



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL–ESTRUCTURAS

MEDICIÓN Y ANÁLISIS DE LA RESPUESTA DE UN TRAMO ELEVADO
INSTRUMENTADO DE LA LÍNEA 12 DEL METRO

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
YOATZIN LÓPEZ CASILLAS

TUTOR PRINCIPAL:
DR. DAVID MURIÀ VILA, INSTITUTO DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F. **SEPTIEMBRE** 2014



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo

Secretario: Dr. Jaime García Pérez

Vocal: Dr. David Murià Vila

1^{er.} Suplente: Dr. Marcos Mauricio Chávez Cano

2^{do.} Suplente: M. I. Abraham Roberto Sánchez Ramírez

Lugar donde se realizó la tesis: INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. DAVID MURIÀ VILA

FIRMA

Contenido

1. Introducción	5
2. Descripción del tramo elevado seleccionado	6
2.1. Localización	6
2.2. Descripción de la estructura	8
3. Descripción de las pruebas experimentales	12
3.1. Pruebas estáticas	14
3.2. Pruebas dinámicas	17
3.3. Instrumentación	19
3.3.1. <i>Desplazamientos laterales y verticales</i>	19
3.3.2. <i>Deformaciones</i>	20
3.3.3. <i>Giros relativos y absolutos</i>	20
4. Metodología y procesamiento	24
4.1. Procesamiento pruebas estáticas	24
4.1.1. <i>Trabe</i>	26
4.1.2. <i>Columnas</i>	37
4.2. Procesamiento pruebas dinámicas	44
4.2.1. <i>Trabe</i>	45
4.2.2. <i>Columnas</i>	61
4.2.3. <i>Factor de amplificación dinámico</i>	64
5. Análisis y resultados	71
5.1. Pruebas estáticas	71
5.1.1. <i>Trabe</i>	71
5.1.2. <i>Columnas</i>	77
5.2. Pruebas dinámicas	82
5.2.1. <i>Trabe</i>	82
5.2.2. <i>Columnas</i>	90
5.2.3. <i>Factor de amplificación dinámico</i>	94
6. Comparaciones	97
6.1. Comparación de velocidades	97
6.2. Comparación entre pruebas dinámicas en una sola vía	99
6.3. Comparación de instantes de valores máximos	104
7. Conclusiones	117

Apéndice A. Historias de pruebas estáticas	120
A.1. Desplazamientos verticales.....	120
A.2. Deformaciones unitarias	123
A.3. Desplazamientos laterales	126
A.4. Giros relativos y absolutos	131
Apéndice B. Historias de pruebas dinámicas	139
B.1. Desplazamientos verticales	140
B.2. Deformaciones unitarias	146
B.3. Desplazamientos laterales	152
B.4. Giros relativos	164
B.5. Comparación de instantes de valores máximos.....	170
Referencias	177
Agradecimientos	178

1. Introducción

En distintas partes del mundo se ha estudiado el comportamiento de estructuras civiles en laboratorio, ensayando elementos de la estructura, o en sitio por medio de pruebas experimentales. El Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) ha llevado a cabo este tipo de pruebas en distintas partes del país incluida la ciudad de México. Algunas de estas se han realizado en vías elevadas (Murià *et al.*, 2014a).

En la ciudad de México una de las obras civiles más importantes es la que se destina para el uso del transporte público, como es el caso del transporte colectivo Metro, el cual cuenta con 11 Líneas ubicadas de norte a sur y de oriente a poniente. Debido a la demanda en este tipo de servicio se llevó a cabo la construcción de una línea del Metro adicional, la Línea 12.

El IIUNAM realizó pruebas experimentales en un tramo elevado de la nueva Línea al final de su construcción (Murià *et al.*, 2012). En estas pruebas se empleó instrumentación permanente, la cual se complementó con instrumentación temporal. Con la que se registró la respuesta de la vía elevada en condiciones de carga estática y dinámica (Murià *et al.*, 2014b).

El objetivo de esta investigación consiste en conocer la respuesta estructural del tramo instrumentado de la vía elevada en condiciones de cargas servicio.

Los alcances de este trabajo contemplan el procesamiento y análisis de una parte de la información registrada por la instrumentación temporal para conocer las propiedades de la estructura en condiciones de cargas de servicio. En este procesamiento se obtuvieron desplazamientos, deformaciones y giros, los cuales fueron comparados con valores permisibles. Estos resultados se han empleado para calibrar modelos analíticos de la vía elevada (Vázquez A., 2013) y constituyen una referencia para la instrumentación permanente.

2. Descripción del tramo elevado seleccionado

La Línea 12 del Metro Tláhuac-Mixcoac consta de veinte estaciones, cuatro de ellas cruzan algunas líneas de la red del Metro, como la Línea 8 en la estación Atlalilco, la Línea 2 en la estación Ermita, la Línea 3 en la estación Zapata y la Línea 7 en la estación Mixcoac (www.metro.df.gob.mx). La Línea 12 es la segunda en contar con rodadura férrea, esta línea cubre una extensión total de 24.4 km, de estos la mayoría son destinados al servicio de pasajeros (20.2 km) y solo 4.2 km al servicio de mantenimiento. Su longitud también se divide de acuerdo con el tipo de vialidad, es decir, modo superficial (2.8 km), viaducto elevado (12.1 km), cajón subterráneo (2.8 km) y túnel profundo (6.8 km).

2.1. Localización

El tramo elegido para ser instrumentado se ubica sobre la avenida Tláhuac entre las estaciones Lomas Estrella y San Andrés Tomatlán, en la colonia Lomas Estrella de la delegación Iztapalapa. El tipo de suelo del sitio corresponde a la zona III, de acuerdo con el mapa de zonificación geotécnica de las Normas Técnicas Complementarias para la Construcción y Diseño de Cimentaciones del Distrito Federal (2004), ver figura 2.1. Con respecto a estudios de mecánica de suelos (Proyectista, 2010) el período dominante del sitio es aproximado a 1.04 s, que corresponde a la zona IIIa de las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo del Distrito Federal (2004).

El tramo instrumentado se encuentra en un segmento curvo con un radio de 200 m y una longitud de 317 m medida a partir de la columna E8, inicio de la estación Lomas Estrella, a la columna C11 (Figura 2.2). En la tabla 2.1 se presentan las distancias entre las columnas que conforman dicho segmento curvo. El tramo instrumentado se localiza entre las columnas C5 y C6.

Tabla 2.1. Distancias entre las columnas que conforman el segmento curvo de la Línea 12 del Metro.

Columna	Cadenamiento	Distancia entre columnas, en m	
E8	14+787.456	E8-C1	26.75
C1	14+814.206	C1-C2	26.75
C2	14+840.959	C2-C3	26.75
C3	14+867.724	C3-C4	26.75
C4	14+894.495	C4-C5	30
C5	14+924.524	C5-C6	30
C6	14+954.553	C6-C7	30
C7	14+984.583	C7-C8	30
C8	15+014.612	C8-C9	30
C9	15+044.638	C9-C10	30
C10	15+074.646	C10-C11	30
C11	15+104.646		

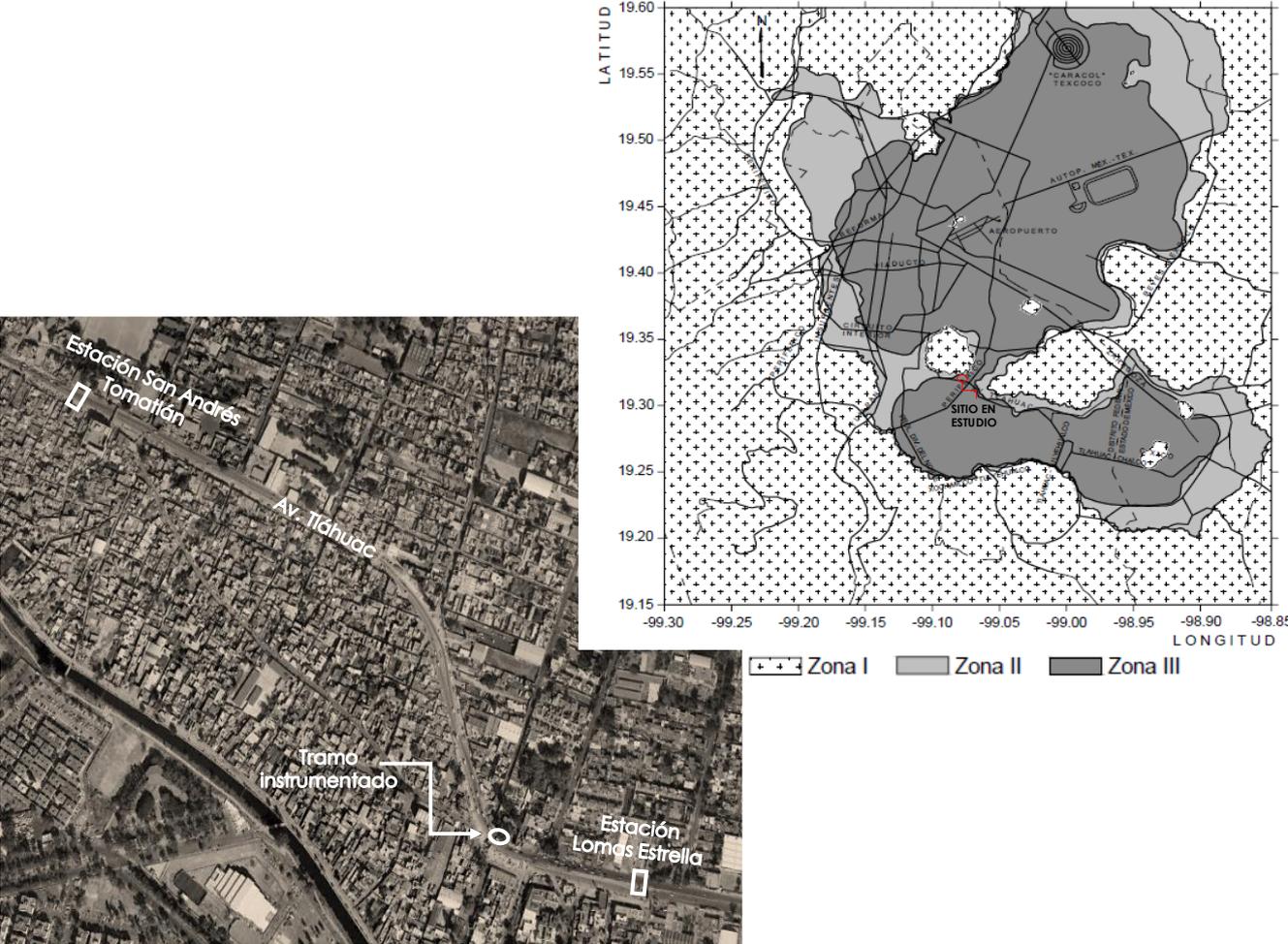


Figura 2.1. Ubicación del tramo elevado instrumentado de la Línea 12 del Metro.

