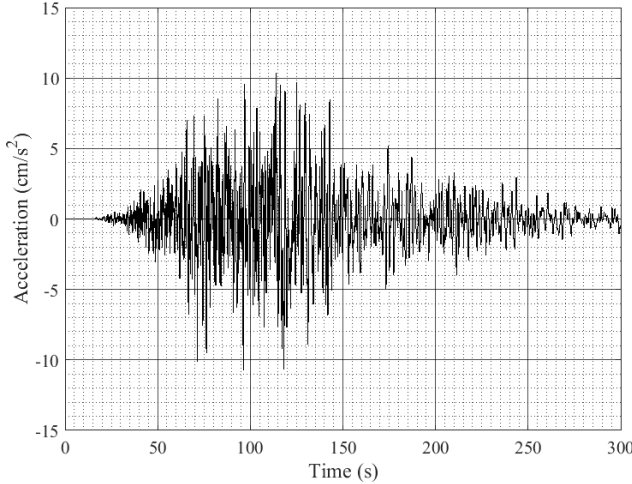


Fig. 8. Acceleration recorded of the Tohoku earthquake at Oodate station, along the E-W direction.

3.2 Instrumentation

With exception of the shaking table tests, the acceleration signals were acquired with an FBA (force balance accelerometer) uniaxial accelerometers model ES-U2 (Episensor[®]) from Kinemetrics[®]. Their main characteristics are: dynamic range = 140 dB+, bandwidth = DC to 200 Hz, linearity < 1,000 $\mu\text{g}/\text{g}^2$, hysteresis < 0.1% of full scale, cross-axis sensitivity < 1.0% (including misalignment). A sampling rate of 200 Hz was used for all tests. For the shaking table, SETRA[®] model-141 accelerometers were used. Their main characteristics are: bandwidth = 260 Hz, no linearity \pm 1.0% full scale, hysteresis < 0.1% of full scale, cross-axis sensitivity 1.2%, noise level < 0.01% of nominal range. In such tests, the initial sampling rate was equal to 250 Hz. Later, the records were converted to 200 Hz using cubic spline interpolation.

To record displacements, linear variable differential transformers (LVDT's) were used for all tests. These TR100 Novotechnik[®] LVDT's (with linearity of \pm 0.075%, and repeatability of \pm 0.002 mm) were connected to a node and the information was wirelessly transferred to a computer. A sampling rate of 256 Hz was initially recorded, but it was also converted to 200 Hz.

3.2. Comparison of measured and computed records

In addition to the comparison of the displacement signals, the following three parameters were also used to assess the accuracy of the methods: cross correlation coefficient (CCC), root square mean error (RSME), and the peak displacement of the signal. In all cases measured displacements were considered as true values.

The cross correlation coefficient (CCC) [25] is used here to determine the similitude of two signals $\{x(t)\}$ and $\{y(t)\}$, and it is defined as:

$$\rho_{xy} = \frac{C_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N \left(\frac{x_t - \bar{x}}{\sigma_x} \right) \left(\frac{y_t - \bar{y}}{\sigma_y} \right) \quad (1)$$

where:

- ρ_{xy} = cross correlation coefficient
- $C_{xy}(\tau)$ = covariance between $x(t)$ and $y(t)$
- σ_x = standard deviation of x
- σ_y = standard deviation of y
- x_t = signal of measured displacements
- \bar{x} = mean of measured displacements
- y_t = signal of computed displacements
- \bar{y} = mean of computed displacements

It is known that ρ_{xy} varies from -1.0 to 1.0, and that a value close to zero indicate no correlation.

The RSME is the root square of the quadratic mean error (MSE) applied to two signals $\{x(t)\}$ and $\{y(t)\}$ [26], but it offers the advantage that the error computed in this way results with the same units of the signal. It is computed as follows:

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (x(t) - y(t))^2} \quad (2)$$

These parameters are useful to compare the computed signal with the measured one, but these parameters are not definite elements to determine the best method for a given test. For instance, it is possible that for a given method a high correlation factor (close to 1.0) can be computed but, at the same time, its error can be large. Similarly, the computed peak displacements can agree with those measured ones but the rest of the signals can be significantly different from each other, making the CCC small and/or the RSME large. It is also possible to have high values of CCC and small values of RSME indicating almost-perfect correlation of a large portion of the signal, but the peak values can result significantly different from each other. It is also likely that from the set of methods, the one with larger CCC is not the method with the smaller RSME.

Given the previous reasons, to select the better methods for each test, judgment should be used to weigh the previous parameters.

Another point to choose a method depends on the information that is required from the computed displacement signal (peak values or the complete

history of displacements). For instance, an estimation of the peak displacement can be enough for a given structural design; but a large portion of the displacement signal should be well estimated for good results of a given identification algorithm.

4. Results and discussion

Computed and measured displacements are shown in Figs 9-13. Each figure presents the results of one type of test for all the studied methods. To quantitatively compare the measured and computed displacements a summary of both CCC and RSME values is presented in Table 4, wherein the highest CCC values for each test (column) are identified with boldface.

Fig. 9 depicts the results for the quasi-harmonic vibration test. It shows that the methods by Trifunac and Lee, Converse and Brady, as well as that by Chiu, lead to the best displacement estimations. It is clear that for this type of test, the other methods do not compute acceptable displacements. This can be also observed with the CCC and RSME values. These three methods lead to CCC values practically equal to 1.0 and RSME values between 0.037 (CB) and 0.047 (TL). The other methods lead to CCC values between 0.14 and 0.81, and RSME values between 0.7 and 5.23.

It is interesting to highlight that the three methods use high-pass filters for the adjustment of the baseline (Table 1). Of the remaining methods, Boore's method yields to good results and uses a high-pass filter as an additional procedure for the baseline adjustment.

The almost-perfect correlation observed in the first three methods is mainly due to the filtering used for the baseline adjustment that leads to almost zero displacements at the end of the record. Thus, for this type of signals with null end displacements, these methods give good results. As indicated before, the cut-off frequencies were selected with a signal-to-noise analysis.

Additional quasi-harmonic tests revealed that the excitation frequency did not result to be a significant factor affecting the similitude between measured and computed displacements.

A signal with a wide content of frequencies occurs, for instance, in the case of a seismic record. Fig. 10 shows the displacements computed for the case of a synthetic earthquake reproduced in a shaking table. In this case, the final displacements are also close to zero. Again, it is observed that the same three methods lead to the best estimations of displacements. This seems to confirm that the frequency content is not a factor that significantly affects the output of these methods. Of the remaining methods, Wang's method gives acceptable displacement estimations with $CCC = 0.75$ and $RSME = 0.339$.

For the previously presented cases, it can be observed that the ratio of peak accelerations to peak measured displacements varies between 250 and 650 $1/s^2$ approximately (Table 5). When this ratio is larger, as in the case of the pedestrian bridge with a ratio equal to 1155, the estimation of displacements becomes difficult.

Table 4

Values of root mean square error (RSME) and cross correlation coefficient (CCC) for each case.

Method	Parameter	Quasi-harmonic signal	Shaking table	Pedestrian bridge	Vehicular bridge	Tohoku earthquake
Trifunac and Lee	RSME	0.047	0.056	0.009	0.061	40.293
	CCC	1.00	0.98	0.48	0.64	0.09
Chiu	RSME	0.045	0.070	0.018	0.077	40.393
	CCC	1.00	0.96	-0.16	0.74	-0.11
Converse and Brady	RSME	0.037	0.041	0.004	0.030	38.861
	CCC	1.00	0.96	0.54	0.96	0.06
Boore et al.	RSME	0.695	0.814	0.073	0.045	11.835
	CCC	0.81	0.46	-0.07	0.85	0.92
Darragh et al.	RSME	2.933	2.151	0.122	0.045	49.854
	CCC	0.18	0.25	0.17	0.92	0.76
Wang et al.	RSME	1.843	0.339	0.048	0.090	8.872
	CCC	0.47	0.75	-0.24	0.82	0.99
Park et al.	RSME	5.233	1.611	0.096	0.096	33.290
	CCC	0.14	0.24	0.31	0.88	0.82

Computed displacements for the pedestrian bridge are shown in Fig. 11. Similarly to the shaking table case, the frequency content is broad. However, for this case

where displacements are small, none of the methods leads to acceptable results. This can be corroborated with the CCC values reported in Table 4, wherein the

best values of CCC correspond to the methods by Converse and Brady (0.54), Trifunac and Lee (0.48), as well as that by Park *et al.* (0.31).

Table 5
Maximum acceleration / maximum displacement ratio

Case of study	Maximum acceleration, A (gals)	Maximum displacement, D (cm)	A/D (1/s ²)
Quasi-harmonic Signal	302.0	1.38	218.8
Shaking Table	533.1	0.84	634.6
Pedestrian Bridge	46.2	0.04	1,155.5
Vehicular Bridge	27.1	0.34	79.7
Tohoku Earthquake	10.7	97.95	0.1

Table 6, which lists both the measured and computed peak displacements as well as the error on their estimations, shows that the maximum displacement for the pedestrian bridge is almost 0.4 mm. This value is very small when it is compared with the peak displacements of other tests. This result suggests that the methods do not provide reliable estimations in those cases where a previous structural analysis reveals small displacements (less than 0.5 mm, according to Table 6). This point can be corroborated in the same table by observing the errors obtained in the estimations of the peak displacements computed with each method. For this bridge with small displacements, the percentage error of peak displacements varies from 35.9% (TL) up to 259% (PA). It is interesting to observe that the method by Park *et al.* leads to one of the best three values of the CCC parameter, but its estimation of the peak is not acceptable.

To analyze with more detail the effect of displacement magnitude, the results of a vehicular bridge are presented. As can be observed in Table 5, the orders of magnitude of the accelerations for this bridge are similar to those of the pedestrian bridge; however, displacements for the vehicular bridge are approximately 10 times larger than those of the pedestrian bridge. For the vehicular bridge, the relation A/D in Table 5 results equal to 79.7.

Fig. 12 shows the displacements estimated for the vehicular bridge. When the shapes of the obtained displacement signals are carefully reviewed, it is clear that most of the methods provide acceptable results. Except for both the TL and the CH methods, the remaining methods lead to CCC values larger than 0.8.

The methods that provide the best CCC values are those by Converse and Brady (0.96) and Darragh *et al.* (0.92).

It is interesting to observe that even though the method by Boore *et al.* leads to a CCC value equal to 0.85 (which is smaller than that by Darragh *et al.*), its corresponding RSME value is equal to 0.045, which is equal to that obtained with Darragh's. Table 6 shows that for this vehicular bridge, the error between computed and measured peak displacements is equal to 5.9% in the case of the Boore's method, while the error is equal to 11.8% in the Darragh's one.

In this sense, it is important to pinpoint that if only the peak displacement values are required, results indicate that the method by Boore *et al.* seems better than the method by Darragh *et al.* Notice that both parameters CCC and RSME take into account the similarities/differences of the whole signal. For this test, the method by Chiu leads to the exact estimation of the peak displacement.

Again, in these four previously discussed tests, the final displacements are practically equal to zero. A different situation is presented in Fig. 13, which shows the E-W displacements of the Tohoku (Japan, 2011) earthquake corresponding to the Oodate (AKTH10) station. As corroborated by the GPS stations, in this case the displacements at the final part of the movement resulted approximately equal to 1.0 m.

The three methods that had shown the best estimations in the previous tests (TL, CH and CB), are the ones that lead to the more distant estimations of the displacements for the Tohoku earthquake. For this case with nonzero permanent displacements, the best methods resulted to be those by Boore *et al.* and Wang *et al.*, with CCC values of 0.92 and 0.99, respectively. It is also highlighted that these two methods lead to acceptable estimations of the peak displacements with errors of 4.2% and 8.4%, respectively. Similarly, both methods can be preferred for estimating displacements in structures where nonzero displacements can be anticipated by nonlinear behavior.

As a final discussion of these results, an analysis in the frequency domain is briefly presented. Figs. 14 and 15 show the Fourier spectra of measured and computed displacements for the shaking table and the Tohoku earthquake signals. In these figures, only the Fourier spectra for the methods that best computed the displacements are presented. As for the shaking table signal (Fig. 14), it can be observed that displacement frequencies are practically the same for the measured and computed displacements, except for the initial frequency band where the filters modified the signal. For this signal, the methods led to the following values

of CCC between measured and computed signals: TL = 0.99, CH = 0.98 and CB = 0.98.

In the case of the Tohoku earthquake signal the displacement Fourier spectra for the methods that did not used filters (BO, DA, PA, and WA), are shown in Fig. 15. In this figure, it can be observed that, except for the methods by Darragh *et al.* and Park *et al.*, the spectra for the computed and measured displacements are practically the same for all the frequency band. The

differences observed for the small frequencies is due to the baseline adjustment procedure. These methods led to the following values of CCC: BO = 0.997, DA = 0.998, PA = 0.637 and WA = 1.00.

Finally, Table 7 summarizes the observed performance of the methods considered in this study. This table can be usefull for selecting a method to estimate displacements.

Table 6.
Comparison of maximun displacement values (cm)

Method	Displacement	Quasi-harmonic signal	Shaking table	Pedestrian bridge	Vehicular bridge	Tohoku earthquake
	Max Measured	1.38	0.84	0.039	0.34	97.95
Trifunac and Lee	Max. Calculated	1.24	0.74	0.025	0.28	2.03
	Error %	10.1	11.9	35.9	17.6	97.9
	Max. Calculated	1.16	0.75	0.059	0.34	5.75
Chiu	Error %	15.9	10.7	51.3	0.0	94.1
	Max. Calculated	1.35	0.74	0.022	0.29	5.74
Converse and Brady	Error %	2.2	11.9	43.6	14.7	94.1
	Max. Calculated	2.02	2.1	0.095	0.32	93.82
Boore et al.	Error %	46.4	150.0	143.6	5.9	4.2
	Max. Calculated	5.98	3.87	0.217	0.3	141.77
Darragh et al.	Error %	333.3	360.7	456.4	11.8	44.7
	Max. Calculated	3.65	1.01	0.081	0.3	106.21
Wang et al.	Error %	164.5	20.2	107.7	11.8	8.4
	Max. Calculated	9.28	3.42	0.14	0.44	65.93
Park et al.	Error %	572.5	307.1	259.0	29.4	32.7

Table 7
Summary of advantages for each method

Evaluation item	Methods						
	TL	CB	CH	BO	DA	PA	WA
Overall good estimation for records with zero end displacements	✓	✓	✓				
Overall good estimation for records with nonzero end displacements				✓			✓
High (> 0.85) cross correlation coefficient with respect to measured displacements*	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Good peak displacement estimations (error < 11%)*	✓	✓	✓	✓			✓
Small root mean square errors*	✓	✓	✓	✓	✓		✓
Fast computation	✓	✓	✓	✓		✓	
Easy to implement in a computed program	✓	✓	✓	✓		✓	
Invariant with record length				✓	✓	✓	✓
No filters (Independence of cut-off frequencies)					✓	✓	✓

* In those cases where the method applies (see Tables 4 and 6).

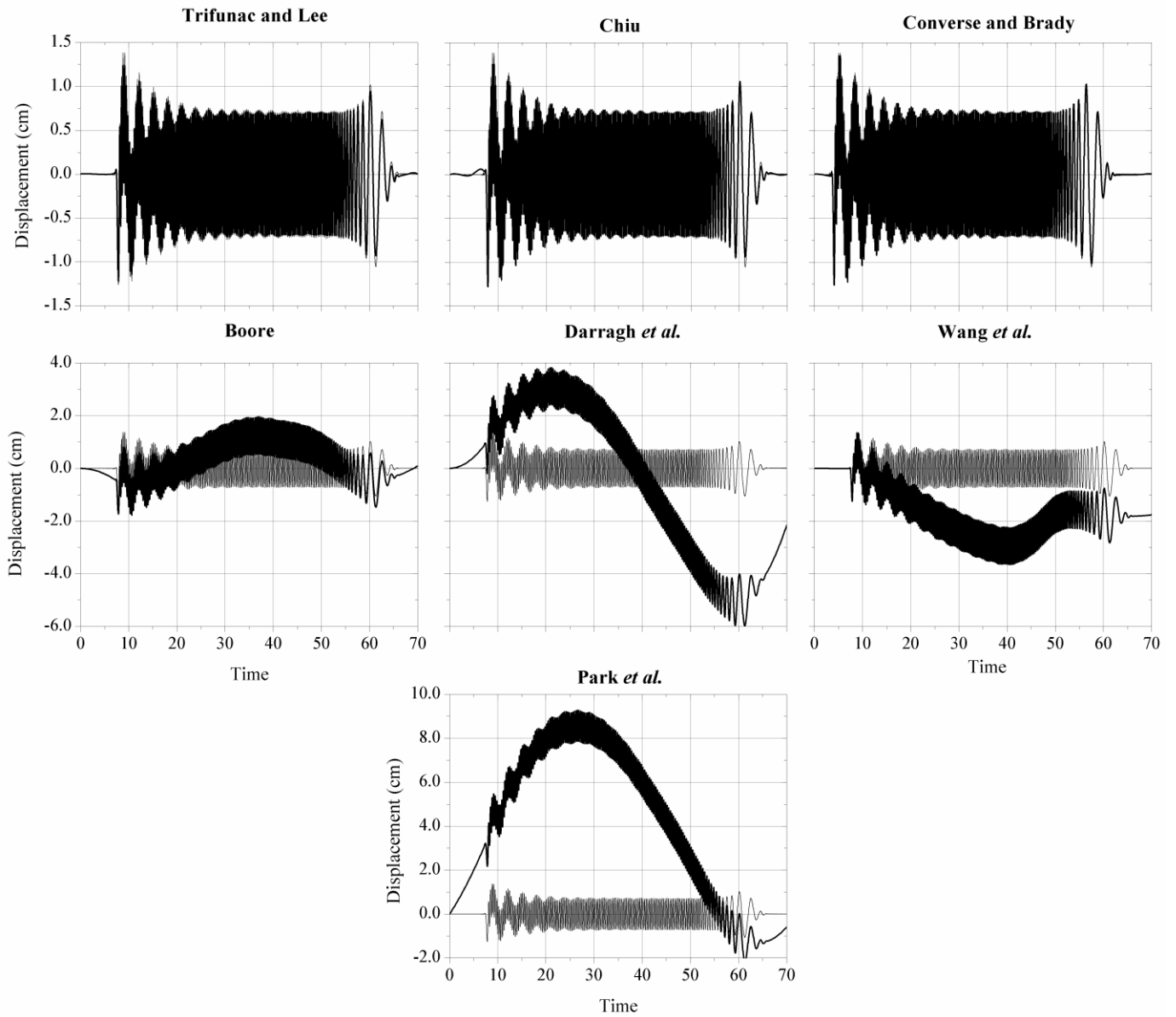


Fig. 9. Comparison of measured (gray) and computed (black) displacements for the quasi-harmonic test (time in seconds).

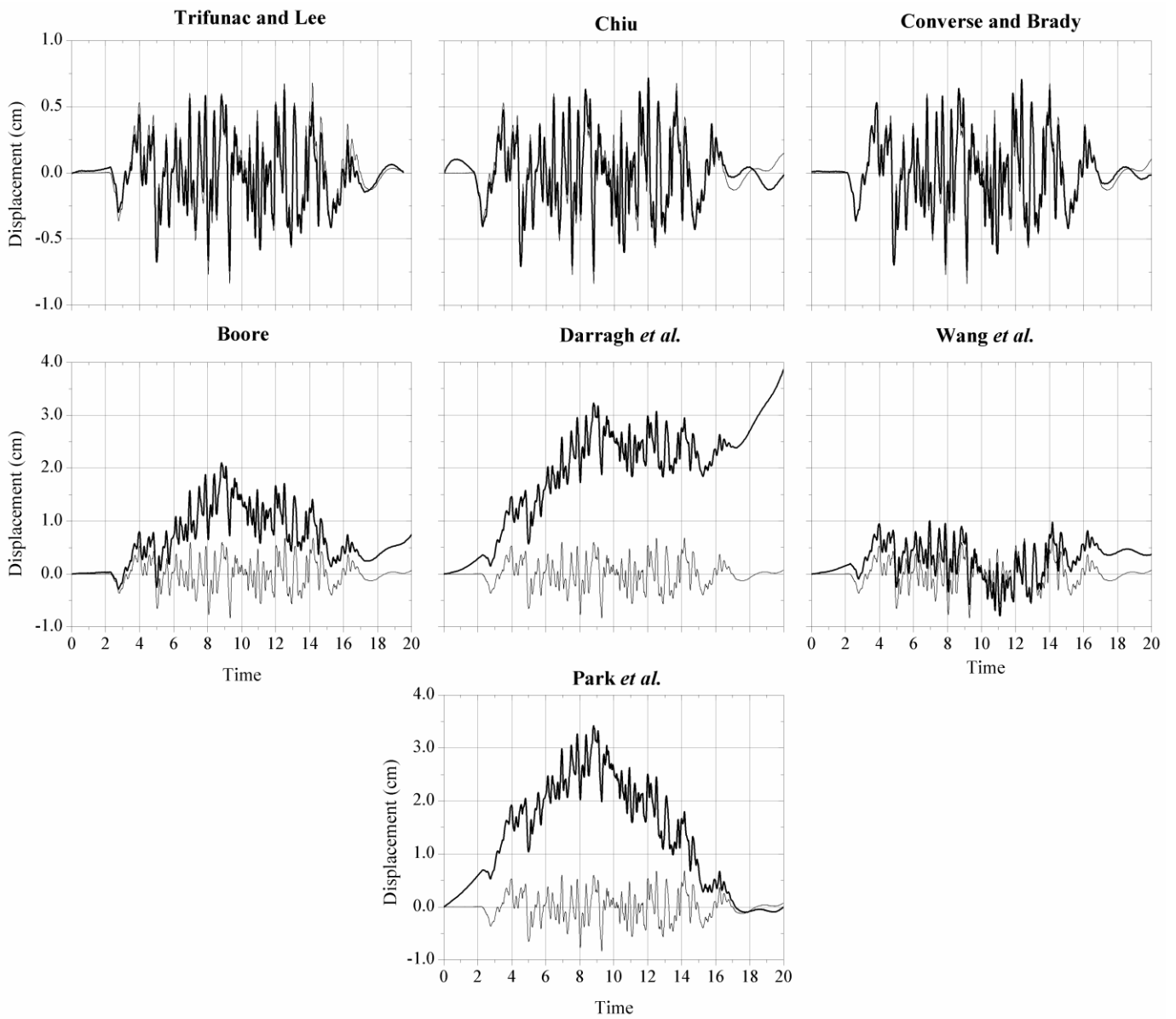


Fig. 10. Comparison of measured (gray) and computed (black) displacements for the shaking table test (time in seconds).

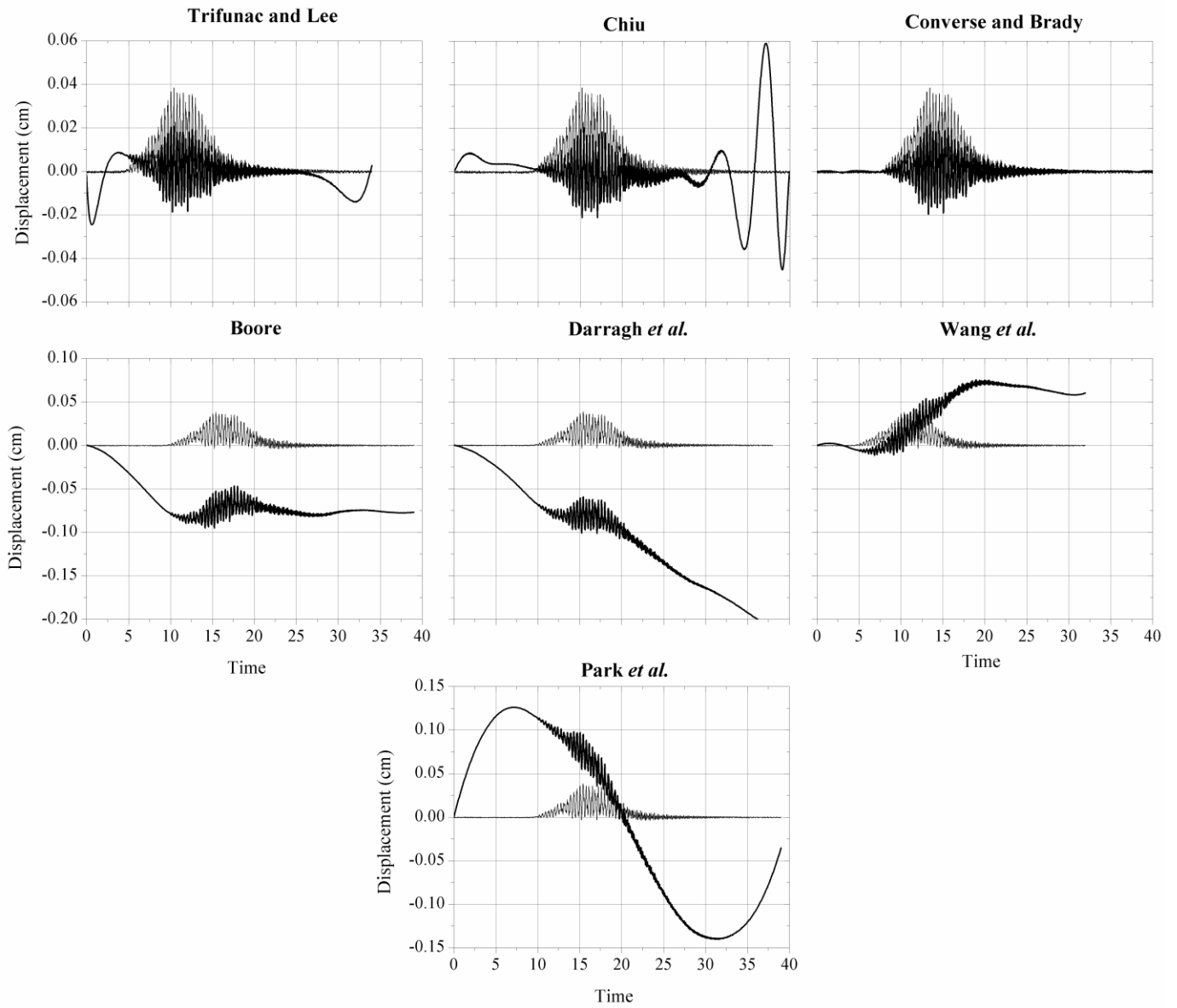


Fig. 11. Comparison of measured (gray) and computed (black) displacements for the pedestrian bridge test (time in seconds).

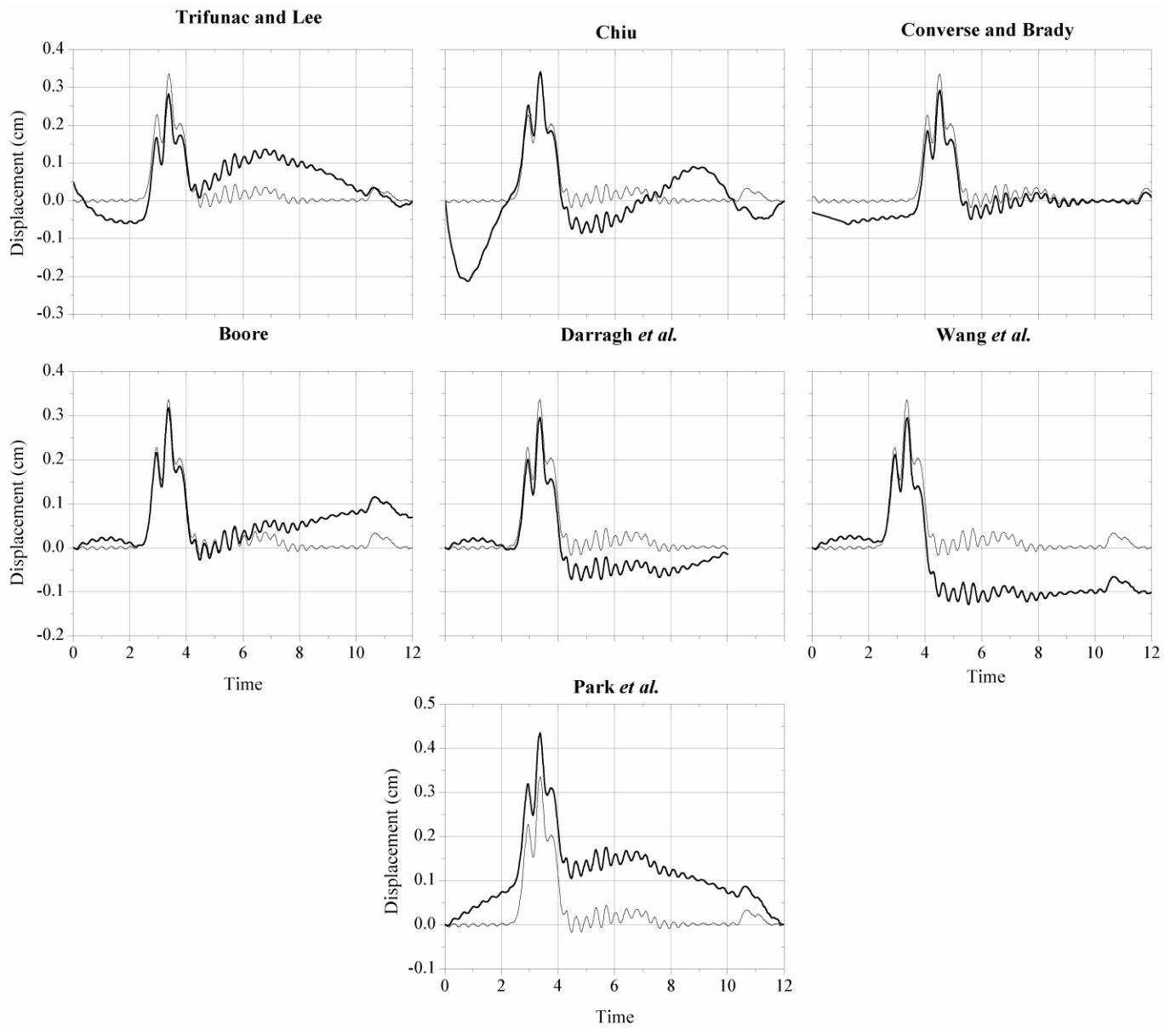


Fig. 12. Comparison of measured (gray) and computed (black) displacements for the vehicular bridge test (time in seconds).

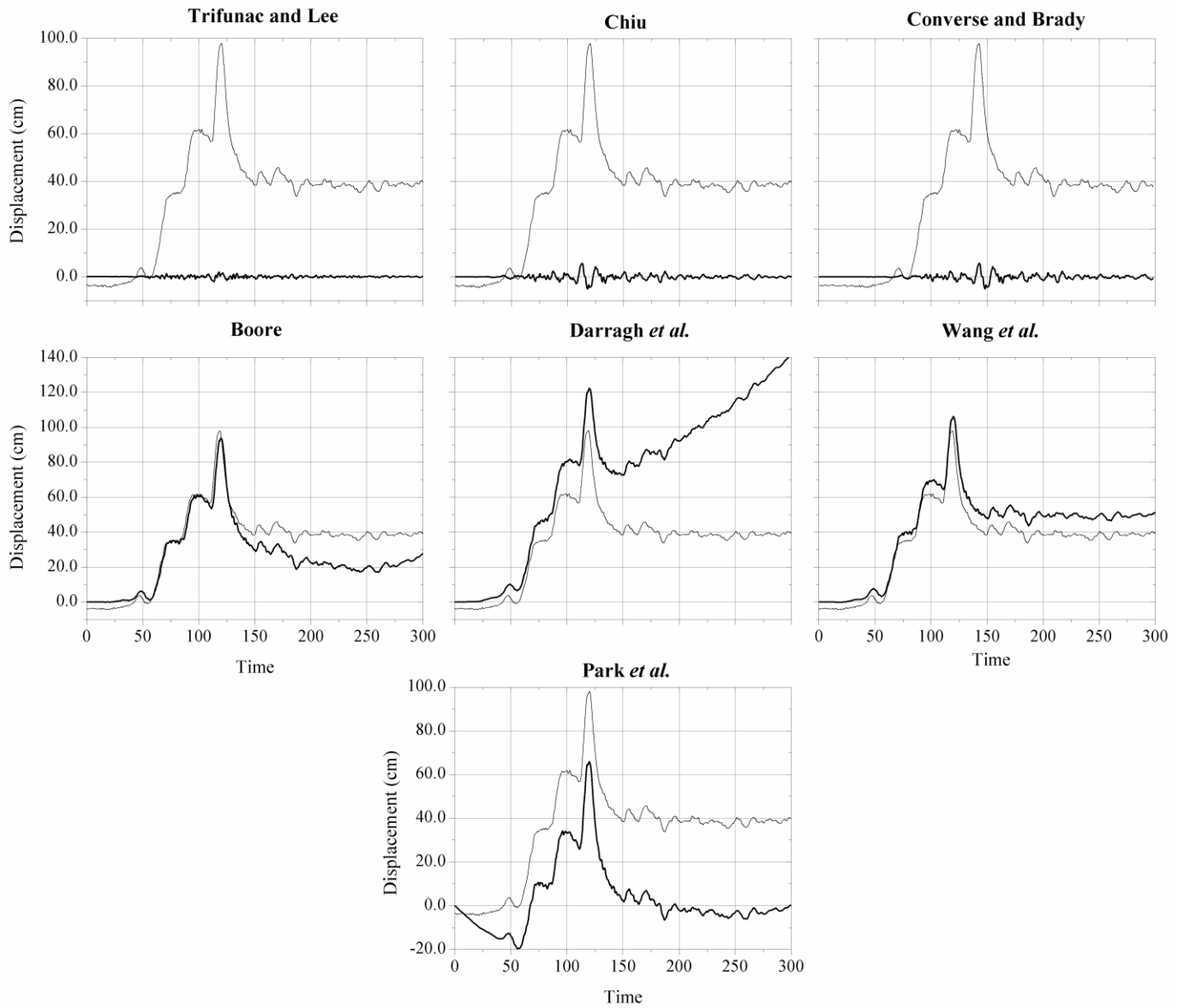


Fig. 13. Comparison of measured (gray) and computed (black) displacements for the Tohoku earthquake, Oodate station (E-W).

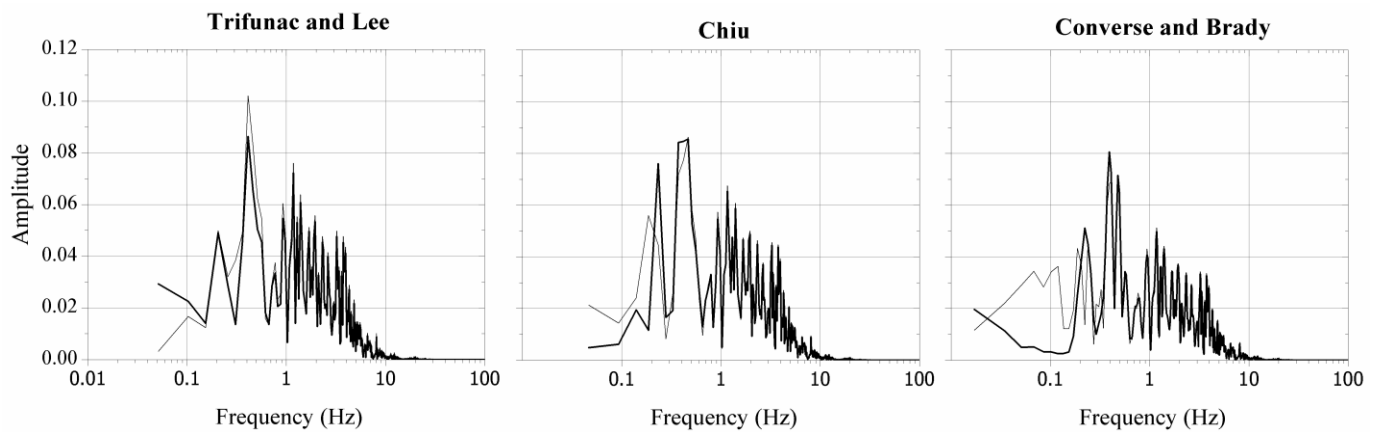


Fig. 14. Comparison of Fourier spectra for measured (gray) and computed (black) displacements of the shaking table test.

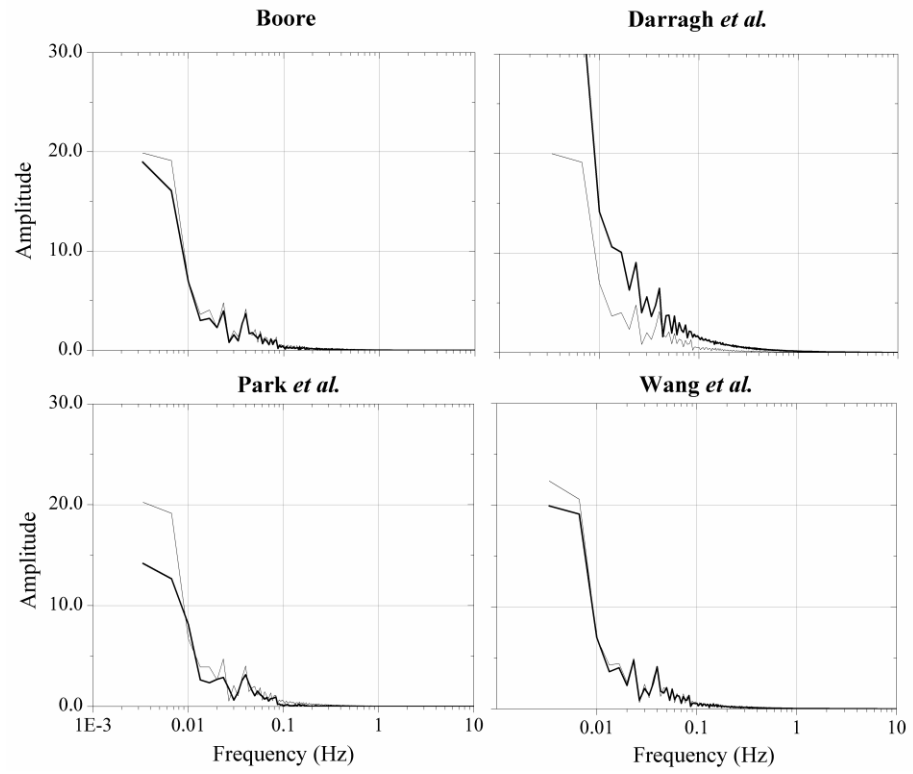


Fig. 15. Comparison of Fourier spectra for measured (gray) and computed (black) displacements of the Tohoku earthquake, Oodate station (E-W).

5. Conclusions

Seven methods to compute displacement records from measured acceleration records have been studied. Each method is assessed with five types of tests. The conclusions of the study are as follows:

Methods using high-pass filtering for baseline adjustment lead to almost-zero end displacements. The methods by Trifunac and Lee, Converse and Brady, and the one by Chiu use this type of baseline adjustment. Therefore, they are useful in cases where the final displacements are close to zero. This conclusion applies for records with a broad frequency content.

For records where nonzero permanent displacements are expected (as in the case of structures with nonlinear behavior), other type of baseline adjustment is desirable. The methods by Boore *et al.* and Wang *et al.* are recommended for this second type of records. Since the method by Wang *et al.* requires an iterative procedure, the method by Boore seems to be a better option. Moreover, the method by Boore *et al.* leads to the best estimations of peak displacements for the studied tests.

For the case of quite small displacements (0.5 mm), the considered methods do not lead to acceptable estimations of displacements. For this test, the best estimations (in terms of CCC, RSME, and peak displacement) were obtained with the methods of Converse and Brady, as well as Trifunac and Lee. It is convenient to carry out a previous simple dynamic structural analysis to determine the magnitude of the expected displacements and select the more appropriate method to estimate displacements.

The method to compute displacements from acceleration records should be selected taking into account the following points: 1) if the whole displacement record is required or just its peak value; 2) the magnitude of the final displacements; 3) the magnitude of the displacements (as compared with the magnitude of accelerations and noise).

Results indicate that excitation frequency does not affect significantly the results.

Acknowledgments

Authors appreciate all the support provided by Roberto Duran, chief engineer of the shaking table laboratory (Institute of Engineering, UNAM), during the shaking table tests.

References

- [1] W. Duan and H. Achintya, "Element-level system identification with unknown input," *J. Eng. Mech.*, vol. 120, no. 1, pp. 159–176, 1994.
- [2] J. L. Beck and P. C. Jennings, "Structural identification using linear models and earthquake records," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 8, no. 2, pp. 145–160, 1980.
- [3] D. Murià Vila, J. Camargo, B. D. Aldama, G. Rodriguez, L. A. Aguilar, and M. Amaya, "Structural health monitoring of an instrumented building in Mexico with accelerometers and GPS sensors," *Proceedings 6th international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure*, Hong Kong, 2013, p. 19.
- [4] G. L. Emore, J. S. Haase, K. Choi, K. M. Larson, and A. Yamagiwa, "Recovering seismic displacements through combined use of 1-Hz gps and strong-motion accelerometers," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 97, no. 2, pp. 357–378, Apr. 2007.
- [5] H.-C. Chiu, "Stable baseline correction of digital strong-motion data," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 87, no. 4, 1997.
- [6] D. M. Boore and J. J. Bommer, "Processing of strong-motion accelerograms: Needs, options and consequences," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 25, no. 2, pp. 93–115, 2005.
- [7] M. D. Trifunac, "Routine computer processing of strong-motion accelerograms," California Institute of Technology, Earthquake Engineering Research Laboratory, Pasadena, California, Tech. Rep. EERL 73-03, Jan. 1973.
- [8] A. Converse and A. G. Brady, "BAP basic strong-motion accelerogram processing software version 1.0," United States department of the interior, U.S. Geological survey; distributed by books and open-file reports section, USGS Numbered Series 92–296–A, 1992.
- [9] R. Wang, B. Schurr, C. Milkereit, Z. Shao, and M. Jin, "An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong-motion records," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 101, no. 5, pp. 2029–2044, Oct. 2011.
- [10] D. M. Boore, "On pads and filters: Processing strong-motion data," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 95, no. 2, p. 6, 2005.
- [11] V. Graizer, "Determination of the true ground displacement by using strong motion records," *Izv. Earth Phys.*, vol. 15, no. 12, pp. 875–885, 1979.

- [12] W. D. Iwan, M. A. Moser, and C.-Y. Peng, "Some observations on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerograph," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 75, no. 5, pp. 1225–1246, Oct. 1985.
- [13] D. M. Boore, "Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 91, no. 5, pp. 1199–1211, Oct. 2001.
- [14] L. Zhu, "Recovering permanent displacements from seismic records of the June 9, 1994 Bolivia deep earthquake," *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, no. 14, p. 1740, Jul. 2003.
- [15] B. Darragh, W. Silva, and N. Gregor, "Strong motion record processing procedures for the PEER center," *Proceedings of COSMOS workshop on strong-motion record processing*, Richmond, California, 2004, pp. 1–12.
- [16] Y.-M. Wu and C.-F. Wu, "Approximate recovery of coseismic deformation from Taiwan strong-motion records," *J. Seismol.*, vol. 11, no. 2, pp. 159–170, Jan. 2007.
- [17] W.-A. Chao, Y.-M. Wu, and L. Zhao, "An automatic scheme for baseline correction of strong-motion records in coseismic deformation determination," *J. Seismol.*, vol. 14, no. 3, pp. 495–504, Aug. 2009.
- [18] M. D. Trifunac and V. Lee, "Automatic digitization and processing of accelerograms using PC," University of Southern California Faculty Research and Publications, 90–3, 1990.
- [19] D. M. Boore, C. D. Stephens, and W. B. Joyner, "Comments on baseline correction of digital strong-motion data: examples from the 1999 Hector Mine, California, earthquake," *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 92, no. 4, p. 18, 2002.
- [20] K.-T. Park, S.-H. Kim, H.-S. Park, and K.-W. Lee, "The determination of bridge displacement using measured acceleration," *Eng. Struct.*, vol. 27, no. 3, pp. 371–378, Feb. 2005.
- [21] M. Arraigada and M. Partl, "Calculation of displacements of measured accelerations, analysis of two accelerometers and application in road engineering," *Proceedings 6th Swiss Transport Research Conference*, Monte Verità / Ascona, 2006.
- [22] A. Gilat and V. Subramaniam, *Numerical Methods for Engineers and Scientists*, 3rd Edition. Wiley.
- [23] J. De-la-Colina and J. Valdés, "Péndulo de prueba para el estudio dinámico de modelos estructurales (in Spanish)," *Rev. Ing. Sísmica*, 2010.
- [24] J. A. Álvarez Espinosa, "Evaluación experimental de la metodología de Chiu para calcular desplazamientos a partir de aceleraciones (in Spanish)," Master thesis, Universidad Autónoma del Estado de México, Toluca, Estado de México, 2016.
- [25] W. S. Wei, *Time series analysis: univariate and multivariate methods*, First edition. Pearson, 1990.
- [26] J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random data: Analysis and measurement procedures*, 4th Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2010.

APÉNDICE A. ASPECTOS BÁSICOS DEL PROCESAMIENTO DE SEÑALES

En este apéndice se inicia con la presentación de algunos conceptos básicos del procesamiento de señales. Se aborda el tema del tratamiento del ruido en las señales y posteriormente se presentan las principales técnicas de procesamiento de los registros. Cabe resaltar que el contenido de este apéndice es fundamental para la comprensión de los temas cubiertos en este trabajo y de las metodologías presentadas en los apéndices subsiguientes.

A.1. Conceptos básicos

En esta sección se presentan algunos conceptos básicos sobre el procesamiento de señales que son de utilidad para la comprensión de los métodos de estimación de desplazamiento empleados en el presente trabajo.

A.1.1. Señales

Según Proakis y Manolakis [23], “una señal es cualquier cantidad física que varía con el tiempo, espacio o cualquier otra variable independiente.”

Un ejemplo de señal es la respuesta de las vibraciones de una estructura sometida a acciones dinámicas registradas en términos de aceleraciones, velocidades, o desplazamientos. Por ejemplo en la Fig. A.1 se muestra la señal de aceleración registrada en la estación AKTH-10 durante el sismo de Tohoku, Japón 2011. En este caso, la amplitud de la aceleración es la variable dependiente y el tiempo es la variable independiente.

Una señal es un medio para transmitir información acerca del estado (características, composición, trayectoria) pasado, actual o futuro de la fuente que la genera. La información que transporta una señal se puede describir por medio de sus principales características: amplitud, periodo y frecuencia (Fig. A.2).

La amplitud (A) es el valor que toma la variable dependiente para determinado valor de la variable independiente. Su unidad de medida está en términos del fenómeno en estudio.

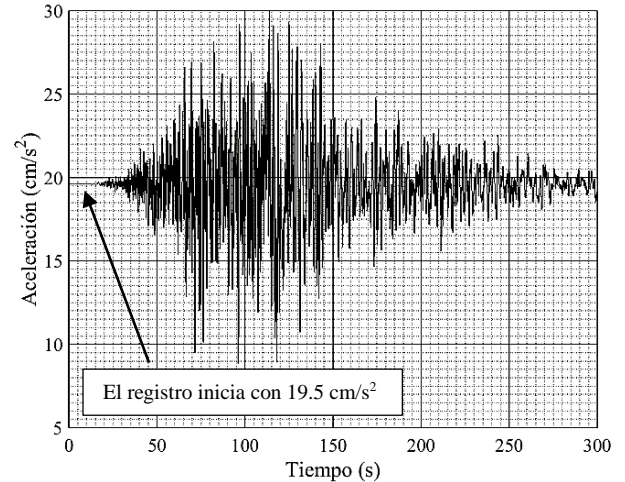


Fig. A.1 Señal de aceleración del sismo de Tohoku, Japón 2011

El periodo (T) es la duración de un ciclo completo de la señal y su unidad de medida son los segundos (s), generalmente.

La frecuencia (f) es el número de ciclos por unidad de tiempo que se presenta en la señal y su unidad de medida son los Hertz. La frecuencia puede ser calculada a partir del inverso del periodo.

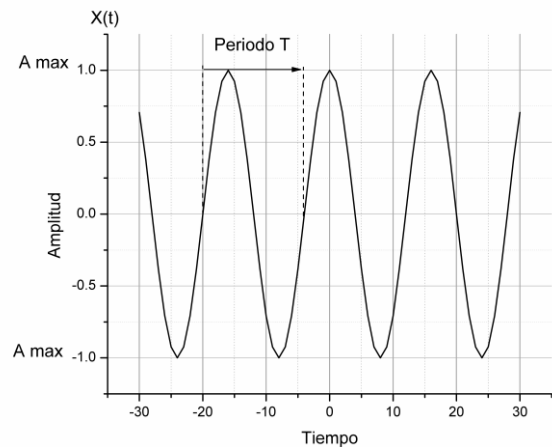


Fig. A.2. Representación de una señal en tiempo continuo y de sus principales características.

Las señales se pueden clasificar en: señales de tiempo continuo y señales de tiempo discreto. En el caso de señales continuas la variable independiente es continua, por lo que puede tomar cualquier valor de un intervalo continuo de números reales (Fig. A.2). Por otra parte, las señales discretas sólo están definidas en tiempos discretos, por lo tanto para estas señales la variable independiente puede tomar un valor solamente de un conjunto discreto de datos (Fig. A.3).

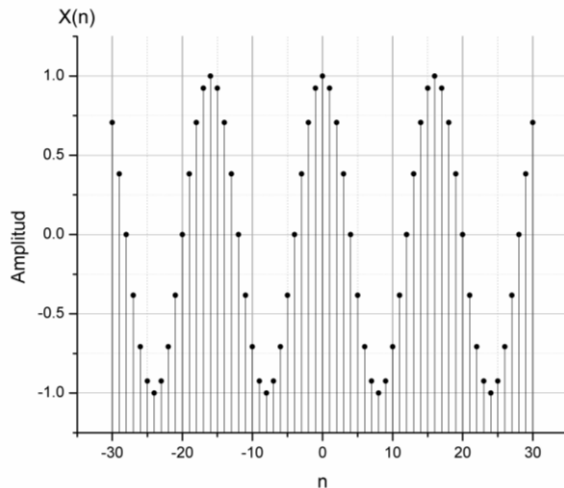


Fig. A.3. Ejemplo de una señal en tiempo discreto

En este trabajo, las señales a analizar corresponden al tipo discreto y la variable independiente es el tiempo. Una de las maneras más usuales en que se genera este tipo de señales es a partir de una señal continua muestreada a una frecuencia uniforme de tiempo. Dicho proceso se conoce como muestreo (*sampling*).

A.1.2. Error de línea base

Se conoce como línea base el nivel de referencia de las ordenadas señalado dentro de la gráfica de una señal dada. Por ejemplo, un movimiento que puede ser registrado en términos de aceleración, velocidad o desplazamiento.

El error de línea base se refiere al corrimiento o distorsión en el nivel de referencia del movimiento [24]. Para ilustrar este tipo de error, en la Fig. A.1 se observa que el registro de aceleración inicia en 19.5 cm/s² en lugar de empezar en cero. A este desajuste de la línea de referencia se le conoce como desplazamiento de línea base (*baseline offset*).

