



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

DIVISIÓN DE INGENIERÍAS CIVIL Y GEOMÁTICA  
COMITÉ DE TITULACIÓN  
FING/DICyG/SEAC/UTIT/034/12

Señor  
RAÚL EDUARDO CARRILLO CRUZ  
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor DR. DAVID MURIÁ VILA, que aprobó este Comité, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

**"MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE UNA VÍA ELEVADA ANTE CARGAS VEHICULARES"**

- INTRODUCCIÓN
- I. DESCRIPCIÓN DE LA VÍA ELEVADA VEHICULAR
- II. PRUEBAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS DE CAMPO
- III. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL
- IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS
- V. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"  
Cd. Universitaria a 30 de agosto del 2012.  
EL PRESIDENTE

  
M.I. JOSÉ LUIS TRIGOS SUÁREZ

JLTS/MTH\*gar.





**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO**

---

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Medición y análisis de la respuesta de una vía  
elevada ante cargas vehiculares**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**Ingeniero Civil**

P R E S E N T A :

**Raul Eduardo Carrillo Cruz**

TUTOR

**Dr. David Murià Vila**



México 2013



## Agradecimientos

---

Este trabajo fue realizado en la coordinación de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería UNAM al cual reconozco el apoyo y las facilidades otorgadas.

Debo reconocer y agradecer con especial énfasis al Dr. David Murià Vila, Director de esta tesis, por su disposición, tiempo y orientación dedicados a este trabajo y, le agradezco, sus enseñanzas a nivel profesional y personal.

Al término de este estudio, agradezco el apoyo y las pertinentes sugerencias de los miembros del jurado; por ello, expreso mi gratitud al Ing. Abraham Roberto Sánchez Ramírez, el Dr. José Alberto Escobar Sánchez, al M.C. Marco Antonio Macías Castillo y al M.I. Rodrigo Takashi Sepulveda Hirose.

Manifiesto mi gratitud al M.I. Carlos Humberto Huerta Carpizo, por su continuo apoyo, consejos, y enseñanzas que me permitieron realizar y completar la tesis. También al Dr. José Camargo Pérez, quien me apoyo durante el desarrollo de la investigación. Dos ingenieros en los cuales también encontré amistad.

Estos agradecimientos no estarían completos sin el apoyo otorgado por el M.I. Baruo Daniel Aldama Sánchez y los ingenieros Alberto Vásquez, Julián Suárez, Omar Ochoa y Yoatzin López.

Los profesores Bernardo Castillo, Laura Toledo y Raymundo, que a lo largo de mis estudios han sido influencia en mi formación académica.

Finalmente, a todos aquellos que colaboraron de forma directa o indirecta para la realización del estudio, durante las pruebas y la investigación, con lo cual fue posible realizar el trabajo presentado.

De manera personal expreso en humildes palabras lo grato que estoy hacia las personas que marcan mi vida y, con este trabajo de desarrollo profesional, mi persona declara:

Mi trabajo, esfuerzos, de hoy y mañana dedicados a enorgullecer a mi papá Carlos Eduardo Carrillo Ordaz y mi mamá Laura Cruz Abarca, quienes me dieron vida y herramientas para vivirla. Siendo lo que soy debido a ellos, mi alma y mente traen las marcas con las que esculpieron mi ser.

Gracias:

A mi abuelita Gloria por enseñarme lo que es amar. Mi abuelo Carlos, ejemplo de lucha y trabajo.

Mi abuela María por darme a mi papá. A mi abuelo Raúl que su vida es guía en mi camino.

Mis hermanos Gloria E., Diego F. y Ana L., en el cielo no hay constelación que brille más.

Mi tío Carlos, por la cultura y educación que me inculcó.

To my best friend Julio C. García who groks me.

A mi amante Gissel A. Preza que contigo quiero hacer eterno lo momentáneo.

Mis amigos David Pimentel, Jorge F. Torres que me han acompañado en largos caminos, de los que dejan grandes recuerdos.

Mis amigos Andrés Pérez, Fernando Moreno, Gibran Rios, José Juan Herrera y Rafael Segura, por las risas compartidas.

Mis amigos de la facultad Arlet y Diego.

# Contenido

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>XI</b>
<b>CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA VÍA ELEVADA VEHICULAR .....</b>	<b>13</b>
1.1. LOCALIZACIÓN .....	13
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	14
1.3. DESCRIPCIÓN DE LA CIMENTACIÓN.....	17
<b>CAPÍTULO 2. PRUEBAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS DE CAMPO .....</b>	<b>19</b>
2.1. PRUEBAS ESTÁTICAS .....	21
2.2. PRUEBAS DINÁMICAS .....	22
2.3. INSTRUMENTACIÓN .....	23
<b>CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....</b>	<b>29</b>
3.1. PREPROCESAMIENTO DE LOS REGISTROS .....	29
3.2. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE PRUEBAS ESTÁTICAS .....	32
3.3. PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE LOS REGISTROS DE PRUEBAS DINÁMICAS.....	33
3.4. GIROS Y FLECHAS .....	35
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS ESTÁTICAS Y DINÁMICAS .....</b>	<b>39</b>
4.1. PRUEBAS ESTÁTICAS .....	39
4.1.1. Intervalos de medición .....	39
4.1.2. Perfiles de desplazamiento.....	47
4.1.3. Análisis de las flechas de la trabe.....	53
4.1.4. Análisis de los desplazamientos laterales de la columna .....	54
4.2. PRUEBAS DINÁMICAS .....	55
4.2.1. Intervalos de medición .....	55
4.2.2. Perfiles desplazamiento máximo .....	55
4.2.3. Análisis del perfil de la trabe .....	60
4.2.4. Análisis de los desplazamientos laterales de la columna.....	61
4.2.5. Factor de amplificación dinámico .....	61
4.3. COMPARACIÓN CON DATOS DEL PROYECTISTA.....	65
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS.....</b>	<b>69</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>71</b>
<b>APÉNDICE A. HISTORIAS DE PRUEBAS ESTÁTICAS .....</b>	<b>73</b>
A.1. INCLINÓMETROS .....	73
A.1. POTENCIÓMETROS .....	77
<b>APÉNDICE B. PERFILES DE PRUEBAS ESTÁTICAS .....</b>	<b>78</b>
B.1. HORIZONTALES.....	78
B.2. VERTICALES.....	82

B.3.	POTENCIÓMETROS .....	86
B.4.	INCLINÓMETROS .....	87
<b>APÉNDICE C. HISTORIAS DE PRUEBAS DINÁMICAS.....</b>		<b>91</b>
C.1.	HORIZONTALES.....	91
C.2.	VERTICALES.....	97
C.3.	POTENCIÓMETROS .....	103
C.4.	FAD.....	105
<b>APÉNDICE D. PERFILES DE PRUEBAS DINÁMICAS .....</b>		<b>119</b>
D.1.	HORIZONTALES.....	119
D.2.	VERTICALES.....	121

---



¿Cómo iba a negar yo este mundo cuya potencia y cuyas fuerzas experimento? Y sin embargo toda la ciencia de esta tierra no me dará nada que me garantice que este mundo es mío.

Albert Camus  
El mito de Sísifo (1942)



El ingeniero civil siempre ha trabajado con suposiciones, las cuales a través de errores, ensayos e investigación se han logrado corroborar, mejorar, quitar o usar nuevas hipótesis. Esto ha repercutido en dos aspectos importantes de la ingeniería, la seguridad y los costos de la obra.

Los experimentos pueden ser realizados en laboratorios, probando con secciones características de elementos estructurales. Sin embargo estos también son llevados a estructuras reales fuera del laboratorio, permitiendo obtener un análisis del sistema.

Este tipo de estudios se ha desarrollado, por parte del Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM), en puentes a lo largo del país (Gómez *et al.*, 2008) y en vías elevadas dentro de la zona metropolitana de la ciudad de México; a la par con la demanda y construcción de mayores áreas de tránsito dentro de la ciudad.

El Viaducto Bicentenario, es una estructura más en la que se han realizado estudios experimentales. En ella el trabajo de investigación se realizó en dos etapas:

La primera consistió en la medición de la respuesta de una sola columna ante una fuerza lateral en el capitel con cargas de servicio y a la cual se le experimentó en dos condiciones: aislada y luego con la obra concluida. Los resultados permiten conocer los efectos de interacción suelo-estructura y la respuesta lateral de una sección característica de la vía elevada (Murià *et al.*, 2012).

En la segunda etapa se instrumentó un tramo típico del viaducto, para medir y estudiar la respuesta del sistema bajo pruebas con cargas vehiculares de diseño.

En el caso del Viaducto Bicentenario, los estudios fueron realizados para poder obtener elementos de referencia que permitan corroborar las hipótesis de diseño y detectar posibles discrepancias que afecten las condiciones de seguridad.

El trabajo de esta tesis consiste en el procesamiento de las mediciones de la segunda etapa de las pruebas, para obtener datos confiables y representativos de desplazamiento horizontal, vertical y giro de la estructura. Los cuales serán analizados, con el objetivo de revisar y comparar con los cálculos del proyectista y las condiciones límite permisible.

Los resultados experimentales también podrán ser un referente para que el proyectista corrobore sus consideraciones de análisis y diseño; adicionalmente servirán de base para calibrar los modelos analíticas que se elaboren, permitiendo estimar propiedades del sistema para comparar con las de diseño y revisar las hipótesis de análisis utilizadas en la práctica profesional; este análisis queda fuera del alcance de la tesis.



# Capítulo 1.

## Descripción de la Vía Elevada Vehicular

El presente trabajo se centra en el estudio experimental de una porción de la vía elevada Viaducto Bicentenario (ViBi). El puente de tres carriles, fue desarrollado en cinco tramos como parte del Plan de Desarrollo del Estado de México 2005-2011, con el objetivo de comunicar al Estado de México desde el límite norte del Distrito Federal, a la altura de Toreo de Cuatro Caminos, hasta Tepetzotlán en el kilómetro 44 de la autopista México-Querétaro; uniendo las dos zonas a través de 32 km viales.

### 1.1. Localización

La sección estudiada se encuentra en el municipio de Tlalnepantla, Estado de México, al sur del tramo 3 de la subdivisión del ViBi. Tramo que abarca desde Santa Mónica hasta Valle Dorado (Figura 1.1), construido sobre la calle Manuel Ávila Camacho con una longitud de 3 km; inaugurado desde septiembre del 2010. La porción seleccionada para el estudio abarca de la columna A240 a la A243, al noreste del puente de Santa Mónica, entre los encadenamiento 9+335 y 9+400.

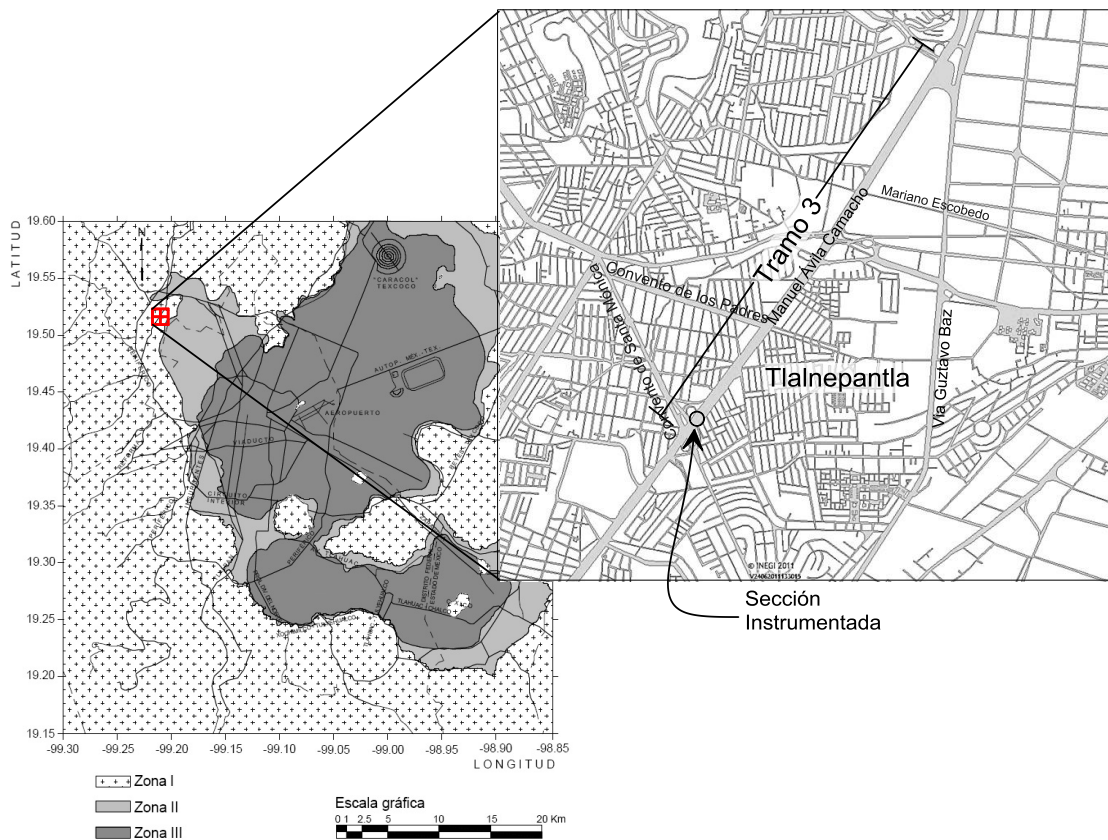


Figura 1.1 – Localización del Viaducto Bicentenario con base al mapa de zonificación por tipo de suelo (NTC-DCC, 2004)

## 1.2. Descripción de la estructura

La estructura elevada está conformada por marcos de elementos prefabricados y pretensados. La zona de estudio es un tramo tipo de cuatro columnas apoyadas en zapatas con cuatro pilas. Tres traveses unen los marcos en un sistema tipo cantiliver (Wilcox, 1898); es decir, dos de ellas se apoyan en las columnas y se extienden más allá de sus soportes; la tercera, del claro central, se haya simplemente apoyada en una de las traveses y con un apoyo restringido en la otra. Por último el sistema se completa con 18 tabletas colocadas sobre cada trabe (Figura 1.2) La resistencia del concreto es de  $f'_c = 600 \text{ kg/cm}^2$  y un módulo elástico  $E_c = 328,206 \text{ kg/cm}^2$ . El acero de refuerzo tiene una resistencia  $f_y = 4,200 \text{ kg/cm}^2$ , y el de presfuerzo un  $f_{pu} = 19,000 \text{ kg/cm}^2$ .

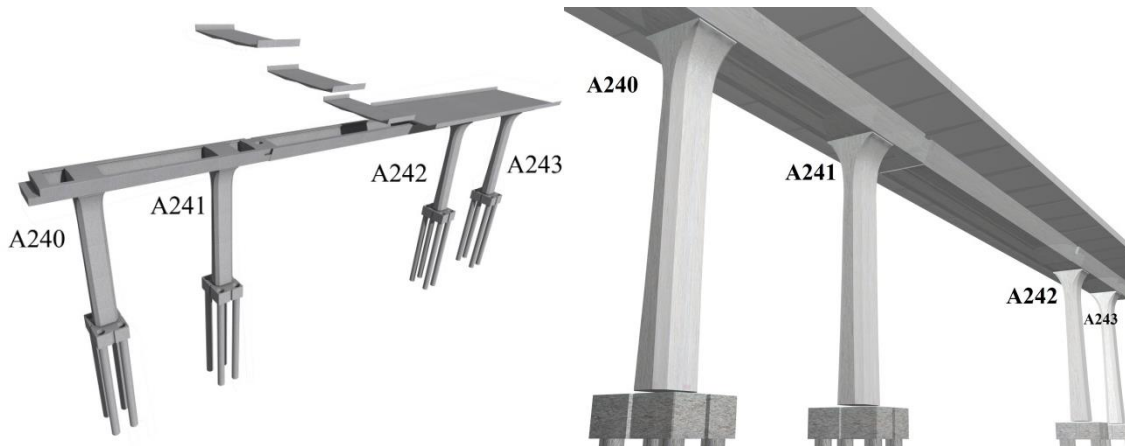


Figura 1.2 – Vista de la estructura instrumentada

Las columnas son huecas y de sección transversal variable (Figura 1.3). El espacio vacío es mayor en la base y disminuye gradualmente hasta el capitel, el cual tiene la abertura para la descarga de agua pluvial. El espesor de la columna también varía respecto a la altura, sin embargo está no es menor de 0.30 m.

Con base en la figura 1.3, la altura total de las columnas A240, A241, A242 y A243 son de 11.0, 10.75, 9.75 y 9.25 m, respectivamente.

Los marcos están constituidos por dos tipos de trabe, la 3TCR3 para el centro del claro con una longitud de 25 m, y la 3TAR para los marcos A240-A241 (3TAR2) y el A242-A243 (3TAR3). Este último tipo de trabe se apoya sobre las columnas y se une al cabezal mediante un postensado, tiene un largo entre ejes de columna de 15 m y, a cada extremo, dos ménsulas de 5 m que sirven de apoyo para la trabe 3TCR (Figura 1.4). Las traveses son de secciones huecas con un ancho de 4.8 m

El apoyo restringido o fijo, se encuentra en la unión de la trabe 3TAR2 y la 3TCR3; la cual comparte el apoyo simple, o móvil, con la trabe 3TAR3.

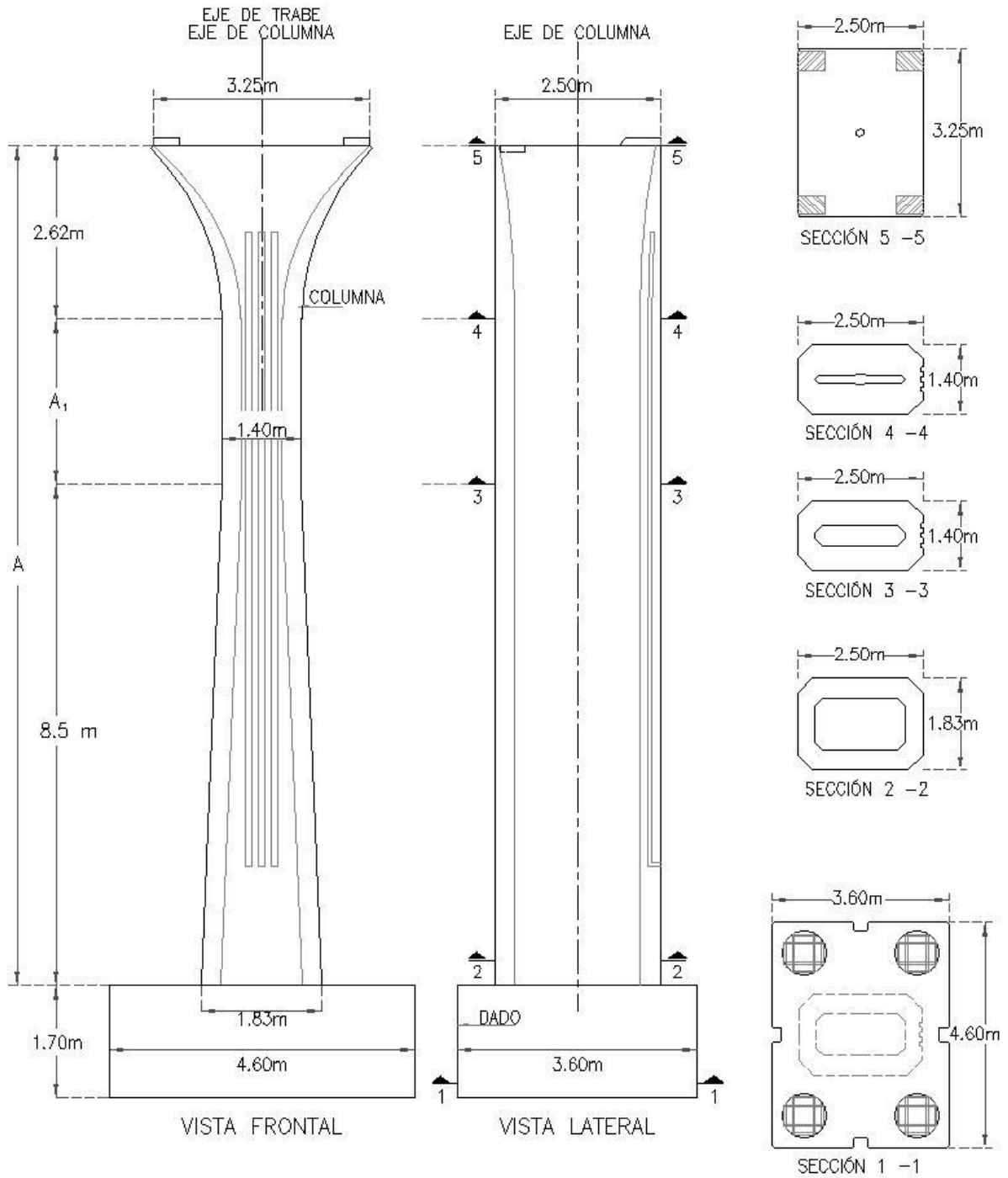


Figura 1.3 – Geometría de las columnas instrumentadas

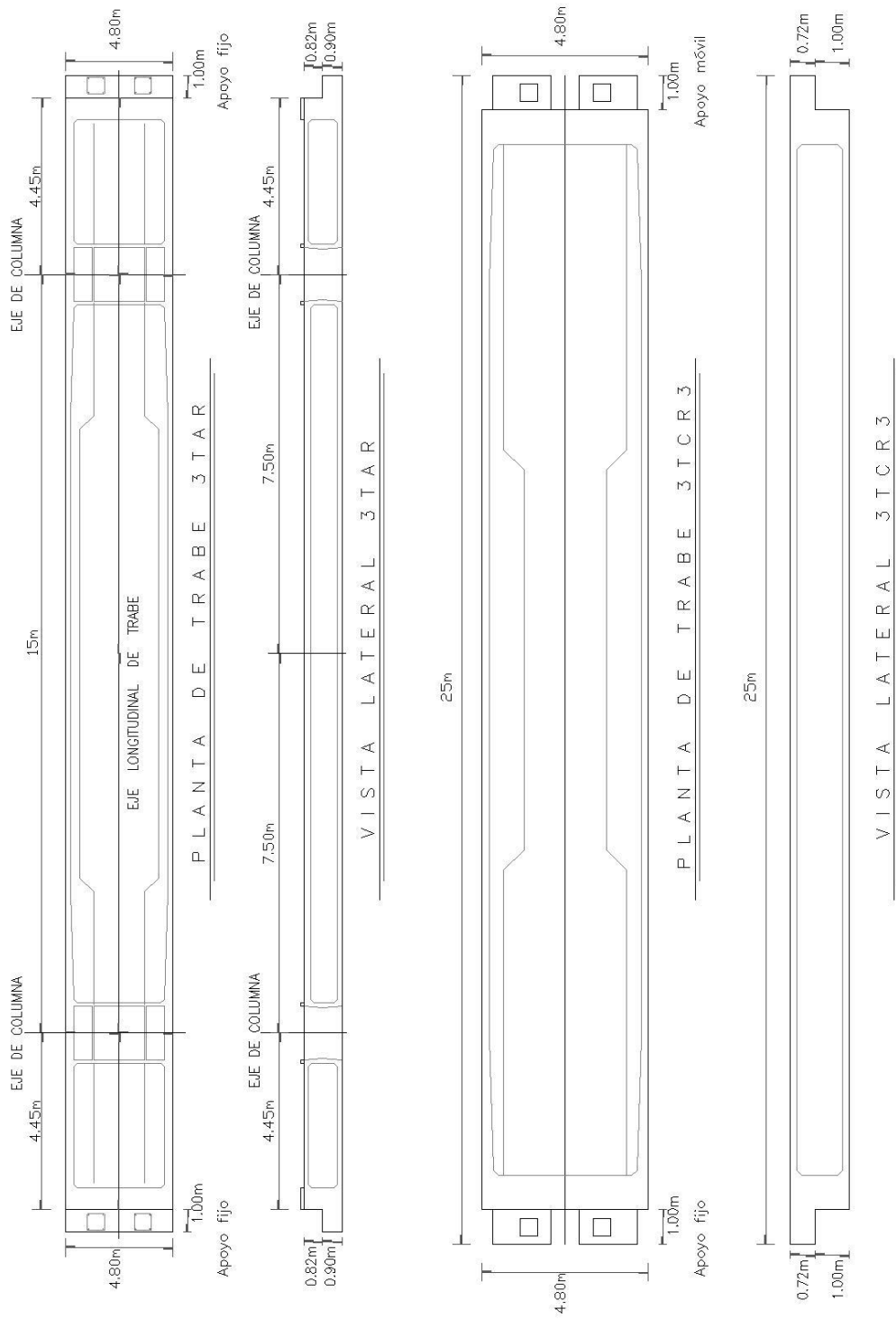


Figura 1.4 – Geometría de las traves instrumentadas



Para la formación de la vía se colocaron tabletas sobre las traveses de la estructura con un ancho total, en la zona estudiada, de 11.68 m y un ala o volado de 3.82 m (Figura 1.5). Su diseño permite que el pavimento, colocado sobre ellas, se agarre a la estructura.



Figura 1.5 – Geometría de las tabletas

### 1.3. Descripción de la cimentación

Las cimentaciones de las columnas tienen como base una zapata rectangular de 3.6 por 4.6 m y un peralte de 1.7 m (Figura 1.6). Las zapatas son prefabricadas junto con las columnas (Figura 1.3) y se conectan a cuatro pilas construidas en el sitio. Las pilas tienen un largo promedio de 25.6 m con un diámetro de 0.80 m; su geometría y posición se muestra en la tabla 1.1.

La unión de los elementos de cimentación se logra mediante el embono de una sección de las pilas de 0.85 m, dentro de cuatro huecos cilíndricos ubicados en las esquinas de las zapatas, y un postensado de la pila con la zapata.

Los materiales de las zapatas son los mismos que se utilizaron para las columnas. Las pilas son de concreto con resistencia  $f'_c = 250 \text{ kg/cm}^2$  y un  $E_c = 221,359.4 \text{ kg/cm}^2$ ; con un acero de refuerzo de  $f_y = 4200 \text{ kg/cm}^2$ .

Tabla 1.1 – Geometría de las pilas de columnas instrumentadas

Geometría de pilas, en m				
Eje de columna	Largo de la pila	Diámetro	Nivel del terreno natural*	Desplante de zapata*
A240	25.80	0.80	2261.08	2259.03
A241	25.60	0.80	2261.11	2258.87
A242	25.50	0.80	2261.11	2258.78
A243	25.60	0.80	2261.09	2258.80

\*Respecto al nivel del mar

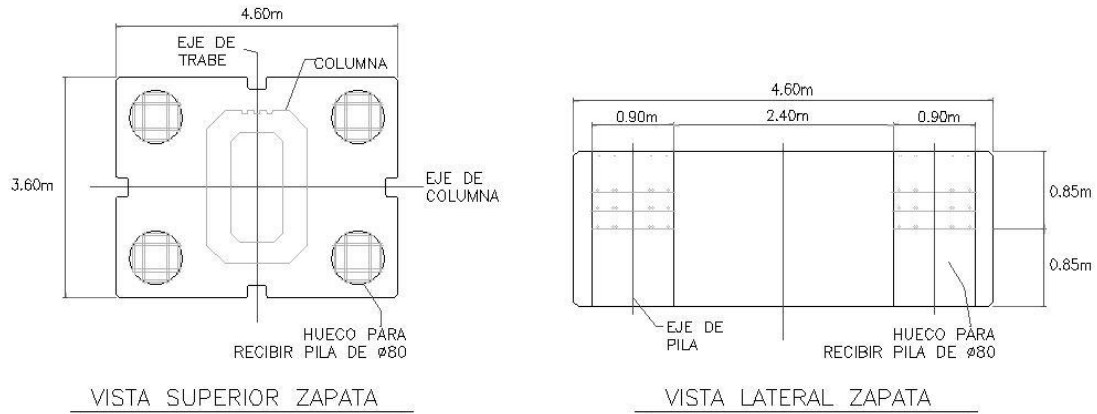


Figura 1.6 – Geometría de las zapatas de las columnas instrumentadas

Con base en las NTC-DCC (2004) la estructura se encuentra en un tipo de suelo con características a la zona I: constituido por lomas formadas por rocas o suelos generalmente firmes (Figura 1.1).

De acuerdo al sondeo SM-EM-02B-35, el suelo tiene una densidad de  $1.41 \text{ t/m}^3$ . Su estratigrafía es arcilla y limo de consistencia media, hasta los 20 m de profundidad, y principalmente de arena muy densa después de los 23 m de profundidad, al nivel del desplante de la pilas (Tabla 1.2).

Tabla 1.2 – Estratigrafía con laboratorio SM-EM-02B-35

Profundidad, en m	Material	Descripción geotécnica del material	Porcentaje de contenido de agua	Porcentaje de contenido de finos
0 – 10	Arcilla	Poco arenosa, de color café. Consistencia media	40	90
10 – 23	Limo arenoso	Poco arcilloso, de color café. Consistencia generalmente media	50	80
23 – 25	Arena limosa	Fina a media, de color café. Compacidad muy densa	30	50
25 - 32	Arena pumítica	Fina a gruesa, de color café y gris amarillento. Compacidad muy densa	60	20
32 - 34	Arena limosa	Fina a media, de color café amarillento. Compacidad muy densa	40	30
34 – 37	Limo arenoso	De color café. Consistencia muy dura	40	50

## Capítulo 2.

### Pruebas Estáticas y Dinámicas de Campo

---

El estudio experimental consistió en la realización de un conjunto de pruebas para someter la estructura a condiciones de carga vehicular, las cuales fueron transitadas sobre la vía elevada. La instrumentación fue colocada con el objetivo de medir la respuesta de la estructura ante las pruebas realizadas.

El tipo de carga vehicular utilizada consistió en tractocamiones o camiones articulados. Con ello se logró someter a la estructura a condiciones de carga de gran magnitud. En total se utilizaron: tres camiones tipo T3-S2, uno de ellos no cargado; y tres camiones tipo T3-S3, todos con carga.

Las dimensiones de los camiones utilizados para las pruebas se muestran en las tablas 2.1 y 2.2. Las medidas se realizaron de eje a eje de llanta, como lo muestra la figura 2.1; con excepción de la longitud total del camión (h).

Tabla 2.1 - Dimensiones de los camiones tipo T3-S2 utilizados en las pruebas de carga vehicular

<b>Camiones tipo T3-S2</b>							
Nombre	Dimensiones, en m						
	a	b	c	d	h	f <sub>del</sub>	f <sub>tras</sub>
Camión 0	4.4	1.40	4.2	1.30	13.0	2.2	1.95
Camión 1	4.6	1.40	4.5	1.25	13.5	2.1	2.00
Camión 3	4.4	1.35	4.3	1.30	13.7	2.1	2.10

Tabla 2.2. Dimensiones de los camiones tipo T3-S3 utilizados en las pruebas de carga vehicular

<b>Camiones tipo T3-S3</b>								
Nombre	Dimensiones, en m							
	a	B	c	D	e	h	f <sub>del</sub>	f <sub>tras</sub>
Camión 4	4.8	1.30	4.15	1.25	1.20	15.00	2.00	2.1
Camión 5	4.4	1.35	4.10	1.25	1.30	14.65	2.05	2.1
Camión 6	4.4	1.35	4.00	1.30	1.25	14.60	2.10	2.0

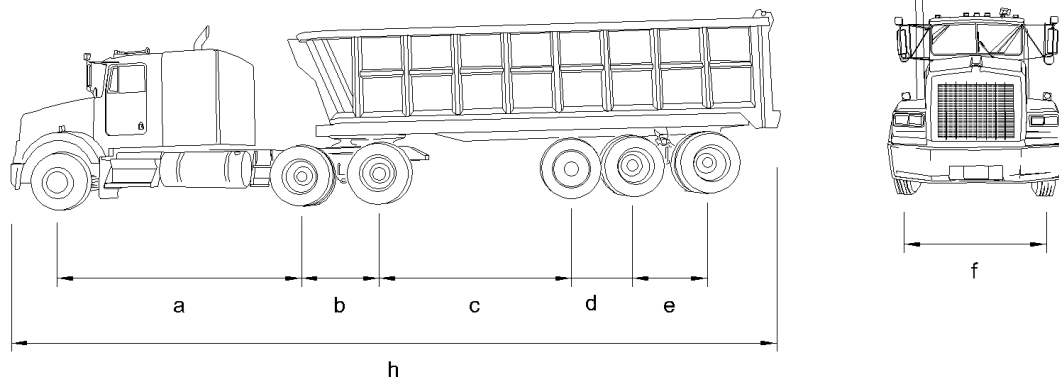


Figura 2.1 - Camión articulado tipo T3-S3

El peso de los vehículos se midió en tres posiciones (figura 2.2): para los ejes del tractor (I), los del semirremolque (II), y el total del camión (III). En la tabla 2.3 se muestran los valores obtenidos por la báscula, donde las diferencias entre la suma de la posición I y II respecto al peso total (III), se puede deber a la resolución de la medición, como a variaciones en el posicionamiento del vehículo sobre la báscula. El camión 0 es el único con el semirremolque vacío, todos los demás estaban cargados.

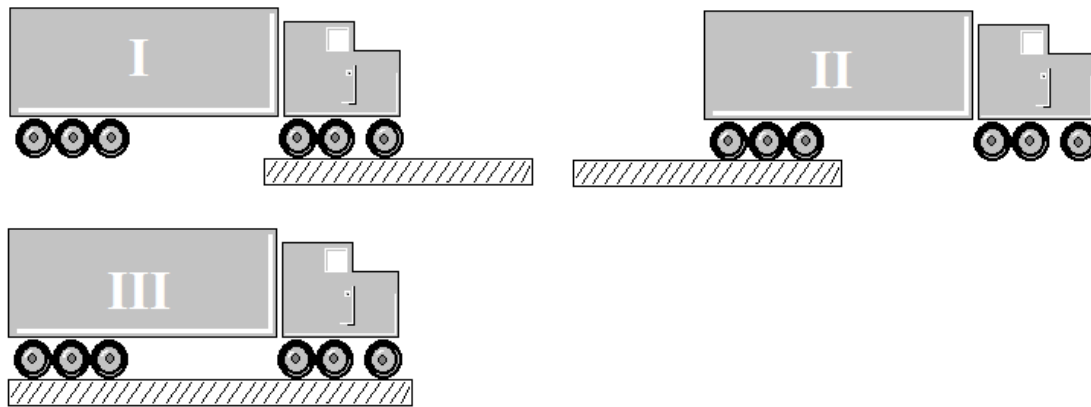


Figura 2.2. Posiciones para la medición del peso de los camiones

Tabla 2.3. Pesos, por descarga, de los camiones utilizados en las pruebas de carga vehicular

Camiones tipo T3-S2					Camiones tipo T3-S3				
Nombre	Pesos por eje, en t				Nombre	Pesos por eje, en t			
	I	II	I + II	III		I	II	I + II	III
Camión 0	11.19	5.14	16.33	16.33	Camión 4	29.73	34.19	63.92	60.92
Camión 1	23.38	23.07	46.45	46.30	Camión 5	25.27	35.06	60.33	60.02
Camión 3	28.35	36.29	64.64	64.64	Camión 6	28.13	41.73	69.86	70.64

\*I. Peso ejes del tractor II. Peso ejes del semirremolque III. Peso total

### 2.1. Pruebas estáticas

El programa de pruebas estáticas (PE) consistió en diez pruebas, cada una con un arreglo de camiones sobre la vía elevada (Tabla 2.4), variando las posiciones y combinaciones sobre los carriles dentro de la zona de estudio, como se muestra en las figuras 2.3 a 2.6.

Tabla 2.4. Posicionamiento de los camiones en los arreglos de las pruebas estáticas

Pruebas estáticas.				
Prueba	Camión por carril			Descripción de la posición*
	Oeste	Central	Este	
PE1		0		Centro del claro
PE2		3		Centro del claro
PE3	3			Centro del claro
PE4	3	1		Centro del claro
PE5	3	0	1	Centro del claro
PE6	3	0	1	1/4 al norte del claro
PE7	5, 3	6, 0	4, 1	Centro del claro
PE8	5, 3	6, 0	4, 1	1/4 al norte del claro
PE9	5, 3			Alineados centro del claro
PE10	Todos			Alineados centro del claro

\* Todos los camiones fueron posicionados hacia el norte

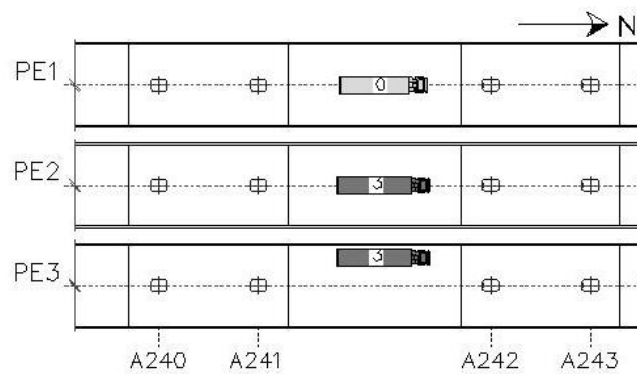


Figura 2.3. Arreglo de camiones de la PE1, PE2 y PE3

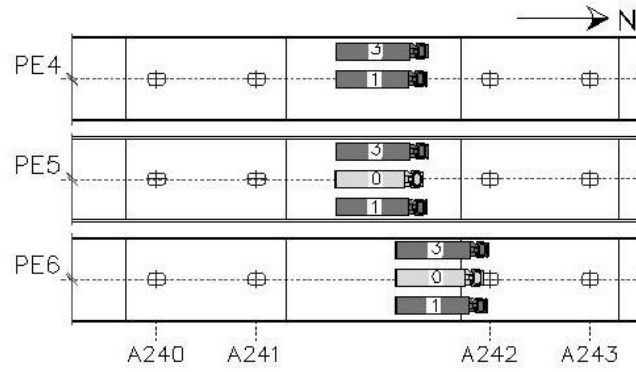


Figura 2.4. Arreglo de camiones de la PE4, PE5 y PE6

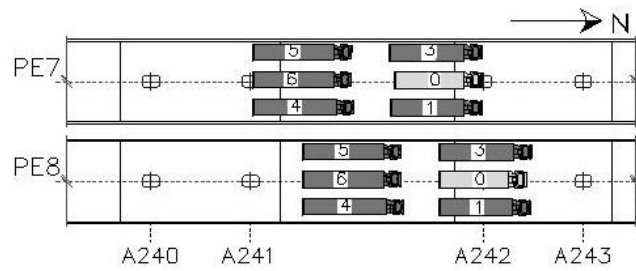


Figura 2.5. Arreglo de camiones para la PE7 y PE8

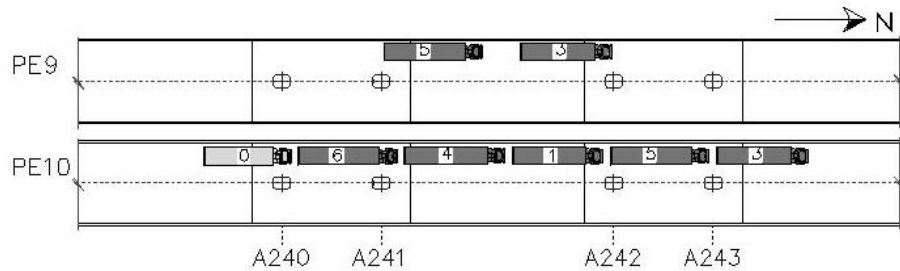


Figura 2.6. Arreglo de camiones para la PE9 y PE10

## 2.2. Pruebas dinámicas

Este tipo de pruebas tiene como objetivo estudiar la respuesta de la estructura ante los efectos dinámicos, como ejemplo vibración o impacto. El programa consistió en siete pruebas dinámicas (PD1 a la PD7), en todas ellas transitaron camiones sobre el carril central de la zona de estudio.

Para las PD5, PD6 y PD7 se colocaron dos toques, transversalmente al sentido de la vía, para provocar un impacto ante el paso de los camiones. Uno se posicionó en el eje de la columna A241, y el otro al centro del claro, sobre la trabe 3TCR3.

En la tabla 2.5 se describe la posición de las pruebas dinámicas. La figura 2.7 muestra una representación del paso vehicular para dichas pruebas.

Tabla 2.5. Configuración de las pruebas dinámicas

Prueba	Camión por carril			Descripción de la posición*
	Oeste	Central	Este	
PD1		0		Centro del claro
PD2		3		Centro del claro
PD3		5		Centro del claro
PD4		1		Centro del claro
PD5		0		Centro del claro con tope**
PD6		4		Centro del claro con tope**
PD7		6		Centro del claro con tope**

\*Todos los camiones fueron posicionados hacia el norte

\*\*El primer tope se posiciono sobre la columna A241, el segundo al centro del claro

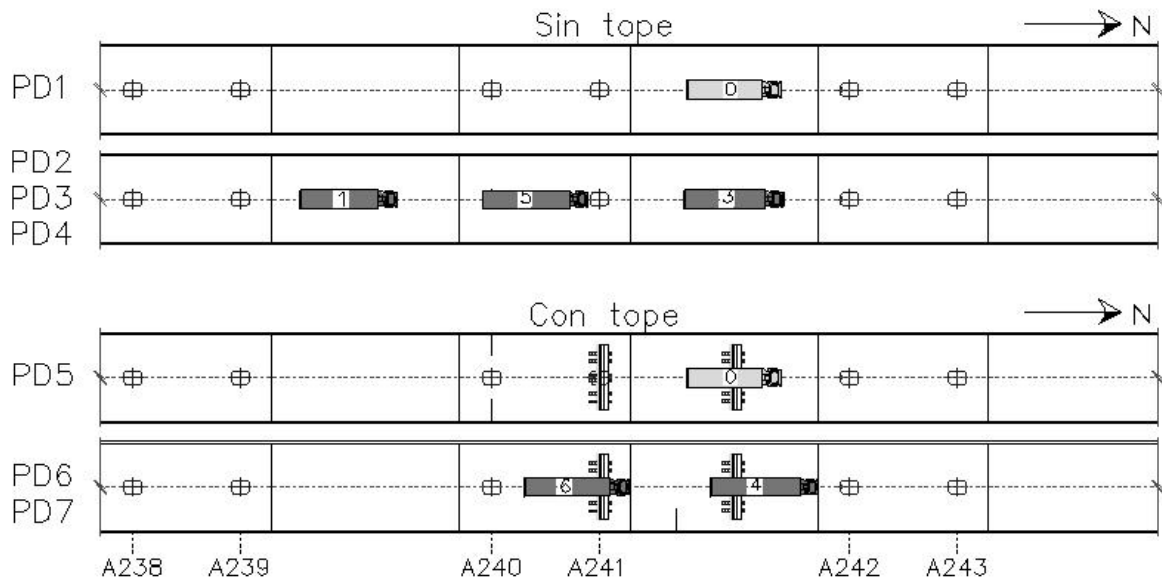


Figura 2.7. Arreglo de camiones para las cuatro pruebas dinámicas

### 2.3. Instrumentación

La instrumentación fue colocada con el objetivo de determinar los desplazamientos relativos y deformaciones de la estructura. Para ello se utilizaron tres tipos de dispositivos de medición: potenciómetros, transductores de desplazamiento e inclinómetros. De la zona de estudio, las columnas instrumentadas fueron la A240, A241 y A242 y las traveses 3TAR2 y 3TCR3

La nomenclatura utilizada para identificar los instrumentos consiste, primero, en el prefijo de cada uno, después se indica su posición respecto a la estructura: "A" para el eje A240, "B" para A241, "C" para A242 y "o" para el eje del centro del claro; y el número del instrumento.

### Potenciómetros

Este tipo de instrumentos miden el desplazamiento relativo de la estructura con respecto a la posición del instrumento.

Se distribuyeron en tres grupos: el primero, denominado con el prefijo “p”, fue colocado para medir de forma indirecta los giros en la base de la columna A241. La distribución fue de seis potenciómetros, tres a cada lado, uno encima del otro desde el primer nivel (Figura 2.10).

Tabla 2.6. Posición de los potenciómetros en la columna instrumentada

Nivel	Columna A241	
	Distancia, en m	Instrumentos
1.0	1.84	pB5 pB6
0.5	1.88	pB3 pB4
0.0	1.92	pB1 pB2

Un grupo de potenciómetros, denominados con el prefijo “H”, fue posicionado para medir el desplazamiento horizontal en distintos puntos de las columnas. Esto se logró colocando un sistema de soporte, lateral a la columna, diseñado de forma tal que su deformación fuera despreciable.

Las tres columnas tuvieron el mismo diseño de instrumentación con seis potenciómetros tipo “H”. El primero colocado al nivel superior de la zapata y continuando a distintas alturas hasta alcanzar el cabezal de la columna (Figuras 2.9 a 2.11). En la tabla 2.7 se muestra la altura de cada instrumento respecto al lecho superior de la zapata correspondiente. Todos los instrumentos fueron colocados en el este de cada columna.

Tabla 2.7. Posición de los instrumentos H respecto al nivel de la zapata de cada columna

Columna A240		Columna A241		Columna A242	
Instrumentos	Altura, en m	Instrumentos	Altura, en m	Instrumentos	Altura, en m
HA6	9.30	HB6	9.44	HC6	9.68
HA5	8.30	HB5	8.43	HC5	8.70
HA4	6.79	HB4	6.93	HC4	7.17
HA3	3.80	HB3	3.91	HC3	4.21
HA1	0.36	HB1	0.61	HC1	0.81

El otro grupo de instrumentos, denominados con el prefijo “V”, fueron colocados para determinar las flechas verticales de la trabe de mayor claro y las alas de la sección cajón de las trabes, transversal como longitudinal. El sistema utilizado consistió en la colocación de tubos ortogonalmente al suelo en los puntos de medición. En la parte baja del tubo se colocó el instrumento, registrando de esta forma el desplazamiento relativo del punto de medición respecto al suelo.



Se instrumentaron tres ejes transversales a la vía (Tabla 2.8): el A240 con un instrumento VA a cada extremo (Figura 2.9); El A241 con cinco VB separados 1.79 m del eje (Figura 2.10); y al centro del claro con cinco instrumentos VC, ubicados a 17.84 m del eje A241 (Figura 2.12).