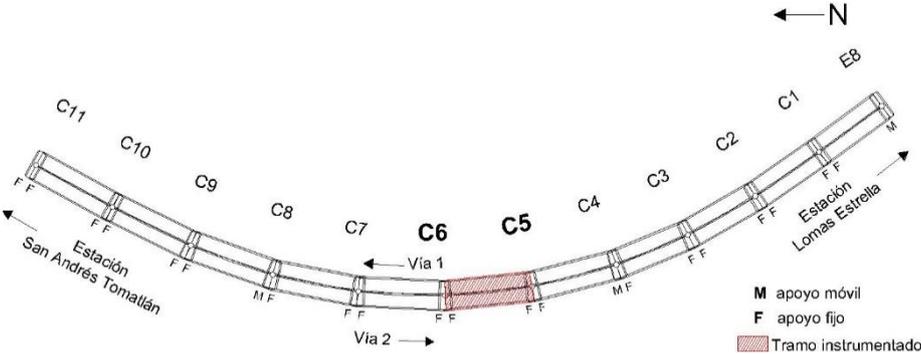


Figura 2.2. Tramo curvo de la Línea 12 del Metro.

2.2. Descripción de la estructura

El tramo en estudio de la Línea 12 del Metro se compone de una trabe de 30 m de longitud simplemente apoyada sobre el capitel de dos columnas de 8.25 m de altura (C5 y C6), prefabricadas con una zapata unida a cuatro pilas coladas en sitio (Proyectista, 2010a), ver figura 2.3. Los elementos son de concreto reforzado y presforzado. Para la trabe, capiteles, columnas y zapatas el concreto es de un módulo elástico (E_c) nominal de 318,206 kg/cm² y una resistencia nominal a compresión (f'_c) de 600 kg/cm². Para las pilas un f'_c nominal de 250 kg/cm² y un módulo elástico nominal de 221,359.4 kg/cm². El acero de refuerzo presenta un esfuerzo a la fluencia (f_y) nominal de 4,200 kg/cm². El acero de presfuerzo con un esfuerzo nominal (f_{pu}) de 19,000 kg/cm². Los detalles y armado de los elementos del tramo instrumentado se presentan en los planos del proyecto (Proyectista, 2010a) y una síntesis de ellos aparece en Vázquez A. (2013).

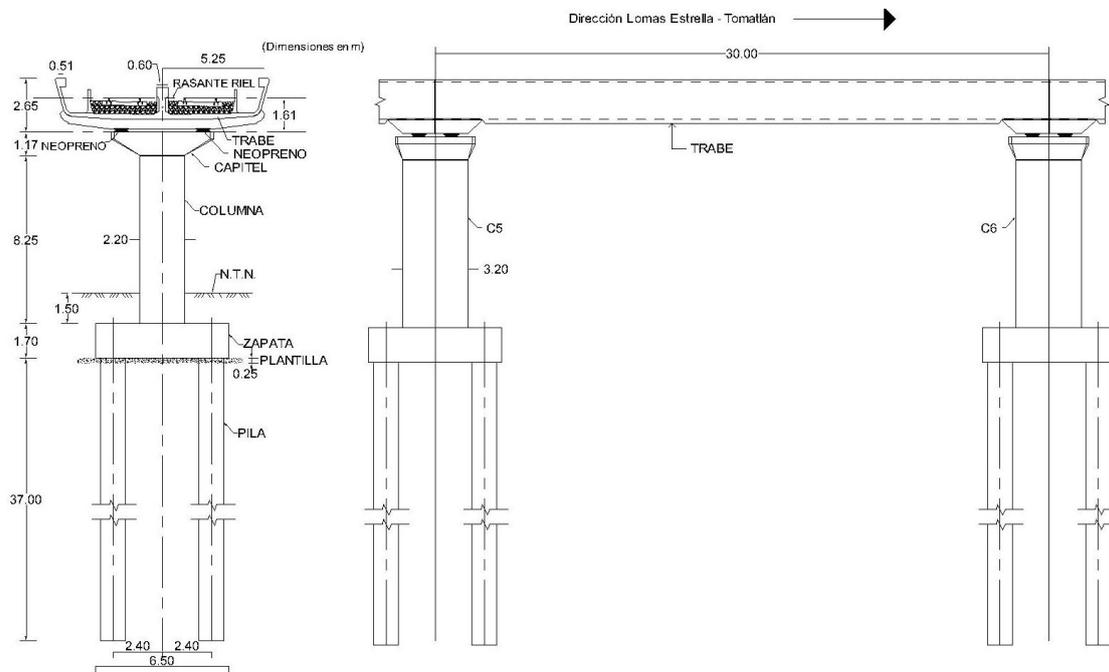


Figura 2.3. Vista transversal y longitudinal de los elementos que conforman el tramo elevado instrumentado.

La trabe se formó con la unión de dos secciones U simétricas fabricadas en planta y posteriormente unidas de una de sus nervaduras por medio de un colado complementario en sitio y la incorporación de pernos en el lecho superior, y de placas metálicas en el lecho inferior de las traves. La trabe está compuesta por tres nervaduras, dos en los extremos y una central, además de una vía por sentido, vía 1 (intradós) dirección Lomas Estrella-San Andrés Tomatlán y vía 2 (extradós) dirección San Andrés Tomatlán-Lomas Estrella. La trabe presenta dos tipos de sección transversal debido a su ensanchamiento en la posición del eje de las columnas en comparación del resto de su claro (Figura 2.4). La trabe se colocó sobre apoyos de neopreno shore 60 tipo "cubo encapsulado" de 60 cm de diámetro y 5 cm de espesor. Se colocaron dos tipos de apoyos de neopreno, móviles a cada 150 m y fijos (Figura 2.2).

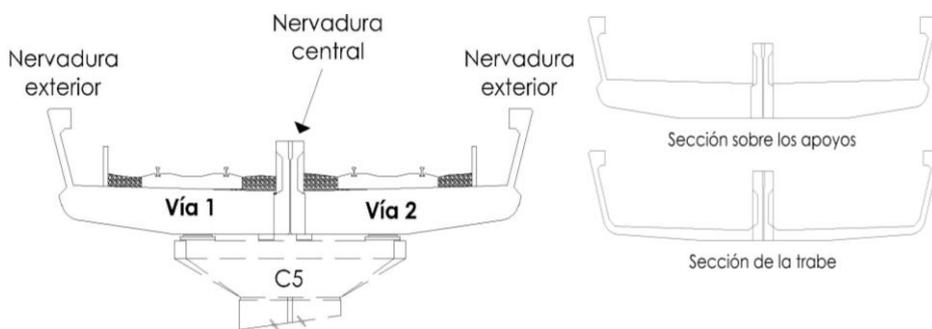


Figura 2.4. Características de la trabe.

Las columnas C5 y C6 son de sección transversal hueca y de geometría oblonga con un diámetro en dirección del eje de columna de 2.20 m y 3.20 m del eje de trabe. En el lecho superior, las columnas tienen un capitel de 1.17 m cuya sección transversal es variable (Figura 2.5).

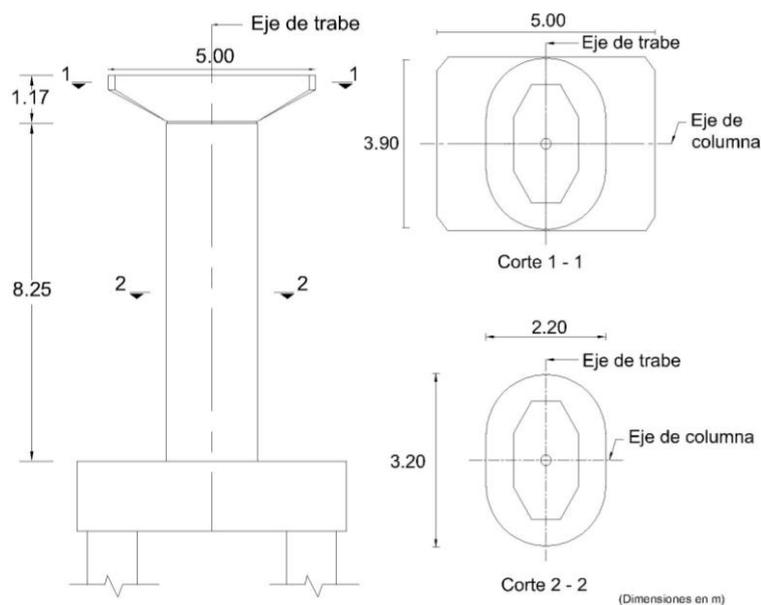


Figura 2.5. Dimensiones de las columnas.

La cimentación del tramo seleccionado consta de zapatas prefabricadas con las columnas y pilas coladas en sitio de 1.2 m de diámetro y 37 m de longitud. Las cuatro pilas de concreto reforzado se conectan a la zapata por medio de una segunda etapa de colado en sitio (Figura 2.6).

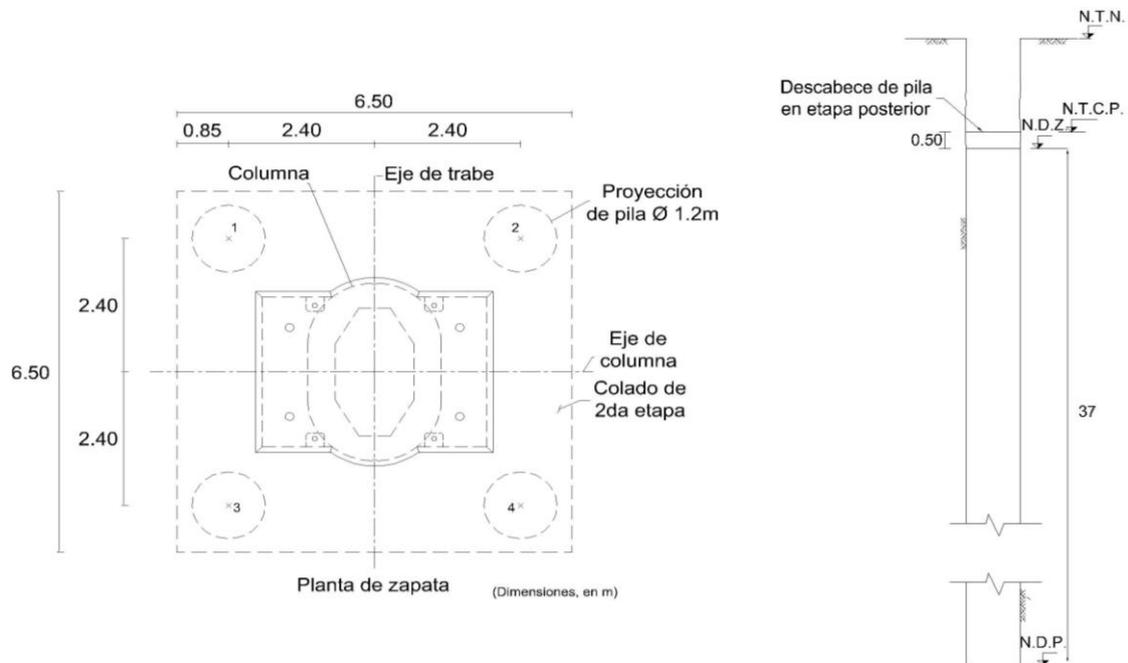


Figura 2.6. Características de la zapata y pilas.