A pesar de que la desviación de la línea base puede ser pequeña en las señales de aceleración, puede provocar grandes errores en los desplazamientos obtenidos a partir de la doble integración de las aceleraciones, de modo que éstos resulten completamente irreales.

Existen numerosas fuentes de errores de línea base [13], entre ellas:

Ruido instrumental. Este tipo de ruido se debe a la respuesta no lineal del instrumento de medición, resolución insuficiente, insuficiente frecuencia de muestreo, ruido electrónico y falta de calibración de los aparatos.

Ruido ambiental. Este tipo de ruido depende del sitio donde se realice las pruebas. Su característica principal es la forma aleatoria de sus ondas y un amplio contenido de frecuencias. Normalmente su amplitud es mucho más pequeña que la de la excitación, pero contribuye a que el valor inicial del registro de aceleración sea diferente de cero. Esto provoca una acumulación del error de línea base, por lo que su efecto no puede ser ignorado en el cálculo de los desplazamientos.

Valores iniciales en los registros. En teoría, una estructura permanece en reposo hasta que se le aplica una excitación (armónica, peatonal, vehicular, sísmica, etc.), por lo que el valor inicial del movimiento registrado debería ser igual a cero. En la realidad, debido a la presencia de ruido electrónico y ruido ambiental, el valor inicial del registro obtenido es diferente de cero. Estos valores iniciales, principalmente el de la aceleración y velocidad, pueden causar una distorsión grande al final del registro de desplazamientos. Un valor inicial diferente de cero en la aceleración se puede incrementar debido al proceso de integración para obtener los desplazamientos. Lo mismo sucede con el valor inicial de la velocidad, con la diferencia de que éste no aparece explícitamente en la aceleración, ya que su derivada es muy pequeña.

Manipulación de los datos. El procesamiento de los datos remueve o minimiza algunos tipos de errores en los registros, pero al mismo tiempo puede introducir nuevos errores. La manipulación de los datos, por ejemplo por medio del filtrado, puede modificar la forma de la señal, así como su línea base. Un pequeño cambio en la forma de la onda de la señal de aceleración no modifica significativamente los desplazamientos, pero un pequeño corrimiento de línea base de la señal de aceleración, puede causar una distorsión grande en los desplazamientos.

Debido a las diferentes fuentes de ruido que puede contener una señal, no existe un esquema de corrección que pueda ser aplicado a todos los registros.

A.1.3. Filtros

Los filtros son una clase importante de sistemas lineales invariantes en el tiempo. Según Oppenheim *et al.* [25], estrictamente hablando, el término filtro de frecuencia selectiva sugiere un sistema que permite el paso de ciertos componentes de frecuencia y rechaza totalmente otros. Pero en un contexto amplio, cualquier sistema que modifica ciertas frecuencias relativas a otras es también llamado filtro.

En procesamiento de señales, un filtro ideal es una función que en el dominio de la frecuencia tiene un

valor igual a la unidad en el intervalo de frecuencias que se desea conservar y un valor igual a cero en el intervalo que se desea eliminar [18]. En la Fig. A.4, se ilustra un filtro ideal pasa baja. En dicha figura, el término del eje vertical $|H(e^{j\omega})|$ es la magnitud de la respuesta en frecuencia de un sistema lineal invariante en el tiempo (LTI) estable [26], donde ω es la frecuencia en radianes/seg. También se denota como $|H(\omega)|$. La respuesta en frecuencia $H(\omega)$ es la respuesta de un sistema LTI a una señal exponencial compleja de entrada.

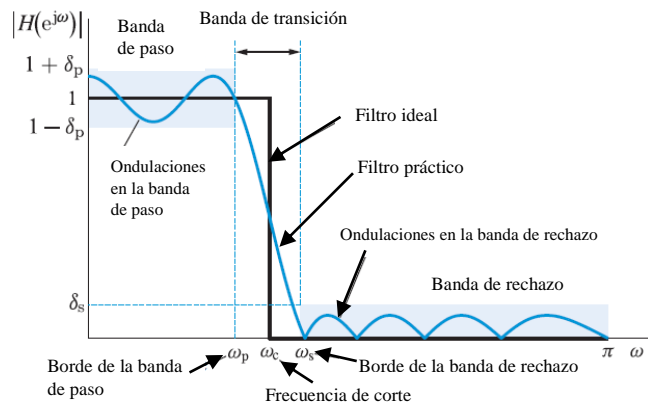


Fig. A.4. Filtro ideal pasa baja y filtro práctico pasa baja [26].

Este filtro tiene una ganancia de 1 a la izquierda de la frecuencia de corte ω_c . Esto significa que la amplitud de las señales en dicho intervalo de frecuencias se multiplica por 1 cuando pasan a través del filtro. A la derecha de ω_c la ganancia del filtro es 0. Esto significa que la amplitud de las señales que se encuentran a la derecha de ω_c multiplicada por 0 y por lo tanto la señal de salida es nula.

Como se explicará más adelante, el filtro ideal es irrealizable. Sin embargo, existen varias aproximaciones al filtro ideal. Éstas se conocen como filtros prácticos o reales. En la Fig. A.4, se ilustra la respuesta en frecuencia de un filtro práctico. A medida que su respuesta se acerca a la del filtro ideal, la pendiente de la transición tiende a infinito y el costo computacional del mismo se eleva.

El intervalo de frecuencias para el cual la señal pasa a través del filtro sin mayores alteraciones se conoce como banda de paso (pass-band) (Fig. A.4).

El intervalo de frecuencias donde la amplitud de la señal es reducida significativamente por el filtro se conoce como banda de rechazo (stop-band) (Fig. A.4).

El intervalo de frecuencias entre la banda pasante y la banda de rechazo es conocida como banda de

transición (transition band) (Fig. A.4). En dicha banda la reducción de la amplitud de la señal cambia rápidamente.

La frecuencia de corte ω_c (cut-off frequency) es el valor de frecuencia para el cual el filtro permitirá o bloqueará el paso de la señal de entrada.

De acuerdo a su respuesta en frecuencia, los filtros se clasifican en:

Filtros pasa-baja. Permiten el paso de las frecuencias por debajo de la frecuencia de corte establecida sin mayores alteraciones a su magnitud (Fig. A.4)

Filtros pasa-alta. Trabajan de manera opuesta al filtro pasa baja, ya que permiten el paso de las frecuencia mayores a la frecuencia de corte establecida (Fig. A.5).

Filtros pasa-banda. Permiten el paso de las frecuencias localizadas entre dos frecuencias de corte (ω_{c1} y ω_{c2}), y rechaza las frecuencias menores a la frecuencia de corte más baja y mayores a la frecuencia de corte más alta (Fig. A.6).

Filtros de rechaza banda. Funciona de manera inversa al filtro pasa-banda, rechaza la banda de frecuencias situada entre dos frecuencias de corte (ω_{c1} y ω_{c2}) y permite el paso del resto de las frecuencias (Fig. A.7).

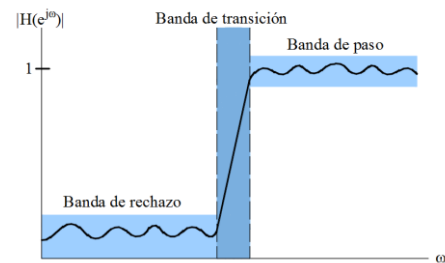


Fig. A.5. Respuesta en frecuencia de filtro pasa alta

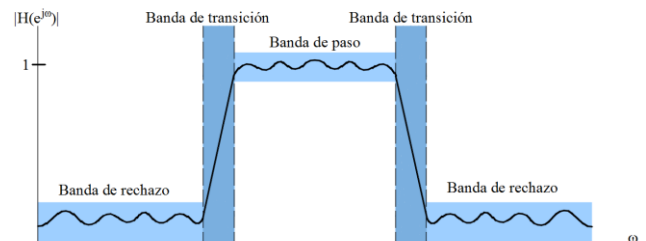


Fig. A.6. Respuesta en frecuencia de filtro pasa-banda

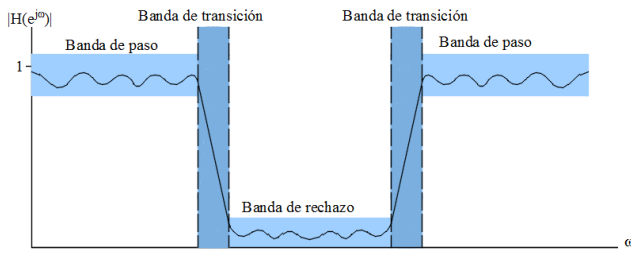


Fig. A.7. Respuesta en frecuencia de filtro rechaza banda

De acuerdo a su respuesta a un impulso, los filtros pueden clasificarse en filtros de respuesta finita al impulso (FIR) o filtros no recursivos, y filtros de respuesta infinita al impulso (IIR) o filtros recursivos, porque parte de la señal de salida es retroalimentada a la entrada.

Dependiendo de la técnica empleada para su diseño, los filtros tipo FIR, pueden provocar ondulaciones (ripples) en la banda de paso de las señales, pero su fase es lineal. Lo contrario sucede con los filtros tipo IIR. Éstos provocan fase no lineal en las señales de salida, pero la respuesta de la banda pasante puede ser más plana [23], [27].

Como se mencionó previamente, el filtro ideal es irrealizable. Por ejemplo, para el caso de un filtro pasa baja ideal, la respuesta en frecuencia esta dada por:

$$H_{lp}(e^{j\omega}) = \begin{cases} e^{-j\omega n_d}, & |\omega| < \omega_c \\ 0, & \omega_c < \omega \leq \pi \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Su correspondiente respuesta al impulso resulta:

$$h_{lp} = \frac{\text{sen}\omega_c(n - n_d)}{\pi(n - n_d)}, -\infty < n < \infty \quad (\text{A.2})$$

Esta respuesta al impulso se ilustra en la Fig. A.8 para $n_d = 0$. Se puede notar que la respuesta al impulso $h_{lp}[n]$ se extiende de $-\infty$ a ∞ , por lo que no se puede estimar su salida utilizando la suma de convolución. La respuesta al impulso $h_{lp}[n]$ tiene transformada de Fourier de tiempo discreto DTFT $H_{lp}(e^{j\omega})$ porque tiene energía finita. Las letras DTFT se refieren a discrete time Fourier transform. Sin embargo, $h_{lp}[n]$ no es absolutamente sumable.

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |h_{lp}[n]| = \infty \quad (\text{A.3})$$

Por lo tanto, el filtro ideal pasa baja es inestable. La secuencia $h_{lp}[n]$ tampoco tiene transformada Z. Por lo anterior no se puede calcular la salida del sistema (filtro ideal pasa baja) de la forma recursiva ni de la no recursiva. Por ello, el filtro ideal pasa baja es inestable

e irrealizable. Esto mismo sucede para el caso de los demás tipos de filtros.

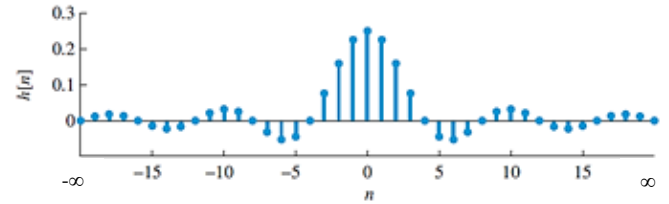


Fig. A.8. Respuesta al impulso de un filtro ideal pasa baja.

Por lo anterior, normalmente se hace uso de filtros prácticos, los cuales se aproximan al filtro ideal. Dentro de lo filtros más comunes se encuentran los filtros Butterworth, Chebyshev, Bessel y Cauer o elíptico.

Respecto a su respuesta en frecuencia, los filtros Butterworth y Bessel no presentan ondas (ripples) en la banda pasante ni en la banda de detención [27]. El filtro Chebyshev presenta ondulaciones en la banda pasante, pero no en la banda de detención, mientras que el filtro elíptico presenta en ambas bandas (pasante y de detención).

Estos cuatro tipos de filtros provocan desfase en las señales, pero el filtro Bessel introduce un retraso constante para todas las frecuencias de la banda pasante. Según [27], esto significa que el desfase que produce en la señal es lineal. Para los otros filtros, el cambio de fase de la señal de salida no es lineal.

Respecto a la atenuación de la banda de transición, la atenuación más pronunciada la presenta el filtro Cauer, seguido por el filtro Chebyshev, el filtro Butterworth, y finalmente, el filtro Bessel que presenta la atenuación menos pronunciada. En la Fig. A.9 se observa de manera esquemática la comparación de la respuesta en frecuencia de los cuatro tipos de filtros mencionados.

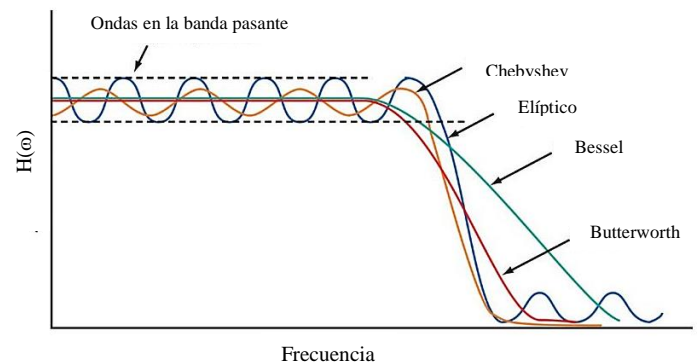


Fig. A.9 Comparación de la respuesta en frecuencia de los filtros Chebyshev, Elíptico, Butterworth y Bessel.

Boore y Bommer [18] señalan que en el filtrado de la señal, es importante la correcta utilización del filtro seleccionado, más que en su elección y que los resultados obtenidos mediante el uso de un tipo de filtro u otro no varía de manera considerable.

La manera en la cual el filtro seleccionado es aplicado a las señales es muy importante. Boore y Bommer [18] destacan básicamente dos opciones: filtrado causal y no causal. La característica distintiva del filtrado no causal, es que no produce distorsiones de fase en la señal. Esto se logra aplicando el filtro a lo largo de la señal de inicio a fin y luego en sentido contrario, desde el final hasta el inicio de la señal. El uso de un tipo de filtrado u otro, incluso con parámetros de filtros similares, produce resultados diferentes en términos de los desplazamientos calculados.

En este trabajo se emplean filtros pasa baja y pasa alta. En todos los casos se utiliza el filtro Butterworth y se aplica de manera no causal. La elección se sustenta en que la mayoría de los métodos analizados para la estimación de desplazamientos hacen uso de este tipo de filtro, y coinciden en la necesidad de un filtrado que no cause distorsiones de fase.

La importancia de los filtros en el procesamiento de las señales y en la estimación de desplazamientos, radica en que permiten reducir la amplitud de las frecuencias no deseables de una señal causadas por errores en el registro o por ruido. Los filtros pasa alta normalmente son empleados para el ajuste de línea base de la señal. En la Fig. A.10 se observa el registro de velocidad estimada para una prueba en el puente vehicular. Es claro que la señal presenta distorsión de línea base. En la Fig. A.11 se muestran el efecto que provoca en la línea base de la señal la aplicación de un filtro pasa alta.

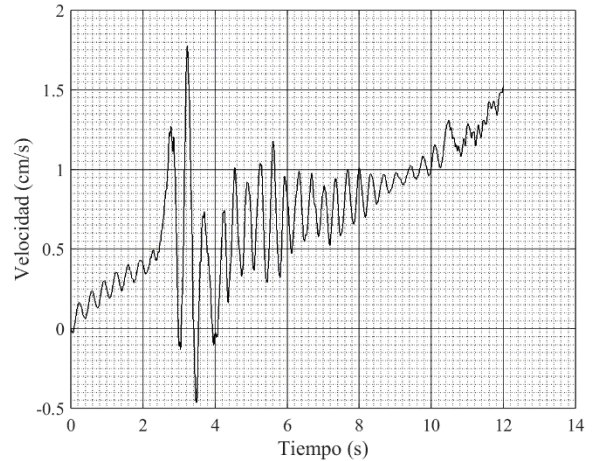


Fig. A.10. Registro de velocidad estimada para una prueba del puente vehicular, con una clara distorsión de la línea base.

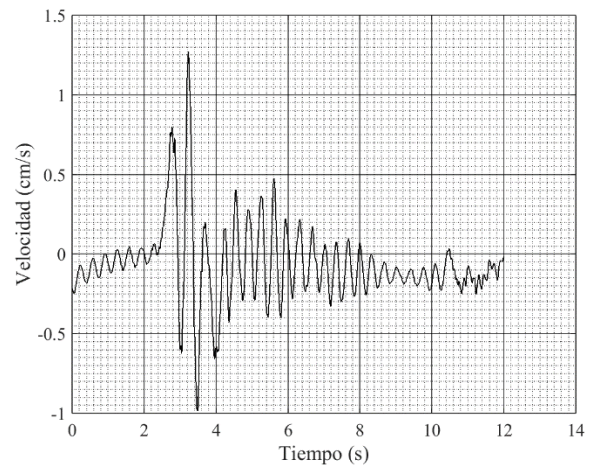


Fig. A.11. Registro de velocidad estimada corregida por línea base mediante la aplicación de un filtro pasa alta.

Los filtros pasa baja son empleados para la reducción de las frecuencias altas que impiden visualizar las señales. El efecto que provoca el filtrado pasa baja en las señales se observa claramente en la Fig. A.12. Debido al contenido de altas frecuencias en la señal original es difícil la lectura de los datos. Una vez filtrada, presenta un comportamiento más suave y la lectura de los datos se puede realizar sin dificultad.

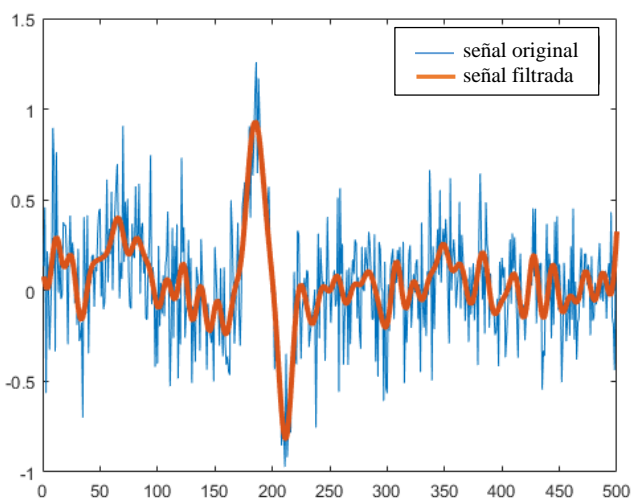


Fig. A.12. Comparación entre señal con ruido de alta frecuencia y señal filtrada

Antes de aplicar un filtro pasa alta a la señal, se debe tener presente que las bajas frecuencias de una señal corresponden a los desplazamientos estáticos y cosísmicos. Si se aplican filtros pasa alta para el ajuste de línea base, los desplazamientos estáticos y cosísmicos no podrán ser estimados y el desplazamiento al final del registro obtenido resultará cercano a cero.

Según Boore y Bommer [18], para un filtrado exitoso, es importante la selección de las frecuencias de corte a emplear. Estas se deben elegir de modo que más allá de la frecuencia seleccionada la relación/razón señal/ruido resulte inaceptable. Este tema se aborda en la siguiente sección.

A.2. Ruido en las señales

En esta sección se presentan conceptos básicos sobre ruido. Según Saeed [28] el ruido puede ser definido como una señal no deseada que interfiere con la comunicación y medición de la señal que se desea conocer. Se describen las principales fuentes que lo producen, así como el procedimiento realizado y los resultados obtenidos para la selección de las frecuencias de corte que se utilizan para el filtrado de las señales. Las frecuencias de corte se seleccionaron para cada tipo de prueba (armónica, peatonal, vehicular y sísmica). Dicho procedimiento se realizó a través del análisis del ruido presente en las señales.

A.2.1. Generalidades del ruido

Las mediciones experimentales nunca son perfectas, incluso con el uso de modernos y sofisticados instrumentos de medición. Los registros obtenidos pueden contener distorsiones o errores que en muchas

ocasiones no son apreciables a simple vista. Por ejemplo, las distorsiones de baja frecuencia en las señales de aceleración son más obvias en las señales obtenidas de su integración (velocidad y desplazamiento), ya que tienden a amplificarse causando errores de línea base. Algunos errores presentes en los registros de aceleración, velocidad o desplazamiento son causados por el ruido. Para eliminar o reducir estos errores, algunas metodologías proponen el uso de filtros.

La identificación de las frecuencias de corte de las frecuencias de corte que deben emplearse para el filtrado de la señales puede realizarse a partir de varios procedimientos. En algunos casos las frecuencias de corte pueden proponerse en base a la experiencia. Sin embargo, es recomendable realizar un análisis del ruido contenido en los registros, de modo que se puedan eliminar o reducir la mayor cantidad de frecuencias que no son de interés para el estudio. La selección de las frecuencias de corte tiene mayor relevancia para el filtrado pasa alta, ya que es utilizado en el ajuste de la línea base de los registros y provoca mayor efecto en la señal.

Es claro que lo que puede ser considerado ruido para un analista, para otro analista puede ser parte fundamental de su estudio. Por ejemplo, si un investigador sólo desea estudiar el efecto de las vibraciones en un puente debido al paso vehicular entonces, la vibración ambiental del puente, la cual está incluida en la señal registrada, se considera como ruido. Por otro lado, para el investigador que desea estudiar las propiedades dinámicas de un puente a partir de la vibración ambiental las fuentes de ruido serán otras (ruido instrumental, ruido electrónico, etc).

Es importante señalar que en un registro de vibración ambiental, la mayor parte de la señal se debe precisamente a la vibración de baja amplitud de la estructura. Sin embargo, dicha señal también tendrá fuentes de ruido diferentes.

Para este estudio, donde se calculan los desplazamientos a partir de registros de aceleración ocasionados por el tráfico peatonal, vehicular, ante la excitación armónica y sísmica, el ruido es la parte de la señal que no se debe a estas fuentes de excitación. En este caso, la vibración ambiental está considerada como parte del ruido de la señal. De este modo, la señal del ruido en los registros se obtuvo de su pre-evento.

El ruido en sí mismo es una señal que transmite información en relación a las fuentes que lo producen y el medio ambiente en el que se propaga.

Los tipos y fuentes de ruido son muy variados e incluyen entre otros [28]: (i) ruido electrónico, (ii) ruido acústico, (iii) ruido electromagnético y (iv) distorsión del canal de comunicación. Para fines de este trabajo se destaca el ruido acústico, el cual es emanado por el movimiento, vibración o fuentes de colisión, tales como las maquinarias, vehículos en movimiento, el viento y la lluvia.

O'Haver [29] también destaca que algunas fuentes de ruido en las señales registradas se deben a las vibraciones presentes en la estructura (edificio, puente, etc), al redondeo a cierta cantidad de dígitos de los datos adquiridos (ruido de digitalización), y al error humano, que puede llegar a ser un factor importante, e involucra la manipulación, ajuste, grabación, calibración y el control de los instrumentos.

Existen varias maneras de analizar y caracterizar el ruido en las señales. Von Haartman y Östling [30] plantean que la manera estándar de analizar el ruido es en el dominio de la frecuencia, porque genera más información de sus propiedades.

Según Saeed [28], el ruido también puede ser clasificado de acuerdo a su función de autocorrelación y al espectro de densidad de potencia en: (i) ruido blanco, (ii) ruido blanco de banda limitada, (iii) ruido de banda angosta, (iv) ruido coloreado, (v) ruido impulsivo o (vi) ruido de pulsos transitorios. Las características particulares de cada uno de estos tipos de ruido se describen con detalle en [28].

Al analizar la función de autocorrelación y el espectro de densidad de potencia de las señales de ruido (pre-evento de las señales medidas) de los cuatro tipos de pruebas (armónicas, en puente peatonal, en puente vehicular y en la mesa vibradora), se observó el mismo comportamiento, similar al ruido blanco de banda limitada de acuerdo a las características señaladas por Saeed [28].

En la Fig. A.13 se ilustra la función de autocorrelación de una señal registrada durante una medición de vibración ambiental. Se observa que su forma es similar a la función sinc = $\text{sen}(x)/(x)$. En la Fig. A.14 se muestra el espectro de densidad de potencia para una señal de vibración ambiental registrado en el puente vehicular. Se observa que el espectro tiende a un comportamiento plano en una banda limitada.

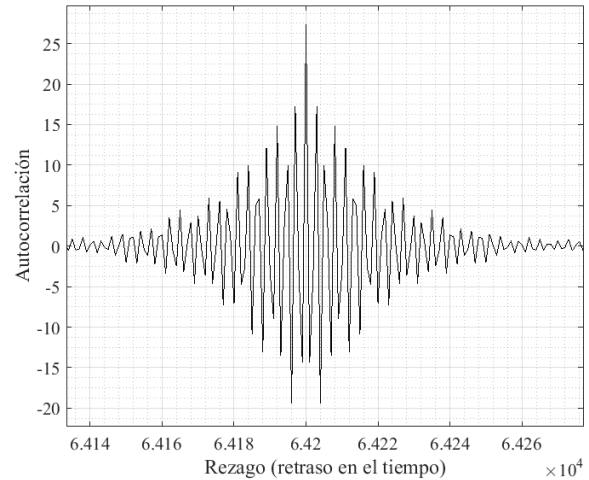


Fig. A.13. Función de autocorrelación de la señal de ruido registrada, se observa que la función se asemeja a la función sinc = $\text{sen}(x)/x$.

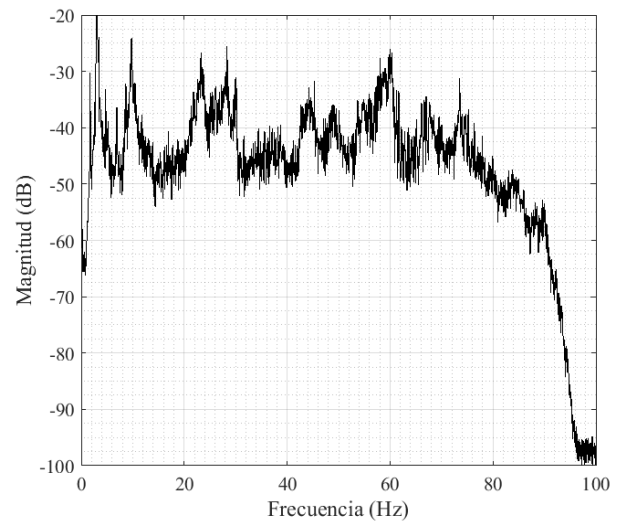


Fig. A.14. Espectro de densidad de potencia de la señal de ruido registrada en el puente vehicular.

A.2.2. Tratamiento del ruido

Para la reducción del ruido de alta frecuencia en las señales, se aplicó un filtro pasa alta con frecuencia de 25 Hz de corte, de acuerdo a lo recomendado por autores como Trifunac y Lee [9]. Se observa que la señal no es tan sensible a la elección de la frecuencia de corte para este tipo de filtro, como en el caso del filtrado pasa alta, donde una pequeña variación en la frecuencia de corte tiene repercusiones grandes en la señal.

Para la identificación de las frecuencias de corte con las que se aplica el filtro pasa alta se toma en cuenta los criterios establecidos por Boore y Bommer [18].

1. Comparación del espectro de amplitudes de Fourier (Fourier Amplitude Spectrum, FAS) del registro del movimiento contra un FAS correspondiente al ruido. Con el fin de determinar en qué intervalo de frecuencias se encuentra el ruido y, por consiguiente, establecer la frecuencia de corte para eliminarlo del registro.
2. Inspección visual de las velocidades y desplazamientos obtenidos al integrar la aceleración filtrada. Se debe analizar si los resultados son o no razonables físicamente.

El procedimiento empleado en este trabajo consistió en primer lugar, en la identificación de las bandas de frecuencia en las que se concentra la señal del ruido y las del evento mediante el uso de la transformada de Fourier. Éstas se compararon con la intención de identificar una diferencia marcada entre la ubicación de ambas bandas, y de esta manera seleccionar la frecuencia de corte a emplear. Sin embargo, se observó que en todos los casos el ruido se encuentra distribuido en las mismas frecuencias de la señal del evento, por lo que la frecuencia de corte no pudo ser identificada de esta manera. En las Fig. A.15 y Fig. A.16 se observan los espectros de Fourier para el ruido y para la señal registrada en las pruebas de la mesa vibradora, respectivamente.

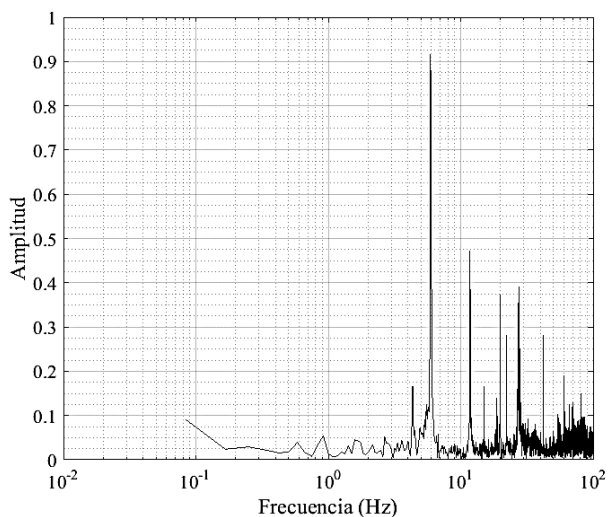


Fig. A.15. Espectro de amplitudes de Fourier de la señal de ruido registrada en las pruebas de la mesa vibradora.

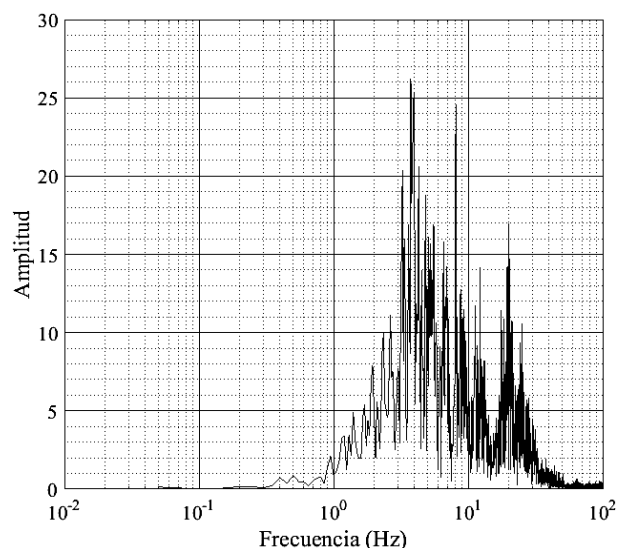


Fig. A.16. Espectro de amplitudes de Fourier de la señal registrada en las pruebas de la mesa vibradora durante el sismo al 100% de su intensidad.

Al comparar los espectros de amplitudes de Fourier (FAS) de la señal medida con los correspondientes a la señal de ruido obtenida del pre-evento del registro y se calcula el cociente entre la FAS de la señal y la FAS del ruido (Fig. A.17). La frecuencia de corte se elige usando una razón señal-ruido de 2, de acuerdo a lo recomendado por Boore y Boomer [18] y por Shakal *et al* [31].

En la Tabla A.1 se muestran los valores de las frecuencias de corte obtenidas mediante la razón señal-ruido. Nótese que para el caso de las pruebas cuasi-armónicas y para el registro del sismo de Tohoku no fue posible obtener las frecuencias de corte por este procedimiento. En estos casos se empleó la frecuencia de corte sugerida por Trifunac y Lee [32] 0.07 Hz.

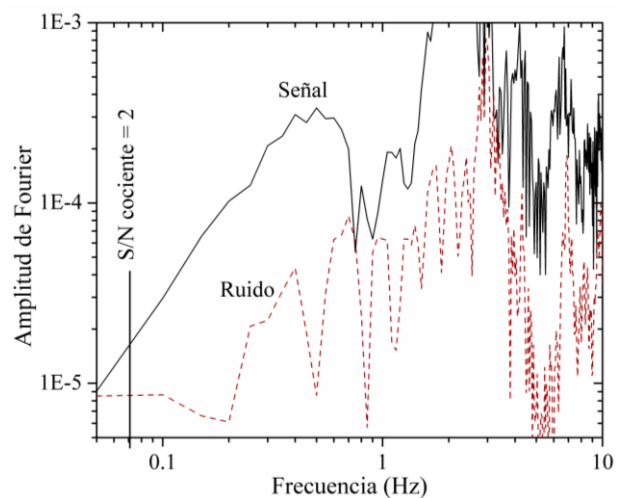


Fig. A.17. Amplitudes de Fourier para señales de aceleración y ruido.

Tabla A.1.

Frecuencias de corte seleccionadas para filtrado pasa alta mediante la razón señal-ruido = 2.

Tipo de prueba	Frecuencia de corte (Hz)
Cuasi-armónicas	No se logró obtener
Mesa vibradora	0.12
Puente peatonal	0.14
Puente vehicular	0.06
Sismo de Tohoku	No se logró obtener

Finalmente, se inspecciona visualmente los registros de velocidad y desplazamiento obtenidos de la doble

Tabla A.2.

Frecuencias de corte en Hz seleccionadas para filtrado pasa alta

Método	Señal cuasi-armónica	Mesa vibradora	Puente peatonal	Puente vehicular	Sismo de Tohoku
Trifunac y Lee	0.07	0.12	0.14	0.06	0.07
Converse y Brady	0.10	0.20	0.20	0.07	0.07
Chiu	0.20	0.20	0.20	0.20	0.07
Boore	0.15	Ninguna	Ninguna	Ninguna	Ninguna

A.3. Técnicas para el procesamiento de los registros

En esta sección se describen las principales técnicas para el procesamiento de señales empleadas por los métodos de estimación de desplazamiento que se utilizan en este trabajo.

Los métodos para estimación de desplazamientos usados se detallan en los apéndices posteriores.

A.3.1. Ajuste de línea base en los registros

El error de línea base descrito en la sección A.1.2 es uno de los mayores problemas encontrados en los registros de aceleración porque provocan velocidades y desplazamientos irreales. Por lo tanto, es necesario el uso de procedimientos que permitan ajustar la línea base de los registros. Los más comunes consisten en el uso de filtros pasa alta, o en su ajuste con la ayuda de una o más líneas base que pueden ser rectas o de mayor orden, y que son luego sustraídas de la traza de aceleración y/o velocidad.

integración de las señales de aceleración filtrada con la frecuencia de corte seleccionada, para juzgar si los desplazamientos calculados son físicamente razonables o no. En el caso en que los desplazamientos obtenidos fueron irreales, se seleccionó otra frecuencia de corte.

Cabe mencionar que para algunos métodos de estimación de desplazamiento, las frecuencias de corte seleccionadas no conducen a buenos resultados, por lo que en esos casos se adoptan otras frecuencias de corte. En la Tabla A.2 se observan las frecuencias de corte seleccionadas para el filtro pasa alta para cada método y prueba.

En esta sección se describen los procedimientos de ajuste de línea base usados por los métodos de estimación de desplazamiento analizados.

Cabe señalar que a lo largo de este trabajo se empleó el concepto de “ajuste de línea base” en lugar de “corrección de línea base”. Esto debido a que usualmente las condiciones iniciales de los registros de movimientos son desconocidas. Por lo tanto, el movimiento real, dentro del intervalo de periodos de interés para la ingeniería, no puede determinarse de manera inequívoca [18].

La manera más común y sencilla de ajustar la línea base de un registro es restando de todo el registro la media de la porción del pre-evento. Este tipo de ajuste es usualmente conocido como corrección o ajuste de orden cero [14].

En la Fig. A.18 se observan las aceleraciones registradas durante una de las pruebas en un puente vehicular. En dicho registro se observa el error de línea base ya que el nivel de referencia se sitúa en 5 cm/s^2 en lugar de ubicarse en cero. En la Fig. A.19 se ilustra el

efecto que provoca el ajuste de orden cero en la señal. Su nivel de referencia ahora se localiza en cero.

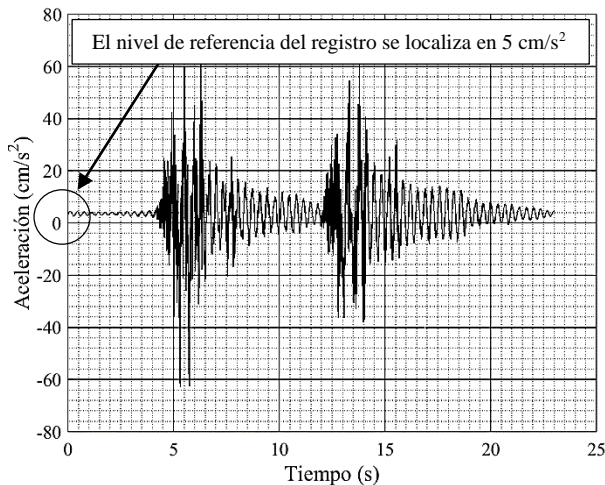


Fig. A.18. Registro de aceleración correspondiente al paso de dos camiones durante las pruebas en el puente vehicular, en él se hace evidente el error de línea base.

Boore [14] señala que, al realizar este ajuste en la aceleración, se garantiza que el valor al inicio del registro de velocidades estimadas sea cero. Esto se ilustra en la Fig. A.20, donde se observan las velocidades estimadas a partir de las aceleraciones de la Fig. A.19.

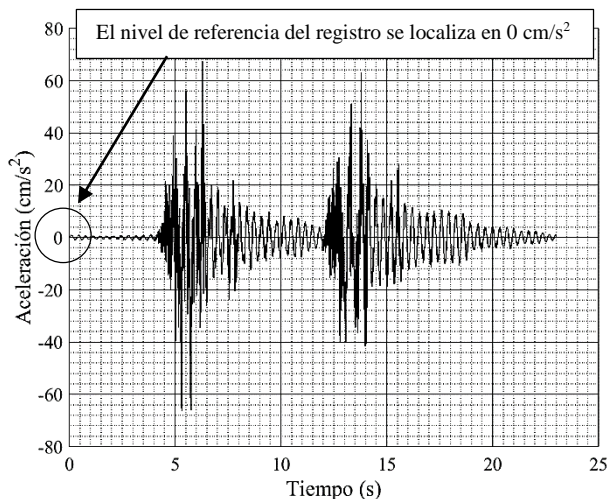


Fig. A.19. Registro de aceleraciones luego del ajuste de orden cero.

En la mayoría de los casos, el nivel de referencia del registro de aceleraciones no es constante. Normalmente éste presenta una tendencia lineal, parabólica u otra. Sin embargo, esto es difícil de observar en el registro de las

aceleraciones, ya que por lo general el desfaseamiento en este registro no es muy pronunciado.

Al integrar las aceleraciones corregidas con la media del pre-evento se pueden observar tendencias lineales o de mayor orden de la línea base de las velocidades estimadas (Fig. A.20), lo cual sugiere que el ajuste de orden cero no es suficiente, por lo que se debe usar otro tipo de ajuste de línea base.

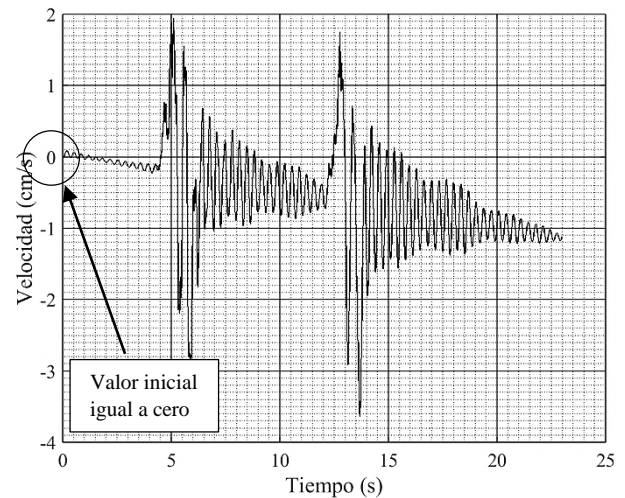


Fig. A.20 Registro de velocidades estimadas a partir del registro observado en la Fig. A.19 en el se evidencia que la corrección de orden cero no es suficiente en algunos casos.

Otro tipo de ajuste de línea base empleado consiste en estimar una función lineal o de mayor orden que se ajuste a la tendencia de la línea base del registro. Esta función es normalmente estimada por medio de mínimos cuadrados y es sustraída del registro. Este tipo de ajuste de línea base se usa para reducir los errores debidos a los valores iniciales de la velocidad. Cabe recordar que el ajuste de mínimos cuadrados es una técnica cuyo objetivo es encontrar una función que mejor se aproxime a un conjunto de datos.

Algunos de los métodos para estimar desplazamientos a partir de aceleraciones que utilizan esta forma de ajuste de línea base son los propuestos por Converse y Brady [12] así como el de Chiu [13]. Es importante notar que Converse y Brady [12] sugieren ajustar sólo el registro de las aceleraciones, mientras que Chiu [13] ajusta la línea base tanto en la aceleración como en la velocidad.

En la Fig. A.21 se puede observar la tendencia de la línea base de las velocidades estimadas de un registro de aceleración obtenido de las pruebas de la mesa vibradora y su función de ajuste lineal. En la Fig. A.22 se observa el registro de velocidades corregido mediante la sustracción de la función de ajuste.

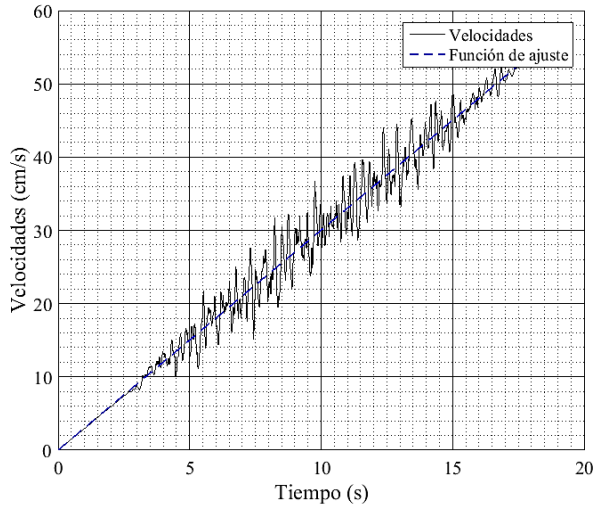


Fig. A.21 Registro de velocidades estimadas y su función de ajuste lineal

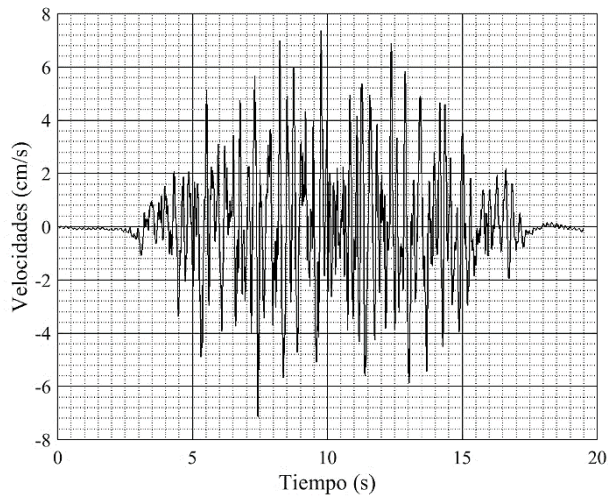


Fig. A.22. Registro de velocidades corregidas por línea base mediante una función lineal de ajuste.

Algunos de los métodos de estimación de desplazamiento analizados en este trabajo hacen uso de los dos tipos de ajuste de línea base descritos anteriormente. Éstos son los propuestos por Darragh *et al.* [16] y Boore *et al.* [24]. En ambos métodos se utiliza el ajuste de orden cero para la porción del pre-evento de la aceleración, mientras que la línea base del evento y post-evento se ajusta con el siguiente procedimiento:

Se integran las aceleraciones para obtener el registro de velocidades.

Se selecciona la función lineal o cuadrática que mejor se ajusta a la línea base del registro de velocidades (evento y post-evento).

En lugar de sustraer la función de ajuste de la velocidad, ésta es derivada y removida del registro de aceleraciones.

En la Fig. A.23 se observa la porción del evento y post evento de un registro de velocidades estimadas así como la función de ajuste cuadrático de dicha porción.

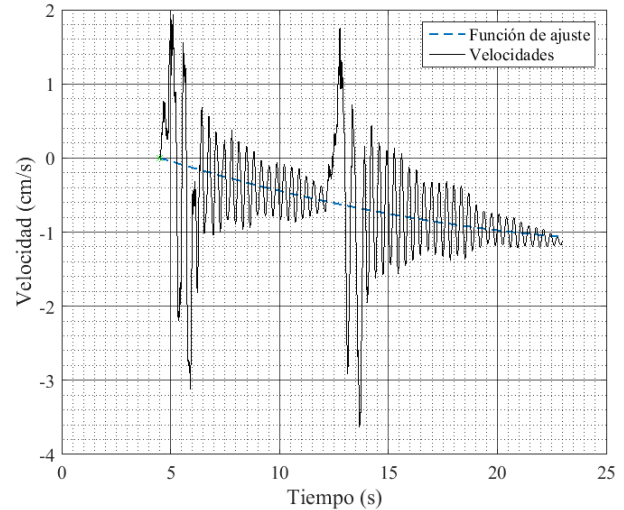


Fig. A.23. Registro de velocidades estimadas a partir de las aceleraciones registradas en el puente vehicular, y su función de ajuste.

En la Fig. A.24 se observa el registro de aceleraciones ajustado mediante la corrección de orden cero de su pre-evento y de la sustracción de la función de ajuste cuadrática mostrada en la Fig. A.23.

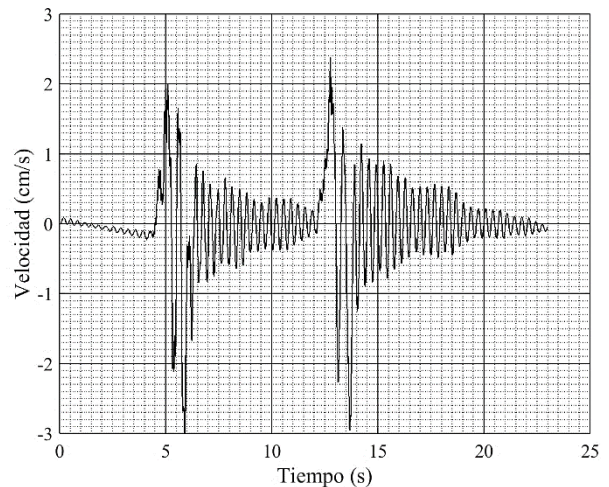


Fig. A.24. Registro de velocidades corregidas por línea base mediante el método de Boore *et al.*

Otra forma para el ajuste de línea base en los registros consiste en la sustracción de funciones bilineales continuas que son estimadas a partir de

ciertos parámetros de la señal como lo sugieren Wang et al. [22]. En la Fig. A.25 se observa el registro de velocidad estimado para el sismo de Tohoku, estación FKTH05 E-W y la función bilineal de ajuste calculada mediante el método de Wang *et al.* En la Fig. A.26 Se observa el registro ajustado mediante la sustracción de la función bilineal.

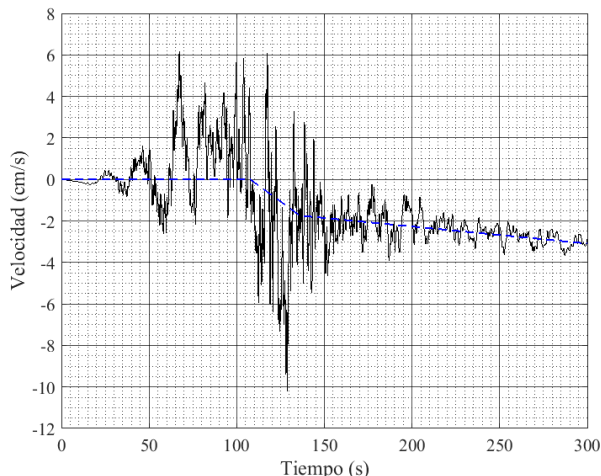


Fig. A.25. Registro de velocidad estimada para el sismo de Tohoku, estación FKTH05 E-W, y función de ajuste bilineal continuo calculada con los parámetros propuestos por Wang et al.

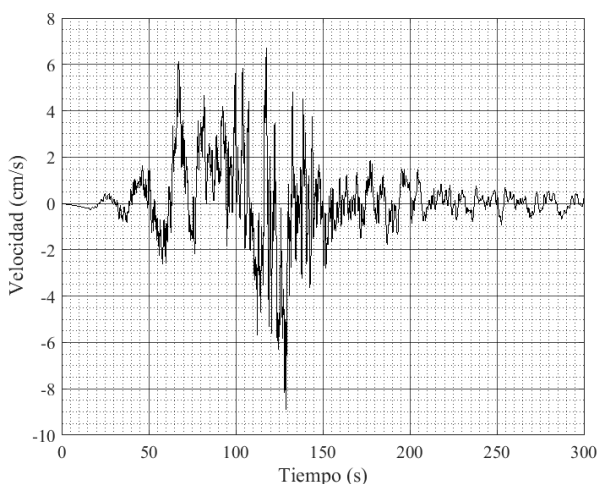


Fig. A.26. Registro de velocidad estimada ajustada por línea base mediante función de ajuste bilineal.

El filtro pasa alta también se utiliza como una herramienta para el ajuste de línea base. Autores como Trifunac y Lee [9], Converse y Brady [12], Chiu [13] y Boore [17] sostienen que las distorsiones de línea base se deben a las bajas frecuencias presentes en los registros de aceleración que tienden a amplificarse durante el proceso de integración y que, debido a ello, son más notables en los registros de velocidad y desplazamiento. Basándose en lo anterior, sugieren el

uso de filtros pasa alta, y señalan que mediante la selección de una adecuada frecuencia de corte, éstos pueden reducir considerablemente la amplitud de las bajas frecuencias de la señal evitando las distorsiones de línea base.

El método propuesto por Trifunac y Lee [9] filtra las señales de aceleración, velocidad y desplazamientos. En cambio el de Converse y Brady [12], al igual que el de Chiu [13], filtran únicamente las señales de aceleración. En la Fig. A.10 se observa la velocidad estimada para una prueba en el puente vehicular. En ella se observa claramente una distorsión de línea base con una tendencia lineal. En la Fig. A.11 se muestran el efecto que provoca en la línea base de la señal la aplicación de un filtro pasa alta.

Es importante destacar que debido a que los filtros pasa alta reducen las frecuencias bajas de las señales de desplazamientos que en el dominio del tiempo se reflejan como desplazamientos cosísmicos o estáticos, su uso no permite estimarlos y provoca que los desplazamientos al final del registro estimado tiendan a cero.

A.3.2. Adición de ceros (*pads*) en la señal

Los *pads* son segmentos de ceros que se agregan al principio y/o al final del registro de aceleración previo al filtrado pasa alta y pasa baja de la señal. La longitud de *pads* que se agrega al registro está relacionada al orden del filtro a emplear y a la frecuencia de corte usada.