Tabla 2.8. Posición de los instrumentos V respecto al eje longitudinal de la vía

Eje A240		Eje A241		Eje centro del claro	
Instrumentos	Distancia, en m	Instrumentos	Distancia, en m	Instrumentos	Distancia, en m
VA1	-5.98	VB1	-5.93	Vo1	-5.96
VA2	5.98	VB2	-2.31	Vo2	-2.52
		VB3	0.00	Vo3	0.00
		VB4	2.54	Vo4	2.45
		VB5	5.98	Vo5	5.89

### Inclinómetros biaxiales

Estos instrumentos se colocaron para medir los giros de la zapata y la columna, posicionándose tres inclinómetros para cada una, a excepción de la A240 con solo dos. Se ubicaron en el lecho superior de la zapata, en la base de la columna y en el capitel (Figuras 2.9 a 2.11).

Cada inclinómetro biaxial dispone de un sensor de temperatura interno, el cual es utilizado para registrar la temperatura y realizar la corrección correspondiente a la medición. En su identificación se utiliza el prefijo "T" más la letra de la columna correspondiente y el número del inclinómetro.

Tabla 2.9. Altura de los inclinómetros respecto al nivel de la zapata

Columna A240			Columna A241			Columna A242		
Instrumento		Altura, en m	Instrumento		Altura, en m	Instrumento		Altura, en m
TA1	IAL1	0.53	TB1	IBL1	0.00	TC1	ICL1	0.00
TA2	IAL2	9.45	TB2	IBL2	0.53	TC2	ICL2	0.53
			TB3	IBL3	9.45	TC3	ICL3	9.45

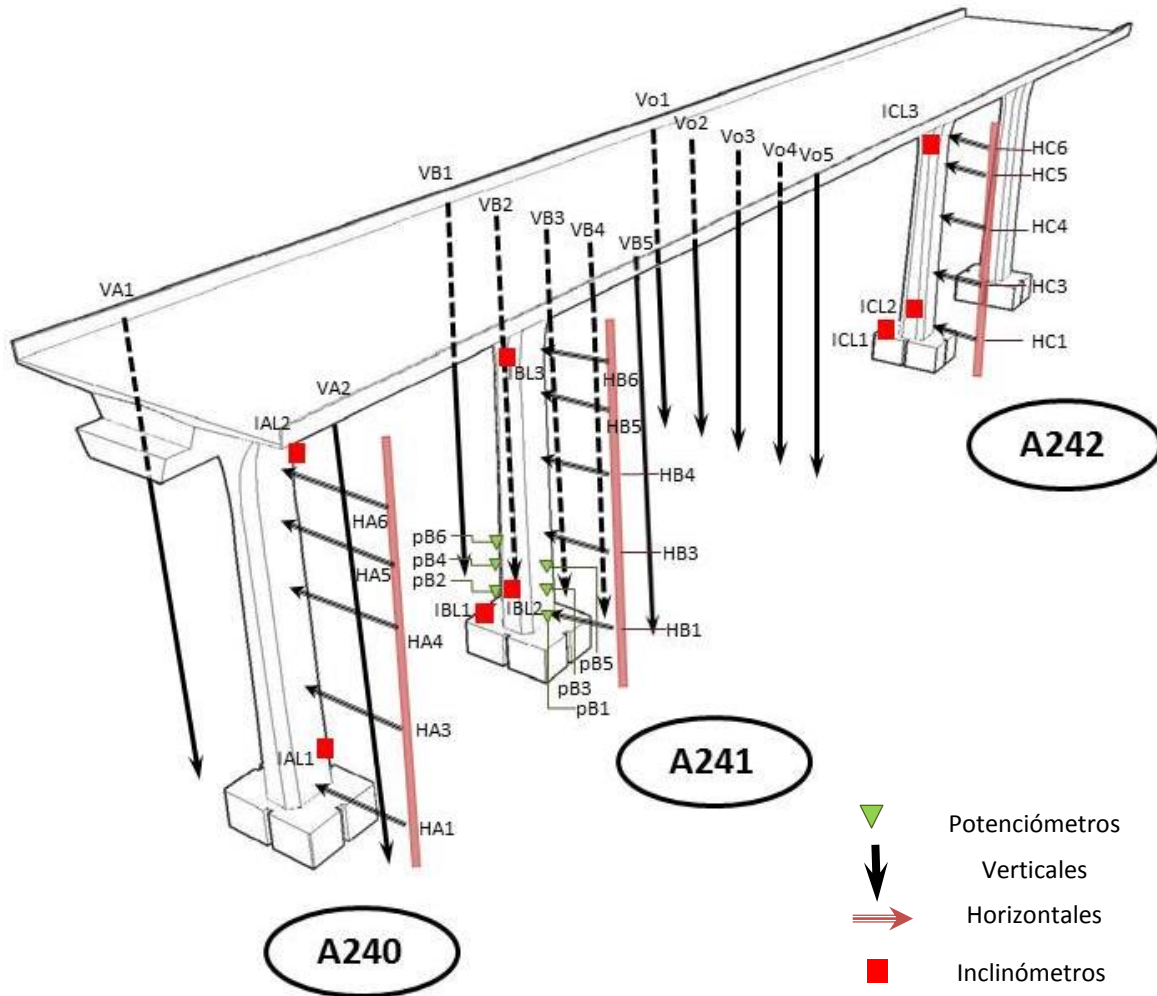


Figura 2.8 – Croquis de la instrumentación colocada en el ViBi

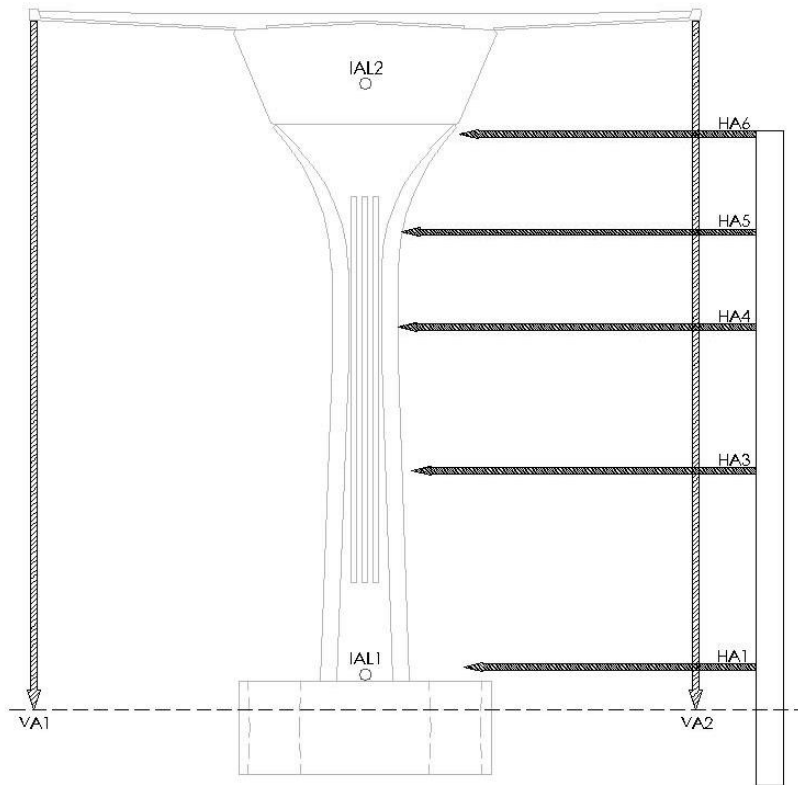


Figura 2.9. Posición de la instrumentación colocada en la columna A240

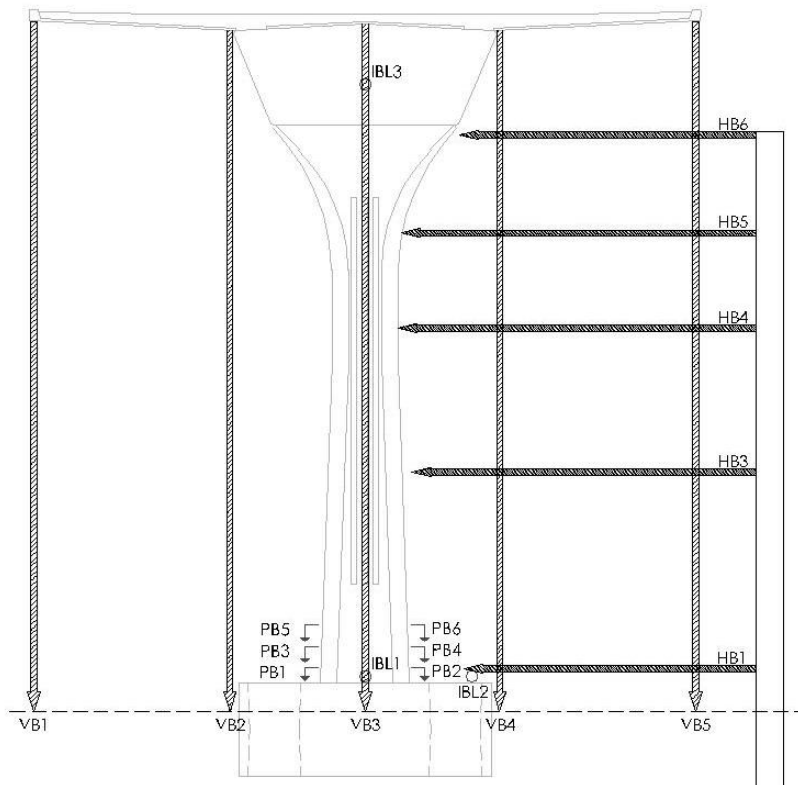


Figura 2.10. Posición de la instrumentación en la columna A241

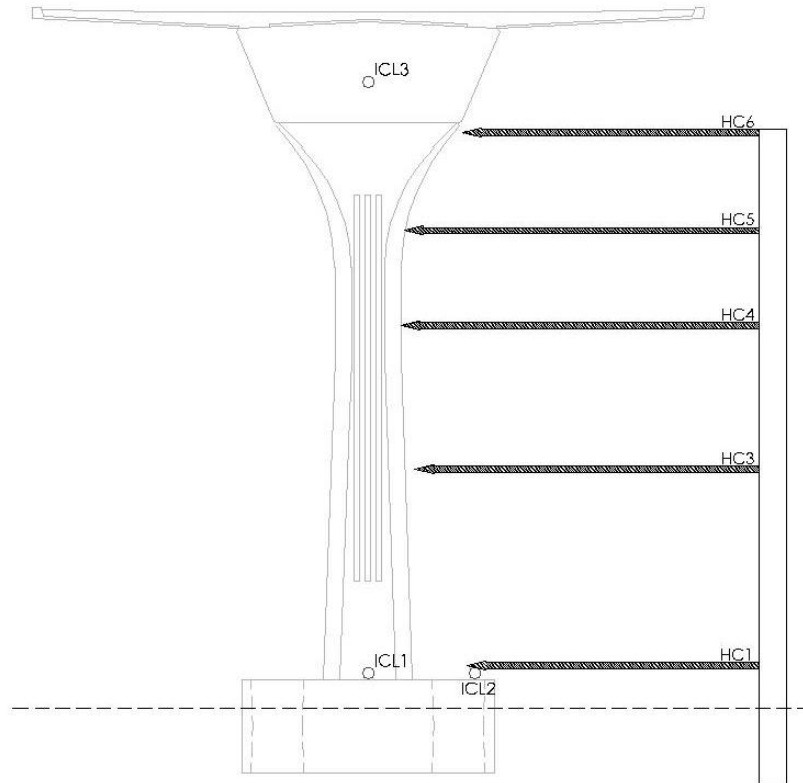


Figura 2.11. Posición de la instrumentación en la columna A242

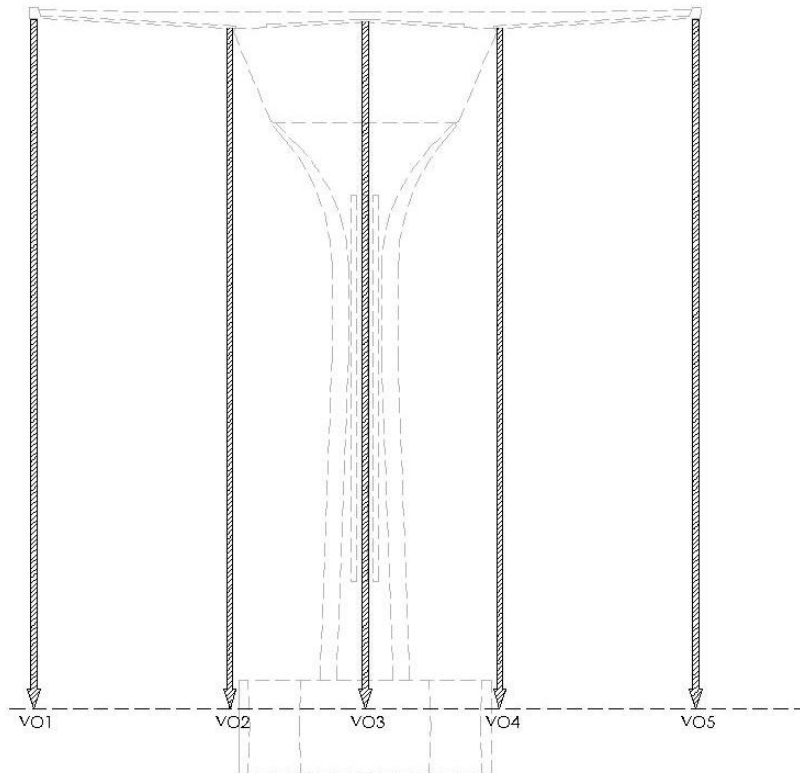


Figura 2.12. Posición de la instrumentación al centro del claro.

La metodología experimental de análisis consiste en el procesamiento de la señal de datos, de la instrumentación colocada durante las pruebas, para obtener las mediciones de la respuesta de la estructura. Esto abarcará el preprocesamiento de la señal, el procesamiento por tipo de prueba y su análisis.

### **3.1. Preprocesamiento de los registros**

La primera etapa se realiza con el fin de preparar la información, de forma que pueda ser analizada y facilite el manejo de posibles errores en la señal de datos.

Los instrumentos consisten en sensores que transforman una magnitud física medida en alguna otra magnitud. Por lo que para su correcta utilización es necesario conocer la relación numérica existente entre las dos magnitudes, este valor es denominado sensibilidad del sensor o factor de calibración (FC) como se hará referencia en este texto. El FC es obtenido para cada instrumento y debe de verificarse antes de la utilización de ellos. Esto se logra con una calibración del sensor, la cual consiste en ejercer una magnitud de entrada controlada y registrar el valor de salida, obteniendo un intervalo de valores para una relación lineal cuya pendiente es el FC del sensor (Pallás Areny, 2003).

El registro de datos de una prueba consiste en tres etapas: el estado previo de la estructura, la prueba y el después. La primera se refiere a la condición a la cual se encuentra el sistema antes de ser alterado por los procedimientos de la prueba. Esta fase de la captura es utilizada como referencia y la medición de la respuesta de la estructura es la variación de dicho estado.

Se realiza la corrección de línea base (CLB) para ajustar la señal de datos a un valor cero del estado de referencia. La CLB toma el promedio de los datos del intervalo de tiempo donde se midió dicho estado y se lo resta a toda la señal de datos.

En el caso de las pruebas vehiculares realizadas, el estado de referencia de una señal de datos se determina en un intervalo de tiempo previo al posicionamiento de los camiones. Para las pruebas estáticas, el intervalo del estado de referencia debe de ser el mismo en todos los instrumentos.

La etapa de la prueba en la captura se discutirá en los subcapítulos de procesamiento y análisis. El estado posterior al experimento, registra el estado alterado del sistema y, debido a la naturaleza no destructiva de las pruebas, se estipula que la estructura retorna a su estado inicial. El análisis de dicha zona del registro permite determinar si la señal tiene o no algún tipo de corrimiento de línea base.

Los errores durante la captura de datos son probables y, para no perder la información, se pueden realizar las correcciones pertinentes, mientras que no se corrompa la integridad de los datos. Las siguientes secciones explican los tratamientos aplicados en los registros de datos de las pruebas del ViBi.

Durante las pruebas eventualmente puede ocurrir un corrimiento de línea base. Esto se presenta cuando después de un suceso los datos pierden la CLB que tenían. Puede ser provocado por varias razones, como ruido en la señal, problemas eléctricos en el sensor o, como se ejemplifica en la figura 3.1, un golpe en el sensor. Las consideraciones que se deben de tomar para poder realizar la corrección son:

- La señal debe de estar en un estado estacionario antes y después del suceso.
- Antes y después del suceso la magnitud física medida es similar.
- Los valores, dentro del intervalo corregido, se eliminan para el análisis.

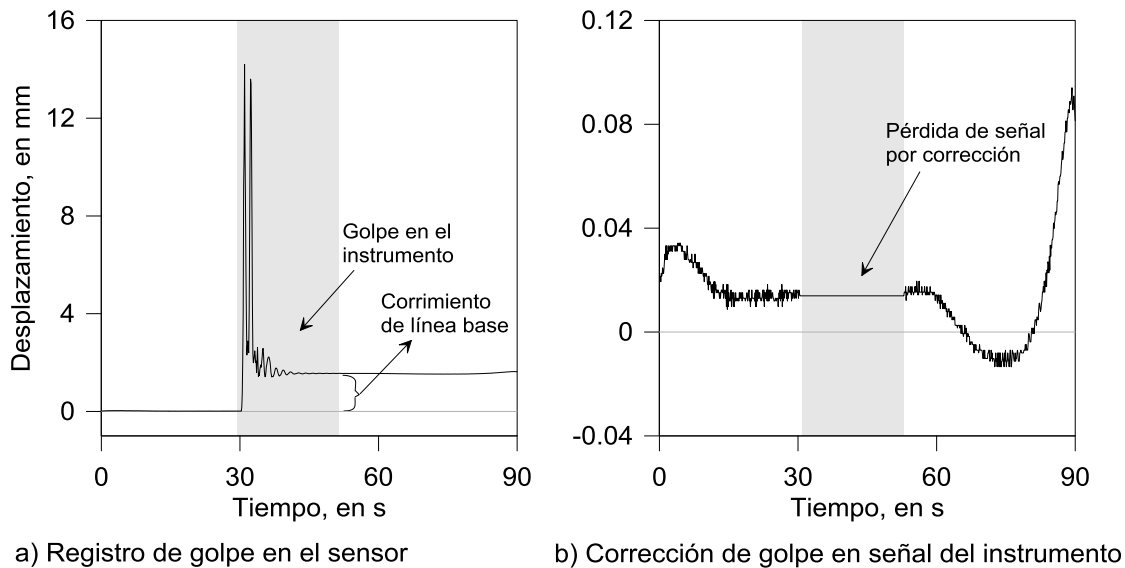


Figura 3.1 – Comparación de señal de datos antes (a) y después (b) de la corrección del corrimiento de línea base

El procedimiento de corrección consiste en quitarle a la señal, después del suceso, el valor al que se recorrió, el cual es obtenido de la diferencia entre el antes y después. Los elementos involucrados en la resta son calculados con un promedio de datos para tomar en cuenta la precisión del sensor.

Otro tipo de corrección, que se realiza a algunos registros de pruebas estáticas, principalmente por lo extenso de la captura, es la rectificación por corrimiento de línea base sistemático en función del tiempo o deriva. En el caso de algunas señales registradas, se observó que la deriva puede ser descrita aproximadamente con una función del tipo  $y = f(t)$ . La corrección por deriva es el procesamiento de restar el valor de la función del error a lo largo del registro de datos.

La función de la deriva se obtiene utilizando dos puntos de la recta. El primer punto ( $P_1$ ) ya conocido es el obtenido por la CLB. El segundo punto ( $P_2$ ) se busca en una sección del registro donde se estipula que el sistema ha regresado a su estado de referencia; por lo que  $P_2$  debe de ser similar a  $P_1$ . Los puntos son calculados con base en un promedio para tomar en cuenta la precisión del sensor. Con ello la función de la recta queda definida por la ecuación 3.1

La corrección es realizada restándole a cada dato de la señal, su correspondiente valor de la función. En la figura 3.2 se muestra un ejemplo de una señal corregida bajo este proceso. En donde al restarle a la señal original (línea gris) el valor de la recta trazada (línea discontinua), la señal al final regresa al estado cero (línea negra).

$$y(t) = \left( \frac{\bar{P}_2 - \bar{P}_1}{\bar{T}_2 - \bar{T}_1} * t - \bar{P}_2 \right) + \bar{T}_2 \quad [3.1]$$

Donde:

- $y(t)$  - El valor de la recta de corrección en el instante  $t$
- $\bar{P}$  - Es el valor promedio de la señal en los puntos  $P_1$  y  $P_2$
- $\bar{T}$  - El valor promedio del tiempo en los puntos  $P_1$  y  $P_2$

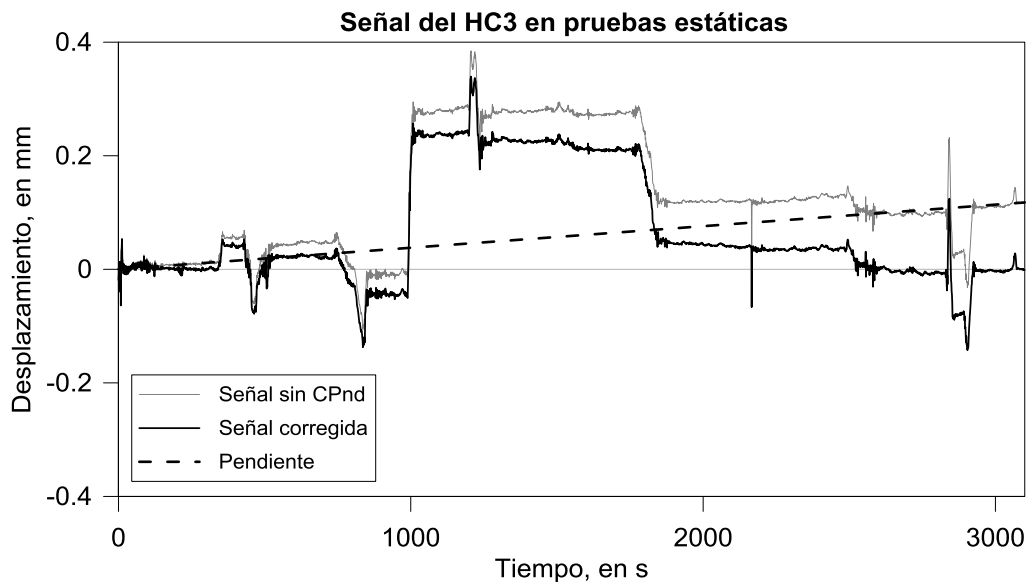


Figura 3.2 – Corrección por pendiente de la señal de un sensor con corrimiento de línea base sistemático

Los inclinómetros tienen una corrección más, por temperatura, esto es principalmente debido al mecanismo de medición del sensor. Para el ViBi se utilizaron inclinómetros electrolíticos para medir las variaciones del ángulo, los cuales consisten en receptáculos de vidrio, curvado y herméticamente cerrado, con un fluido conductor, una burbuja de aire y electrodos (Pallás Areny, 2003, pp. 57, 58).

El líquido electrolítico sufre cambios volumétricos debido a la variación de la temperatura. La rectificación del ángulo medido es realizada al modificar el FC por un coeficiente de temperatura y por las alteraciones de ella registrada.

### 3.2. Procesamiento y análisis de los registros de pruebas estáticas

El valor de la respuesta estructural se obtiene del procesamiento de un intervalo de análisis, seleccionado de cada zona de la señal donde se registró una prueba estática, del cual se calcula el promedio de los puntos para lograr un valor representativo y disminuir los efectos de fluctuaciones inherentes, tanto de la prueba como del sistema de medición. El intervalo de tiempo escogido, por prueba, debe de ser el mismo para todos los instrumentos que se encontraban midiendo el sistema.

Con dicho valor se determina el perfil de la estructura ya que se conoce la posición del instrumento cómo referencia (Figura 3.3). Permitiendo la consiguiente comparación con límites permisibles.

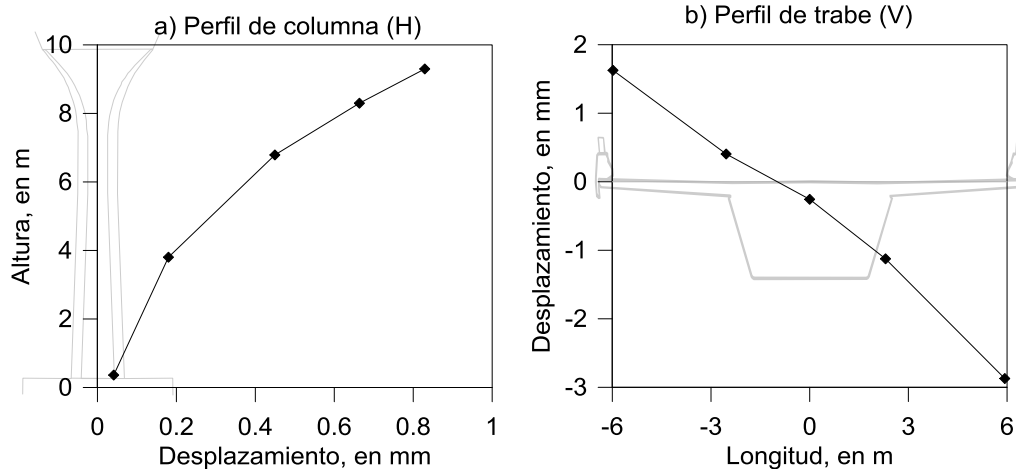


Figura 3.3 – Ejemplo de perfiles de prueba estática. a) Perfil trazado utilizando los instrumentos H. b) Perfil trazado utilizando los instrumentos V

En la figura 3.4 se presenta un ejemplo de la elección de un intervalo de medición. El registro del arreglo de una prueba, limitado por líneas intermitentes, contiene efectos que deben quedar fuera del análisis estático. El acercamiento realizado, figura 3.4b, muestra pequeñas variaciones en la amplitud de la señal, originadas por la continua vibración de la estructura y sumado con el ruido propio del sistema instrumental.



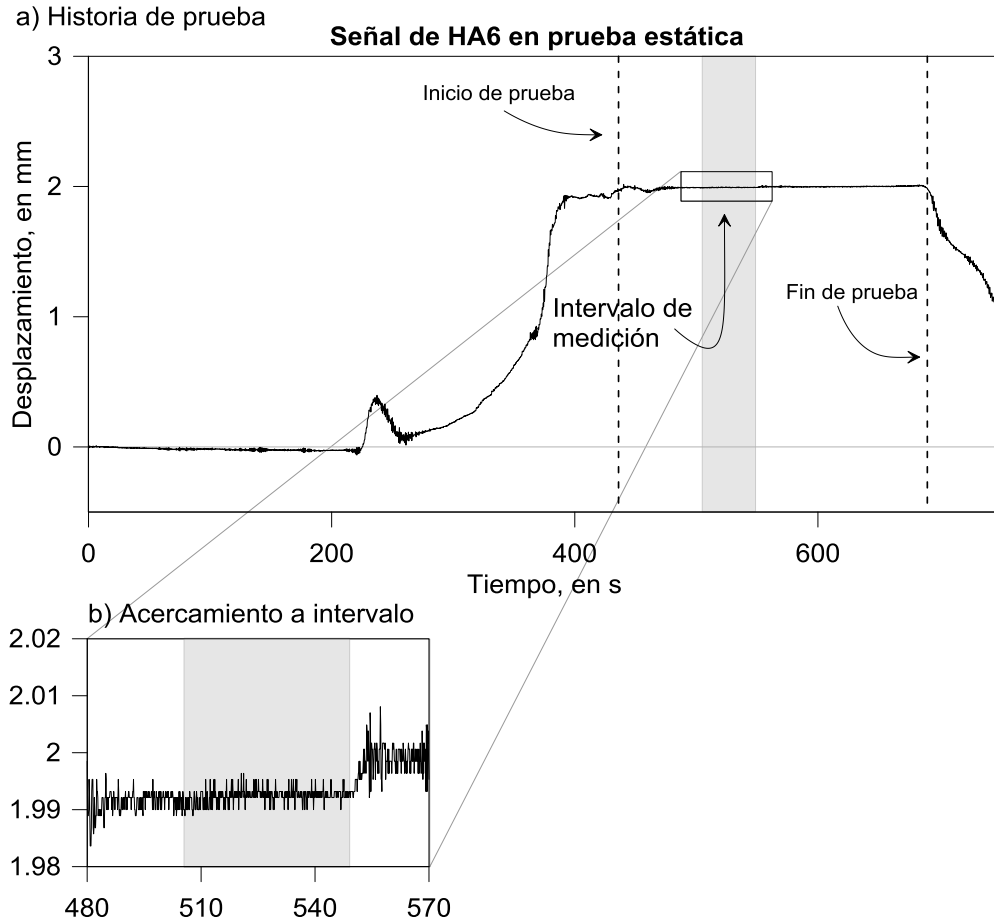


Figura 3.4 – Elección del intervalo de medición para prueba estática

### 3.3. Procesamiento y análisis de los registros de pruebas dinámicas

La respuesta dinámica de la estructura es tanto por la carga impuesta, como por los efectos dinámicos que ella provoca. Debido a la naturaleza de la respuesta, el análisis de las amplitudes es realizado determinando el valor máximo absoluto de la señal obtenida de cada camión.

El criterio para definir el intervalo de medición es diferente respecto a las pruebas estáticas. En el caso de las dinámicas, el intervalo sirve para restringir la búsqueda del valor máximo absoluto, por lo que debe de abarcar el efecto dinámico del punto medido. Dicho efecto puede ser registrado en momentos distintos, dando un intervalo individual por instrumento; sin embargo, para fines del procesamiento se determina un intervalo por grupo de instrumentos, como se ilustra en la figura 3.5 donde se presenta el intervalo para una prueba dinámica del grupo de instrumentos horizontal.

Los perfiles son construidos con los valores obtenidos en un mismo instante de tiempo, el cual es definido en el del instante donde se detectó el valor máximo. Los giros calculados con los potenciómetros se obtienen con el mismo instante de tiempo definido por la instrumentación horizontal.

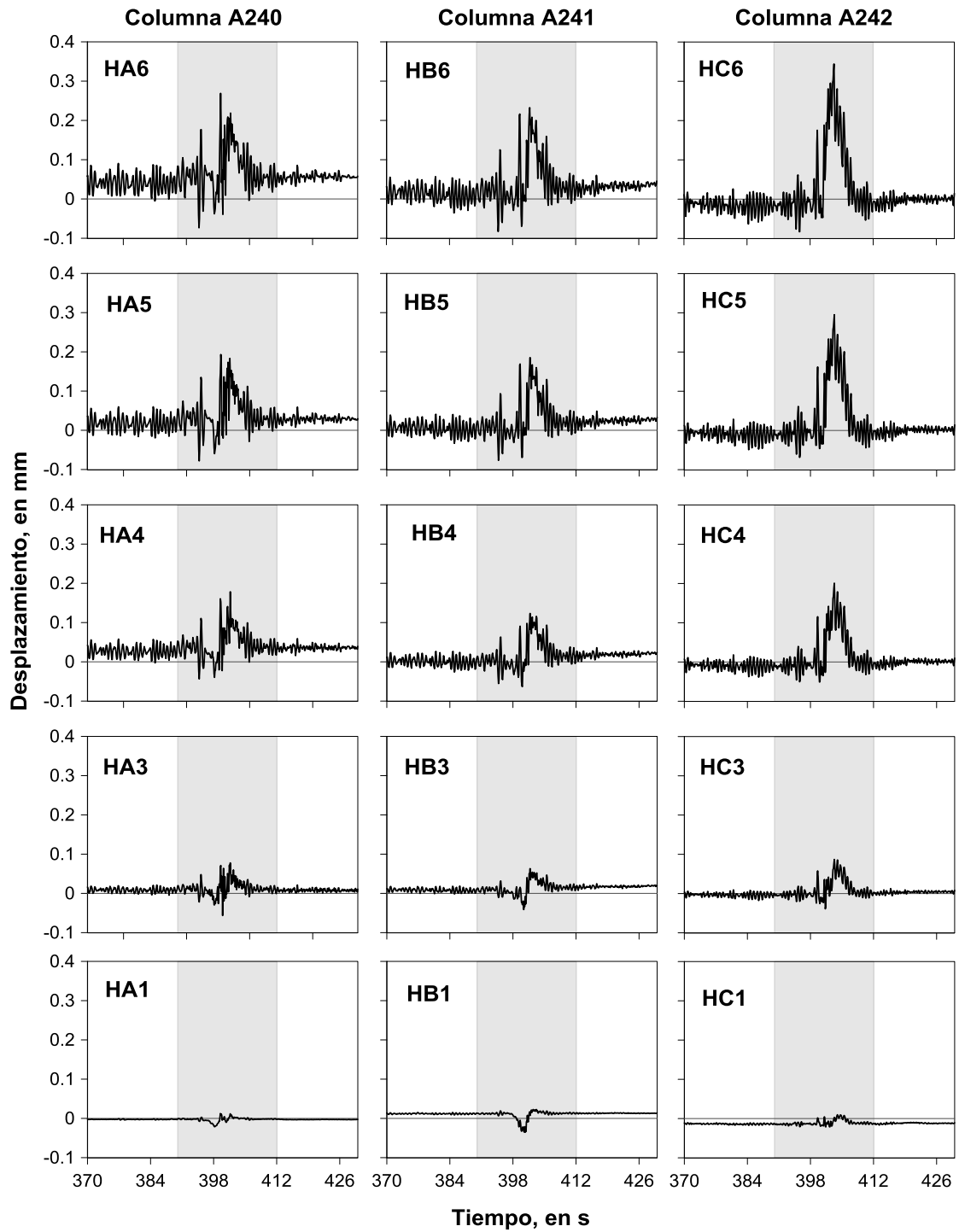


Figura 3.5 – Intervalo de medición para una prueba dinámica

### **Cálculo del factor de amplificación dinámico**

El factor de amplificación dinámico (FAD), es la relación que existe entre la respuesta dinámica, de la estructura, con la respuesta estática.

Esta relación se representa en la ecuación 3.2 (Paultre *et al.*, 1992), en la cual, las respuestas de la estructura deben ser generadas por las mismas cargas.

$$FAD = \frac{R_D}{R_E} \quad [3.2]$$

Donde:

- FAD - Factor de amplificación dinámico
- $R_D$  - Máxima respuesta dinámica
- $R_E$  - Máxima respuesta estática

Para obtener los valores de la respuesta estática se pueden utilizar dos procedimientos:

- 1) El primero consiste en utilizar los valores de la respuesta obtenida por una carga de una prueba estática, similar a la de la prueba dinámica. Para el caso en estudio los arreglos estáticos y dinámicos se asemejan en la posición de los camiones y en su peso.
- 2) El segundo procedimiento consiste en realizar un filtrado de la señal de las pruebas dinámicas y así eliminar los efectos dinámicos. Para lograr esto, se utilizó un filtrado Butterworth paso bajas con una frecuencia de corte de 0.5 Hz.

El análisis es realizado dentro de un intervalo de valores de la respuesta dinámica, calculando el valor dinámico con su correspondiente valor filtrado. El FAD es el máximo encontrado dentro de dicho intervalo.

El intervalo de análisis del FAD es determinado con el criterio siguiente:

- a) Abarcar un número de puntos adelante y atrás del valor máximo de la respuesta dinámica filtrada.
- b) Contenerse dentro del efecto dinámico registrado por el sensor.
- c) Debe de contener los valores máximos absolutos de la respuesta dinámica.

## **3.4. Giros y flechas**

### **Cálculo del giro**

El giro es calculado de forma directa con los inclinómetros y de forma indirecta con las mediciones de los potenciómetros. Estos últimos fueron colocados en pares a distintas alturas de las columnas (Subcapítulo 2.3), cada instrumento tiene una altura de 50 cm (Figura 3.6a).

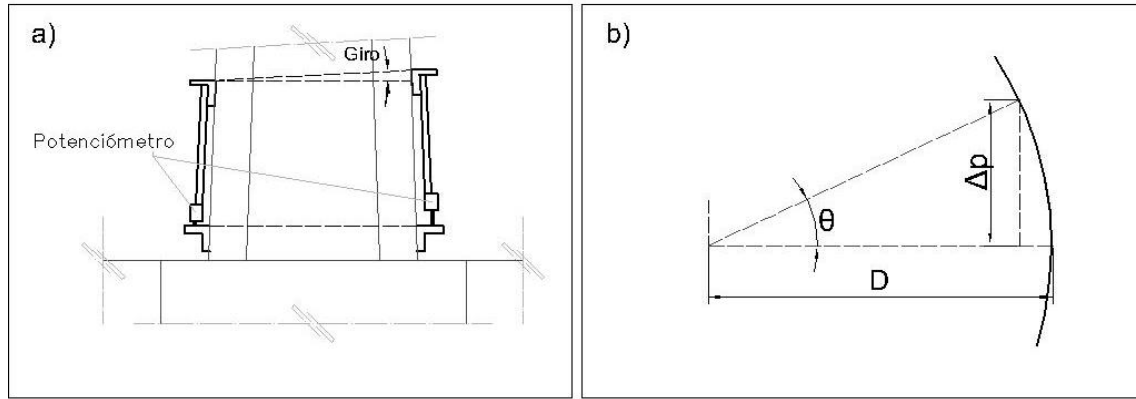


Figura 3.6 – Giro. a) Diagrama del giro obtenido por dos potenciómetros opuestos en una sección de columna. b) Representación geométrica del giro

Lo obtenido del cálculo, corresponde al giro relativo de la sección transversal correspondiente a la parte superior de cada par de potenciómetros; respecto a la base de la columna, son secciones a 0.5, 1.0 y 1.5 m. El giro absoluto (relativo al giro de la zapata) es el valor calculado, más el giro absoluto de la sección inferior.

El giro es calculado como el seno inverso de la relación de la diferencia de valores en los potenciómetros, entre la separación entre instrumentos (Ecuación 3.3). Debido a los valores tan pequeños que se manejan, puede no calcularse el seno inverso; el error obtenido se encuentra muy por debajo del 0.001%.

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{p_2 - p_1}{D} \right) \quad [3.3]$$

Donde:

- $\theta$  - Giro, en rad
- $p_i$  - Medición del potenciómetro  $i$ , en mm
- $D$  - Separación entre instrumentos, en mm.

### Cálculo de la flecha

La normativa utilizada para la determinación de los límites permisibles de la flecha (AASHTO, 2007), estipula que ante la ausencia de algún criterio para delimitar las deflexiones, los siguientes límites pueden ser considerados:

- Para cargas vehiculares.

$$\delta_p = L_1/800 \quad [3.4]$$

- Para cargas vehiculares en ménsula

$$\delta_p = L_2/300 \quad [3.5]$$

Donde:

- $\delta_p$  - Flecha máxima permisible.
- $L_1$  - Longitud entre apoyos de la viga o cubierta.
- $L_2$  - Longitud del apoyo al extremo de la ménsula.

Las longitudes se determinaron con base en el proyecto geométrico de la estructura; los puntos de medición se muestran en las figuras 3.7 y 3.8, respectivamente. Los resultados de las deflexiones permisibles se muestran en la tabla 3.1; estas corresponden al valor máximo al centro del claro, para la trabe, y al extremo sin apoyo, para el ala.

La comparación con los valores permisibles requiere el cálculo de la flecha al centro del claro de la trabe y al extremo del ala; para ello es necesario conocer los desplazamientos en dichas posiciones. Aunque las mediciones realizadas son próximas a los puntos, para una mejor estimación, se usa una regresión lineal entre los pares de instrumentos localizados en cada eje y así obtener el valor del desplazamiento al centro de la trabe y al extremo del ala lo que permite calcular la flecha en dichas zonas y poder compararla con los valores permisibles.

Tabla 3.1 . Flecha permisibles

	Longitud total, en m	Ecuación utilizada	Deflexión permisible, en mm
Trabe	32.5	1	40.6
Tableta	3.82	2	12.7

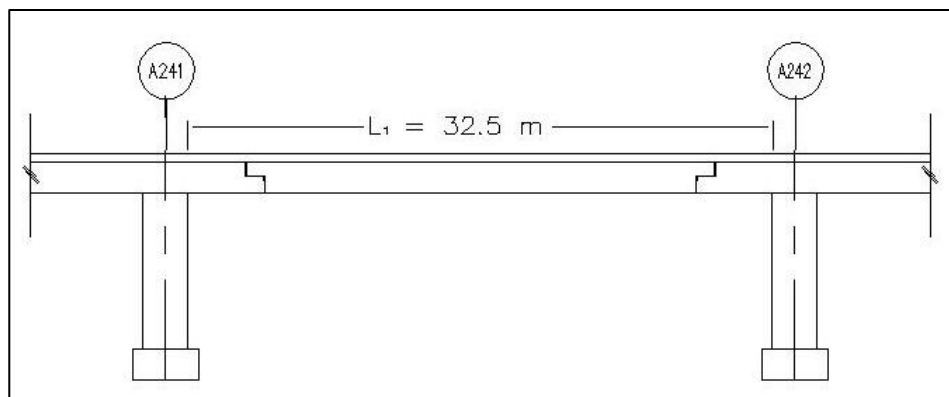


Figura 3.7 – Longitud  $L_1$  entre apoyos para la trabe CCL A241-A242

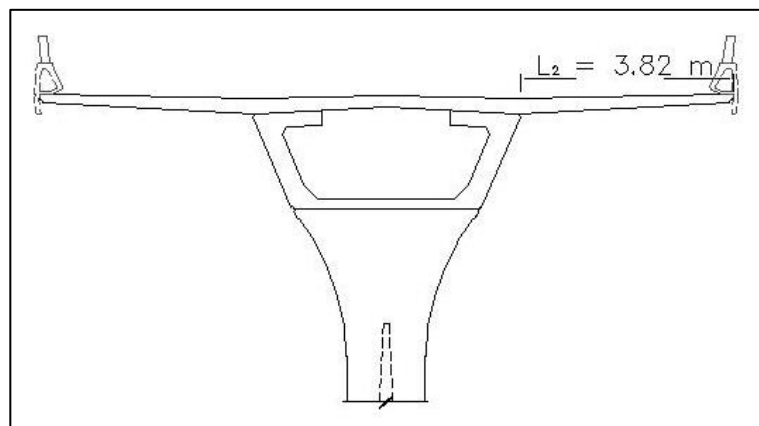


Figura 3.8 - Longitud  $L_2$  del ala para las tabletas entre los ejes A241 a A242



## **Capítulo 4.**

### **Resultados y Análisis de las Pruebas Estáticas y Dinámicas**

---

#### **4.1. Pruebas estáticas**

El desarrollo de las diez pruebas se realizó sin detener al sistema de captura, debido a que el día del experimento se tuvo acceso a la vía durante menor tiempo del inicialmente convenido. El procedimiento fue posicionar cada arreglo de camiones y al término del décimo retirarlos. Por consiguiente, en una misma señal de datos se puede observar, a lo largo del registro, las 10 pruebas estáticas.

Al inicio de las pruebas, los camiones debieron de ser alineados, al centro de la vía, tres marcos al sur del instrumentado. Durante la realización de las pruebas, los camiones que no participaban en el arreglo en desarrollo debieron regresar a la zona del posicionamiento inicial.

Durante el procesamiento de las señales se observó que al final éstas no regresaba al estado sin carga. Debido a esto, la función para la corrección por deriva (Capítulo 3) utiliza el segundo punto de referencia en el tiempo 3100 s, en un intervalo de condición sin carga. Con la información recabada en campo (bitácoras, registros fotográficos), se determinó que al detener el registro de los instrumentos, algunos camiones no habían salido de la zona en estudio por estar preparándose para las pruebas dinámicas.

##### **4.1.1. Intervalos de medición**

Con base en la metodología expuesta, se realizó la selección de los intervalos de medición utilizados para el procesamiento y análisis de datos. En la tabla 4.1 se presentan dichos intervalos referenciados a los tiempos de la bitácora de las pruebas. De la figura 4.1 a la 4.6 se exhiben las historias de las señales registradas para las PE de la instrumentación horizontal y vertical, en ellas se indican los intervalos de medición elegidos, y en el apéndice A para la demás instrumentación.