El suelo en el tramo en estudio, se localiza en la zona III con respecto a la zonificación geotécnica del Distrito Federal y de acuerdo con la memoria geotécnica (Proyectista, 2010b) se encuentra caracterizada por:

- Depósitos arcillosos con espesor mayor a 20 m.
- Depósitos profundos de limo arenoso o arena limosa de consistencia muy dura y compacidad muy densa.
- Roca basáltica hasta una profundidad indefinida, muy fracturada, de calidad mala en los primeros 2 m y muy buena hasta el final de la exploración (37.5 m). En la tabla 2.2 se resume la estratigrafía de la zona de estudio.

Tabla 2.2. Estratigrafía de la zona en estudio (Proyectista, 2010b).

Estrato	Profundidad, en m		Espesor, en m	Peso específico, en t/m ³	Módulo de Poisson	Resistencia a la penetración de cono, en kg/cm ²
	de	a				
ML-CL	0	1.5	1.5	1.49	-	-
MH	1.5	5.3	3.8	1.55	0.318	8
CH	5.3	10.3	5	1.27	0.314	32
SP	10.3	11.8	1.5	1.68	-	30
CH	11.8	15.7	3.9	1.33	0.31	10
MH	15.7	16.5	0.8	1.37	0.328	34
CH	16.5	23	6.5	1.12	0.33	16
MH	23	33	10	1.84	0.328	20
Roca sana	33	37.5	4.5	22	-	204

ML: Limos inorgánicos y arenas muy finas, CL: Limos inorgánicos y arenas muy finas, MH: Limos inorgánicos, suelos limosos o arenosos finos, CH: Arcillas inorgánicas de alta plasticidad, SP: Arena mal graduada, arenas gravosas.

3. Descripción de las pruebas experimentales

Las pruebas experimentales se realizaron en la etapa en la que aún no había sido puesta en servicio la Línea 12 del Metro. Las pruebas consistieron en el posicionamiento o arreglos de trenes para pruebas estáticas y la circulación de trenes a diferentes velocidades para pruebas dinámicas. Los trenes empleados fueron de rodadura férrea alimentados por catenaria, compuestos de siete vagones, dos vagones en los extremos tipo remolque con cabina (VR) y cinco vagones motrices con pantógrafo (VP), ver figura 3.1.

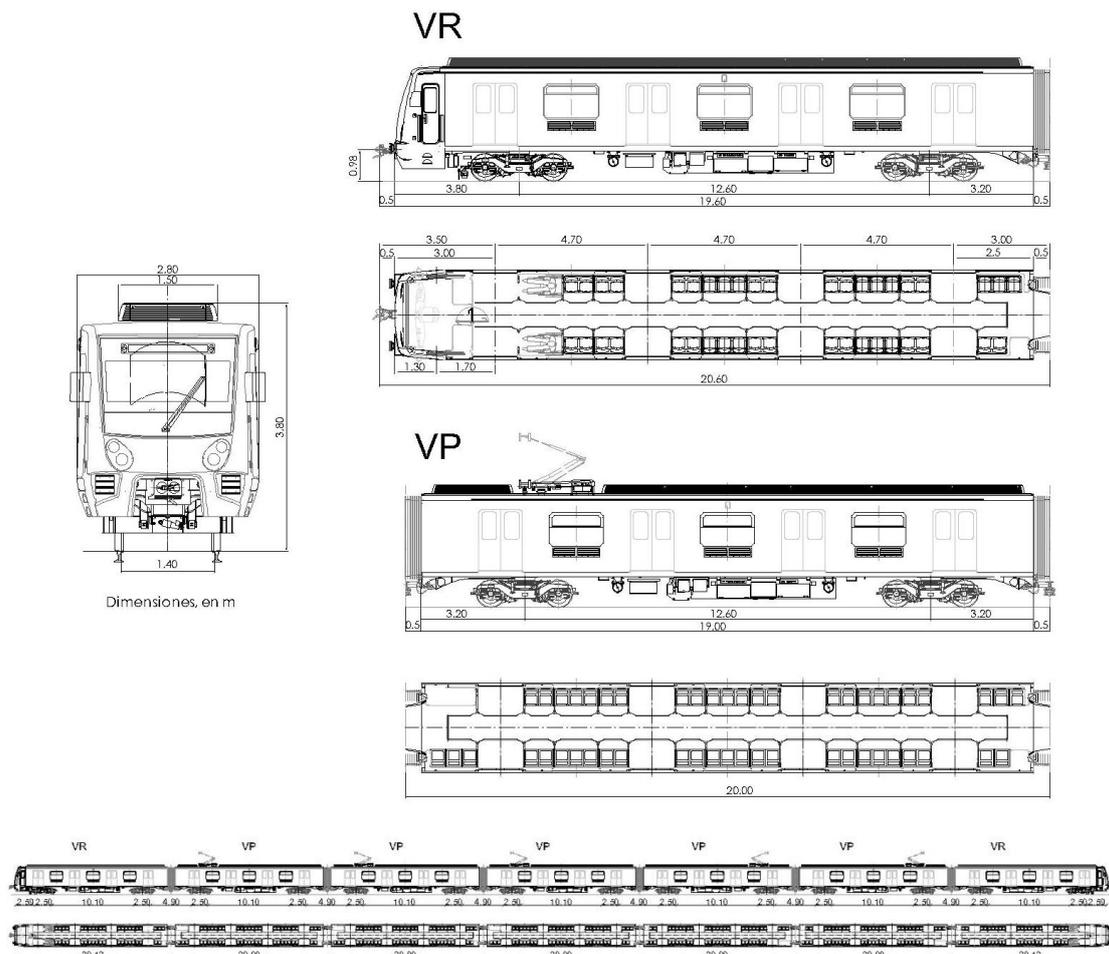


Figura 3.1. Tipos de vagones y sus dimensiones.

Los trenes se cargaron con bidones llenos de agua cada uno con un peso aproximado de 50 kg. Para el tren B que circuló en la vía 1 se cargaron tres vagones extremos, un VR y dos VP, y para el tren A que circuló en la vía 2 se cargaron cuatro vagones extremos, un VR y tres VP, (Figura 3.3). Los pesos de los vagones de cada tren registrados durante las pruebas se aprecian en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Pesos de los trenes que se registraron durante las pruebas experimentales.

Tipo	Tren A		Tren B	
	vagón	Peso por vagón, en kg	vagón	Peso por vagón, en kg
VR	A1	50,640	B1	30,500
VP	A2	52,080	B2	33,000
VP	A3	50,970	B3	33,000
VP	A4	50,970	B4	33,000
VP	A5	33,000	B5	52,170
VP	A6	33,000	B6	51,060
VR	A7	30,520	B7	49,530

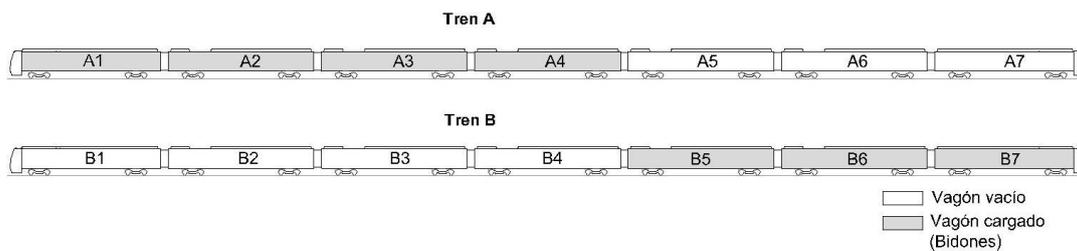


Figura 3.2. Nomenclatura de los trenes de acuerdo a IIUNAM.

Las pruebas experimentales sobre el tramo elevado instrumentado se llevaron a cabo en dos etapas, la primera etapa consistió en pruebas estáticas (PE) realizadas el 6 de agosto del 2012 y la segunda en pruebas dinámicas (PD) programadas el 8 de agosto del mismo año.

3.1. Pruebas estáticas

Las pruebas estáticas (PE) fueron un conjunto de doce pruebas en las que se realizaron diferentes acomodos o posiciones de los trenes. Las primeras seis pruebas consistieron en diferentes arreglos de un tren en una sola vía (Figura 3.3).

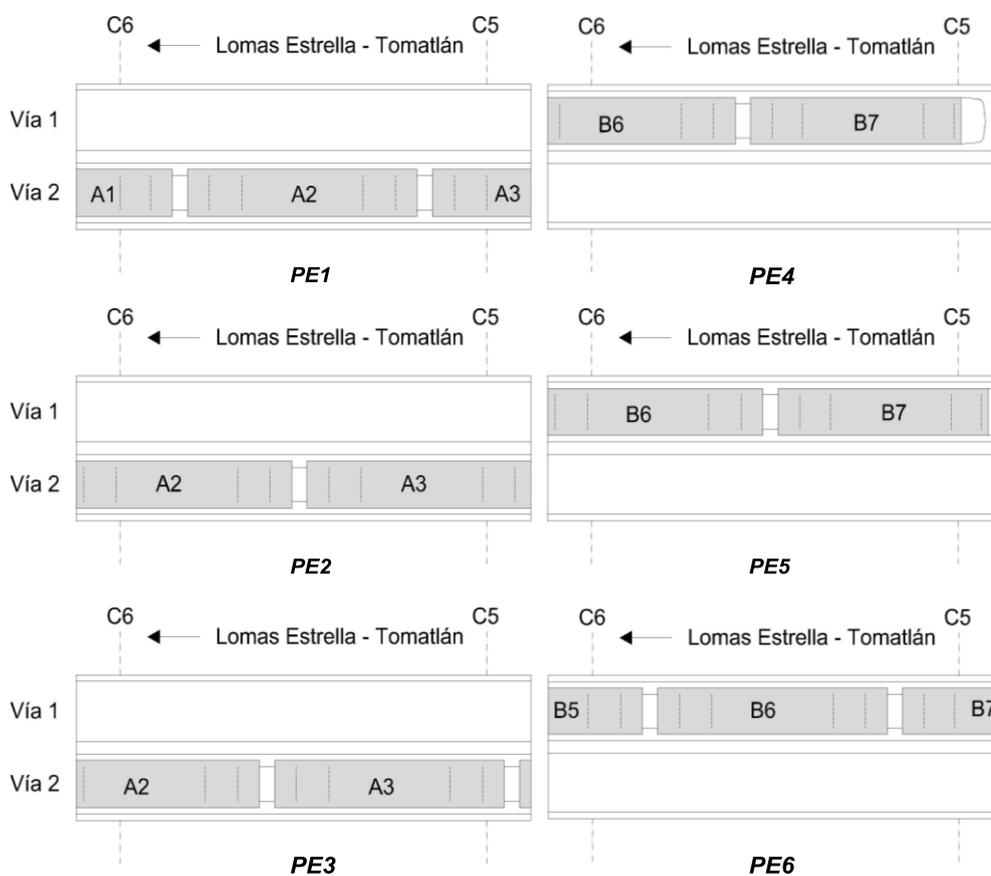


Figura 3.3. Pruebas estáticas con un solo tren en una vía.