Según Boore [17], la necesidad del uso de *pads* en la señal de aceleración radica en que los programas empleados para el filtrado de las señales en el dominio de la frecuencia hacen uso de la transformada discreta de Fourier. Para ello se asume que la serie de tiempo es periódica, y la longitud de los datos es igual a una potencia de dos. Si la longitud de los datos es menor, éstos se extienden con ceros hasta la longitud requerida. Normalmente estas suposiciones son realizadas implícitamente por el programa de computadora, pero si la longitud de ceros que se agregan al registro no es suficiente, o si los segmentos de ceros se remueven antes de concluir el procesamiento de los datos incluyendo el proceso de doble integración, los registros de desplazamiento obtenidos presentan distorsiones. Este tipo de distorsiones se conocen como “wrap-around pollution”.

Por lo anterior, Converse y Brady [12], así como Boore [17], proponen la adición manual de segmentos de ceros y la retención de éstos durante los procesos subsiguientes como la doble integración de las señales.

Converse y Brady [12] sugieren que la longitud total de ceros (T_{pad}) que se debe añadir se calcule con la siguiente fórmula

$$T_{pad} = \frac{1.5 n}{f_c} \quad (\text{A.4})$$

donde:

n = orden del filtro Butterworth

f_c = frecuencia de corte empleada.

La mitad de T_{pad} se añade al inicio del registro y la otra mitad al final.

El uso de *pads* en los registros de aceleración conduce a desplazamientos igual a cero tanto al inicio como al final de los registros. Esto se puede observar a mayor detalle en los resultados mostrados en el Apéndice D para el método de Converse y Brady, donde se hace uso de los *pads*. No es conveniente hacer uso de *pads* en los casos donde se busca estimar desplazamientos permanentes (cosísmicos) diferentes de cero.

En la Fig. A.27 se observa una señal de aceleración previo a la adición de *pads*. En la Fig. A.28 se observa la misma señal con *pads* con longitud igual a 19 seg en cada extremo. El efecto que provoca en las señales de desplazamiento la adición de *pads* en la aceleración se muestra en las Fig. A.29 y Fig. A.30. En la Fig. A.29 se observan los desplazamientos obtenidos a partir de la señal de aceleración sin *pads*. Es claro que dichos desplazamientos son irreales. En la Fig. A.30 se observan los desplazamientos obtenidos a partir de la señal de aceleración con *pads*. En este caso los desplazamientos no muestran errores de línea base y los valores obtenidos son similares a los reales.

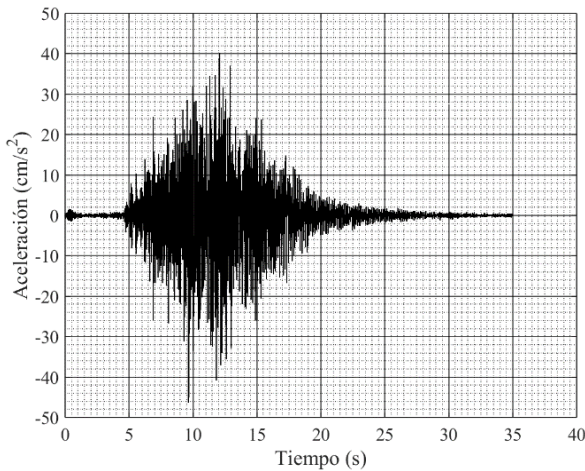


Fig. A.27. Señal de aceleración correspondiente a una de las mediciones realizadas en el puente peatonal.

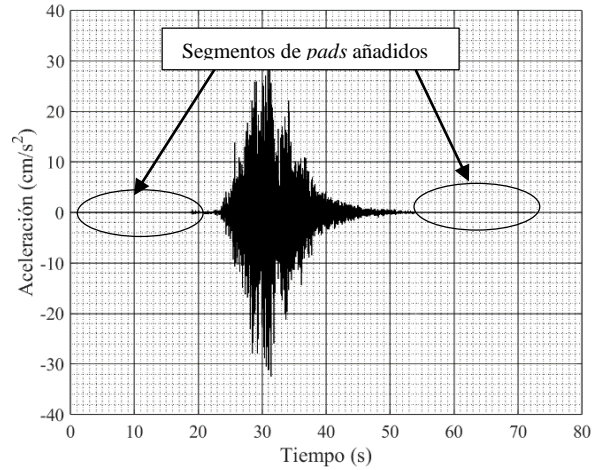


Fig. A.28. Señal de aceleración registrada en el puente peatonal con *pads* en ambos extremos.

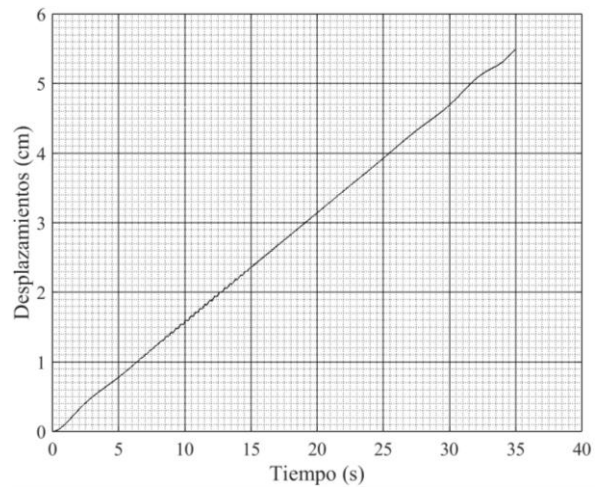


Fig. A.29. Desplazamientos obtenidos a partir de la señal sin *pads* de la Fig. A.27.

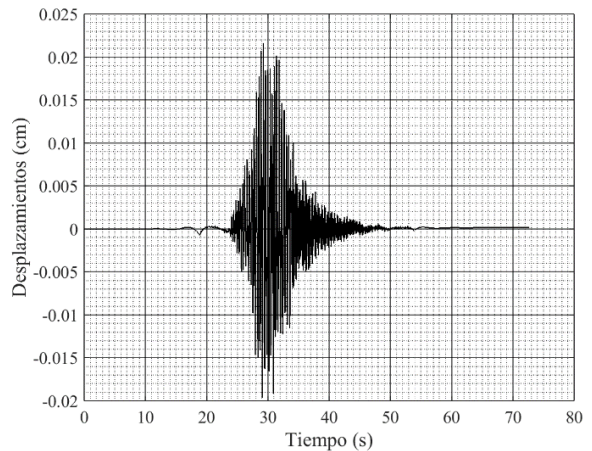


Fig. A.30. Desplazamientos obtenidos a partir de la señal de aceleración de la Fig. A.28.

A.3.3. Filtrado pasa baja

En algunos casos las señales registradas contienen ruido de alta frecuencia que dificultan la lectura de los datos deseados, como se observa en el registro azul de la Fig. A.12. Para eliminar este problema, se utilizan filtros pasa baja, como se explicó en la sección A.1.3, para disminuir/suavizar la amplitud de la señal en las frecuencias ubicadas por encima de una frecuencia de corte seleccionada. El efecto que produce el filtro pasa baja en una señal se ilustra en la Fig. A.12. Se puede observar que la señal filtrada muestra un comportamiento más suave.

Un dato importante es que normalmente las señales no sufren alteraciones drásticas en su forma con pequeñas variaciones de la frecuencia de corte elegida, únicamente se suaviza su forma. Caso contrario a lo que sucede en el caso de los filtros pasa alta, donde un pequeño cambio en la frecuencia de corte usada puede tener repercusiones grandes en la forma de la señal.

A.3.4. Integración numérica

En estudios experimentales, como los realizados en este trabajo, no se dispone de una función analítica que describa el fenómeno medido. Normalmente se obtienen series de datos de las mediciones registradas (en este caso aceleraciones) con cierta frecuencia de muestreo. En estos casos no es posible obtener las señales de velocidad y desplazamiento por medio de procedimientos de integración analítica. Por ello surge la necesidad de emplear técnicas de integración numérica.

Existen varios métodos para llevar a cabo la integración numérica. Todos ellos hacen uso de fórmulas para calcular la integral a partir de valores discretos del integrando. Los métodos pueden dividirse en dos grupos: los métodos abiertos y los métodos cerrados.

Los métodos cerrados usan los valores extremos del intervalo a integrar, mientras que en los métodos abiertos, los valores extremos del intervalo a integrar (límites de integración) no son empleados porque normalmente no se conocen.

Los métodos de integración numérica más empleados son las fórmulas de integración de Newton-Cotes. Estos son métodos de integración cerrada y consisten en sustituir los datos tabulados, por un polinomio de aproximación $f_n(x)$, que es más fácil de integrar. El polinomio es de la forma:

$$f_n(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_{n-1}x^{n-1} + a_nx^n \quad (\text{A.5})$$

donde:

$n =$ grado del polinomio.

Dentro de los métodos de Newton – Cotes están la regla del trapecio (utiliza un polinomio de primer orden), la regla de Simpson de 1/3 (utiliza un polinomio de segundo orden) y la regla de Simpson de 3/8 (utiliza un polinomio de tercer orden).

La técnica de integración empleada en este trabajo es la regla de 1/3 de Simpson. Esta técnica se eligió debido a que es más exacta que la regla del trapecio y su error es del mismo orden que la regla de Simpson de 3/8. Además, la regla de Simpson de 1/3 es más sencilla.

En la regla de Simpson de 1/3 se emplea un polinomio de segundo orden para aproximar el integrando. Los coeficientes del polinomio de segundo orden pueden ser determinados a partir de tres puntos (Fig. A.31). Los tres puntos empleados son los puntos extremos del segmento a integrar $x_0 = a$, $x_2 = b$, y el punto medio $x_1 = (a+b)/2$.

Notése que en la imagen $f(x)$ se refiere a la función desconocida, de la cual únicamente conocemos sus valores a cierto intervalo de tiempo (datos tabulados) obtenidos de pruebas experimentales. Estos datos son llamados señales discretas. Finalmente $f_n(x)$ se refiere a la función de aproximación empleada.

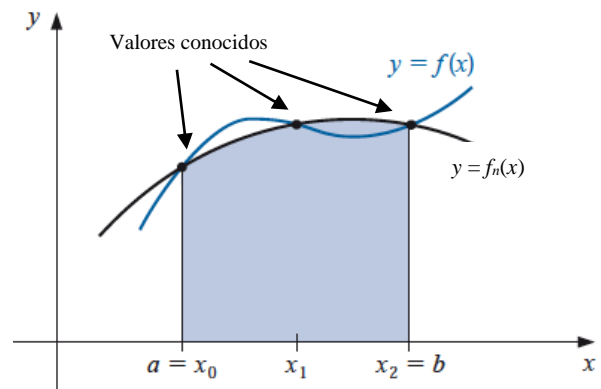


Fig. A.31. Regla de Simpson de 1/3 [33].

La regla de Simpson de 1/3 resulta de integrar el segundo polinomio de Lagrange en el intervalo $[a,b]$, [33], de modo que

$$\int_a^b f(x) dx \approx \int_{x_0}^{x_1} \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} f(x_0) + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} f(x_1) + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)} f(x_2) dx \quad (\text{A.6})$$

Después de la integración se obtiene la regla de Simpson:

$$I = \frac{h}{3} [f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)] \quad (\text{A.7})$$

donde:

$$h = (b - a)/2.$$

Es importante notar que si se desea utilizar este esquema de integración, es necesario conocer tres puntos del intervalo, los puntos conocidos a y b que corresponden a los valores de la señal discreta (datos tabulados) y el valor en el punto intermedio entre a y b . Por medio de interpolación se puede obtener una estimación de este valor como se indica en la siguiente sección. En el caso en que no se desee realizar este procedimiento se puede hacer uso de la regla trapezoidal, ya que ésta sólo requiere conocer los dos valores extremos del intervalo (a y b).

A.3.5. Interpolación de los datos

Como se mencionó previamente, los resultados de mediciones experimentales normalmente sólo conducen a valores en puntos discretos de su variable independiente [34]. En tales casos, los valores de la función $f(x)$ deben ser tabulados para valores discretos de x . El procedimiento de calcular los valores entre los puntos de datos conocidos para $f(x)$ se llama interpolación.

Para llevar a cabo la interpolación, primero se determina un polinomio que conduce a los valores exactos en los puntos conocidos, luego se utiliza el polinomio para calcular los valores en los puntos desconocidos.

En este trabajo la interpolación se utilizó en los siguientes casos:

1. Para ajustar la frecuencia de muestreo de los registros de desplazamiento registrados con LVDTs (256 Hz), los registros de desplazamiento obtenidos de GPS (1 Hz) y los registros de aceleraciones de la mesa vibradora (250 Hz), a la frecuencia de muestreo empleada en este trabajo (200 Hz).
2. Para estimar el valor medio x_2 requerido por la ecuación A.7 durante el proceso de integración. Este procedimiento se realizó ajustando la frecuencia de muestreo de los registros de 200 puntos por segundo a 400 puntos por segundo.

En ambos casos, se emplearon *splines cúbicos*.

La técnica de splines cúbicos es un tipo de interpolación seccional, en la que un polinomio de tercer orden se usa en cada uno de los intervalos del registro entre un valor conocido y otro (Fig. A.32).

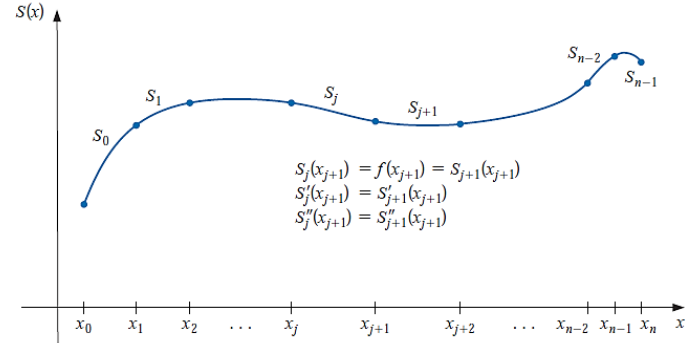


Fig. A.32 Spline cúbicos [33].

Los splines cúbicos deben cumplir las siguientes condiciones:

- a. Debe existir un polinomio cúbico S_j en cada subintervalo $[x_j, x_{j+1}]$ para cada $j = 0, 1, \dots, n - 1$;
- b. $S(x_j) = f(x_j)$ para cada $j = 0, 1, \dots, n$;
- c. $S_j(x_{j+1}) = S_{j+1}(x_{j+1})$ para cada $j = 0, 1, \dots, n - 2$;
- d. $S'_j(x_{j+1}) = S'_{j+1}(x_{j+1})$ para cada $j = 0, 1, \dots, n - 2$;
- e. $S''_j(x_{j+1}) = S''_{j+1}(x_{j+1})$ para cada $j = 0, 1, \dots, n - 2$;

Estas condiciones aseguran la continuidad de la función resultante y evitan los cambios abruptos de pendiente entre un intervalo y otro. Esto genera funciones más suaves que describen de mejor manera el comportamiento de las estructuras.

Durante las pruebas de vibración armónica también fue necesario interpolar los registros de aceleración, para obtener las aceleraciones en el mismo punto de los desplazamientos (medidos con LVDTs).

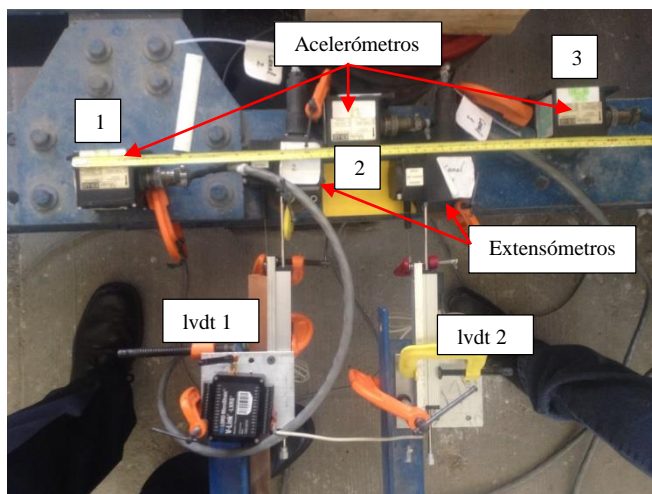


Fig. A.33. Disposición de acelerómetros, extensómetros de hilo y lvdt's empleados en las pruebas de excitación armónica (péndulo de pruebas).

La interpolación se realizó, debido a que por motivos de espacio (Fig. A.33) no fue posible colocar los acelerómetros y los LVDTs en el mismo punto de la plataforma.

Debido a que el comportamiento que presenta la plataforma del péndulo de pruebas es lineal, para este caso no fue necesario el uso de *splines cúbicos* y se utilizó interpolación lineal.

El registro de aceleraciones se estimó de la siguiente manera:

$$y(t) = \frac{(x-x_2)}{(x_1-x_2)} y_1(t) + \frac{(x-x_1)}{(x_2-x_1)} y_2(t) \quad (\text{A.8})$$

donde x_1 y y_1 corresponden a la ubicación del acelerómetro 1 y a sus aceleraciones registradas respectivamente. Los valores de x_2 y y_2 corresponden a la ubicación del acelerómetro 2 y a sus aceleraciones registradas. Finalmente x y y corresponden a la ubicación del lvdt 1 y a la amplitud de las aceleraciones que se desea estimar respectivamente.

APÉNDICE B. MÉTODO DE TRIFUNAC Y LEE

En este apéndice se describe la última versión del método propuesto por Trifunac y Lee (1990) [9] para el procesamiento de registros de aceleración y estimación de desplazamientos.

Se presenta un archivo script de Matlab® en donde se puede observar el esquema de procesamiento seguido, y las instrucciones para su implementación. El script incluye instrucciones para la impresión de las gráficas y el cálculo de la transformada de Fourier, aunque éstos no son parte de la metodología. Esto aplica para todos los métodos estudiados en este trabajo.

También, se presentan algunos ejemplos de su aplicación para mostrar la bondad del método, en registros de aceleración de diferentes tipos de excitación. En particular se presentan dos ejemplos de pruebas con vibración armónica, dos de pruebas con vibración vehicular, dos de pruebas con vibración peatonal, dos de pruebas con un sismo sintético simulado con diferentes intensidades en la mesa vibradora de la UNAM, y dos con registros del sismo de Tohoku Japón de marzo de 2011.

B.1. Descripción

El algoritmo que se presenta corresponde a la propuesta de Trifunac y Lee de 1990, para el procesamiento de registros de aceleraciones, y la estimación de desplazamientos. Su método fue enfocado al tratamiento de registros sísmicos. Las primeras propuestas de este método se describen brevemente en los párrafos siguientes. Posteriormente se describe la propuesta de 1990.

El primer algoritmo propuesto por Trifunac y Lee, 1973 [35], fue desarrollado para un esquema de digitalización manual de los registros sísmicos. E involucra los siguientes pasos que Trifunac ordenó en tres volúmenes. En el volumen I, las ordenadas (y) de cada trazo son escaladas a unidades de aceleración (cm/s^2), y las abscisas (x) son escaladas a unidades de tiempo (s). El registro es suavizado y posteriormente corregido por línea base, mediante la sustracción de líneas de ajuste previamente suavizadas.

En el volumen II, al registro se le aplica un filtrado pasa baja, con un filtro Ormsby, seguidamente se realiza la corrección por instrumento. El ajuste por

línea base se realiza por medio de un filtro Ormsby pasa alta. Posteriormente se obtiene el registro de velocidad, y a éste se le aplica un filtro tipo Ormsby pasa alta, con la misma frecuencia de corte que la empleada en el filtrado de las aceleraciones. Finalmente, se obtiene por integración el desplazamiento, aplicando a éste último un filtro igual. El volumen III consiste en el cálculo de los espectros de respuesta y de Fourier.

Debido al progreso en las técnicas de procesamiento digital de señales, especialmente en su precisión, velocidad y reducción del costo computacional, los programas desarrollados en 1973 fueron modificados en 1979 [32], 1984 [36] y en 1990 [9]. En 1990 se incorporó una rutina de cálculo para la determinación automática de la banda de frecuencia con una relación/razón aceptable señal/ruido.

B.2. Algoritmo

El esquema de procesamiento aquí presentado incluye únicamente los procedimientos usados para el procesamiento de acelerogramas digitales (no se incluye la parte I de Trifunac y Lee, 1990).

En general, los principios que rigen la rutina de procesamiento de registros sísmicos han cambiado poco. Los pasos que involucran el procesamiento de señales por medio del método de Trifunac y Lee, 1990 [9] se resumen en el diagrama de flujo de la Fig. B.1 y son los siguientes:

Los registros de aceleración no corregidos son escalados a unidades de aceleración (ordenada y). En este paso no se realiza ninguna corrección ni filtrado.

Se realiza un filtrado pasa baja para eliminar los errores de altas frecuencias, usando una frecuencia de corte de 25 Hz. El filtro usado no debe producir desfasamiento de la señal. La magnitud de la función de transferencia debe estar libre de rizado y el efecto de Gibbs debe ser minimizado [26].

En caso de ser necesario, se realiza corrección por instrumento.

La señal de aceleración es ajustada por línea base con un filtro pasa alta. Al igual que en el filtrado pasa baja, el filtro a utilizar no debe desfasar la señal. La frecuencia de corte usada es de 0.07 Hz, sin embargo Trifunac y Lee señalan que las frecuencias de corte tanto para el filtro pasa alta como pasa baja pueden variar de un registro a otro.

La velocidad se obtiene por la integración del registro de aceleración que fue previamente ajustado por línea base. La velocidad calculada se corrige por línea base, con un filtro pasa alta usando el mismo procedimiento y frecuencia de corte usados para la aceleración, esto se realiza para eliminar los errores

de periodos largos introducidos por el proceso de integración.

El desplazamiento se estima integrando el registro de velocidad, y se le aplica la misma corrección por línea base aplicada a la velocidad.

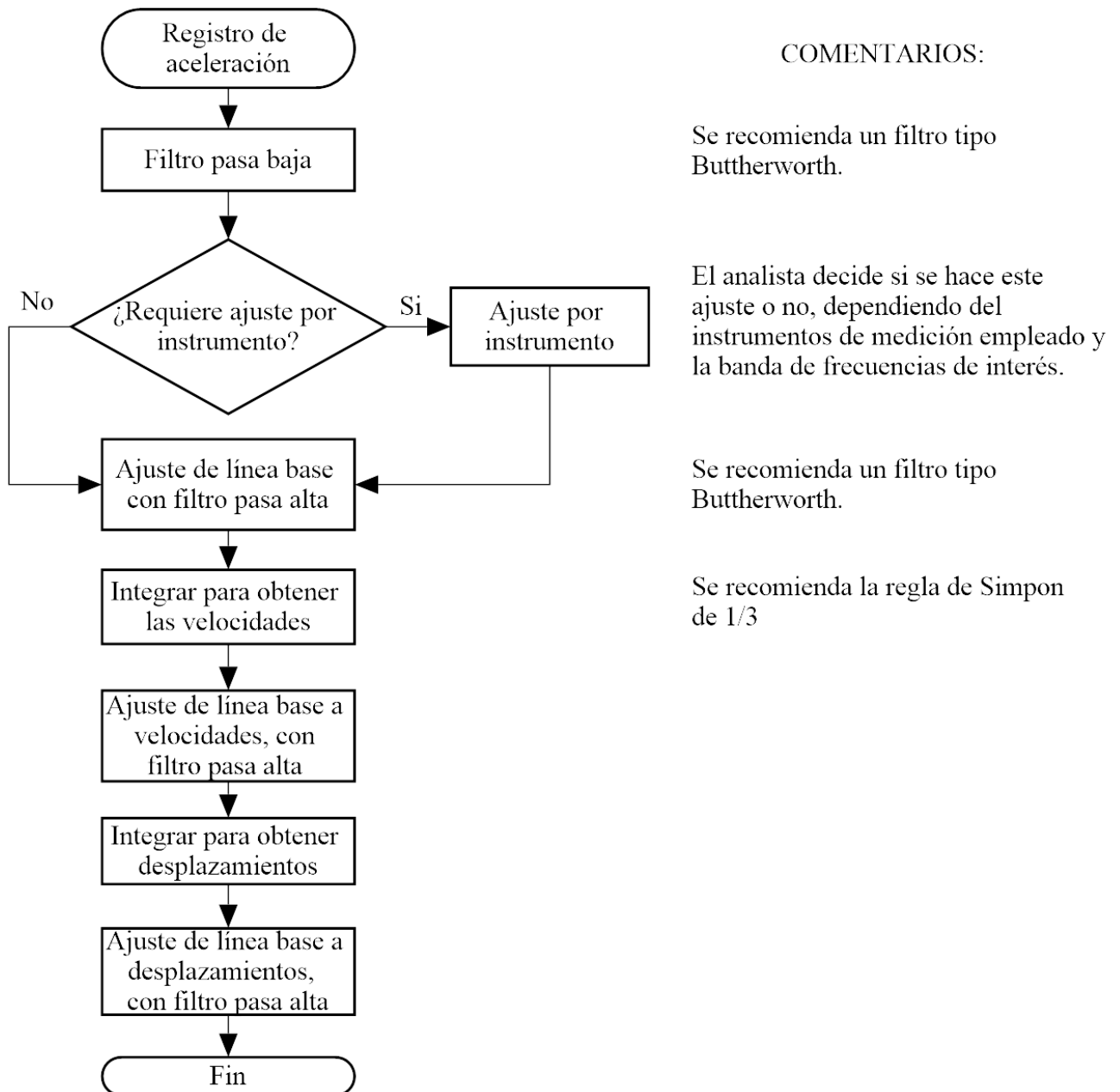


Fig. B.1. Diagrama de flujo del método de Trifunac y Lee (1990)

B.3. Archivo script de Matlab ®

% Programa para estimar desplazamientos a partir de registros de aceleración, mediante el metodo propuesto por Trifunac and Lee 1990. Sin modificaciones (original)

% creación: 27 de Octubre 2015

clear all; close all; clc;

```
fprintf('\nMétodo de Trifunac (1990)\n\n');
sampling_rate = input('Sample rate en Hz = ');
delta_t = 1.0/sampling_rate; % Espacio entre muestras
Nyquist = sampling_rate/2.0; % Frecuencia de Nyquist
scale_factor = 2940/6170270; % Para convertir de voltios a cm/s^2
nroll_low = 1; % Orden del filtro pasa baja
corner_low = 25; % frecuencia de corte filtro pasa baja
nroll_high = 1; % Orden del filtro pasa alta
corner_high = 0.07; % frecuencia de corte del filtro pasa alta
```

```
%-----
% ***** PROCESOS PREVIOS*****
% 1.- Carga el registro de voltajes a procesar
filename = input('Open file: ', 's');
xc = load (filename);
xc = xc; % Para los armónicos se pone (+), para los puentes y mesa vibradora (-)
[N,~] = size(xc);
tc_max = N/sampling_rate;
tc = (delta_t:delta_t:tc_max)'; % Esto genera el vector de tiempo de la señal completa
```

```
figure (1);
plot(tc,xc,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel ('Voltaje', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
```

```
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_t_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (1), 'v_t_fksh05_ew.bmp')
```

```
%2.- Cortar el registro de aceleraciones
tiempo_de_corte_inicial = input ('Tiempo de corte inicial = ');
tiempo_de_corte_final = input ('Tiempo de corte final = ');
no = tiempo_de_corte_inicial * sampling_rate;
nf = tiempo_de_corte_final * sampling_rate;
j = 0.0;
for i = 1:N;
    if i> nf
        break;
    end
    if i>= no
        j = j+1;
        x(j) = xc(i);
    end
end
x = x';
```

```
% 3.- Escalar y mostrar registro original y la Transformada de Fourier
x = x*scale_factor;
[N,m] = size(x);
t_max = N/sampling_rate;
t = (delta_t:delta_t:t_max)'; % Esto genera el vector de tiempo del segmento de señal a analizar
```

```
figure (2);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel ('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
```

```

ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('a_t_fksh05_ew.fig')
saveas(figure(2), 'a_t_fksh05_ew.bmp')

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:); %Deja solo la mitad de la FFT
f = linspace(0,Nyquist,length(y)); %Crea vector de
frecuencias

figure(3)
plot(f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_orig_fksh05_ew.fig')
saveas(figure(3), 'fft_orig_fksh05_ew.bmp')

%-----
%COMIENZA MÉTODO DE TRIFUNAC, (1990)
% Paso 1: Filtro butterwoth pasa baja en el registro
de aceleraciones
[b,a] = butter(nroll_low, corner_low /Nyquist, 'low');
% Diseño del filtro
x_low = filtfilt(b,a,x);

figure(4);
plot(t,x_low,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times
New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor

```

```

ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('alow_fksh05_ew.fig')
saveas(figure(4), 'alow_fksh05_ew.bmp')

```

```

% Guarda el archivo resultado del filtro pasa baja
file_3 = fopen('FKSH05_EW.low','w');
for i = 1 : N
fprintf(file_3,'%+12.6f,%+12.6f\n',t(i),x_low(i));
end
fclose(file_3);

```

% Calcular la FFT: este cálculo no es parte del método, pero se incluye con el objetivo de revisar las frecuencias de la señal en esta etapa de cálculo.

```

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x_low))/length(x_low);
y = y(1:fix(end/2),:); %Deja solo la mitad de la FFT
f = linspace(0,Nyquist,length(y)); %Crea vector de
frecuencias

```

```

figure(5)
plot(f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_L_fksh05_ew.fig')
saveas(figure(5), 'fft_L_fksh05_ew.bmp')

```

```

%-----
%Paso 2: Filtro butterworth pasa alta en el registro de
aceleraciones
[b,a] = butter (nroll_high,corner_high/
Nyquist,'high');
x_high = filtfilt(b,a,x_low);

figure (6);
plot(t,x_high,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel ('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times
New Roman', 'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman',
'fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('ahigh_fksh05_ew.fig')
saveas('figure(6)', 'ahigh_fksh05_ew.bmp')

% Guarda el archivo resultado del filtro pasa alta
file_3 = fopen ('FKSH05_EW.high','w');
for i = 1 : N
fprintf(file_3,'%+12.6f,%+12.6f\n',t(i) ,x_high(i));
end
fclose(file_3);

% Calculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x_high))/length(x_high);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (7)
plot (f,y)
xlabel ('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel ('Amplitud', 'FontName', 'Times New
Roman','FontSize',18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
    
```

```

ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_H_fksh05_ew.fig')
saveas('figure (7)', 'fft_H_fksh05_ew.bmp')

%-----
% Paso 3: Doble integración del registro de
aceleraciones, se utiliza regla de Simpson de 1/3

delta_t2 = delta_t/2; %Nuevo delta_t correspondiente
al delta_t de t2
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max);
Ac = spline(t,x_high,t2); %Interpolación por medio
de spline cúbico

% Integrar por medio de regla de Simpson para
obtener velocidades:
[NA,~] = size(Ac);
n200 = ceil(NA/2);
Vel(n200,1)= zeros;
Vel(1) = (Ac(1) + Ac(2))*(delta_t2/2.0); % Regla del
trapecio
for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    Vel(k2,1)=Vel(k2-1)+ (Ac(k) + 4.0*Ac(k+1)+
Ac(k+2))* delta_t2/3.0;
% Regla de Simpson
end

figure (8);
plot(t,Vel,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel ('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Times New
Roman','FontSize',18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
    
```

```

ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig ('vel_fksh05_ew.fig')
saveas (figure (8), 'vel_fksh05_ew.bmp')

% Guardar registro de Velocidades
file_7=fopen('VEL_FKSH05_EW.txt','w')
for i = 1 : N
    fprintf (file_7,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),Vel(i));
end
fclose(file_7);

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(Vel))/length(Vel);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (9)
plot (f,y)
xlabel ('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel ('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig ('fftv_fksh05_ew.fig')
saveas (figure (9), 'fftv_fksh05_ew.bmp')

%-----
% Paso 4: Filtro butterworth pasa alta en el registro
de velocidades
[b,a] = butter (nroll_high,corner_high
/Nyquist,'high');
Vel_high = filtfilt(b,a,Vel);

figure (10);
plot(t,Vel_high,'k')

```

```

xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize',18)
ylabel('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('vel_H_fksh050_ew.fig')
saveas (figure (10), 'vel_H_fksh05_ew.bmp')

% Guardar el archivo resultado del filtro pasa alta
file_3 = fopen ('VEL_FKSH05_EW.high', 'w');
for i = 1 : N
    fprintf(file_3,'%+12.6f,%+12.6f\r\n',t(i),
x_high(i));
end
fclose(file_3);

% Calcular la FFT
Y = 2*abs(fft(Vel_high))/length (Vel_high);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (11)
plot (f,y)
xlabel ('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize',18)
ylabel ('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';

```



```

ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fftv_H_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (11),'fftv_H_fksh05_ew.bmp')

%-----
% Paso 5: Integración del registro de velocidades por
medio de la regla de Simpson (1/3) para obtener
desplazamientos

delta_t2 = delta_t/2;
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max);
Vc = spline(t,Vel_high,t2);
[NA,m] = size(Vc);
n200 = ceil(NA/2);
D(n200,1)= zeros;
D(1) = (Vc(1) + Vc(2))*(delta_t2/2.0);
for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    D(k2,1)=D(k2-1)+(Vc(k)+4.0*Vc(k+1)+
Vc(k+2)) * delta_t2/3.0;
end

figure (12);
plot(t,D,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Desplazamiento (cm)', 'FontName', 'Times
New Roman','FontSize',18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (12), 'D_fksh05_ew.bmp')

%Guardar registro de Desplazamiento
file_7= fopen ('D_FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_7,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),D(i));
end
fclose(file_7);
    
```

```

%Calcular FFT
y = 2*abs(fft(D))/length(D);
y = y(1:fix(end/2),:);
f=linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (13)
plot (f,y)
xlabel ('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel ('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fftD_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (13), 'fftD_fksh05_ew.bmp')

%-----
% Paso 6: Filtro butterworth pasa alta del registro de
desplazamientos
[b,a] = butter (nroll_high,corner_high / Nyquist,
'high');
D_high = filtfilt(b,a,D);

figure (14);
plot(t,D_high,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize',18)
ylabel('Desplazamiento (cm)', 'FontName', 'Times
New Roman','FontSize',18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
    
```

```

ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_H_fksh05_ew.fig')
saveas('figure (14)', 'D_H_fksh05_ew.bmp')

% Guarda el archivo resultado del filtro pasa alta
file_3 = fopen('D_FKSH05_EW.high', 'w');
for i = 1 : N
    fprintf(file_3, '%+12.6f, %+12.6f\n', t(i), D_high(i));
end
fclose(file_3);

% Calcular la FFT
y = 2*abs(fft(D_high))/length(D_high);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0, Nyquist, length(y));

```

```

figure (15)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel ('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fftD_H_fksh05_ew.fig')
saveas (figure (15), 'fftD_H_fksh05_ew.bmp')

```

B.4. Ejemplos de aplicación

B.4.1. Pruebas con vibración armónica

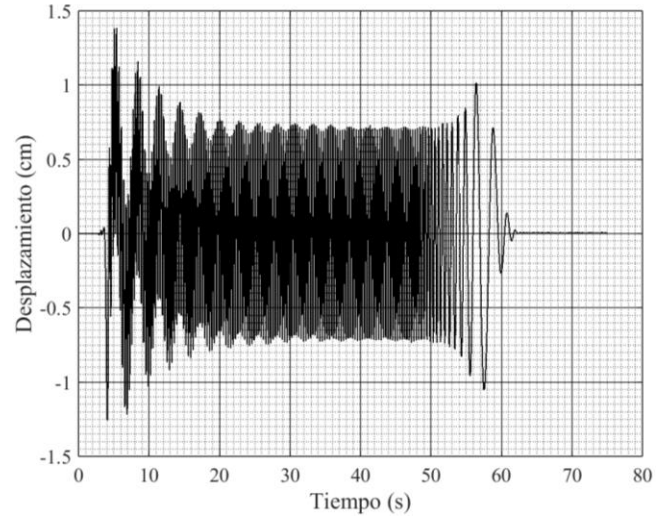


Fig. B.2. Desplazamientos medidos con LVDT para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

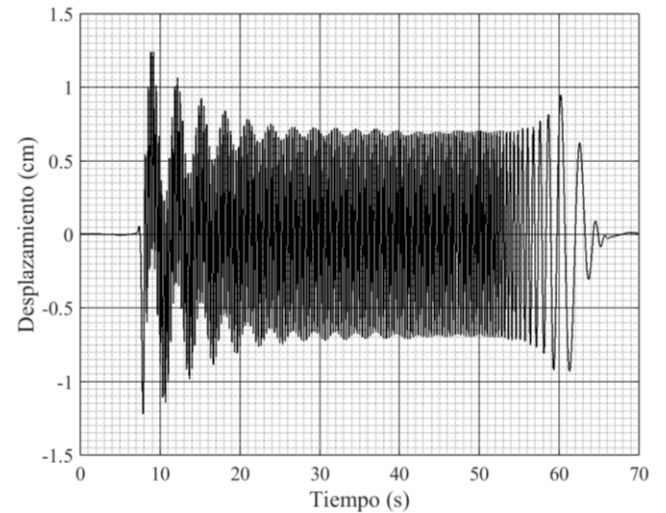


Fig. B.3. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

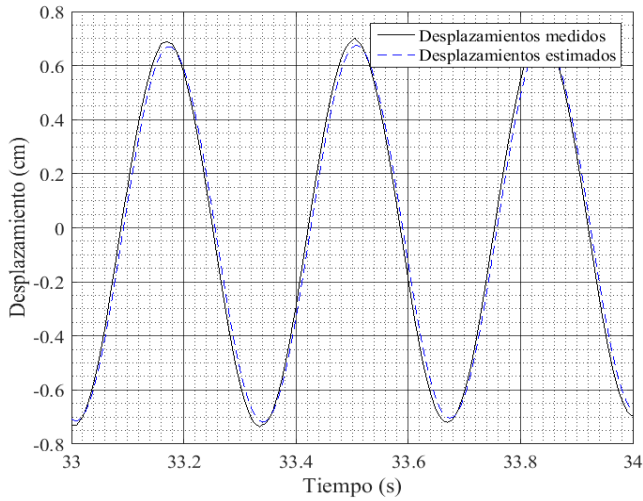


Fig. B.4. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

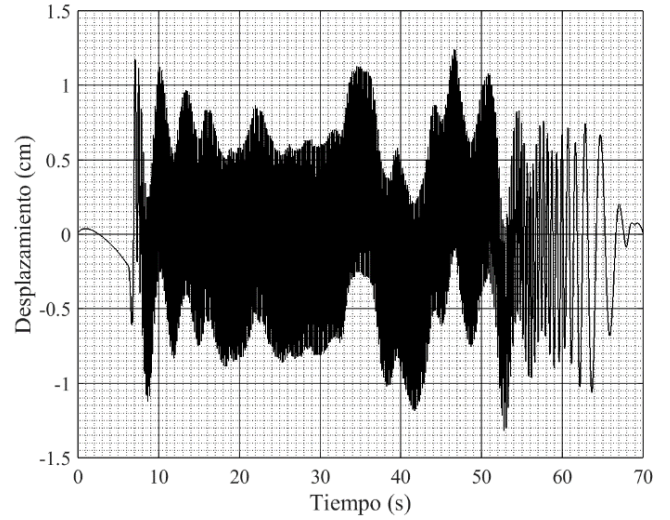


Fig. B.6. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

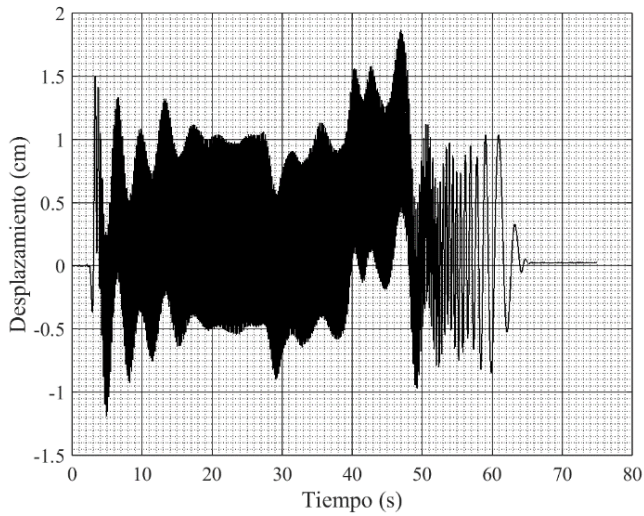


Fig. B.5. Desplazamientos medidos con LVDT para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

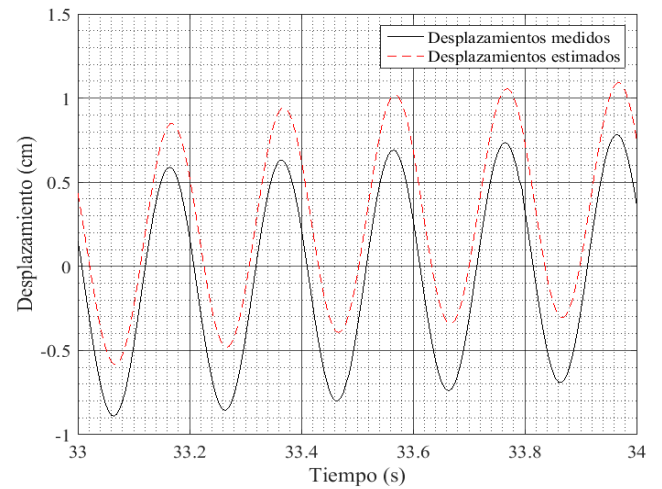


Fig. B.7. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

B.4.2. Pruebas en puente vehicular

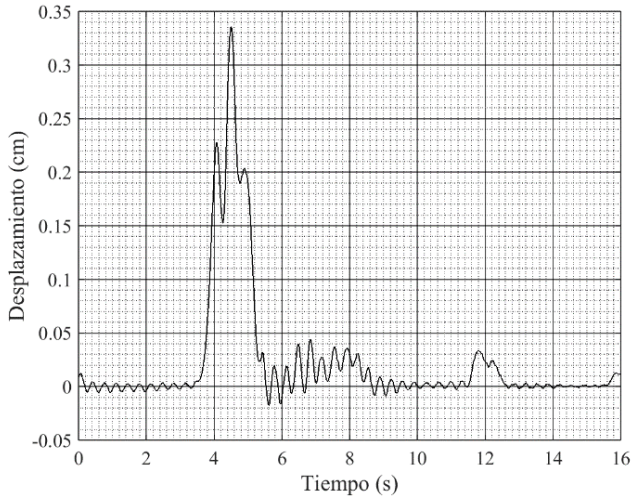


Fig. B.8. Desplazamientos medidos con lvdv en la prueba 13 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

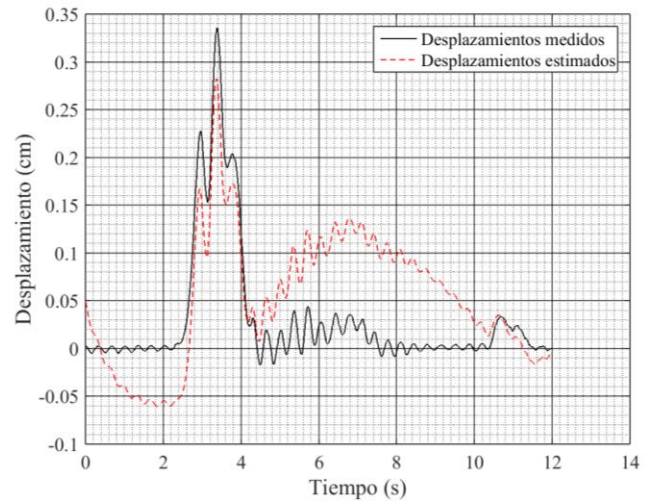


Fig. B.10. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 13 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

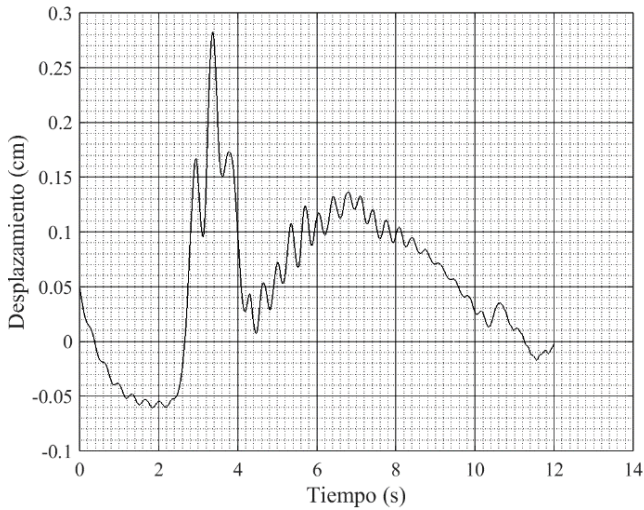


Fig. B.9. Desplazamientos estimados para la prueba 13 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

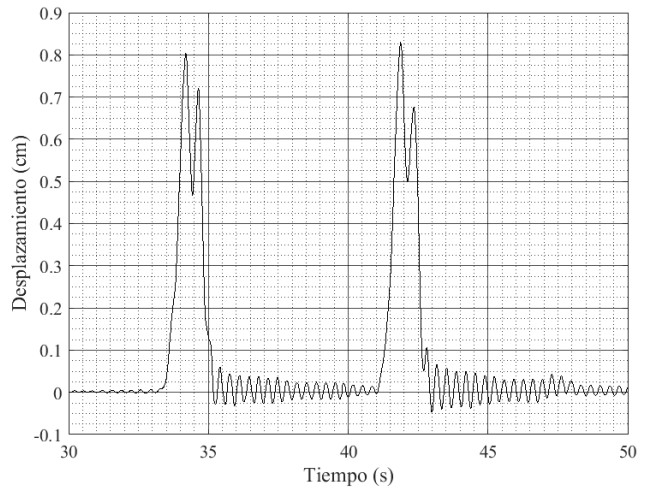


Fig. B.11. Desplazamientos medidos con lvdv en la prueba 19 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

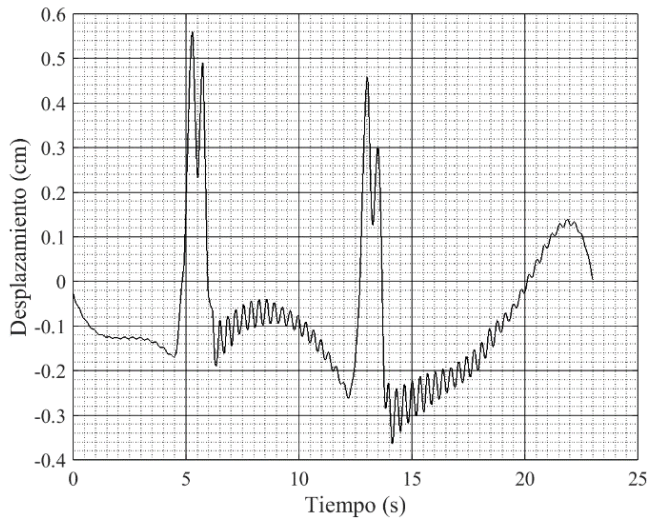


Fig. B.12. Desplazamientos estimados para la prueba 19 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

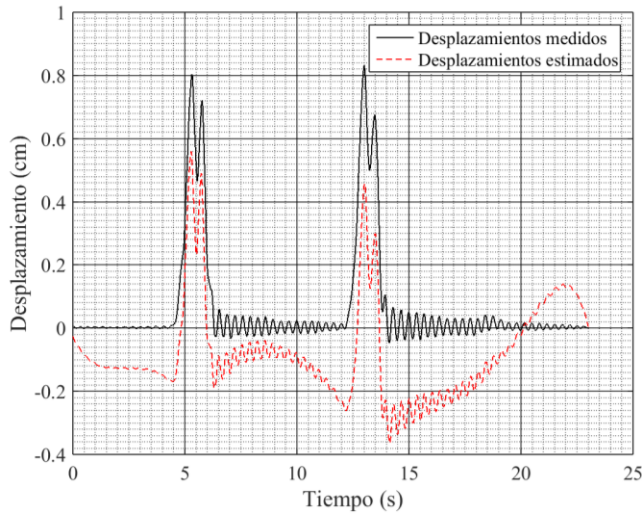


Fig. B.13. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 19 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

B.4.3. Pruebas en puente peatonal

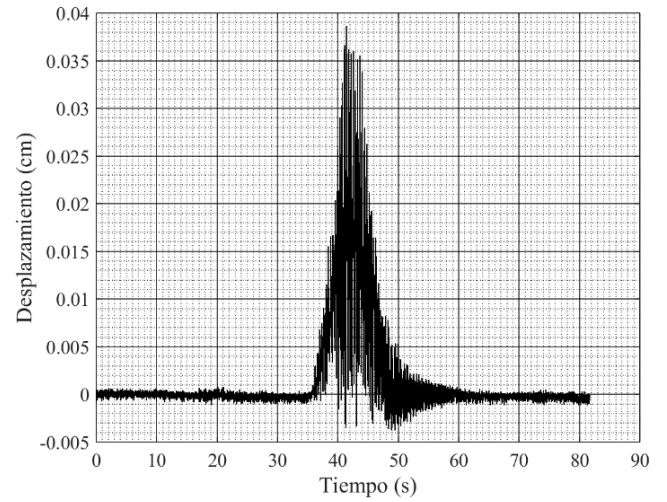


Fig. B.14. Desplazamientos medidos con LVDT en la prueba 5 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

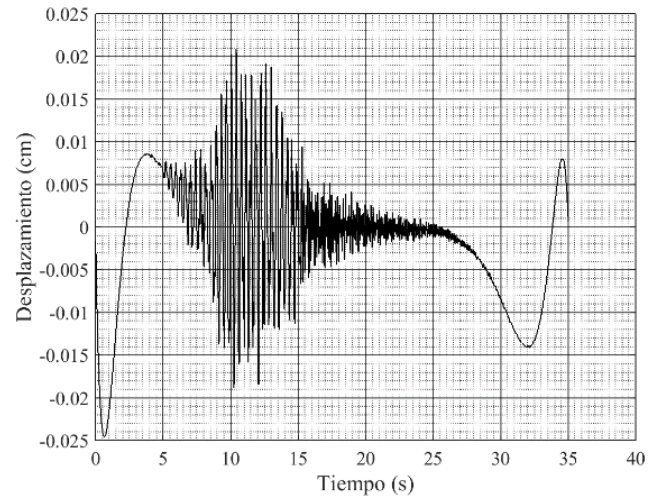


Fig. B.15. Desplazamientos estimados para la prueba 5 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

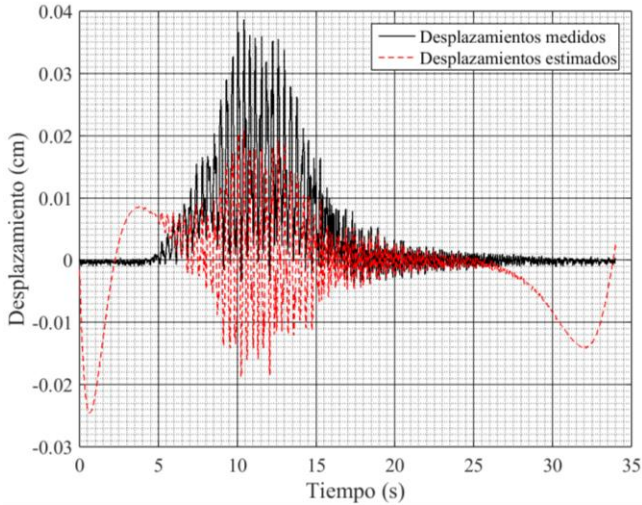


Fig. B.16. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 5 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