Tabla 4.1 – Bitácora de las pruebas estáticas junto con los intervalos de medición

Evento	Tiempo, en s		Intervalo de medición, en s	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin
<b>Pruebas</b>	0	7714		
PE1	134	212	179	202
Golpe sensor V03	780	783		
PE2	880	979	954	979
PE3	1295	1498	1346	1389
PE4	1556	1782	1610	1642
PE5	1860	2514	1890	1912
PE6	2594	2828	2721	2789
Descarga	2852	2972		
PE7	3944	4614	4300	4336
PE8	4780	5045	4906	4933
Descarga	5241	5480		
Salto en Señales	5301.2			
PE9	6097	6351	6166	6216
PE10	6580	7234	6995	7101
Descarga	7535	7595		



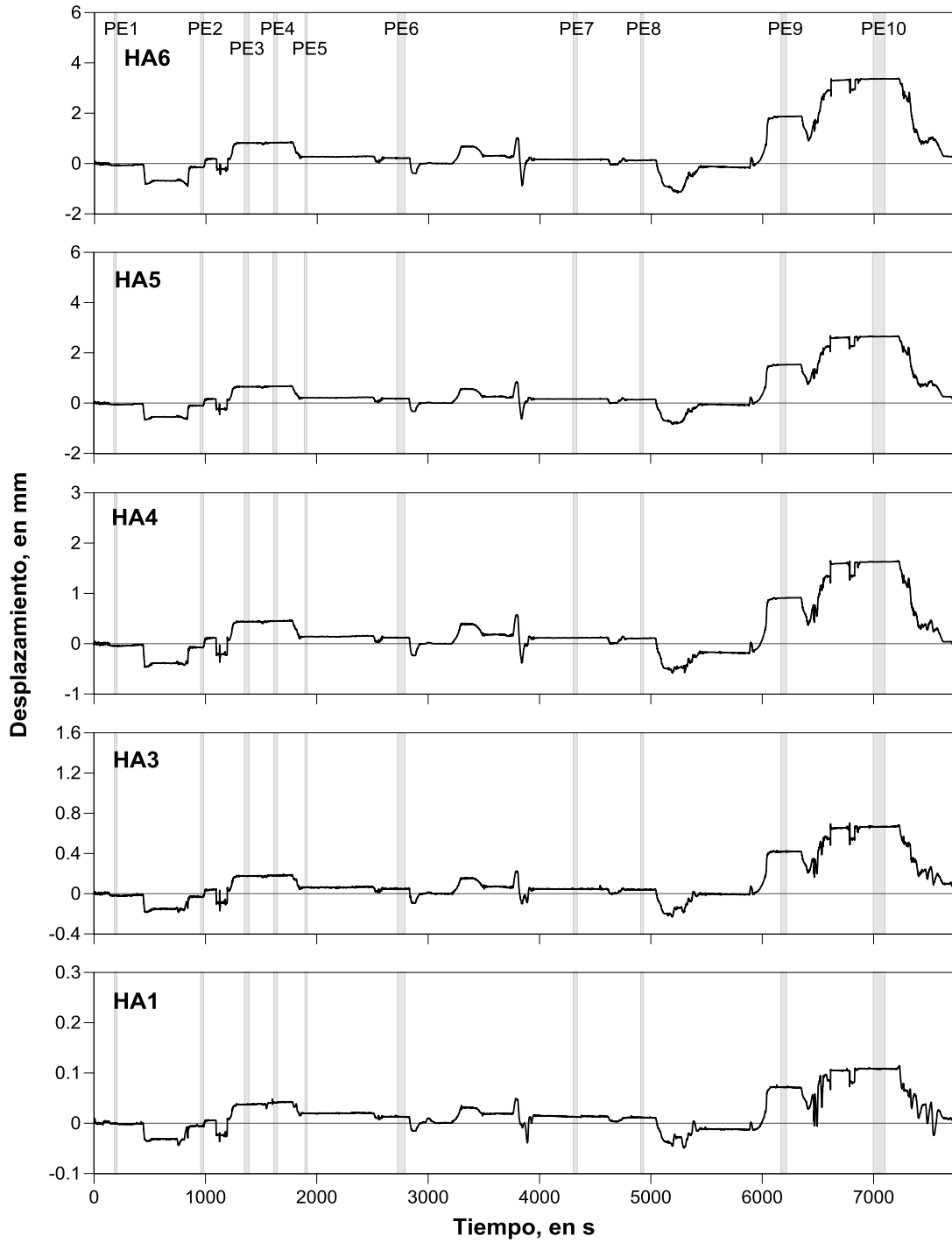


Figura 4.1 – Historia de las señales de los instrumentos horizontales en la columna A240 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

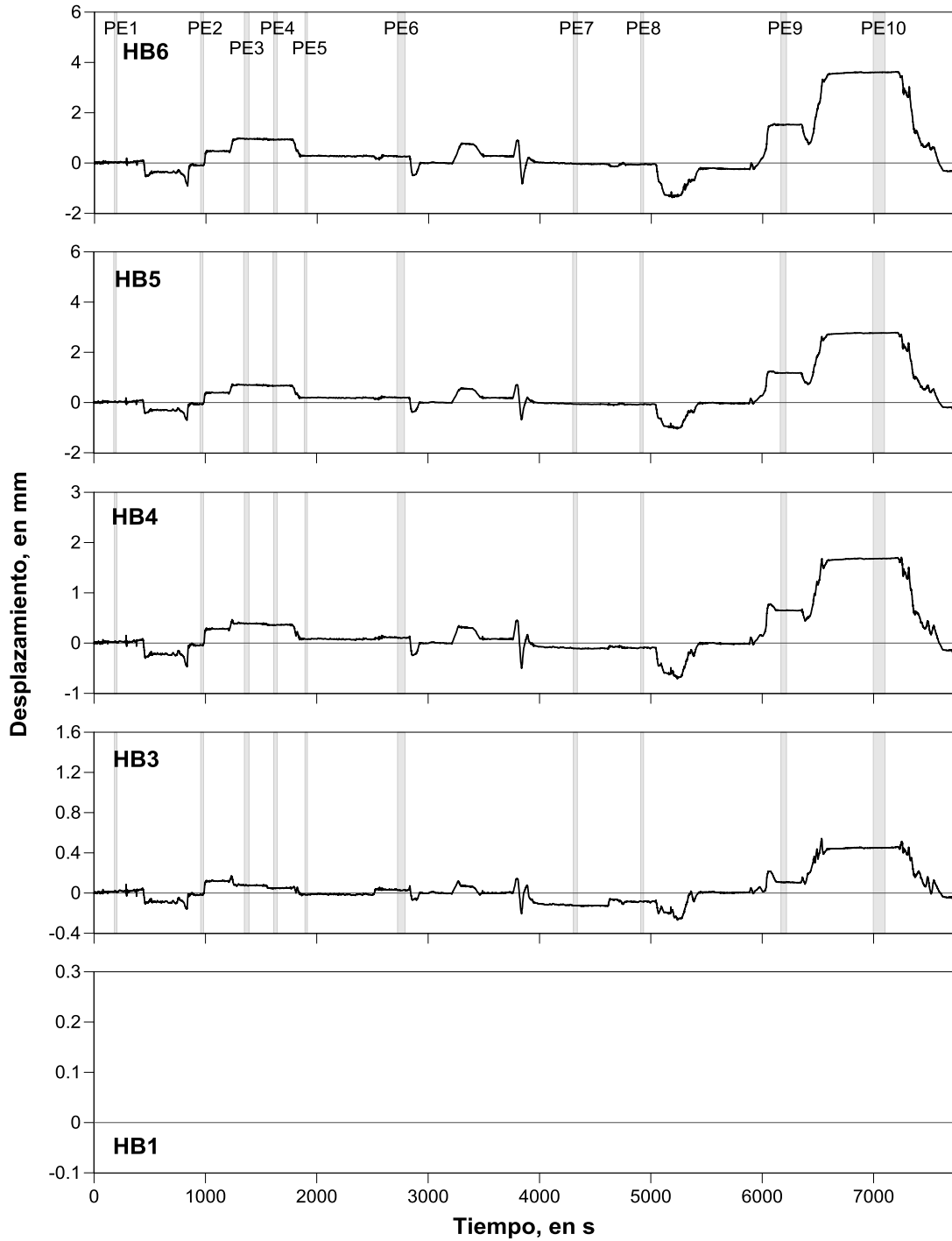


Figura 4.2 - Historia de las señales de los instrumentos horizontales en la columna A241 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

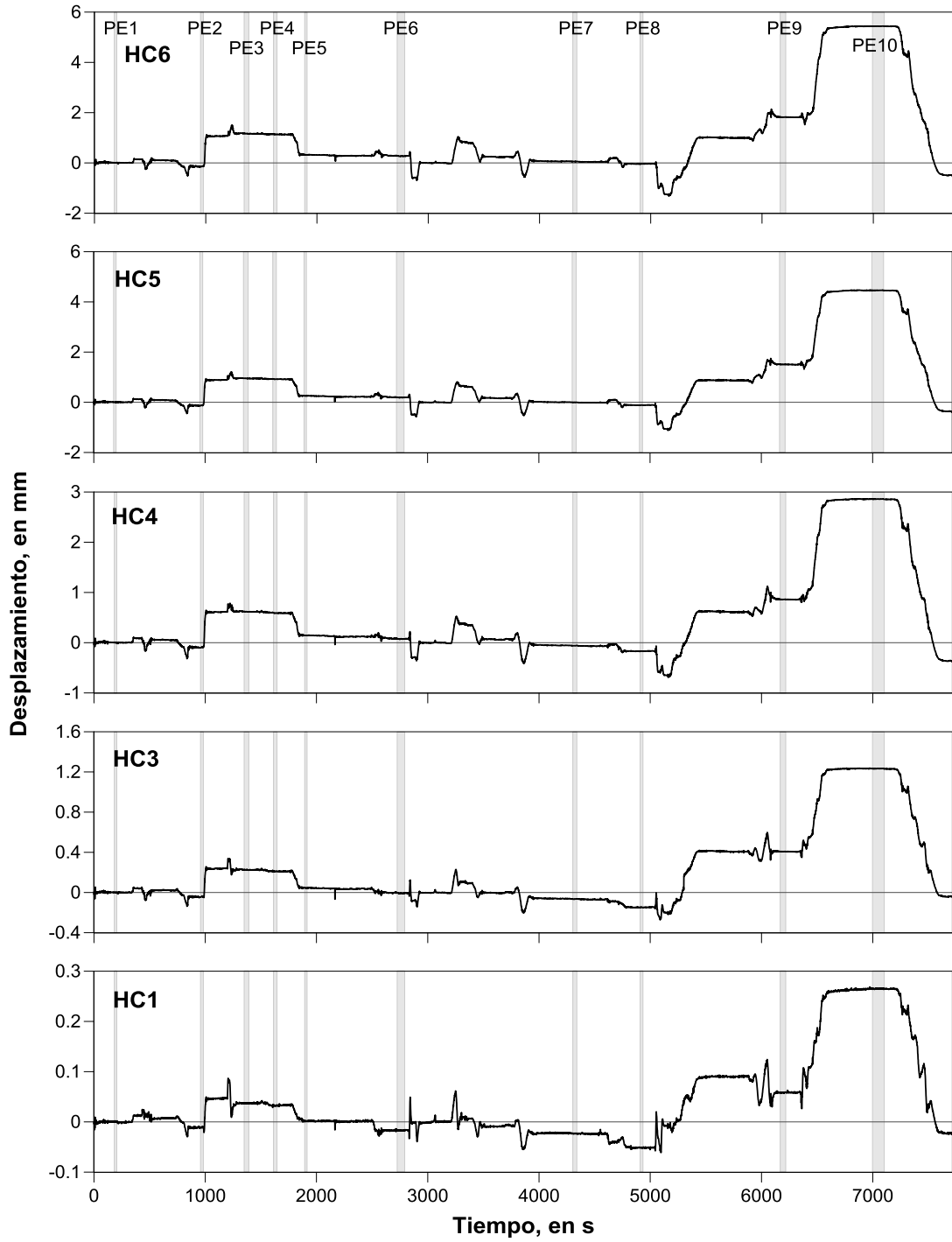


Figura 4.3 - Historia de las señales de los instrumentos horizontales en la columna A242 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

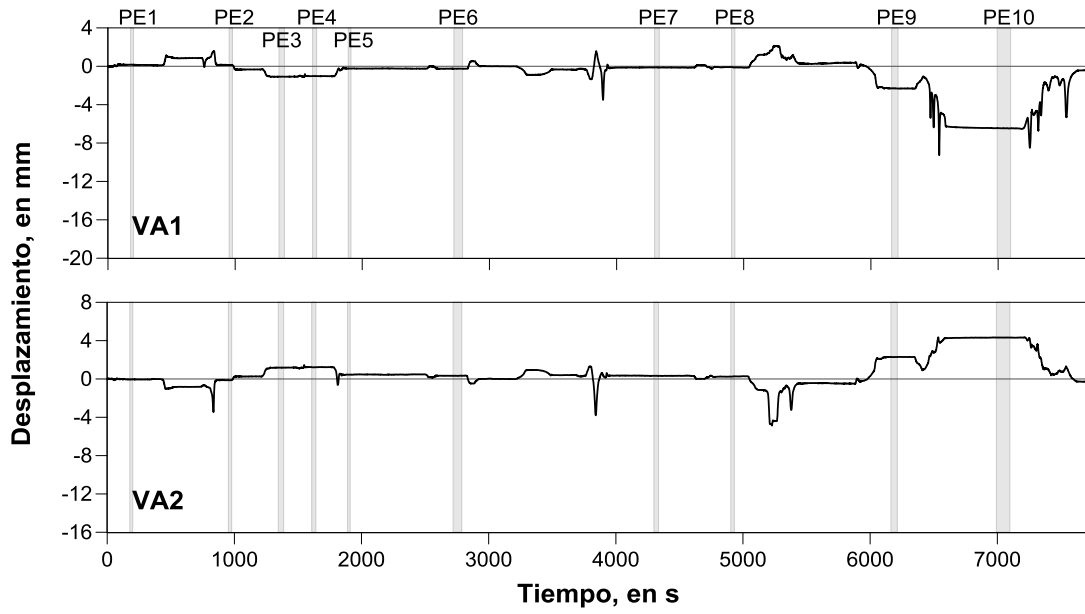


Figura 4.4 - Historia de las señales de los instrumentos verticales en la columna A240 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

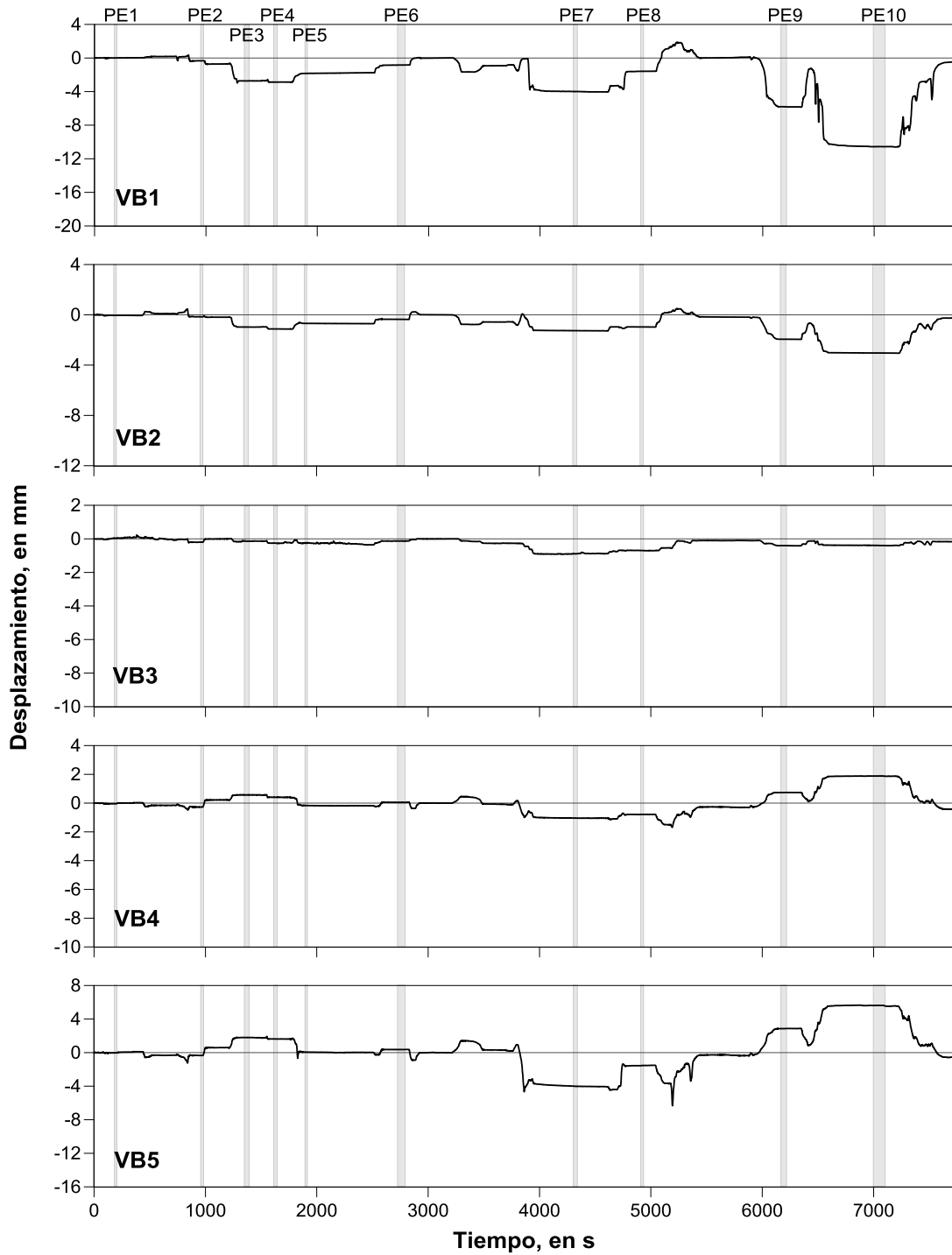


Figura 4.5 - Historia de las señales de los instrumentos verticales en la columna A241 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

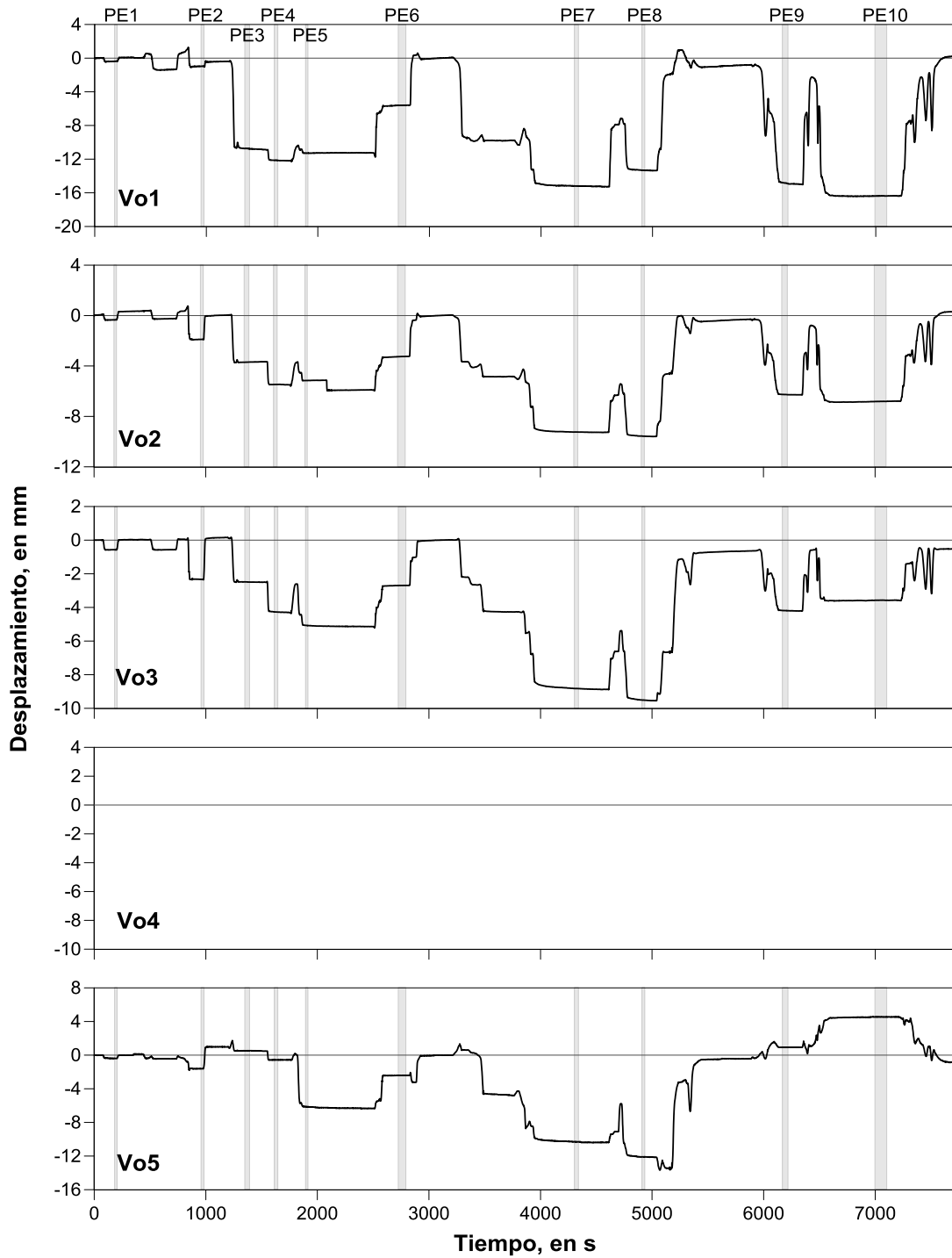


Figura 4.6 - Historia de las señales de los instrumentos verticales en la columna A242 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

### 4.1.2. Perfiles de desplazamiento

La respuesta horizontal se obtuvo de la instrumentación de las columnas A240, A241 y A242. Los aparatos de medición horizontales se colocaron en el lado este de las columnas, perpendiculares al sentido de la vía. Los desplazamientos hacia el oeste de la columna son positivos.

Las tablas 4.2 y 4.3 presentan los valores de la respuesta de las columnas ante los desplazamientos causados por la correspondiente prueba estática. En el apéndice B, de las figuras B.1 a la B.4 se muestran los perfiles de las columnas ante los desplazamientos ocasionados por las cargas de las PE.

La respuesta vertical se obtuvo de la instrumentación de las trabes en los ejes A240, A241 y al centro del claro entre los ejes A241 y A242. Los aparatos de medición se colocaron bajo las trabes, en grupos divididos por ejes y alineados perpendicularmente al sentido de la vía. Un desplazamiento positivo indica una elevación respecto al suelo.

Las tablas 4.4 y 4.5 presentan los valores de las trabes ante los desplazamientos causados por las correspondientes pruebas estáticas. En el apéndice B, de las figuras B.5 a B.8 se muestran los perfiles de las trabes ante los desplazamientos ocasionados por las cargas de las PE.

Tabla 4.2 – Desplazamiento horizontal, en mm, de las columnas instrumentadas para las pruebas estáticas PE1 a PE6

Columna	Altura, en m	Sensor	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
A240	9.3	HA6	-0.07	-0.15	0.81	0.83	0.27	0.21
	8.3	HA5	-0.06	-0.11	0.65	0.66	0.21	0.17
	6.8	HA4	-0.04	-0.08	0.44	0.45	0.14	0.12
	3.8	HA3	-0.02	-0.03	0.17	0.18	0.06	0.05
	0.4	HA1	0.00	-0.01	0.04	0.04	0.02	0.01
A241	9.4	HB6	0.03	-0.09	0.96	0.93	0.28	0.26
	8.4	HB5	0.03	-0.06	0.70	0.67	0.19	0.19
	6.9	HB4	0.03	-0.04	0.39	0.36	0.08	0.10
	3.9	HB3	0.02	-0.02	0.08	0.05	-0.02	0.03
A242	9.7	HC6	0.01	-0.14	1.17	1.14	0.32	0.27
	8.7	HC5	0.01	-0.13	0.95	0.92	0.26	0.19
	7.2	HC4	0.00	-0.09	0.62	0.59	0.15	0.07
	4.2	HC3	0.00	-0.04	0.23	0.21	0.05	-0.01
	0.8	HC1	0.00	-0.01	0.04	0.03	0.00	-0.02

Tabla 4.3 - Desplazamiento horizontal, en mm, de las columnas instrumentadas para las pruebas estáticas PE7 a PE10

Columna	Altura, en m	Sensor	PE7	PE8	PE9	PE10
A240	9.3	HA6	0.15	0.13	1.87	3.36
	8.3	HA5	0.16	0.14	1.52	2.65
	6.8	HA4	0.11	0.11	0.91	1.63
	3.8	HA3	0.05	0.04	0.42	0.67
	0.4	HA1	0.01	0.01	0.07	0.11
A241	9.4	HB6	-0.03	-0.05	1.52	3.61
	8.4	HB5	-0.06	-0.07	1.18	2.77
	6.9	HB4	-0.11	-0.09	0.65	1.68
	3.9	HB3	-0.12	-0.08	0.11	0.45
A242	9.7	HC6	0.05	-0.04	1.82	5.44
	8.7	HC5	0.00	-0.11	1.51	4.46
	7.2	HC4	-0.06	-0.17	0.86	2.86
	4.2	HC3	-0.07	-0.15	0.41	1.23
	0.8	HC1	-0.02	-0.05	0.06	0.27

Tabla 4.4 - Desplazamiento vertical, en mm, de los ejes instrumentados para las pruebas estáticas PE1 A PE6

Eje	Altura, en m	Sensor	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6
A240	6.0	VA1	0.16	0.14	-1.09	-1.02	-0.24	-0.25
	-6.0	VA2	-0.04	-0.13	1.18	1.22	0.45	0.33
A241	5.9	VB1	0.00	-0.33	-2.73	-2.87	-1.83	-0.84
	2.3	VB2	-0.05	-0.16	-0.97	-1.12	-0.68	-0.36
	0.0	VB3	0.04	-0.20	-0.13	-0.26	-0.25	-0.13
	-2.5	VB4	-0.04	-0.27	0.57	0.40	-0.17	0.05
	-6.0	VB5	-0.03	-0.34	1.80	1.63	0.06	0.37
Centro del claro	6.0	Vo1	-0.36	-0.96	-10.75	-12.14	-11.28	-5.60
	2.5	Vo2	-0.34	-1.89	-3.70	-5.47	-5.16	-3.25
	0.0	Vo3	-0.57	-2.34	-2.49	-4.27	-5.07	-2.69
	-5.9	Vo5	-0.39	-1.62	0.53	-0.56	-6.13	-2.42



Tabla 4.5 - Desplazamiento vertical, en mm, de los ejes instrumentados para las pruebas estáticas PE7 a PE10

Eje	Altura, en m	Sensor	PE7	PE8	PE9	PE10
A-240	6.0	VA1	-0.12	-0.11	-2.31	-6.46
	-6.0	VA2	0.33	0.26	2.29	4.32
A-241	5.9	VB1	-3.99	-1.58	-5.80	-10.56
	2.3	VB2	-1.26	-0.97	-1.94	-3.04
	0.0	VB3	-0.89	-0.69	-0.40	-0.39
	-2.5	VB4	-1.04	-0.79	0.74	1.88
	-6.0	VB5	-4.01	-1.54	2.86	5.62
Centro del claro	6.0	Vo1	-15.19	-13.33	-14.85	-16.37
	2.5	Vo2	-9.24	-9.57	-6.27	-6.81
	0.0	Vo3	-8.82	-9.51	-4.19	-3.57
	-5.9	Vo5	-10.31	-12.10	0.93	4.55

Para el caso de la instrumentación horizontal el desplazamiento máximo se buscó en el punto de medición más alto, se encontró en la columna A242 para la PE10, este desplazamiento fue provocado al colocar todos los camiones alineados en el carril lateral al oeste de la vía (Figura 4.7). Esta es una respuesta distinta a la obtenida con la PE8, la cual consiste en el acomodo de los seis camiones sobre el claro instrumentado. La PE8 fue la que provoco el mayor desplazamiento en el punto de medición Vo3, al centro del claro (Figura 4.8).

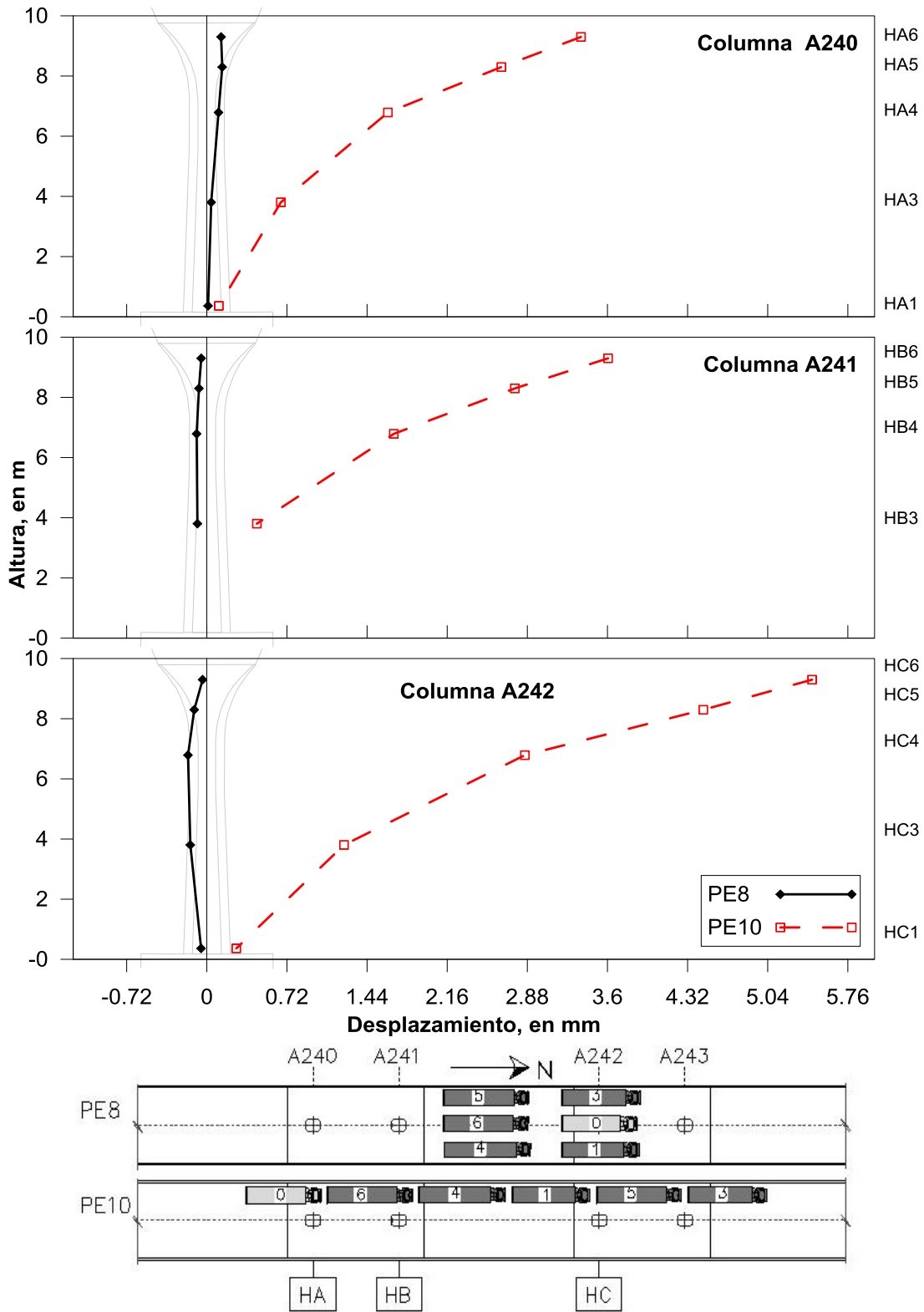


Figura 4.7 – Comparación del desplazamiento máximo obtenido horizontalmente (PE10), con el máximo obtenido verticalmente (PE8)

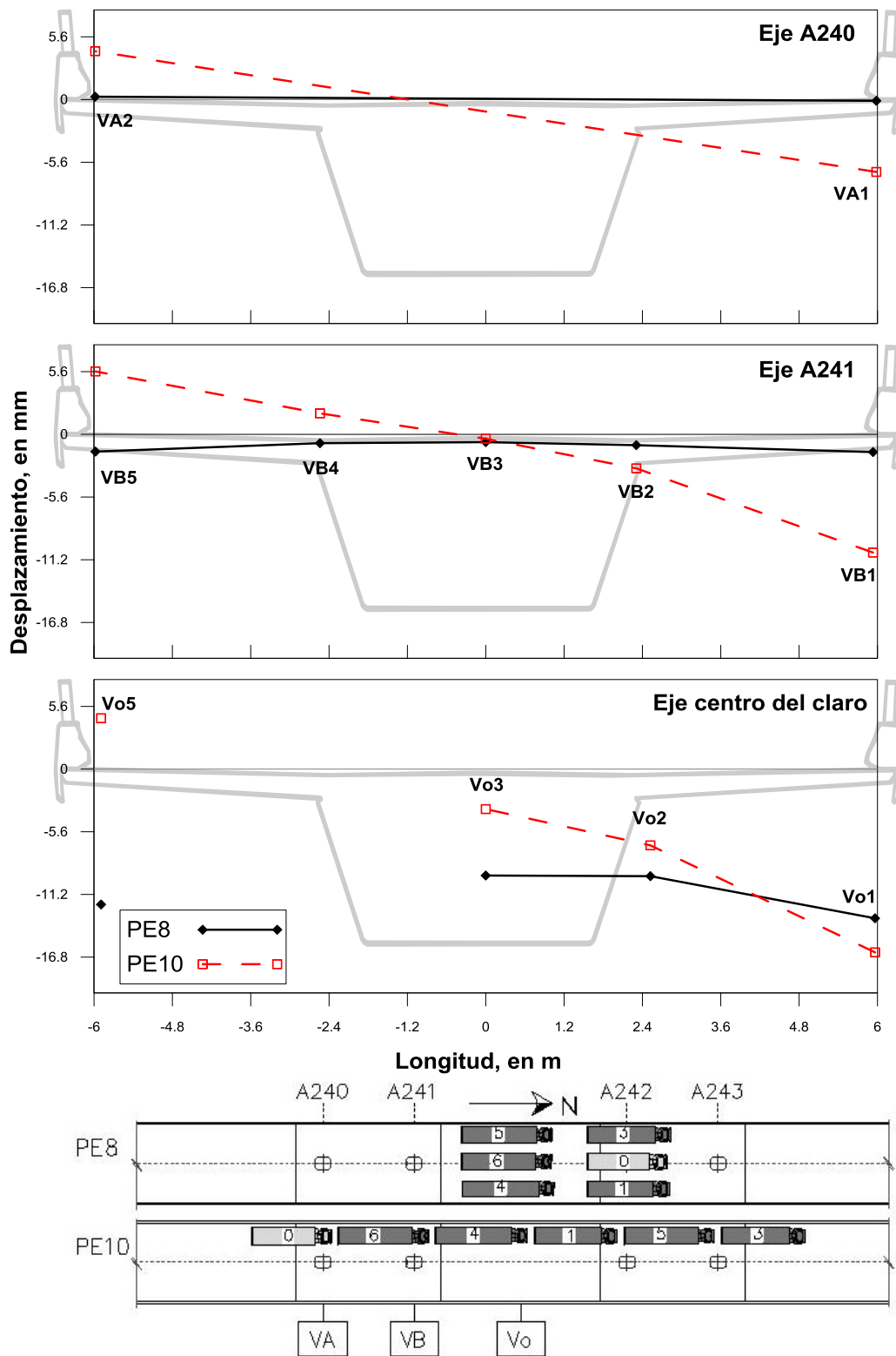


Figura 4.8 - Comparación del desplazamiento máximo obtenido verticalmente (PE8), con el desplazamiento máximo obtenido horizontalmente (PE10)

En el caso de las mediciones obtenidas con los potenciómetros, el giro se obtuvo de forma indirecta para la base de la columna A241. Los resultados corresponden a los instrumentos del pB1 al pB6. El giro de la columna, relativo al de la zapata, se presenta en la tabla 4.6. La figura B.9 muestra las gráficas de los giros en la base de la columna A241.

Un valor positivo indica un giro, alrededor del eje longitudinal de la vía dirección norte y en sentido opuesto a las manecillas de un reloj.

Las mediciones de los giros con los inclinómetros en la columna y zapata son respecto al plano horizontal. Sólo se tiene el registro de cuatro sensores de temperatura de los inclinómetros, el TiB1, el TiB3, el TiC1 y TiC2. Por lo que para realizar la corrección por temperatura, cada instrumento se corrigió con el sensor más cercano de los cuatro que sí capturaron datos. Los resultados se presentan en las tablas 4.7 y 4.8 En el apéndice B, de las figuras B.10 a la B.13 se muestran los perfiles de los giros de las columnas y zapatas, ante las cargas de las pruebas estáticas.

Tabla 4.6 – Giros, en rad, en la base de la columna A241 para las pruebas estáticas

Altura	0.5 m	1.0 m	1.5 m
PE	pB1-pB2	pB3-pB4	pB5-pB6
1	6.3E-07	1.1E-06	1.3E-06
2	-9.7E-07	-2.5E-06	-3.1E-06
3	4.3E-06	8.8E-06	1.3E-05
4	4.4E-06	8.2E-06	1.2E-05
5	1.4E-06	2.1E-06	4.0E-06
6	2.4E-06	3.2E-06	4.4E-06
7	3.3E-07	-2.8E-06	-1.2E-06
8	2.0E-06	1.8E-06	2.9E-06
9	1.4E-05	2.3E-05	3.4E-05
10	3.0E-05	4.8E-05	7.1E-05

Tabla 4.7 – Giros, en rad, de los inclinómetros para las pruebas estáticas PE1 a PE6

Columna	Altura, en m	Sensor	PE1			PE2			PE3			PE4			PE5			PE6											
			PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6	PE1	PE2	PE3	PE4	PE5	PE6									
A240	0.53	IAL2	1.3E-6	-8.0E-6	2.2E-5	2.3E-5	5.1E-6	7.6E-6	1.7E-4	5.3E-5	5.0E-5	1.8E-5	7.4E-6	2.0E-5	1.9E-5	2.2E-5	3.3E-5	2.6E-4	8.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5	3.4E-4	1.2E-4	1.5E-4
	9.45	IAL1	-6.7E-6	-2.3E-5	1.7E-4	1.7E-4	5.3E-5	5.0E-5	-9.0E-7	-6.5E-6	1.2E-5	1.8E-5	7.4E-6	2.0E-5	1.9E-5	2.2E-5	3.3E-5	2.6E-4	8.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5	3.4E-4	1.2E-4	1.5E-4
A241	0.00	IBL3	-9.0E-7	-6.5E-6	1.2E-5	1.8E-5	7.4E-6	2.0E-5	3.0E-6	8.6E-6	8.0E-6	1.9E-5	2.2E-5	3.3E-5	2.6E-4	8.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5
	0.53	IBL2	3.0E-6	8.6E-6	8.0E-6	1.9E-5	2.2E-5	3.3E-5	-6.1E-6	-3.2E-5	2.6E-4	2.6E-4	8.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5
	9.45	IBL1	-6.1E-6	-3.2E-5	2.6E-4	2.6E-4	8.9E-5	8.0E-5	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5
A242	0.00	ICL3	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	-9.5E-6	-3.5E-5	2.1E-4	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5	3.4E-4	1.2E-4	1.5E-4	-8.8E-6	-3.2E-5	3.3E-4	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5
	0.53	ICL2	-9.5E-6	-3.5E-5	2.1E-4	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5	-8.8E-6	-3.2E-5	3.3E-4	3.4E-4	1.2E-4	1.5E-4	-8.8E-6	-3.2E-5	3.3E-4	-8.8E-6	-3.2E-5	3.3E-4	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5
	9.45	ICL1	-8.8E-6	-3.2E-5	3.3E-4	3.4E-4	1.2E-4	1.5E-4	-8.8E-6	-3.2E-5	3.3E-4	3.4E-4	1.2E-4	1.5E-4	-8.8E-6	-3.2E-5	3.3E-4	-8.8E-6	-3.2E-5	3.3E-4	1.3E-5	-2.9E-5	8.0E-5	8.7E-5	5.3E-5	5.7E-5	2.1E-4	6.7E-5	8.6E-5

Tabla 4.8 – Giros, en rad, de los inclinómetros para las pruebas estáticas PE7 a PE10

Columna	Altura, en m	Sensor	PE7	PE8	PE9	PE10
A240	0.53	IAL2	3.7E-6	-5.1E-6	4.8E-5	8.8E-5
	9.45	IAL1	1.9E-5	1.0E-5	3.6E-4	6.8E-4
A241	0.00	IBL3	1.3E-5	1.3E-5	1.2E-5	5.7E-5
	0.53	IBL2	4.4E-5	3.7E-5	-1.4E-5	5.5E-6
	9.45	IBL1	4.4E-5	2.6E-5	4.8E-4	9.2E-4
A242	0.00	ICL3	1.1E-5	4.1E-5	-8.5E-5	-6.5E-5
	0.53	ICL2	4.1E-5	6.2E-5	3.2E-4	8.5E-4
	9.45	ICL1	1.0E-4	1.1E-4	6.1E-4	1.1E-3

Las pruebas PE9 y PE10 generaron los mayores giros, tanto para los potenciómetros como para los inclinómetros. Dichos arreglos corresponden al posicionamiento de los camiones al oeste de la vía en el carril lateral. Para la PE9 se posicionaron dos camiones y para PE10 los seis camiones.

#### 4.1.3. Análisis de las flechas de la trabe

Con los valores de las tablas 4.4 y 4.5 se determinaron las flechas en la trabe (Tablas 4.9 y 4.1), las cuales se comparan con los límites permisibles, presentándose el porcentaje del valor alcanzado. Los valores negativos de las flechas representan una elevación respecto al terreno.

Tabla 4.9 – Comparación entre la flecha en la trabe, en mm, y el valor permisible (40.6 mm)

Prueba	VB1 - Vo1	%VP*	VB3 - Vo3	%VP*	VB5 - Vo5	%VP*
PE1	0.37	0.9%	0.62	1.5%	0.36	0.9%
PE2	0.65	1.6%	2.18	5.4%	1.28	3.1%
PE3	8.20	20.2%	2.40	5.9%	1.27	3.1%
PE4	9.48	23.3%	4.10	10.1%	2.19	5.4%
PE5	9.66	23.8%	4.92	12.1%	6.19	15.2%
PE6	4.87	12.0%	2.62	6.5%	2.78	6.9%
PE7	11.44	28.2%	8.11	20.0%	6.30	15.5%
PE8	12.00	29.5%	9.01	22.2%	10.56	26.0%
PE9	9.25	22.8%	3.87	9.5%	1.93	4.8%
PE10	5.95	14.6%	3.25	8.0%	1.07	2.6%

\* Porcentaje del valor permisible (%VP)

Tabla 4.10 – Comparación entre la flecha en las alas de la sección cajón, en mm, y el valor permisible (12.7 mm)

Prueba	VB2 - VB1	%VP	VB4 - VB5	%VP	Vo2 - Vo1	%VP
PE1	-0.05	-0.4%	-0.01	-0.1%	0.02	0.2%
PE2	0.18	1.4%	0.07	0.5%	-0.95	-7.5%
PE3	1.82	14.3%	-1.26	-9.9%	7.27	57.1%
PE4	1.81	14.2%	-1.25	-9.8%	6.89	54.1%
PE5	1.19	9.4%	-0.23	-1.8%	6.32	49.6%
PE6	0.50	3.9%	-0.32	-2.5%	2.42	19.0%
PE7	2.84	22.3%	3.04	23.9%	6.13	48.2%
PE8	0.64	5.0%	0.77	6.1%	3.88	30.4%
PE9	4.01	31.5%	-2.18	-17.2%	8.85	69.5%
PE10	7.80	61.3%	-3.84	-30.2%	9.86	77.4%

Ninguna flecha rebasó el valor permisible. Los casos más desfavorables para la trabe y las alas, fueron las pruebas PE8 y PE10, respectivamente, con magnitudes del 30 y el 77 % del valor permisible.

#### 4.1.4. Análisis de los desplazamientos laterales de la columna

En el caso del desplazamiento lateral de la estructura, no hay normativa específica que limite el valor hasta el cual un puente se puede desplazar en el sentido lateral.

El Gobierno del Distrito Federal, en sus NTC-DS (2004), limita el desplazamiento lateral de pisos consecutivos de edificios a 0.012 veces la diferencia de elevaciones, para el caso de la ausencia de elementos incapaces de soportar deformaciones laterales. Tomando como referencia dicho valor, el desplazamiento permisible en el capitel de la columna de menor tamaño sería de 117mm. Este valor es más de 20 veces mayor que el desplazamiento lateral máximo alcanzado en las pruebas estáticas, de apenas 5.44mm registrado por el instrumento HC6.

## 4.2. Pruebas dinámicas

### 4.2.1. Intervalos de medición

Con base en la metodología expuesta en el subcapítulo 3.3, se realizó la selección de los intervalos de medición que se utilizarán para el procesamiento y análisis de datos. En la tabla 4.11 se presentan dichos intervalos, en segundos, referenciados a los tiempos de la bitácora de las pruebas.

Tabla 4.11 – Intervalos de medición, en s, para el cálculo de desplazamientos máximos de las pruebas dinámicas

Prueba	Camión	Intervalos de medición, en s					
		Horizontales		Verticales		Potenciómetros	
		inicio	Fin	Inicio	Fin	Inicio	Fin
PD1	0	10.6	31.0	10.7	19.0	10.6	31.0
PD2	3	89.0	108.0	92.0	100.0	89.0	108.0
PD3	5	146.5	167.5	152.0	163.0	146.5	167.5
PD4	1	305.0	315.0	305.0	316.0	305.0	315.0
PD5	0	23.0	38.0	22.0	38.0	22.0	38.0
PD6	4	86.0	102.0	86.0	102.0	86.0	102.0
PD7	6	140.0	162.0	142.0	156.0	140.0	162.0

En el apéndice C, se presenta la historia de las señales registradas para las pruebas dinámicas, dónde se indica en sombreado los intervalos de medición en dónde se realizó la búsqueda de los valores de desplazamiento máximo.

### 4.2.2. Perfiles desplazamiento máximo

La tabla 4.12 presenta los desplazamientos máximos horizontales de la respuesta de las columnas ante las pruebas dinámicas, y en la tabla 4.13 los máximos verticales de las trabes. En el apéndice D, las figuras D.1 y D.2 muestran los perfiles de las columnas y las figuras D.3 y D.4 los perfiles de las trabes; ambos ante los desplazamientos ocasionados por las cargas de las respectivas pruebas.

La obtención de los giros, para las pruebas dinámicas, se realizó con los datos de los potenciómetros. En el caso de los inclinómetros no se obtuvieron los giros para dichas pruebas; esto debido a que no es el instrumento apropiado para medir giros ante incrementos de tiempo pequeños, cómo los registrados en las PD.

Los giros aparecen en la tabla 4.14. De la misma manera que para las pruebas estáticas, los resultados sólo se presentan para el giro de la base de la columna A241. La figura 4.9 muestra la gráfica de los giros de las pruebas dinámicas.