Las siguientes cuatro pruebas fueron la combinación de algunas de las primeras seis PE, es decir, constaron de un tren en cada vía en diferentes posiciones (Figura 3.4).

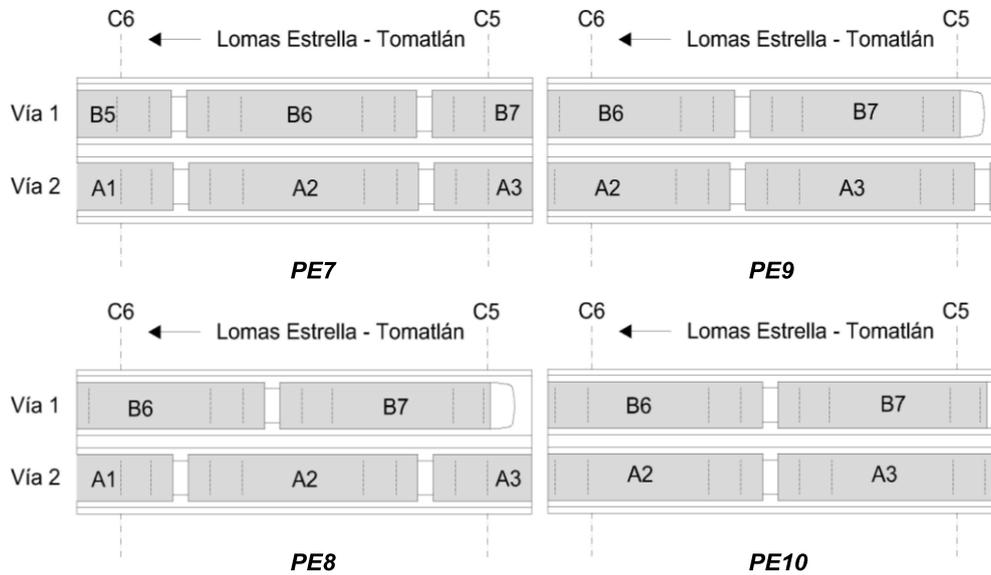


Figura 3.4. Pruebas estáticas con un tren en cada vía.

Las dos pruebas estáticas finales se realizaron con dos trenes en una sola vía, primero sobre la vía 1 y después sobre la vía 2 (Figura 3.5). En la tabla 3.2 se observa el resumen de las pruebas estáticas con respecto al tren y peso en cada vía.

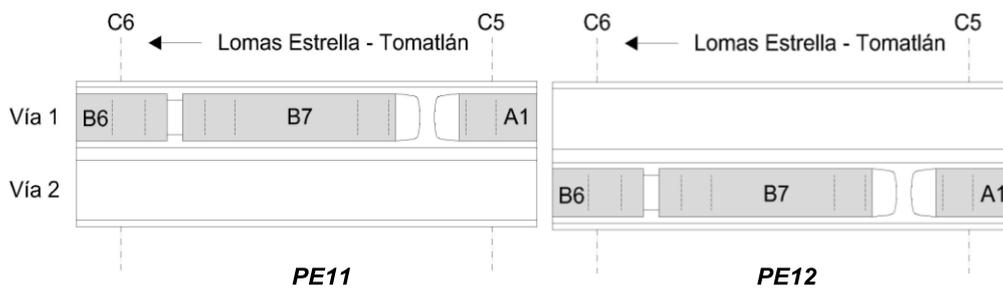


Figura 3.5. Pruebas estáticas con dos trenes en una vía.

Tabla 3.2. Características y posicionamiento de los trenes durante el desarrollo de las pruebas estáticas en el tramo elevado instrumentado.

PE	Identificación del tren	Vía de circulación	Vagones de tren sobre tramo C5-C6	Número de ejes de tren sobre tramo C5-C6	Carga total, en kg, sobre tramo C5-C6
1	A	2	2 ejes de A1 + 4 ejes de A2 + 2 ejes de A3	8	102,885
2	A	2	2 ejes de A2 + 3 ejes de A3	5	64,268
3	A	2	2 ejes de A2 + 4 ejes de A3	6	77,010
4	B	1	4 ejes de B7 + 2 ejes de B6	6	75,060
5	B	1	3 ejes de B7 + 2 ejes de B6	5	62,678
6	B	1	2 ejes de B7 + 4 ejes de B6 + 1 eje de B5	7	88,868
7	B y A	1 y 2	PE6 y PE1	7 y 8	191,753
8	B y A	1 y 2	PE4 y PE1	6 y 8	177,945
9	B y A	1 y 2	PE4 y PE3	6 y 6	152,070
10	B y A	1 y 2	PE5 y PE2	5 y 5	126,945
11	B y A	1	1 eje de A1 + 4 ejes de B7 + 1 eje de B6	7	74,955
12	B y A	2	1 eje de A1 + 4 eje de B7 + 1 eje de B6	6	74,955

3.2. Pruebas dinámicas

Las pruebas dinámicas (PD) consistieron en la circulación de un tren en una vía o en ambas vías. Las doce PD fueron diferenciadas por la velocidad del tren, la vía de circulación, pruebas sin frenado, pruebas con frenado en el centro del claro instrumentado (C5-C6) y pruebas con frenado en el centro del claro anterior al tramo instrumentado (C4-C5). Las velocidades propuestas se consideraron como baja de 30 km/h y alta de 60 km/h.

Las seis pruebas iniciales fueron sin frenado del tren, las primeras cuatro de estas se realizaron sobre una sola vía. Las siguientes dos, una a baja (30 km/h) y otra a alta velocidad (60 km/h) con un tren en cada vía. Las pruebas con frenado en el centro del claro C5-C6, a baja velocidad y alta velocidad, se llevaron a cabo con un tren en cada vía. Las pruebas con frenado en C4-C5 se realizaron con un tren en cada vía y con un tren en una sola vía, ambas a baja y alta velocidad. Las pruebas dinámicas se hicieron con dirección Lomas Estrella-Tomatlán (C5-C6), con excepción de la PD5. La segunda parte de todas las pruebas dinámicas con frenado (arranque del tren), el cual se caracterizó por la dirección en la que circuló el tren, ya que este arranque fue contrario a la dirección del frenado. La descripción completa de las pruebas se observa en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Características de las pruebas dinámicas.

PD	Identificación del tren	Vía de circulación	Velocidad propuesta, en km/h	Velocidad estimada, en km/h	Dirección de los trenes	Frenado
1	B	1	30	28	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	Sin frenado
2	A	2	30	28	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	Sin frenado
3	B	1	60	61	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	Sin frenado
4	A	2	60	57	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	Sin frenado
*5	B y A	1 y 2	30	30	San Andrés Tomatlán- Lomas Estrella	Sin frenado
6	B y A	1 y 2	60	58	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	Sin frenado
7	B y A	1 y 2	30	28	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	frenado en el centro del claro C5-C6
8	B y A	1 y 2	60	58	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	frenado en el centro del claro C5-C6
9	B y A	1 y 2	30	31	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	frenado en el centro del claro C4-C5
10	B y A	1 y 2	60	59	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	frenado en el centro del claro CC4-CC5
11	B	1	60	50	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	frenado en el centro del claro C4-C5
12	A	2	60	43	Lomas Estrella - San Andrés Tomatlán	frenado en el centro del claro C4-C5

*PD con dirección San Andrés Tomatlán-Lomas Estrella. En el caso de las PD 7 a PD12 corresponde a la dirección del arranque, es decir, todas las pruebas con arranque regresan a su punto de partida.

3.3. Instrumentación

En las pruebas experimentales se registraron desplazamientos laterales en las columnas, desplazamientos verticales y deformaciones en la trabe, giros relativos en el extremo inferior de las columnas y giros absolutos en la base de columnas y zapatas. Para este trabajo se emplearon los registros de una parte de la instrumentación (Figura 3.6), ya que no se incluyeron los registros de aceleración en el tiempo, ni los desplazamientos entre trabe-trabe y trabe-columna.

3.3.1. Desplazamientos laterales y verticales

Para medir los desplazamientos laterales de las columnas C5 y C6 se emplearon potenciómetros en posición horizontal (**H**), en cinco niveles a partir del lecho superior de la zapata hasta el lecho superior del capitel (Figura 3.7), apoyando su vástago sobre un costado de la columna, perpendicular al eje de la trabe, y el cuerpo del sensor se ancló a un segmento de un perfil metálico afianzado a un andamio apoyado en el terreno. Las alturas para cada potenciómetro **H** se presentan en la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Alturas en las que se colocaron los potenciómetros referidas al lecho superior de la zapata.

Columna	Sensor	Altura, en m	Columna	Sensor	Altura, en m
C5	HA5	9.33	C6	HB5	9.34
	HA4	8.15		HB4	8.16
	HA3	5.45		HB3	5.42
	HA2	2.75		HB2	2.70
	HA1	0.03		HB1	0.07

Los desplazamientos verticales de la trabe se registraron con potenciómetros en posición vertical (**V**). La instalación de cada potenciómetro constó de tubos metálicos de sección circular sujetos en el lecho inferior de la trabe de forma vertical hasta el nivel del terreno, en este último extremo se colocaron los potenciómetros **V** apoyando su vástago sobre una placa metálica paralela al terreno. Se colocaron en tres ejes longitudinales: nervadura de la vía 1, nervadura central y nervadura de la vía 2, y en cuatro secciones transversales: en el eje de la columna C5, a un cuarto del claro, al centro del claro y en el eje de la columna C6 (Figura 3.7).

3.3.2. Deformaciones

Las deformaciones de la trabe se obtuvieron de los registros de los deformímetros colocados en el centro del claro, anclados al concreto por medio de dos tornillos: uno en un extremo del deformímetro y el otro a una barra metálica, que se empleó como extensión, obteniendo un segmento de medición de 20 cm. En dicha sección de la trabe se colocaron diez deformímetros: tres en la nervadura del eje de la vía 1, tres en la nervadura del eje de la vía 2 y cuatro en la nervadura central (Figura 3.7).

3.3.3. Giros relativos y absolutos

Los giros relativos en el extremo inferior de las columnas se obtuvieron a partir de los de registros de desplazamientos y de deformaciones. Los primeros se registraron con los potenciómetros (**p**). Estos se anclaron al concreto en tres niveles de cada lado de las columnas (Figura 3.7). Los potenciómetros del primer nivel, nivel más cercano a la zapata, se colocaron a 9 cm del lecho superior de la zapata (Tabla 3.5). El segmento de medición de estos sensores es la longitud entre sus dos puntos anclados a la columna (0.51 m). Las deformaciones en el extremo inferior de las columnas se obtuvieron a partir de deformímetros colocados en dos niveles en cada lado de la columna C5 y un nivel en cada lado de la columna C6 (Figura 3.7). La posición de los deformímetros en el extremo inferior de las columnas se observa en la tabla 3.6. Los deformímetros registraron deformaciones unitarias, en $\mu\epsilon$. El segmento de medición de estos sensores es la longitud entre sus dos tornillos (0.076 m).