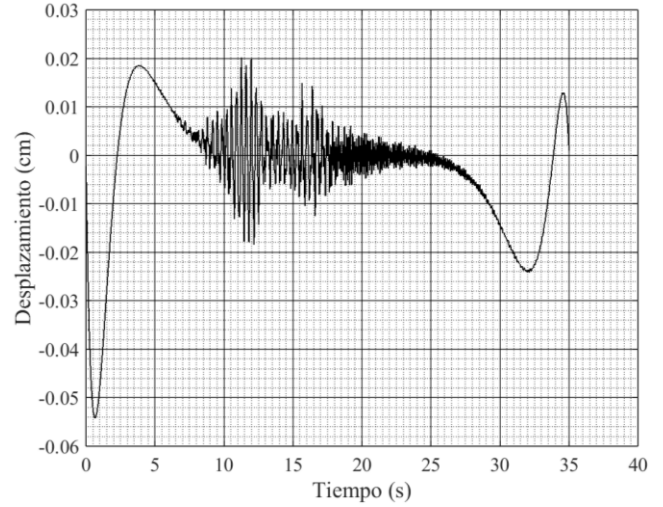


Fig. B.18. Desplazamientos estimados para la prueba 7 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

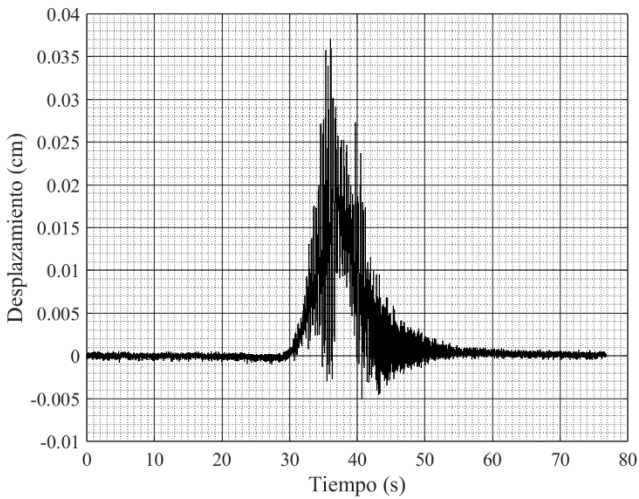


Fig. B.17. Desplazamientos medidos con lvdt en la prueba 7 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

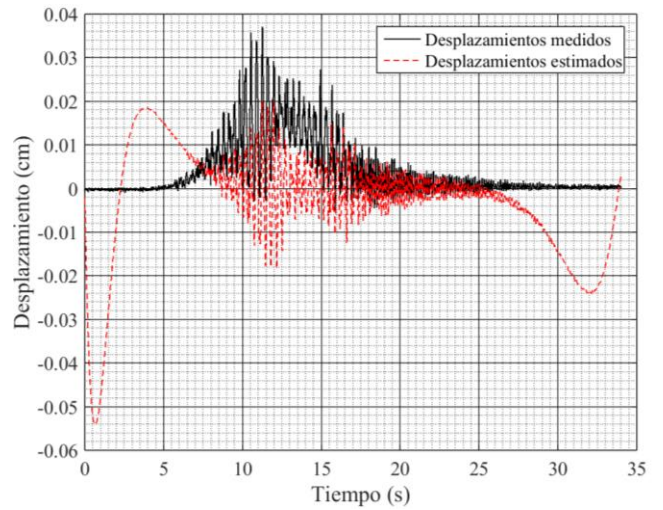


Fig. B.19. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 7 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

B.4.4. Pruebas en mesa vibradora

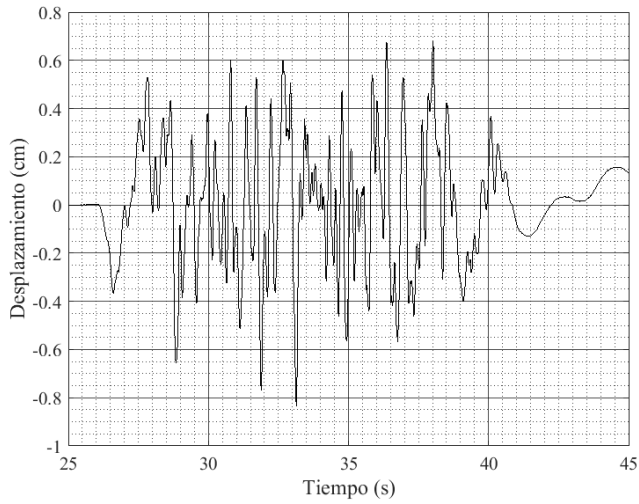


Fig. B.20. Desplazamientos medidos con LVDT para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

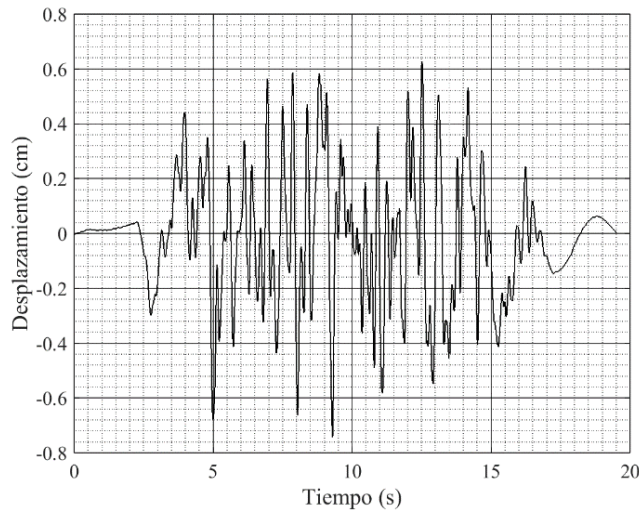


Fig. B.21. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

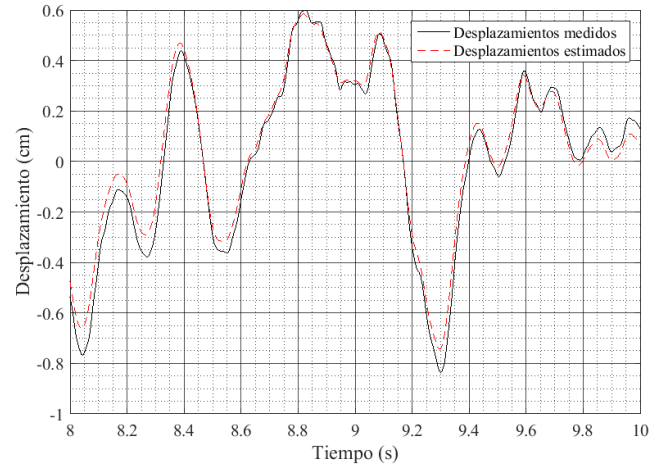


Fig. B.22. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

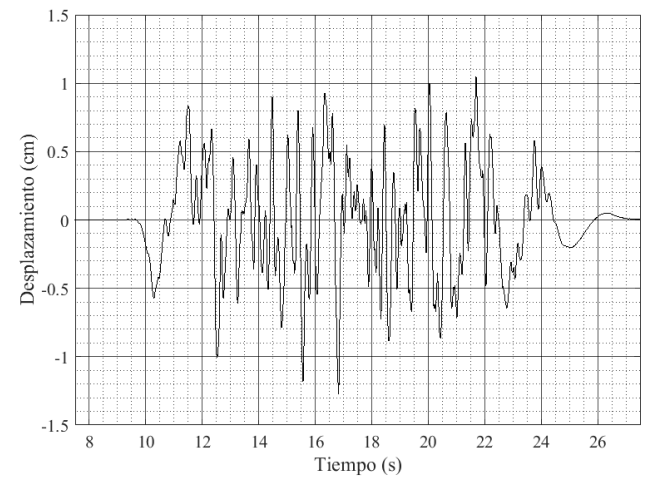


Fig. B.23. Desplazamientos medidos con LVDT para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

B.4.5. Sismo Tohoku, Japón.

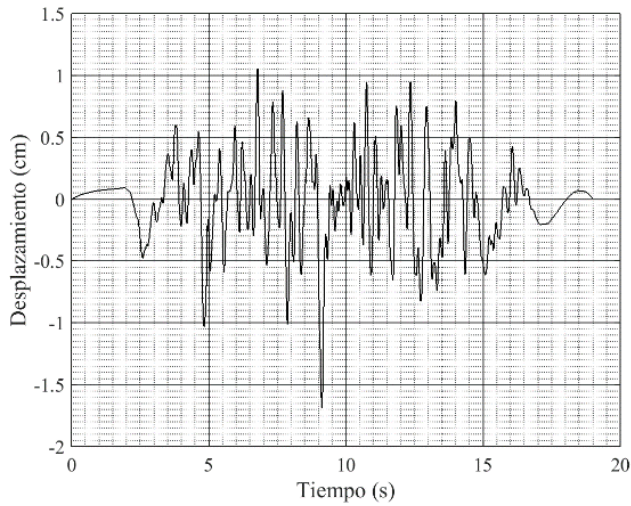


Fig. B.24. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

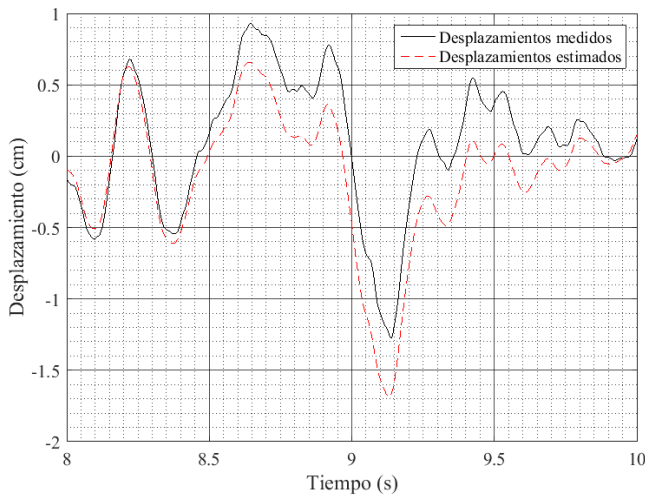


Fig. B.25. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

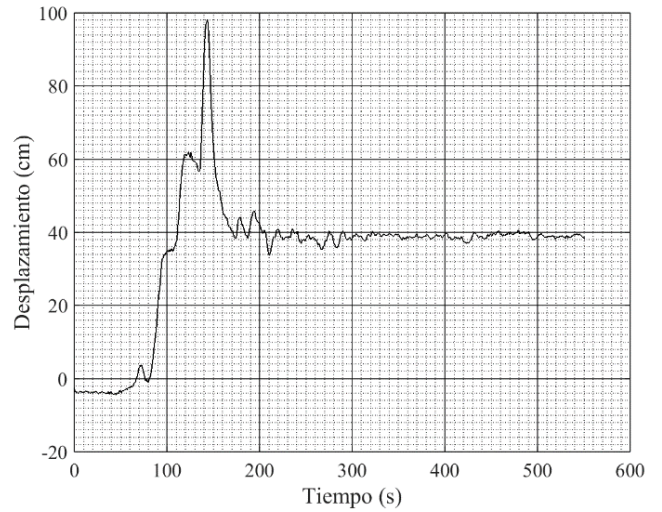


Fig. B.26. Desplazamientos medidos con GPS para el sismo Tohoku, Japón estación AKTH10, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

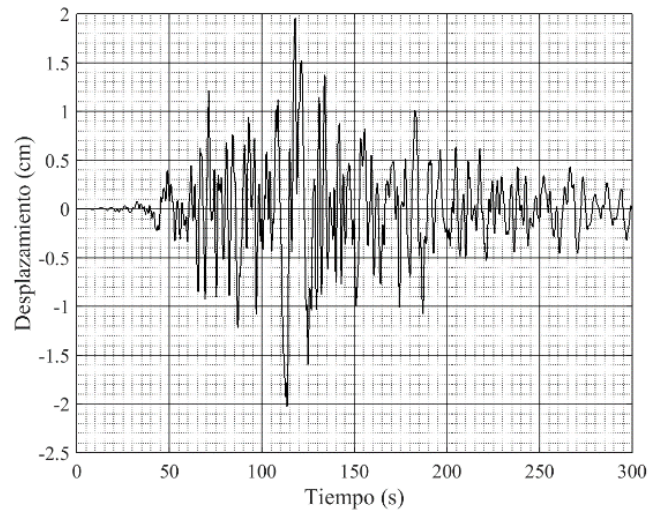


Fig. B.27. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación AKTH10, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

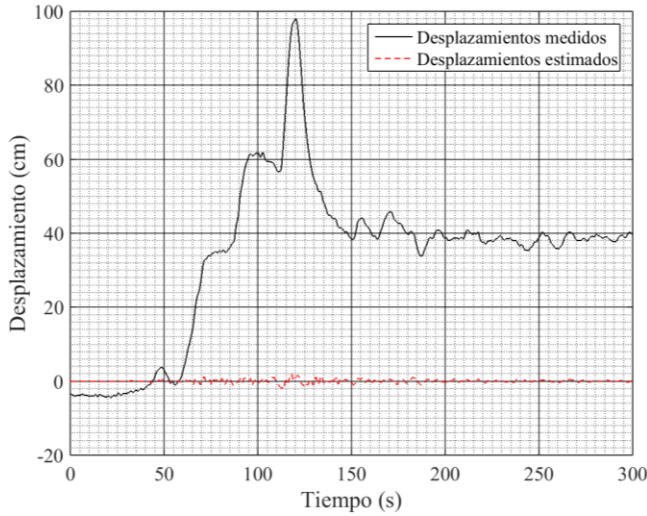


Fig. B.28. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación AKTH10 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

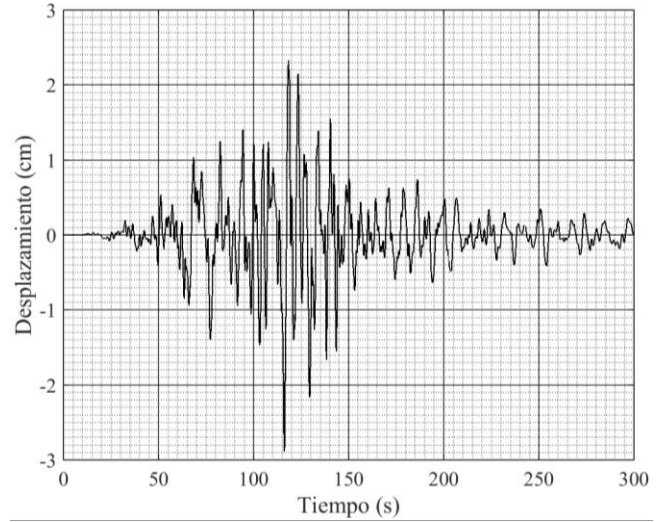


Fig. B.30. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación FKSH05, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

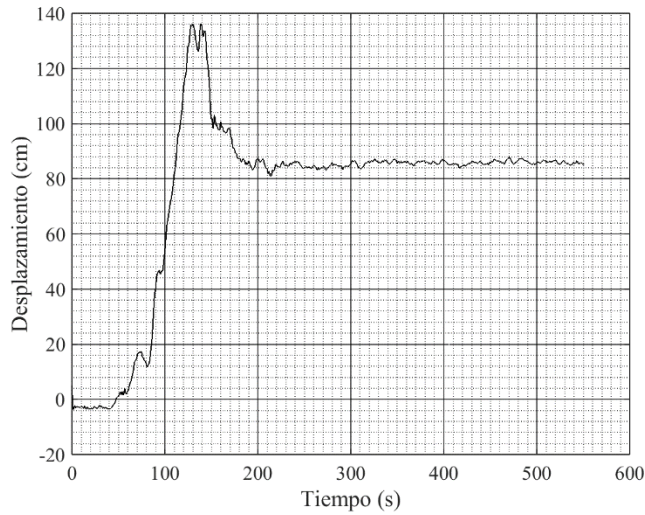


Fig. B.29. Desplazamientos medidos con GPS para el sismo Tohoku, Japón estación FKSH05, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

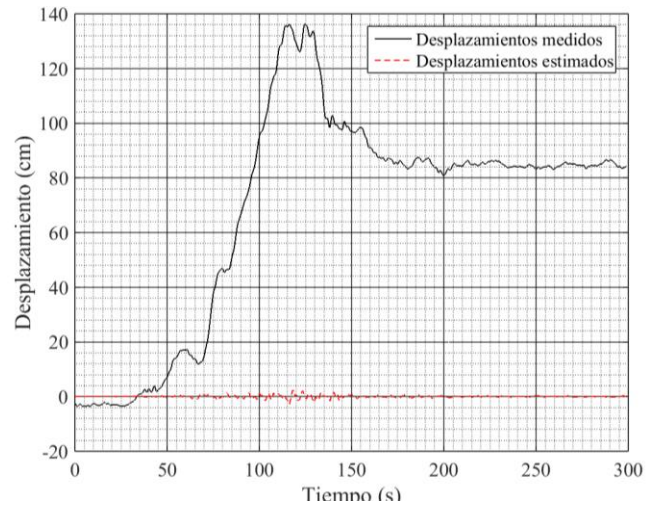


Fig. B.31. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación FKSH05 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

APÉNDICE C. MÉTODO DE CHIU

En este apéndice se describe el método propuesto por Hung–Chie Chiu [13] (1997) para la corrección por línea base de registros de aceleración.

Se presenta un archivo script de Matlab® en donde se puede observar el esquema de procesamiento seguido, y las instrucciones para su implementación.

Para mostrar la bondad del método, se presentan algunos resultados de su aplicación en registros de aceleración de diferentes tipos de excitación. Estos ejemplos corresponden a los mostrados para el método de Trifunac y Lee, con la finalidad de observar las diferencias en los resultados de ambos métodos.

C.1. Algoritmo

Esta metodología fue desarrollada por Hung- Chie Chiu en 1997 [13]. Su propósito es estimar los desplazamientos a partir de registros de aceleraciones basándose en la corrección de los principales errores de línea base que se presentan en registros digitales de aceleración. Según Chiu, en dichos registros, se encuentran presentes tanto errores de baja como de alta frecuencia, pero sólo los errores de baja frecuencia afectan la línea base.

Según el autor, los errores de baja frecuencia se deben principalmente a factores como: ruido provocado por los instrumentos de medición, constante de deriva, ruido ambiental, valores iniciales de la velocidad y a la manipulación de errores.

Basado en lo anterior, propuso un algoritmo que consta de tres pasos: ajuste por mínimos cuadrados en la aceleración, filtrado pasa alta en la aceleración y la sustracción del valor inicial en la velocidad. En el diagrama de flujo de la Fig. C.1 se resumen los pasos para la implementación de esta metodología.

El ajuste por mínimos cuadrados en el primer paso remueve la tendencia lineal en la aceleración. El

segundo paso se refiere a la aplicación de un filtro pasa alta en la aceleración para remover los errores aún presentes. Chiu señala que si el filtro pasa alta se selecciona apropiadamente, el filtrado puede remover la mayoría de los errores presentes en la aceleración.

El último paso consiste en remover la tendencia lineal presente en los desplazamientos (obtenidos de la doble integral de las aceleraciones). Para ello Chiu plantea tres opciones, la primera aproximación consiste en remover la velocidad inicial correspondiente a la segunda parte de la suma de la ecuación (C.1), donde los coeficientes a_n y b_n tienen relación con la parte imaginaria de la transformada de Fourier del registro de aceleración $\ddot{x}(t)$.

$$\begin{aligned} \int_0^t \ddot{x}(t) dt &= \dot{x}(t) - \dot{x}(0) \\ &= \frac{a_0 t}{2} \\ &+ \sum_{n=1}^N \frac{1}{2\pi f_n} [a_n \sin(2\pi f_n t) \\ &- b_n \cos(2\pi f_n t)] + \sum_{n=1}^N \frac{b_n}{(2\pi f_n)} \end{aligned} \quad (\text{C.1})$$

Una segunda aproximación consiste en realizar un ajuste lineal por mínimos cuadrados en la velocidad para remover la deriva de la línea base. La tercera opción es realizar un ajuste lineal por mínimos cuadrados en el registro del desplazamiento.

En el script de la programación del método de Chiu, se observan el segundo (opción 2) y el tercer caso (opción 1).

Los resultados que se presentan en este apéndice corresponden a la aplicación de la opción 2 (ajuste por mínimos cuadrados en la velocidad), porque es la que en teoría permite calcular desplazamientos permanentes diferentes de cero.

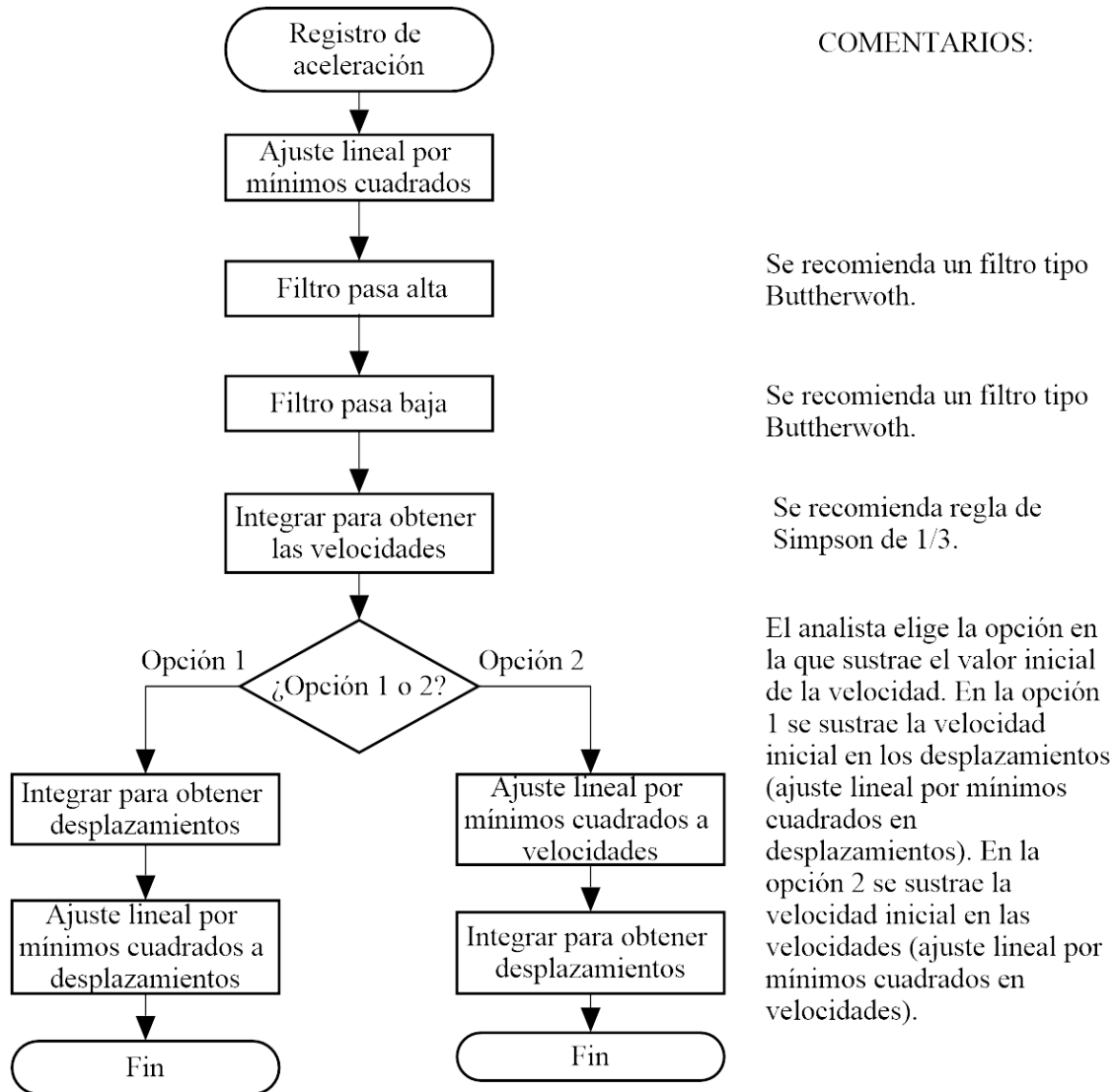


Fig. C.1. Diagrama de flujo del método de Chiu.

C.2. Archivo script de Matlab ®

% Programa para estimar desplazamientos a partir de registros de aceleración, mediante el método propuesto de Hung-Chie Chiu para corregir por línea base, incluye 2 opciones:

% opción 1 = Corrección por mínimos cuadrados en aceleración, filtrado pasa alta en aceleración y corrección por mínimos cuadrados en desplazamiento.

% opción 2 = Corrección por mínimos cuadrados en aceleración, filtrado pasa alta en aceleración y corrección por mínimos cuadrados en velocidades, luego integración para obtener desplazamientos.

```

% Fecha de creación: 21 de octubre de 2015
close all; clear all; clc;
fprintf('\nMetodo de Hung-Chie Chiu (1997) -
correccion de linea base (B) ...\n\n');
% Valores de entrada:
opcion = 2
sampling_rate = input('Sample rate en Hz = ')
delta_t = 1.0/sampling_rate;
Nyquist = sampling_rate/2.0;
scale_factor = 392.4; % Para convertir de voltios a
cm/s^2
order_poly_ acel = 1; % Orden del polinomio para
ajuste por mínimos cuadrados en aceleración
  
```

```

order_poly_vel = 1; % Orden del polinomio para
ajuste por mínimos cuadrados en velocidad
order_poly_desp = 1; % Orden del polinomio para
ajuste por mínimos cuadrados en desplazamientos
orden_low = 2; % Orden del filtro pasa baja
corner_low = 30; % Frecuencia de corte del filtro pasa
baja
Wp = 0.25; % Frecuencia de esquina pasabanda
Ws = 0.017; % Frecuencia de esquina detención de
banda
Rp = 0.5; % Riple en la banda pasante en decibeles
Rs = 55; % Atenuación en decibeles de la banda de
detención

```

```

%-----
% *****PROCESOS PREVIOS *****
% 1.- Carga el registro de voltajes a procesar
filename = input('Open file: ', 's');
xc = load (filename);
xc = -xc; % Para los armónicos se pone (+), para los
puentes, mesa vibradora y sismo Japón (-)
[N,~] = size(xc);

```

```

tc_max = N/sampling_rate;
tc = (delta_t:delta_t:tc_max);

```

```

figure (1);
plot(tc,xc,'k')
xlabel('Tiempo (s)','FontName','Arial','FontSize',18)
ylabel('Voltaje','FontName','Arial','FontSize',18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_t_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (1), 'v_t_fksh05_ew.bmp')

```

```

%2.- Cortar el registro de aceleraciones
tiempo_de_corte_inicial = input('Tiempo de corte
inicial = ');
tiempo_de_corte_final = input('Tiempo de corte final
= ');
no = tiempo_de_corte_inicial*sampling_rate;

```

```

nf = tiempo_de_corte_final*sampling_rate;
j = 0.0;
for i = 1:N;
    if i> nf
        break;
    end
    if i>= no
        j = j+1;
        x(j) = xc(i);
    end
end
x = x';
% 3.- Escalar y mostrar registro original y la
Tranformada de Fourier
x = x*scale_factor;
[N,m] = size(x);
t_max = N/sampling_rate;
t = (delta_t:delta_t:t_max);% Esto genera el vector de
tiempo del segmento de señal a analizar

```

```

figure (2);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo (s)','FontName','Arial','FontSize',18)
ylabel('Aceleración
(cm/s^2)','FontName','Arial','FontSize',18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('a_t_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (2), 'a_t_fksh05_ew.bmp')

```

```

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:); %Deja solo la mitad de la FFT
f = linspace(0,Nyquist,length(y)); %Crea vector de
frecuencias

```

```

figure (3)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)

```

```

ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_orig_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (3), 'fft_orig_fksh05_ew.bmp')

% Guarda archivo de señal ajustada con mínimos
cuadrados vs tiempo
file_1 = fopen ('FKSH05_A_EW.txt', 'w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_1, '%+12.6f, %+12.6f \n', t(i), x(i));
end
fclose(file_1);

% -----
%* COMIENZA MÉTODO DE CHIU (1997) *
% Paso 1: Ajuste por mínimos cuadrados del registro
de aceleración
coef = polyfit(t,x,order_poly_ancel);
x = x - polyval(coef,t);

figure (4);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'arial', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';

```

```

savefig('alsq_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (4), 'alsq_fksh05_ew.bmp')

% Guarda archivo de señal ajustada con mínimos
cuadrados vs tiempo
file_1 = fopen ('FKSH05_EW.lsq', 'w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_1, '%+12.6f, %+12.6f \n', t(i), x(i));
end
fclose(file_1);

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0, Nyquist, length(y));

figure (5)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel ('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',
16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_lsq_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (5), 'fft_lsq_fksh05_ew.bmp')
Amax = max(abs(x));

% -----
% Paso 2: Filtro pasa alta en el registro de
aceleraciones
% Filtro Butterwoth pasa alta
[n,Wn] = buttord (Wp/Nyquist, Ws/Nyquist, Rp, Rs);
[b,a] = butter(n, Wn, 'high'); % Diseño de un filtro
x_high = filtfilt(b,a,x);

figure (6)
freqz(b,a)
dataIn = randn(sampling_rate,1);
dataOut = filtfilt(b,a,dataIn);

```

```
figure (7);
plot(t,x_high,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set (gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('ahigh_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (7), 'ahigh_fksh05_ew.bmp')
```

```
% Guarda el archivo resultado del filtro pasa alta
file_2 = fopen ('FKSH05_EW.high','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_2,'%+12.6f,%+12.6f\n',t(i),x_high(i));
end
fclose(file_2);
```

```
%Cálculo de la transformada de Fourier después del
filtro pasa alta
y = 2*abs(fft(x_high))/length(x_high);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));
```

```
figure (8)
plot (f,y);
xlabel ('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set (gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
```

```
savefig('fft_H_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (8), 'fft_H_fksh05_ew.bmp')
```

```
%-----
% Paso 3: Filtro pasa baja en el registro de
aceleraciones
% Filtro Butterwoth pasa baja
[b,a] = butter (orden_low, corner_low/Nyquist, 'low');
x_low = filtfilt(b,a,x_high);
```

```
figure (9)
freqz(b,a)
dataIn = randn(sampling_rate,1);
dataOut = filtfilt(b,a,dataIn);
```

```
figure (10);
plot(t,x_low,'k')
xlabel ('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set (gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('alow_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (10), 'alow_fksh05_ew.bmp')
```

```
% Guarda el archivo resultado del filtro pasa baja
file_3 = fopen ('FKSH05_EW.low','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_3,'%+12.6f,%+12.6f\n',t(i),x_low(i));
end
fclose(file_3);
```

```
% Cálculo de la transformada de Fourier después del
filtro pasa baja
y = 2*abs(fft(x_low))/length(x_low);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));
figure (11)
plot (f,y);
```

```

xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_L_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (11), 'fft_L_fksh05_ew.bmp')

%-----
%Paso 4: Integración del registro de aceleraciones
para obtener velocidades

delta_t2 = delta_t/2; %Nuevo delta_t correspondiente
al delta_t de t2
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max)';
Ac = spline(t,x_low,t2);%Interpolación por medio de
spline cúbico

[NA,~] = size(Ac);
n200 = ceil(NA/2);
Vel(n200,1)= zeros;
Vel(1) = (Ac(1) + Ac(2))*(delta_t2/2.0); %Regla del
trapecio

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    Vel(k2,1) = Vel(k2-1)+(Ac(k)+ 4.0*Ac(k+1)+
Ac(k+2))* delta_t2/3.0; %Regla de Simpson
end

figure (12);
plot(t,Vel,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';

```

```

ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('vel_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (12), 'vel_fksh05_ew.bmp')

%Guardar registro de Velocidades
file_4= fopen ('VEL_FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_4,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),Vel(i));
end
fclose(file_4);

% Cálculo de la transformada de Fourier del registro
de velocidades
y = 2*abs(fft(Vel))/length(Vel);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (13)
plot (f,y);
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fftv_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (13), 'fftv_fksh05_ew.bmp')
%-----
%OPCIÓN: 1
if opcion == 1

% Paso 5: Integrar registro de velocidades para
obtener desplazamientos
Vs = spline(t,Vel,t2);
D(n200,1)= zeros;
D(1) = (Vs(1) + Vs(2))*(delta_t2/2.0);

```

```

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    D(k2,1) = D(k2-1)+(Vs(k)+ 4.0*Vs(k+1)+
Vs(k+2))* delta_t2/3.0;
end

figure (14);
plot(t,D,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Desplazamientos (cm)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set (gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (14), 'D_fksh05_ew.bmp')

%Guardar registro de Desplazamientos
file_6= fopen ('D_FKSH05_EW_OP1.txt','w');
for i = 1 : N;
    fprintf (file_6,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),D(i));
end
fclose(file_6);

%Paso 6: Ajuste de mínimos cuadrados en el
desplazamiento
coef = polyfit(t,D,order_poly_desp);
D = D - polyval(coef,t);

figure (15);
plot(t,D,'k')
title('Desplazamientos prueba 4, con ajuste de
mínimos cuadrados', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Desplazamiento (cm)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor

```

```

ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_lsq_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (15), 'D_lsq_fksh05_ew.bmp')

% Guarda archivo de señal ajustada con mínimos
cuadrados vs tiempo
file_6 = fopen ('D_FKSH05_EW_OP1.ls','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_6,'%+12.6f,%+12.6f \n',t(i),x(i));
end
fclose(file_6);

% Cálculo de la transformada de Fourier del registro
de desplazamientos
y=2*abs(fft(D))/length(D);
y=y(1:fix(end/2),:);
f=linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (16)
plot (f,y);
title('Transformada de Fourier del registro de
desplazamientos', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fftD_lsq_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (16), 'fftD_lsq_fksh05_ew.bmp')

%-----
% OPCIÓN 2:
else

```



```

% Paso 5: Ajuste por mínimos cuadrados en el
registro de velocidades
coef = polyfit(t, Vel, order_poly_vel);
Vel = Vel - polyval(coef, t);

figure (14);
plot(t, Vel, 'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel ('Velocidades (cm/s)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'arial', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('V_lsq_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (14), 'V_lsq_fksh05_ew.bmp')
% Guarda archivo de señal ajustada con mínimos
cuadrados vs tiempo
file_6 = fopen ('VEL_FKSH05_EW_OP2.lsqa', 'w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_6, '%+12.6f, %+12.6f \n', t(i), x(i));
end
fclose(file_6);

% Paso 6: Integración del registro de Velocidades
corregidas para obtener desplazamientos

Vs = spline(t, Vel, t2);
D(n200, 1) = zeros;
D(1) = (Vs(1) + Vs(2)) * (delta_t2 / 2.0);

for k = 2 : NA - 1;
    k2 = k / 2 + 1;
    D(k2, 1) = D(k2 - 1) + (Vs(k) + 4.0 * Vs(k + 1) +
Vs(k + 2)) * delta_t2 / 3.0;
end

figure (15);
plot(t, D, 'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Desplazamientos (cm)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)

```

```

set(gca, 'fontname', 'arial', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_op2_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (15), 'D_op2_fksh05_ew.bmp')

% Guardar registro de Desplazamientos
file_7 = fopen ('D_FKSH05_EW_OP2.txt', 'w');
for i = 1 : N;
    fprintf (file_7, '% 12.6f, % 12.6f \r\n', t(i), D(i));
end
fclose(file_7);

% Cálculo de la transformada de Fourier del registro
de desplazamientos
y = 2 * abs(fft(D)) / length(D);
y = y(1 : fix(end / 2), :); f = linspace(0, Nyquist, length(y));

figure (16)
plot (f, y);
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'arial', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fftD_op2_lsqa_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (16), 'fftD_op2_lsqa_fksh05_ew.bmp')

end
Dmax = max(abs(D));
% Finaliza método

```

C.3. Ejemplos de aplicación

C.3.1. Pruebas con vibración armónica

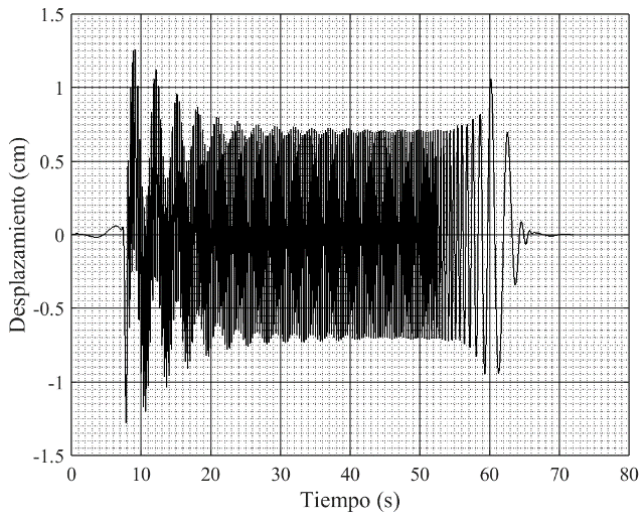


Fig. C.2. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

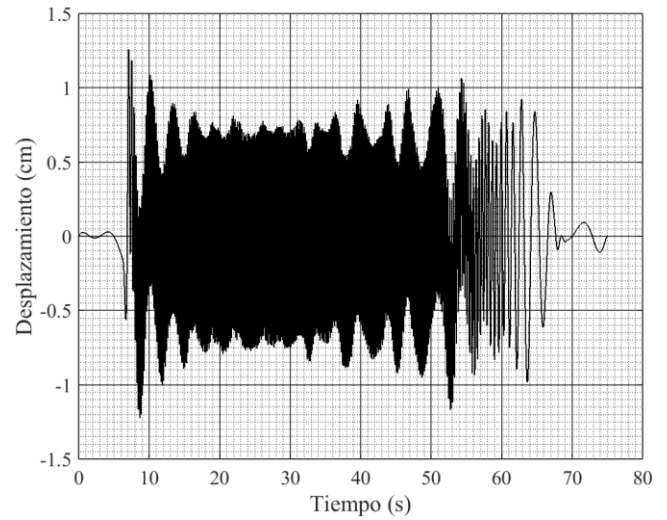


Fig. C.4. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

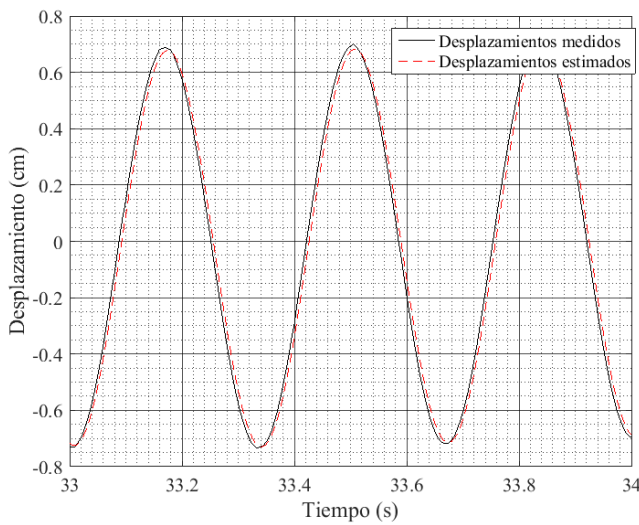


Fig. C.3. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

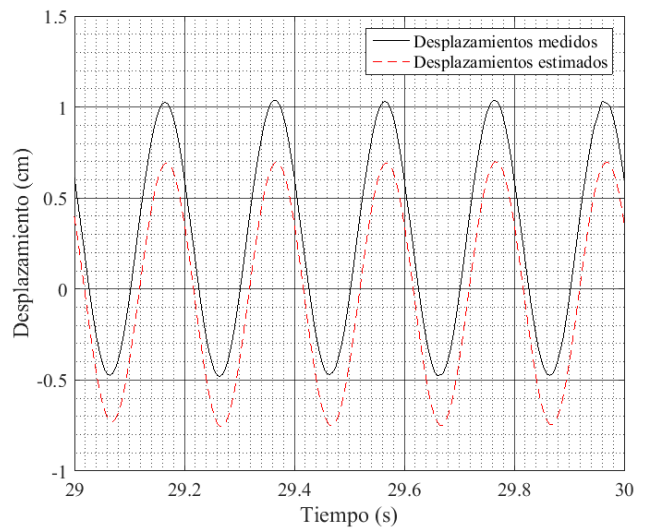


Fig. C.5. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

C.3.2. Pruebas en puente vehicular

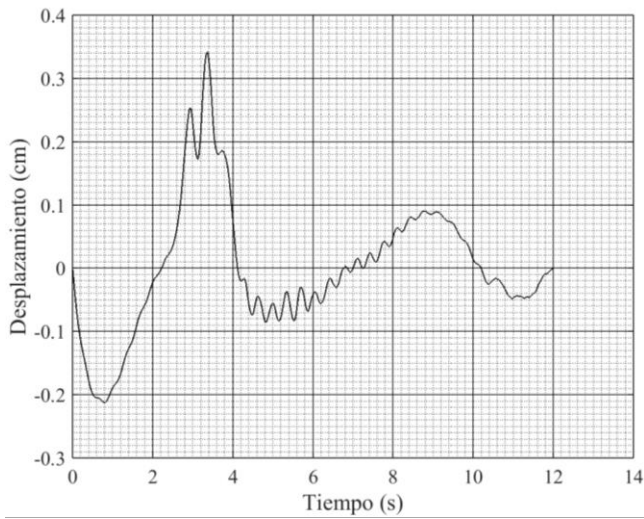


Fig. C.6. Desplazamientos estimados para la prueba 13 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

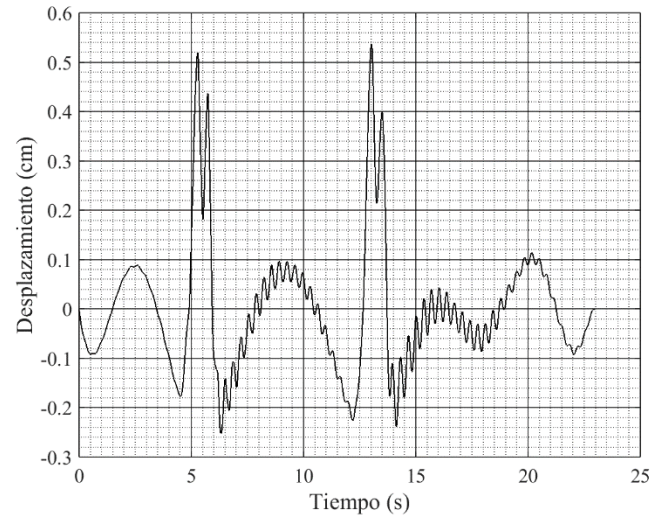


Fig. C.8. Desplazamientos estimados para la prueba 19 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

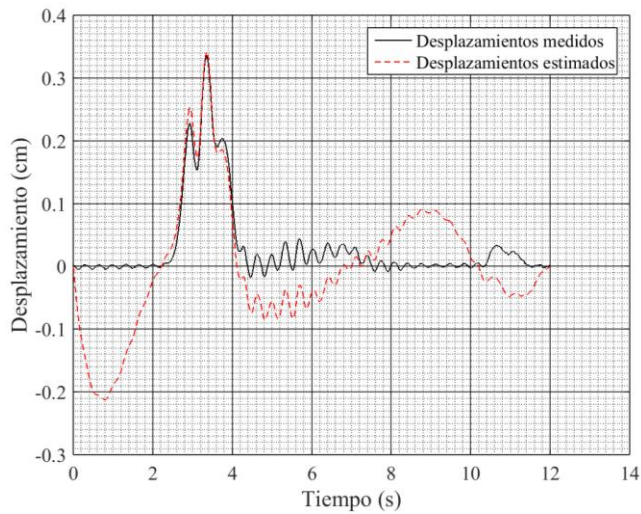


Fig. C.7. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 13 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

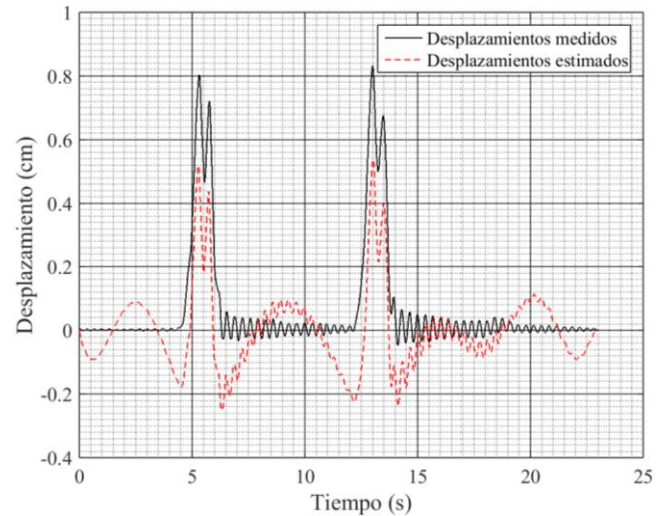


Fig. C.9. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 19 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

C.3.3. Pruebas en puente peatonal

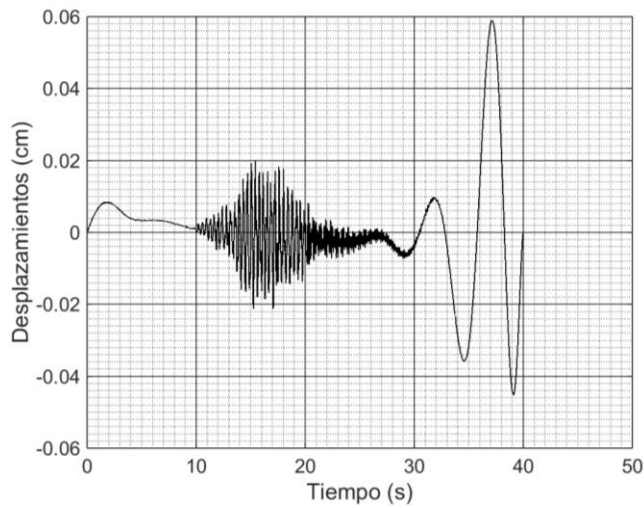


Fig. C.10. Desplazamientos estimados para la prueba 5 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

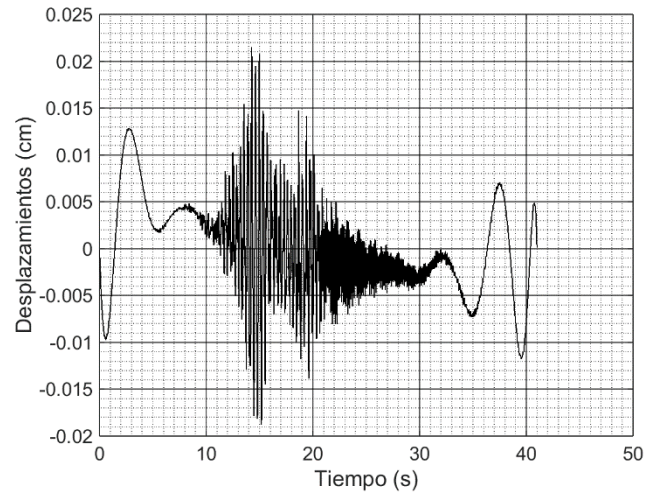


Fig. C.12. Desplazamientos estimados para la prueba 7 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

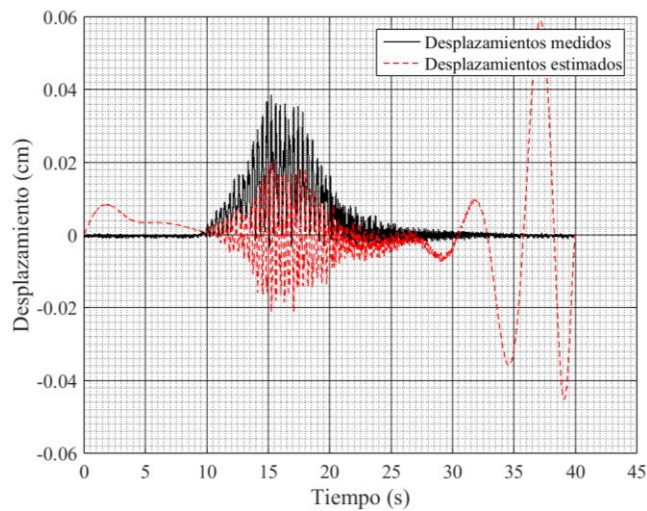


Fig. C.11. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 5 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

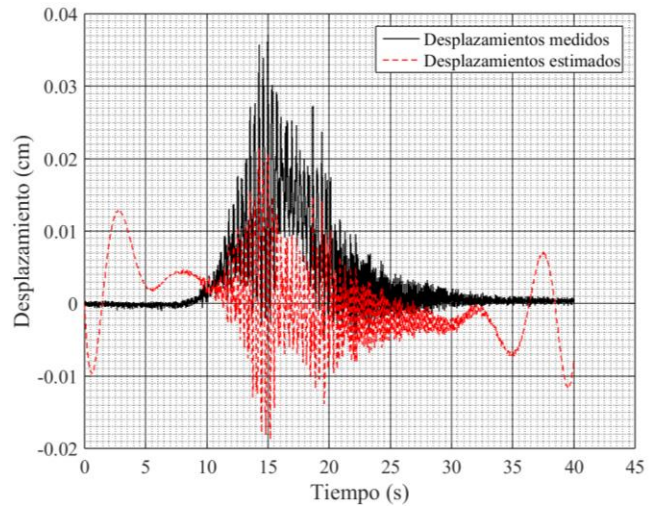


Fig. C.13. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 7 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