Tabla 4.12 – Desplazamiento horizontal, en mm, de las columnas instrumentadas para las pruebas dinámicas

Columna	Altura, en m	Sensor	(16.3 t) PD1	(64.6 t) PD2	(60.0 t) PD3	(46.3 t) PD4	(16.3 t) PD5	(60.9 t) PD6	(70.6 t) PD7
A240	9.3	HA6	0.04	0.16	-0.12	-0.11	-0.18	-	0.23
	8.3	HA5	0.03	0.13	-0.10	-0.10	-0.18	-	0.20
	6.8	HA4	0.02	0.09	-0.07	-0.07	-0.15	-	0.11
	3.8	HA3	0.01	0.04	-0.03	-0.03	-0.02	-	0.04
	0.4	HA1	0.00	0.01	-0.01	-0.01	0.00	-	0.01
A241	9.4	HB6	0.04	0.17	-0.14	0.10	-0.18	-0.21	0.22
	8.4	HB5	0.04	0.14	-0.10	0.08	-0.15	-0.19	0.18
	6.9	HB4	0.03	0.08	-0.08	0.05	-0.10	-0.09	0.13
	3.9	HB3	0.01	0.03	-0.02	0.02	-0.04	-0.02	0.05
A242	9.7	HC6	0.05	0.16	-0.16	-0.20	-0.36	-0.22	0.36
	8.7	HC5	0.05	0.14	-0.14	-0.17	-0.31	-0.16	0.30
	7.2	HC4	0.03	0.09	-0.11	-0.13	-0.22	-0.11	0.21
	4.2	HC3	0.01	0.04	-0.06	-0.06	-0.10	-0.07	0.09
	0.8	HC1	0.00	0.01	-0.01	-0.02	-0.03	-0.04	0.02

Tabla 4.13 – Desplazamiento vertical, en mm, de las traveses instrumentadas para las pruebas dinámicas

Eje	Longitud en m	Sensor	(16.3 t) PD1	(64.6 t) PD2	(60.0 t) PD3	(46.3 t) PD4	(16.3 t) PD5	(60.9 t) PD6	(70.6 t) PD7
A240	-6.0	VA1	0.13	0.42	0.50	0.37	0.04	0.01	0.41
	6.0	VA2	0.09	0.49	0.25	0.18	-0.18	-0.31	0.37
A241	-5.9	VB1	0.03	-0.03	0.19	-0.06	0.03	-0.04	-0.37
	-2.3	VB2	-0.01	-0.22	-0.05	-0.05	-0.07	-0.21	-0.39
	0.0	VB3	-0.06	-0.24	-0.20	-0.16	-0.12	-0.24	-0.29
	2.5	VB4	-0.08	-0.25	-0.31	-0.18	-0.13	-0.28	-0.28
	6.0	VB5	-0.09	-0.14	-0.33	-0.14	-0.13	-0.20	-0.13
Centro del claro	-5.9	Vo1	-0.63	-2.07	-1.32	-1.20	-1.31	-0.81	-3.22
	-2.5	Vo2	-0.73	-2.87	-2.24	-1.83	-1.10	-3.06	-3.94
	0.0	Vo3	-0.71	-2.70	-2.23	-1.78	-1.08	-2.95	-3.57
	5.9	Vo5	-0.57	-1.71	-1.58	-1.25	-1.37	-0.93	-2.18

Tabla 4.14 - Giros en la base de la columna A-241, en rad, para las pruebas PD1 y PD2

Columna	Altura, en m	Sensor	(16.3 t) PD1	(64.6 t) PD2	(60.0 t) PD3	(46.3 t) PD4	(16.3 t) PD5	(60.9 t) PD6	(70.6 t) PD7
A240	1.5	pB5-pB6	-9.5E-07	7.0E-06	-1.0E-06	3.3E-06	-4.1E-06	-3.8E-06	9.9E-06
	1.0	pB3-pB4	-6.3E-07	4.7E-06	-6.8E-07	2.2E-06	-2.8E-06	-2.5E-06	6.6E-06
	0.5	pB1-pB2	-3.2E-07	2.3E-06	-3.4E-07	1.1E-06	-1.4E-06	-1.3E-06	3.3E-06



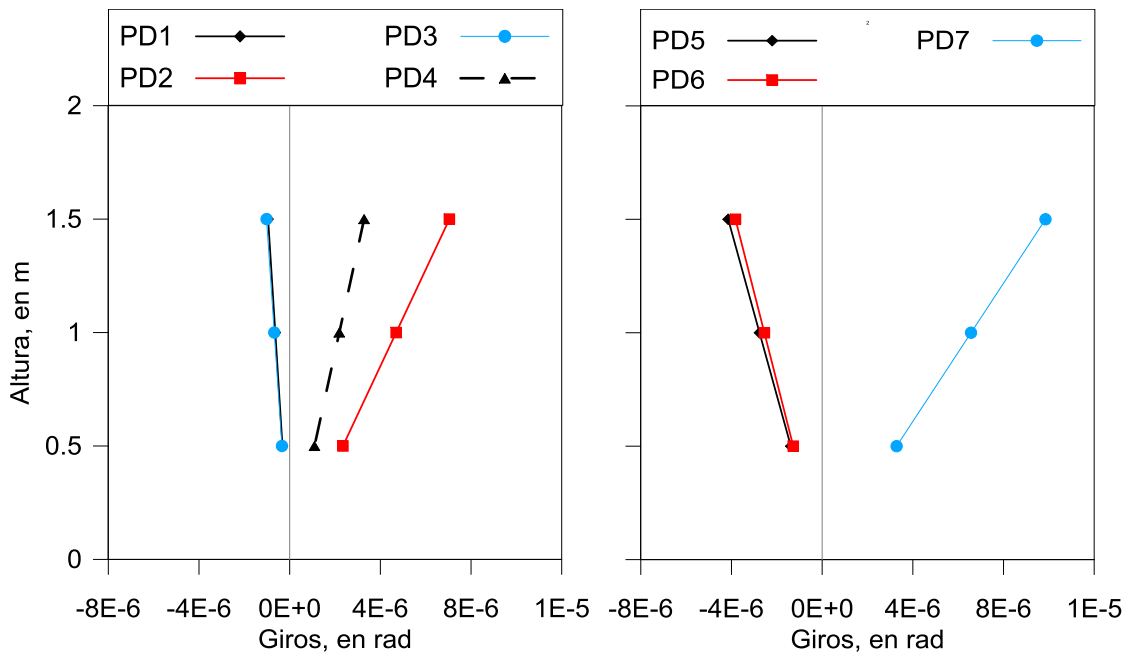


Figura 4.9 - Giros en la base de la columna A241 para las pruebas dinámicas

Los valores máximos, para todos los instrumentos, se encontraron en la prueba PD7, la cual consistió en el camión más pesado con los dos topes en la vía. En las figuras 4.10 y 4.11 se muestran los desplazamientos máximos horizontales y verticales. Se observa que los desplazamientos máximos en las columnas no tienen el mismo instante de tiempo, que los desplazamientos de las travesaños. La travesaño tiene su máxima deformación antes que la columna.

Las pruebas realizadas con los dos topes en la vía, muestran un aumento del valor de desplazamiento en todos los casos. La PD2 (segundo camión más pesado) registra los valores máximos en las pruebas dinámicas sin tope, con valores, en la mayoría de los casos, menores que los obtenidos en la PD5 (camión sin carga con tope).

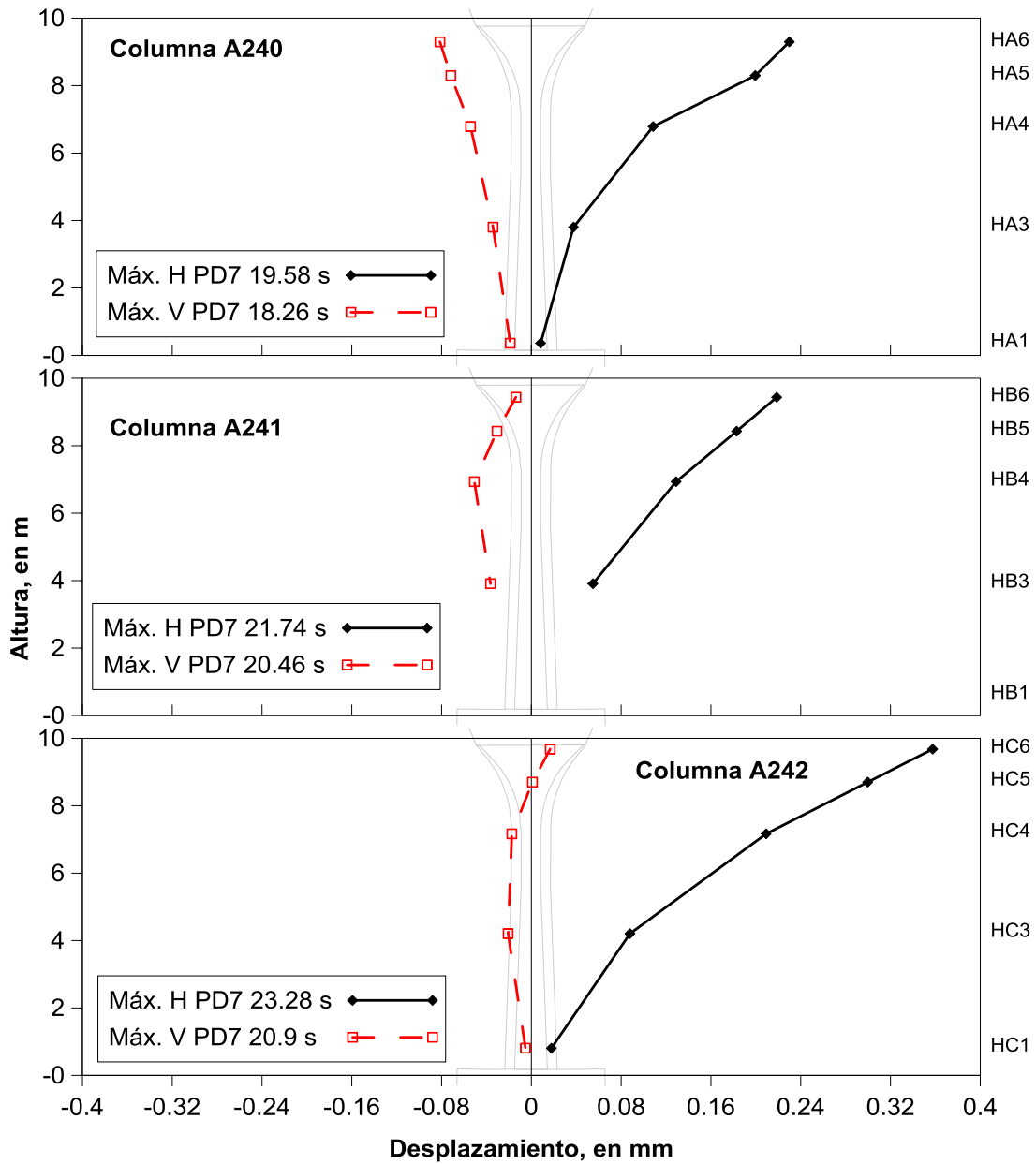


Figura 4.10 – Desplazamientos de las columnas en el tiempo del máximo horizontal y del vertical

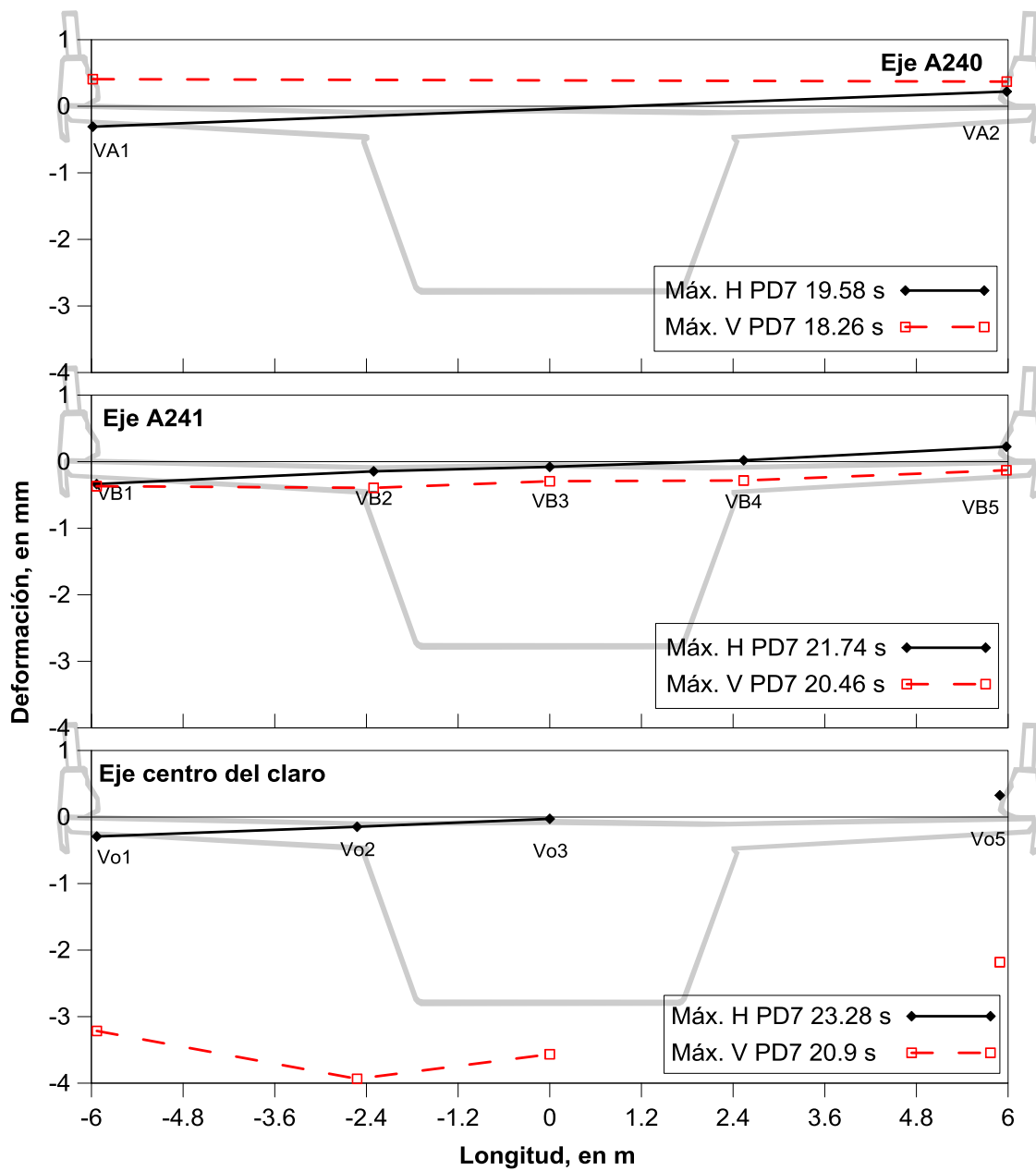


Figura 4.11 – Desplazamientos de las traves en el tiempo del máximo horizontal y vertical

### 4.2.3. Análisis del perfil de la trabe

En las tablas 4.15 y 4.16 se muestran las flechas calculadas, usando la tabla 4.13, junto con su comparación con el valor permisible. Las flechas negativas representan una elevación respecto al nivel del terreno.

Debido a que los camiones transitaron al centro de la vía, sólo se pueden realizar las siguientes comparaciones PD1 vs PE1, PD2 vs PE2 y PD5 vs PE1; en todos los casos las pruebas dinámicas fueron mayores a las estáticas en un 7, 15 y 57 %, respectivamente. Aun con los aumentos en los valores, ninguna prueba dinámica excedió el valor permisible. Por la misma razón en la forma de circular los camiones, la flecha en las alas es baja.

Tabla 4.15 – Comparación entre la flecha en la trabe, en mm, y el valor permisible (40.6 mm)

Prueba	VB1 - Vo1	%VP*	VB3 - Vo3	%VP*	VB5 - Vo5	%VP*
PD1	0.67	1.64%	0.67	1.64%	0.49	1.20%
PD2	2.09	5.14%	2.51	6.19%	1.61	3.96%
PD3	1.55	3.81%	2.07	5.09%	1.28	3.15%
PD4	1.17	2.87%	1.66	4.08%	1.13	2.78%
PD5	1.37	3.38%	0.98	2.42%	1.27	3.12%
PD6	0.78	1.92%	2.77	6.81%	0.75	1.85%
PD7	2.91	7.16%	3.34	8.23%	2.10	5.17%

\* Porcentaje del valor permisible (%VP)

Tabla 4.16 – Comparación entre la flecha en las alas de la sección cajón, en mm, y el valor permisible (12.7 mm)

Prueba	VB2 - VB1	%VP	VB4 - VB5	%VP	Vo2 - Vo1	%VP
PD1	-0.03	-0.27%	0.01	0.09%	-0.11	-0.84%
PD2	-0.20	-1.54%	-0.12	-0.91%	-0.83	-6.49%
PD3	-0.26	-2.00%	0.02	0.16%	-0.94	-7.38%
PD4	0.01	0.05%	-0.04	-0.28%	-0.65	-5.11%
PD5	-0.11	-0.88%	0.00	0.00%	0.22	1.72%
PD6	-0.17	-1.34%	-0.09	-0.68%	-2.32	-18.20%
PD7	-0.03	-0.20%	-0.16	-1.25%	-0.74	-5.83%

\* Porcentaje del valor permisible (%VP)

#### 4.2.4. Análisis de los desplazamientos laterales de la columna

El desplazamiento lateral máximo alcanzado por las pruebas dinámicas, fue de 0.35 mm en el capitel de la columna A242. Este valor apenas representa el 0.3 % del valor limitado en las NTC-DS (2004), de 0.012 veces la altura. Las cargas de las pruebas dinámicas fueron impuestas en el carril central de la vía, por lo que no generaron grandes desplazamientos como los obtenidos en las pruebas estáticas.

#### 4.2.5. Factor de amplificación dinámico

El FAD sólo se obtuvo para los valores de máximo desplazamiento, por lo que el análisis no se realiza para algunos instrumentos ni para las pruebas con el camión menos pesado (PD1 y PD5).

Para la instrumentación vertical se utilizaron los más céntricos (V2, V3 y V4), y en el caso de la horizontal solo se tomaron en cuenta, por columna, los dos más altos (H5 y H6). El análisis de las señales se determinó con un intervalo de estudio de +/- 20 puntos respecto al valor máximo de la señal filtrada. En las tablas 4.17 y 4.18 se presentan los resultados para cada caso en cuestión.

El FAD en la trabe (Figura 4.12) permite apreciar de forma clara como el impacto, provocado por los topes colocados en la vía, aumenta el efecto dinámico; provocando que el desplazamiento sea 30 % mayor que el estático. Esto no se aprecia fácilmente en la columna (Figura 4.13) debido a la carga céntrica de los camiones.

Tanto en los desplazamientos verticales como los horizontales, en las pruebas sin impacto (PD2, PD3 y PD4), el camión más pesado causa el mayor FAD, efecto inverso en las demás pruebas, con impacto, donde es el camión menos pesado el que genera el mayor valor.

En el apéndice C se presenta la comparación de los registros con y sin filtrado de las pruebas dinámicas. De la figura C.15 a la C.28 se presentan los intervalos para el análisis del FAD

Tabla 4.17 – Máximo FAD para las pruebas dinámicas PD, con la instrumentación vertical

Sensor	(64.6 t) PD2	(60.0 t) PD3	(46.3 t) PD4	(60.9 t) PD6	(70.6 t) PD7
VB2	1.08	-	-	1.39	1.28
VB3	1.19	1.08	1.11	1.30	1.26
VB4	1.27	1.16	1.11	1.47	1.33
Vo2	1.14	1.04	1.08	1.41	1.38
Vo3	1.15	1.03	1.08	1.40	1.39

Tabla 4.18 – Máximo FAD para las pruebas dinámicas PD, con la instrumentación horizontal

Sensor	(64.6 t) PD2	(60.0 t) PD3	(46.3 t) PD4	(60.9 t) PD6	(70.6 t) PD7
HA5	1.74	1.13	1.38	-	1.52
HA6	1.75	1.14	1.37	-	1.50
HB5	1.79	1.58	1.65	2.69	1.47
HB6	1.84	1.46	1.65	2.52	1.35
HC5	1.87	1.22	1.26	1.66	1.31
HC6	1.89	1.22	1.25	2.20	1.31

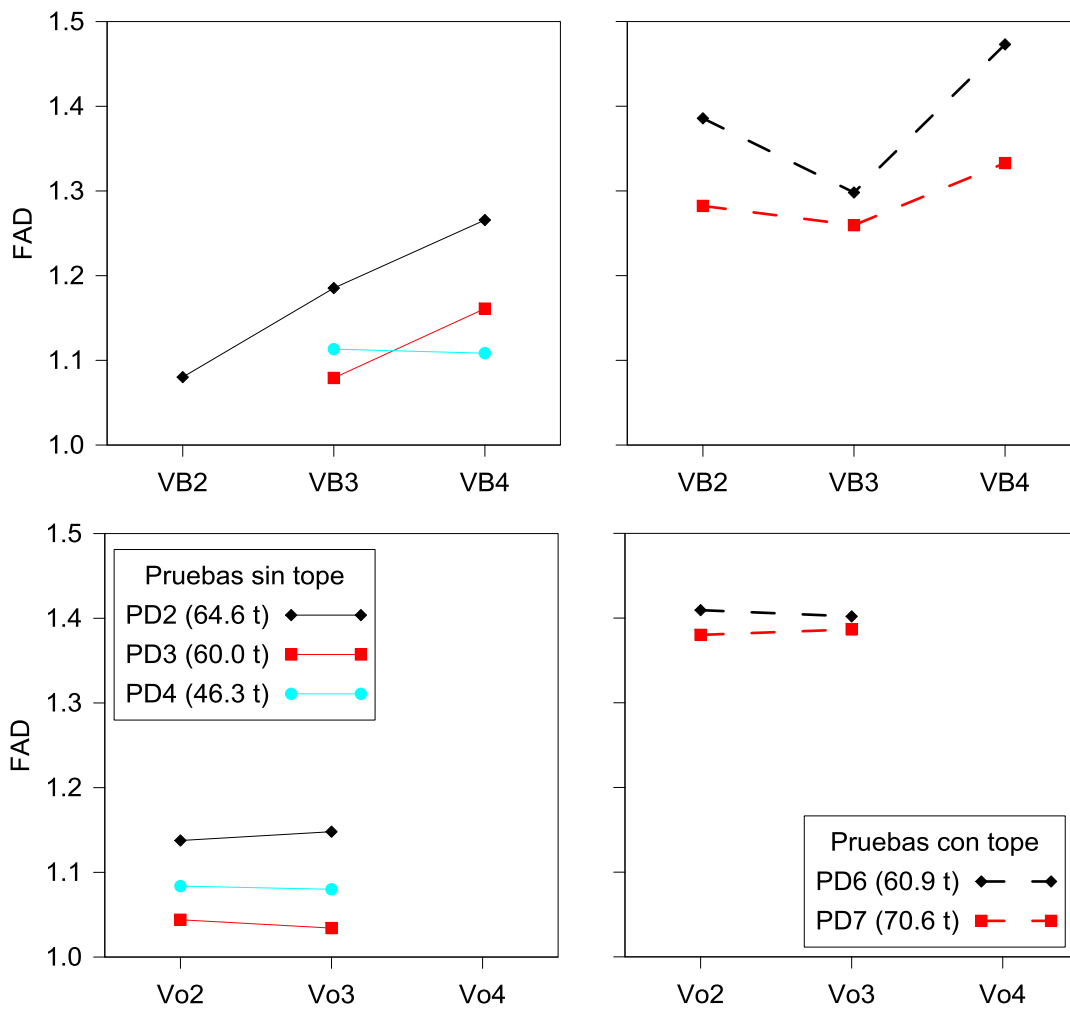


Figura 4.12 – FAD por instrumento vertical

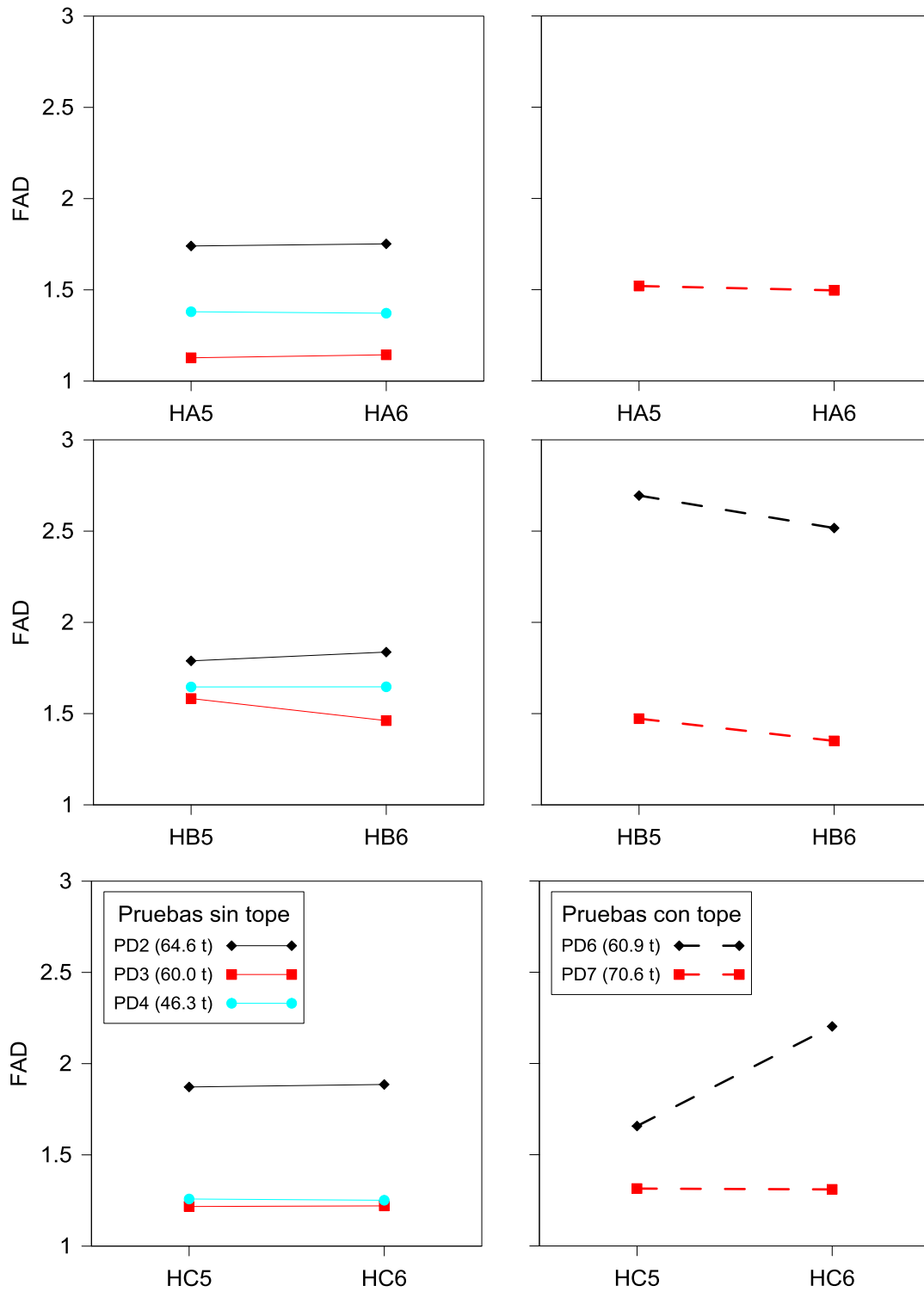


Figura 4.13 – FAD por instrumento horizontal

Como se mencionó en el capítulo 3, uno de los procedimientos para la obtención del FAD consiste en utilizar los valores de la respuesta de dos pruebas, una estática y la otra dinámica. De manera ilustrativa se presenta la comparación de dos PE con dos PD en el VIBI. En ambas tanto el camión utilizado es el mismo y la posición de carga son aproximadamente similares.

Las pruebas estáticas fueron la PE1 y la PE2. Los cuales corresponden a la posición del camión 0 en el centro del claro y del camión 3 también al centro del claro, respectivamente (Figura 4.14).

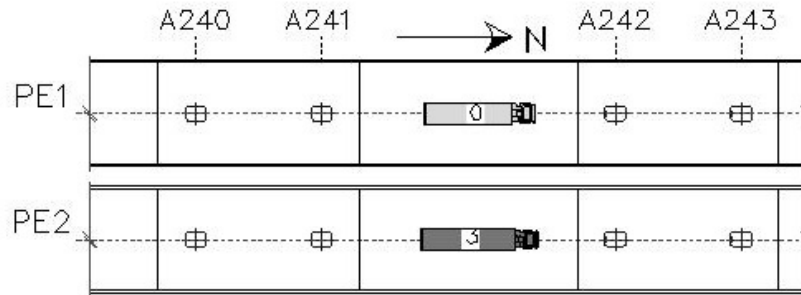


Figura 4.14 – Posición de los camiones en prueba estática

Los pasos del camión dinámico, utilizados para la comparación, fueron las pruebas PD1 y PD2. En todas las pruebas dinámicas, el camión pasó por el carril central; pero se utilizaron sólo estos camiones por el hecho de ser del mismo peso que las PE para la comparación.

De igual manera, los valores que se escogieron para la comparación fueron los medidos verticalmente al centro del claro (Vo2 y Vo3) y los medidos horizontalmente en la columna A241 (HB6 y HB5).

En la tabla 4.19 se muestran los resultados obtenidos de la comparación. El instrumento Vo3, ubicado al centro del claro, es el que registra las menores diferencias. Para las columnas los valores son alrededor del 30%; en el caso del camión 3, hay un cambio de dirección en las mediciones lo que provoca diferencias mayores al 100 %; sin embargo, obviando el cambio de signo, los porcentajes son del rango encontrado.

Tabla 4.19 – Porcentaje de diferencia entre pruebas estáticas y pruebas dinámicas filtradas

PD1 (16.3 t)				PD2 (64.6 t)			
Instrumento	Desplazamiento, en mm		%Dif*	Instrumento	Desplazamiento, en mm		%Dif*
	PE	PD Filtrada			PE	PD Filtrada	
Vo2	-0.337	-0.553	-64.3	Vo2	-1.888	-2.576	-36.4
Vo3	-0.572	-0.546	4.6	Vo3	-2.335	-2.395	-2.6
HB6	0.032	0.022	32.1	HB6	-0.091	0.096	204.6
HB5	0.032	0.018	45.4	HB5	-0.063	0.082	230.0

\* Porcentaje de diferencia (%Dif)



### 4.3. Comparación con datos del proyectista

Utilizando los datos obtenidos en las mediciones de las pruebas estáticas, se compararon los valores con los del proyectista, al cual se le pidió proporcionará una memoria de cálculo modelando dos de las pruebas realizadas.

#### Modelos del proyectista

El proyectista realizó el modelo utilizando la carga de un camión tipo T3-S3 (Figura 2.1), con dimensiones y pesos solicitados por el IIUNAM (Tabla 4.20). Las dimensiones utilizadas son muy similares a las de los camiones de las pruebas (Tabla 2.2). El peso total es similar al más liviano de los camiones T3-S3 utilizados (Camión 5)

Tabla 4.20 – Datos del camión utilizado por el proyectista

Dimensiones, en m	a	b	c	d	e	f <sub>del</sub>	f <sub>tras</sub>
	4.40	1.35	4.50	1.30	1.30	2.10	1.85
Descargas por eje, en t	1	2	3	4	5	6	Peso
	4.65	12.99	12.99	9.76	9.76	9.76	60.00

Es importante resaltar que el modelo del proyectista no utiliza algún factor de carga y fue estimado previo a la prueba. Pero, para la comparación se utilizaron los mismos pesos que los camiones experimentales, esto debido a su variación en cargas con vehículos de 16, 46 y hasta 70 t. Los arreglos utilizados son:

1. Arreglo A

Este consiste en seis camiones posicionados al centro del claro, tres por cada carril (Figura 4.15), el cual permitirá comparar la flecha al centro del claro con la prueba estática PE7, de misma configuración vehicular.

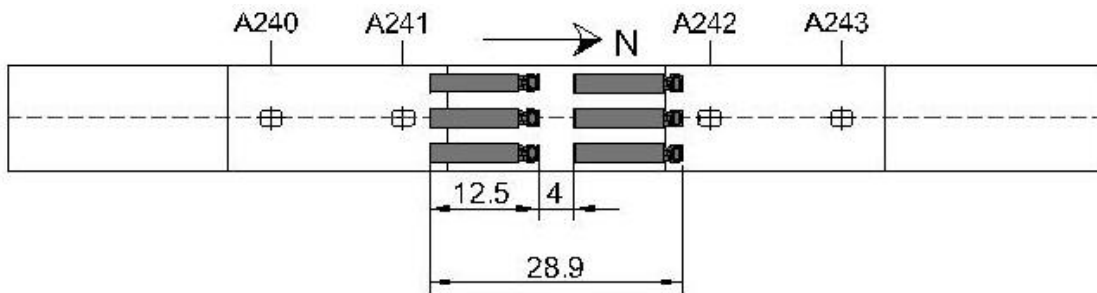


Figura 4.15 – Arreglo tipo A

2. Arreglo B

El segundo arreglo contiene seis camiones alienados en el carril lateral (Figura 4.16), y es comparado con la prueba estática PE10. Este arreglo permitirá comparar el desplazamiento horizontal y la flecha del ala de la trabe en el eje A241 (Figura 4.17)

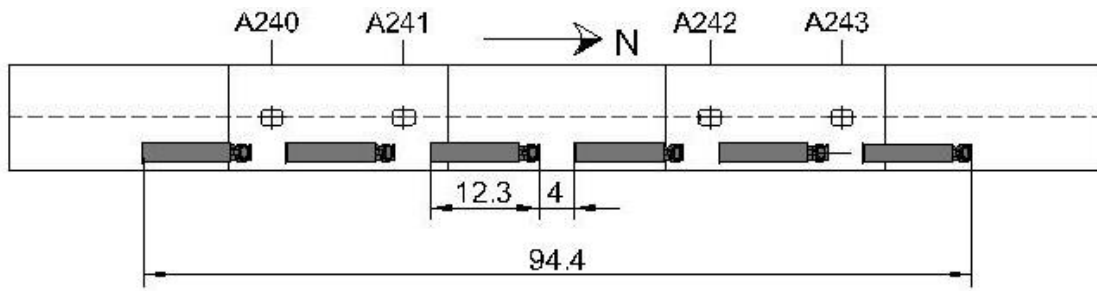


Figura 4.16 – Arreglo tipo B

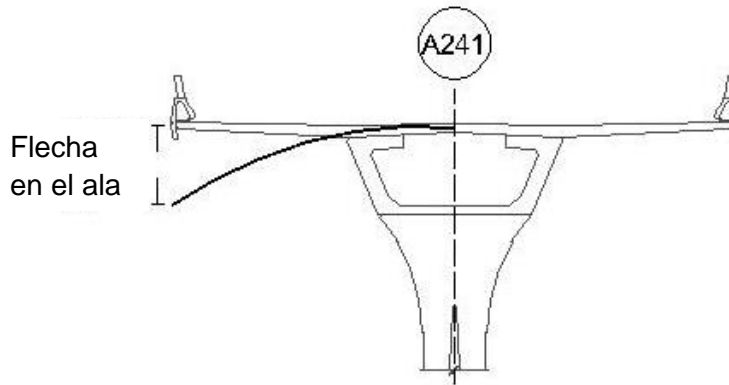


Figura 4.17 – Croquis de la flecha del ala de la trabe, eje A241

### Comparación

#### 1. Desplazamiento lateral

En la figura 4.18 se muestra la comparación realizada con los valores del proyectista del Arreglo B y los medidos de la prueba estática PE10, los resultados se muestran en la tabla 4.21. El Arreglo B tiene los desplazamientos máximos, con una diferencia de un 25 a 60 % mayor respecto a la PE10.

Tabla 4.21 – Comparación de los desplazamientos horizontales entre el Arreglo B y la PE10

Columna	Altura, en m	Desplazamiento, en mm		Diferencia, en mm	Diferencia, en %
		Arreglo B	PE10		
A240	9.3	5.24	3.36	-1.88	-56%
	8.3	4.29	2.65	-1.64	-62%
A241	9.4	5.40	3.61	-1.80	-50%
	8.4	4.40	2.77	-1.63	-59%
A242	9.7	6.83	5.44	-1.39	-26%
	8.7	5.84	4.46	-1.38	-31%

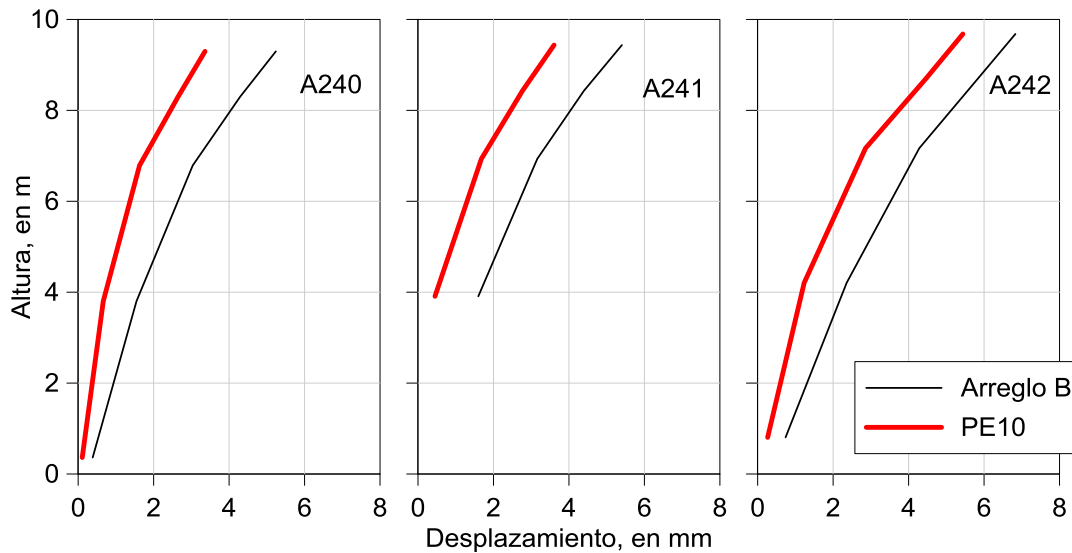


Figura 4.18 – Desplazamientos laterales con el Arreglo B del modelo y la prueba experimental PE10

## 2. Flecha

Debido a los puntos de estudio, se tuvieron dos casos comparativos, el primero fue realizado entre la PE7 y el Arreglo A, para comparar la flecha al centro del claro en la trabe, y el segundo entre la PE10 y el Arreglo B, para la tableta al eje de la columna A241.

En la primera comparación (PE7 vs Arreglo A) al centro del claro (Figura 3.7), el Arreglo A presenta una flecha de 10.67mm, siendo un 31.5 % mayor que lo determinado por la PE7, con un 8.11 mm de la flecha, y un 26.3 % al límite permisible.

La segunda comparación (PE7 vs Arreglo B) es realizada con la flecha relativa al punto de apoyo de la tableta con la sección cajón (Figura 3.8), restando el efecto del giro de la trabe. En el eje de la columna A241, a la misma distancia, el Arreglo B genera una flecha de 5.40 mm, un 22 % mayor a los 4.42 mm determinados en la PE10, y un 40 % menor al límite permisible.

En los dos casos, la predicción del proyectista es más flexible que lo real, las dos pruebas comparadas (PE7 y PE10) son las más desfavorables, tanto estática como dinámicamente, y no sobrepasaron los límites permisibles.



## Capítulo 5. Conclusiones y Comentarios

---

La experimentación conlleva retos que el investigador debe de afrontar y, que con los recursos con los que dispone, obtener resultados del estudio. Para ello la planeación ayuda a prever la mayoría de las dificultades y su solución, como por ejemplo, realizar el experimento en la noche para no obstaculizar el trabajo en la obra ni a la ciudadanía.

Durante las pruebas realizadas al Viaducto Bicentenario se tuvo un retraso de tres horas, aproximadamente, para acceder con los camiones, esto debido a que los encargados de la obra tardaron más de lo previsto para desalojar la vialidad. La limitante del tiempo impidió que los vehículos se movilizaran de acuerdo a lo planeado, provocando que se redujera el número de pruebas previstas y, su presencia al final de las pruebas estáticas, no se registrara un estado final de la estructura.

Las pruebas realizadas utilizaron cargas vehiculares en condiciones extremas, para algunos casos ni siquiera son consideradas en el diseño, como por ejemplo la PE7 con seis camiones en filados al centro del claro.

Con el procesamiento correspondiente de las señales, se logró determinar cuáles eran los datos confiables y, con el análisis realizado, se concluye que:

- Al comparar los desplazamientos laterales medidos, con los resultados de la modelación del proyectista (con cargas similares a las empleadas en las pruebas de campo), se encontró que el modelo prevé, en promedio, desplazamientos un 47 % mayor a los experimentales. Esto fue obtenido para la PE10, la carga más desfavorable.
- Las flechas fueron menores que los límites propuestos por la referencia. Incluso en los casos más desfavorables: con los seis camiones al centro del claro y con todos alineados en un carril lateral, no se rebaso el 30 % (en la trabe) ni el 80 % (en las alas) del valor permisible, respectivamente. La comparación con los cálculos del proyectista, indica que la flecha al centro del claro se sobrestima un 30 % y el ala un 70 %. En ambos casos la predicción es más flexible a lo real pero, tanto para la respuesta medida como la modelada, en ningún caso se sobrepasan los límites permisibles.
- Las pruebas dinámicas producen desplazamientos mayores que sus equivalentes en pruebas estáticas, esto se comprueba con los valores obtenidos del FAD, con un promedio de 1.4 para el sentido vertical y de 1.9 para el horizontal, superior al 1.3 utilizado para diseño. La diferencia no repercute en la seguridad debido a que las cargas estáticas rigen esta estructura, como resultó del experimento donde los casos más desfavorables fueron la PE7 y PE10; pruebas que registraron desplazamientos menores a los del modelo, el cual se supone cumple con la reglamentación.

- Las comparaciones revelaron que el modelo es más flexible que lo real, por lo que se predijo una respuesta de la estructura más conservadora.

Los resultados obtenidos de este trabajo, serán utilizados para calibrar un modelo matemático de la estructura, permitiendo así corroborar los criterios del proyectista. Esto queda fuera del alcance de esta tesis.

Todo esto dejó una amplia experiencia en el área de estudios experimentales, permitiendo ofrecer las siguientes recomendaciones:

- Video grabar el desarrollo del experimento.
- Para el caso de pruebas similares, estacionar los vehículos lo más alejado de la zona de estudio y siempre al centro de la vialidad, reduciendo con ello desplazamientos en la estructura que repercutan las mediciones de las pruebas.
- Mantener mediciones periódicas de la estructura para observar variaciones en sus propiedades.

## Referencias

---

AASHTO (2007), "General Design and Location Features", en AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, SI Units, 4a. ed, AASTHO.

Gómez R., Murià Vila D., Sánchez Ramírez R., Escobar J. A., Rodríguez Gutiérrez G. y Mendoza García M. A. (2008), "An account of structural health monitoring and related problems of bridge structures in Mexico: case studies", The Monitor, pp. 11-35.

Murià D.V., Sánchez A. R.R., Huerta C. H.C. y Fernández L. R.S. (2012), "In-Situ Test of a Precast Pier of an Elevated Viaduct in Mexico City", 15 World of Earthquake Engineering, Lisboa.

NTC-DCC (2004) en Gaceta Oficial del Distrito Federal, vol. II, no. 103-bis, 6 octubre, Distrito Federal.

NTC-DS (2004) en Gaceta Oficial del Distrito Federal, vol. II, no. 103-bis, 6 octubre, México, D.F.

Pallás Areny R. (2003), "Sensores y Acondicionadores de Señal", 4a. ed, Marcombo, S.A., Barcelona.

Paultre P., Chaallal O. y Proulx J. (1992), "Bridge dynamics and dynamic amplification factors - a review of analytical and experimental findings", Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 19, no. 2, pp. 260-278.

Wilcox R.M. (1898), "Theory and calculation of cantilever bridges", 1a. ed, D. Van Nostrand company, New York.