Para el cálculo del giro relativo se utilizaron las historias de deformímetros y potenciómetros en desplazamientos, es decir, se realizó una conversión de las historias de deformaciones en $\mu\epsilon$ a milímetros. Para la conversión se empleó una longitud del segmento de la columna igual a la longitud del segmento de medición del potenciómetro (Figura 3.8).

Tabla 3.5. Alturas referidas al lecho superior de la zapata de los potenciómetros, colocados en el extremo inferior de las columnas, referidas al lecho superior de la zapata.

Columna	Eje longitudinal		Altura, en m
	Vía 1	Vía 2	
C5	pA5	pA6	1.12
	pA3	pA4	0.61
	pA1	pA2	0.10
C6	pB5	pB6	1.11
	pB3	pB4	0.60
	pB1	pB2	0.09

Tabla 3.6. Alturas del lecho superior de la zapata a la distancia entre tornillos de los deformímetros colocados en el extremo inferior de las columnas C5 y C6.

Columna	Eje longitudinal		Altura, en m
	Vía 1	Vía 2	
C5	DA4	DA3	0.86
	DA2	DA1	0.36
C6	DB2	DB1	0.35

Los registros de los giros absolutos solo se disponen para las PE. Estos giros, expresados en radianes, se obtuvieron directamente de los registros de inclinómetros alrededor del eje transversal (L) y longitudinal (T) del claro. Estos se colocaron en el lecho superior de las zapatas (IA1 e IB1), en la base de las columnas (IA2 e IB2) y en los andamios de cada columna (IC1 e IC2), ver figura 3.7. Estos últimos solo se disponen para las PE4 a PE12. Su colocación fue a base de dos placas metálicas y tres tornillos.

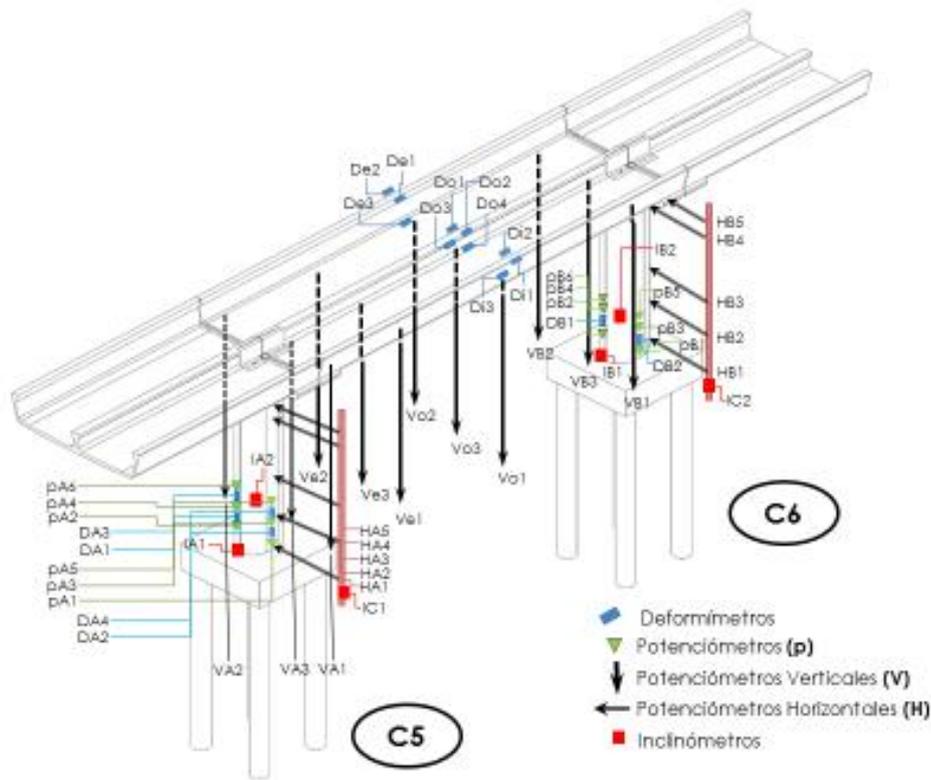


Figura 3.6. Croquis de la instrumentación del tramo en estudio.

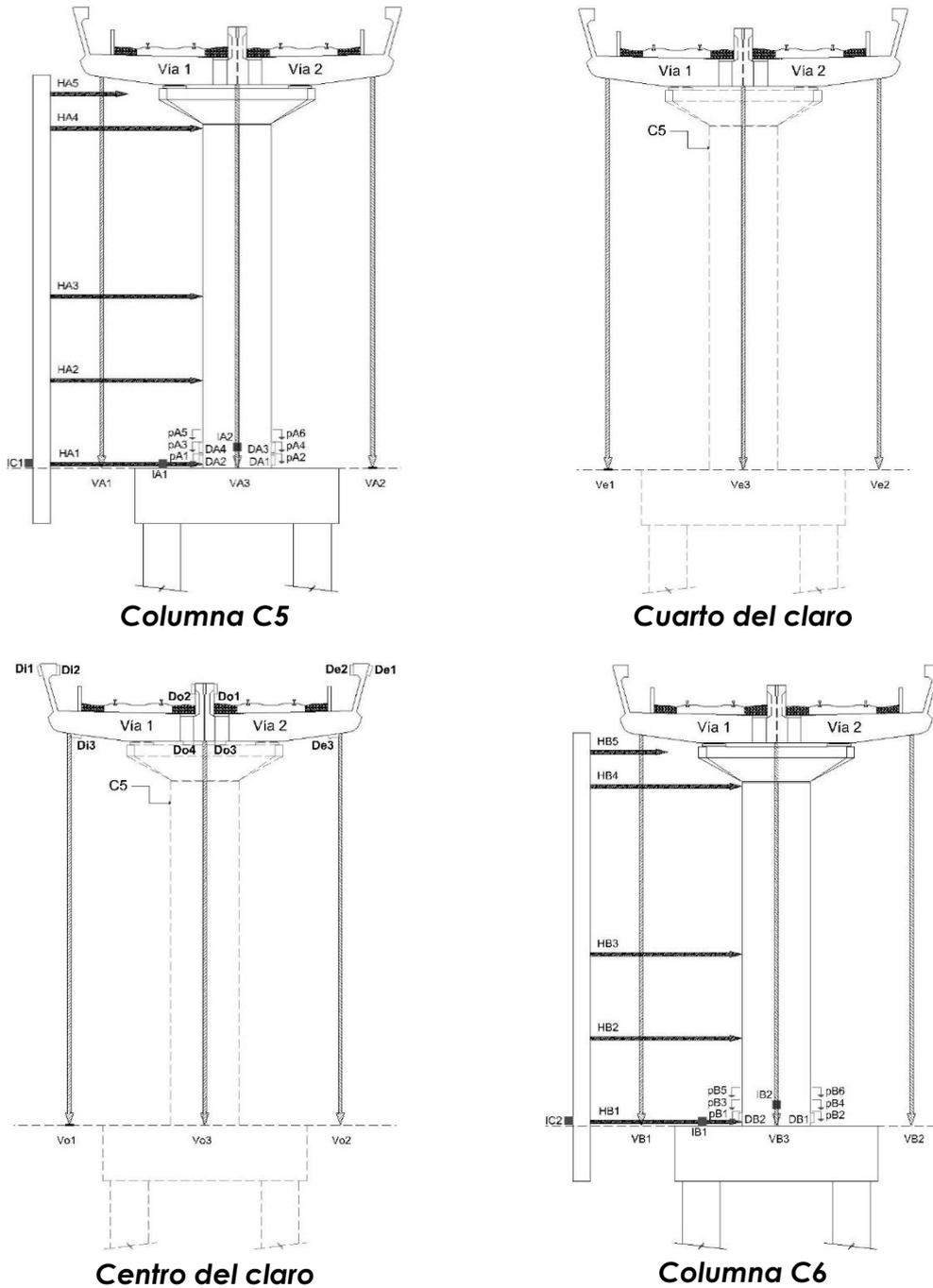


Figura 3.7. Croquis de la Instrumentación en cuatro secciones transversales de la trabe.

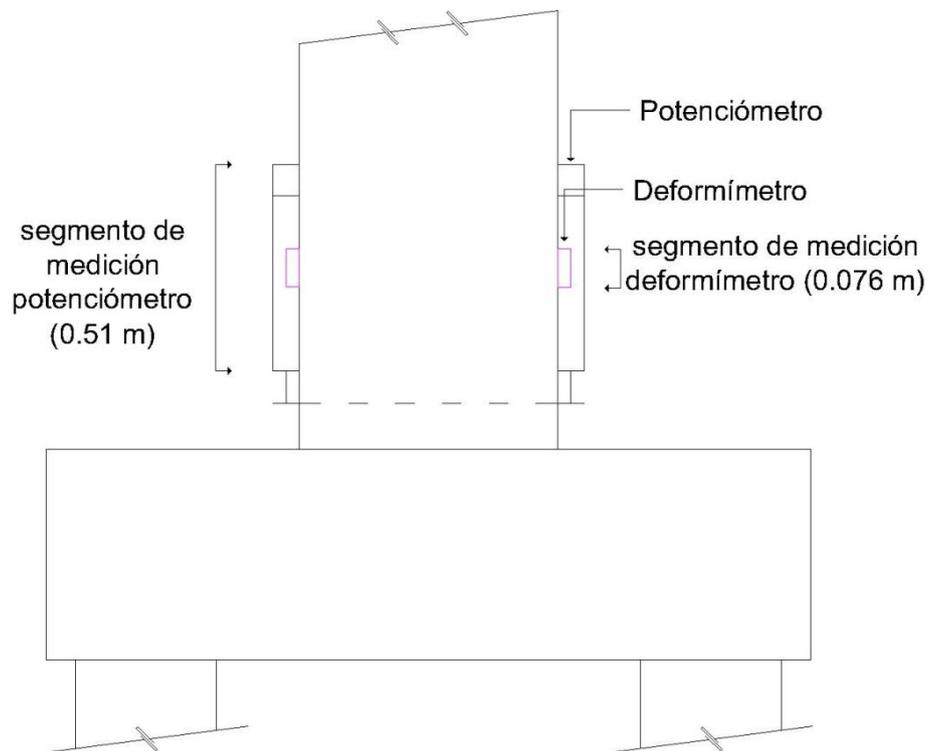


Figura 3.8. Segmentos de medición de potenciómetros y deformímetros en el extremo inferior de las columnas.

4. Metodología y procesamiento

En este capítulo se presenta el procesamiento antes y después de las pruebas experimentales. Además de la metodología que se empleó para obtener los valores medidos en la trabe y las columnas. Previo a las pruebas experimentales se calibraron los sensores empleados en la instrumentación del tramo en estudio.