C.3.4. Pruebas en mesa vibradora

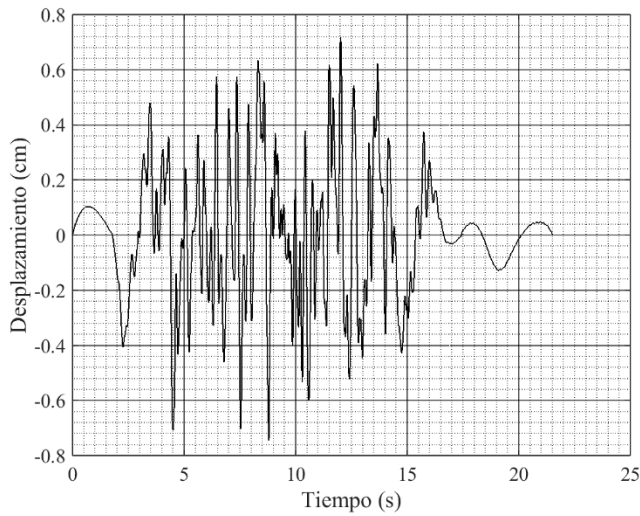


Fig. C.14. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

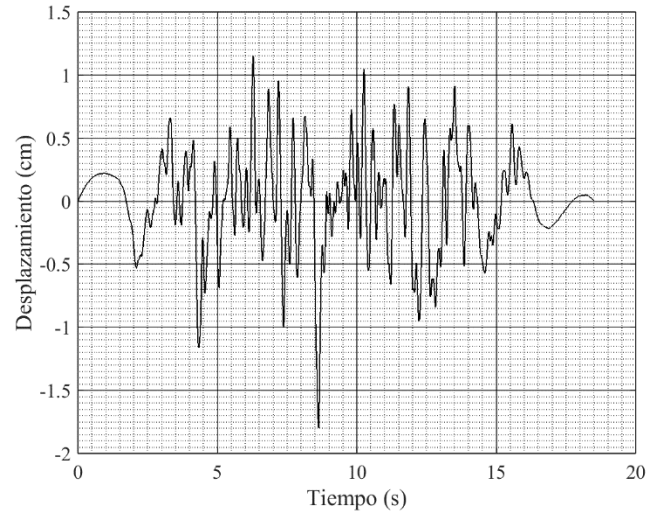


Fig. C.16. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

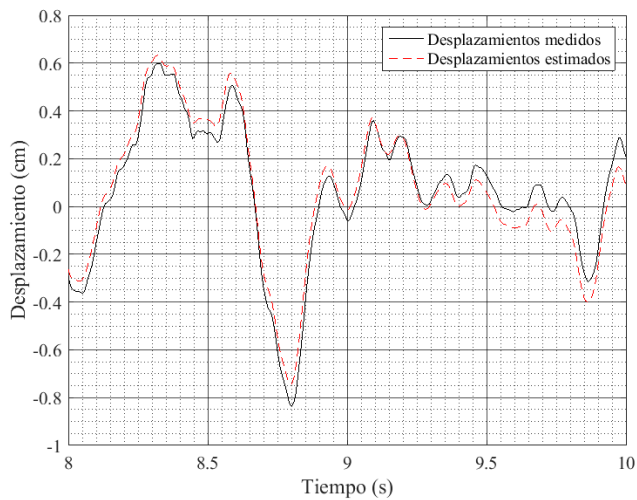


Fig. C.15. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

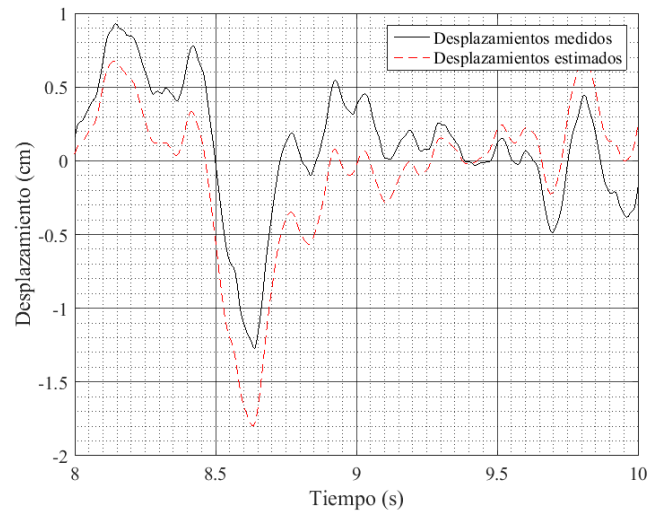


Fig. C.17. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

C.3.5. Sismo Tohoku, Japón

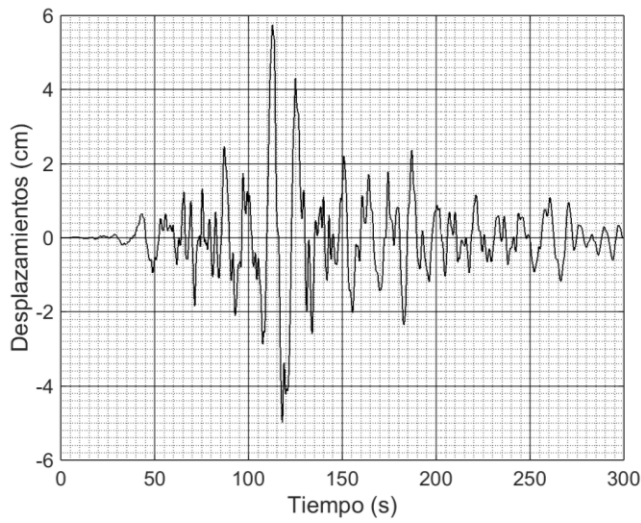


Fig. C.18. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación AKTH10, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

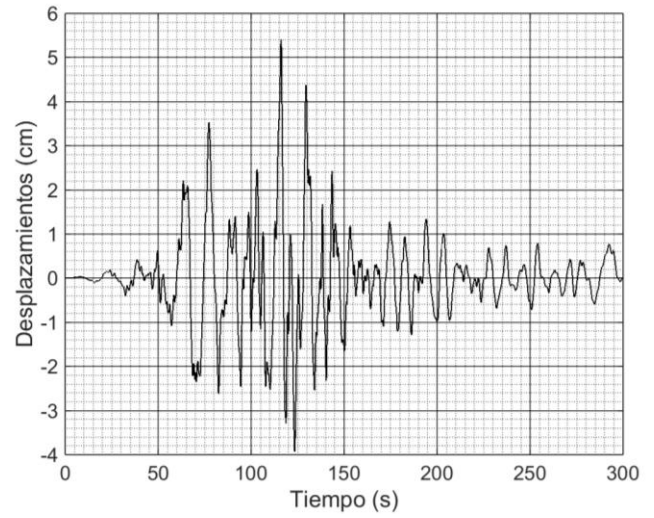


Fig. C.20. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación FKSH05, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

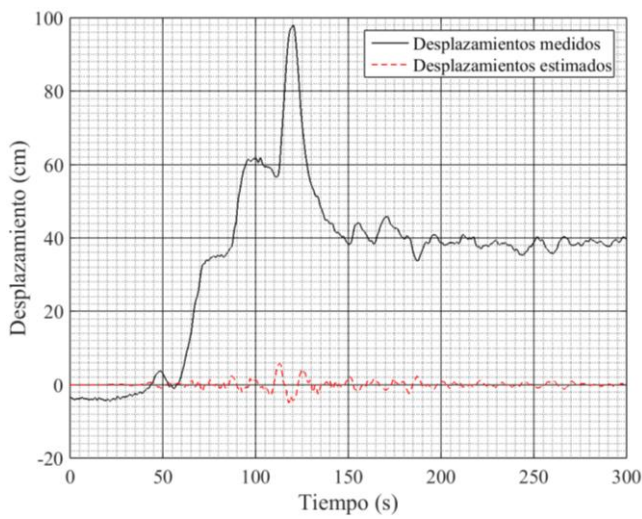


Fig. C.19. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación AKTH10 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

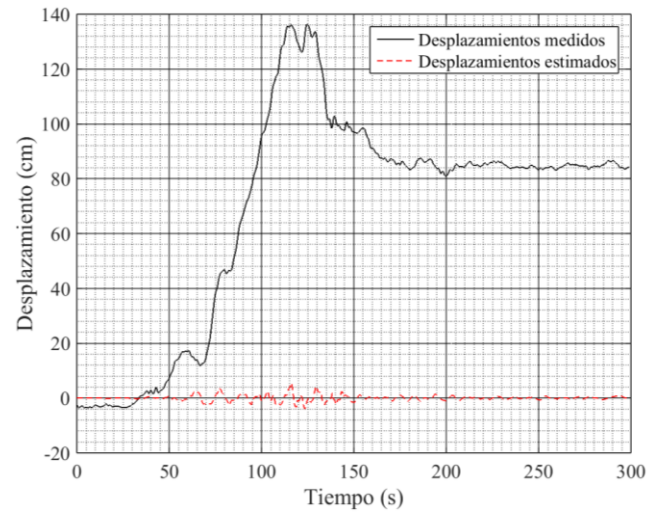


Fig. C.21. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación FKSH05 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

APÉNDICE D. MÉTODO DE CONVERSE Y BRADY

En este apéndice se describe el método propuesto por April Converse y Gerald Brady [12] (1992) para la corrección por línea base de registros de aceleración.

Se presenta un archivo script de Matlab ® en donde se puede observar el esquema de procesamiento seguido, y las instrucciones para su implementación.

Para mostrar la bondad del método, se presentan algunos resultados de su aplicación en registros de aceleración de diferentes tipos de excitación. Estos ejemplos corresponden a los mostrados para el método de Trifunac y Lee, con la finalidad de observar las diferencias en los resultados de ambos métodos.

D.1. Algoritmo

El software para el procesamiento básico de acelerogramas de movimientos fuertes, BAP por sus siglas en inglés, fue desarrollado por Converse y Brady en 1992 [12], y usado por U.S. Geological Survey para el procesamiento de acelerogramas de movimientos fuertes (strong-motion) digitalizados.

BAP calcula la velocidad y desplazamientos a partir de un registro de aceleración de entrada, o calcula la aceleración y desplazamientos a partir de un registro de velocidad de entrada.

El programa realiza una corrección lineal de línea base, corrige por instrumento (en caso de requerirse), aplica un filtro pasa alta o pasa baja, y calcula el espectro de amplitudes de Fourier. También grafica los resultados de cada paso.

Los pasos que involucra el procesamiento de señales por medio de este método se resumen en el diagrama de flujo de la Fig. D.1 y son los siguientes:

Se sustrae una línea recta del registro de entrada. La línea puede ser un ajuste lineal por mínimos cuadrados en la serie de tiempo, la media del registro de entrada o una constante.

Se extiende la serie de tiempo en ambas direcciones añadiendo ceros (pads) en preparación al filtrado pasa alta y pasa baja. Debido a que la longitud de pads requerida por el filtro pasa alta es mucho mayor que la requerida por el filtro pasa baja, este paso se realiza en dos etapas. Antes del filtrado pasa baja se añade 2 segundos de pads en ambos extremos de la señal, y antes del filtrado pasa alta se añade una longitud igual a

$$\frac{1.5 * nroll}{corner} - 2seg$$

Donde:

Nroll es la mitad del orden del filtro usado

Corner es la frecuencia de corte seleccionada

Se realiza un filtrado pasa baja para remover las frecuencias altas de la señal de entrada.

Se aplica un filtro pasa alta por medio de un filtro Butterworth bidireccional para remover las frecuencias bajas de la señal de entrada.

Cálculo de la velocidad y el desplazamiento por medio de la integración simple y doble del registro de aceleración, o cálculo de la aceleración y desplazamiento por medio de la derivación e integración del registro de aceleración.

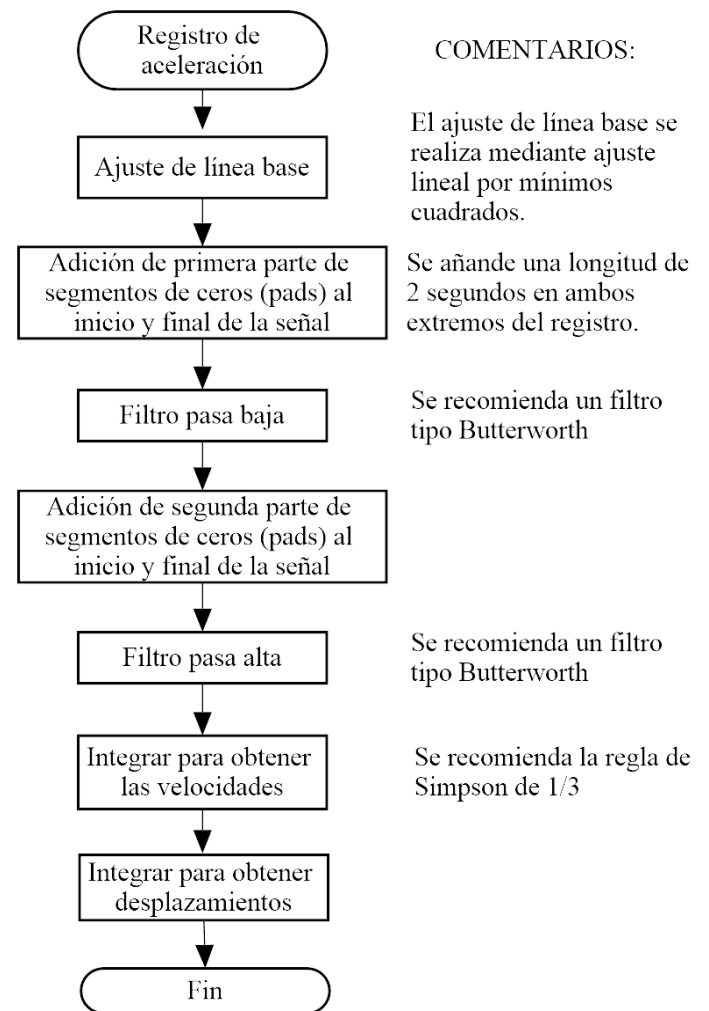


Fig. D.1. Diagrama de flujo del método de Converse y Brady

D.2. Archivo script de Matlab ®

% Programa para estimar desplazamientos a partir de registros de aceleración, mediante el método propuesto de Converse y Brady.

% creación: 09 de Septiembre 2015

% Revisión: 28 de Octubre 2015

```
clear all;
close all
clc;
fprintf('\nMetodo de Converse and Brady (1992)\n\n');
format compact;
```

```
sampling_rate = input('Sample rate en Hz = ');
delta_t = 1.0/sampling_rate; % Espacio entre muestras
Nyquist = sampling_rate/2.0; % Frecuencia de Nyquist
order_poly = 1; % Orden del polinomio
scale_factor = 2940/6170270; % Para convertir de voltios a cm/s^2
order_low = 2; % Orden del filtro pasa baja
corner_low = 25; % Frecuencia de corte del filtro pasa baja
```

```
Wp = 0.20;% Frecuencia de esquina pasabanda
Ws = 0.0085; % Frecuencia de esquina detención de banda
Rp = 0.5;% Riple en la banda pasante en decibeles
Rs = 55;% Atenuación en decibeles de la banda de detención
```

```
%-----
% ***** PROCESOS PREVIOS *****
%1.- Carga el registro de voltajes a procesar
filename = input('Open file: ', 's');
xc = load (filename);
xc = -xc; % Para los armónicos se pone (+), para los puentes, mesa vibradora y sismo Japón (-)
[N,~] = size(xc);
tc_max = N/sampling_rate;
tc = (delta_t:delta_t:tc_max)'; % Esto genera un vector tiempo
```

```
figure (1);
plot(tc,xc,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Voltaje', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
```

```
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_t_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (1), 'v_t_fksh05_ew.bmp')
```

```
%2.- Cortar el registro de aceleraciones
tiempo_de_corte_inicial = input ('Tiempo de corte inicial = ');
tiempo_de_corte_final = input ('Tiempo de corte final = ');
no = tiempo_de_corte_inicial*sampling_rate;
nf = tiempo_de_corte_final*sampling_rate;
```

```
j = 0;
for i = 1:N;
    if i> nf
        break;
    end
    if i>= no
        j = j+1;
        x(j) = xc(i);
    end
end
x = x';
```

```
% 3.- Escalar y mostrar registro original y la Transformada de Fourier
x = x*scale_factor;
[N,m] = size(x);
t_max = N/sampling_rate;
t = (delta_t:delta_t:t_max)'; % Esto genera un vector tiempo
```

```
figure (2);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
```



```

ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('a_t_fksh05_ew.fig')
saveas('figure (2)', 'a_t_fksh05_ew.bmp')

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:); %Deja solo la mitad de la FFT
f = linspace(0,Nyquist,length(y)); %Crea vector de
frecuencias

figure (3)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_orig_afksh05_ew.fig')
saveas('figure (3)', 'fft_orig_fksh05_ew.bmp')

% Guarda archivo de señal vs tiempo
file_1 = fopen ('FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_1, '%+12.6f, %+12.6f \n', t(i), x(i));
end
fclose(file_1);

%-----
% Comienza método de Converse and Brady (1992)

% Paso 1: Ajuste de mínimos cuadrados en la
aceleración

coef = polyfit(t,x,order_poly);
x = x - polyval(coef,t);

figure (4);
plot(t,x,'k')

xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('alsq_fksh05_ew.fig')
saveas('figure (4)', 'alsq_fksh05_ew.bmp')

% Guarda archivo de señal ajustada con mínimos
cuadrados vs tiempo
file_1 = fopen ('FKSH05_EW.lsqr','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_1, '%+12.6f, %+12.6f \n', t(i), x(i));
end
fclose(file_1);

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (5)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_lsqr_fksh05_ew.fig')
saveas('figure (5)', 'fft_lsqr_fksh05_ew.bmp')
    
```

```

Amax = max(abs(x));

% ** Paso 2: Padding I etapa **
% la longitud de pads requeridos por el filtro pasa alta es
mucho mayor que
% por el pasa baja por eso el padding se hace en dos
etapas.

pad_length_1 = 2 * sampling_rate;
x = padarray(x,pad_length_1,'both');
[N,~] = size(x);
t_max = N/sampling_rate;
t = (delta_t:delta_t:t_max)'; % Esto genera un nuevo
vector tiempo

figure (6)
plot (t,x)
xlabel('Tiempo(seg)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('apad1_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (6), 'apad1_fksh05_ew.bmp')

% Cálculo de transformada de Fourier antes del filtrado
y=2*abs(fft(x))/length(x);
y=y(1:fix(end/2),:);
f=linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (7)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;

```

```

ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_pad1_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (7), 'fft_pad1_fksh05_ew.bmp')

```

```

% Paso 3: Aplicación de filtro pasa baja
% Filtro Butterworth pasa baja
[b,a] = butter(order_low,corner_low/Nyquist,'low');
x = filtfilt(b,a,x);

```

```

figure (8)
plot(t, x, 'k');
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 12)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('alow_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (8), 'alow_fksh05_ew.bmp')

```

```

% Guarda el archivo resultado del filtro pasa baja
file_3 = fopen ('FKSH05_EW.low', 'w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_3, '% 12.6f, % 12.6f\r\n', t(i), x(i));
end
fclose(file_3);
% Cálculo de la transformada de Fourier después del
filtro pasa baja
y=2*abs(fft(x))/length(x);
y=y(1:fix(end/2),:);
f=linspace(0,Nyquist,length(y));

```

```

figure (9)
plot (f,y);
xlabel ('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)

```

```

set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_L_fksh05_ew.fig');
saveas(figure (9), 'fft_L_fksh05_ew.bmp');

% Paso 4: Padding II Etapa
[n,Wn] = buttord(Wp/Nyquist,Ws/Nyquist,Rp,Rs);
n
Wn*Nyquist
pad_length_2 = floor(((1.5*(n/2) /(Wn*Nyquist))*
sampling_rate)); % Longitud del padding [muestras]
pad_length_2 = pad_length_2 - pad_length_1;
x = padarray(x,pad_length_2,'both');
[N,~] = size(x);
t_max = N/sampling_rate;
t = (delta_t:delta_t:t_max);

figure (10);
plot(t,x,'k');
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)','FontName','Times New
Roman','FontSize',18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('apad2_fksh05_ew.fig');
saveas(figure (10), 'apad2_fksh05_ew.bmp');

% Cálculo de transformada de Fourier antes del filtrado
pasa alta
y=2*abs(fft(x))/length(x);
y=y(1:fix(end/2),:);

```

```

f=linspace(0,Nyquist,length(y));
figure (11)
plot (f,y)
title('Transformada de Fourier previa al filtrado',
'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_pad2_fksh05_ew.fig');
saveas(figure (11), 'fft_pad2_fksh05_ew.bmp');

```

%Paso 5: Aplicación de filtro pasa alta

```

[b,a] = butter(n,Wn,'high'); % Diseño de un filtro
x = filtfilt(b,a,x);

```

```

figure (12)
freqz(b,a)
dataIn = randn(sampling_rate,1);
dataOut = filtfilt(b,a,dataIn);

```

```

figure (13);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)','FontName','Times New
Roman','FontSize',18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';

```

```

savefig('ahigh_fksh05_ew.fig');
saveas(figure (13), 'ahigh_fksh05_ew.bmp');
% Guarda el archivo resultado del filtro pasa alta
file_6= fopen ('FKSH05_EW.high','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_6,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),x(i));
end
fclose(file_6);

% Cálculo de transformada de Fourier de señal con filtro
pasa alta

y=2*abs(fft(x))/length(x);
y=y(1:fix(end/2),:);
f=linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (14)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_H_fksh05_ew.fig');
saveas(figure (14), 'fft_H_fksh05_ew.bmp');

%**Paso 6: Doble integración del registro de
aceleraciones **

delta_t2 = delta_t/2; %Nuevo delta_t correspondiente al
delta_t de t2
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max)';
A = spline(t,x,t2);
[NA,~] = size(A);
n200 = ceil(NA/2);
V(n200,1)= zeros;

V(1) = (A(1) + A(2))*(delta_t2/2.0); % Regla del
trapecio
for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;

```

```

V(k2,1) = V(k2-1)+(A(k)+ 4.0*A(k+1)+ A(k+2))*
delta_t2/3.0;
end

```

```

figure (15);
plot(t,V,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('vel_fksh05_ew.fig');
saveas(figure (15), 'vel_fksh05_ew.bmp');

```

```

% Guardar registro de Velocidades
file_7= fopen ('VEL_FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file_7,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),V(i));
end
fclose(file_7);

```

```

% Cálculo de la transformada de Fourier del registro de
velocidades
y=2*abs(fft(V))/length(V);
y=y(1:fix(end/2),:);
f=linspace(0,Nyquist,length(y));

```

```

figure (16)
plot (f,y);
title('Transformada de Fourier del registro de
velocidades', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;

```

```

ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fftv_fksh05_ew.fig');
saveas('figure (16)', 'fftv_fksh05_ew.bmp');

Vs = spline(t,V,t2);
D(n200,1)= zeros;

D(1) = (Vs(1) + Vs(2))*(delta_t2/2.0);
for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    D(k2,1) = D(k2-1)+(Vs(k)+ 4.0*Vs(k+1)+
Vs(k+2))* delta_t2/3.0;
end

[N,~] = size(D);
figure (17);
plot(t,D,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Desplazamientos (cm)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_fksh05_ew.fig');
saveas('figure (17)', 'D_fksh05_ew.bmp');

% Guardar registro de Desplazamientos
file_6= fopen ('D_FKSH05_EW.txt', 'w');
for i = 1 : N;
    fprintf (file_6, '% 12.6f, % 12.6f\r\n', t(i), D(i));
end
fclose(file_6);
% Cálculo de la transformada de Fourier del registro de
desplazamientos
y=2*abs(fft(D))/length(D);
y=y(1:fix(end/2),:);
f=linspace(0, Nyquist, length(y));

```

```

figure (18)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fftD_fksh05_ew.fig');
saveas('figure (18)', 'fftD_fksh05_ew.bmp');

Dmax = max(abs(D));

```

D.3. Ejemplos de aplicación

D.3.1. Pruebas con vibración armónica

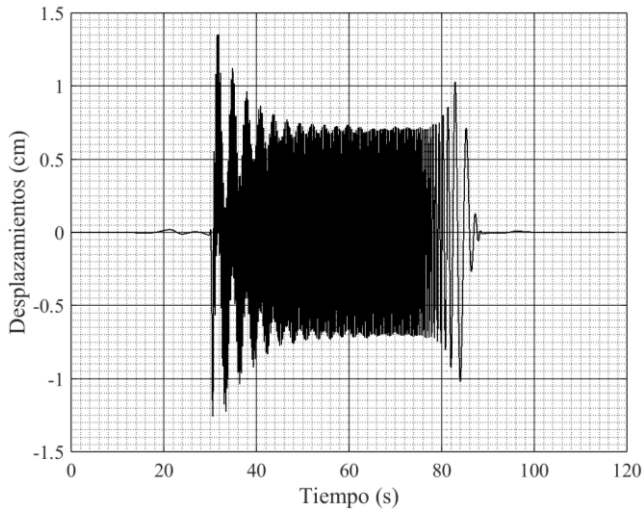


Fig. D.2. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

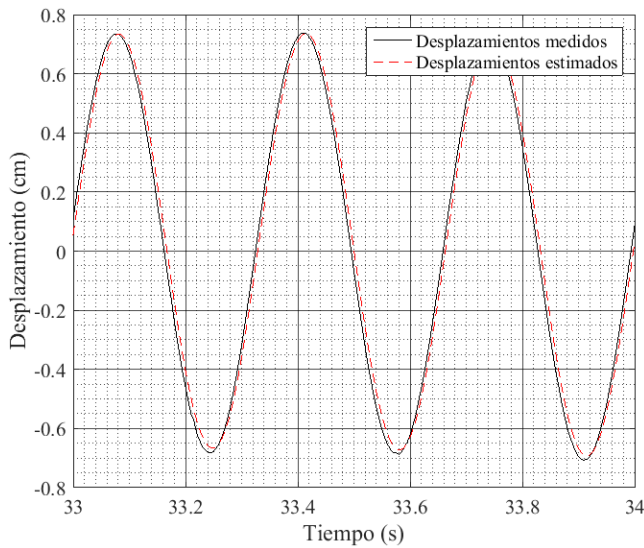


Fig. D.3. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

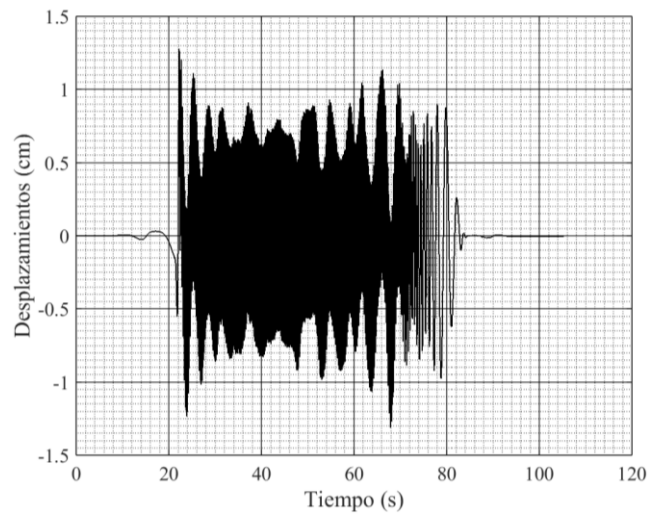


Fig. D.4. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

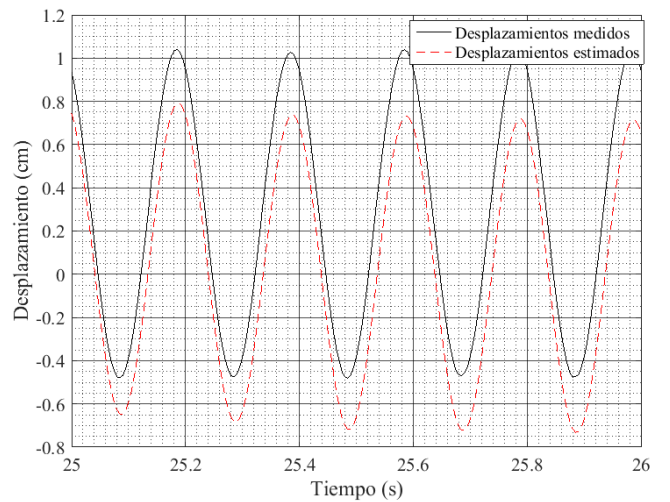


Fig. D.5. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

D.3.2. Pruebas en puente vehicular

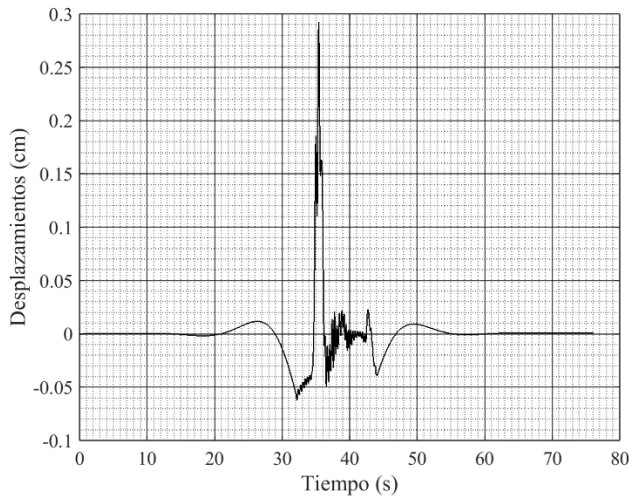


Fig. D.6. Desplazamientos estimados para la prueba 13 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

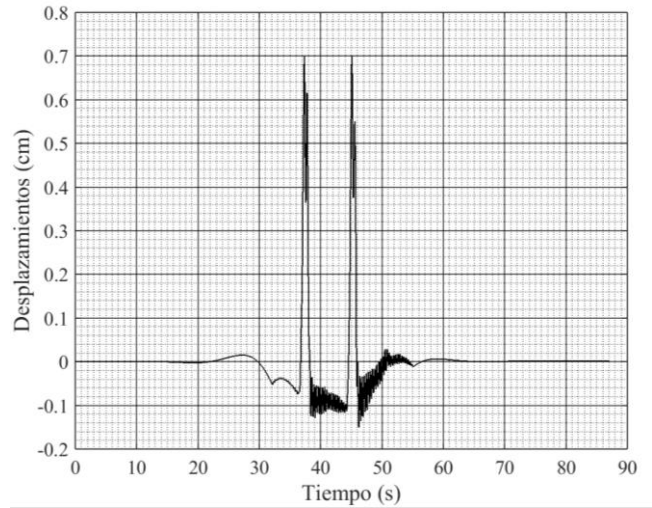


Fig. D.8. Desplazamientos estimados para la prueba 19 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

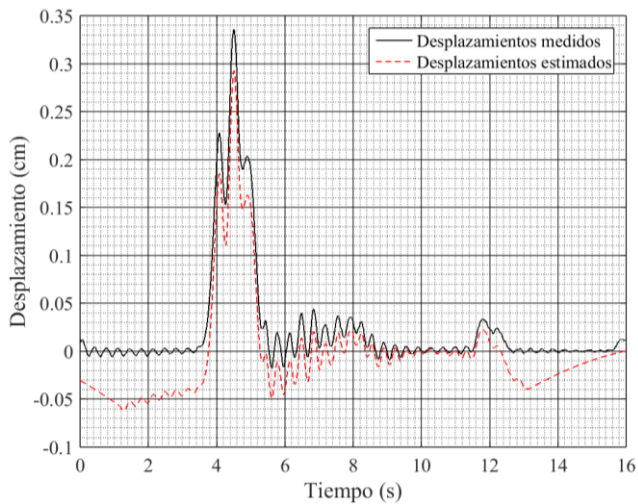


Fig. D.7. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 13 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

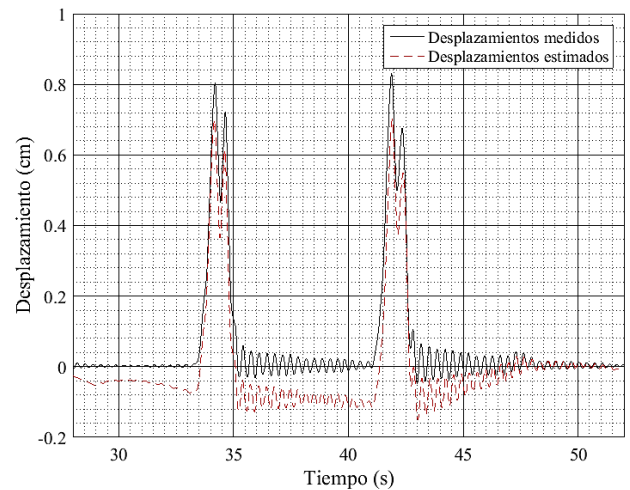


Fig. D.9. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 19 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

D.3.3. Pruebas en puente peatonal

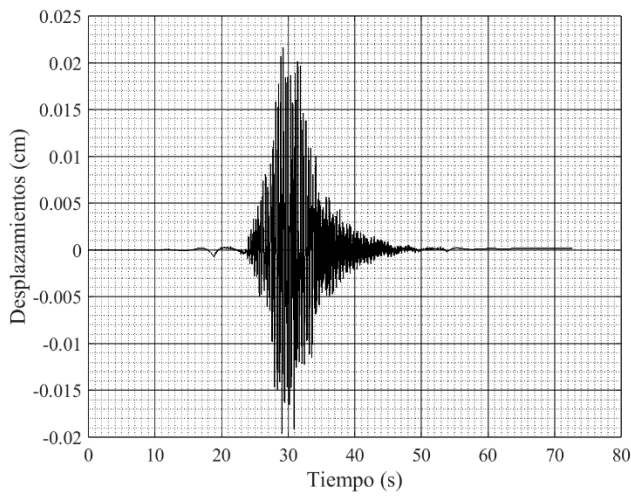


Fig. D.10. Desplazamientos estimados para la prueba 5 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

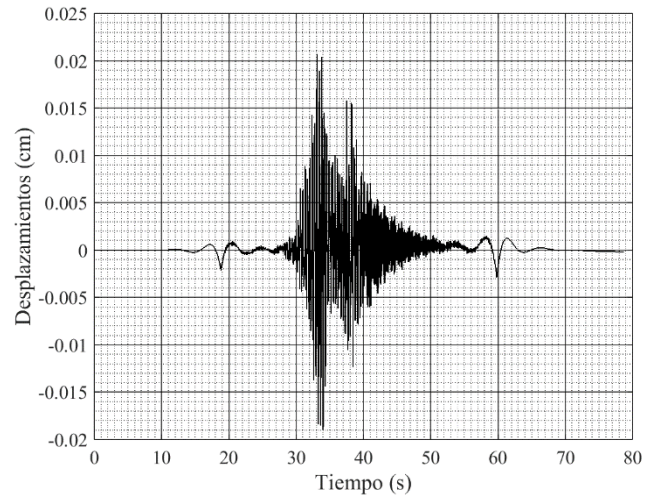


Fig. D.12. Desplazamientos estimados para la prueba 7 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

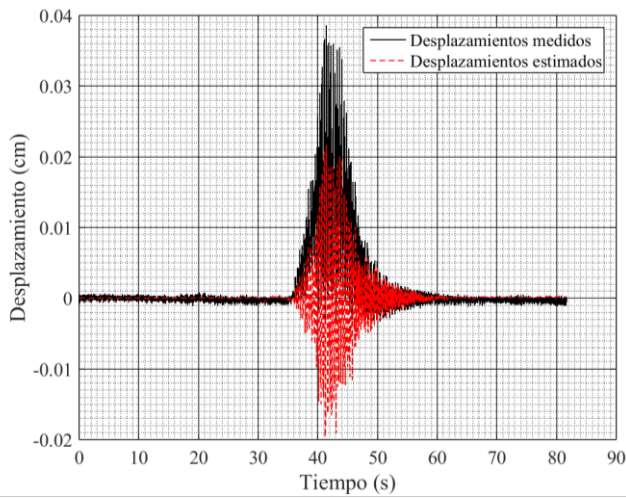


Fig. D.11. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 5 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

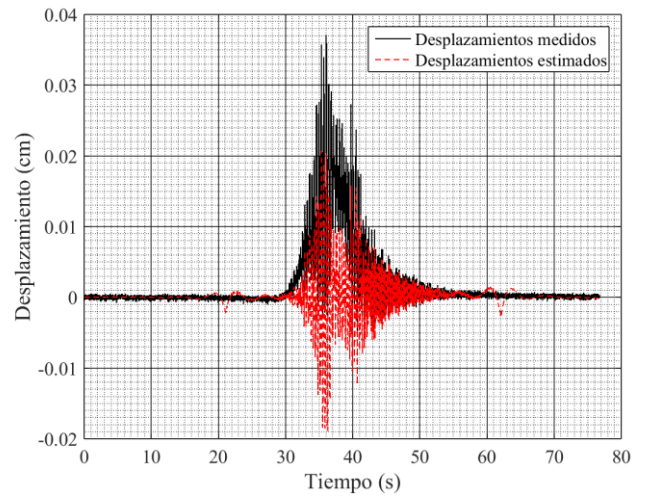


Fig. D.13. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 7 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

D.3.4. Pruebas en mesa vibradora

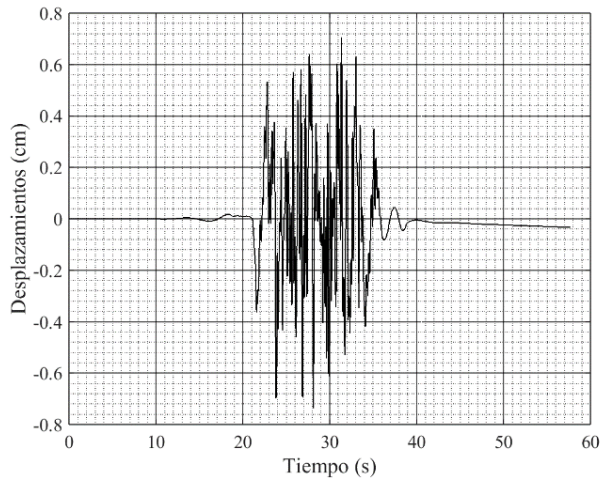


Fig. D.14. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

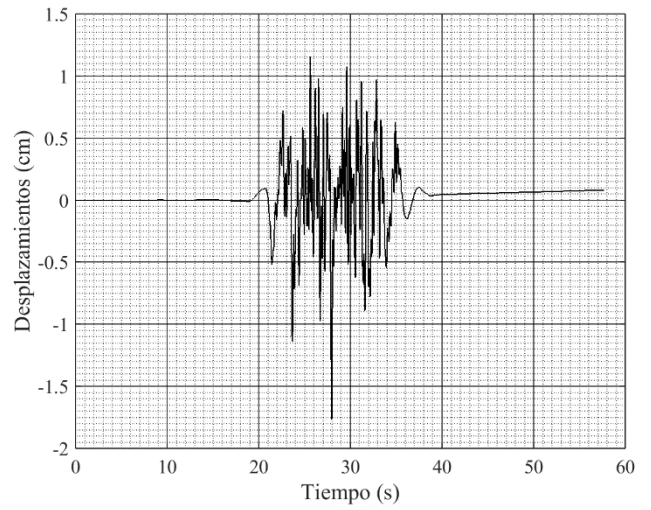


Fig. D.16. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

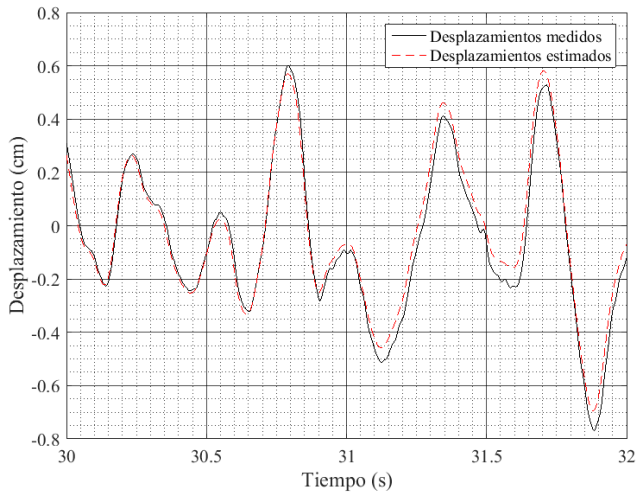


Fig. D.15. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

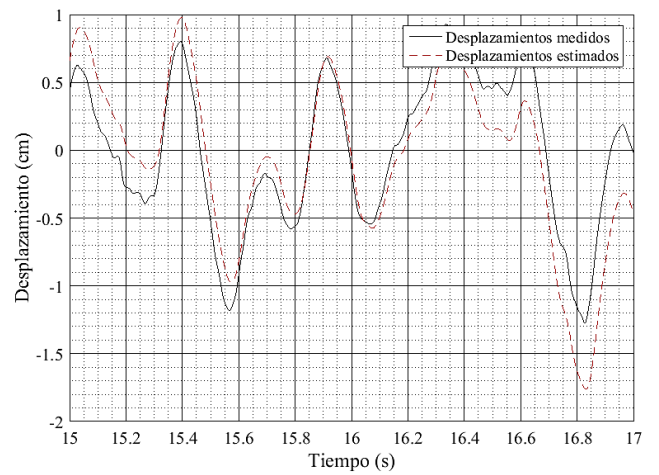


Fig. D.17. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

D.3.5. Sismo Tohoku, Japón

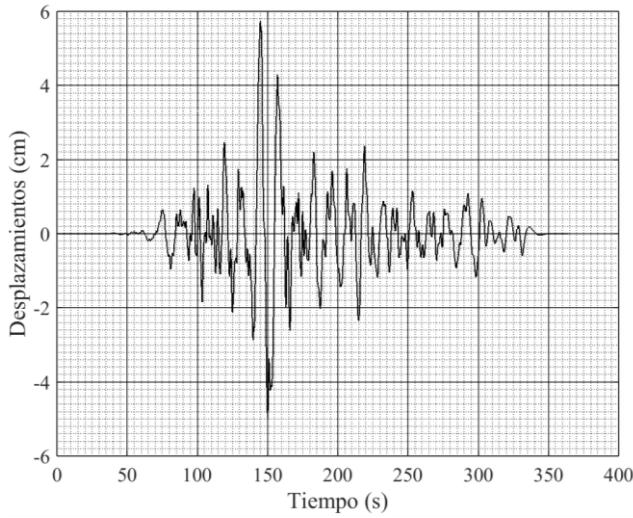


Fig. D.18. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación AKTH10, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

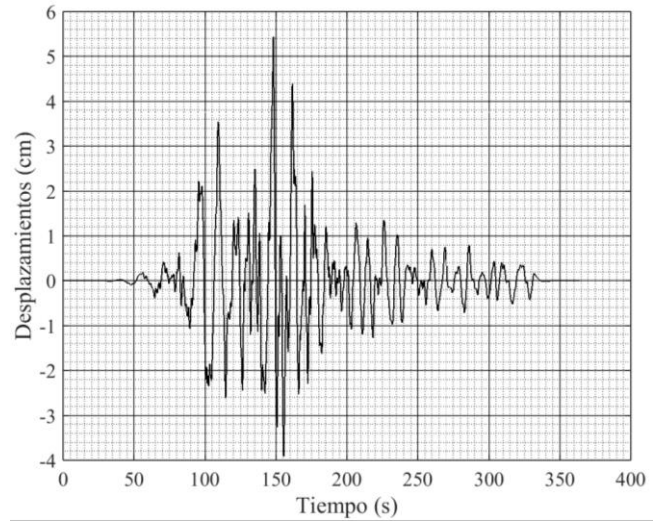


Fig. D.20. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación FKSH05, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

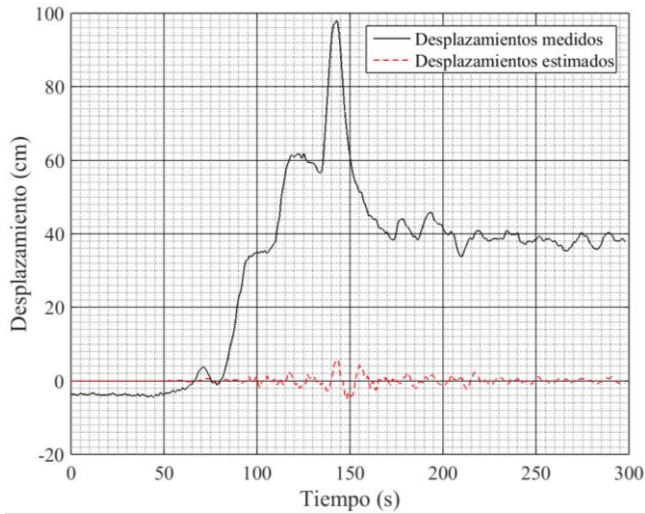


Fig. D.19. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación AKTH10 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

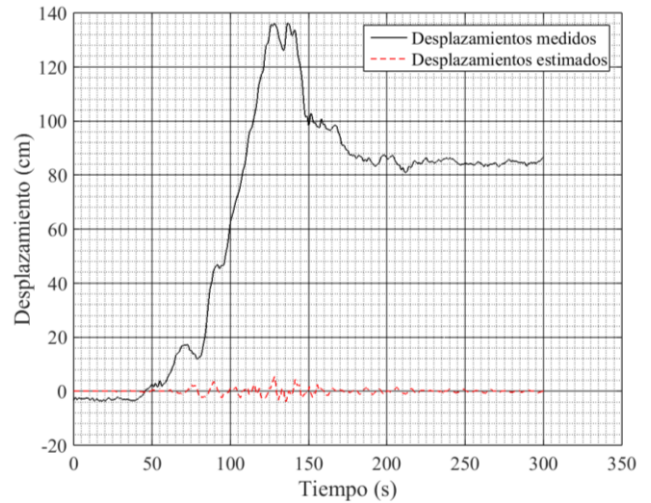


Fig. D.21. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación FKSH05 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

APÉNDICE E. MÉTODO DE BOORE

et al.

En este apéndice se describe el método propuesto por David M. Boore *et al.* [24] (2002) para la corrección por línea base de registros de aceleración.

Se presenta un archivo script de Matlab en donde se puede observar el esquema de procesamiento seguido, y las instrucciones para su implementación.

Para mostrar la bondad del método se presentan algunos resultados de su aplicación en registros de aceleración de diferentes tipos de excitación. Estos ejemplos corresponden a los mostrados para los métodos de los apéndices anteriores.

E.1. Algoritmo

Esta metodología fue desarrollada por David M. Boore, Christopher D. Stephens, y William B. Joyner, 2002 [24], su propósito es estimar los desplazamientos residuales a partir de registros de aceleración basándose en el ajuste de línea base de los registros de aceleración.

Los pasos que involucran el procesamiento de señales por medio de este método se ilustran en el diagrama de flujo de la Fig. E.1 y son los siguientes.

Se calcula la media de la porción del pre-evento del registro de aceleración, y se resta al registro completo. Este paso es llamado corrección de orden cero.

Se integra el registro de aceleración para obtener las velocidades.

Se ajusta una función cuadrática a la velocidad, iniciando en el tiempo del primer arribo de la señal y restringiendo a que la función de ajuste sea cero en el tiempo de inicio.

Remover la derivada de la función de ajuste del registro de aceleración con corrección de orden cero.

Aplicar un filtro Butterworth causal pasa alta. Las frecuencias de corte se eligen de manera subjetiva. Los autores plantean que en algunos casos, la corrección por línea base del paso anterior proporciona resultados razonables. En estos casos no es necesario aplicar el filtro pasa alta. Sin embargo, hay casos en los que se observan oscilaciones indeseables de periodo largo, en dichos casos, se obtienen mejores resultados, al aplicar un filtro pasa alta.

Cálculo de la velocidad y el desplazamiento por medio de la integración simple y doble del registro de aceleración.