A.1. Inclinómetros

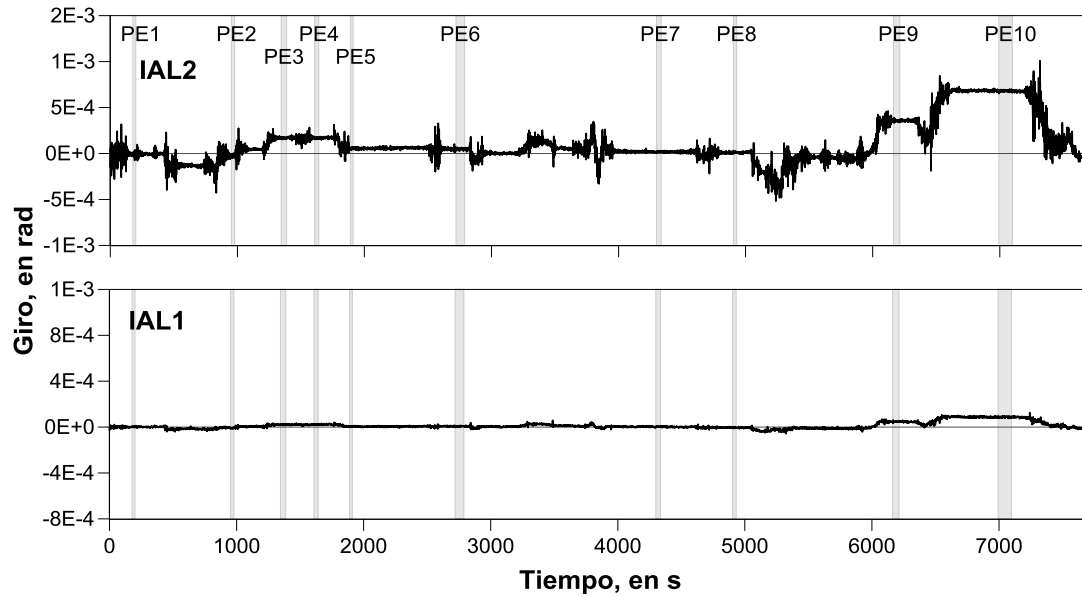


Figura A.1 – Historia de las señales de los inclinómetros en la columna A240 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

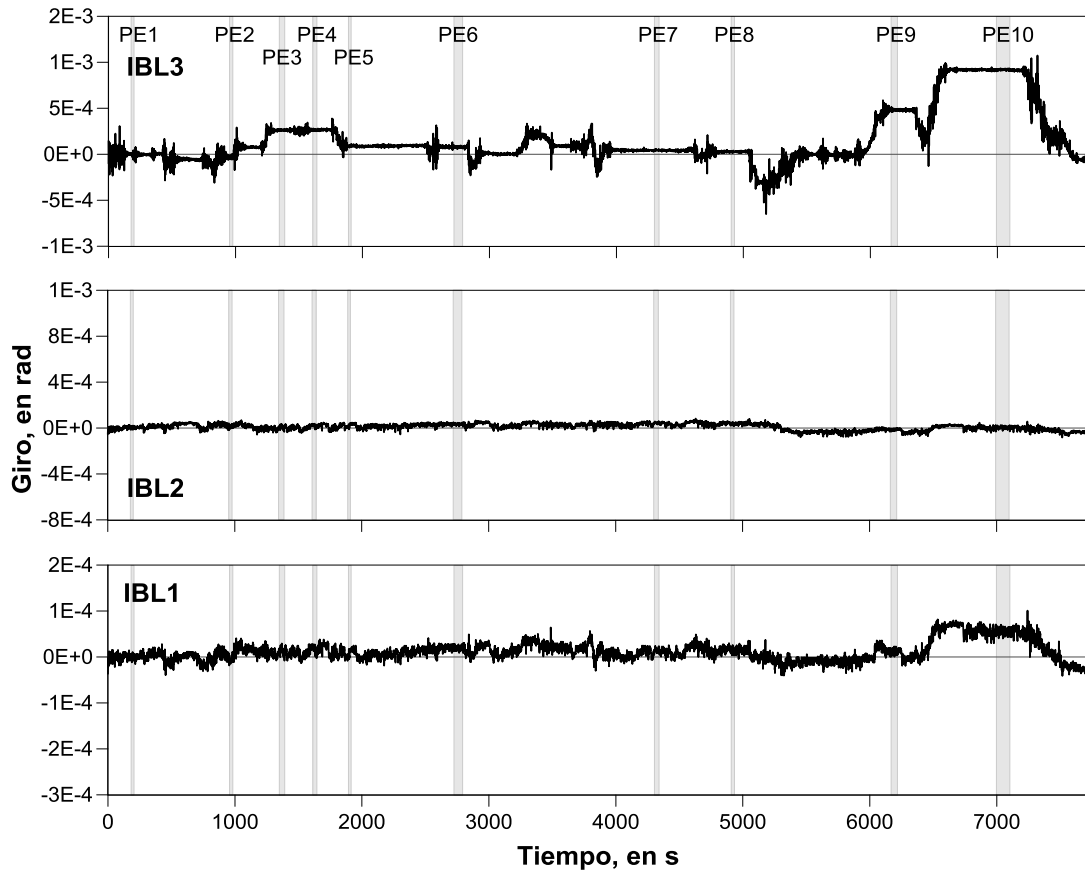


Figura A.2 - Historia de las señales de los inclinómetros en la columna A241 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

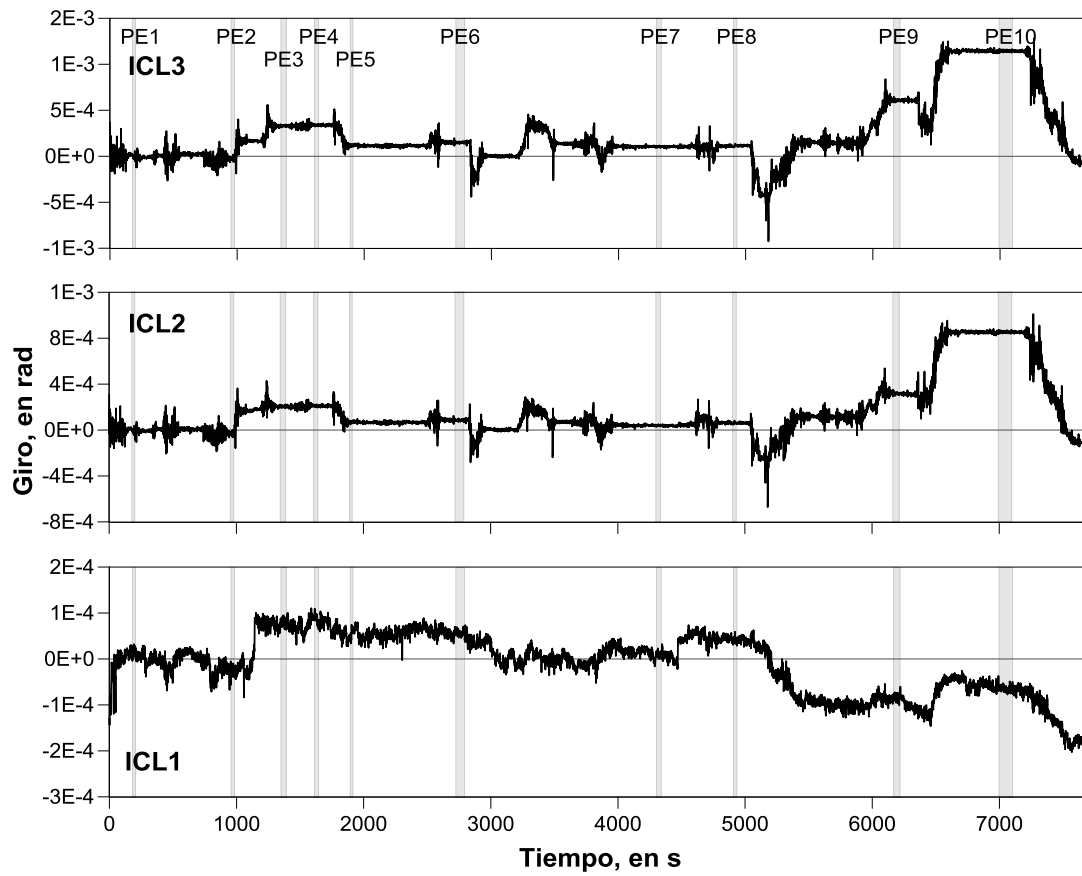


Figura A.3 - Historia de las señales de los inclinómetros en la columna A242 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

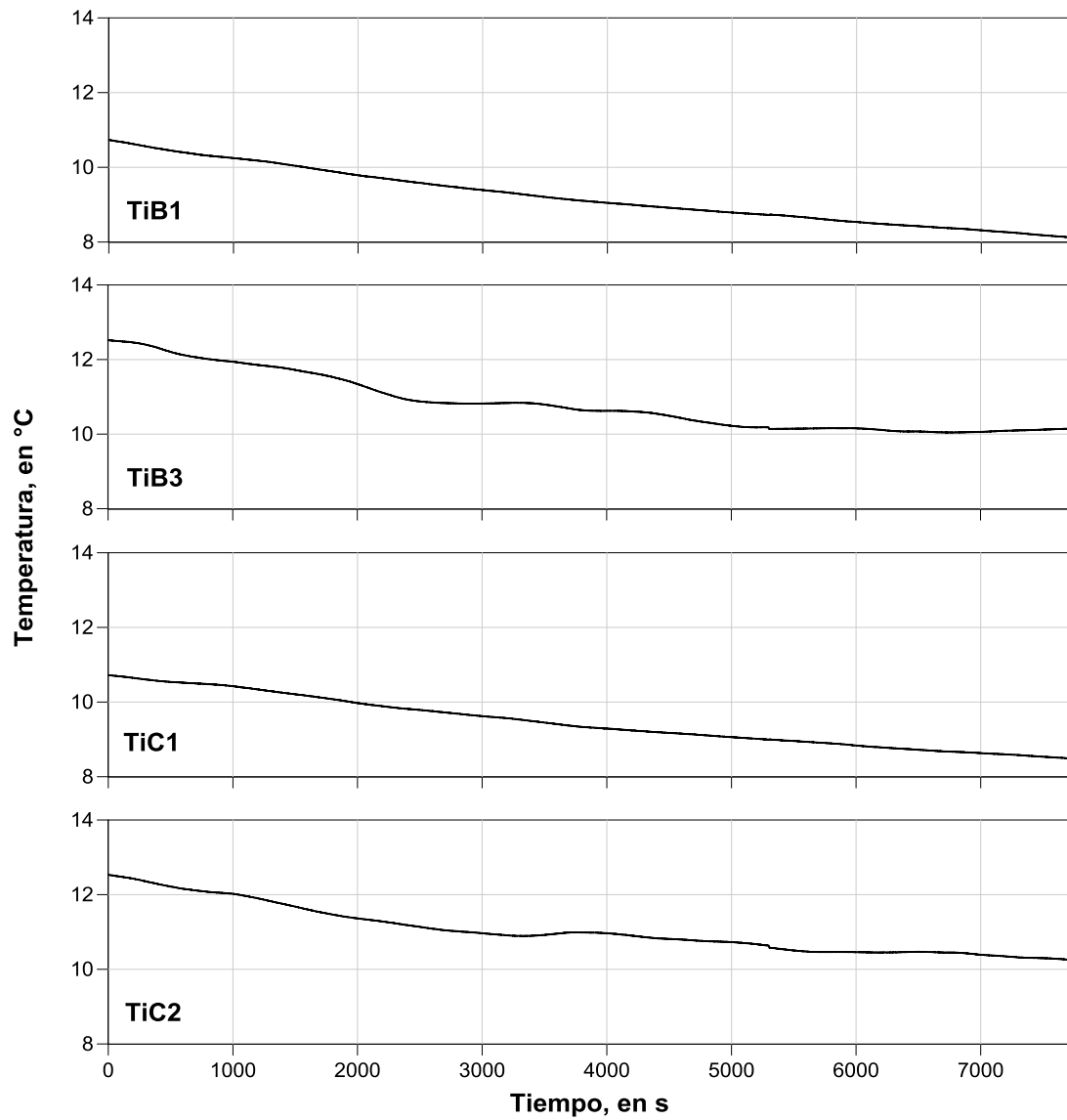


Figura A.4 – Historia de las señales de las temperaturas de los inclinómetro para las PE

### A.1. Potenciómetros

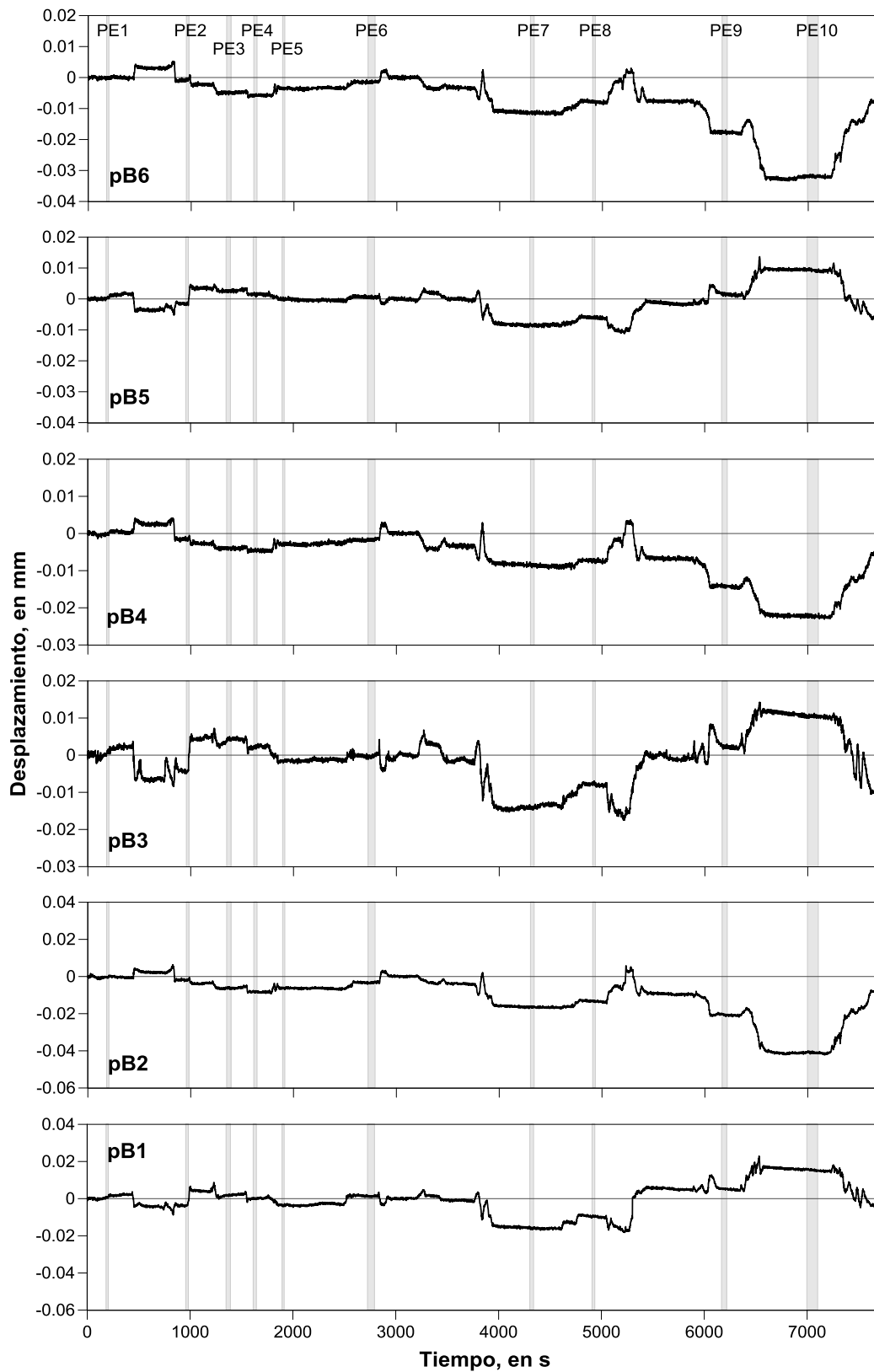


Figura A.5 - Historia de las señales de los potenciómetros en la columna A241 de las PE. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

## Apéndice B. Perfiles de Pruebas Estáticas

### B.1. Horizontales

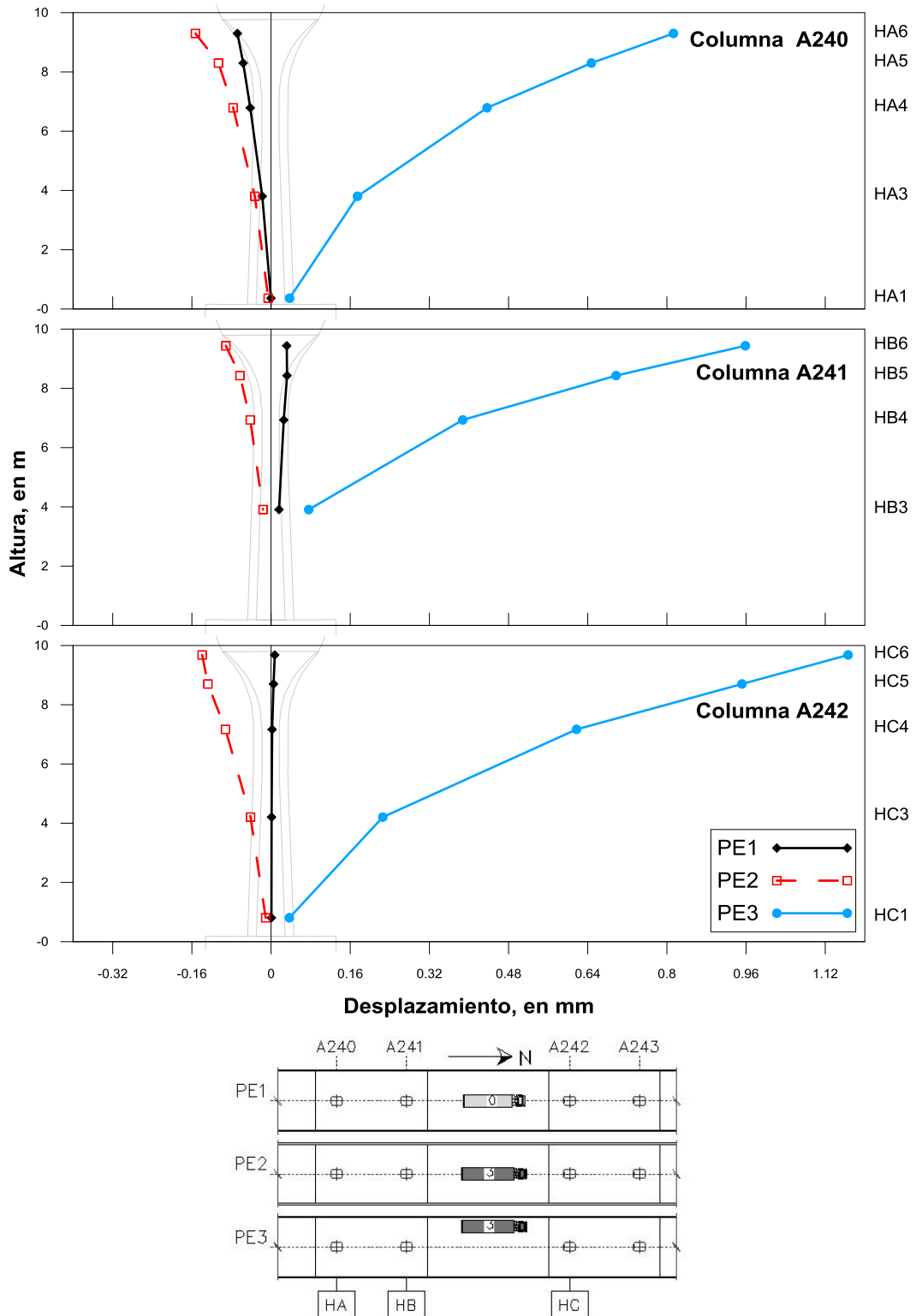


Figura B.1 – Perfiles de las columnas de las pruebas estáticas PE1, PE2 y PE3

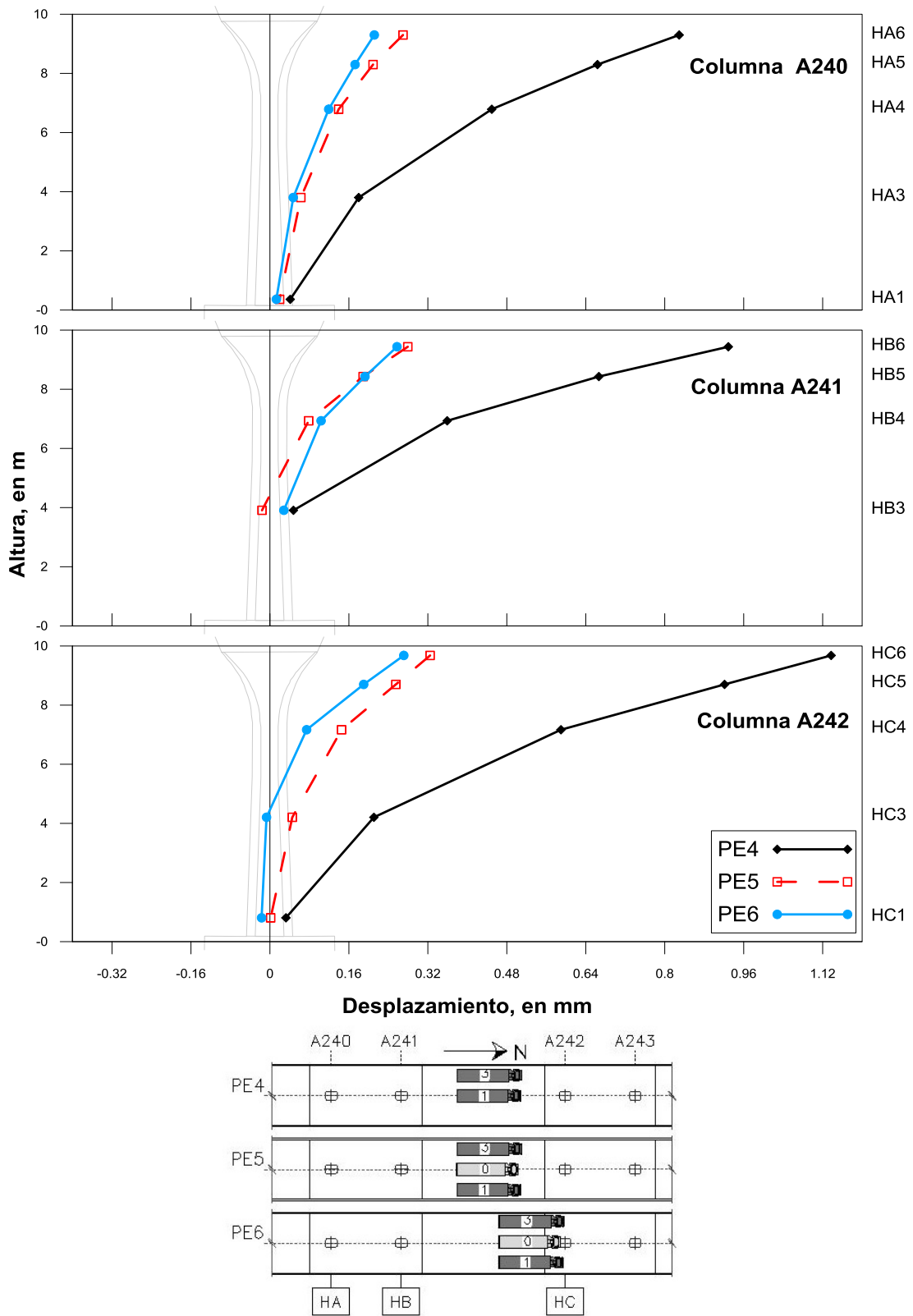


Figura B.2 – Perfiles de las columnas de las pruebas estáticas PE4, PE5 y PE6

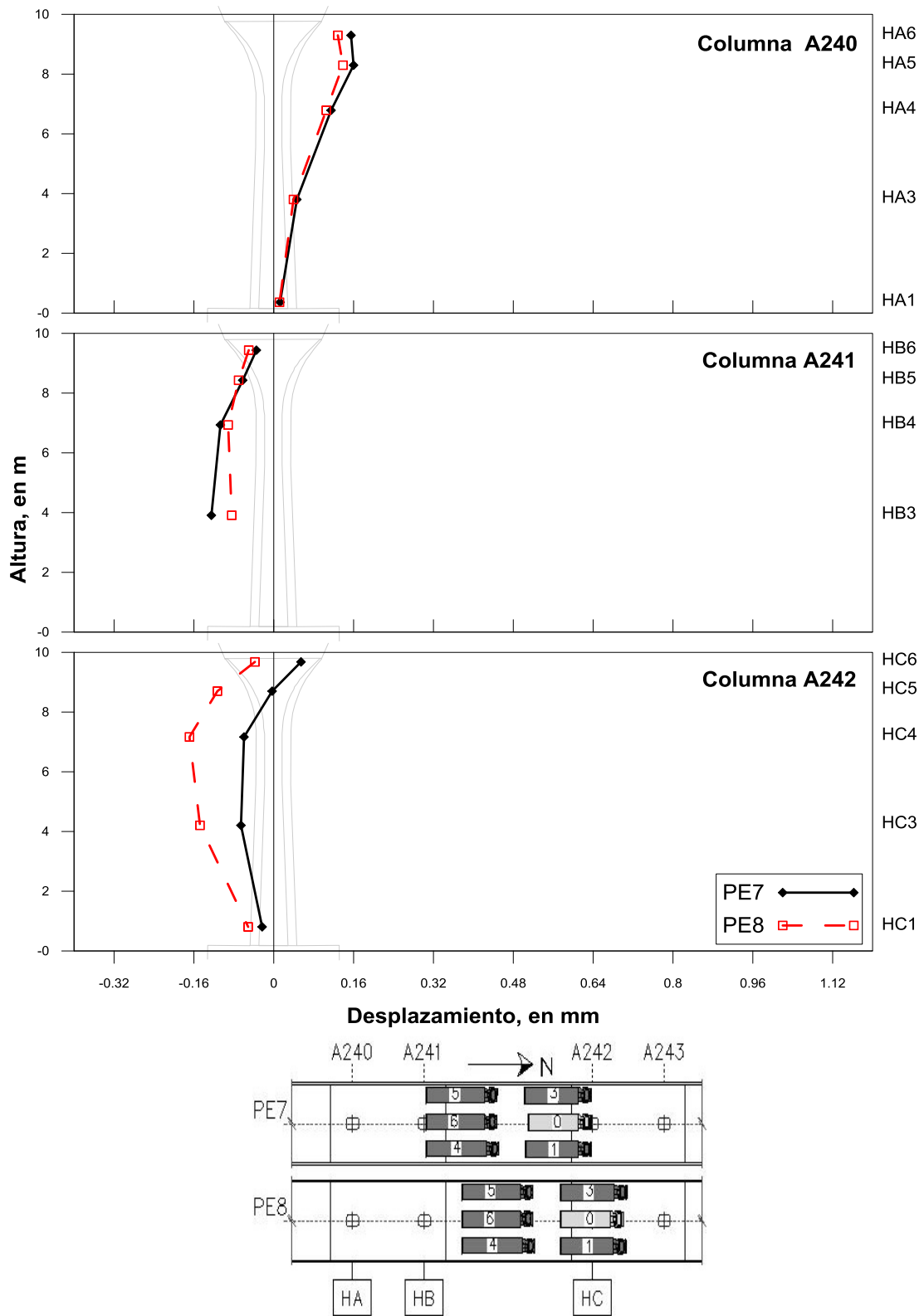


Figura B.3 – Perfiles de las columnas de las pruebas estáticas PE7 y PE8



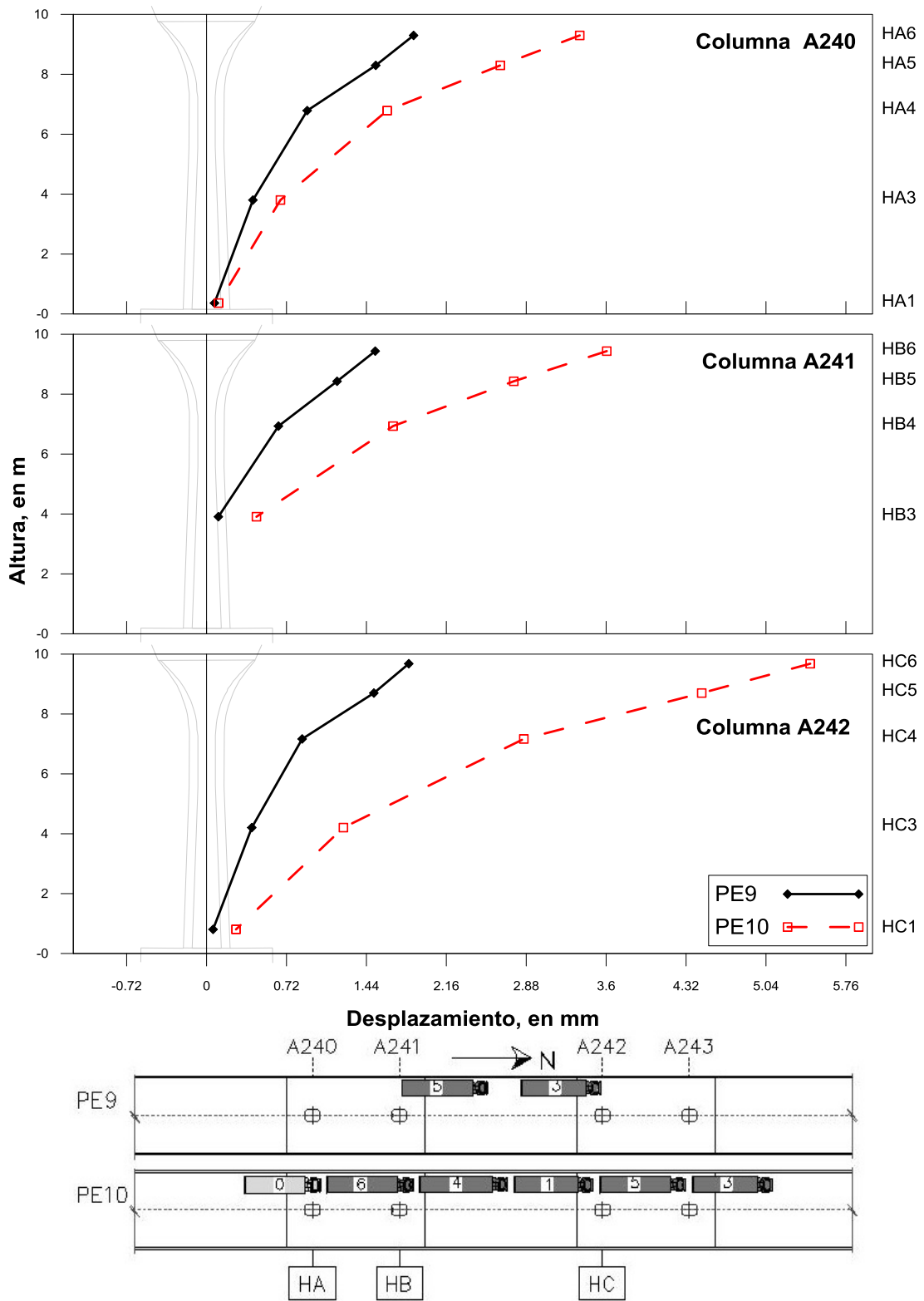


Figura B.4 – Perfiles de las columnas de las pruebas estáticas PE9 y PE10

### B.2. Verticales

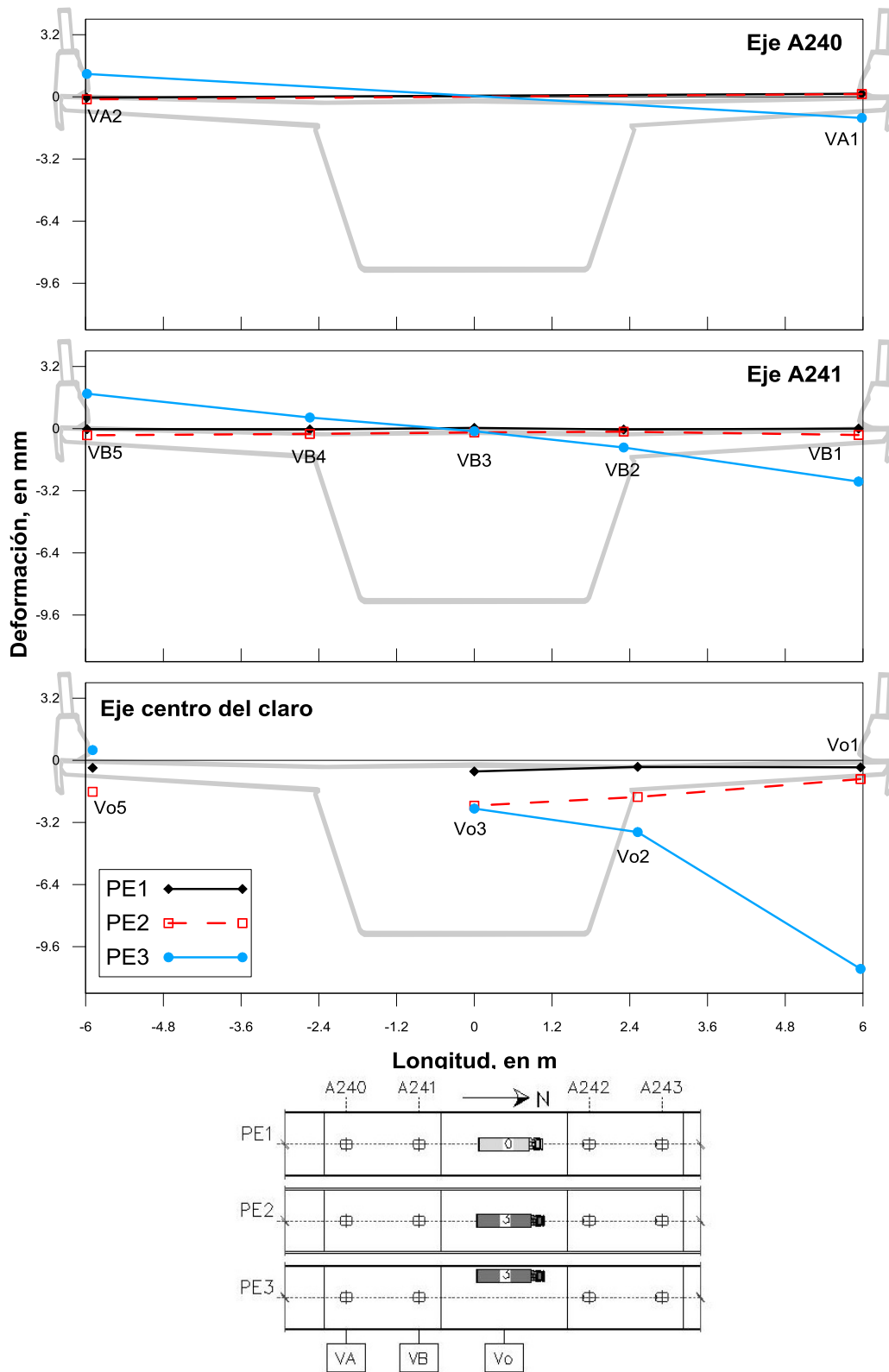


Figura B.5 – Perfiles de las traves de las pruebas estáticas PE1, PE2 y PE3

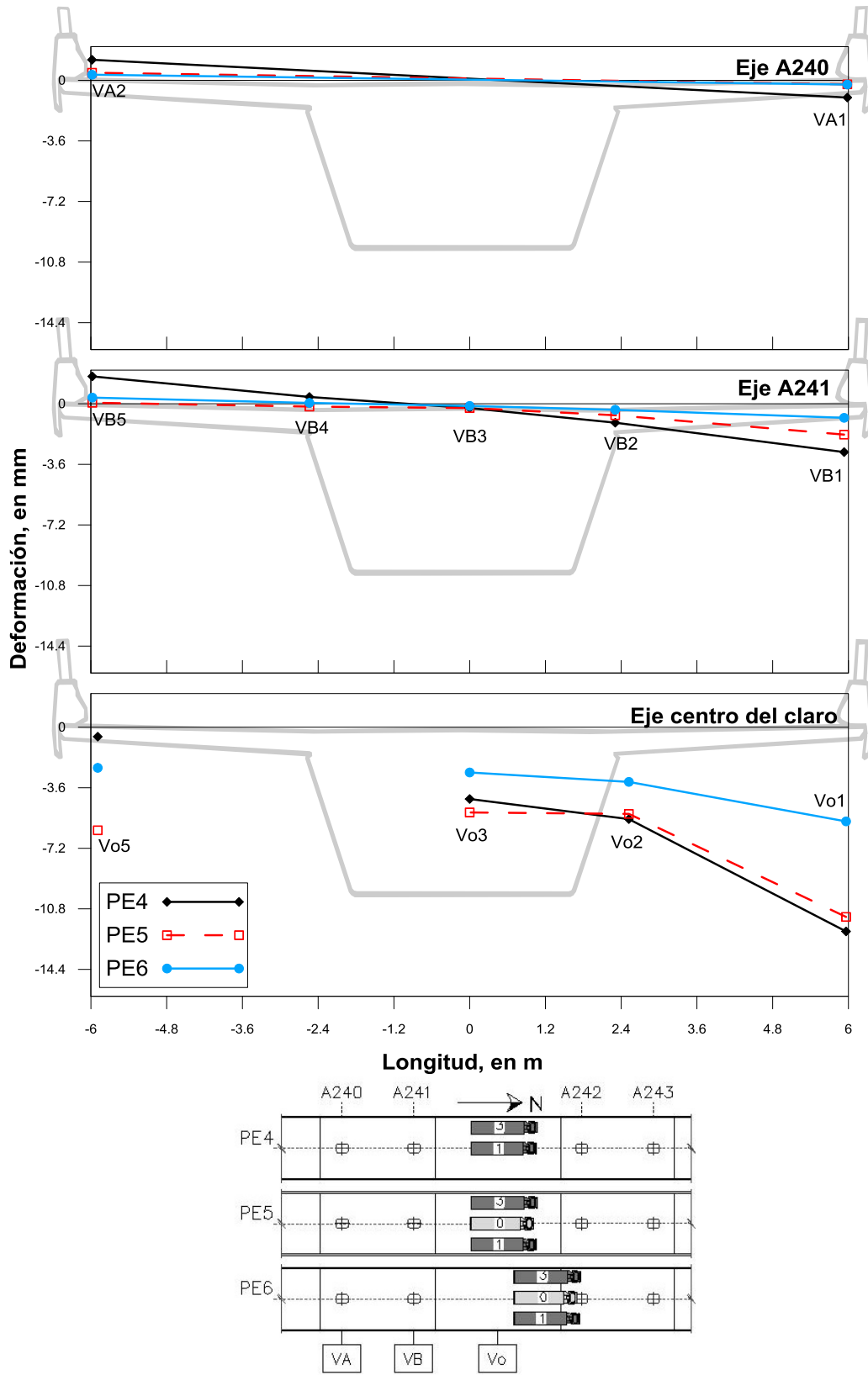


Figura B.6 – Perfiles de las traves de las pruebas estáticas PE4, PE5 y PE6

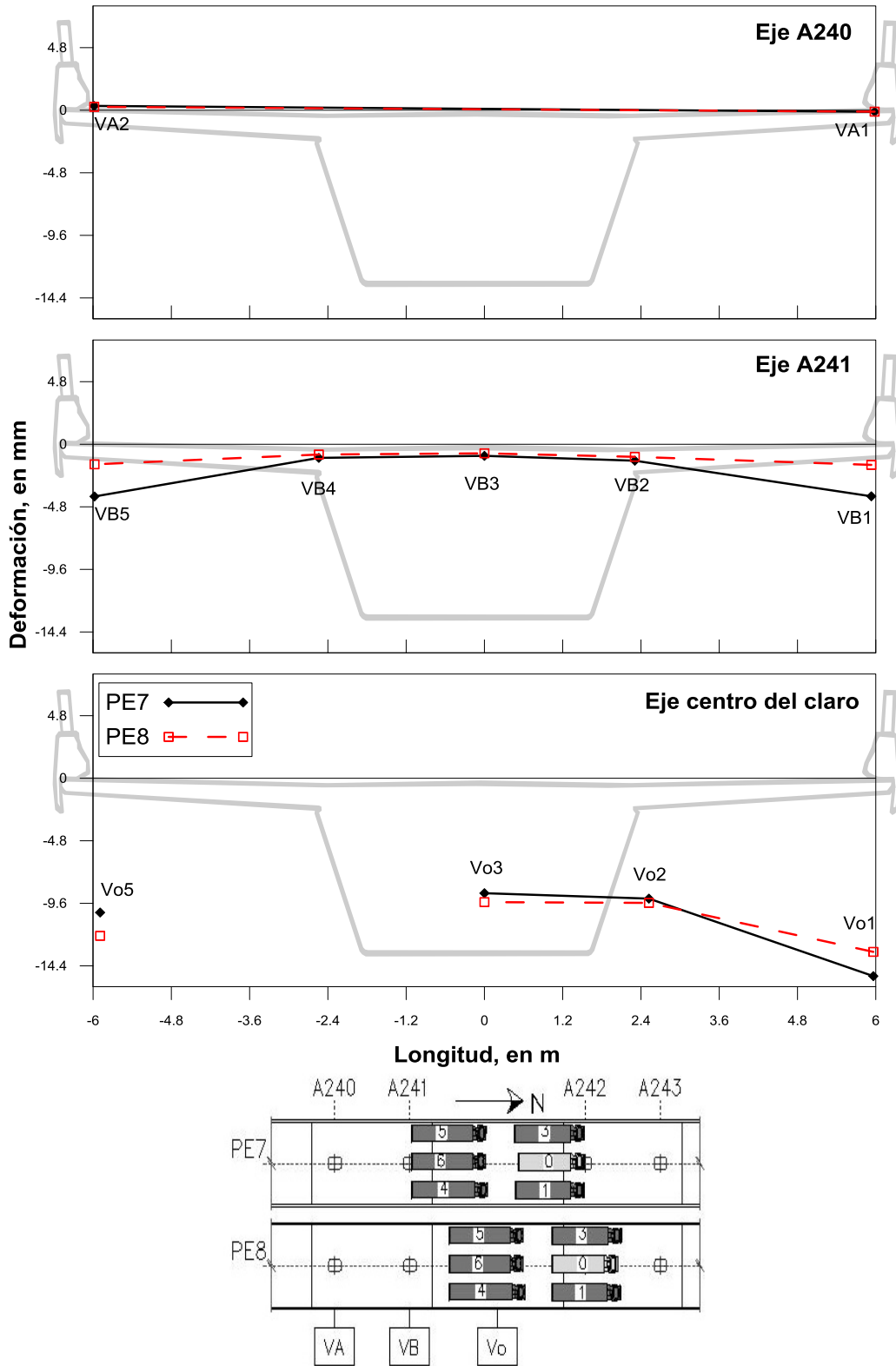


Figura B.7 – Perfiles de las traves de las pruebas estáticas PE7 y PE8

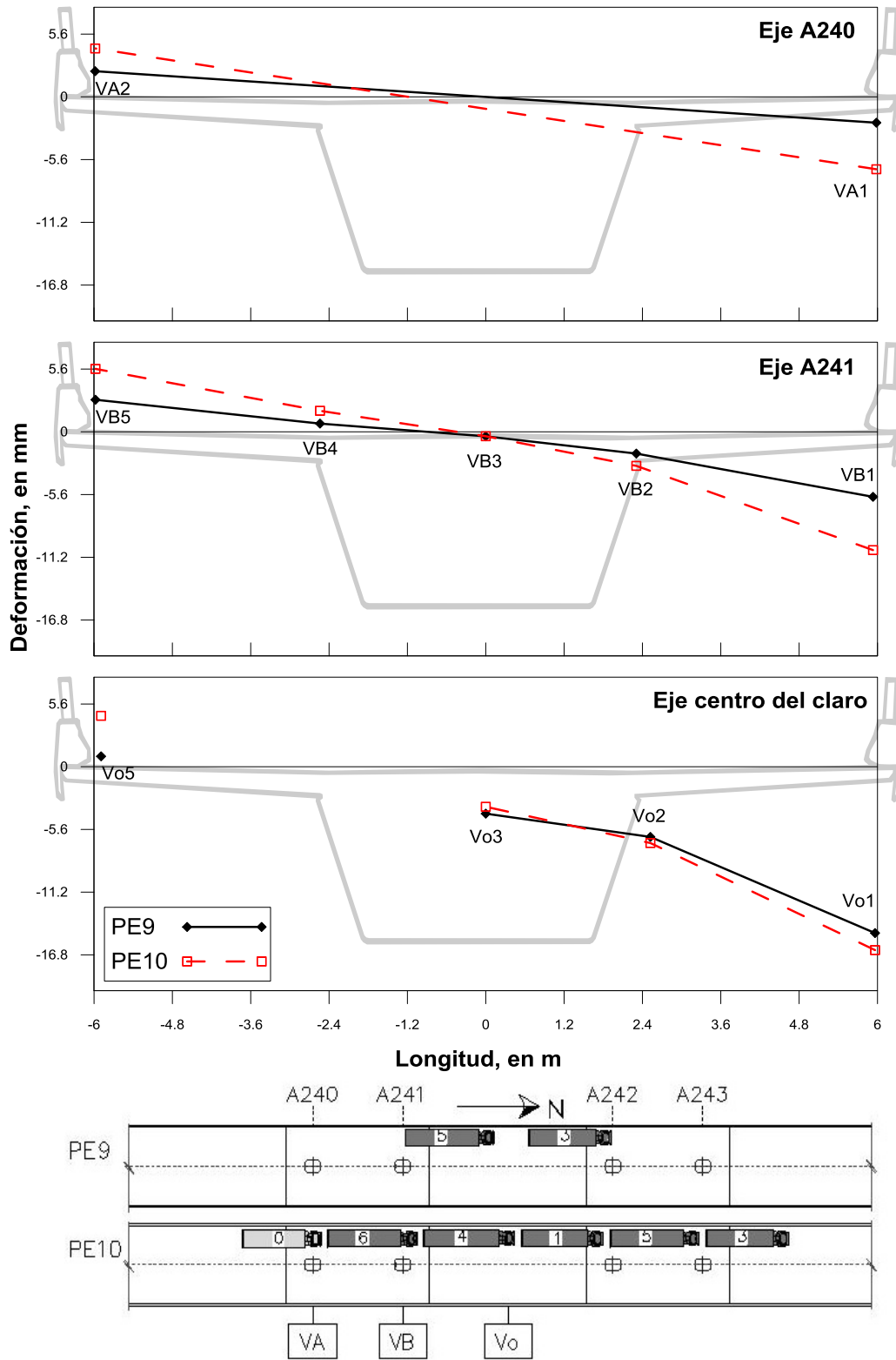


Figura B.8 – Perfiles de las traves de las pruebas estáticas PE9 y PE10

### B.3. Potenciómetros

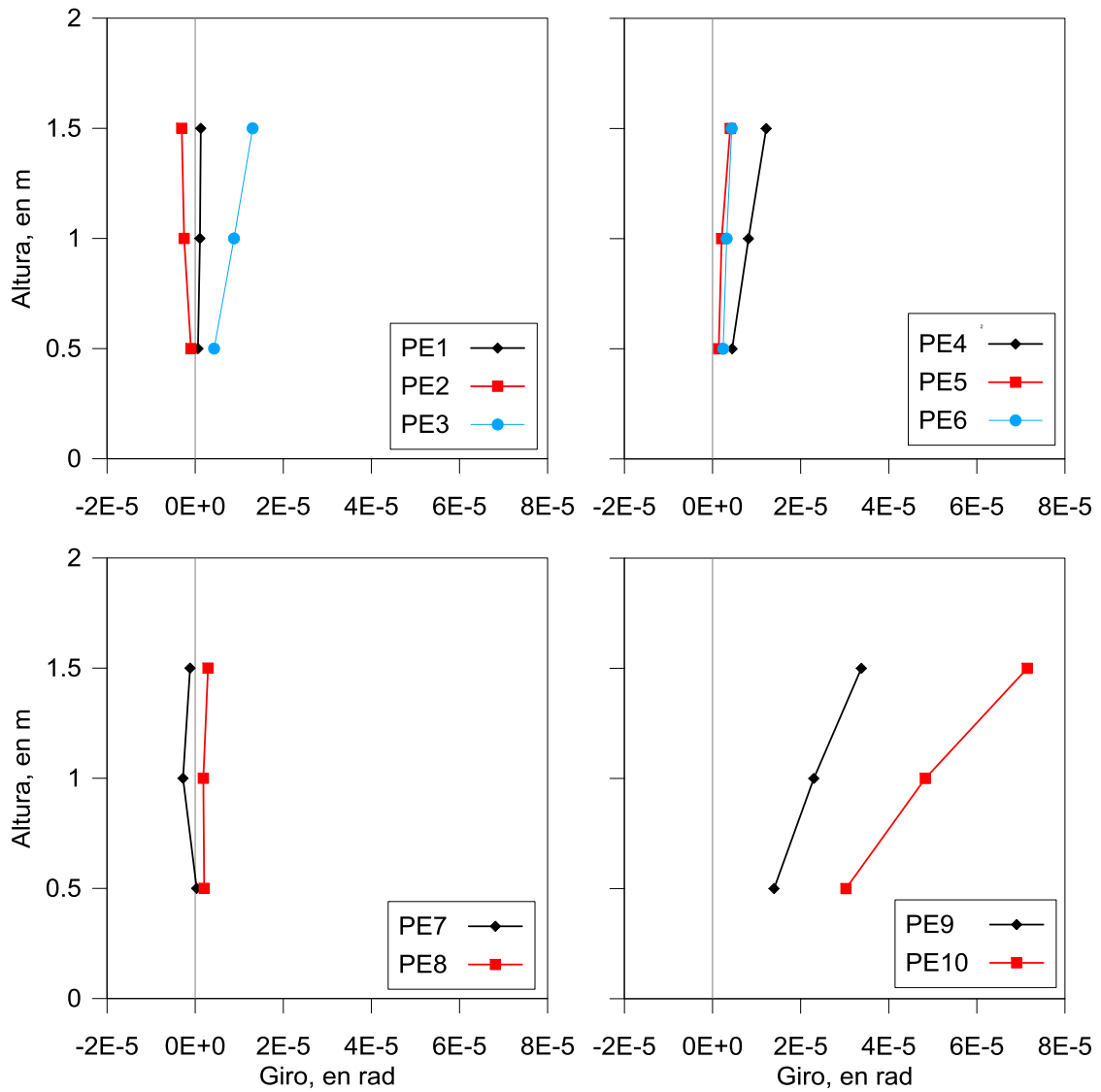


Figura B.9 – Giros en la base de la columna A241 para las pruebas estáticas

### B.4. Inclinómetros

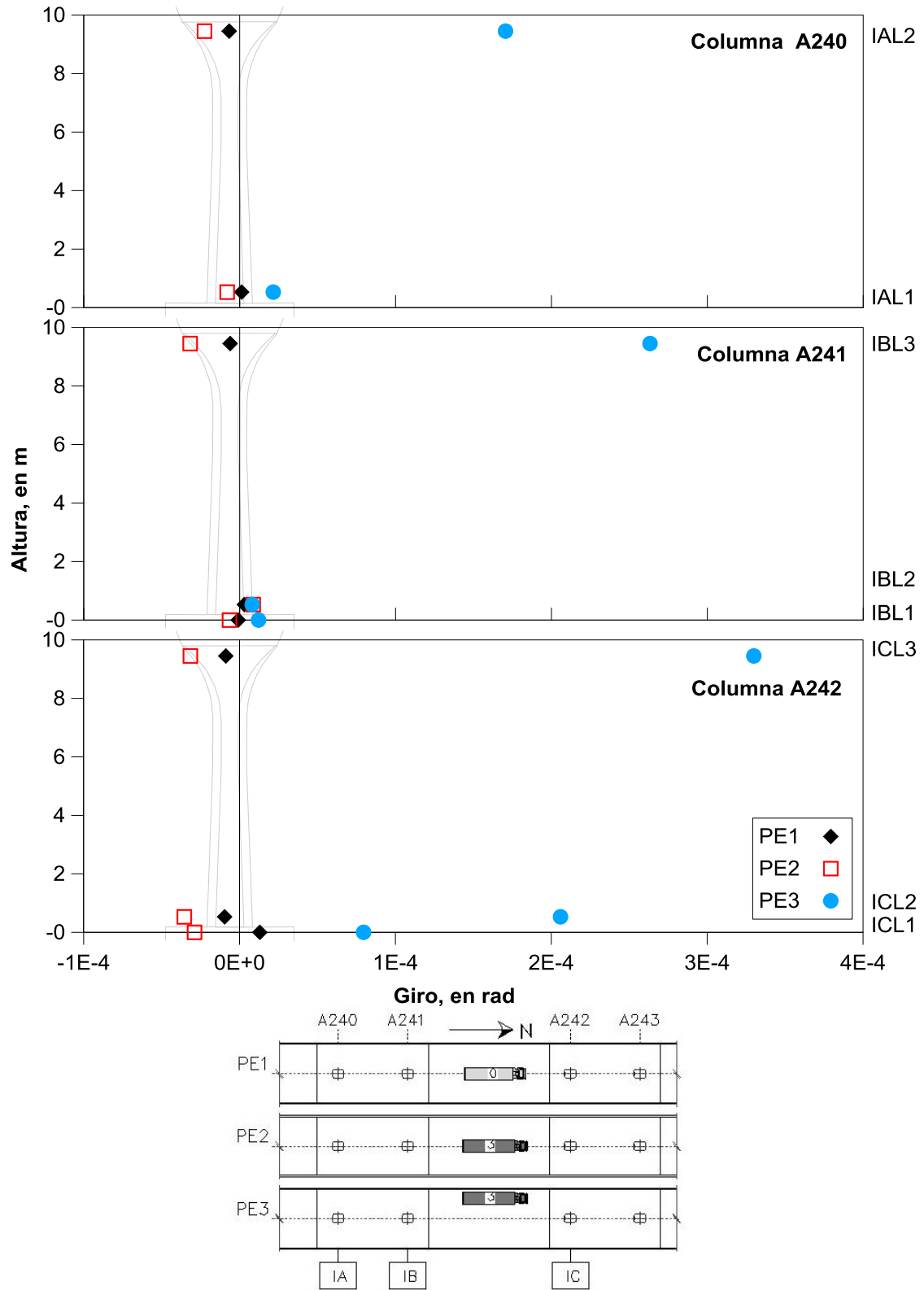


Figura B.10 – Giros de la columna y zapata de las pruebas estáticas PE1, PE2 y PE3