Los registros de las pruebas comenzaron sin el tren en el tramo de estudio. En esta primera etapa de la captura el tren o los trenes se posicionaron en las estaciones Lomas Estrella y San Andrés Tomatlán para evitar efectos en el tramo instrumentado. La segunda etapa fue con el tren en el tramo de estudio, es decir, para las PE se realizaron los arreglos de cada grupo de pruebas y en las PD la circulación del tren. La tercera etapa consistió en la salida del tren del tramo en estudio a la estación más próxima. De manera que la primera etapa de la captura se tomó como referencia para los registros de los sensores y ésta debe ser la misma en la tercera etapa. Esto debido a que las pruebas al ser de servicio permiten que la estructura retome su estado previo. La señal se requiere colocar donde el nivel de referencia sea cero. Esto se realiza con una corrección de línea base determinando el promedio de un intervalo de puntos en la etapa de referencia y restarlo a toda la señal de la respuesta de la estructura.

4.1. Procesamiento pruebas estáticas

En las pruebas estáticas, referidas a efectos de carga sobre la estructura, se presentaron cinco historias para cada sensor que registró estas pruebas. Esto porque se realizaron diferentes arreglos en conjunto, debido a la similitud de sus características, es decir, referidas a la vía y al número de trenes. La selección de intervalos representativos de los registros de cada una de las doce PE se basó en los siguientes criterios:

- Se identificó el inicio y el final de la segunda etapa de la captura del grupo de pruebas estáticas, donde se registraron los posicionamientos del tren. Se estableció dentro de estos límites un intervalo representativo de cada arreglo.
- El intervalo se situó donde la respuesta fuera lo más constante posible para todos los sensores.
- Se realizó un promedio de puntos del intervalo, para obtener un valor representativo y disminuir los efectos de las pequeñas fluctuaciones de la señal.
- Los valores de la respuesta en la trabe y las columnas para las PE se obtuvieron con dicho promedio de puntos.

En la tabla 4.1 se muestran los intervalos representativos y la bitácora de pruebas estáticas. Las historias de los registros para las pruebas estáticas se encuentran en el apéndice A.

Tabla 4.1. Bitácora para pruebas estáticas e intervalos de medición.

Evento	Tiempo, en s			
	Bitácora		Intervalo de medición	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin
Pruebas	0	4680		
Entrada	720			
PE1	1080	2280	1140	1200
PE2	2580	3180	2680	2810
PE3	3360	4200	4000	4100
Descarga	4380			
Pruebas	0	3120		
PE4	720	1320	900	1100
PE5	1440	2040	1440	1850
PE6	2220	2580	2300	2500
Pruebas	0	5160		
PE7	1200	2400	1500	1600
PE8	2640	3000	2800	3000
PE9	3360	3720	3600	3720
PE10	4080	4500	4500	4600
Prueba	0	2520		
Entrada	300			
PE11	900	1800	1500	1580
Prueba	0	2100		
PE12	0	1440	950	1050

Los giros absolutos registrados con inclinómetros electrolíticos compuestos por una caja de cristal que contiene un líquido conductor, una burbuja de aire y electrodos de platino, recibieron dos correcciones adicionales. La primera debida a la temperatura y la segunda por la deriva en el tiempo de las historias.

- i. Las fluctuaciones de temperatura causan la expansión y contracción del líquido del sensor, en consecuencia la reducción y aumento de la burbuja de aire, cambiando la cantidad de líquido en contacto con cada electrodo. Este proceso altera el factor de escala del sensor y cambia su punto cero. Los experimentos han demostrado que la expansión y la contracción volumétrica del líquido es el principal motivo de la utilización de coeficientes de corrección por temperatura en inclinómetros.
- ii. La duración extensa de las pruebas estáticas provocó que los registros de giros absolutos presenten una pendiente a lo largo del tiempo respecto del eje del cero o deriva. Por esta razón se realiza una corrección adicional en el tiempo complementaria a la corrección de línea base. Esta corrección consiste en emplear una ecuación lineal $f(t)$ para obtener la pendiente de la deriva en el tiempo y restarla al valor de cada instante. Para la ecuación lineal se emplean dos promedios de puntos, el obtenido en la corrección de línea base y otro en la tercera etapa de la captura donde la estructura haya regresado a su nivel de referencia.

4.1.1. Trabe

Para la trabe se obtuvieron tres tipos de mediciones: de desplazamiento vertical, deflexión y deformación. Las dos primeras se realizaron con los registros de desplazamiento vertical y la tercera con los registros de deformación. En la tabla 4.2 se presentan los valores de desplazamientos verticales promedio para las PE. En las figuras 4.1 y 4.2 se observan transversal y longitudinalmente estos desplazamientos.

Tabla 4.2. Valores promedio de desplazamientos verticales de la trabe para las PE.

Nervadura	Sección transversal	Longitud, en m	Desplazamientos, en mm											
			PE1	PE2	PE3	PE12	PE4	PE5	PE6	PE11	PE7	PE8	PE9	PE10
			Vía 2				Vía 1				Vías 1 y 2			
Vía 1	C5	-12.7	1.0	1.1	1.1	0.9	-1.3	-1.3	-1.5	-1.2	0.1	0.4	0.4	0.4
	1/4 claro	-5	1.02	0.9	0.8	1.1	-3.8	-4.0	-4.2	-3.3	-2.8	-2.7	-2.7	-2.9
	Centro claro	0	0.9	0.8	0.7	1.1	-5.0	-5.3	-5.2	-4.1	-3.6	-3.9	-3.8	-3.9
	C6	15.7	1.1	1.3	1.4	1.3	-1.4	-1.4	-1.6	-1.3	-0.1	0.0	0.2	0.1
Central	C5	-12.7	-0.6	-0.7	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.2	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1
	1/4 claro	-5	-2.9	-3.3	-3.2	-2.4	-1.9	-2.0	-1.9	-1.6	-4.9	-5.1	-5.1	-5.4
	Centro claro	0	-3.9	-4.6	-4.6	-3.2	-3.0	-3.0	-2.7	-2.1	-6.4	-6.9	-7.5	-7.7
	C6	15.7	-0.7	-0.7	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1
Vía 2	C5	-12.7	-1.5	-1.5	-1.5	-1.3	0.6	0.6	0.8	0.6	-0.8	-1.0	-0.9	-0.8
	1/4 claro	-5	-5.2	-5.4	-5.5	-4.2	0.8	1.0	1.2	1.0	-4.0	-4.5	-4.6	-4.7
	Centro claro	0	-5.8	-6.6	-6.7	-4.8	0.5	0.7	0.7	0.7	-4.9	-5.3	-6.1	-6.2
	C6	15.7	-1.3	-1.4	-1.5	-1.5	1.0	1.0	1.0	0.9	-0.3	-0.3	-0.5	-0.4

Valor negativo indica desplazamiento descendente de la trabe

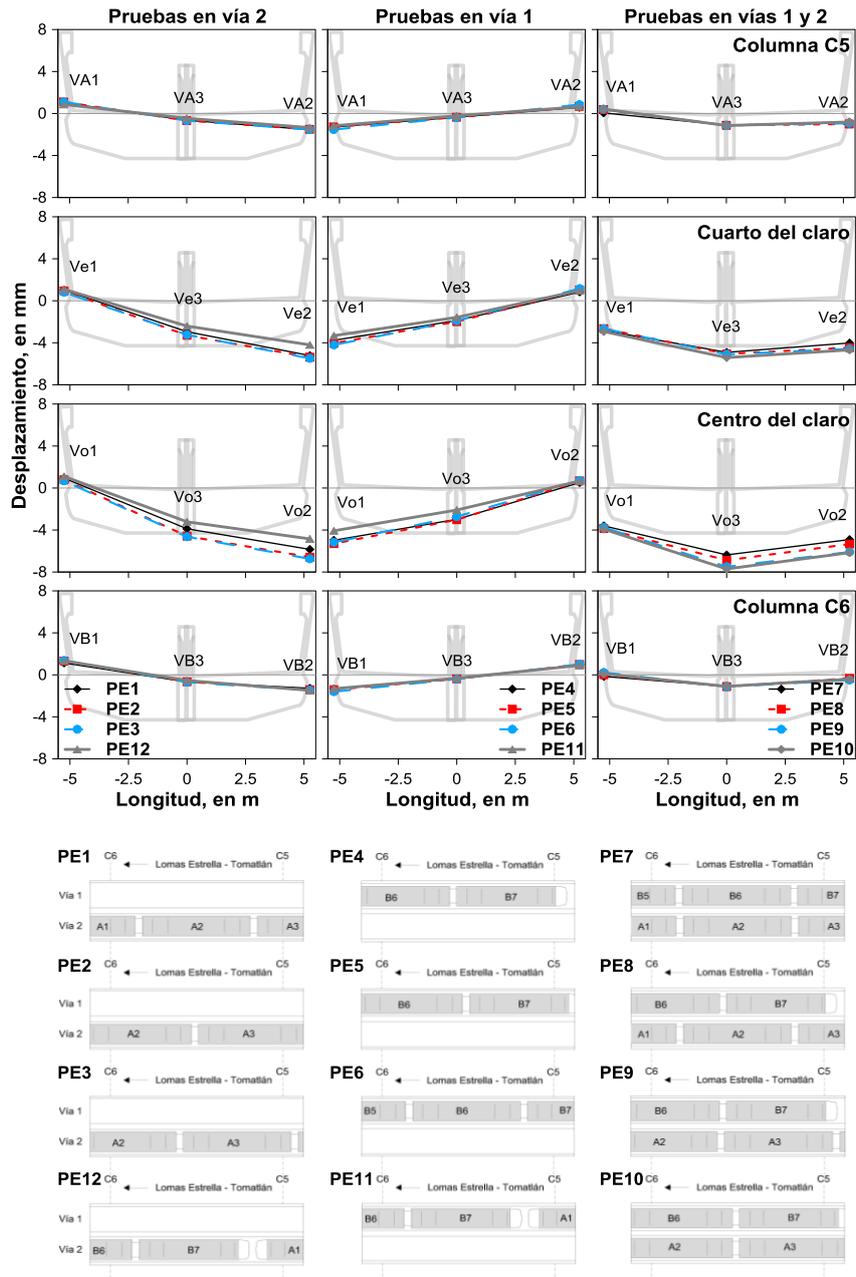


Figura 4.1. Vista transversal de los desplazamientos verticales para las PE.