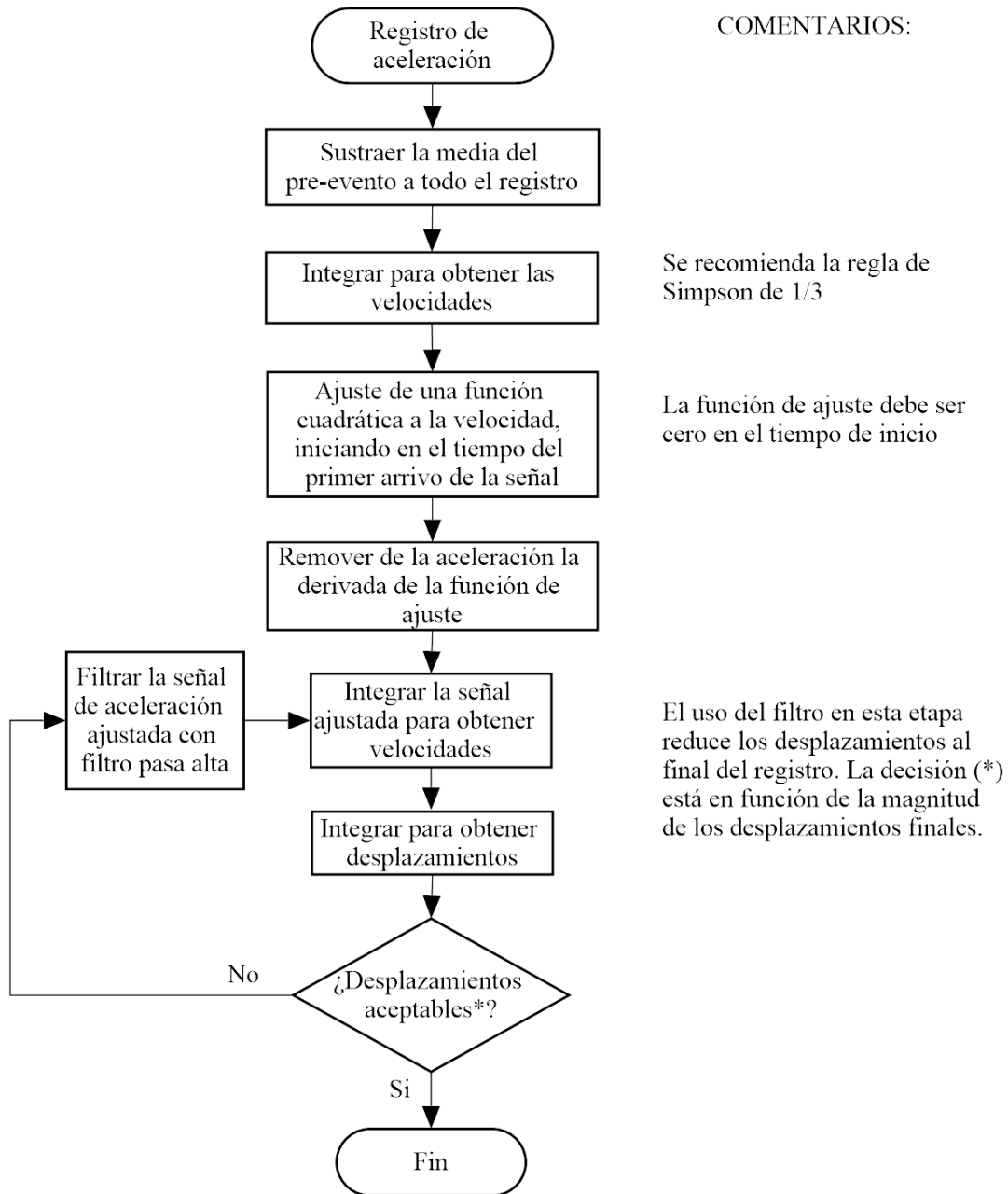


Fig. E.1. Diagrama de flujo del método de Boore *et al.*

E.2. Archivo script de Matlab ®

% Programa para estimar desplazamientos a partir de registros de aceleración, mediante el método propuesto por Boore 2002.
 % Fecha de creación: 15 de Octubre 2015

```
close all; clear all; clc;
fprintf('\nMétodo de Boore (2002)\n\n');
```

% Valores de entrada:

```
sampling_rate = input('Sample rate en Hz = ');
delta_t = 1.0/sampling_rate; % Espacio entre muestras
Nyquist = sampling_rate/2.0; % Frecuencia de Nyquist
scale_factor = 392.4; % Para convertir de voltios a cm/s^2
orden_high = 4; % Orden del filtro pasa alta
```

```

fc_high = 0.07; % Frecuencia de corte del filtro pasa
alta en Hz
caso = 2; % caso = 1, se aplica filtro pasa alta, caso =
2, no se aplica filtro pasa alta.
%-----
% ***** PROCESOS PREVIOS*****
%1.- Carga el registro de voltajes a procesar

filename = input('Open file: ', 's');
xc = load (filename);
xc = xc; % Para los armónicos y sismos se pone (+),
para los puentes, mesa vibradora (-)
[N,~] = size(xc);
tc_max = N/sampling_rate;
tc = (delta_t:delta_t:tc_max); % Esto genera un
vector tiempo

figure (1);
plot(tc,xc,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Voltaje (v)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'arial', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_t_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (1), 'v_t_pa11_ch7.bmp')

%2.- Cortar el registro de aceleraciones
tiempo_de_corte_inicial = input('Tiempo de corte
inicial = ');
tiempo_de_corte_final = input('Tiempo de corte final =
');
no = tiempo_de_corte_inicial*sampling_rate;
nf = tiempo_de_corte_final*sampling_rate;

j = 0.0;
for i = 1:N;
    if i > nf
        break;
    end
    if i >= no
        j = j+1;
        x(j) = xc(i);
    end
end
x = x';

% 3.- Escalar y mostrar registro original y la
Tranformada de Fourier
x = x*scale_factor;
[N,~] = size(x);
t_max = N/sampling_rate;
t = (delta_t:delta_t:t_max);

figure (2);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('a_t_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (2), 'a_t_pa11_ch7.bmp')

%Guarda archivo de señal original vs tiempo
file = fopen('PA11_CH7.txt', 'w');
for i = 1:N
    fprintf(file, '%12.6f, %12.6f\r\n', t(i), x(i));
end
fclose(file);

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0, Nyquist, length(y));

figure (3)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on

```

```

grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_orig_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (3), 'fft_orig_pa11_ch7.bmp')

%-----
% COMIENZA MÉTODO DE BOORE (2002)

% Paso 1: corrección de orden cero, calcular media del
pre-evento y restarla a todo el registro
tiempo_part1 = input('Tiempo T1 (tiempo de llegada
de la primera onda) = ');
n1 = floor(tiempo_part1 * sampling_rate);
average = 0.0;
for i = 1:n1
    average = average + x(i);
end
average = (average/n1);
x = x - average;

figure (4);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('alb_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (4), 'alb_pa11_ch7.bmp')

%Guarda archivo de señal original vs tiempo
file = fopen('PA11_CH7.lb','w');
for i = 1:N
    fprintf(file, '%12.6f, %12.6f\r\n', t(i), x(i));
end

fclose(file);

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0, Nyquist, length(y));

figure (5)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_lb_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (5), 'fft_lb_pa11_ch7.bmp')

%-----
% Paso 2: Integración del registro de aceleraciones

delta_t2 = delta_t/2; %Nuevo delta_t correspondiente
al delta_t de t2
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max);
A = spline(t,x,t2);
[NA,~] = size(A);
n200 = ceil(NA/2);
V(n200,1) = zeros;

V(1) = (A(1) + A(2))*(delta_t2/2.0);

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    V(k2,1) = V(k2-1)+(A(k)+ 4.0*A(k+1)+ A(k+2))*
delta_t2/3.0;
end

figure (6);
plot(t,V,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)

```

```

ylabel('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (6), 'v_pa11_ch7.bmp')

% Guardar registro de Velocidades
file= fopen ('V_PA11_CH7.txt', 'w');
for i = 1 : N
    fprintf (file, '% 12.6f, % 12.6f\r\n', t(i), V(i));
end
fclose(file);

%-----
% Paso 3: Ajuste cuadrático en la velocidad iniciando
en el tiempo del primer arribo de la señal.

for i = n1:N
    signal_lb(i - n1 + 1) = V(i);
end
signal_lb = signal_lb';
t_lb = (n1/sampling_rate:delta_t:t_max);
[N_lb, ~] = size(signal_lb);
t_lb = t_lb(:);
signal_lb = signal_lb(:);

n = 2; % Grado del polinomio a ajustar
C = ones(length(t_lb), n+1, class(t_lb)); % 'C' es la
matriz de Vandermonde para 'x'
for j = n:-1:1
    C(:,j) = t_lb.*C(:,j+1);
end

d = signal_lb; % 'd' es el vector de valores 'y'.
% En este caso no hay restricciones de desigualdades
A = [];
b = [];
% Utilizamos una restricción de igualdad lineal para
forzar curva a pasar
% por el punto requerido, en este caso, 'Aeq' es la
matriz de Vandermonde

```

```

% para 'x0'
Aeq = tiempo_part1.^(n:-1:0);
% y 'beq' es el valor de la curva debe tomar en ese
punto
beq = 0;
p = lsqlin( C, d, A, b, Aeq, beq ); % Resuelve
problemas de mínimos cuadrados con restricciones
lineales
fit = polyval( p, t_lb ); % Evaluamos la función de
ajuste

figure (7);
plot(t_lb, fit, 'k', t_lb, signal_lb, 'b', tiempo_part1, beq, 'gx')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
legend('Función de ajuste', 'Velocidades')
savefig('lb_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (7), 'lb_pa11_ch7.bmp')

%-----
% Paso 4: Diferenciación de la función de ajuste y
sustraerla de la señal de aceleración original

for i = 2:(N_lb-1) % Diferenciar la función de ajuste
    diff(i) = (fit(i+1)-fit(i-1))/(2*delta_t);
end
diff = diff';
diff(1) = diff(2);
diff(N_lb) = diff(N_lb-1);

for i = n1:N % Remover la función de mejor ajuste del
registro de las aceleraciones
    Acel(i - n1 + 1) = x(i);
end
Acel = Acel';
Acel_cor = Acel - diff;

for i = n1:N % Reemplazar señal

```

```

    x(i) = Acel_cor (i - n1 + 1);
end
figure (8);
plot(t,x,'b', t_lb, diff, 'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('avin_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (8), 'avin_pa11_ch7.bmp')

% Guarda archivo de señal ajustada con mínimos
cuadrados vs tiempo
file_2 = fopen ('PA11_CH7.vin','w');
for i = 1 : N
fprintf (file_2, '% 12.6f, % 12.6f\r\n', t(i), x(i));
end
fclose(file_2);

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0, Nyquist, length(y));

figure (9)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';

```

```

ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_vin_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (9), 'fft_vin_pa11_ch7.bmp')

% -----
if caso == 1
% Paso 5: Aplicación de filtro pasa alta Butterworth

% Filtro Butterworth pasa alta
[b,a] = butter(orden_high, fc_high/Nyquist, 'high'); %
Diseño de un filtro
x = filtfilt(b,a,x);

figure (10)
freqz(b,a)
dataIn = randn(sampling_rate, 1);
dataOut = filtfilt(b,a,dataIn);

figure (11)
plot(t, x, 'k');
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set (gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 12)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('a_L_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (11), 'a_L_pa11_ch7.bmp')

% Guarda el archivo resultado del filtro pasa alta
file = fopen ('A_PA11_CH7.high','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file, '% 12.6f, % 12.6f\r\n', t(i), x(i));
end
fclose(file);

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0, Nyquist, length(y));

figure (12)
plot (f,y)

```



```

xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_L_pa11_ch7.fig')
saveas('figure (12)','fft_L_pa11_ch7.bmp')

end

%-----
% Paso 6: Doble integración del registro de
aceleraciones

delta_t2 = delta_t/2; %Nuevo delta_t correspondiente
al delta_t de t2
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max);
Ac = spline(t,x,t2);
[NA,~] = size(Ac);
n200 = ceil(NA/2);
Vel(n200,1)= zeros;

Vel(1) = (Ac(1) + Ac(2))*(delta_t2/2.0);

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    Vel(k2,1) = Vel(k2-1)+(Ac(k)+ 4.0*Ac(k+1)+
Ac(k+2))* delta_t2/3.0;
end

figure (13);
plot(t,Vel,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';

```

```

ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('Vf_pa11_ch7.fig')
saveas('figure (13)','Vf_pa11_ch7.bmp')

%Guardar registro de Velocidades
file = fopen ('VF_PA11_CH7.txt','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),Vel(i));
end
fclose(file);

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(Vel))/length(Vel);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

```

```

figure (14)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_v_pa11_ch7.fig')
saveas('figure (14)','fft_v_pa11_ch7.bmp')

```

```

Vs = spline(t,Vel,t2);
D(n200,1)= zeros;
D(1) = (Vs(1) + Vs(2))*(delta_t2/2.0);

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    D(k2,1) = D(k2-1)+(Vs(k)+ 4.0*Vs(k+1)+
Vs(k+2))* delta_t2/3.0;
end

```

```

Dmax = max(abs(D));

figure (15);
plot(t,D,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Desplazamientos (cm)', 'FontName', 'Times
New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_pa11_ch7.fig')
saveas(figure (15),'D_pa11_ch7.bmp')

% Guardar registro de Desplazamientos
file= fopen ('D_PA11_CH7.txt','w');
for i = 1 : N;
    fprintf (file,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),D(i));
end
fclose(file);

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(D))/length(D);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (16)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';

```

E.3. Ejemplos de aplicación

E.3.1. Pruebas de vibración armónica

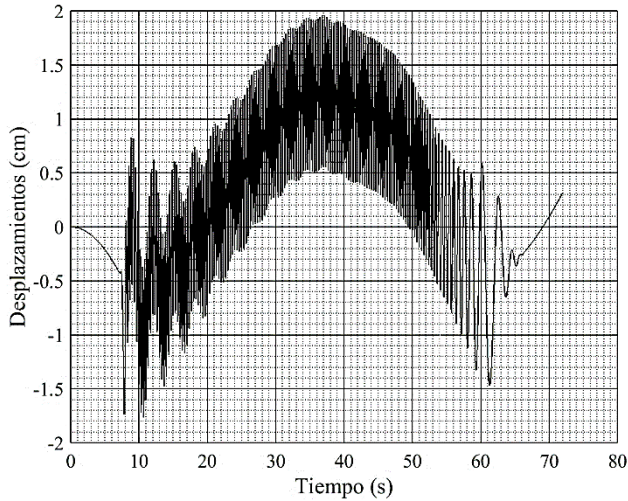


Fig. E.2. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

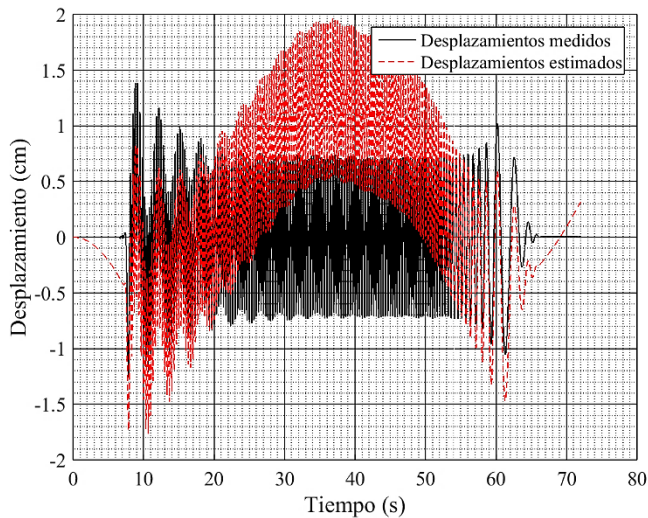


Fig. E.3. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

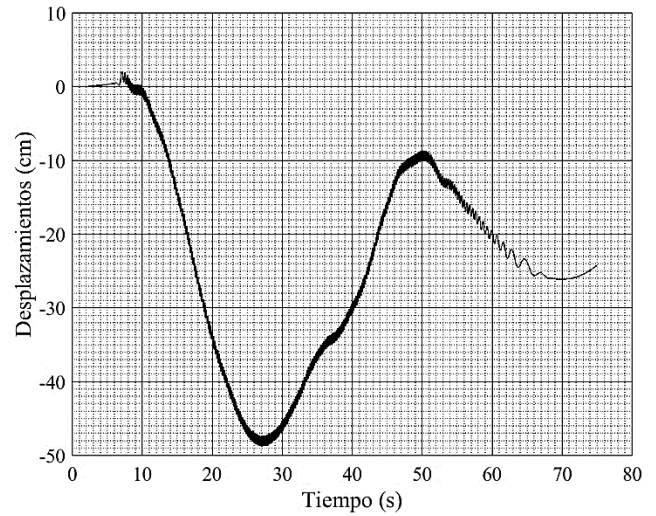


Fig. E.4. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

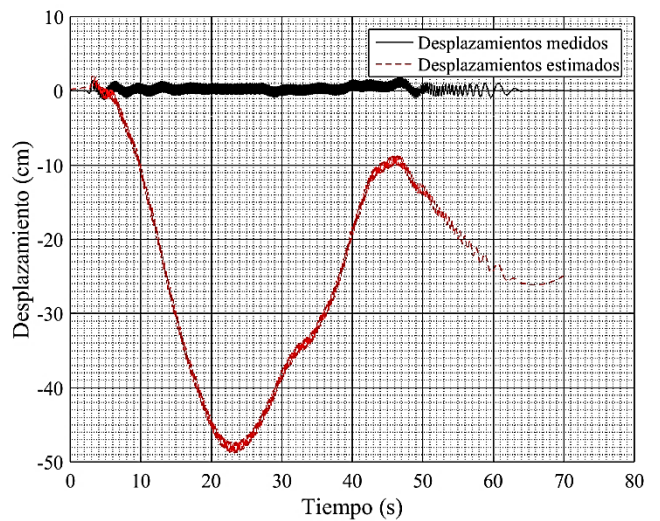


Fig. E.5. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

E.3.2. Pruebas en puente vehicular

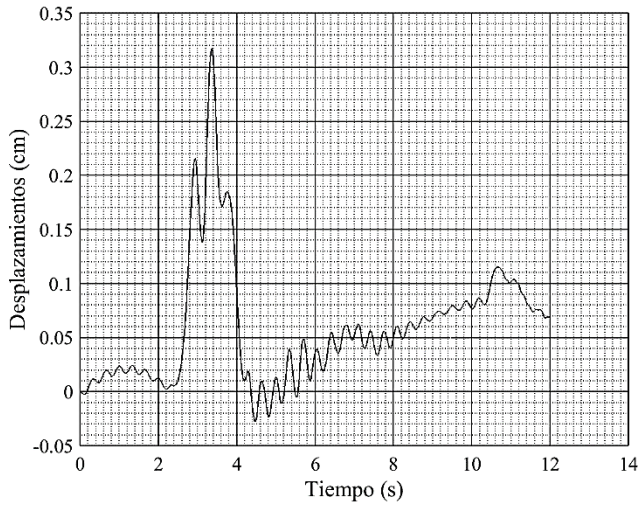


Fig. E.6. Desplazamientos estimados para la prueba 13 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

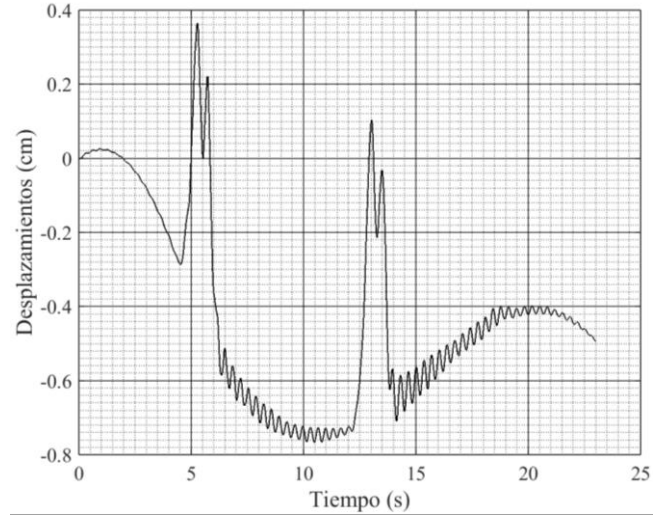


Fig. E.8. Desplazamientos estimados para la prueba 19 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

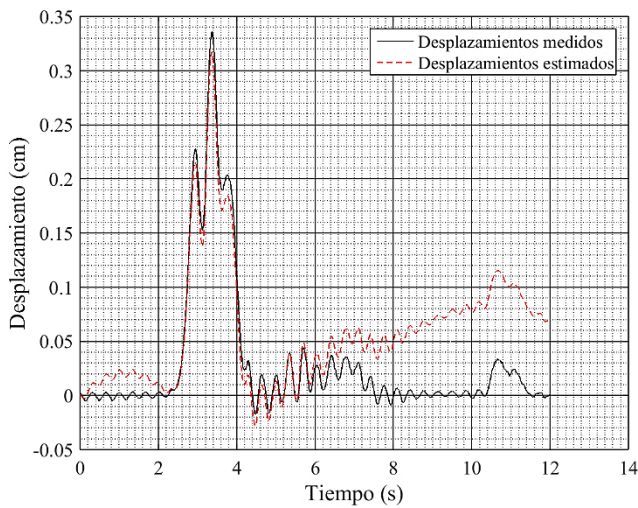


Fig. E.7. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 13 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

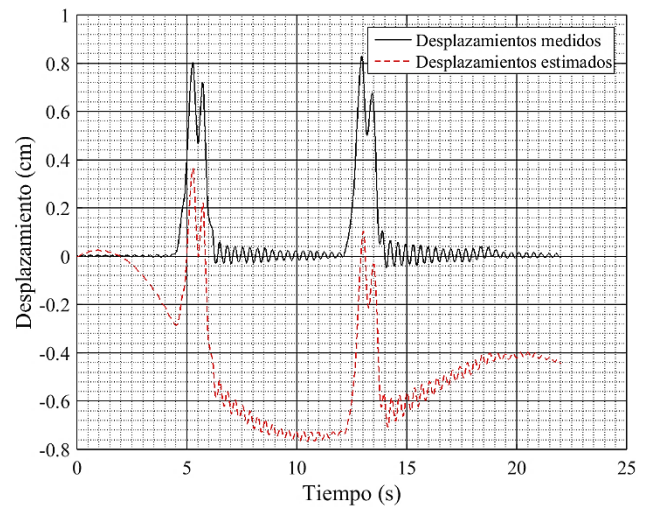


Fig. E.9. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 19 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

E.3.3. Pruebas en puente peatonal

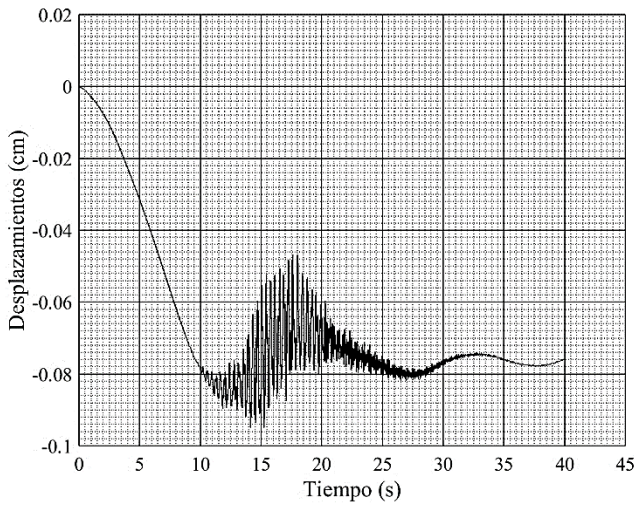


Fig. E.10. Desplazamientos estimados para la prueba 5 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

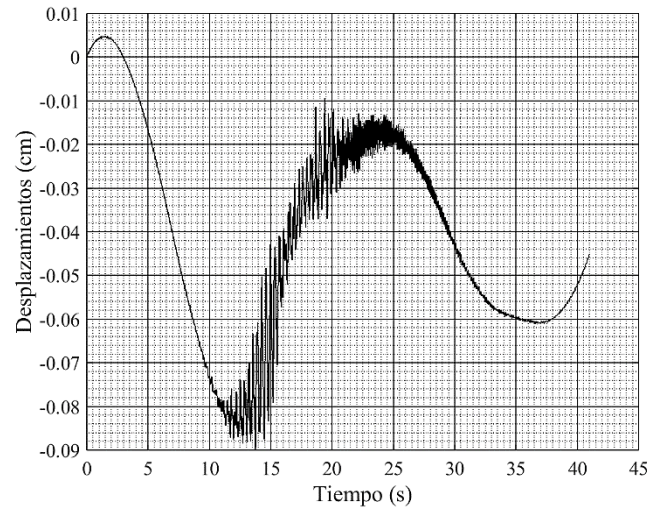


Fig. E.12. Desplazamientos estimados para la prueba 7 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

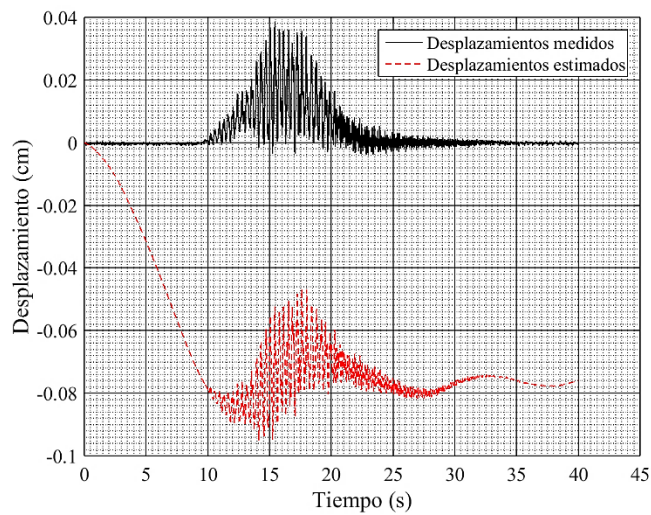


Fig. E.11. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 5 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

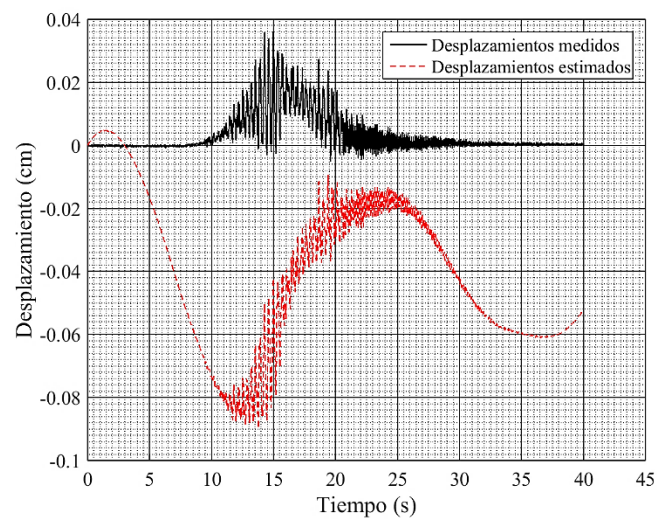


Fig. E.13. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 7 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

E.3.4. Pruebas en mesa vibradora

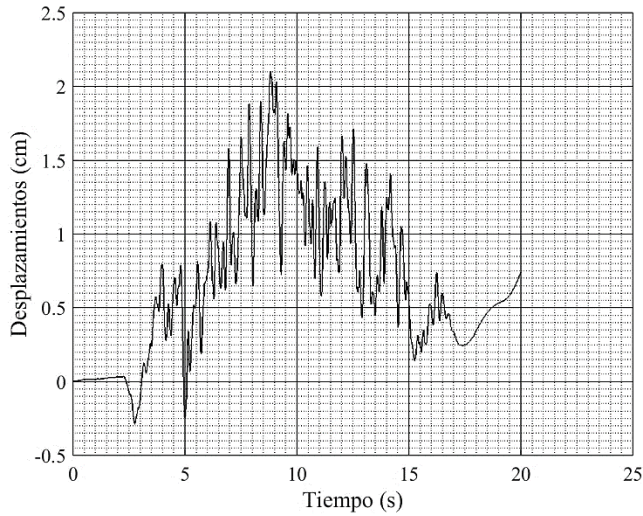


Fig. E.14. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

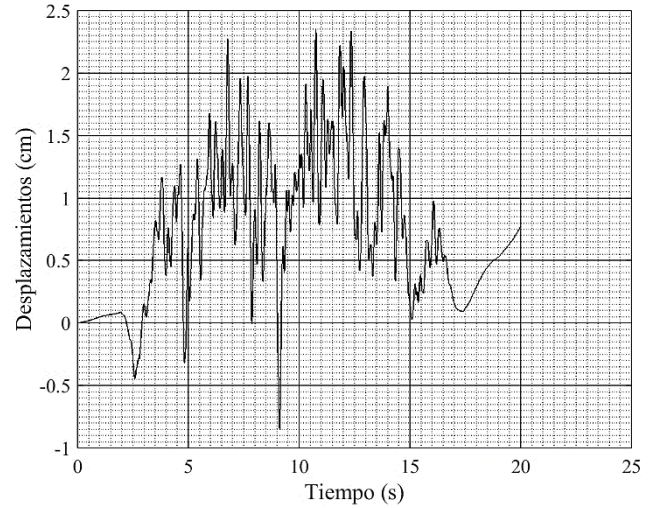


Fig. E.16. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

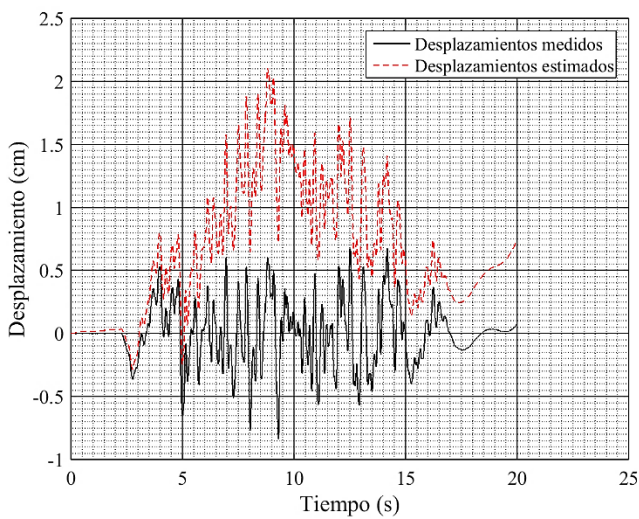


Fig. E.15. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

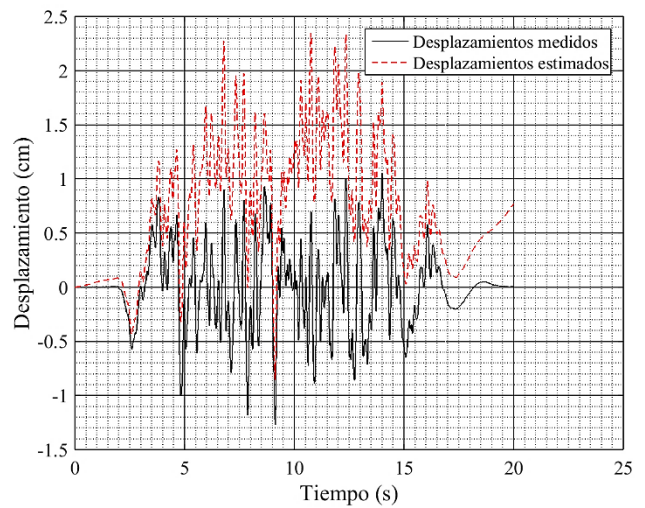


Fig. E.17. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

E.3.5. Sismo Tohoku, Japón

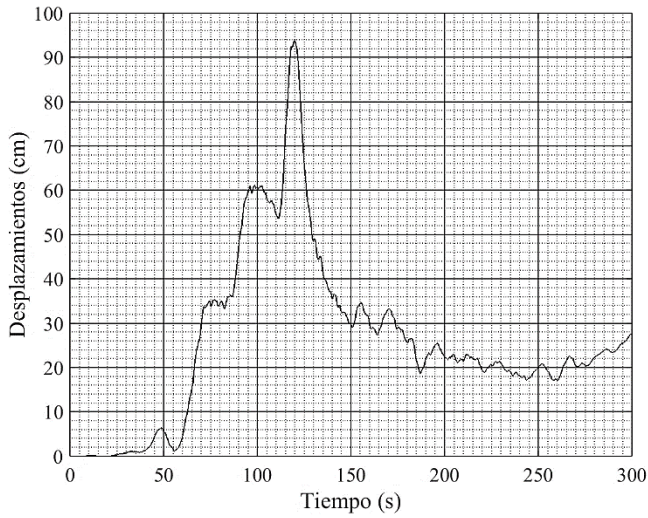


Fig. E.18. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación AKTH10, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

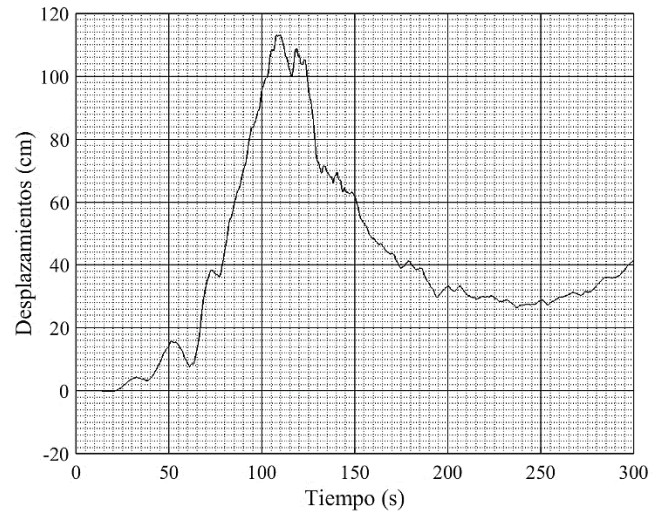


Fig. E.20. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación FKSH05, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

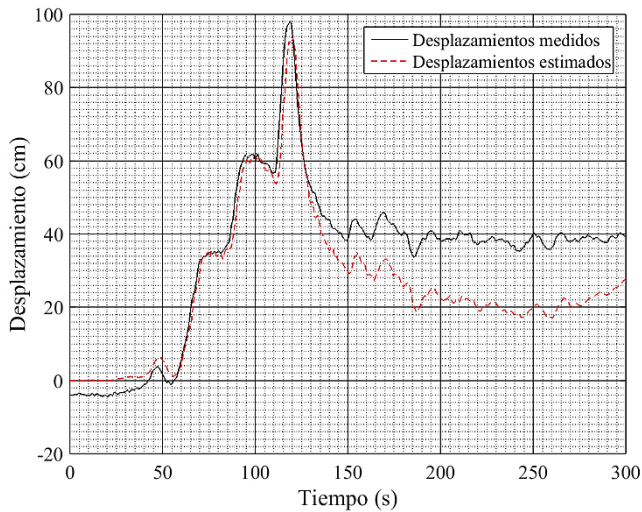


Fig. E.19. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación AKTH10 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

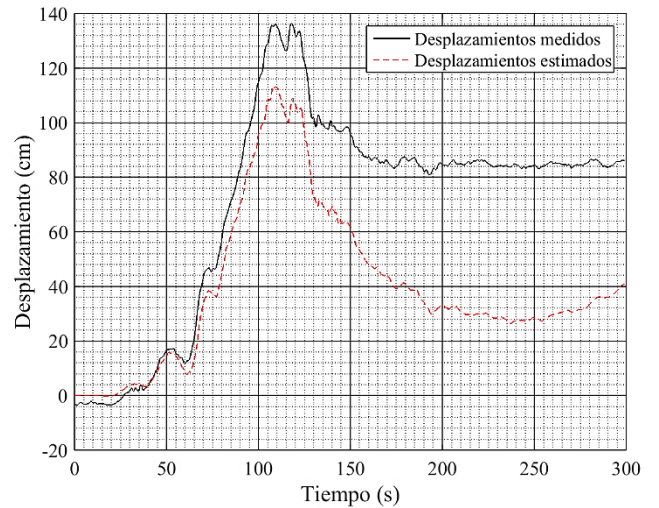


Fig. E.21. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación FKSH05 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

APÉNDICE F. MÉTODO DE WANG

et al.

En este apéndice se describe el método propuesto por Rongjiang Wang *et al.* [22] (2011), para la corrección por línea base de registros de aceleración.

Se presenta un archivo script de Matlab ® en donde se puede observar el esquema de procesamiento seguido, y las instrucciones para su implementación.

Para mostrar la bondad del método, se presentan algunos resultados de su aplicación en registros de aceleración de diferentes tipos de excitación. Estos ejemplos corresponden a los mostrados para los métodos de los apéndices anteriores.

F.1. Algoritmo

Esta metodología fue desarrollada por Wang, Schurr, Milkereit, Shao y Jin, 2011, [22]. Se basa en la corrección por línea base del registro de velocidades por medio de una función continua v_c .

Los pasos de este algoritmo se resumen en la Fig. F.1 y son los siguientes:

Estimar el tiempo del primer arribo de la señal t_p por medio de la aproximación a un umbral de aceleraciones, por ejemplo cuando la señal excede 1.5 veces el nivel del ruido. Calcular la media del pre-evento previo a t_p y restarla del registro completo de aceleración.

Determinar el tiempo donde se alcanza aceleración máxima t_{PGA} y t_f . Donde t_f es seleccionado por un umbral de energía acumulativa del registro de aceleración, (ejemplo 90%). Si el post-evento del registro es muy largo se corta de modo que t_e (tiempo final del registro) $t_e \leq t_p + 4(t_f - t_p)$.

Integrar la aceleración para obtener la velocidad y el desplazamiento y determinar los parámetros t_{DO} = último tiempo en el que el desplazamiento sin ajustar toca el eje cero y t_{PGD} = tiempo del máximo desplazamiento antes del tiempo t_{DO} .

Determinar una función cuadrática o si es necesario cúbica, que mejor se ajuste al desplazamiento entre t_f y t_e , y obtener los parámetros de corrección del post-evento v_f y a_f , a partir de la derivada de la función de ajuste.

Examinar todas las funciones continuas v_c candidatas para la corrección de línea base

$$v_c(t) = \begin{cases} 0, & t \leq t_1 \\ \frac{v_f}{t_2 - t_1}(t - t_1), & t_1 < t < t_2 \\ v_f + a_f(t - t_2), & t \geq t_2 \end{cases}$$

Donde $t_2 \in (\max(t_{PGA}, t_{DO}), t_f)$ y $t_1 \in (t_{PGD}, t_2)$, y ajustar cada desplazamiento corregido a una función escalón $d_f H(t - t_3)$ donde H representa la función de Heavyside, los parámetros d_f y t_3 definen la función escalón que mejor se ajusta a la historia de los desplazamientos corregidos, d_f es el desplazamiento permanente y t_3 es el tiempo donde el registro alcanza una posición permanente. Esto implica que debe realizarse un procedimiento iterativo para seleccionar los parámetros t_1 y t_2 que cumplan con las condiciones anteriores.

Seleccionar los valores optimos t_1 y t_2 de modo que la historia de los desplazamientos corregidos se ajuste mejor a una función escalón, y realizar la corrección final de línea base. De acuerdo con este método, esta corrección final se debe realizar restando la función $v_c(t)$ del registro de velocidades sin corregir.

Integrar para obtener los desplazamientos.

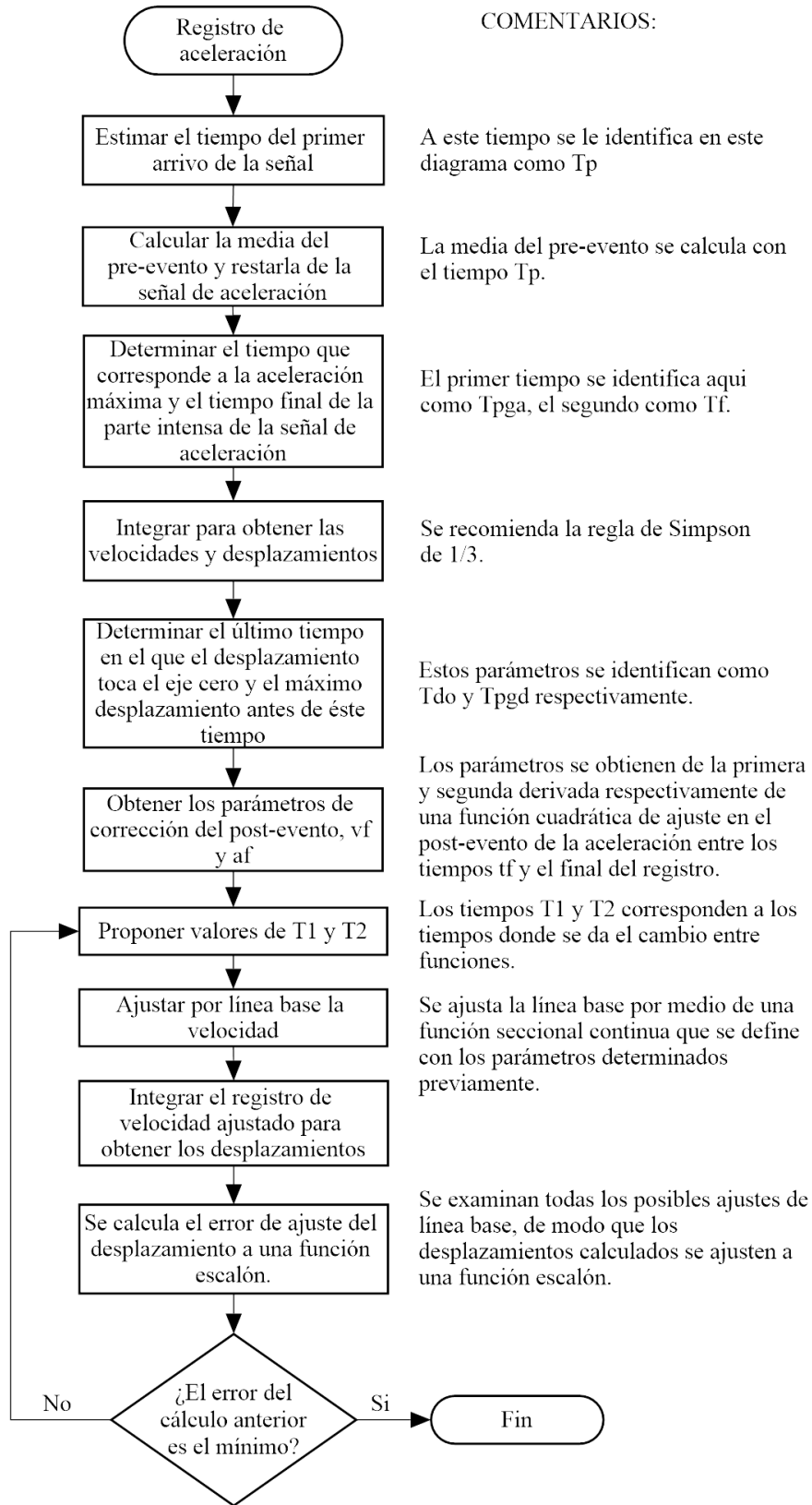


Fig. F.1. Diagrama de flujo del método de Wang *et al.*

F.2. Archivo script de Matlab ®

```
% Programa para estimar desplazamientos a partir de
registros de aceleración, mediante el metodo propuesto
por Wang 2011
% Fecha de elaboración: 18 de Noviembre 2015
close all; clear all; clc;
fprintf('\nMétodo de Wang et al (2011)\n\n');
```

```
% Valores de entrada:
sampling_rate = input('Sample rate en Hz = ');
delta_t = 1.0/sampling_rate; % Espacio entre
muestras
Nyquist = sampling_rate/2.0; % Frecuencia de
Nyquist
scale_factor = 392.4; % Para convertir de voltios a
cm/s^2
order_poly = 2; % Orden del polinomio para ajuste de
post-evento
```

```
%-----
% *****PROCESOS PREVIOS*****
% 1.- Carga el registro de voltajes a procesar
```

```
filename = input('Open file: ', 's');
xc = load (filename);
xc = xc;% Para los armónicos se pone (+), para los
puentes, mesa vibradora y sismo Japón (-)
[N,~] = size(xc);
tc_max = N/sampling_rate;
tc = (delta_t:delta_t:tc_max)'; % Esto genera un vector
tiempo de la señal completa
```

```
figure (1);
plot(tc,xc,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Voltaje', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_t_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (1), 'v_t_pa7_ch7.bmp')
```

```
% 2.- Cortar el registro de aceleraciones
tiempo_de_corte_inicial = input('Tiempo de corte
inicial = ');
tiempo_de_corte_final = input('Tiempo de corte final =
');
no = tiempo_de_corte_inicial*sampling_rate;
nf = tiempo_de_corte_final*sampling_rate;
j = 0.0;
for i = 1:N;
    if i > nf
        break;
    end
    if i >= no
        j = j+1;
        x(j) = xc(i);
    end
end
x = x';
```

```
% 3.- Escalar y mostrar registro original y la
Tranformada de Fourier
x = x*scale_factor;
[N,~] = size(x);
t_max = N/sampling_rate;
t = (delta_t:delta_t:t_max)';
```

```
figure (2);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('a_t_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (2), 'a_t_pa7_ch7.bmp')
```

```
% Guarda archivo de señal original vs tiempo
file_1 = fopen('PA7_CH7.txt.txt','w');
for i = 1:N
    fprintf(file_1,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),x(i));
end
fclose(file_1);
```

```

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y)); %Crea vector de
frecuencias

figure (3)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_orig_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (3),'fft_orig_pa7_ch7.bmp')

%-----
% COMIENZA MÉTODO DE WANG (2011)
% 1. Estimar el tiempo tp, correspondiente al arribo de
la señal
t_calculo_tp = input('Ingresar el tiempo para
promediar nivel de ruido pre-evento = ')
n1 = floor(t_calculo_tp * sampling_rate); %Número de
punto correspondiente al tiempo ingresado
average = 0.0;
for i = 1:n1
    average = average + abs(x(i));
end
average = (average/n1); % indica el nivel de ruido
presente en la señal (pre-evento)

for i = 1 :N
    if abs(x(i)) > (1.03 * average);
        tp = t(i);
        break
    end
end

%Corregir preevento
n2 = floor(tp * sampling_rate); %Número de punto
correspondiente a tp

average_pre_event = 0.0;
for i = 1:n2
    average_pre_event = average_pre_event + x(i);
end
average_pre_event = (average_pre_event/n2); %
indica el nivel de ruido presente en la señal (pre-
evento)

x = x - average_pre_event; % Vector de aceleración
corregida por pre-evento

figure (4);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('alb_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (4), 'alb_pa7_ch7.bmp')

%Guarda archivo de señal original vs tiempo
file_1 = fopen('PA7_CH7.lb','w');
for i = 1:N
    fprintf(file_1,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),x(i));
end
fclose(file_1);

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:); %Deja solo la mitad de la FFT
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (5)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
    
```

```

grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_lb_pa7_ch7.fig')
saveas('figure (5)', 'fft_lb_pa7_ch7.bmp')

%-----
%2.- Determinat t_PGA y t_f

[maxval,maxind] = max(abs(x));
t_PGA = maxind/sampling_rate;
E = sum(x.^2);
E_90 = 0.90 * E;
E_cal = 0.0;
x_energy = 0.0;

for i = 1:N
    x_energy = x_energy + x(i)^2;
    acum_energy(i) = x_energy;
end

for i = 1:N
    E_cal = E_cal + x(i).^2;
    if E_cal > E_90;
        t_f = t(i);
        break
    end
end

t_e = N(1,1)/sampling_rate;
if (t_e > (tp + 4.0* (t_f - tp)))
    t_e = (tp + 4.0* (t_f - tp));
    for i = 1:t_e*sampling_rate;
        x(i) = x(i);
    end
end

%-----
%3.- Doble integración del registro de aceleraciones
delta_t2 = delta_t/2; %Nuevo delta_t correspondiente
al delta_t de t2
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max)';
Ac = spline(t,x,t2);

% Integrar para obtener velocidades:
[NA,~] = size(Ac);
n200 = ceil(NA/2);
Vel(n200,1) = zeros;

Vel(1) = (Ac(1) + Ac(2))*(delta_t2/2.0); % Regla del
trapecio
for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    Vel(k2,1) = Vel(k2-1)+(Ac(k)+ 4.0*Ac(k+1)+
Ac(k+2))* delta_t2/3.0; % Regla de Simpson
end
Vel = Vel';

figure (6);
plot(t, Vel, 'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('V_pa7_ch7.fig')
saveas('figure (6)', 'V_pa7_ch7.bmp')

%Guarda archivo de señal original vs tiempo
file_1 = fopen('V_PA7_CH7.sc','w');
for i = 1:N
    fprintf(file_1, '%12.6f, %12.6f\r\n', t(i), Vel(i));
end
fclose(file_1);

% Cálculo de la transformada de Fourier del registro
de velocidades
y = 2*abs(fft(Vel))/length(Vel);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0, Nyquist, length(y));

figure (7)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)

```

```

grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_V_pa7_ch7.fig')
saveas('figure (7)', 'fft_V_pa7_ch7.bmp')

% Integrar para obtener desplazamientos:
Vc = spline(t, Vel, t2);
[NA, ~] = size(Vc);
n200 = ceil(NA/2);
D(n200, 1) = zeros;
D(1) = (Vc(1) + Vc(2)) * (delta_t2/2.0);

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    D(k2, 1) = D(k2-1) + (Vc(k) + 4.0*Vc(k+1) +
Vc(k+2)) * delta_t2/3.0;
end

figure (8);
plot(t, D, 'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Desplazamiento (cm)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_pa7_ch7.fig')
saveas('figure (8)', 'D_pa7_ch7.bmp')

% Guarda archivo de señal original vs tiempo
file_1 = fopen('D_PA7_CH7.sc', 'w');
for i = 1:N
    fprintf(file_1, '%12.6f, %12.6f\r\n', t(i), D(i));
end

end
fclose(file_1);

% Cálculo de la transformada de Fourier del registro
de desplazamientos
y = 2*abs(fft(D))/length(D);
y = y(1:fix(end/2), :);
f = linspace(0, Nyquist, length(y));

figure (9)
plot(f, y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'Times New Roman', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_D_pa7_ch7.fig')
saveas('figure (9)', 'fft_D_pa7_ch7.bmp')

% Obtener t_D0 y t_PGD
for i = 1:N-1
    prod = D(i) * D(i+1);
    if prod < 0.0
        t_D0 = t(i);
    end
end

for i = 1:t_D0*sampling_rate
    D_abs(i) = abs(D(i));
end
[maxval, maxind] = max(D_abs);
t_PGD = maxind/sampling_rate;

%-----
%4.- Determinar la función cuadrática que mejor se
ajusta al desplazamiento entre t_f y t_e

kf = floor(t_f*sampling_rate);
ke = floor(t_e(1,1)*sampling_rate);

for i = kf:ke

```

```

D_ac(i - kf + 1) = D(i);
end
D_ac = D_ac';

[N_post_event,~] = size(D_ac);
t_max_post_event = N_post_event/sampling_rate;
t_post_event = (delta_t:delta_t:t_max_post_event)'; %
Esto genera un vector tiempo del segmento de la señal
a analizar

% Ajuste cuadrático
coef = polyfit(t_post_event,D_ac,order_poly);
fit = polyval(coef,t_post_event);

figure (10);
plot(t_post_event,fit,'k',t_post_event,D_ac)
title('Ajuste cuadrático del post-
evento','FontName','Arial','FontSize',18)
xlabel('Tiempo(s)','FontName','Arial','FontSize',18)
ylabel('Desplazamiento(cm)','FontName','Arial',
'FontSize',18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('apost_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (10), 'apost_pa7_ch7.bmp')

% Diferenciación de fit para encontrar vf
for i = 1
    vf(i) = (fit(i+1) - fit(i))/(delta_t); %Two point
forward difference
end

% Diferenciación de fit para encontrar af
for i = 1
    af(i) = (fit(i) - 2*fit(i+1) + fit(i+2))/(delta_t^2);
%Three point forward difference
end
%-----
%5.- Examinar todas las correcciones por línea base,
ploteando t2 y t1, y ajustar cada desplazamiento
corregido por medio de una función escalón.

t_left_1 = max(t_PGA,t_D0);

```

```

t_right_1 = t_f;

t_left_2 = t_PGD;

% if t_5 < t_PGD
% t_left_2 = t_5;
% else t_left_2 = t_PGD;
% end

error_min = 5.0e9;
d_f_min = input('valor mín de d_f ');
d_f_max = input('valor máx de d_f ');
delta_d_f = (d_f_max - d_f_min)*0.025;
delta_t_1 = t_e/100.00;
delta_t_2 = t_e/100.00;
delta_t_3 = t_e/100.00;

for t_2 = t_left_1:delta_t_2:t_right_1

    t_right_2 = t_2;

    for t_1 = t_left_2:delta_t_1:t_right_2

        for t_3 = t_1:delta_t_3:t_2

            for d_f = d_f_min:delta_d_f:d_f_max

                vc_order_1 = floor(t_1*sampling_rate);
                vc_order_2 = floor(t_2*sampling_rate);
                vc_order_e = floor(t_e*sampling_rate);

                vc = zeros(1,vc_order_1);

                for i = vc_order_1:vc_order_2
                    vc(i) = (vf/(t_2 - t_1))*((i/sampling_rate) -
t_1);
                end

                for i = vc_order_2:vc_order_e
                    vc(i) = vf + af*((i/sampling_rate) - t_2);
                end

                Vel_ajust = Vel - vc;

% 2). Integrar por medio de regla de Simpson para
obtener desplazamientos:
Vc_int = spline(t,Vel_ajust,t2);
[NA,~] = size(Vc_int);
n200 = ceil(NA/2);
D_vajust(n200,1)= zeros;
D_vajust(1) = (Vc_int(1) +
Vc_int(2))*(delta_t2/2.0);

```

```

    for k = 2:2:NA-1;
        k2 = k/2+1;
        D_vajust(k2,1) = D_vajust(k2-
1)+(Vc_int(k)+ 4.0*Vc_int(k+1)+ Vc_int(k+2))*
delta_t2/3.0;
    end

    for i = 1:N
        step_function(i,1) = d_f;
        if (t(i) - t_3)<0.0
            step_function(i,1) = 0.0;
        end
    end

    error = 0.0;

    for i = 1:10:N
        error = error + (D_vajust(i) -
step_function(i))^2;
    end

    if error < error_min
        error_min = error;
        error
        t_3_selec = t_3;
        t_2_selec = t_2;
        t_1_selec = t_1;
        d_f_selec = d_f;
    end
end
end
end
end

%-----
% 6.- Usar los valores seleccionados de t_1 y t_2 para
hacer la corrección final de línea base

vc_order_1_selec = floor(t_1_selec*sampling_rate);
vc_order_2_selec = floor(t_2_selec*sampling_rate);
vc_order_e = floor(t_e*sampling_rate);
vc = zeros(1,vc_order_1_selec);

for i = vc_order_1_selec:vc_order_2_selec
    vc(i) = (vf/(t_2_selec -
t_1_selec))*((i/sampling_rate) - t_1_selec);
end
for i = vc_order_2_selec:vc_order_e
    vc(i) = vf + af*((i/sampling_rate) - t_2_selec);
end

figure (11);