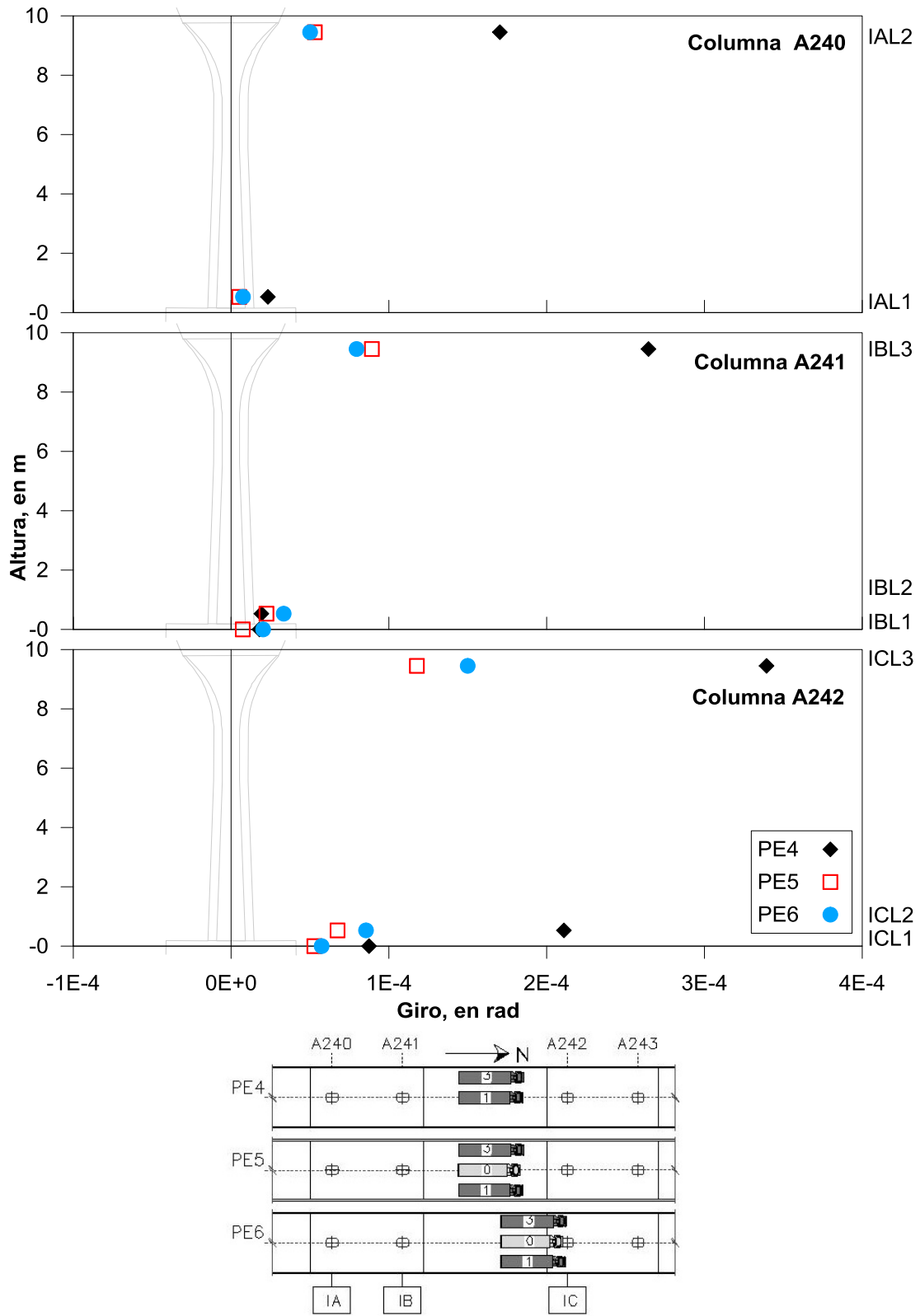


Figura B.11 – Giros de la columna y zapata en de las pruebas estáticas PE4, PE5 y PE6



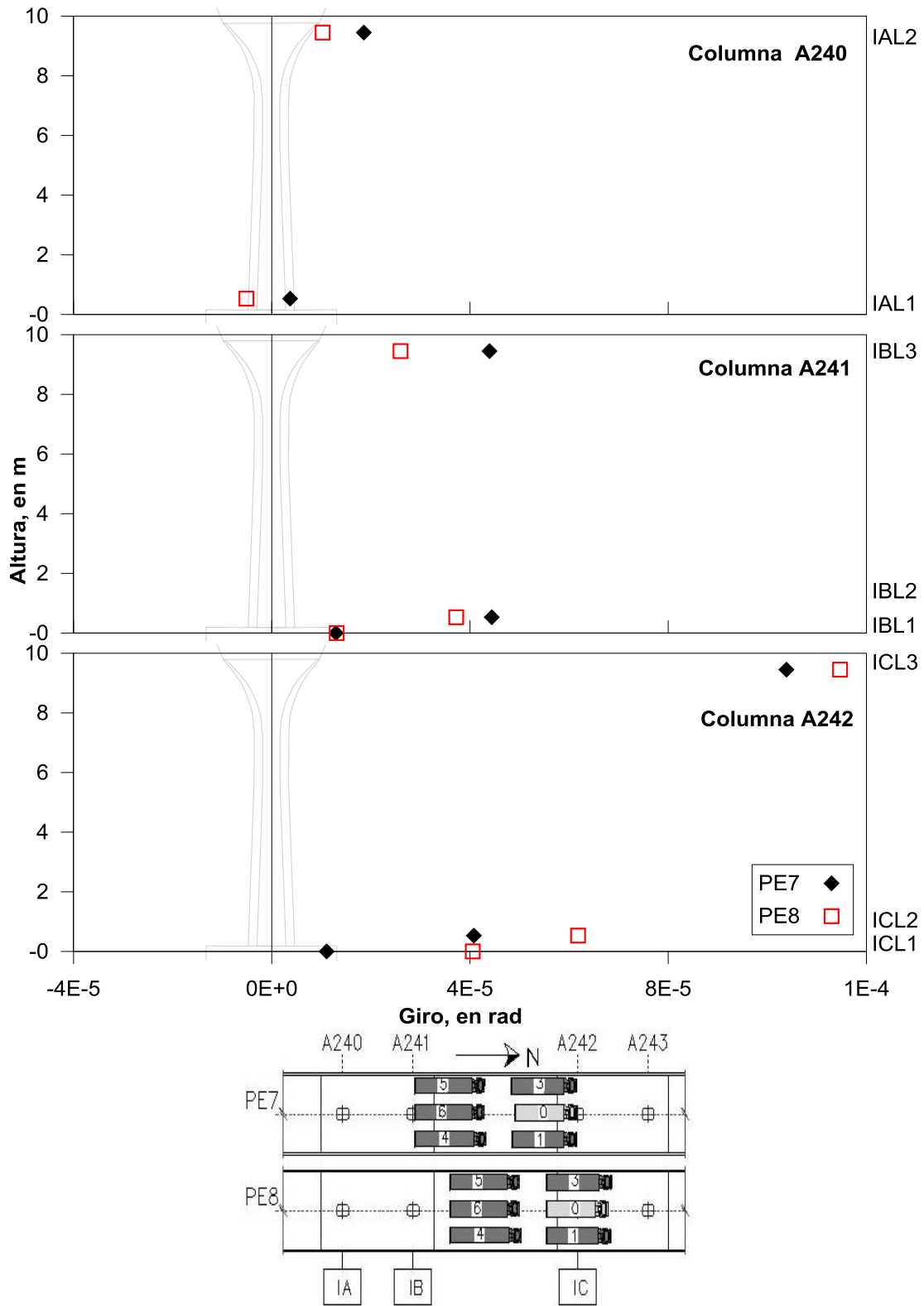


Figura B.12 – Giros de la columna y zapata de las pruebas estáticas PE7 y PE8

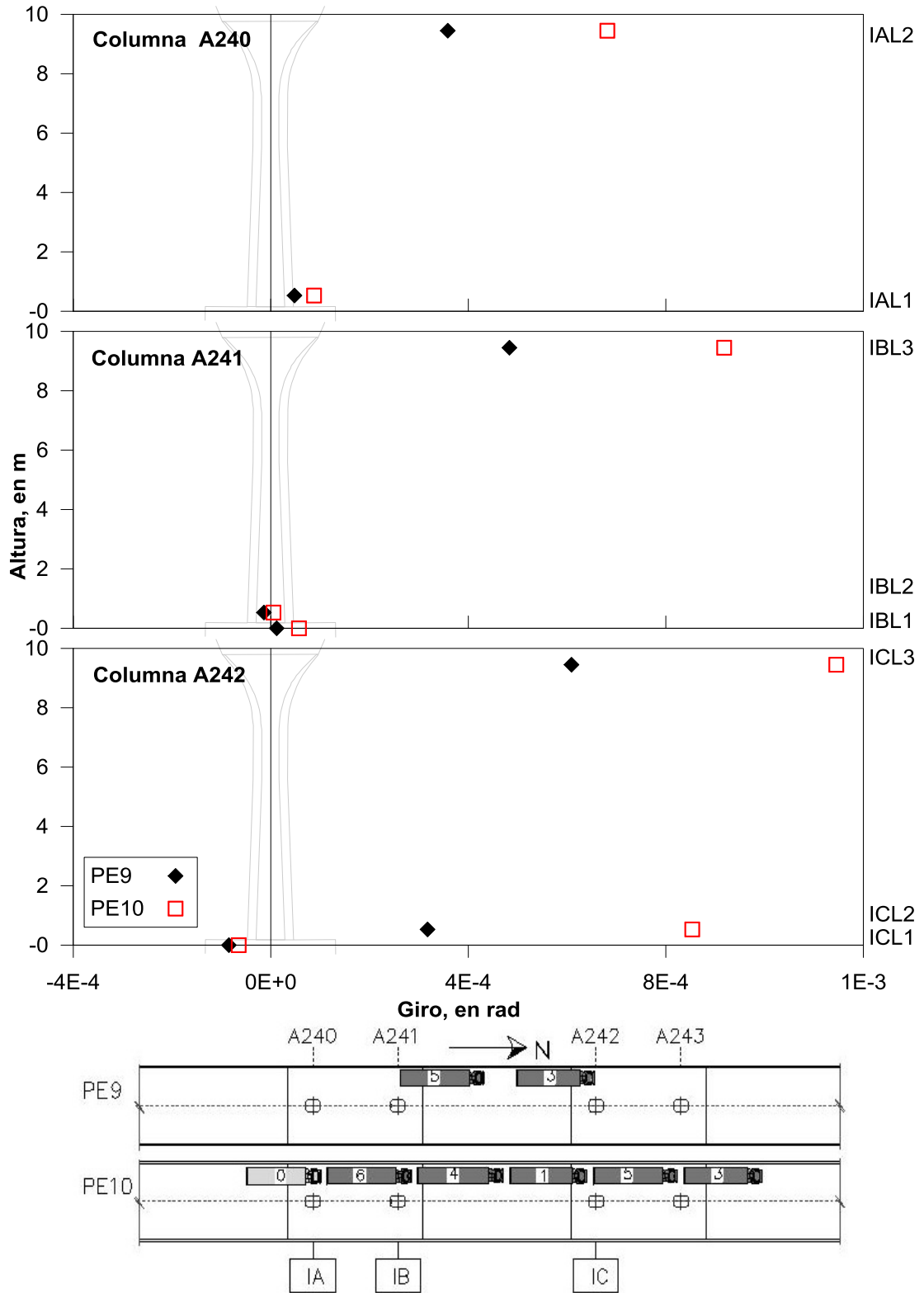


Figura B.13 – Giros de la columna y zapata de las pruebas estáticas PE9 y PE10

C.1. Horizontales

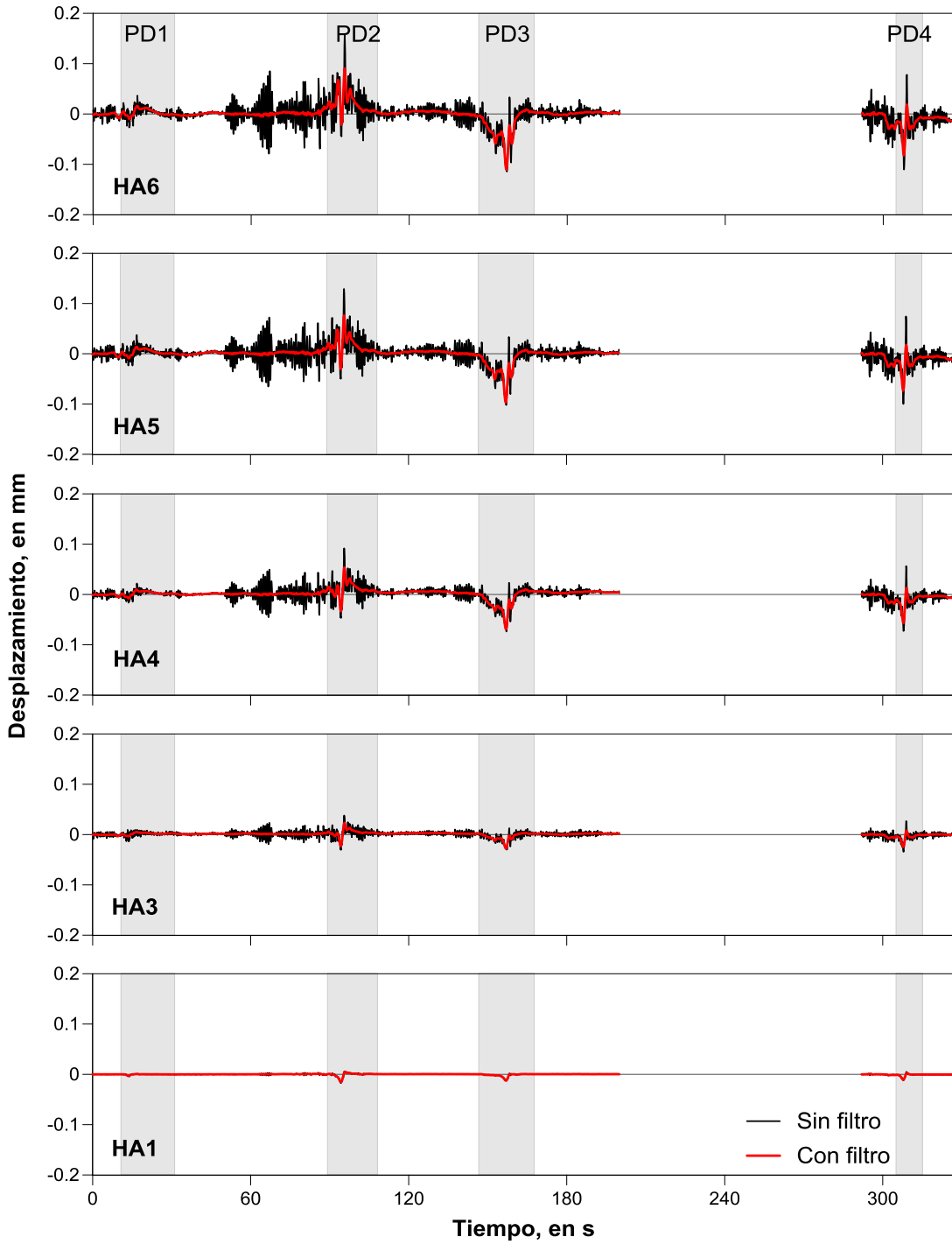


Figura C.1 – Historia de las señales de los instrumentos horizontales en la columna A240 de las pruebas dinámicas PD1, PD2, PD3 y PD4. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

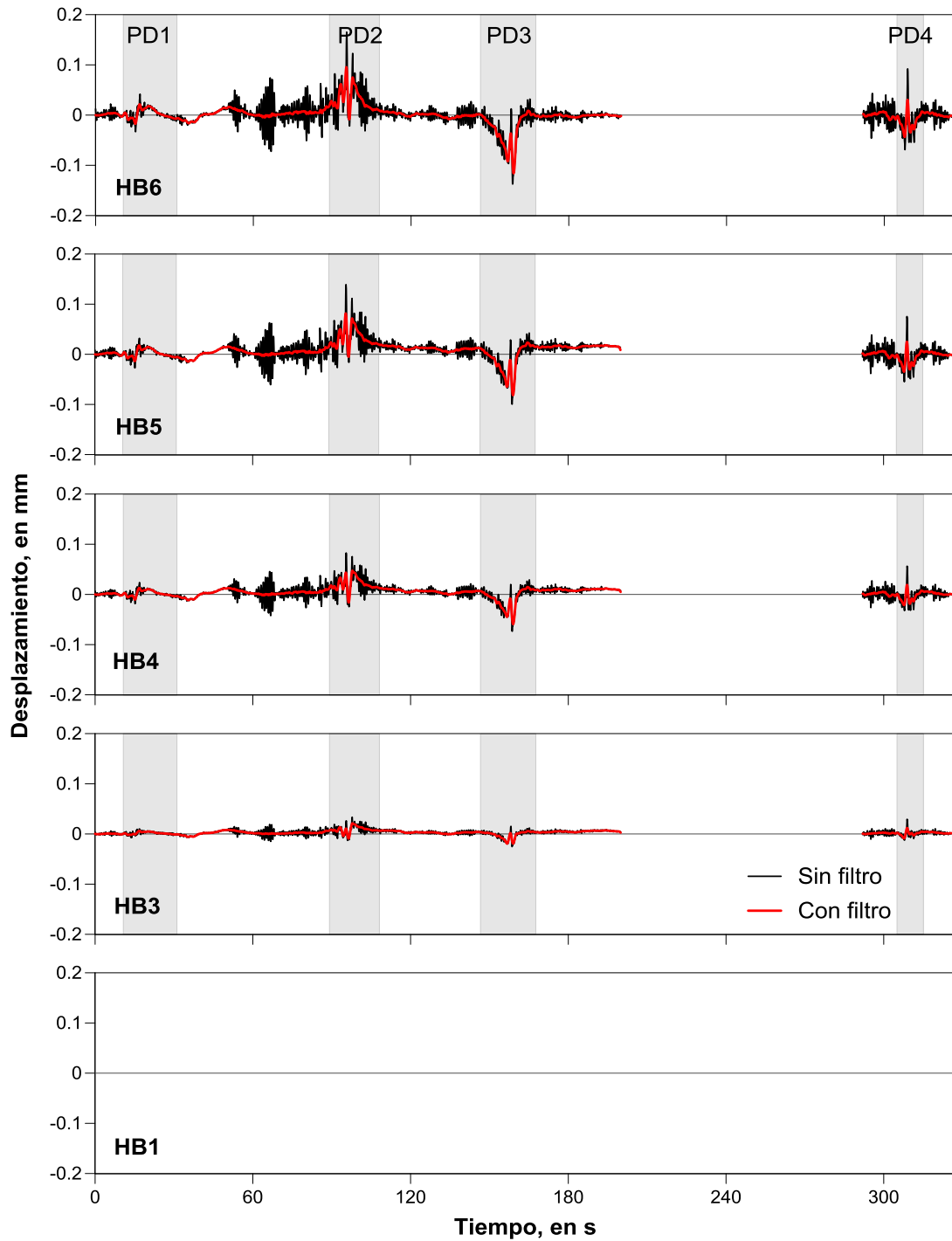


Figura C.2 – Historia de las señales de los instrumentos horizontales en la columna A241 de las pruebas dinámicas PD1, PD2, PD3 y PD4. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

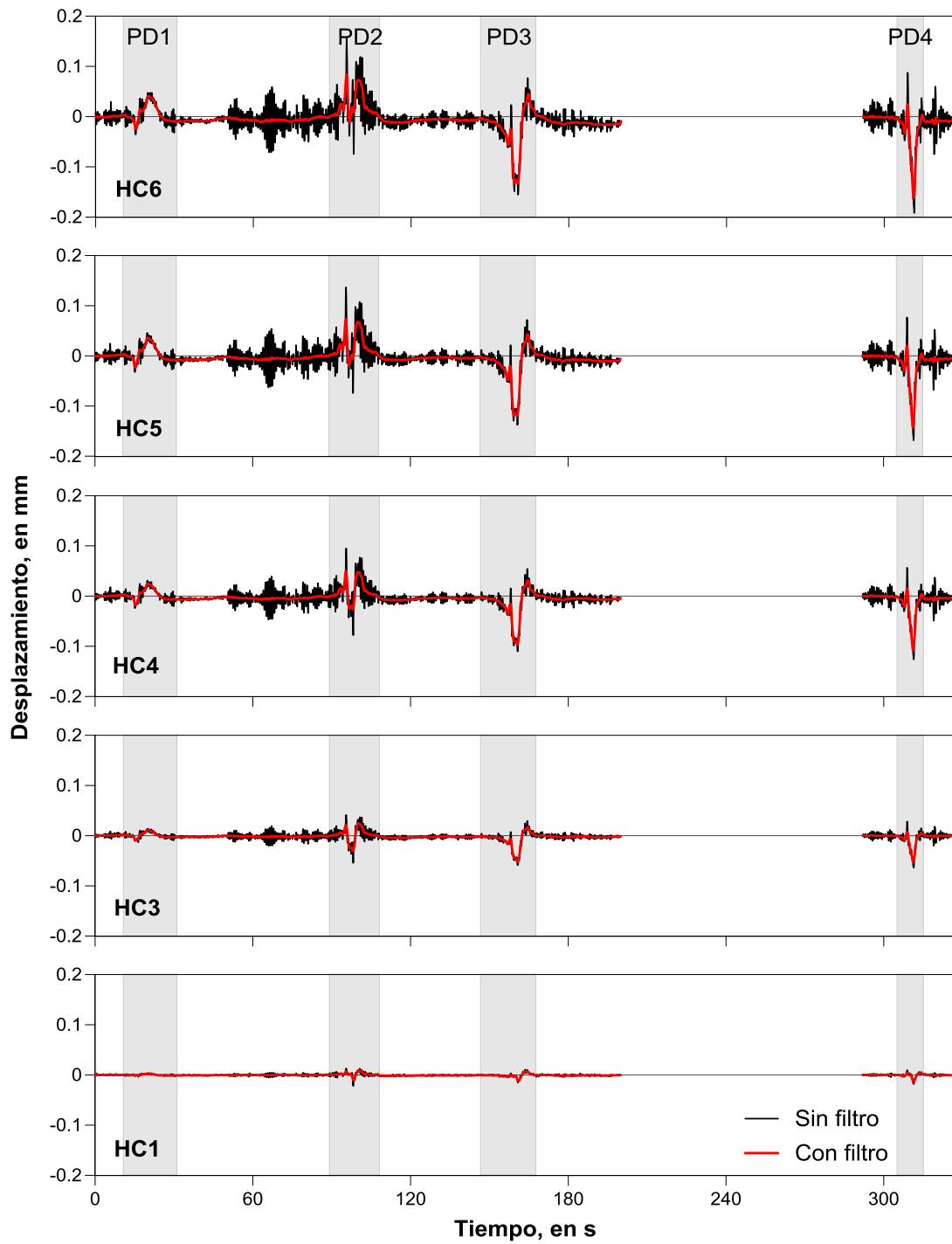


Figura C.3 – Historia de las señales de los instrumentos horizontales en la columna A242 de las pruebas dinámicas PD1, PD2, PD3 y PD4. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

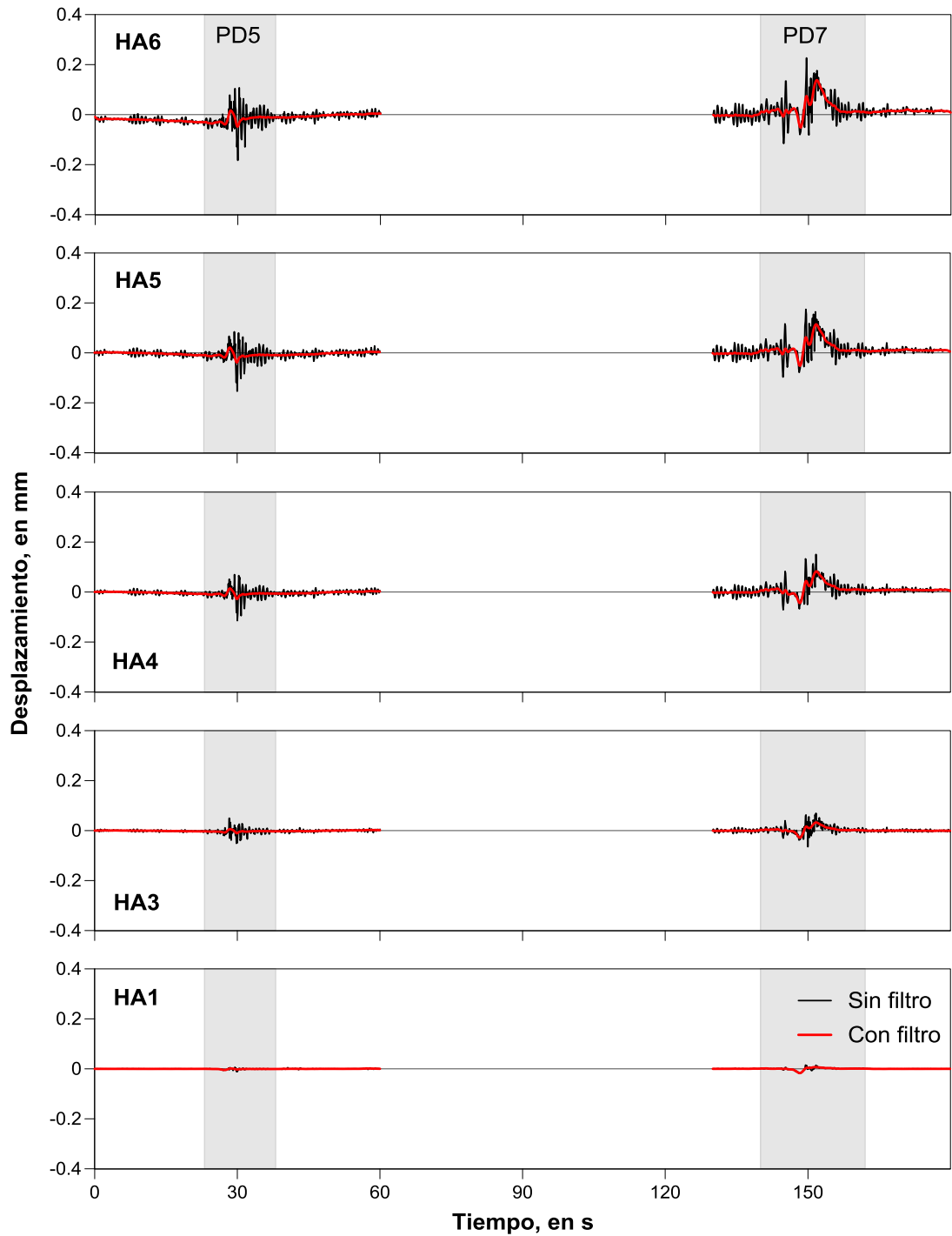


Figura C.4 – Historia de las señales de los instrumentos horizontales en la columna A240 de las pruebas dinámicas PD5 y PD7. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

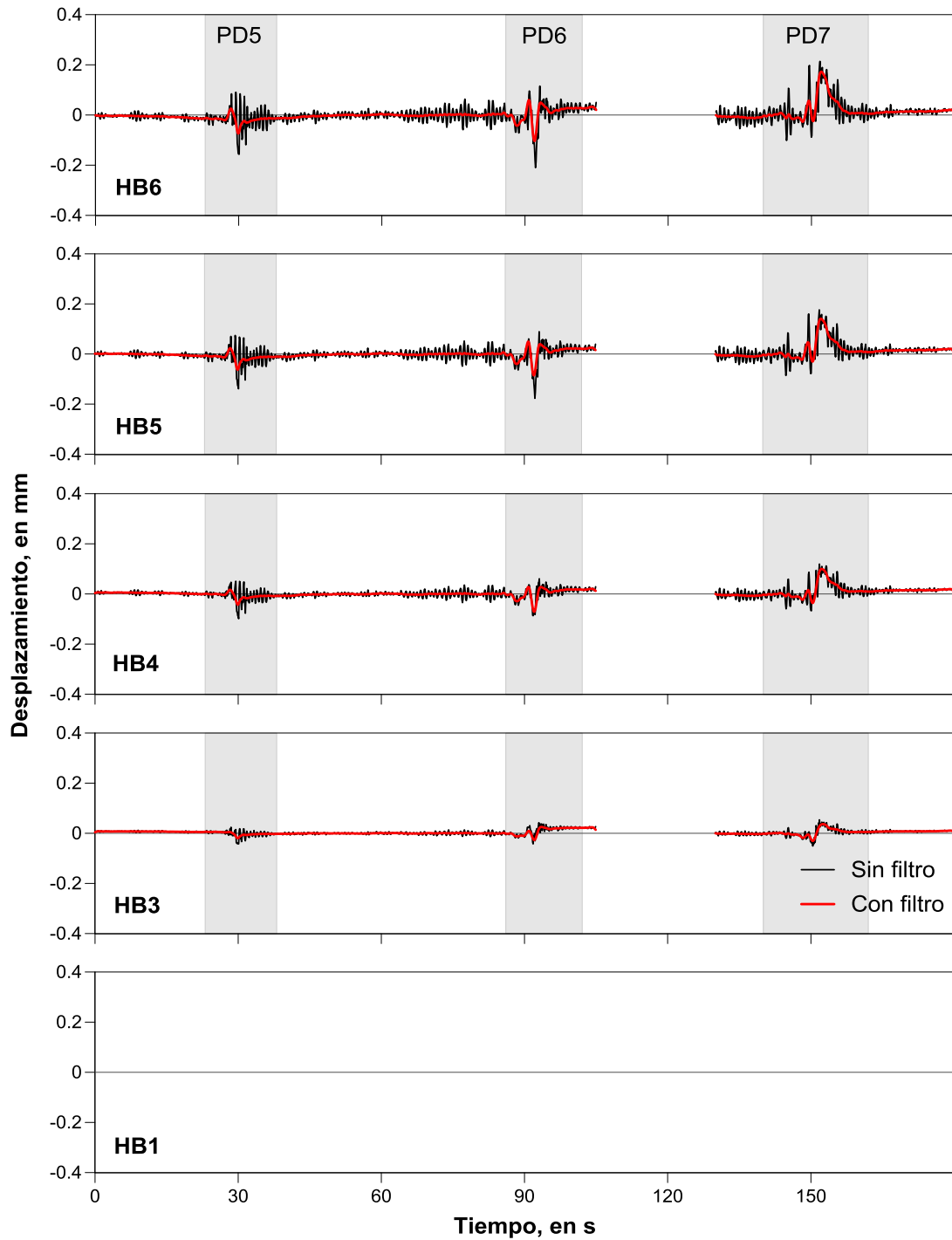


Figura C.5 – Historia de las señales de los instrumentos horizontales en la columna A241 de las pruebas dinámicas PD5, PD6 y PD7. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

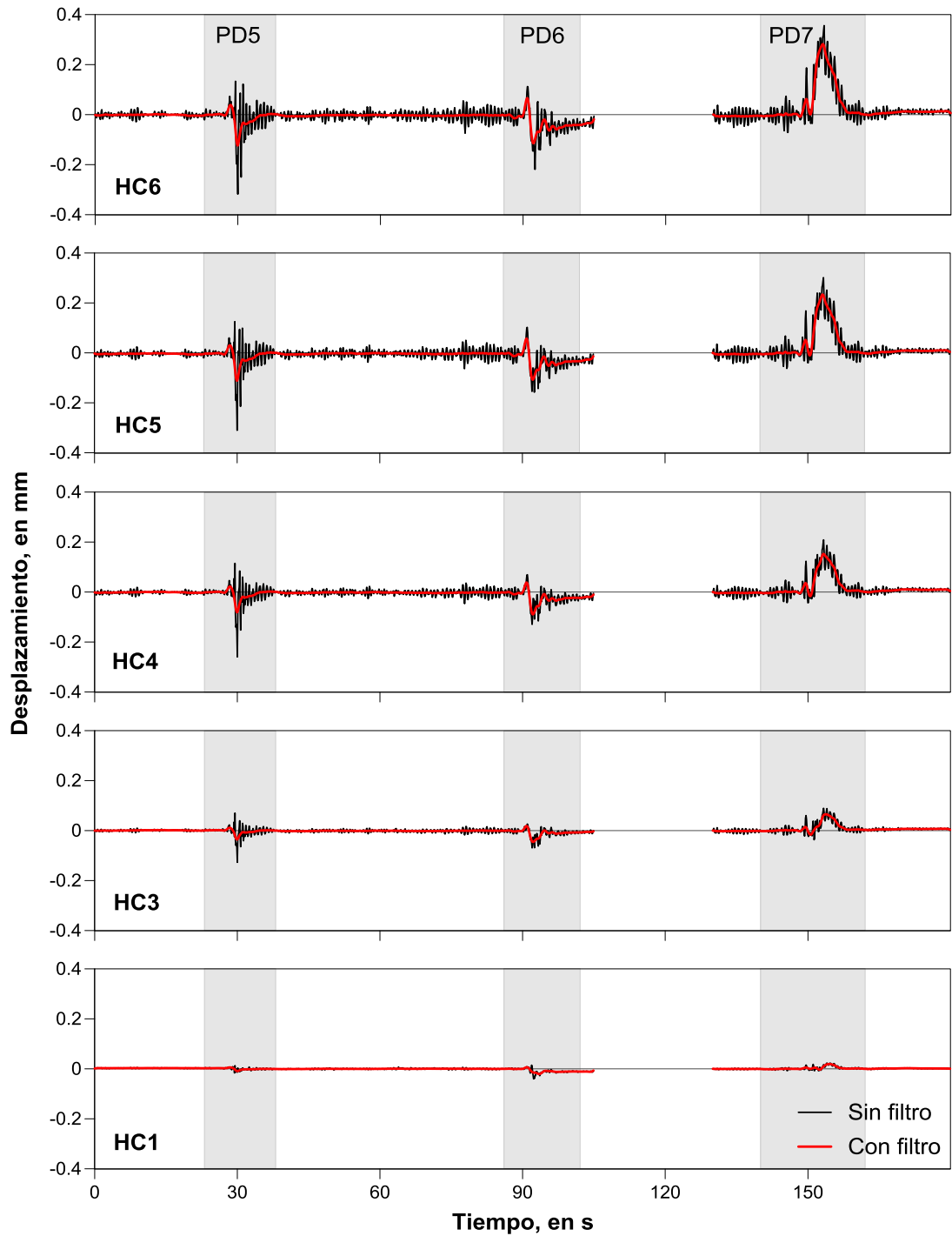


Figura C.6 – Historia de las señales, de los instrumentos horizontales en la columna A242 de las pruebas dinámicas PD5, PD6 y PD7. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición



### C.2. Verticales

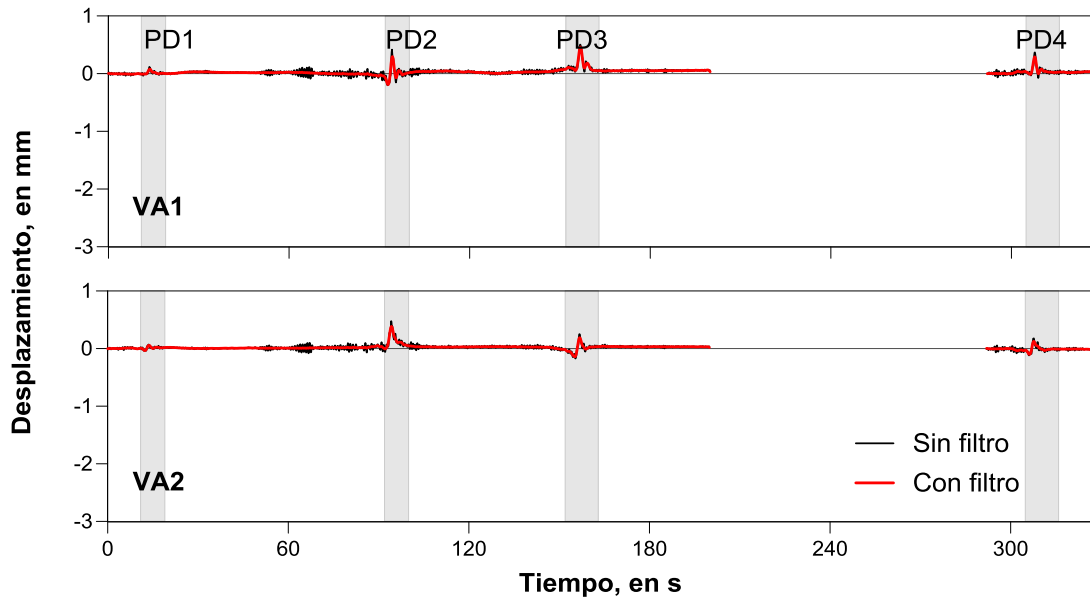


Figura C.7 – Historia de las señales de los instrumentos verticales en el eje A240 de las pruebas dinámicas PD1, PD2, PD3 y PD4. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

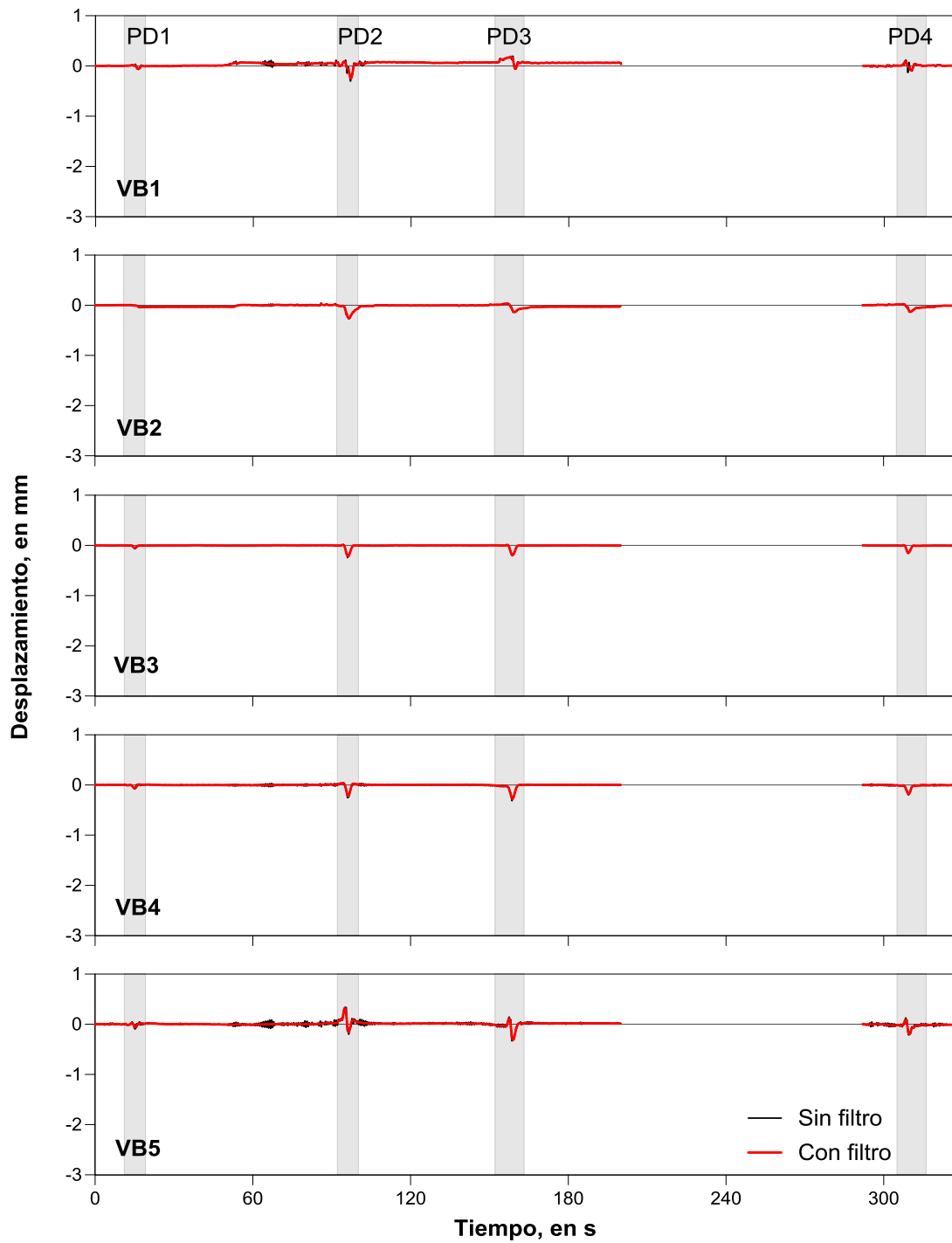


Figura C.8 – Historia de las señales de los instrumentos verticales en el eje A241 de las pruebas dinámicas PD1, PD2, PD3 y PD4. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