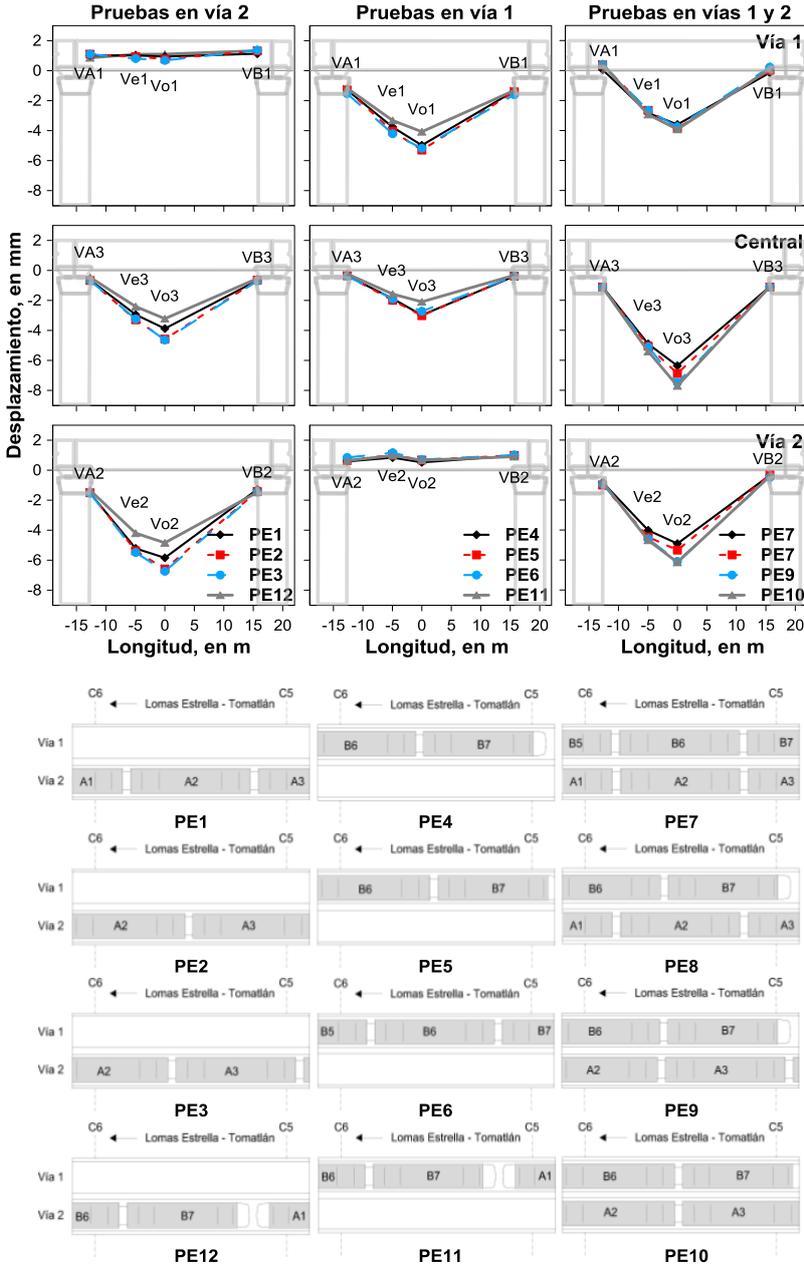


Figura 4.2. Vista longitudinal de los desplazamientos verticales para las PE.

Las deflexiones se obtuvieron para un cálculo longitudinal y uno transversal. Las deflexiones longitudinales se calcularon con los desplazamientos verticales. Para la deflexión transversal se emplearon las deflexiones longitudinales. En los desplazamientos verticales se incluyen los movimientos de los apoyos. Para determinar la deflexión del eje longitudinal de la trabe, los desplazamientos registrados en las secciones de los ejes de las columnas C5 y C6 se consideraron como la medición del movimiento en los apoyos (VA1, VA3, VA2, VB1, VB3 y VB2). Las consideraciones anteriores se hicieron debido a la cercanía de estos desplazamientos verticales con las columnas. En el cálculo para obtener el efecto del movimiento de los apoyos y restarlo a los desplazamientos de un cuarto y centro del claro, se emplearon los desplazamientos medidos en el eje de las columnas y las distancias de la figura 4.3.

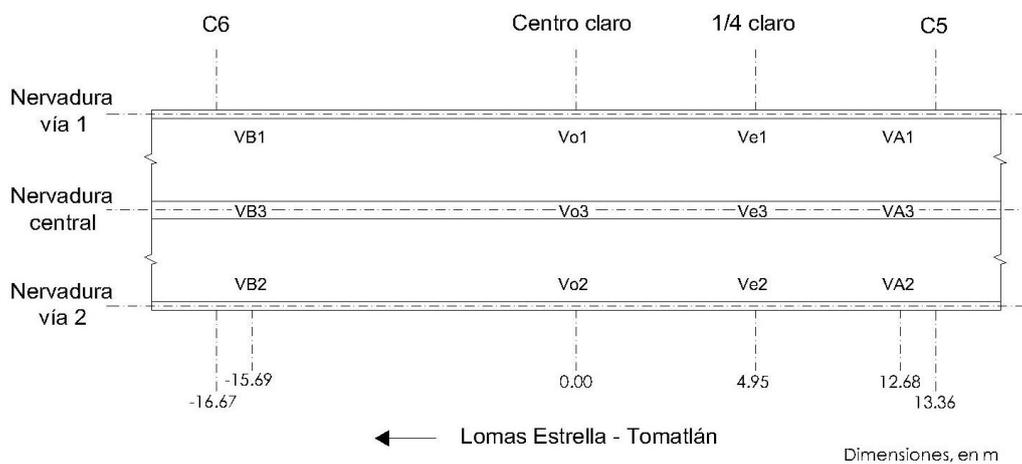


Figura 4.3. Planta esquemática de la ubicación de los puntos de medición de los desplazamientos verticales de la trabe.

Deflexión longitudinal a un cuarto del claro y centro del claro

La deflexión a un cuarto (1/4c) y centro del claro (cc) se determinó restando el efecto en los ejes de las columnas al desplazamiento a un cuarto del claro o centro del claro [4.1].

$$\text{Deflexión}_{1/4c-cc} = \text{Desplazamiento}_{1/4c-cc} - \text{Efecto en los apoyos}_{1/4c-cc} \quad [4.1]$$

Deflexión transversal en las nervaduras de la vía 1 y vía 2

La deflexión en las nervaduras exteriores respecto de la nervadura central se obtuvo de la resta de las deflexiones de la nervadura de la vía 1 o vía 2 con la deflexión de la nervadura central [4.2], ya calculadas anteriormente.

$$\text{Deflexión}_{\text{VÍA1-VÍA2}} = \text{Deflexión}_{\text{CENTRAL}} - \text{Deflexión}_{\text{VÍA1-VÍA2}} \quad [4.2]$$

La flecha o deflexión permisible se obtuvo con base en lo establecido en las especificaciones de diseño (AASHTO, 2007) en la sección 2.5.2.6.2, donde señala que los límites de deflexión se obtienen a partir de la longitud en milímetros del tramo en estudio dividida entre una constante. En las ecuaciones [4.3] y [4.4] se presenta la deflexión permisible longitudinal y transversal, respectivamente.

$$\text{Deflexión permisible longitudinal (DpL)} = \frac{\text{Longitud}}{800} \quad [4.3]$$
$$DpL = 37.5 \text{ mm}$$

$$\text{Deflexión permisible transversal (DpT)} = \frac{\text{Longitud}}{300} \quad [4.4]$$
$$DpT = 17.5 \text{ mm}$$

Para las deflexiones provocadas por cada prueba estática se determinó el porcentaje de su valor respecto de la deflexión permisible (%Dp), con el fin de que los valores de deflexión se expresen mejor.

$$\%Dp = \left[\frac{\text{Deflexión}_{\text{prueba } i}}{Dp} \right] \times 100 \quad [4.5]$$

Los valores de deflexión longitudinal y su porcentaje respecto de la deflexión permisible (%DpL) se presentan en la tabla 4.3. Las deflexiones longitudinales se muestran en las figuras 4.4 y 4.5 en vista transversal y longitudinal, respectivamente. Los valores de deflexión transversal y el porcentaje respecto de la deflexión permisible (%DpT) se observan en la tabla 4.4. Las deflexiones transversales se ven en la figura 4.6.

Tabla 4.3. Deflexiones longitudinales a un cuarto y centro del claro con su porcentaje respecto de la deflexión permisible longitudinal (%DpL) para las PE.

PE	Nervadura	Número de trenes	Vía	Deflexiones, en mm			
				Cuarto del claro		Centro del claro	
				Deflexión	%DpL	Deflexión	%DpL
1	Vía 1	1	2	-0.03	0.1	-0.1	0.3
	Central			-2.3	6.1	-3.2	8.6
	Vía 2			-3.8	10.0	-4.4	11.8
2	Vía 1	-0.2		0.6	-0.4	1.1	
	Central	-2.6		7.0	-3.9	10.4	
	Vía 2	-3.9		10.4	-5.1	13.7	
3	Vía 1	1	-0.4	1.0	-0.5	1.4	
	Central		-2.6	6.8	-4.0	10.5	
	Vía 2		-4.0	10.6	-5.2	14.0	
12	Vía 1	2	0.1	0.3	0.03	0.1	
	Central		-1.9	5.1	-2.7	7.3	
	Vía 2		-2.8	7.5	-3.4	9.2	
4	Vía 1	1	1	-2.5	6.6	-3.7	9.8
	Central			-1.5	4.0	-2.6	7.0
	Vía 2			0.1	0.4	-0.2	0.6
5	Vía 1	-2.7		7.3	-4.0	10.5	
	Central	-1.6		4.3	-2.6	7.1	
	Vía 2	0.3		0.8	-0.1	0.3	
6	Vía 1	1	-2.7	7.1	-3.6	9.6	
	Central		-1.5	4.0	-2.3	6.2	
	Vía 2		0.3	0.7	-0.2	0.6	
11	Vía 1	2	-2.1	5.6	-2.8	7.6	
	Central		-1.3	3.5	-1.8	4.9	
	Vía 2		0.3	0.7	-0.1	0.3	
7	Vía 1	2	1 y 2	-2.8	7.5	-3.6	9.5
	Central			-3.8	10.2	-5.3	14.1
	Vía 2			-3.3	8.9	-4.3	11.5
8	Vía 1	-2.9		7.8	-4.1	10.8	
	Central	-3.9		10.5	-5.8	15.4	
	Vía 2	-3.6		9.7	-4.6	12.4	
9	Vía 1	1	-3.0	8.1	-4.1	10.9	
	Central		-4.0	10.6	-6.4	17.0	
	Vía 2		-3.8	10.1	-5.4	14.3	
10	Vía 1	2	-3.3	8.7	-4.2	11.2	
	Central		-4.3	11.4	-6.6	17.6	
	Vía 2		-4.0	10.6	-5.5	14.7	

DpL: deflexión permisible longitudinal de 37.5 mm

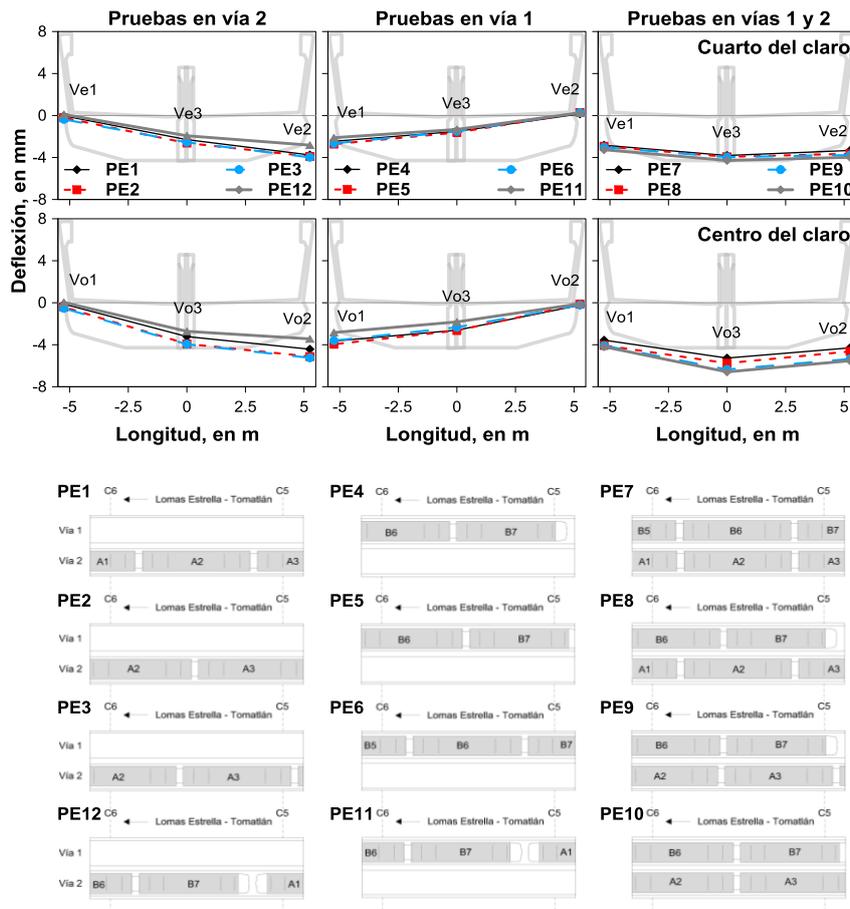


Figura 4.4. Vista transversal de las deflexiones longitudinales a un cuarto y centro del claro para las PE.