```

```

plot(t, Vel, 'b', t, vc, 'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad(cm/s)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'arial', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('Vc_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (11), 'Vc_pa7_ch7.bmp')
Vel_final_ajust = Vel - vc;

figure (12);
plot(t, Vel_final_ajust)
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad(cm/s)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca, 'fontname', 'arial', 'fontsize', 16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('Vf_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (12), 'Vf_pa7_ch7.bmp')

%Guarda archivo de señal original vs tiempo
file_1 = fopen('Vfinal_PA7_CH7.txt', 'w');
for i = 1:N
    fprintf(file_1, '%12.6f, %12.6f\r\n', t(i), Vel_final_ajust(i)
);
end
fclose(file_1);
% Cálculo de la transformada de Fourier del registro
de desplazamientos
y =
2*abs(fft(Vel_final_ajust))/length(Vel_final_ajust);
y = y(1:fix(end/2),:);

```

```
f=linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (13)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_Vf_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (13), 'fft_Vf_pa7_ch7.bmp')

% 2). Integrar por medio de regla de Simpson para
obtener desplazamientos finales:

Vc = spline(t, Vel_final_ajust,t2);
[NA,~] = size(Vc);
n200 = ceil(NA/2);

D_final(n200,1)= zeros;
D_final(1) = (Vc(1) + Vc(2))*(delta_t2/2.0);
for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    D_final(k2,1) = D_final(k2-1)+(Vc(k)+
4.0*Vc(k+1)+ Vc(k+2))* delta_t2/3.0;
end
Dmax = max(abs(D_final));

figure (14);
plot(t,D_final)
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Desplazamiento(cm)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
```

```
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('Df_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (14), 'Df_pa7_ch7.bmp')

% Cálculo de la transformada de Fourier del registro
de desplazamientos
y = 2*abs(fft(D_final))/length(D_final);
y = y(1:fix(end/2),:);
f=linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (15)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_Df_pa7_ch7.fig')
saveas(figure (15), 'fft_Df_pa7_ch7.bmp')

%Guarda archivo de señal original vs tiempo
file_1 = fopen('DFinal_PA7_CH7.txt.txt','w');
for i = 1:N
    fprintf(file_1,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),D_final(i));
end
fclose(file_1);

%7.Cálculo de desplazamiento cosismico
D_cosismico = 0.0;
for i =
floor(t_f*sampling_rate):1:floor(t_e*sampling_rate)
    D_cosismico = D_cosismico + D_final(i);
end
D_cosismico = (D_cosismico/((t_e -
t_f)*sampling_rate));
```


F.3. Ejemplos de aplicación

F.3.1. Pruebas de vibración armónica

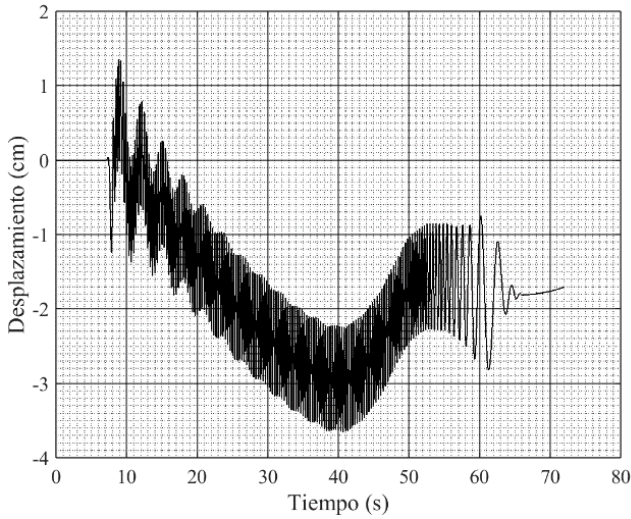


Fig. F.2. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

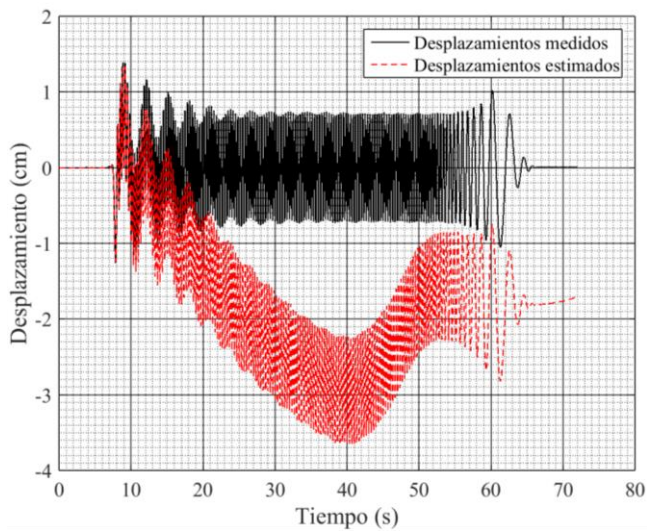


Fig. F.3. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

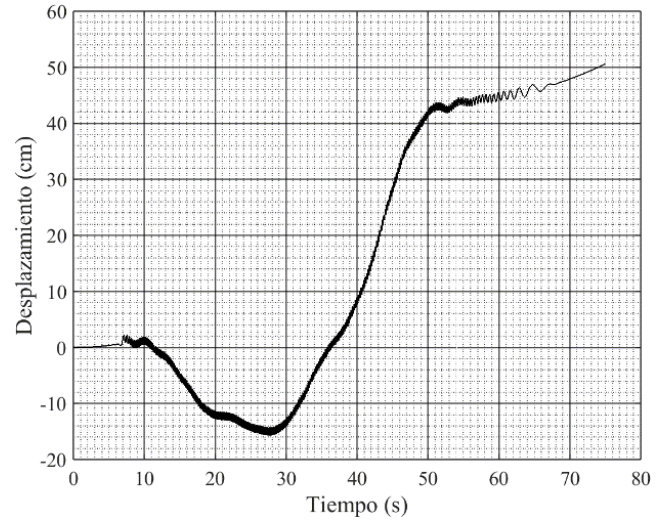


Fig. F.4. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

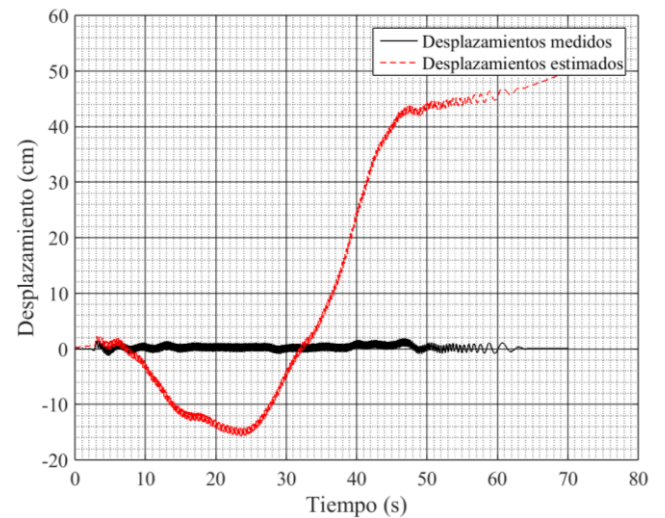


Fig. F.5. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

F.3.2. Pruebas en puente vehicular

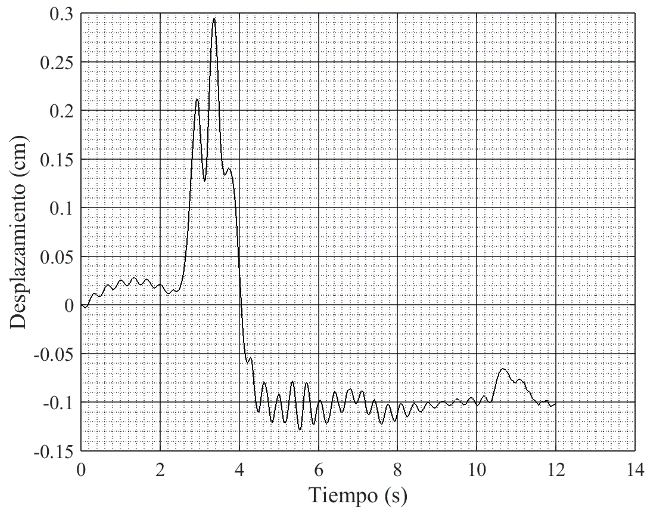


Fig. F.6. Desplazamientos estimados para la prueba 13 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

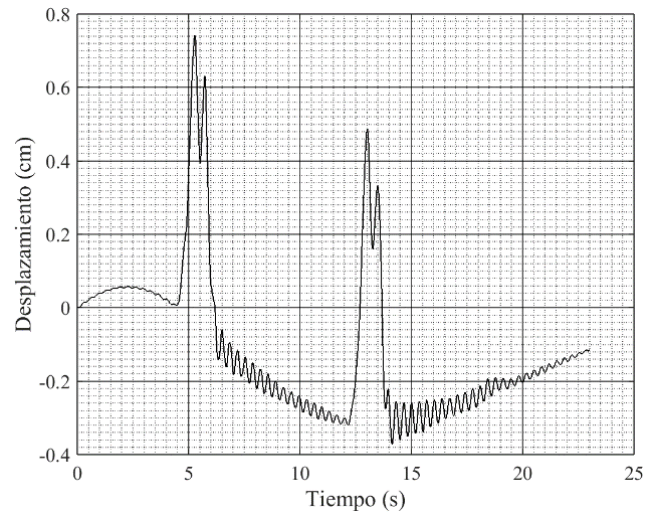


Fig. F.8. Desplazamientos estimados para la prueba 19 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

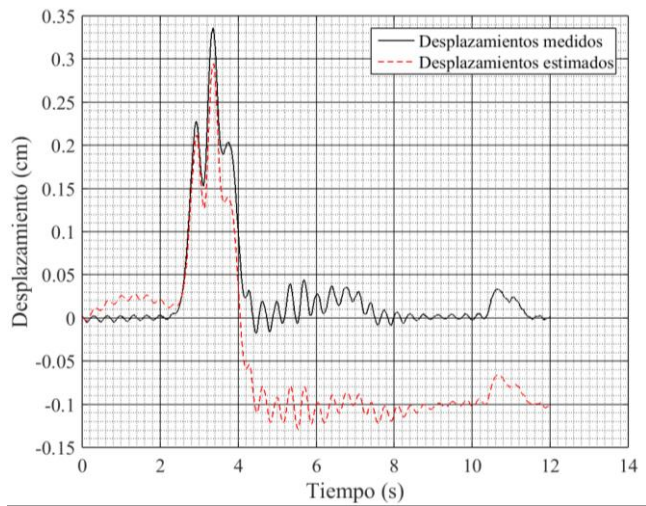


Fig. F.7. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 13 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

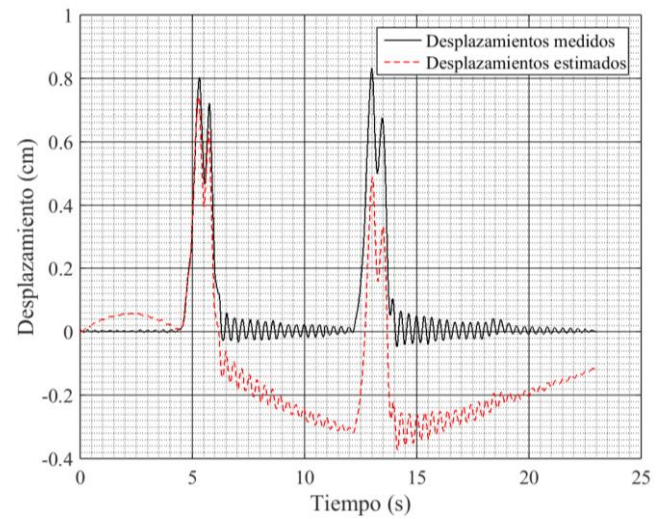


Fig. F.9. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 19 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

F.3.3. Pruebas en puente peatonal

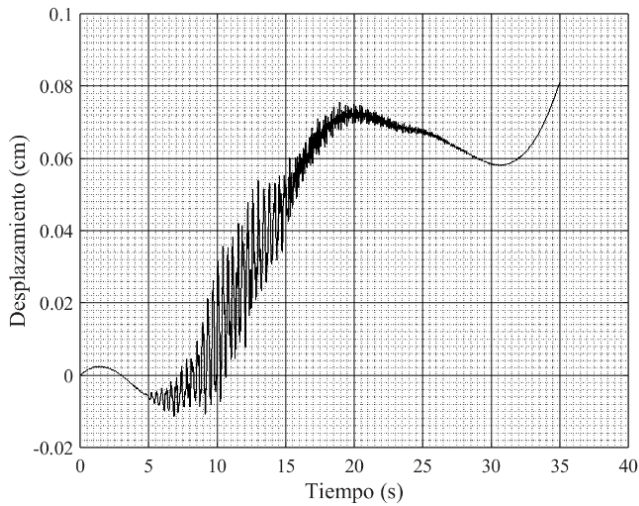


Fig. F.10. Desplazamientos estimados para la prueba 5 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

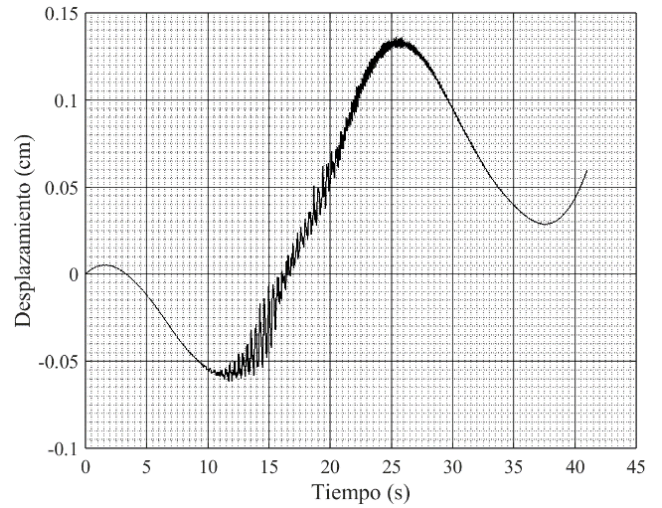


Fig. F.12. Desplazamientos estimados para la prueba 7 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

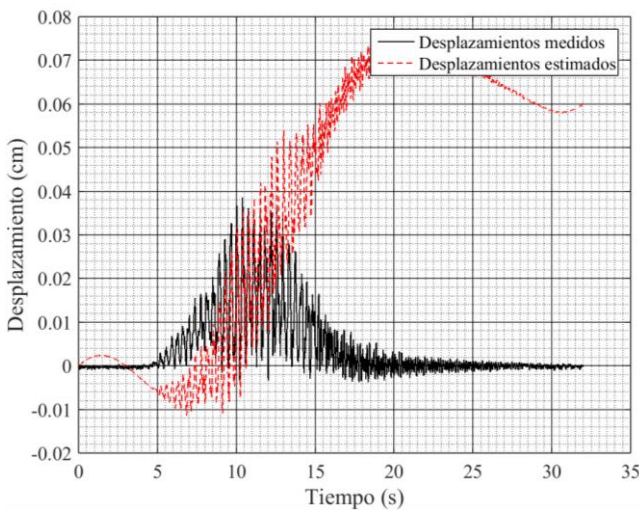


Fig. F.11. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 5 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

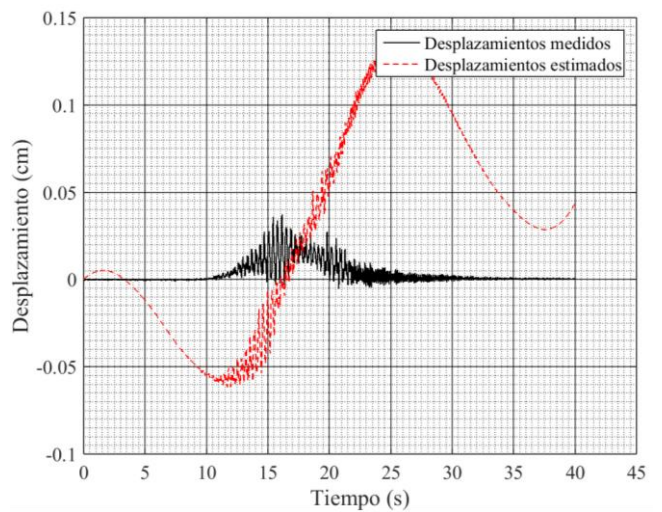


Fig. F.13. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 7 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

F.3.4. Pruebas en mesa vibradora

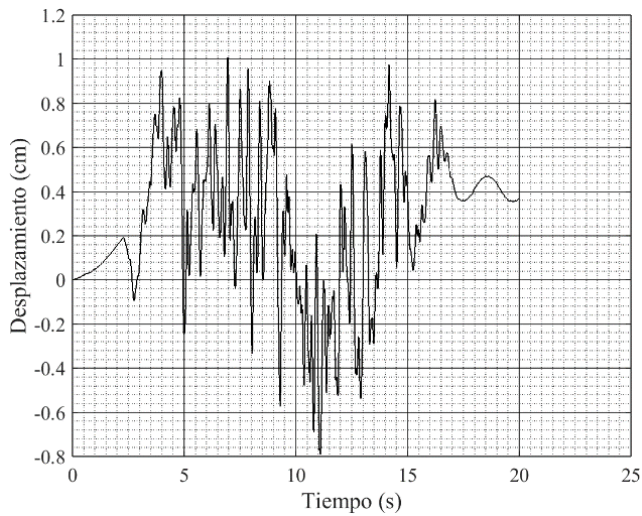


Fig. F.14. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

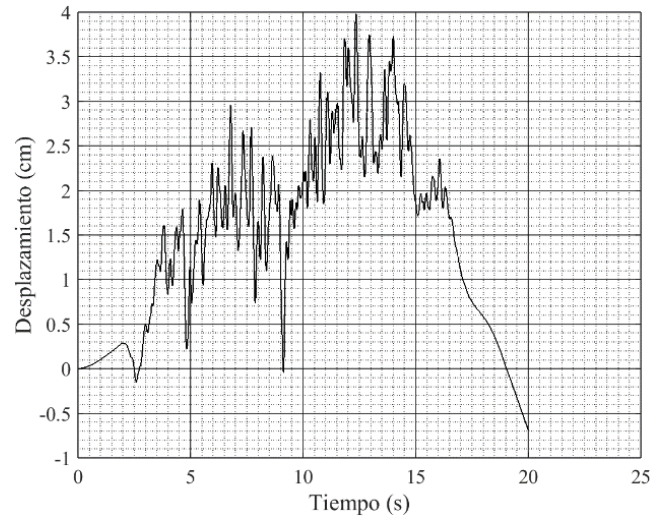


Fig. F.16. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

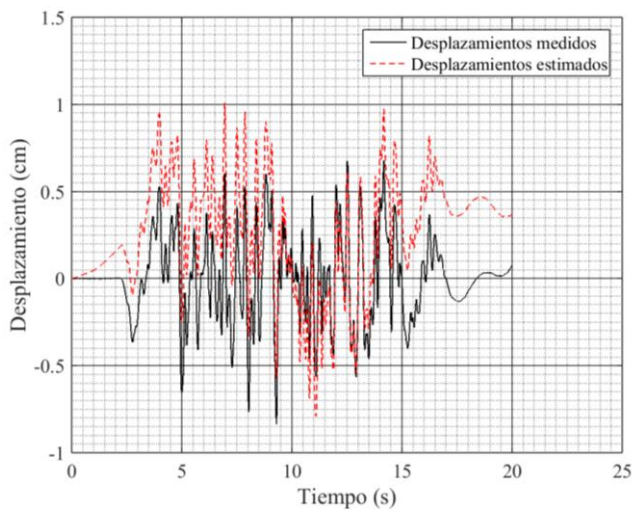


Fig. F.15. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

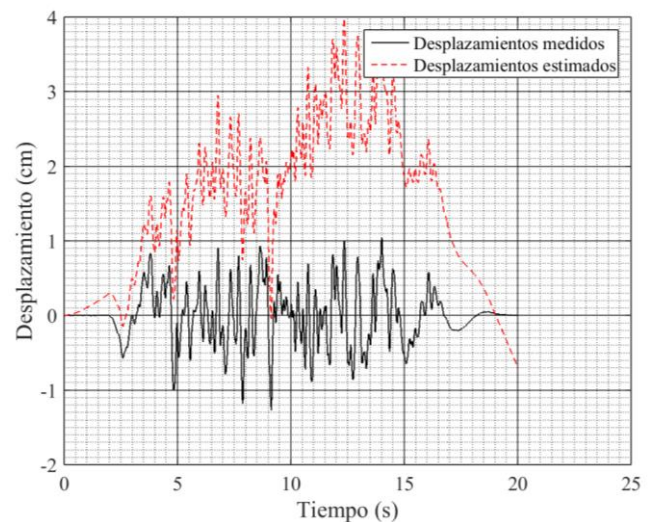


Fig. F.17. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

F.3.5. Sismo Tohoku, Japón

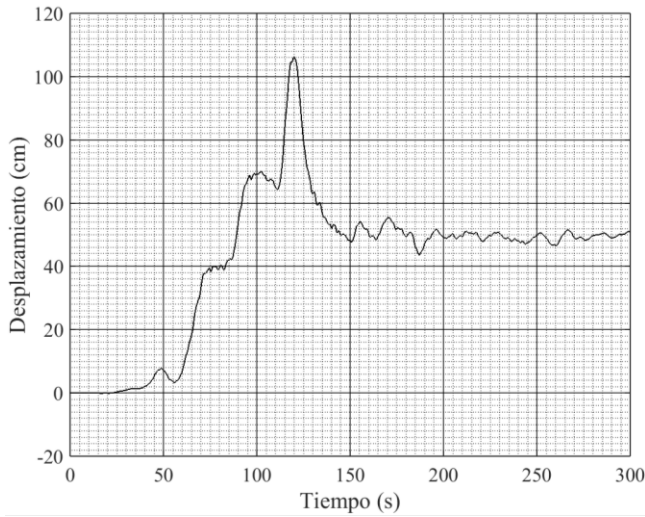


Fig. F.18. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación AKTH10, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

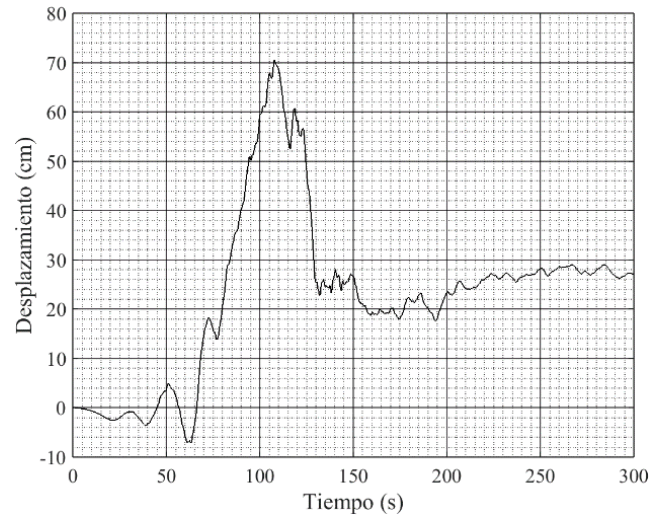


Fig. F.20. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación FKSH05, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

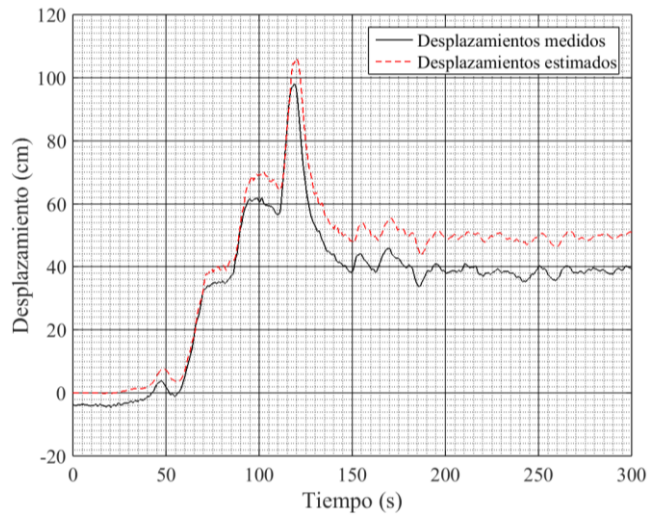


Fig. F.19. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación AKTH10 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

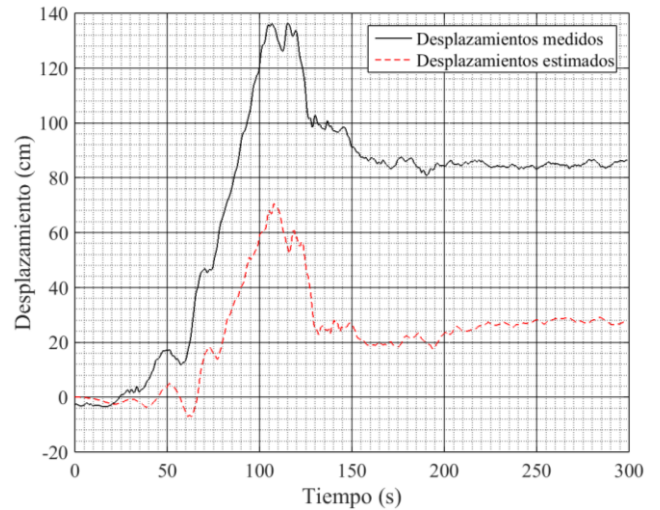


Fig. F.21. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación FKSH05 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

APÉNDICE G. MÉTODO DE DARRAGH *et al.*

En este apéndice se describe el método propuesto por Darragh *et al.* [16] (2004), para la corrección por línea base de registros de aceleración.

Se presenta un archivo script de Matlab® en donde se puede observar el esquema de procesamiento seguido y las instrucciones para su implementación.

Para mostrar la bondad del método, se presentan algunos resultados de su aplicación en registros de aceleración de diferentes tipos de excitación. Estos ejemplos corresponden a los mostrados para los métodos de los apéndices anteriores.

G.1. Algoritmo

Esta metodología fue desarrollada por Darragh, Silva y Gregor, 2004 [16], para el procesamiento de datos en el PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center). Su propósito es corregir los errores de línea base presentes en los registros, preservando los desplazamientos estáticos permanentes, también conocidos como desplazamientos tectónicos en registros cercanos a la falla (< 20 Km). En algunas otras referencias estos desplazamientos permanentes se refieren como desplazamientos cosísmicos.

Los pasos que involucran el procesamiento de señales por medio de este método son resumidos por Emore et al, 2007 [37], y se observan en el diagrama de flujo de la Fig. G.1. Éstos pasos son los siguientes:

Integrar el registro de aceleración para obtener velocidades.

Realizar un ajuste por mínimos cuadrados en el registro de velocidades usando una de las siguientes tres formas funcionales: ajuste lineal en la velocidad, ajuste cuadrático o ajuste bilineal seccional continuo.

Realizar una búsqueda sistemática del tiempo de inicio de la función de ajuste para determinar la mejor forma funcional de ajuste.

Diferenciar la mejor función de ajuste y removerla del registro original de aceleraciones.

Aplicar un filtro pasa baja tipo Butterworth causal de cuatro polos con una frecuencia de esquina cercana a 50 Hz, para remover el ruido de alta frecuencia presente en el registro.

Integrar el registro de aceleraciones para obtener las velocidades y los desplazamientos finales.

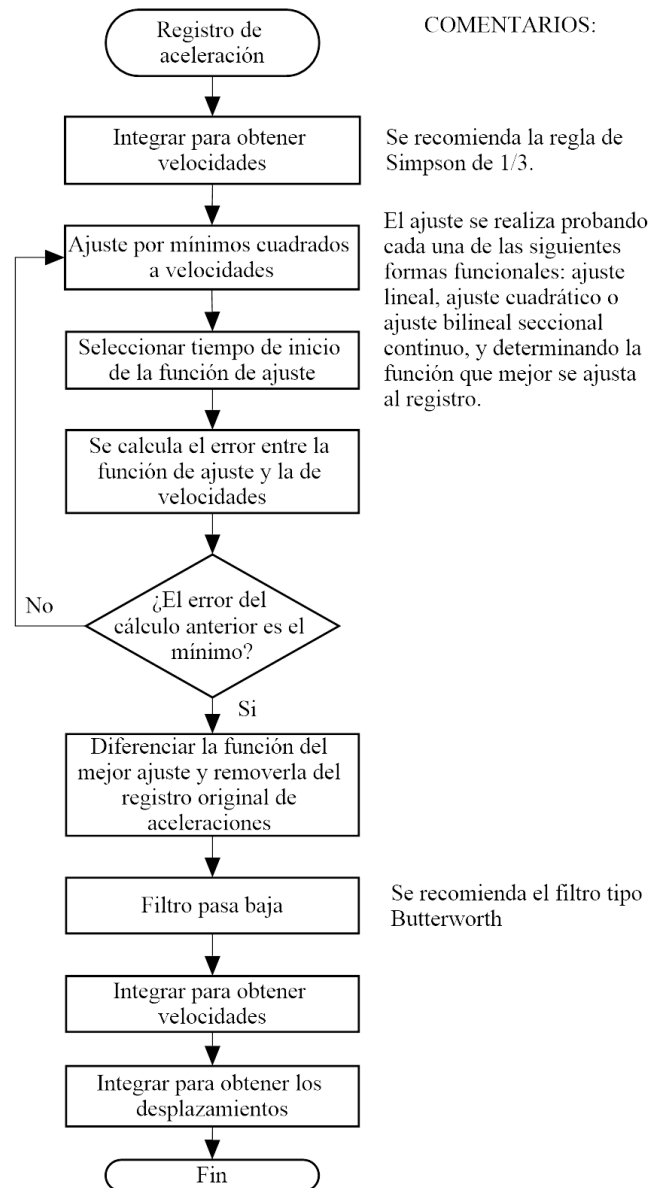


Fig. G.1. Diagrama de flujo del método de Darragh et al.

G.2. Archivo script de Matlab ®

% Programa para estimar desplazamientos a partir de registros de aceleración, mediante el método usado por PEER.

% Fecha de elaboración: 07 de Octubre 2015

% Última fecha de modificación: 01 de Abril del 2016

```

close all; clear all; clc;
fprintf('\nMétodo de PEER (2004)\n\n');
sampling_rate = input('Sample rate en Hz = ');
delta_t = 1.0/sampling_rate; % Espacio entre muestras
Nyquist = sampling_rate/2.0; % Frecuencia de Nyquist
scale_factor = 1; % Para convertir de voltios a cm/s^2
order_poly = 1; % Orden del polinomio
    
```

```

order_poly2 = 2; % Orden del polinomio en
velocidades
order_low = 2; % Orden del filtro pasa baja
fc_low = 25; % Frecuencia de corte del filtro pasa baja
opcion = 1; % Opción = 1, la alineación de las señales
es manual. Opción = 2, la alineación de las señales es
automática
%-----
% ***** PROCESOS PREVIOS*****
%1.- Carga el registro de voltajes a procesar

filename = input('Open file: ', 's');
xc = load (filename);
xc = -xc; % Para los armónicos y sismos se pone (+),
para los puentes, mesa vibradora (-)
[N,~] = size(xc);
tc_max = N/sampling_rate;
tc = (delta_t:delta_t:tc_max); % Esto genera un
vector tiempo

figure (1);
plot(tc,xc,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Voltaje (v)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_t_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (1),'v_t_fksh05_ew.bmp')

%2.- Cortar el registro de aceleraciones
tiempo_de_corte_inicial = input('Tiempo de corte
inicial = ');
tiempo_de_corte_final = input('Tiempo de corte final =
');
no = tiempo_de_corte_inicial*sampling_rate;
nf = tiempo_de_corte_final*sampling_rate;

j = 0.0;
for i = 1:N;
    if i > nf
        break;
    end

    if i >= no
        j = j+1;
        x(j) = xc(i);
    end
end
x = x';

% 3.- Escalar y mostrar registro original y la
Tranformada de Fourier
x = x*scale_factor;
[N,~] = size(x);
t_max = N/sampling_rate;
t = (delta_t:delta_t:t_max);

figure (2);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('a_t_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (2),'a_t_fksh05_ew.bmp')

%Guarda archivo de señal original vs tiempo
file = fopen('FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1:N
    fprintf(file,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),x(i));
end
fclose(file);

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (3)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia (Hz)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)

```

```

ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_orig_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (3),'fft_orig_fksh05_ew.bmp')

%-----
% COMIENZA MÉTODO DE PEER (2004)

%Paso 1: Integración del registro de aceleraciones
delta_t2 = delta_t/2; %Nuevo delta_t correspondiente
al delta_t de t2
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max)';
A = spline(t,x,t2);
[NA,~] = size(A);
n200 = ceil(NA/2);
V(n200,1)= zeros;

V(1) = (A(1) + A(2))*(delta_t2/2.0);

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    V(k2,1) = V(k2-1)+(A(k)+ 4.0*A(k+1)+ A(k+2))*
delta_t2/3.0;
end

figure (4);
plot(t,V,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad(cm/s)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';

```

```

ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (4), 'v_fksh05_ew.bmp')

%Guardar registro de Velocidades
file = fopen ('V_FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),V(i));
end
fclose(file);

```

```

%Paso 2: Corrección por línea base en aceleración por
medio de tres formas
%funcionales funcionales:
%2.1. Ajuste lineal.
%2.2. Ajuste cuadrático.
%2.3. Ajuste continuo seccional.

```

```

%2.1. Ajuste lineal
coef = polyfit(t,V,order_poly);
fit_1 = polyval(coef,t);

figure (5);
plot(t,fit_1,'b',t,V)
title('Ajuste lineal','FontName','Arial','FontSize',18)
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración(cm/s^2)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';

```

```

%2.2. Ajuste cuadrático
coef2 = polyfit(t,V,order_poly2);
fit_2 = polyval(coef2,t);

```

```

figure (6);
plot(t,fit_2,'b',t,V)
title('Ajuste cuadrático', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',18)

```



```

ylabel('Aceleración(cm/s^2)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';

%2.3. Ajuste segmentario bilineal continuo
Z = input('Tiempo de cambio de pendiente en ajuste
bilineal = ');
% Usar spline lineal
x1 = t(1);
y1 = V(1);
x2 = Z;
y2 = V(Z*sampling_rate);
x3 = t(N);
y3 = V(N);

for i = 1:N
    if i <= x2*sampling_rate
        fit_3(i) = ((i/sampling_rate) - x2)/(x1 - x2)*y1 +
((i/sampling_rate) - x1)/(x2 - x1)*y2;
    elseif i > x2*sampling_rate
        fit_3(i) = ((i/sampling_rate) - x3)/(x2 - x3)*y2 +
((i/sampling_rate) - x2)/(x3 - x2)*y3;
    end
end

figure (7);
plot(t,fit_3,'b',t,V, 'k')
title('Ajuste segmentario', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración(cm/s^2)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';

```

```

ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';

%Seleccionar la línea que mejor se ajuste a la
Velocidad.

```

```

for j = 1:3
    sse(j) = 0.0;
    if (j == 1)
        for i = 1:N
            sse(j) = sse(j) + (fit_1(i)- V(i))^2;
        end
    end
    if (j == 2)
        for i = 1:N
            sse(j) = sse(j) + (fit_2(i)- V(i))^2;
        end
    end
    if (j == 3)
        for i = 1:N
            sse(j) = sse(j) + (fit_3(i)- V(i))^2;
        end
    end
end
end

```

```

seleccion = 1;
fit_s = fit_1;
if (sse(2)<sse(1))
    seleccion = 2;
    fit_s = fit_2;
end
if (sse(3) < sse(2))
    seleccion =3;
    fit_s = fit_3;
end
end

```

```

seleccion

```

```

functional_form_target = input('Escribir 0, 1, 2, o 3 =
');
if (functional_form_target == 1)
    fit_s = fit_1; seleccion = 1;
elseif (functional_form_target == 2)
    fit_s = fit_2; seleccion = 2;
elseif (functional_form_target == 3)
    fit_s = fit_3; seleccion = 3;
end
end

```

```

figure (8);
plot(t,V,'k', t, fit_s, 'b')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)

```

```

ylabel('Aceleración(cm/s^2)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('lb_fksh05_ew.fig')
saveas('figure (8)', 'lb_fksh05_ew.bmp')

%Paso 3: Diferenciación de la función de mejor ajuste
y sustraerla de la señal de aceleración original

for i = 2:(N-1) % Diferenciación de fit_s
    diff(i) = (fit_s(i+1)-fit_s(i-1))/(2*delta_t);
end
diff = diff';
diff(1) = diff(2);
diff(N) = diff(N-1);
x_ajust = x - diff; %Remover la función de mejor
ajuste del registro de las aceleraciones

figure (9);
plot(t,x_ajust,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración(cm/s^2)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('alb_fksh05_ew.fig')
saveas('figure (9)', 'alb_fksh05_ew.bmp')

file = fopen ('FKSH05_EW.lb','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),x_ajust(i));
end

```

```

fclose(file);

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (10)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_alb_fksh05_ew.fig')
saveas('figure (10)', 'fft_alb_fksh05_ew.bmp')

% Paso 4: Aplicación de filtro Butterworth pasa baja

[b,a] = butter(order_low,fc_low/Nyquist,'low');
x_fil = filtfilt(b,a,x_ajust);

figure (11)
freqz(b,a)
dataIn = randn(sampling_rate,1);
dataOut = filtfilt(b,a,dataIn);

figure (12)
plot(t, x_fil,'b');
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración(cm/s^2)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set (gca,'fontname','arial','fontsize',12)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';

```

```

ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('a_L_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (12), 'a_L_fksh05_ew.bmp')

```

```

file = fopen ('A_FKSH05_EW.low','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),x_fil(i));
end
fclose(file);

```

```

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(x))/length(x);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

```

```

figure (13)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_L_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (13), 'fft_L_fksh05_ew.bmp')

```

%Paso 5: Doble integración del registro de aceleraciones

```

delta_t2 = delta_t/2; %Nuevo delta_t correspondiente
al delta_t de t2
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max);
Ac = spline(t,x_fil,t2);
[NA,~] = size(Ac);
n200 = ceil(NA/2);
Vel(n200,1)= zeros;

```

```

Vel(1) = (Ac(1) + Ac(2))*(delta_t2/2.0);

```

```

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;

```

```

    Vel(k2,1) = Vel(k2-1)+(Ac(k)+ 4.0*Ac(k+1)+
Ac(k+2))* delta_t2/3.0;
end

```

```

figure (14);
plot(t,Vel,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad(cm/s)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('Vf_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (14), 'Vf_fksh05_ew.bmp')

```

```

%Guardar registro de Velocidades
file= fopen ('VF_FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),Vel(i));
end
fclose(file);

```

```

%Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(Vel))/length(Vel);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

```

```

figure (15)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';

```

```

ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fft_v_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (15), 'fft_v_fksh05_ew.bmp')

Vs = spline(t, Vel, t2);
D(n200,1)= zeros;
D(1) = (Vs(1) + Vs(2))*(delta_t2/2.0);

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    D(k2,1) = D(k2-1)+(Vs(k)+ 4.0*Vs(k+1)+
Vs(k+2))* delta_t2/3.0;
end

Dmax = max(abs(D));

figure (16);
plot(t,D,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Desplazamientos(cm)', 'FontName', 'Arial',
'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (16), 'D_fksh05_ew.bmp')

% Guardar registro de Desplazamientos
file = fopen ('D_FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1 : N;
    fprintf (file,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),D(i));
end
fclose(file);

% Cálculo de la FFT
y = 2*abs(fft(D))/length(D);
y = y(1:fix(end/2),:);
f = linspace(0,Nyquist,length(y));

figure (17)
plot (f,y)
xlabel('Frecuencia(Hz)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize',
18)
ylabel('Amplitud', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)

```

```

set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('fftD_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (17), 'fftD_fksh05_ew.bmp')

```

G.3. Ejemplos de aplicación

G.3.1. Pruebas de vibración armónica

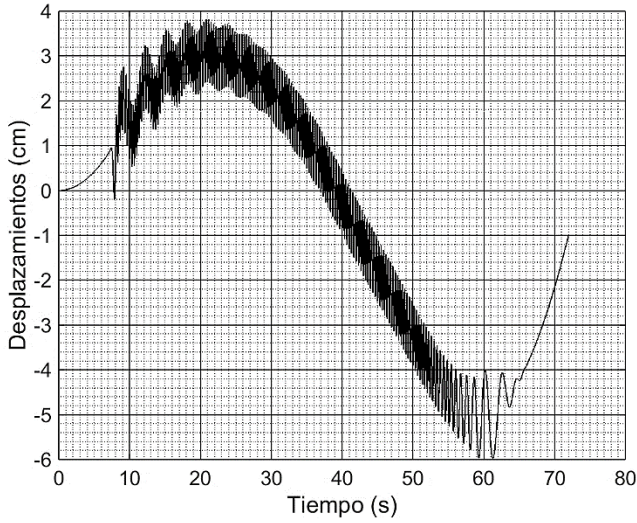


Fig. G.2. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

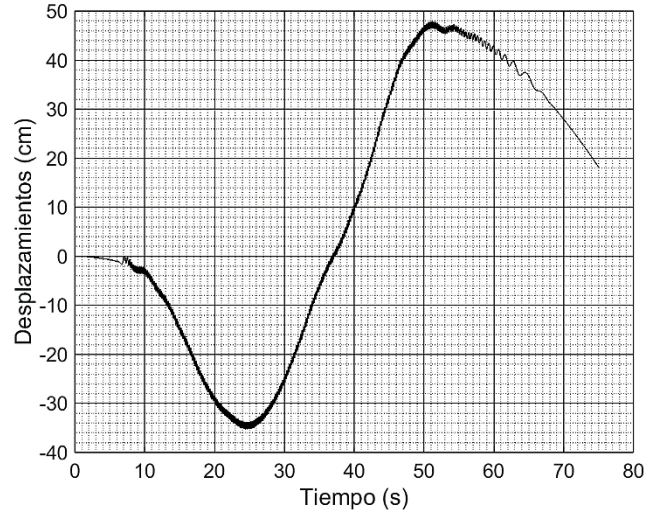


Fig. G.4. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

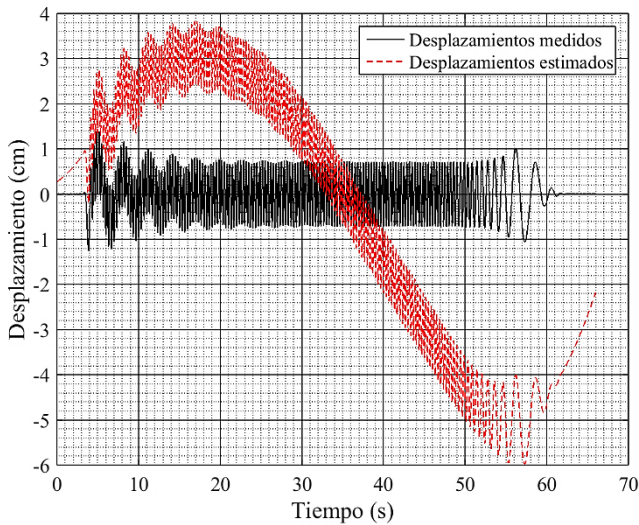


Fig. G.3. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

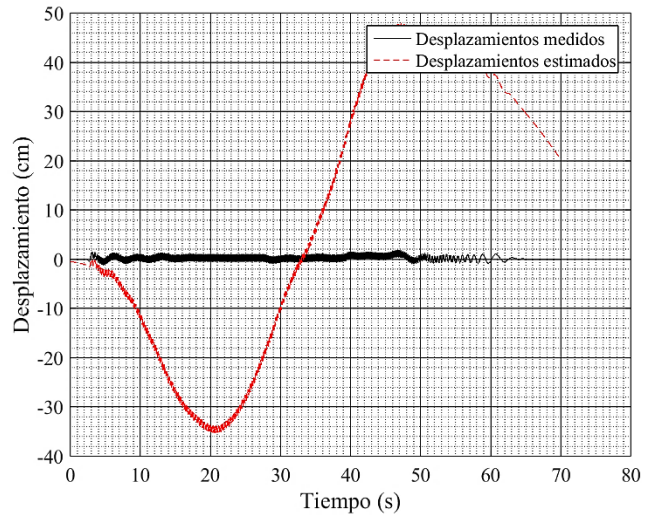


Fig. G.5. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

G.3.2. Pruebas en puente vehicular

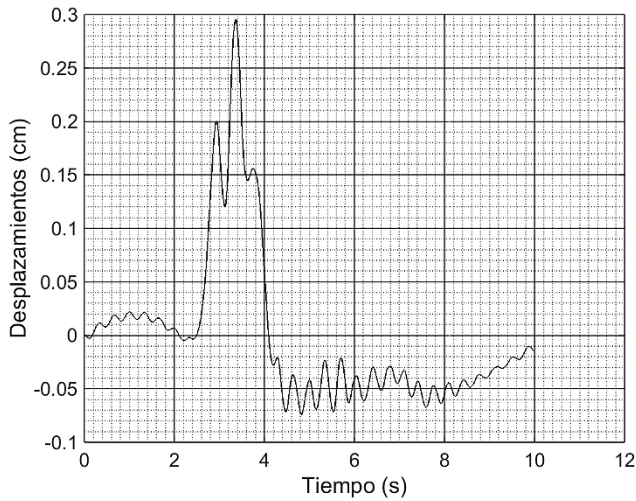


Fig. G.6. Desplazamientos estimados para la prueba 13 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

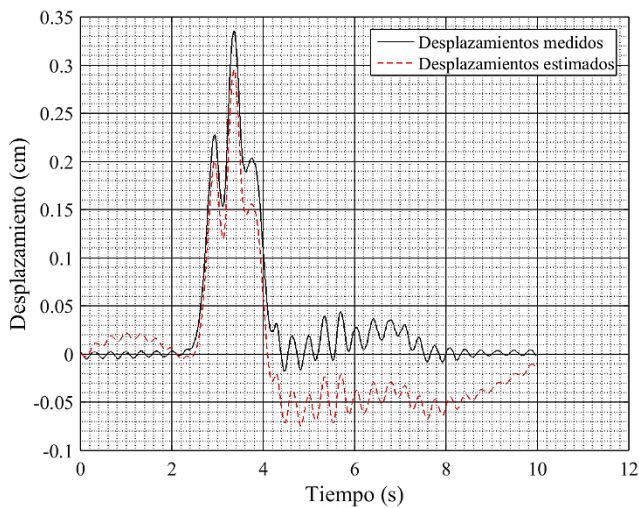


Fig. G.7. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 13 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

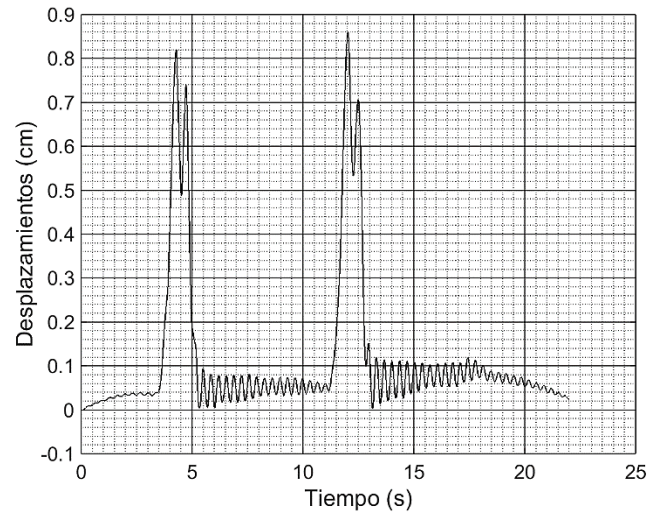


Fig. G.8. Desplazamientos estimados para la prueba 19 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

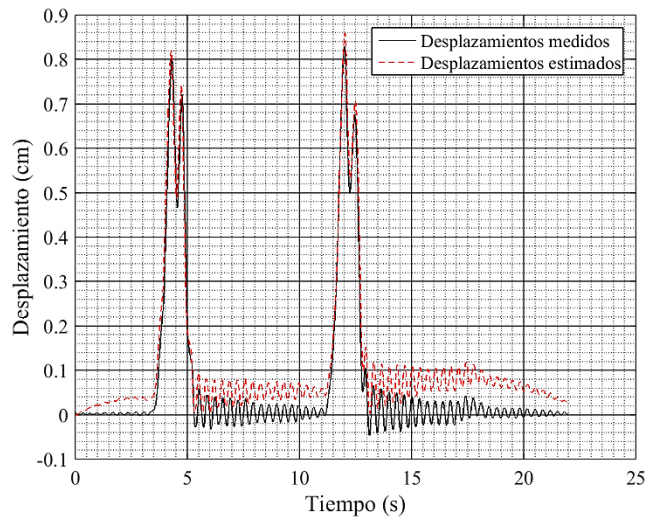


Fig. G.9. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 19 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

G.3.3. Pruebas en puente peatonal

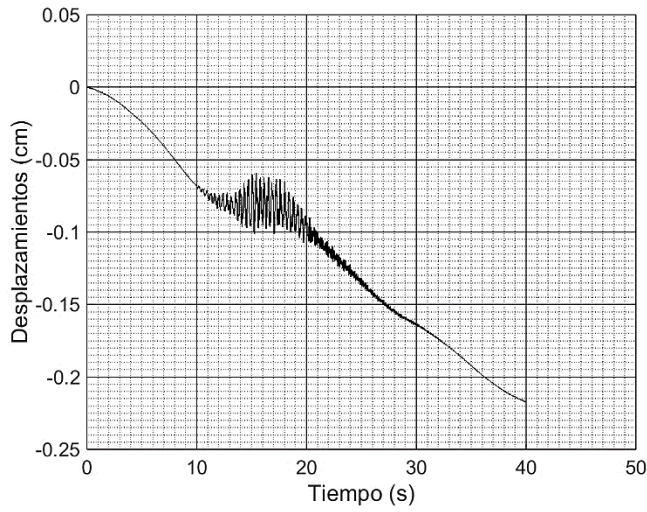


Fig. G.10. Desplazamientos estimados para la prueba 5 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

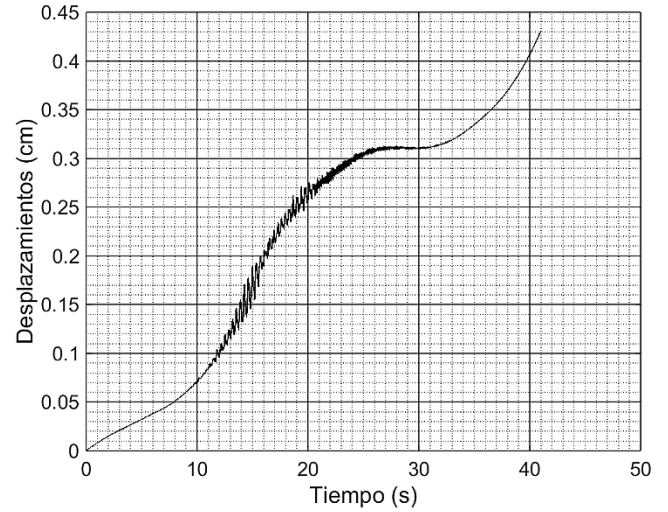


Fig. G.12. Desplazamientos estimados para la prueba 7 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