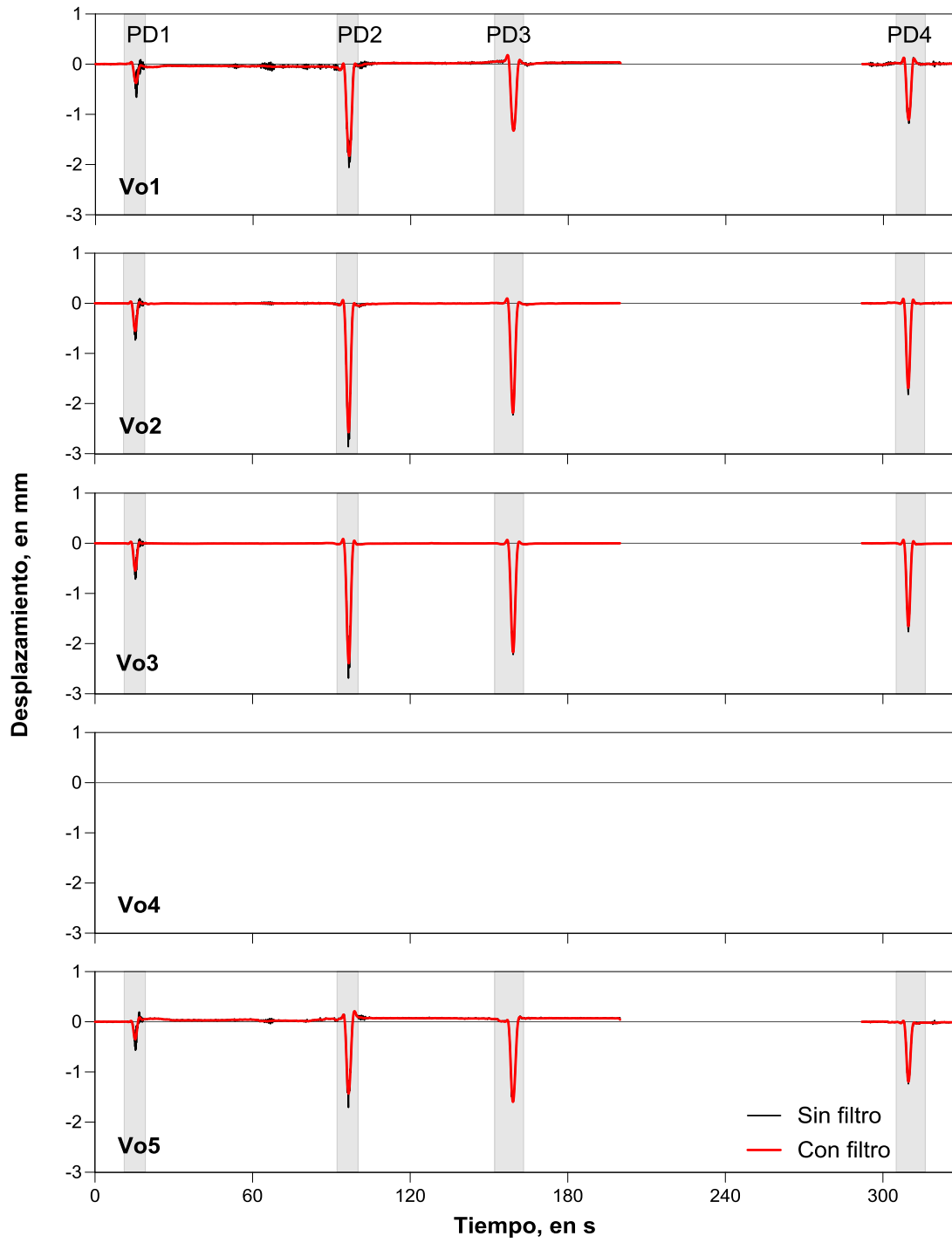


Figura C.9 – Historia de las señales de los instrumentos verticales en el eje centro del claro de las pruebas dinámicas PD1, PD2, PD3 y PD4. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

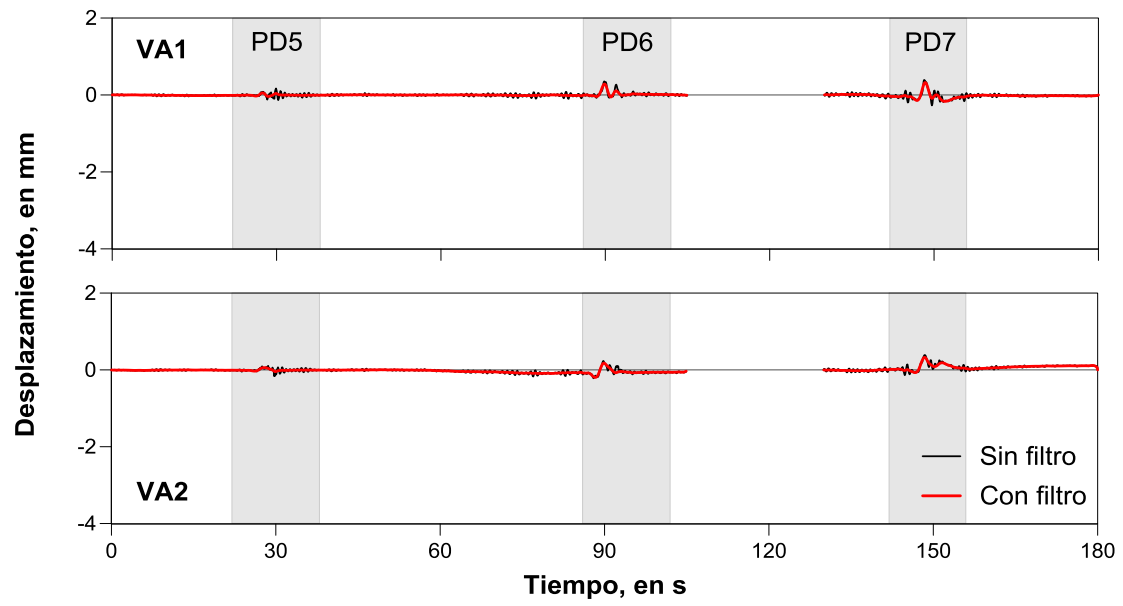


Figura C.10 – Historia de las señales de los instrumentos verticales en el eje A240 de las pruebas dinámicas PD5, PD6 y PD7. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

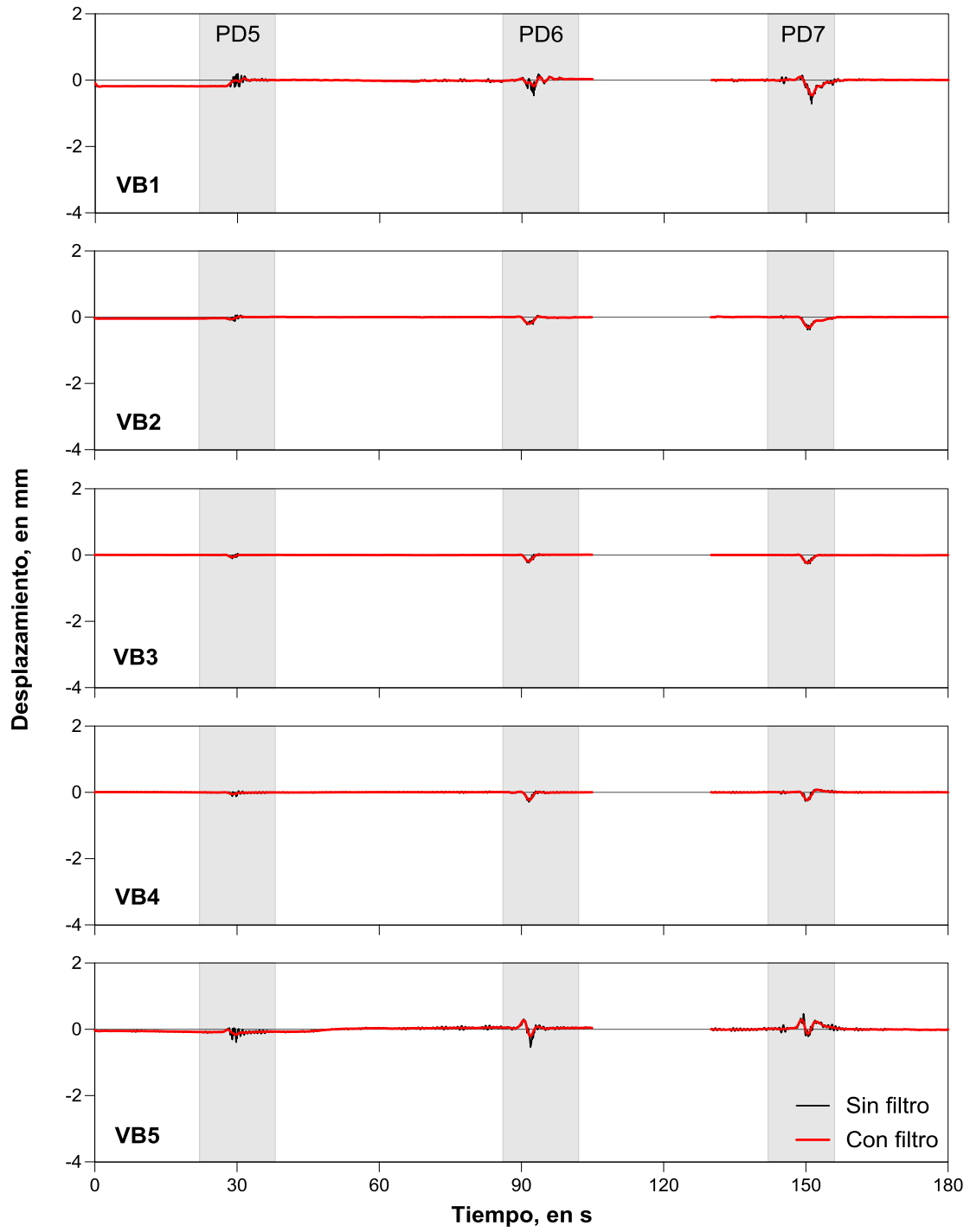


Figura C.11 – Historia de las señales de los instrumentos verticales en el eje A241 de las pruebas dinámicas PD5, PD6 y PD7. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

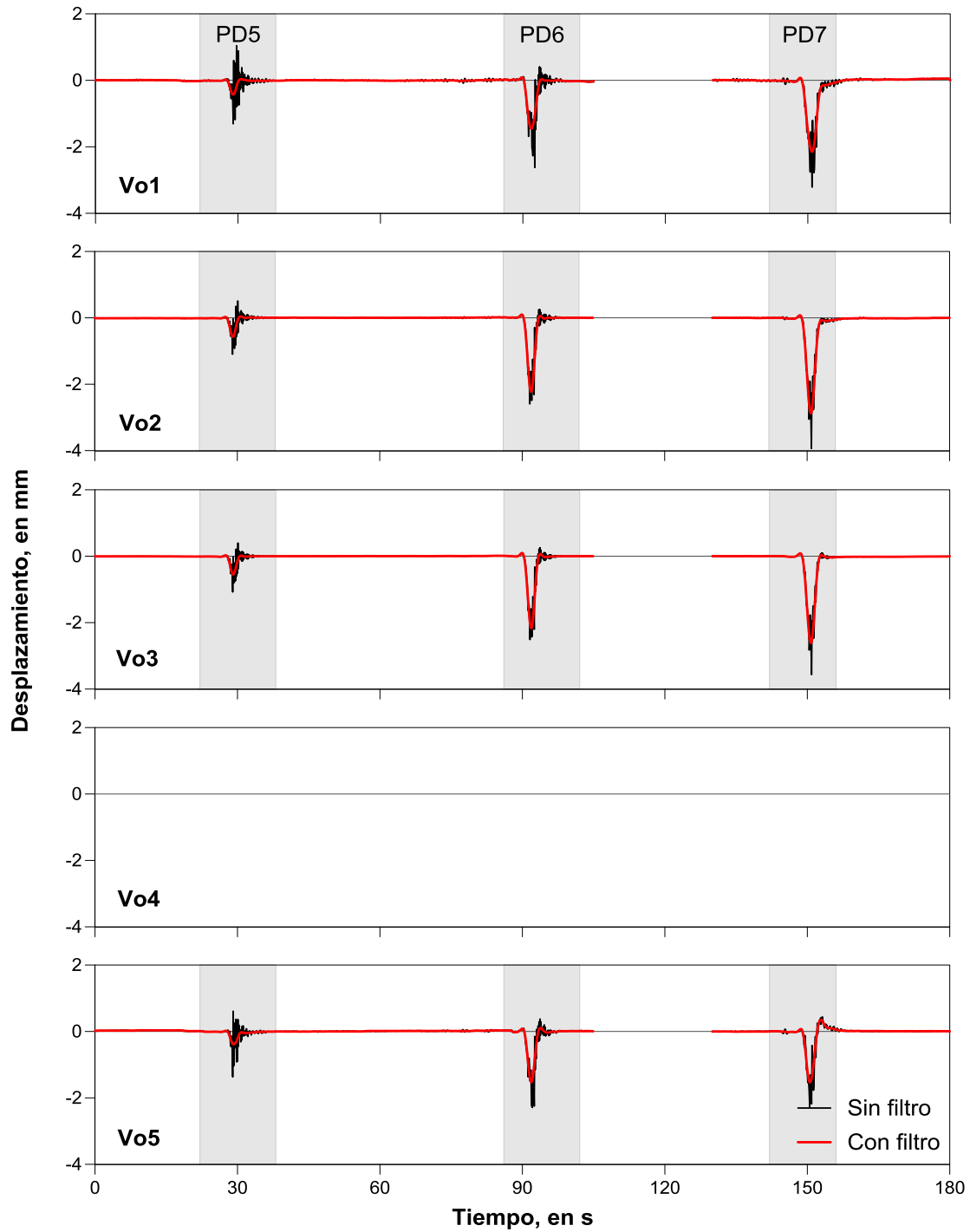


Figura C.12 – Historia de las señales de los instrumentos verticales en el eje centro del claro de las pruebas dinámicas PD5, PD6 y PD7. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

### C.3. Potenciómetros

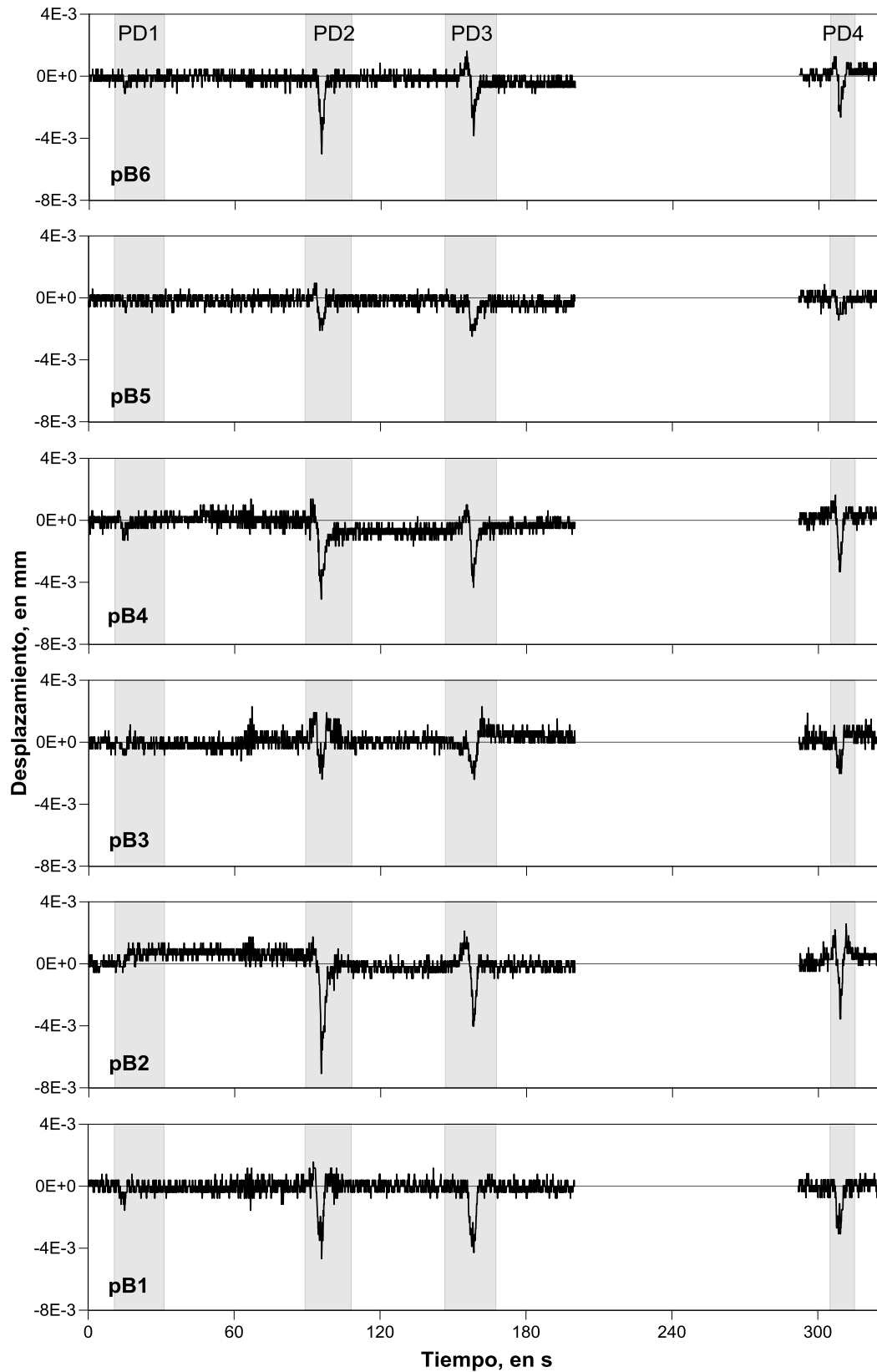


Figura C.13 - Historia de las señales de los potenciómetros en el eje A241 de las pruebas dinámicas PD1, PD2, PD3 y PD4. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición

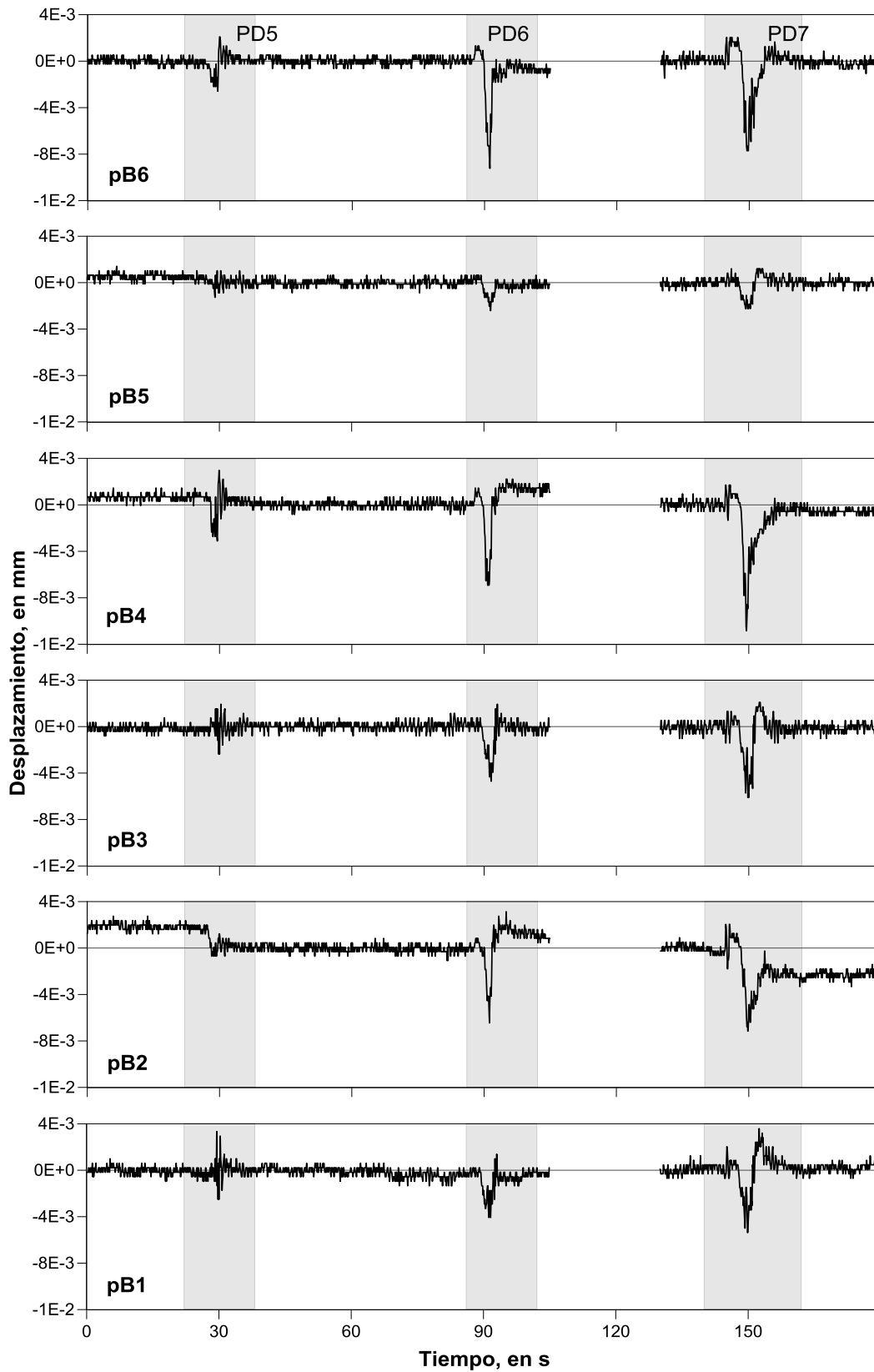


Figura C.14 - Historia de las señales de los potenciómetros en el eje A241 de las pruebas dinámicas PD5, PD6 y PD7. Las zonas sombreadas indican los intervalos de medición



**C.4. FAD**

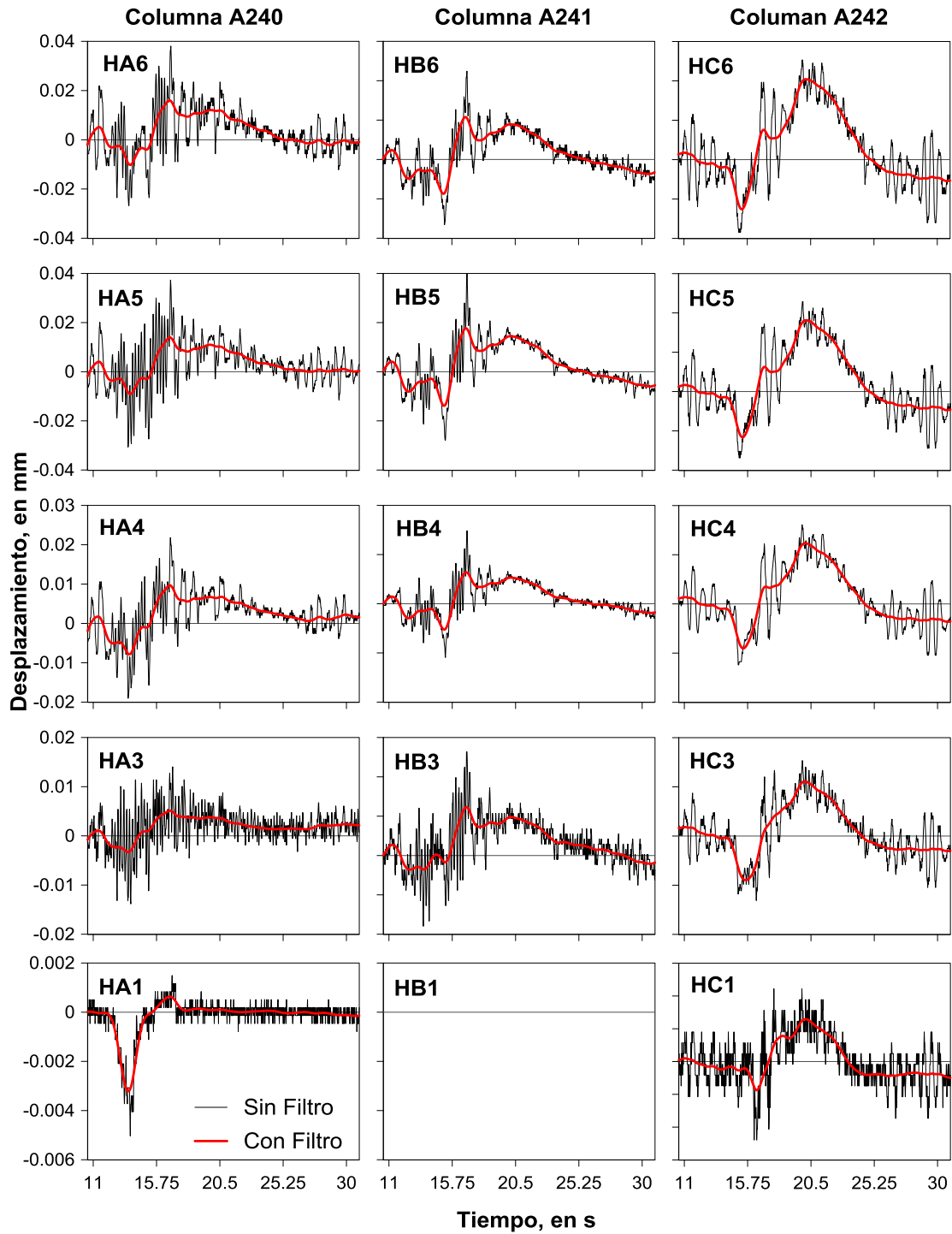


Figura C.15 – Comparación de los registros de los desplazamientos laterales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD1

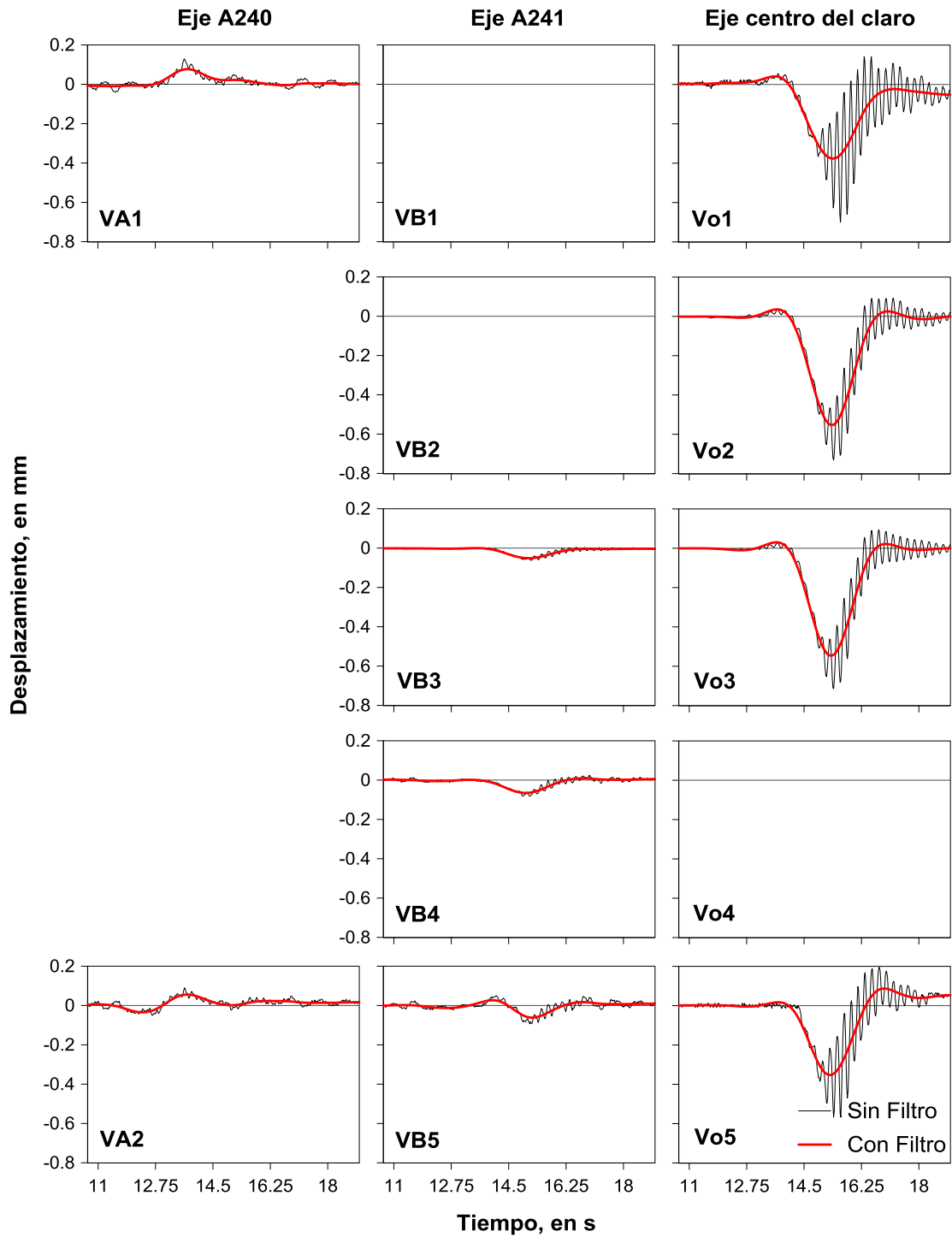


Figura C.16 – Comparación de los registros de los desplazamientos verticales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD1

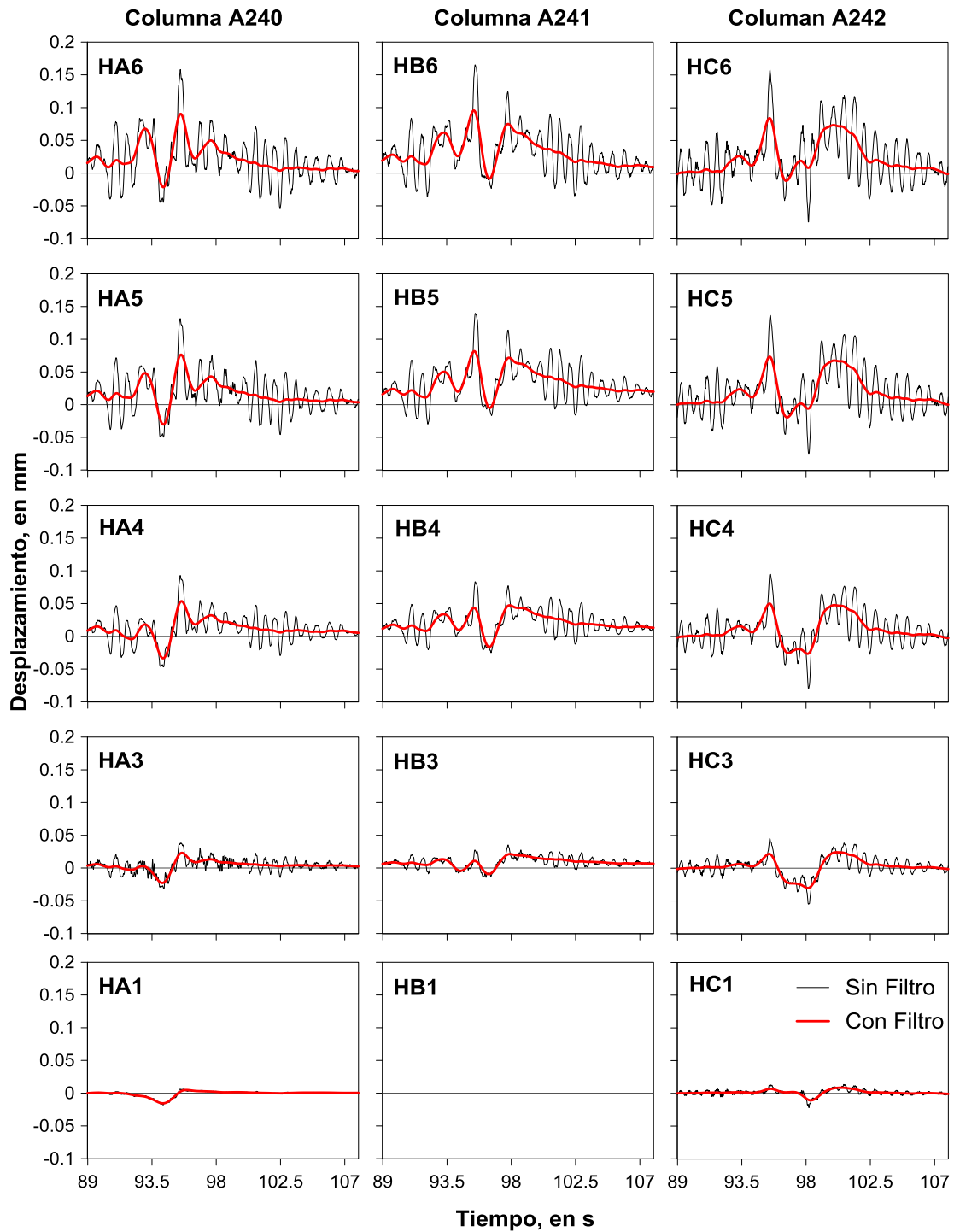


Figura C.17 – Comparación de los registros de los desplazamientos laterales con filtrado y sin filtrado de la prueba dinámica PD2

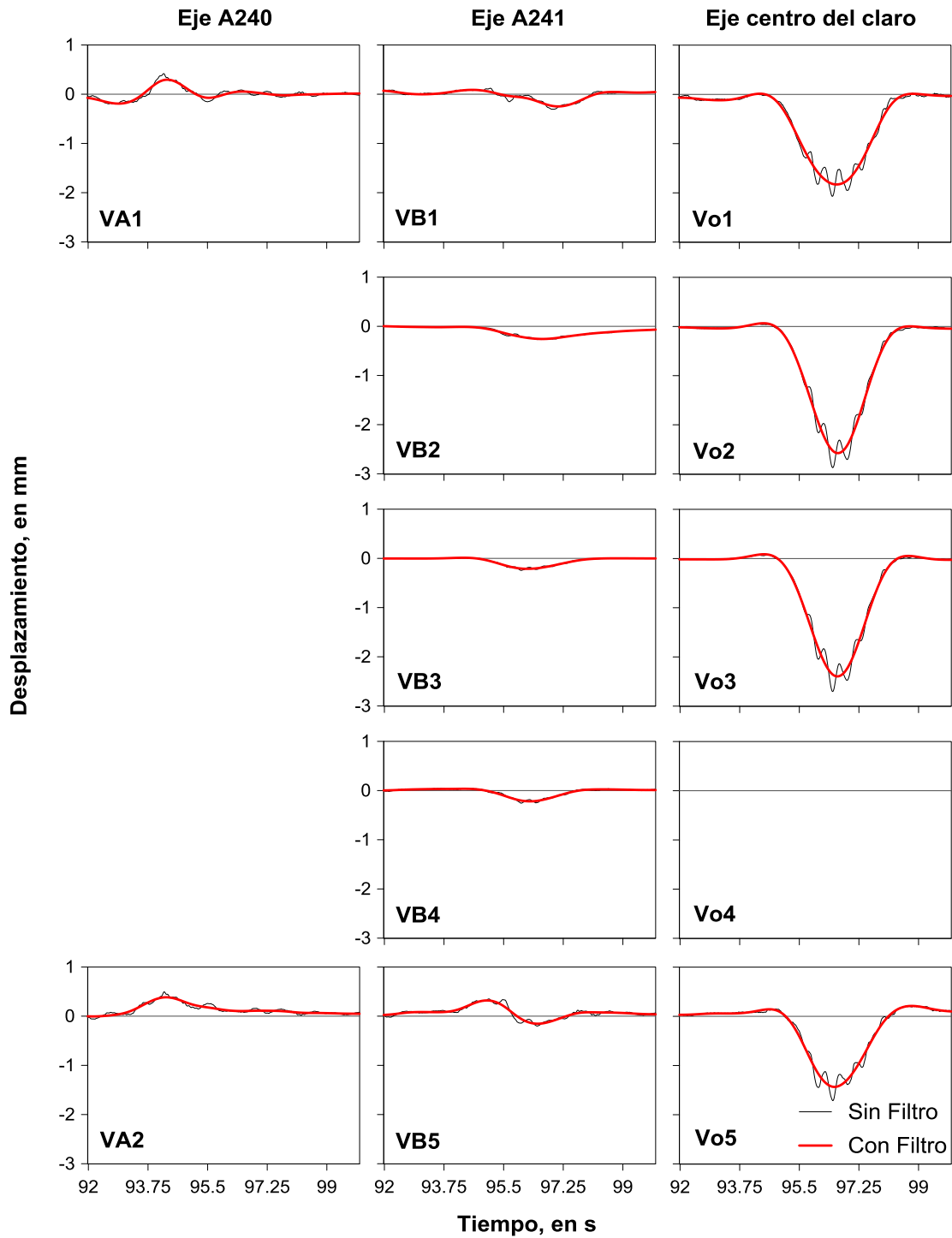


Figura C.18 – Comparación de los registros de los desplazamientos verticales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD2

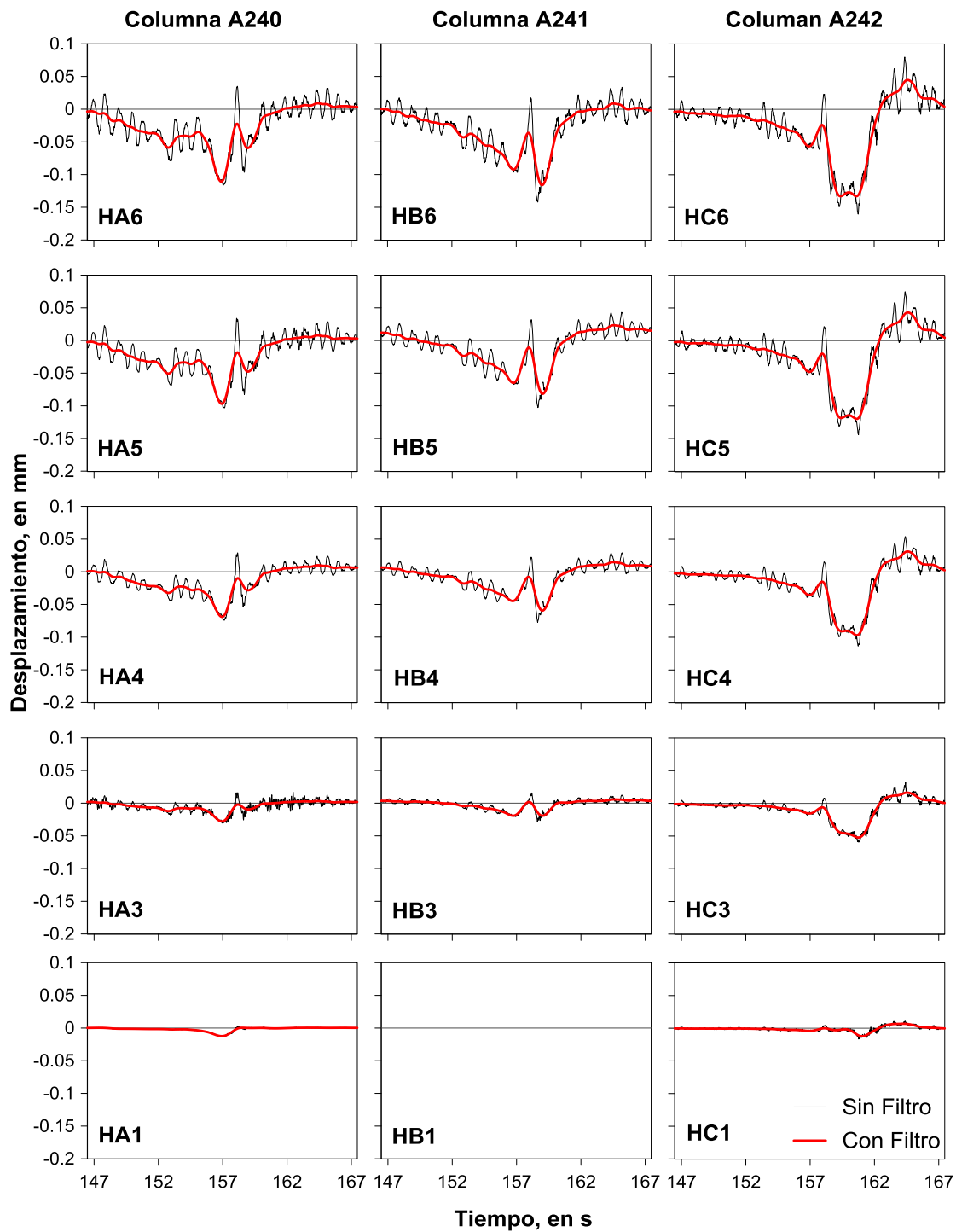


Figura C.19 – Comparación de los registros de los desplazamientos laterales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD3

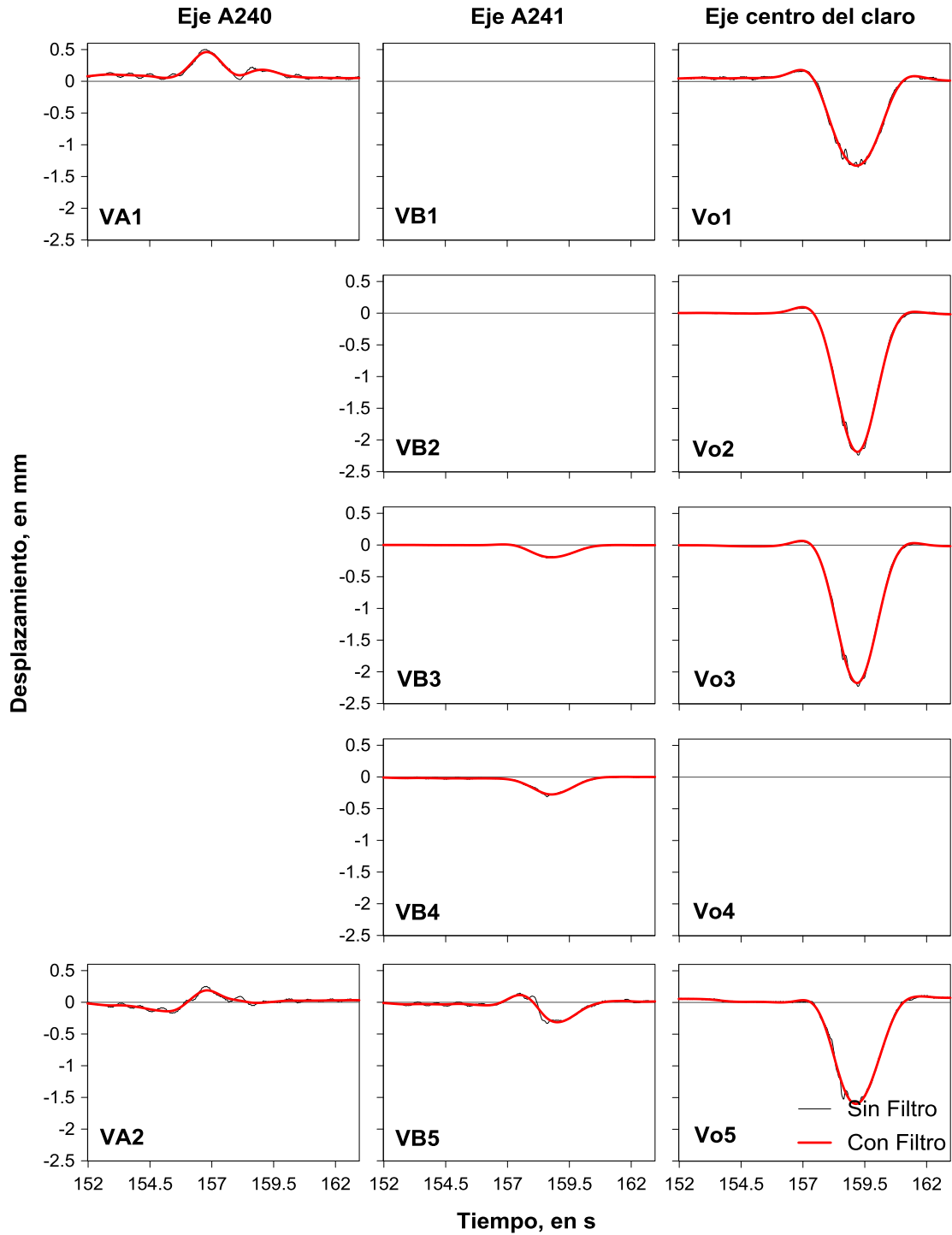


Figura C.20 – Comparación de los registros de los desplazamientos verticales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD3

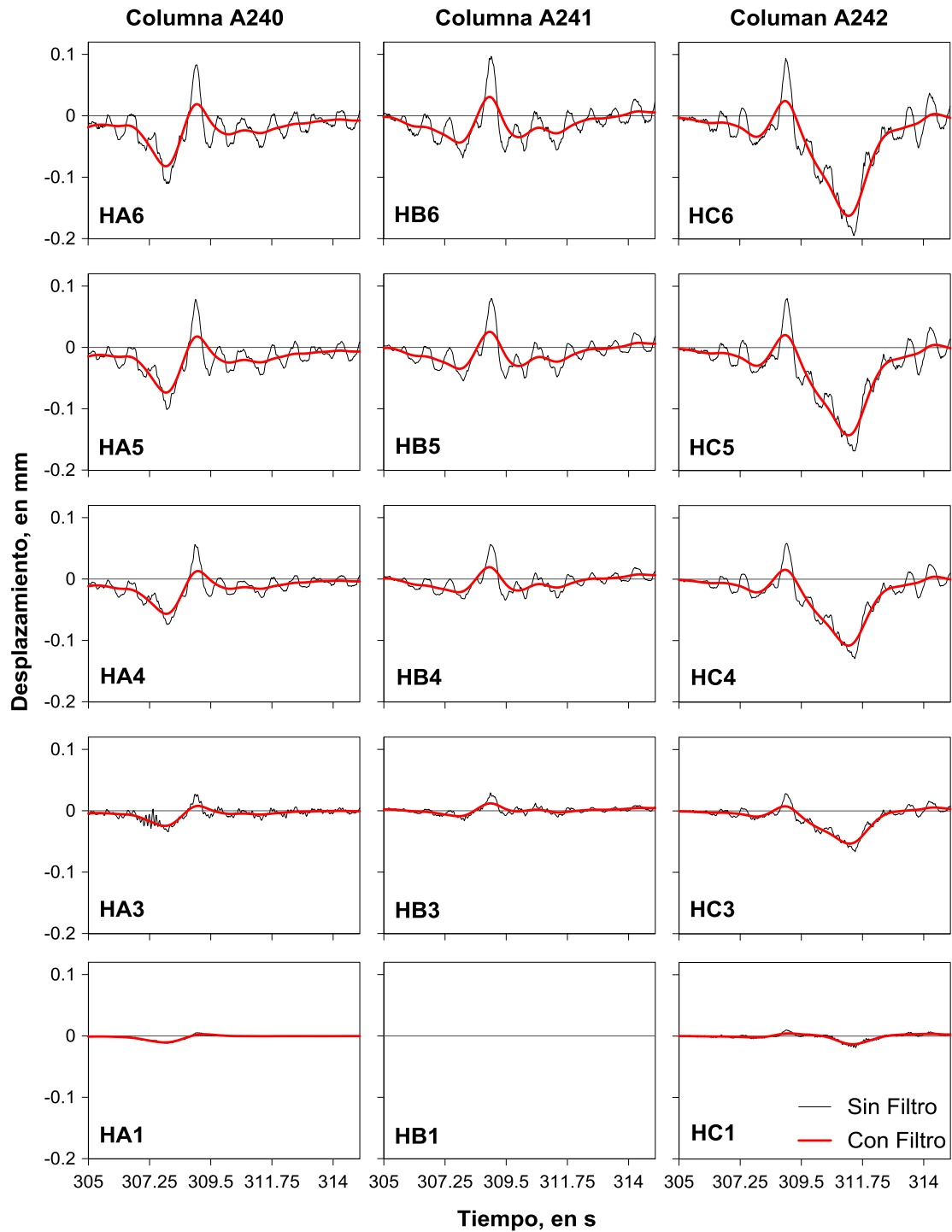


Figura C.21 – Comparación de los registros de los desplazamientos laterales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD4

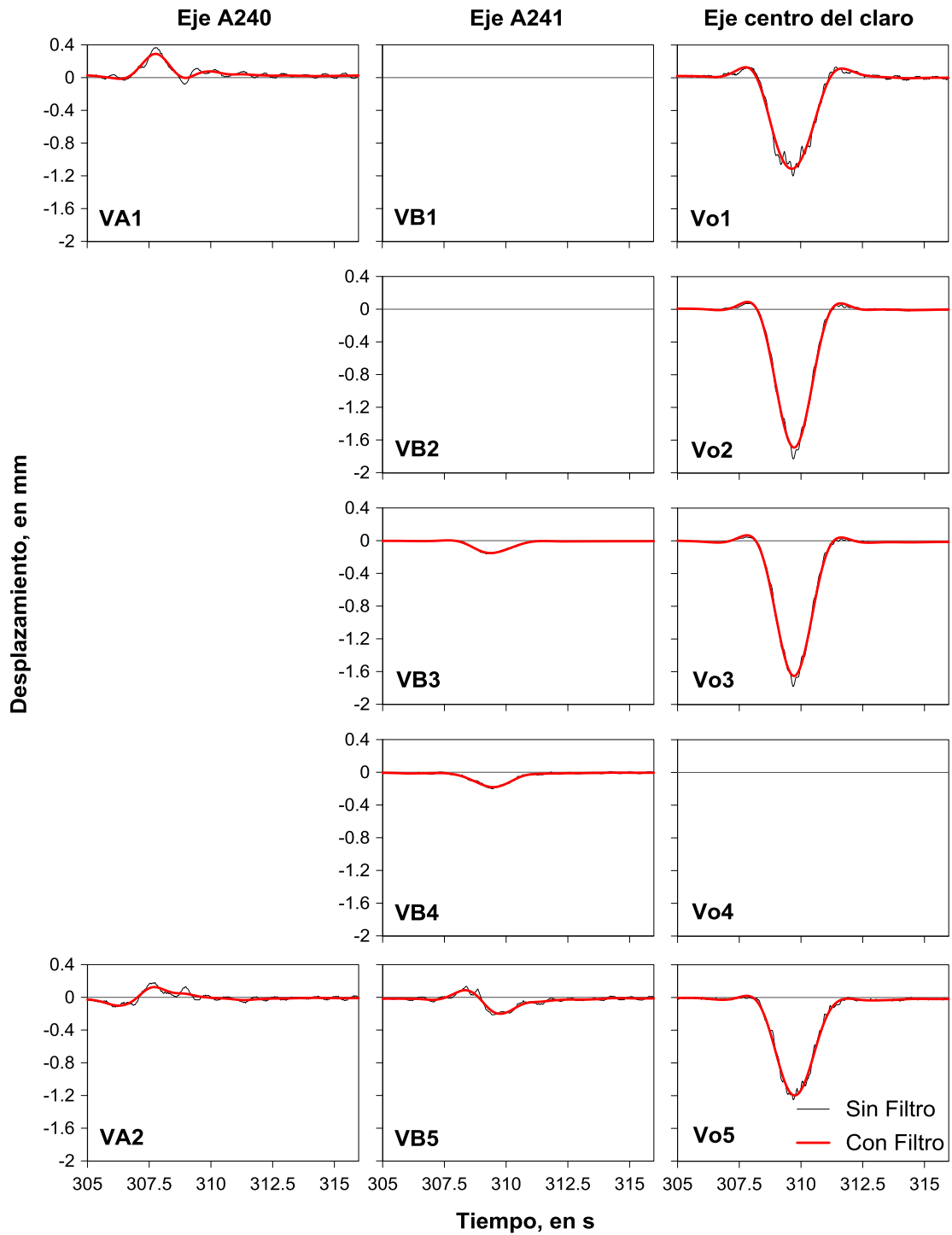


Figura C.22 – Comparación de los registros de los desplazamientos verticales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD4



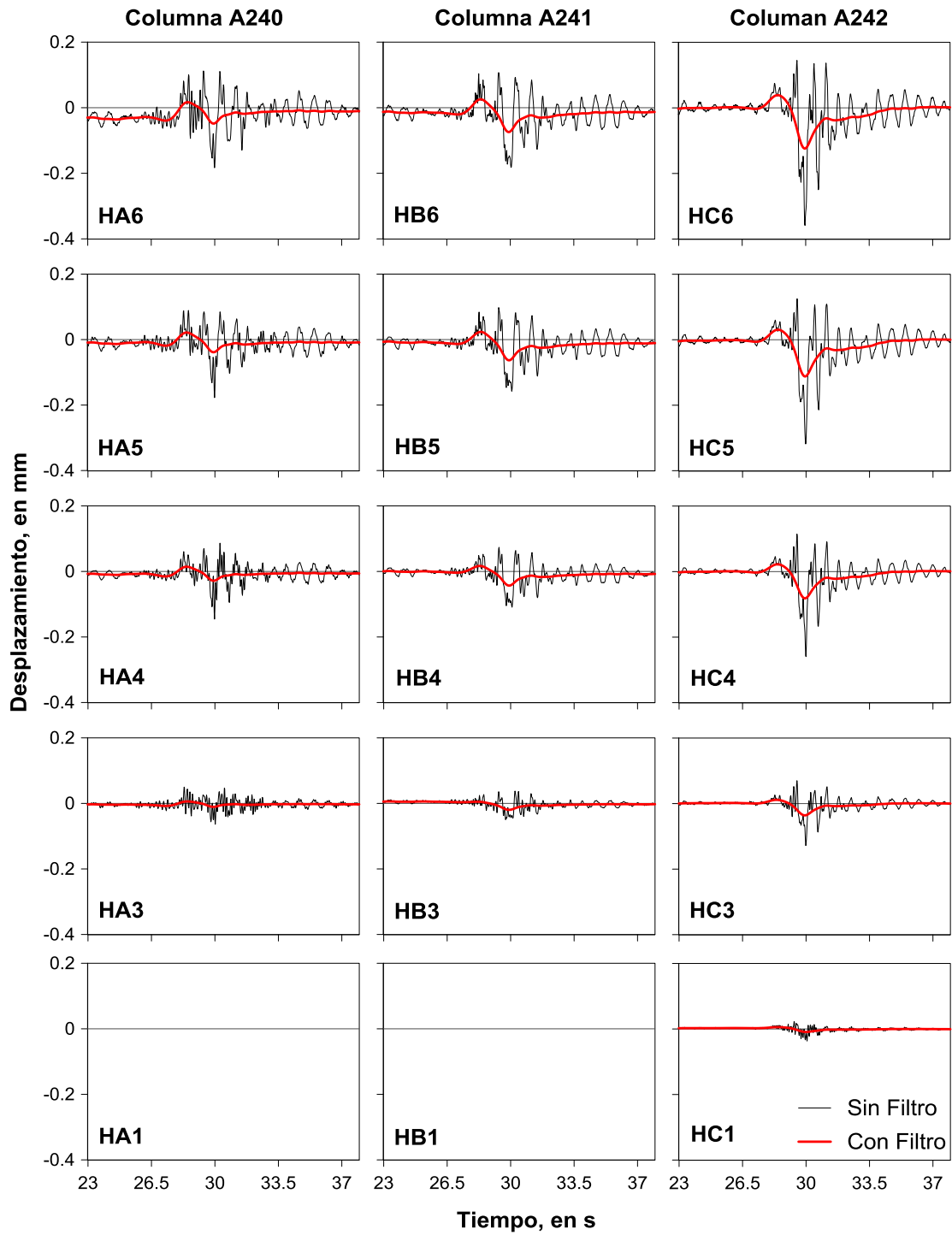


Figura C.23 – Comparación de los registros de los desplazamientos laterales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD5

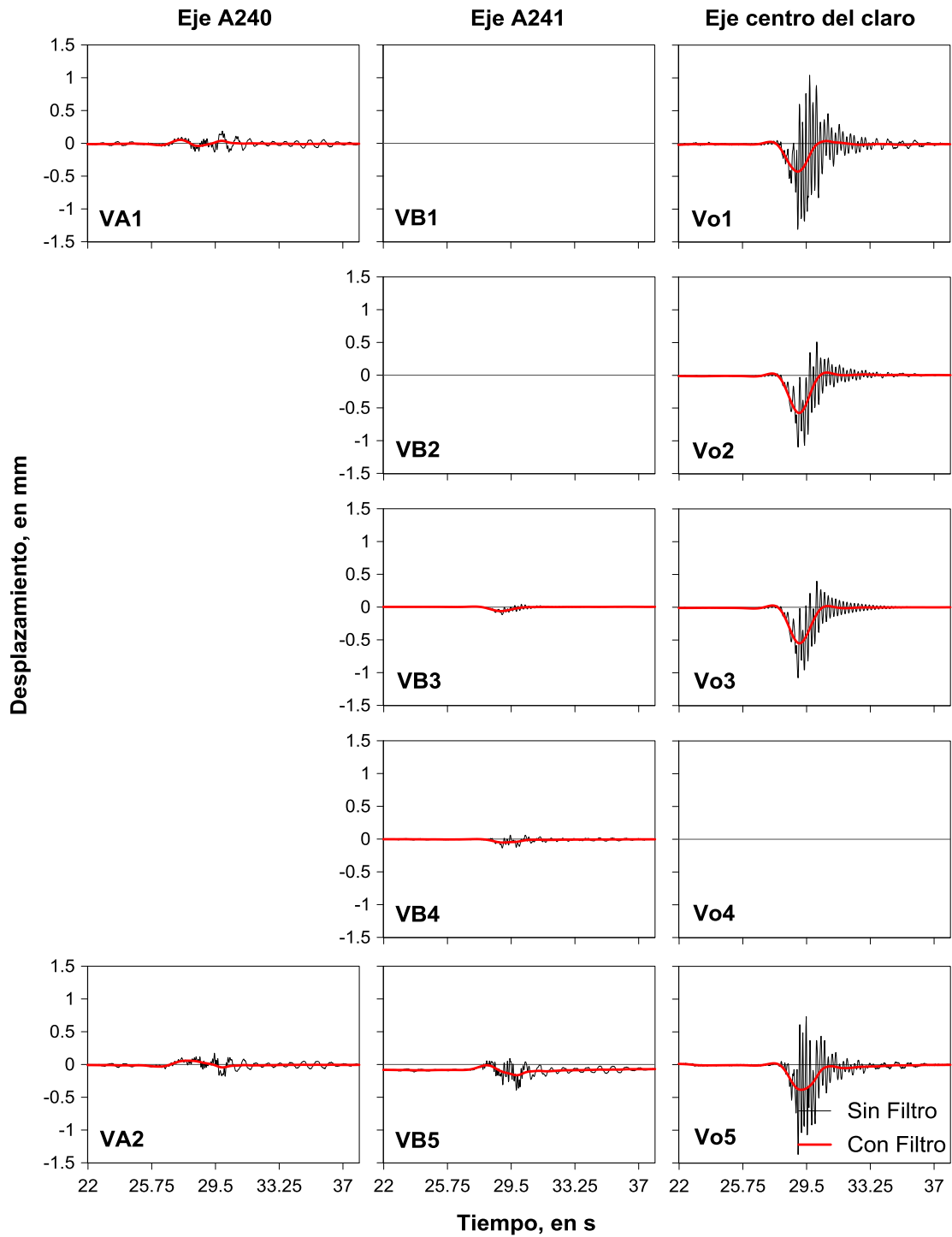


Figura C.24 – Comparación de los registros de los desplazamientos verticales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD5

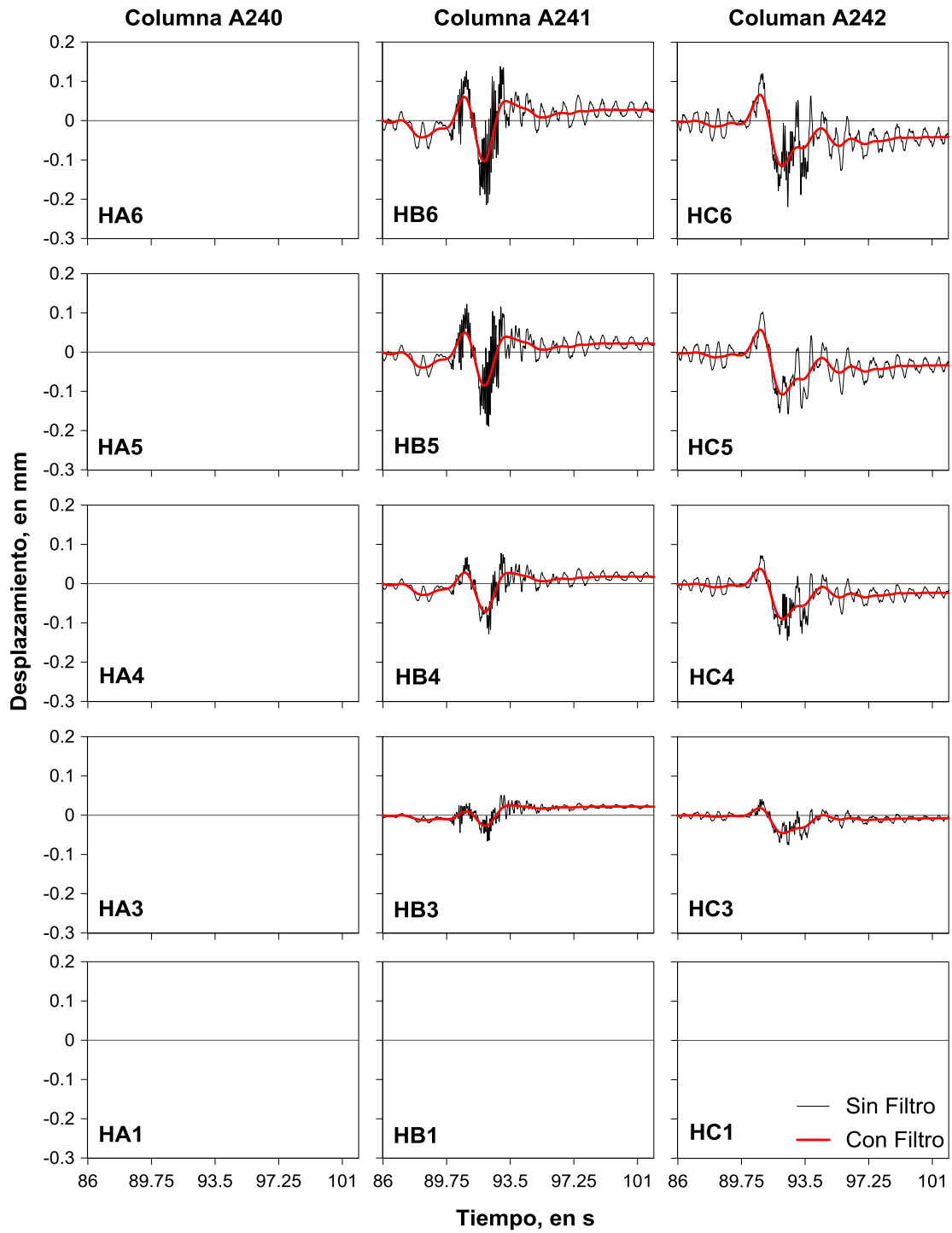


Figura C.25 – Comparación de los registros de los desplazamientos laterales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD6

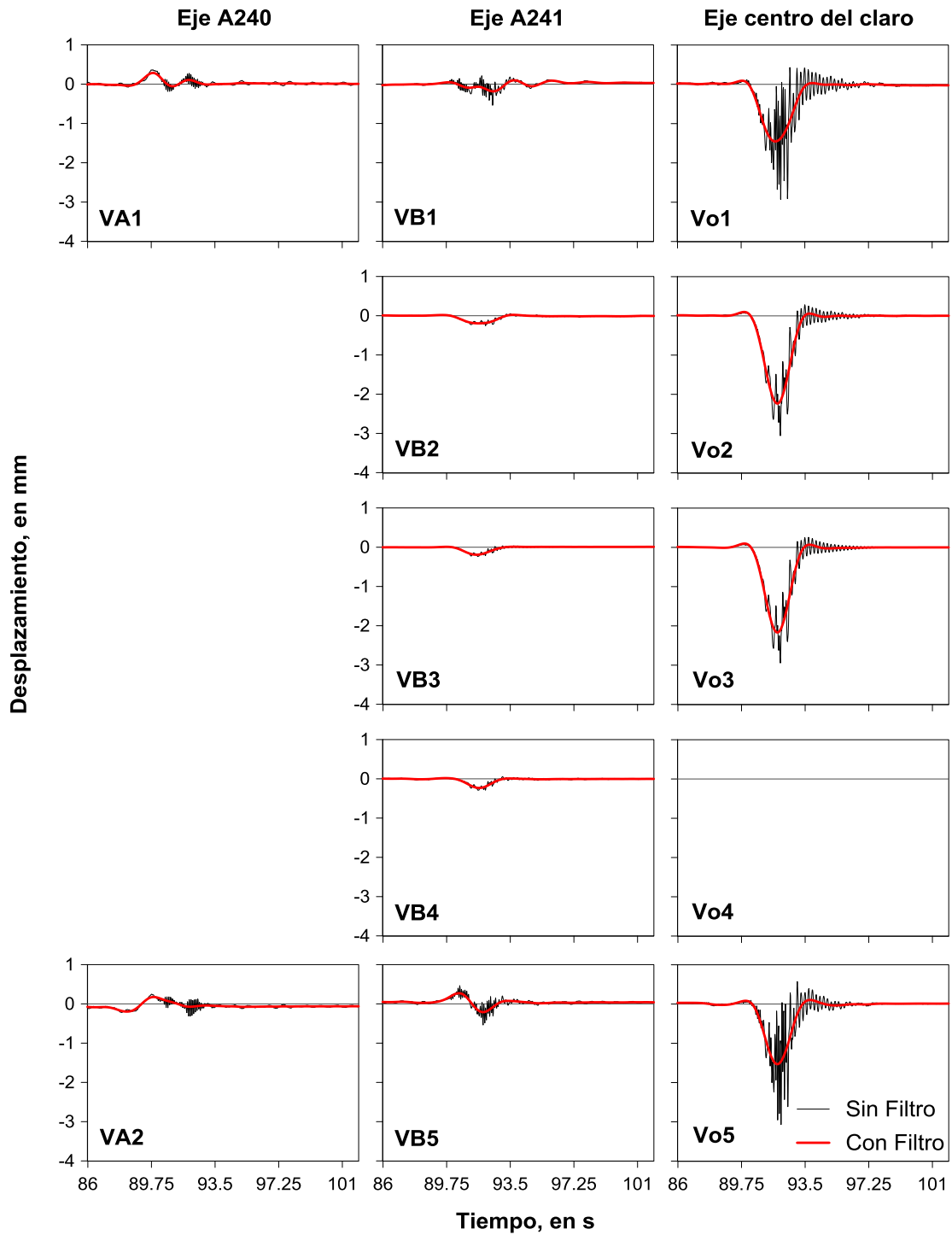


Figura C.26 – Comparación de los registros de los desplazamientos verticales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD6

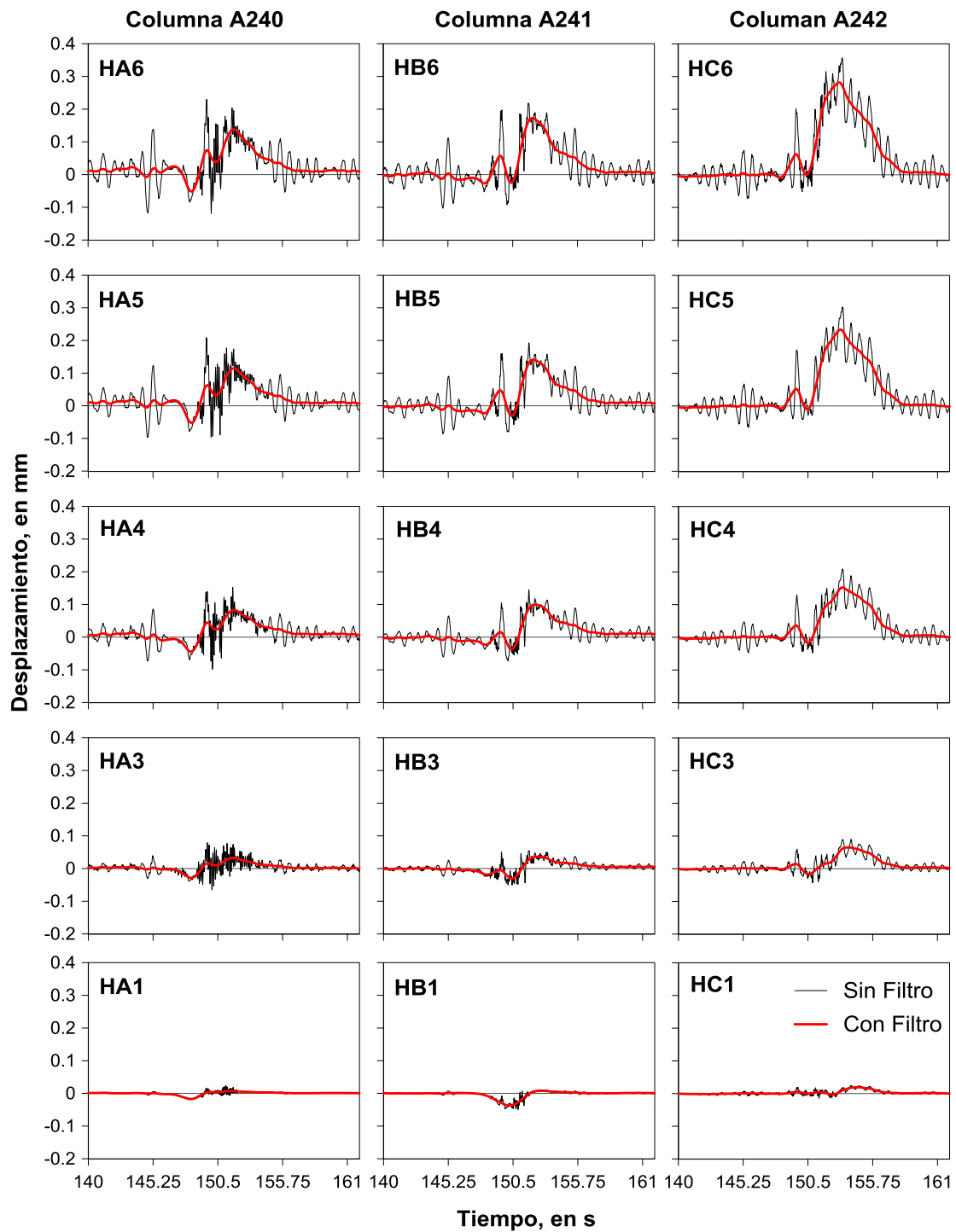


Figura C.27 – Comparación de los registros de los desplazamientos laterales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD7

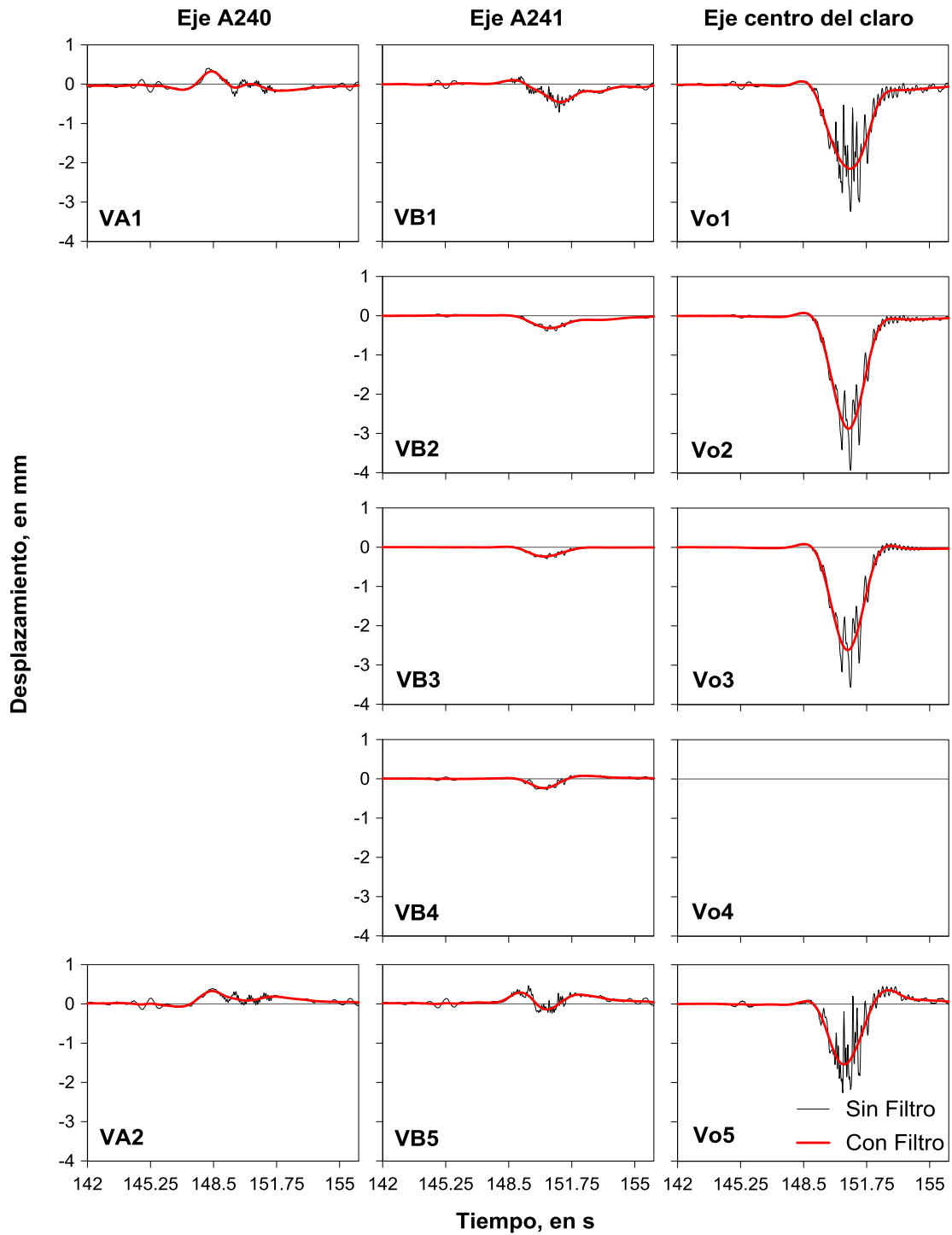


Figura C.28 – Comparación de los registros de los desplazamientos verticales con y sin filtrado de la prueba dinámica PD7

## Apéndice D. Perfiles de Pruebas Dinámicas

### D.1. Horizontales

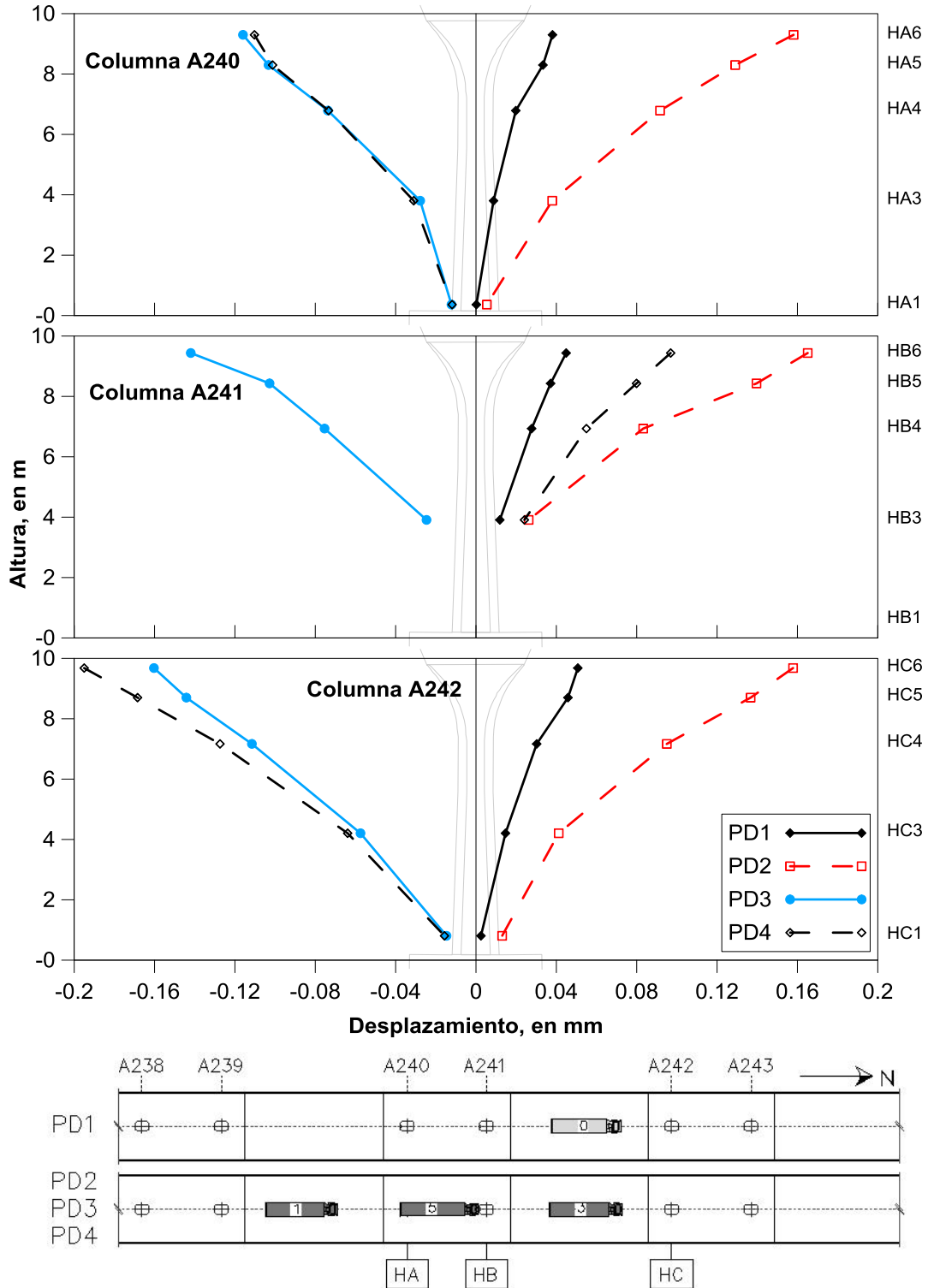


Figura D.1 – Perfiles de las columnas de las pruebas dinámicas PD1, PD2, PD3 y PD4

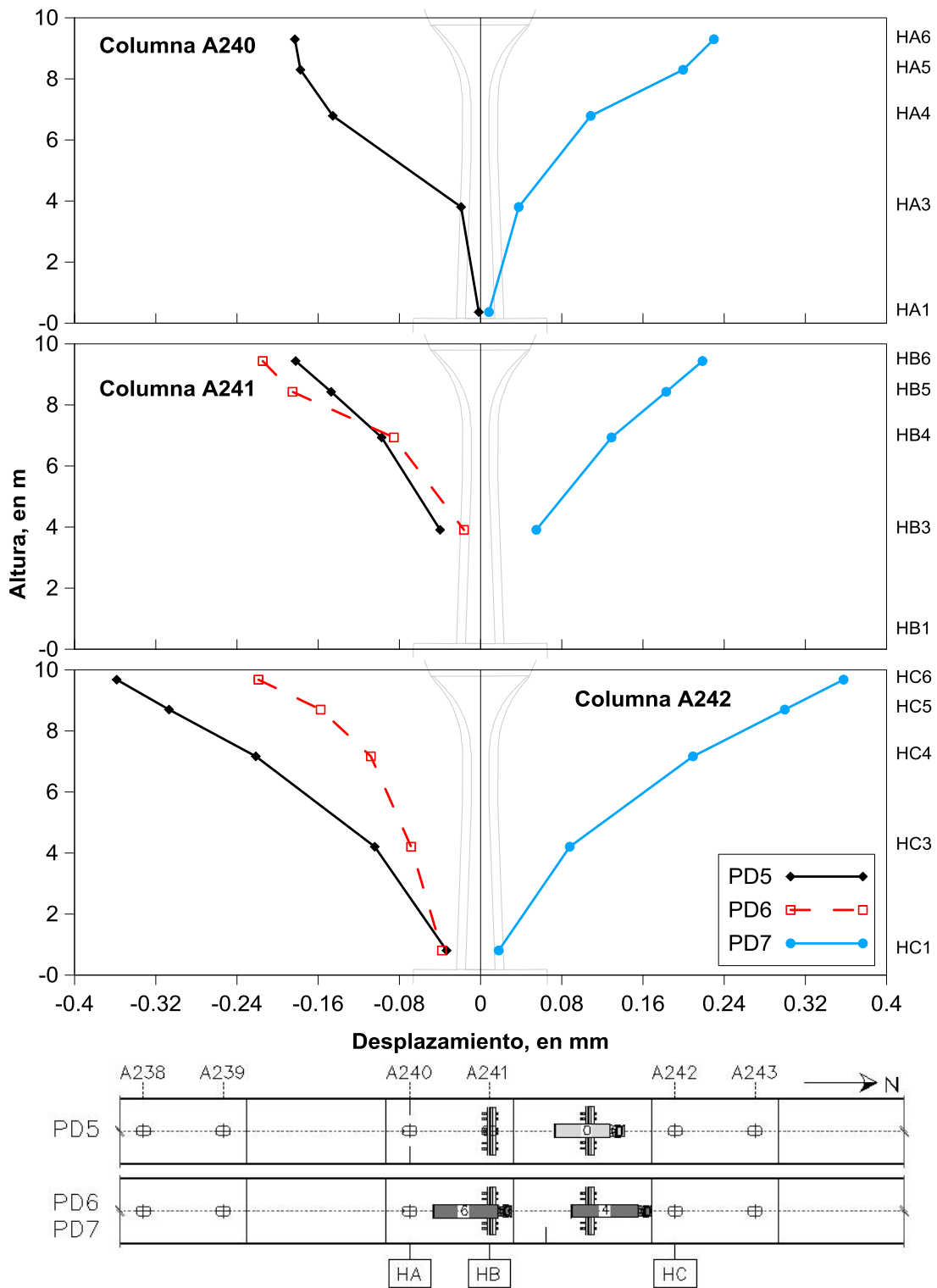


Figura D.2 – Perfiles de las columnas de las pruebas dinámicas PD5, PD6 y PD7



### D.2. Verticales

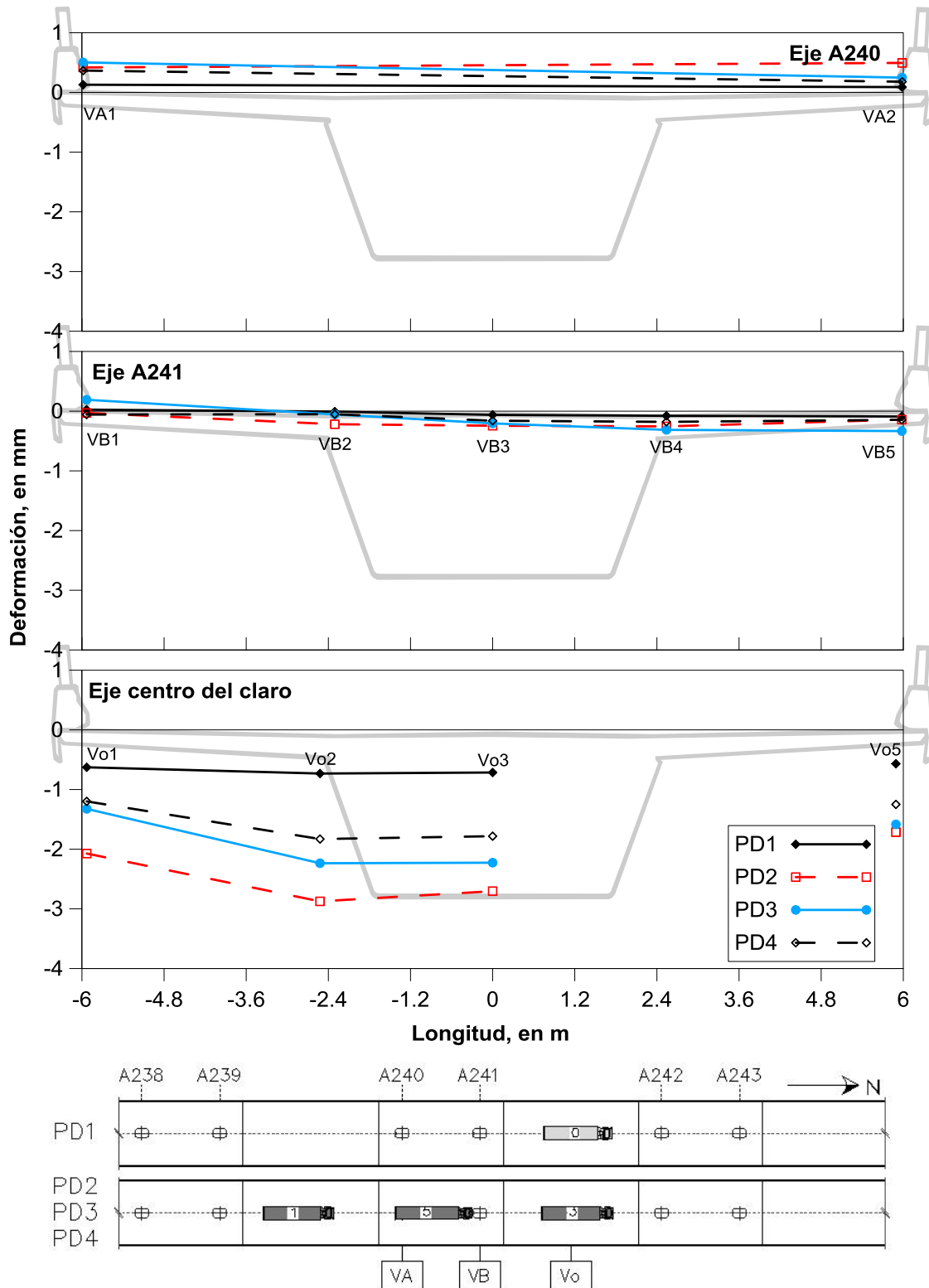


Figura D.3 – Perfiles de las traves de las pruebas dinámicas PD1, PD2, PD3 y PD4

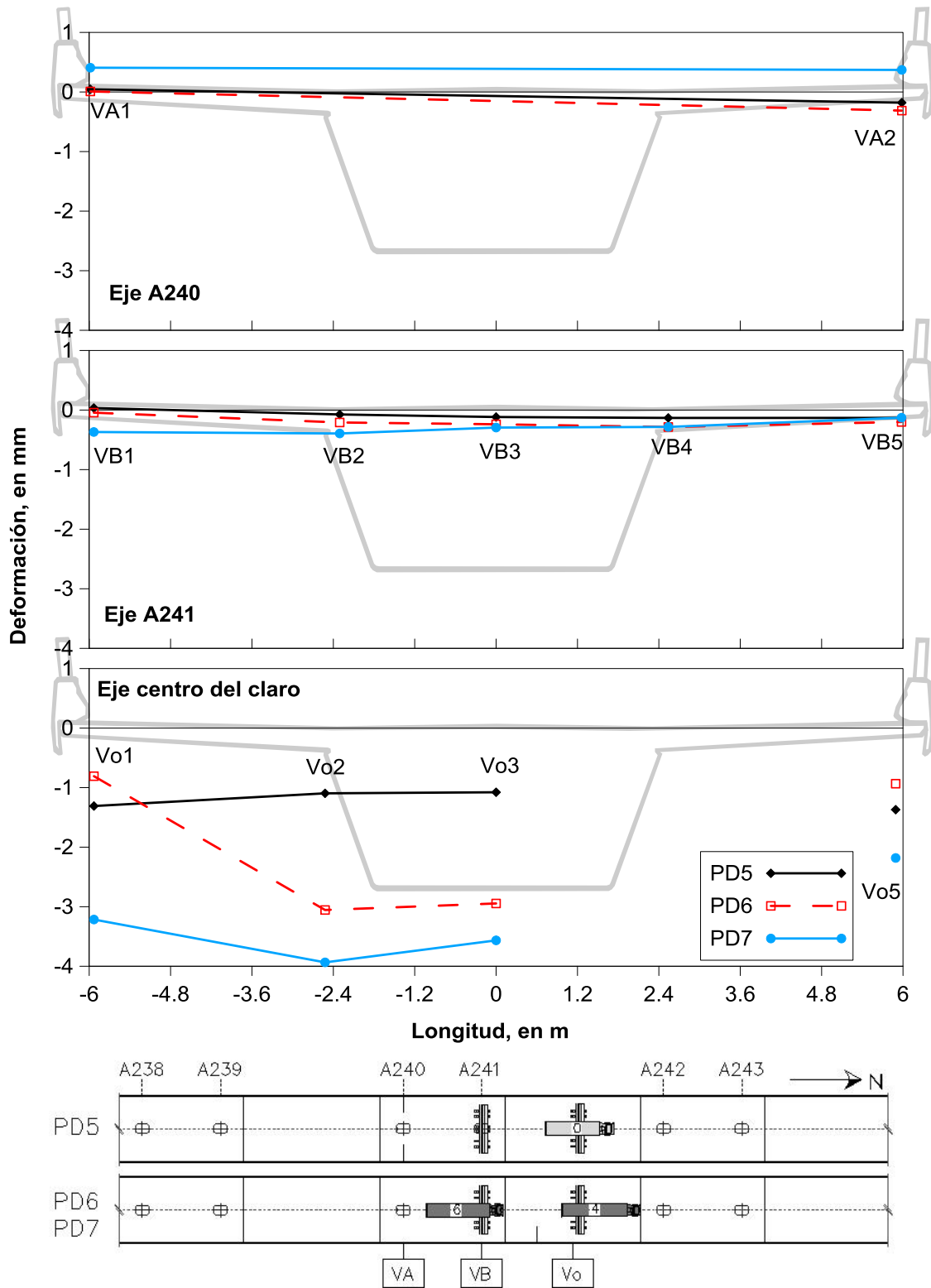


Figura D.4 – Perfiles de las traves de las pruebas dinámicas PD5, PD6 y PD7