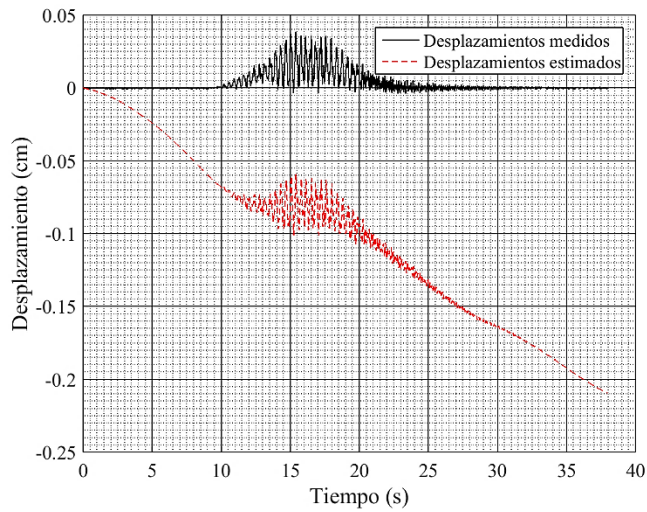


Fig. G.11. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 5 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

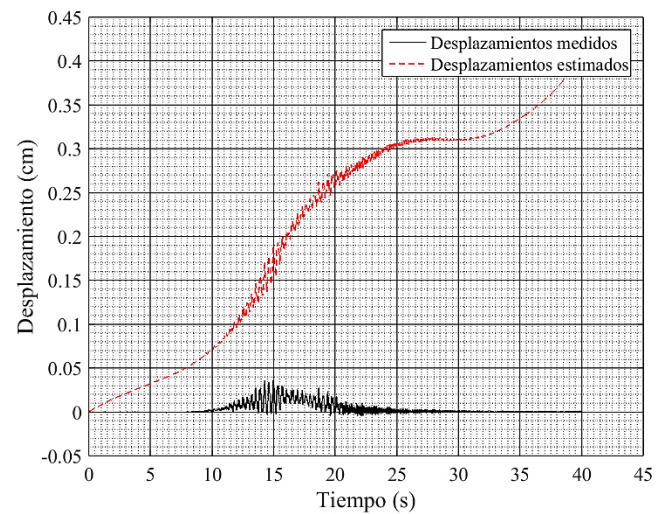


Fig. G.13. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 7 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

G.3.4. Pruebas en mesa vibradora

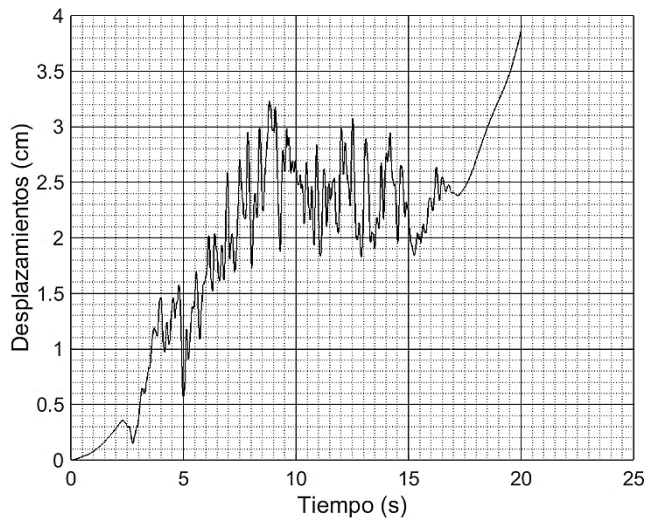


Fig. G.14. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

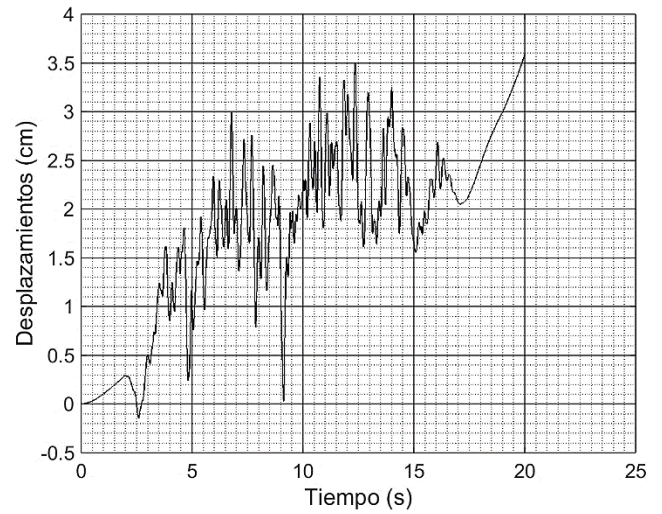


Fig. G.16. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

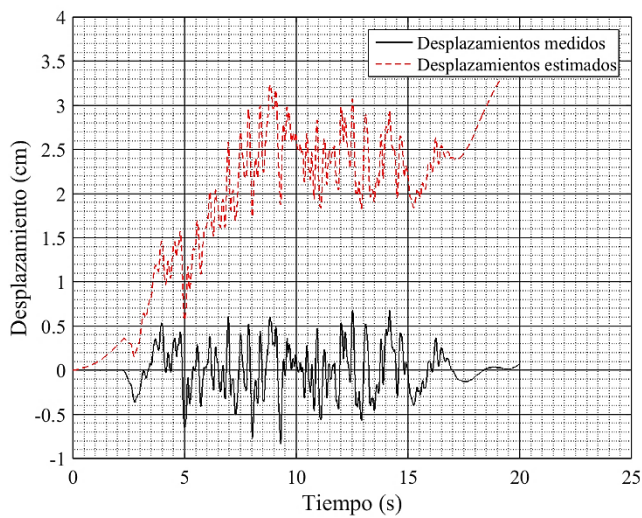


Fig. G.15. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

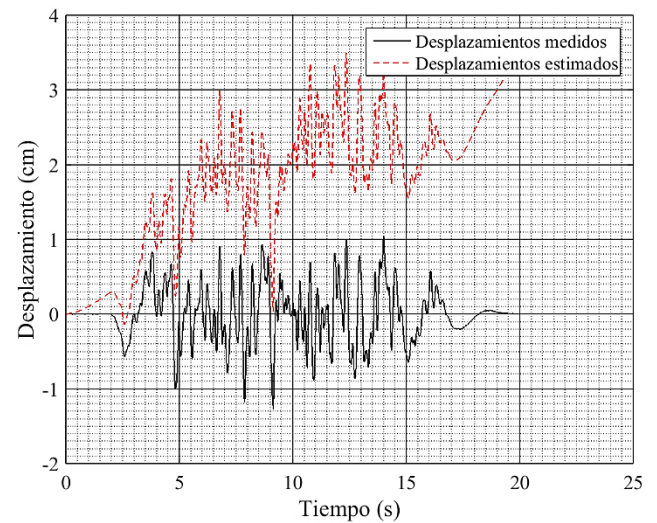


Fig. G.17. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

G.3.5. Sismo Tohoku, Japón

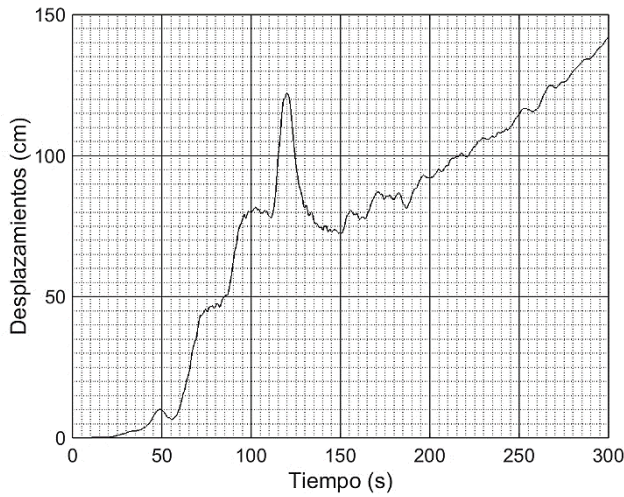


Fig. G.18. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación AKTH10, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

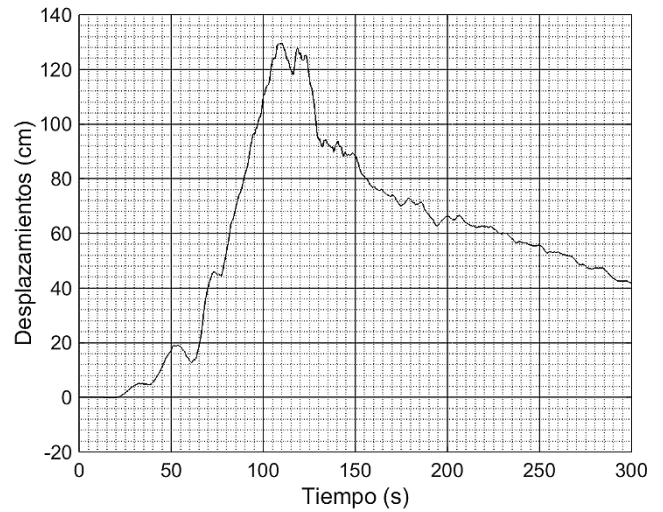


Fig. G.20. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación FKSH05, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

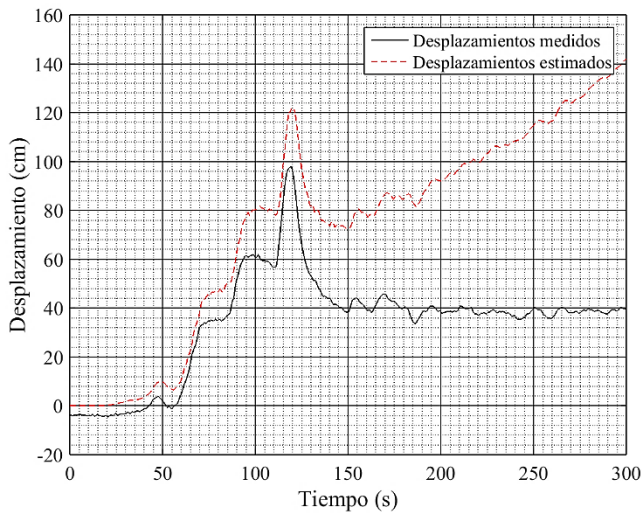


Fig. G.19. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación AKTH10 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

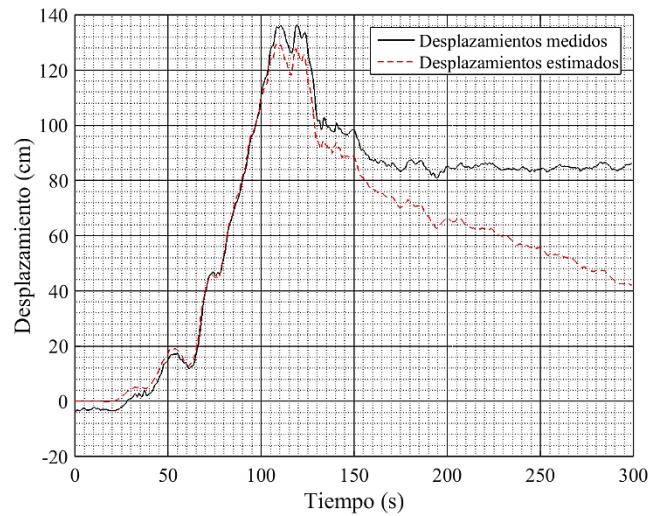


Fig. G.21. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación FKSH05 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

APÉNDICE H. MÉTODO DE PARK *et al.*

En este apéndice se describe el método propuesto por Park *et al.* [19] (2004), para la corrección por línea base de registros de aceleración.

Se presenta un archivo script de Matlab® en donde se puede observar el esquema de procesamiento seguido y las instrucciones para su implementación. El script incluye comando para la impresión de las gráficas y el cálculo de la transformada de Fourier, aunque éstos no son parte de la metodología.

Para mostrar la bondad del método, se presentan algunos resultados de su aplicación en registros de aceleración de diferentes tipos de excitación. Estos ejemplos corresponden a los mostrados para los métodos de los apéndices anteriores.

H.1. Algoritmo

Esta metodología fue desarrollada por Park, Kim, Park y Lee, 2004 [19] para la estimación de los desplazamientos. Su propósito es corregir los errores de línea base presentes en los registros debido a las condiciones iniciales.

La propuesta de Park incluye dos enfoques. El primero ajusta las líneas base con las medias de los registros de aceleración y de velocidad. Este enfoque se puede considerar como un método básico de corrección de señales.

El segundo enfoque hace uso de un filtrado pasa alta asumiendo a la velocidad inicial como cero. Este procedimiento está incluido en los métodos de Trifunac y Lee, Converse y Brady y Chiu, y su aplicación conduciría a resultados muy similares, por lo tanto en este apéndice sólo se analiza el primer enfoque.

Los pasos que involucran el procesamiento de señales del primer enfoque de este método se resumen en el diagrama de flujo de la Fig. H.1 y son los siguientes:

Sustraer del registro de aceleración su promedio. Integrar el registro de aceleración para obtener velocidades. Sustraer del registro de velocidades su promedio. Integrar el registro de velocidades para obtener los desplazamientos.

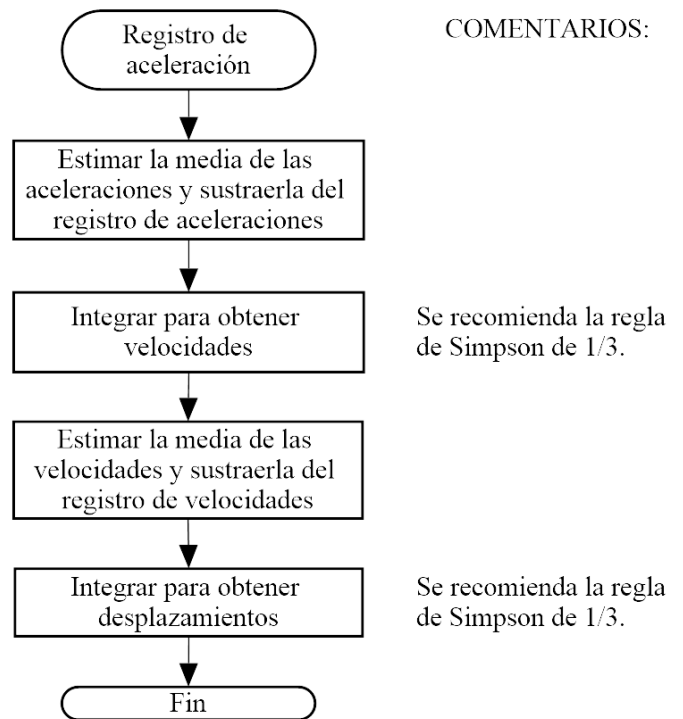


Fig. H.1. Diagrama de flujo del método de Park *et al.*

H.2. Archivo script de Matlab ®

% Programa para estimar desplazamientos a partir de registros de aceleración, mediante el método propuesto por Park *et al.*

% Fecha de creación: 08/04/2016

```
close all; clear all; clc;
fprintf('\nMétodo de Park (2004)\n\n');
```

```
% Valores de entrada:
sampling_rate = input('Sample rate en Hz = ');
delta_t = 1.0/sampling_rate; % Espacio entre
muestras
Nyquist = sampling_rate/2.0; % Frecuencia de
Nyquist
scale_factor = 2940/6170270; % Para convertir de
voltios a cm/s^2
%-----
% ***** PROCESOS PREVIOS *****
% 1.- Carga el registro de voltajes a procesar
filename = input('Open file: ', 's');
xc = load (filename);
xc = xc; % Para los armónicos y sismos se pone (+),
para los puentes, mesa vibradora (-)
[N,~] = size(xc);
tc_max = N/sampling_rate;
tc = (delta_t:delta_t:tc_max)'; % Esto genera un
vector tiempo
```

```

figure (1);
plot(tc,xc,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
ylabel('Voltaje (v)', 'FontName', 'Arial', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','arial','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_t_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (1),'v_t_fksh05_ew.bmp')

%2.- Cortar el registro de aceleraciones
tiempo_de_corte_inicial = input('Tiempo de corte
inicial = ');
tiempo_de_corte_final = input('Tiempo de corte final =
');
no = tiempo_de_corte_inicial*sampling_rate;
nf = tiempo_de_corte_final*sampling_rate;

j = 0.0;
for i = 1:N;
    if i> nf
        break;
    end
    if i>= no
        j = j+1;
        x(j) = xc(i);
    end
end
x = x';

% 3.- Escalar y mostrar registro original
x = x*scale_factor;
[N,~] = size(x);
t_max = N/sampling_rate;
t = (delta_t:delta_t:t_max);

figure (2);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)

```

```

grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('a_t_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (2),'a_t_fksh05_ew.bmp')

%Guarda archivo de señal original vs tiempo
file = fopen('FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1:N
    fprintf(file,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),x(i));
end
fclose(file);

%-----
%*COMIENZA MÉTODO DE PARK (2004) *
%Paso 1: Resta del promedio del registro de
aceleración
average_a= mean(x);
x = x - average_a;

figure (3);
plot(t,x,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Aceleración (cm/s^2)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('alb_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (3), 'alb_fksh05_ew.bmp')

%Guarda archivo de señal original vs tiempo
file = fopen('FKSH05_EW.lb','w');
for i = 1:N

```

```

    fprintf(file,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),x(i));
end
fclose(file);

%-----
% Paso 2: Integración del registro de aceleraciones

delta_t2 = delta_t/2; %Nuevo delta_t correspondiente
al delta_t de t2
t2 = (delta_t2:delta_t2:t_max)';
A = spline(t,x,t2);
[NA,~] = size(A);
n200 = ceil(NA/2);
V(n200,1)= zeros;

V(1) = (A(1) + A(2))*(delta_t2/2.0);

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    V(k2,1) = V(k2-1)+(A(k)+ 4.0*A(k+1)+ A(k+2))*
delta_t2/3.0;
end

figure (4);
plot(t,V,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('v_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (4), 'v_fksh05_ew.bmp')

% Guardar registro de Velocidades
file= fopen ('V_FKSH05_EW.sc','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),V(i));
end
fclose(file);
%-----
% Paso 3: Resta de la media del registro de velocidades
average_V = mean(V);

```

```

V = V - average_V;

figure (5);
plot(t,V,'k')
xlabel('Tiempo (s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Velocidad (cm/s)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;
ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('vlb_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (5), 'vlb_fksh05_ew.bmp')

file = fopen('V_FKSH05_EW.lb','w');
for i = 1:N
    fprintf(file,'% 12.6f,% 12.6f\r\n',t(i),x(i));
end
fclose(file);

%-----
% Paso 4: Integración del registro de velocidades

Vs = spline(t,V,t2);
D(n200,1)= zeros;
D(1) = (Vs(1) + Vs(2))*(delta_t2/2.0);

for k = 2:2:NA-1;
    k2 = k/2+1;
    D(k2,1) = D(k2-1)+(Vs(k)+ 4.0*Vs(k+1)+
Vs(k+2))* delta_t2/3.0;
end
Dmax = max(abs(D));

figure (6);
plot(t,D,'k')
xlabel('Tiempo(s)', 'FontName', 'Times New Roman',
'FontSize', 18)
ylabel('Desplazamiento (cm)', 'FontName', 'Times New
Roman', 'FontSize', 18)
set(gca,'fontname','Times New Roman','fontsize',16)
grid on
grid minor
ax = gca;

```

```

ax.MinorGridAlphaMode = 'manual';
ax.MinorGridAlpha = 0.7;
ax.GridAlphaMode = 'manual';
ax.GridAlpha = 0.7;
ax.GridColorMode = 'manual';
ax.MinorGridColorMode = 'manual';
ax.GridColor = 'k';
ax.MinorGridColor = 'k';
savefig('D_fksh05_ew.fig')
saveas(figure (9), 'D_fksh05_ew.bmp')

% Guardar registro de Desplazamientos
file= fopen ('D_FKSH05_EW.txt','w');
for i = 1 : N
    fprintf (file,'%12.6f,%12.6f\r\n',t(i),D(i));
end
fclose(file);
    
```

H.3. Ejemplos de aplicación

H.3.1. Pruebas de vibración armónica

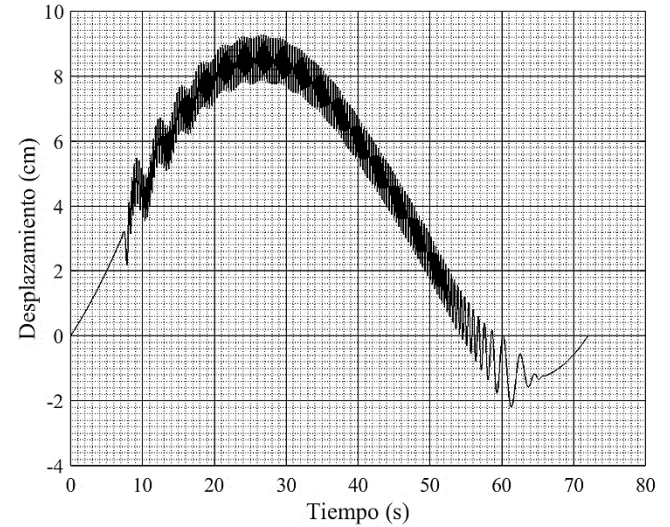


Fig. H.2. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

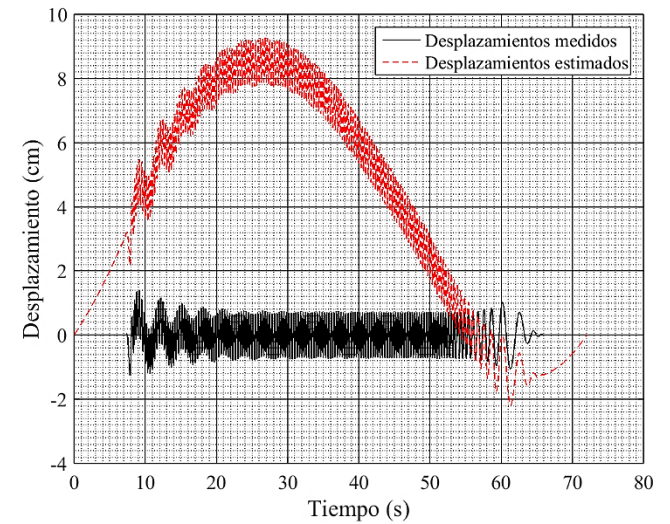


Fig. H.3. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 3.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

H.3.2. Pruebas en puente vehicular

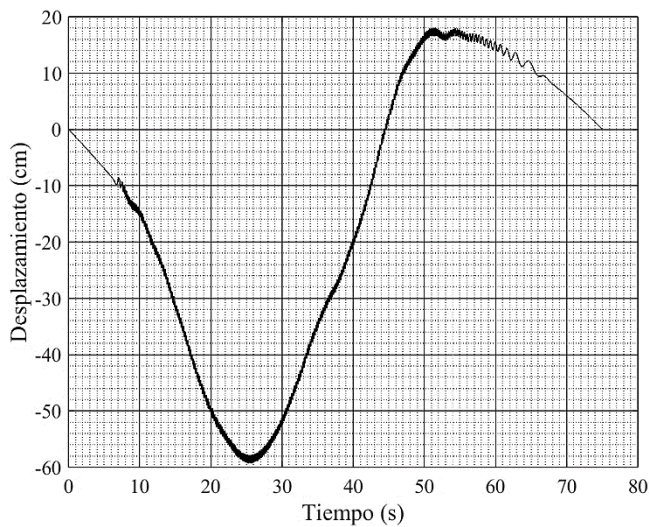


Fig. H.4. Desplazamientos estimados para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

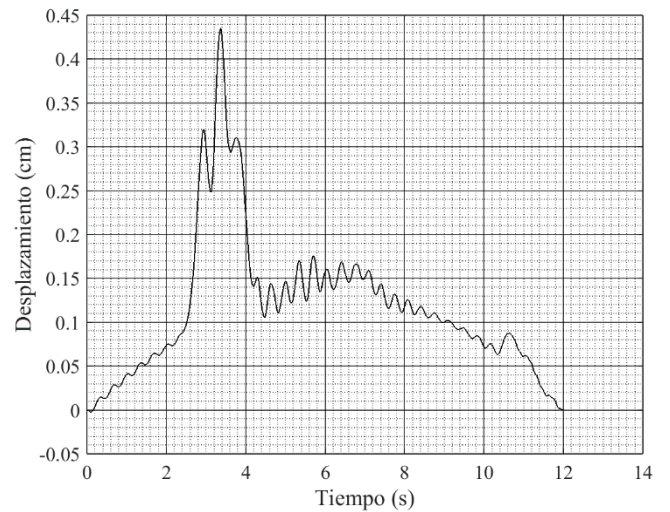


Fig. H.6. Desplazamientos estimados para la prueba 13 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

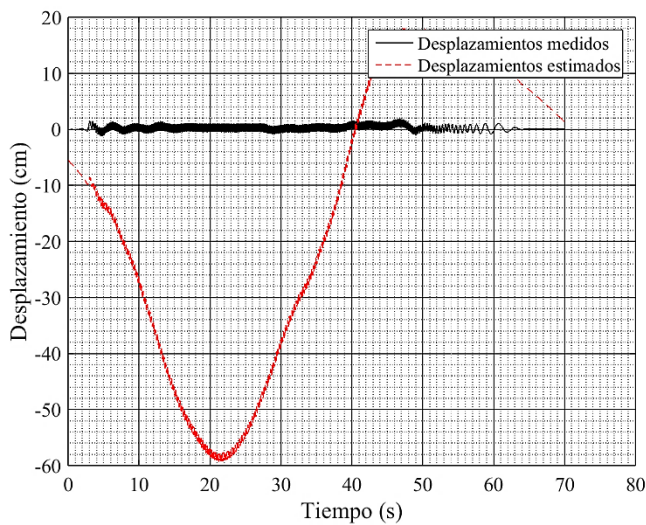


Fig. H.5. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba de vibración forzada de 5.0 Hz, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

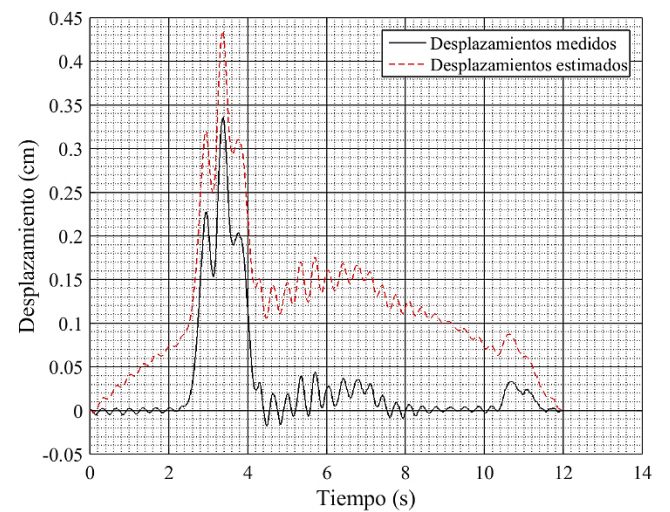


Fig. H.7. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 13 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

H.3.3. Pruebas en puente peatonal

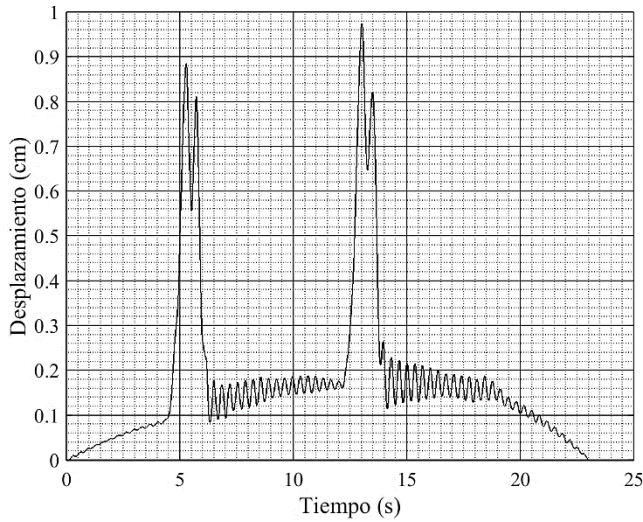


Fig. H.8. Desplazamientos estimados para la prueba 19 en el puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

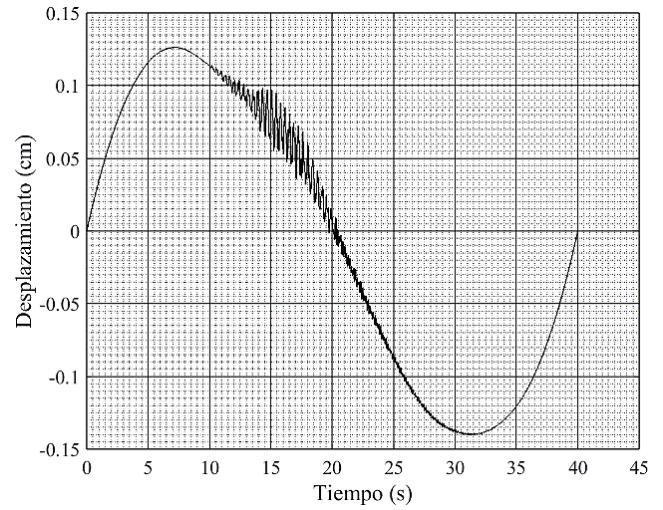


Fig. H.10. Desplazamientos estimados para la prueba 5 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

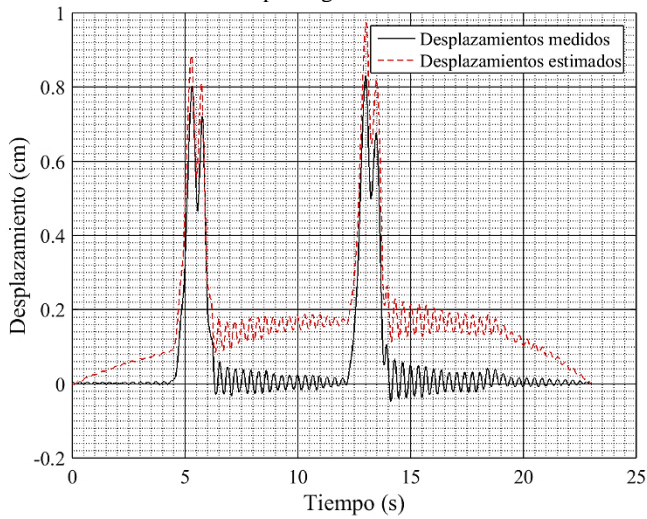


Fig. H.9. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 19 del puente vehicular, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

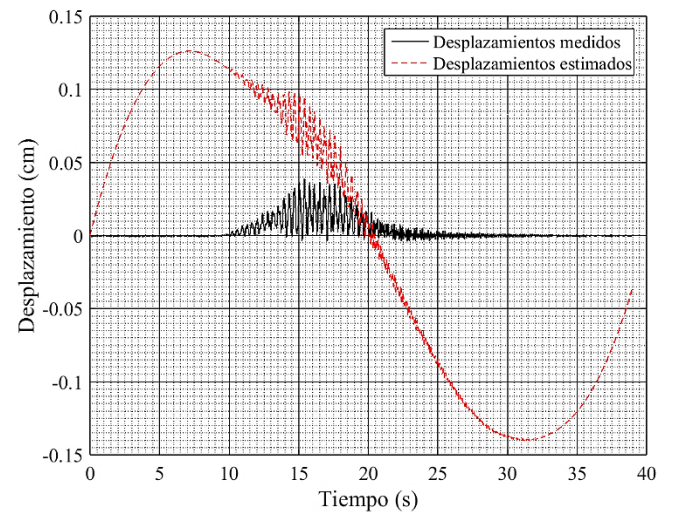


Fig. H.11. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 5 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

H.3.4. Pruebas en mesa vibradora

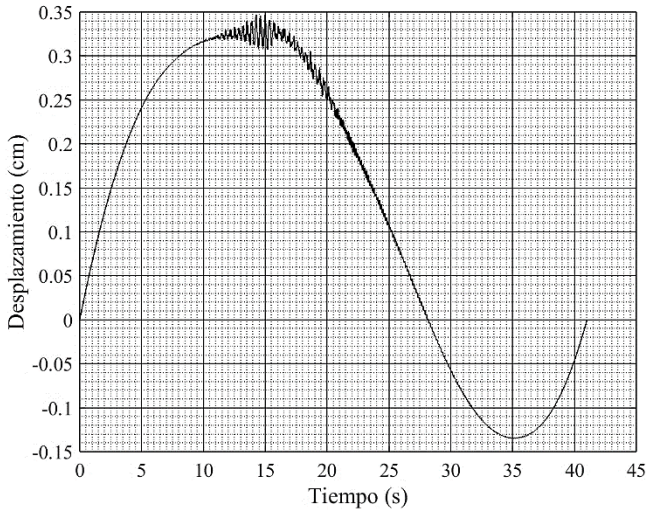


Fig. H.12. Desplazamientos estimados para la prueba 7 en el puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

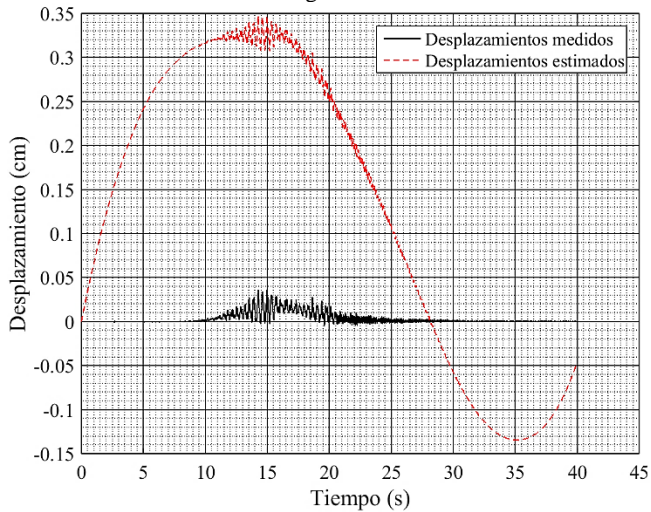


Fig. H.13. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para la prueba 7 del puente peatonal, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo

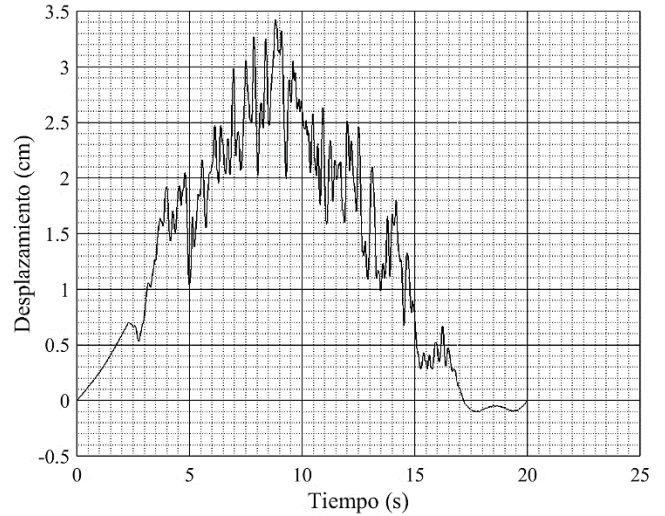


Fig. H.14. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

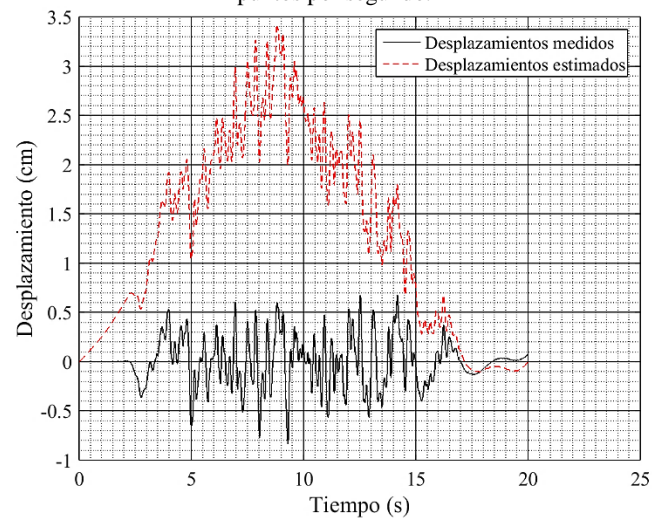


Fig. H.15. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 100% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

H.3.5. Sismo Tohoku, Japón

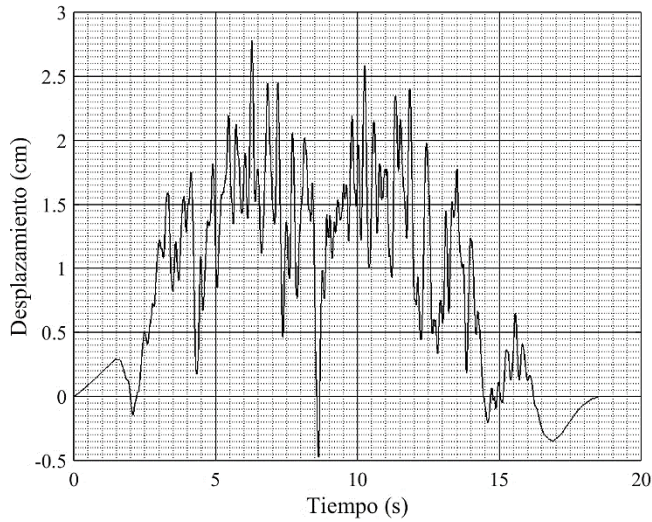


Fig. H.16. Desplazamientos estimados para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

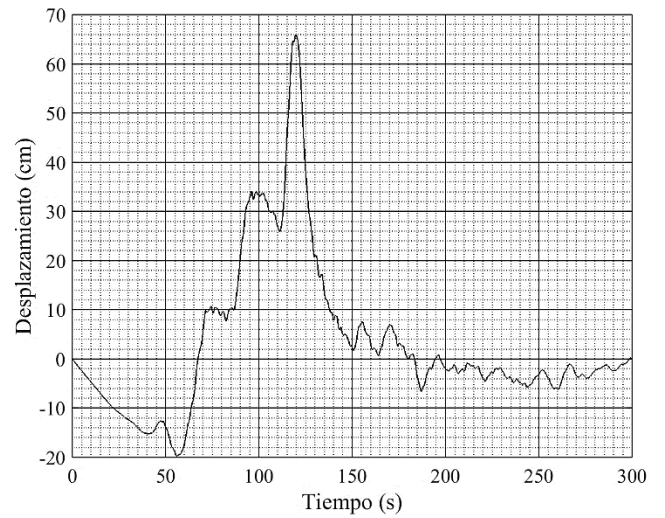


Fig. H.18. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación AKTH10, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

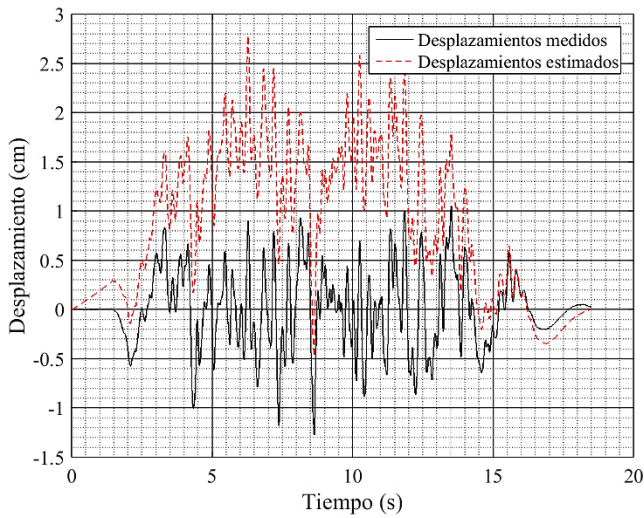


Fig. H.17. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (LVDT sin ajuste) para el sismo sintético al 150% de su intensidad, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

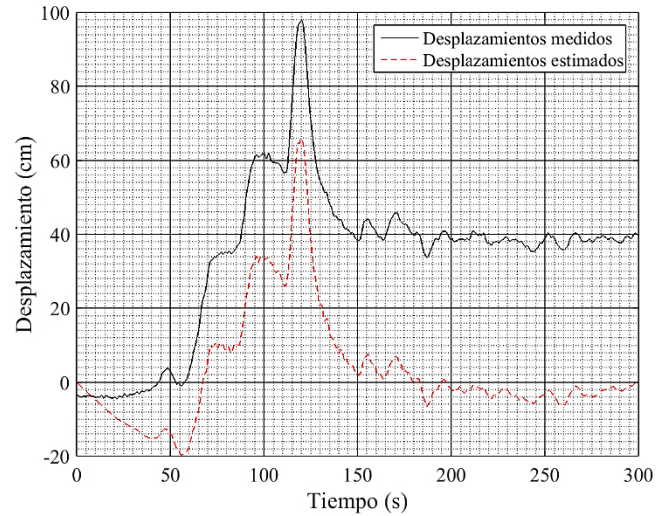


Fig. H.19. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación AKTH10 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

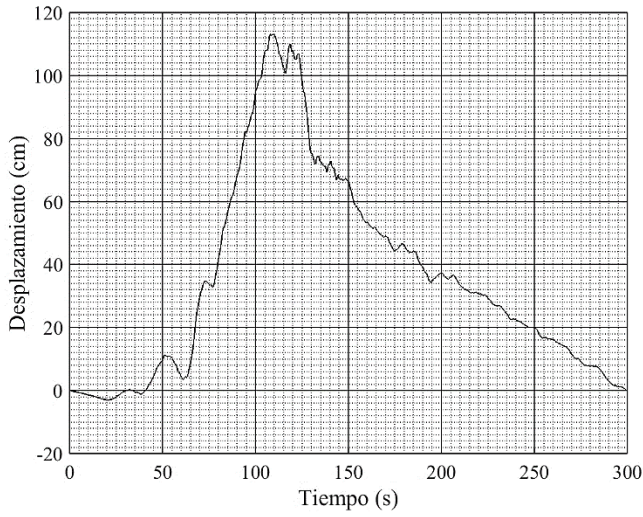


Fig. H.20. Desplazamientos estimados para el sismo Tohoku, Japón, estación FKSH05, con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

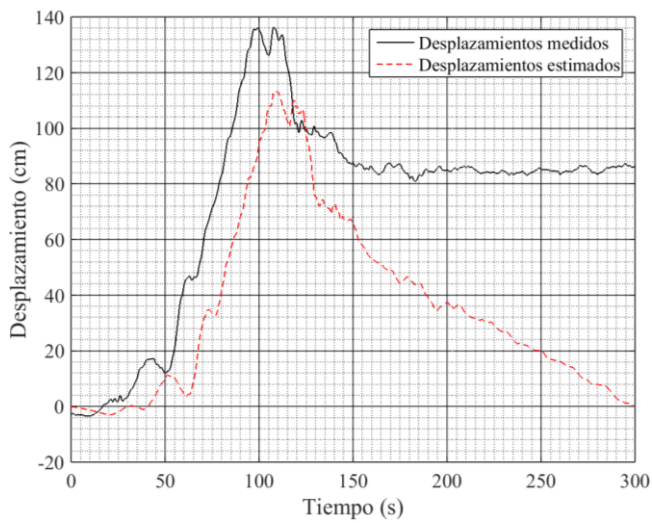


Fig. H.21. Detalle de la comparación de los desplazamientos estimados contra los desplazamientos medidos (GPS) para el sismo sintético Tohoku, Japón estación FKSH05 con una frecuencia de muestreo de 200 puntos por segundo.

REFERENCIAS

- [1] J. M. Franco, D. Gómez, J. H. Murcia, P. Thomson, y J. Marulanda, “Development and implementation of a laser system for dynamic characterization and displacement measurement of civil structures”, *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, núm. 60, pp. 170–181, 2011.
- [2] J. Franco, A. Ortiz, D. Gómez, y P. Thomson, “Evaluación de las vibraciones producidas por las personas en el puente peatonal del Club Noel en Cali, Colombia”, en *Proceedings del III Simposio internacional sobre diseño y construcción de puentes Bucaramanga*, vol. 2, p. 18.
- [3] C. Gentile, “Vibration measurement by radar techniques”, presentado en 8th International Conference on Structural Dynamics (Eurodyn 2011), Leuven, Belgium: European Association for Structural Dynamics (EASD), 2011, pp. 92–103.
- [4] Nayerloo, M., Chen, X. Q., Chase, J. G., Malherbe, A., y MacRae, G. A., “Seismic structural displacement measurement using a high-speed line-scan camera: experimental validation”, presentado en New Zealand Society for Earthquake Engineering 2010 Conference, 2010, pp. 26–28.
- [5] A. W. Smyth, “Application of Differential GPS Sensing on Long-Span Bridges with Accelerometer Data Fusion”, presentado en 8th International Conference on Structural Dynamics (Eurodyn 2011), 2011, pp. 3550–3553.
- [6] M. G. Kogan, W.-Y. Kim, Y. Bock, y A. W. Smyth, “Load Response on a Large Suspension Bridge during the NYC Marathon Revealed by GPS and Accelerometers”, *Seismol. Res. Lett.*, vol. 79, núm. 1, pp. 12–24, 2008.
- [7] D. Murià Vila, J. Camargo, B. D. Aldama, G. Rodríguez, L. A. Aguilar, y M. Amaya, “Structural health monitoring of an instrumented building in Mexico with accelerometers and GPS sensors”, presentado en Proceedings 6th international conference on structural health monitoring of intelligent infrastructure, Hong Kong, 2013, p. 19.
- [8] M. Celebi, “GPS in dynamic monitoring of long-period structures”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 20, núm. 5, pp. 477–483, 2000.
- [9] M. D. Trifunac y V. Lee, “Automatic digitization and processing of accelerograms using PC”, University of Southern California Faculty Research and Publications, 90–3, 1990.
- [10] V. Graizer, “Determination of the true ground displacement by using strong motion records”, *Izv. Earth Phys.*, vol. 15, núm. 12, pp. 875–885, 1979.
- [11] W. D. Iwan, M. A. Moser, y C.-Y. Peng, “Some observations on strong-motion earthquake measurement using a digital accelerometer”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 75, núm. 5, pp. 1225–1246, oct. 1985.
- [12] A. Converse y A. G. Brady, “BAP basic strong-motion accelerogram processing software version 1.0”, United States department of the interior, U.S. Geological survey; distributed by books and open-file reports section, USGS Numbered Series 92–296-A, 1992.
- [13] H.-C. Chiu, “Stable baseline correction of digital strong-motion data”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 87, núm. 4, 1997.
- [14] D. M. Boore, “Effect of baseline corrections on displacements and response spectra for several recordings of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 91, núm. 5, pp. 1199–1211, oct. 2001.
- [15] L. Zhu, “Recovering permanent displacements from seismic records of the June 9, 1994 Bolivia deep earthquake”, *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, núm. 14, p. 1740, jul. 2003.
- [16] B. Darragh, W. Silva, y N. Gregor, “Strong motion record processing procedures for the PEER center”, presentado en Proceedings of COSMOS workshop on strong-motion record processing, Richmond, California, 2004, pp. 1–12.
- [17] D. M. Boore, “On pads and filters: Processing strong-motion data”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 95, núm. 2, p. 6, 2005.
- [18] D. M. Boore y J. J. Bommer, “Processing of strong-motion accelerograms: Needs, options and consequences”, *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 25, núm. 2, pp. 93–115, 2005.
- [19] K.-T. Park, S.-H. Kim, H.-S. Park, y K.-W. Lee, “The determination of bridge displacement using measured acceleration”, *Eng. Struct.*, vol. 27, núm. 3, pp. 371–378, feb. 2005.
- [20] Y.-M. Wu y C.-F. Wu, “Approximate recovery of coseismic deformation from Taiwan strong-motion records”, *J. Seismol.*, vol. 11, núm. 2, pp. 159–170, ene. 2007.
- [21] W.-A. Chao, Y.-M. Wu, y L. Zhao, “An automatic scheme for baseline correction of strong-motion records in coseismic deformation determination”, *J. Seismol.*, vol. 14, núm. 3, pp. 495–504, ago. 2009.
- [22] R. Wang, B. Schurr, C. Milkereit, Z. Shao, y M. Jin, “An improved automatic scheme for empirical baseline correction of digital strong-motion

- records”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 101, núm. 5, pp. 2029–2044, oct. 2011.
- [23] J. G. Proakis y D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing*. Pearson Prentice Hall, 2007.
- [24] D. M. Boore, C. D. Stephens, y W. B. Joyner, “Comments on baseline correction of digital strong-motion data: examples from the 1999 Hector Mine, California, earthquake”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 92, núm. 4, p. 18, 2002.
- [25] A. V. Oppenheim, D. W. Schafer, y J. R. Buck, *Discrete-Time Signal Processing*, Second. New Jersey: Prentice-Hall, Inc, 1999.
- [26] D. G. Manolakis y V. K. Ingle, *Applied Digital Signal Processing: Theory and Practice*. Cambridge University Press, 2011.
- [27] S. Winder, *Analog and Digital Filter Design, Second Edition*, 2 edition. Amsterdam; Boston: Newnes, 2002.
- [28] Saeed V. Vaseghi, *Wiley: Advanced Digital Signal Processing and Noise Reduction*, 4th Edition. .
- [29] T. O’Haver, “A Pragmatic Introduction to Signal Processing with applications in scientific measurement”. Department of Chemistry and Biochemistry University of Maryland at College Park, 04-feb-2016.
- [30] M. von Haartman y M. Östling, *Low-Frequency Noise In Advanced Mos Devices*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2007.
- [31] A. F. Shakal, M. J. Huang, y V. M. Grazier, “58 Strong-motion data processing”, en *International Geophysics*, vol. 81, Part B, H. K. William H.K. Lee Paul C.Jennings and Carl Kisslinger, Ed. Academic Press, 2003, pp. 967–981.
- [32] M. D. Trifunac y V. Lee, “Automatic digitization and processing of strong motion accelerograms”, University of Southern California Faculty Research and Publications, 79–15 I, 1979.
- [33] R. L. Burden y J. D. Faires, *Numerical Analysis*, Ninth. Boston, United States: Cengage Learning, 2011.
- [34] T. L. Harman, J. Dabney, y N. Richert, *Advanced Engineering Mathematics with MATLAB*, Second. Brooks/Cole Pub., 2000.
- [35] M. D. Trifunac y V. W. Lee, “Routine computer processing of strong-motion accelerograms”, California Institute of Technology, EERL 73-03, 1973.
- [36] V. W. Lee y M. D. Trifunac, “Current developments in data processing of strong-motion accelerograms”, *ResearchGate*, ene. 1984.
- [37] G. L. Emore, J. S. Haase, K. Choi, K. M. Larson, y A. Yamagiwa, “Recovering seismic displacements through combined use of 1-Hz gps and strong-motion accelerometers”, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 97, núm. 2, pp. 357–378, abr. 2007.