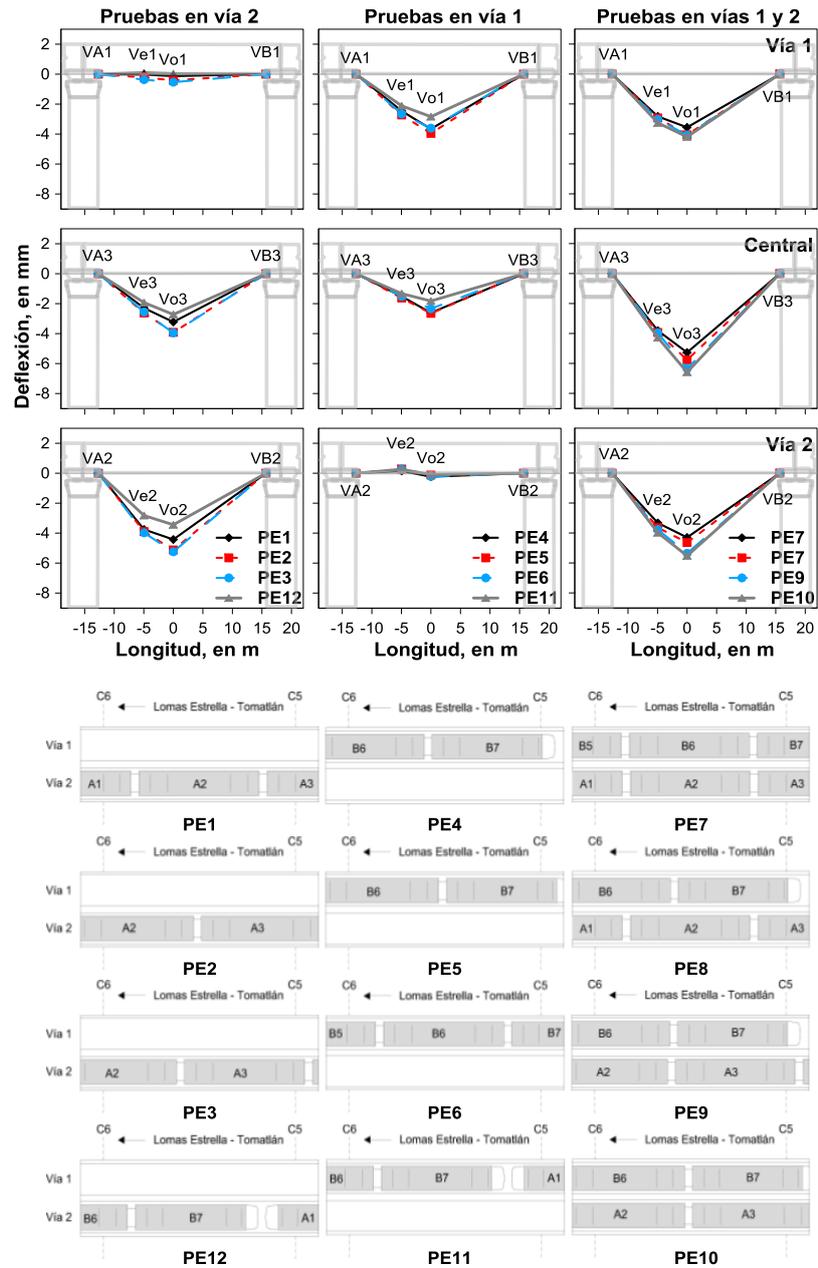


Figura 4.5. Vista longitudinal de las deflexiones longitudinales a un cuarto y centro del claro para las PE.

Tabla 4.4. Deflexiones transversales a un cuarto y centro del claro con su porcentaje respecto de la deflexión permisible transversal (%DpT) para las PE.

Deflexiones respecto de la nervadura central, en mm

PE	Nervadura	Número de trenes	Vía	Cuarto del claro		Centro del claro	
				Deflexión	%DpT	Deflexión	%DpT
1	vía 1	1	2	2.3	12.9	3.1	17.7
	vía 2			-1.5	8.3	-1.2	6.9
2	vía 1			2.4	13.7	3.5	20.0
	vía 2			-1.3	7.3	-1.2	6.9
3	vía 1			2.2	12.5	3.4	19.5
	vía 2			-1.4	8.1	-1.3	7.4
12	vía 1	2		2.0	11.6	2.8	15.8
	vía 2			-0.9	5.1	-0.7	4.1
4	vía 1	1	1	-0.9	5.4	-1.0	6.0
	vía 2			1.7	9.5	2.4	13.6
5	vía 1			-1.1	6.3	-1.3	7.5
	vía 2			1.9	10.9	2.5	14.4
6	vía 1			-1.1	6.5	-1.3	7.2
	vía 2			1.8	10.2	2.1	12.2
11	vía 1	2		-0.8	4.5	-1.0	5.8
	vía 2			1.6	9.1	1.7	9.9
7	vía 1	2	1 y 2	1.0	5.6	1.7	9.8
	vía 2			0.5	2.7	1.0	5.6
8	vía 1			1.0	5.7	1.7	9.7
	vía 2			0.3	1.7	1.1	6.4
9	vía 1			0.9	5.4	2.3	13.0
	vía 2			0.2	1.1	1.0	5.7
10	vía 1	1.0	5.8	2.4	13.7		
	vía 2	0.3	1.7	1.1	6.1		

DpT: deflexión permisible transversal de 17.5 mm

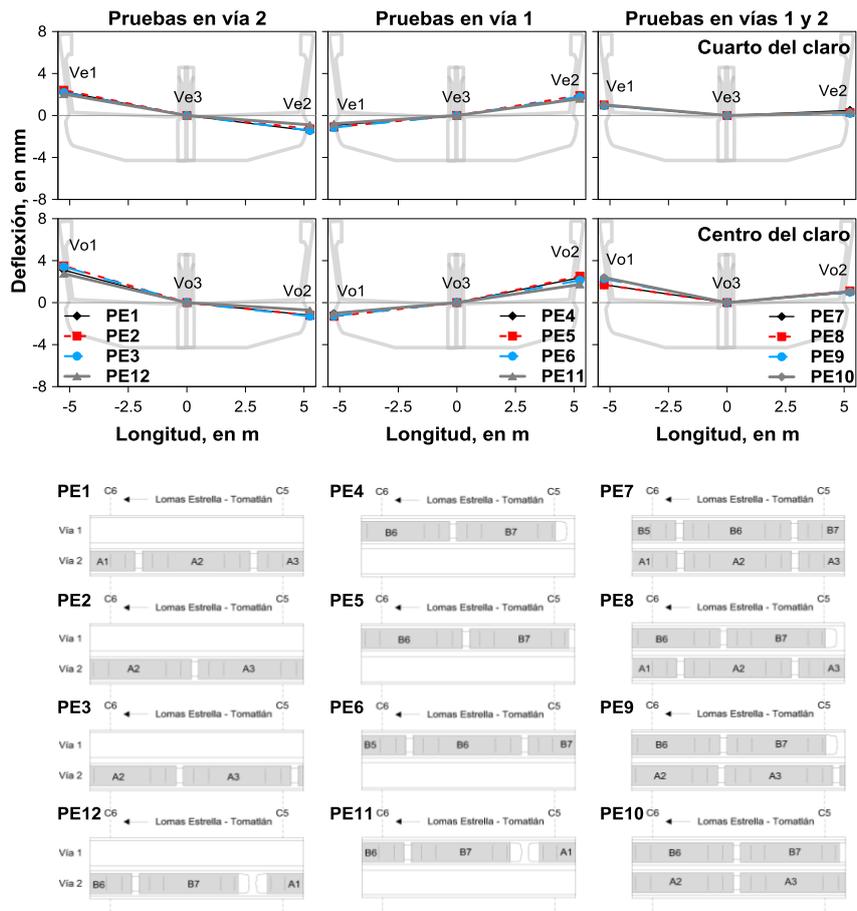


Figura 4.6. Deflexión transversal a un cuarto y centro del claro para las PE.

Deformación unitaria

La tabla 4.5 muestra los valores de deformación unitaria de la trabe para las tres nervaduras en el centro del claro. En la figura 4.7 se presentan gráficamente los valores de deformación en tensión (positivo) y en compresión (negativo) de cada PE. Para el caso donde se cuenta con dos valores de deformación en el mismo nivel de la nervadura se obtuvo el valor promedio.

Tabla 4.5. Deformaciones unitarias en el centro del claro de la trabe para las PE.

Nervadura	Lecho de la trabe	Deformaciones, en $\mu\epsilon$											
		PE1	PE2	PE3	PE12	PE4	PE5	PE6	PE11	PE7	PE8	PE9	PE10
		Vía 2				Vía 1				Vías 1 y 2			
Vía 1	superior	-11.3	-15.9	-16.8	-5.4	-51.7	-54.8	-44.2	-40.4	-46.9	-56.5	-52.6	-52.9
	inferior	-13.1	-13.8	-9.6	-5.8	32.0	32.8	25.9	21.2	20.4	34.0	37.3	38.1
Central	superior	-41.9	-58.0	-60.3	-38.5	-50.8	-52.9	-37.4	-37.0	-79.4	-95.4	-110.3	-113.1
	inferior	15.3	22.0	31.6	16.5	19.2	17.5	14.2	15.5	41.5	51.6	68.1	68.5
Vía2	superior	-70.9	-88.2	-84.6	-54.5	-12.2	-13.2	-9.5	-3.7	-67.2	-64.7	-76.8	-77.9
	inferior	17.3	27.1	38.5	20.1	-7.2	-8.2	-3.9	-0.8	32.2	34.5	52.8	51.7

Valor negativo indica compresión y valor positivo tensión

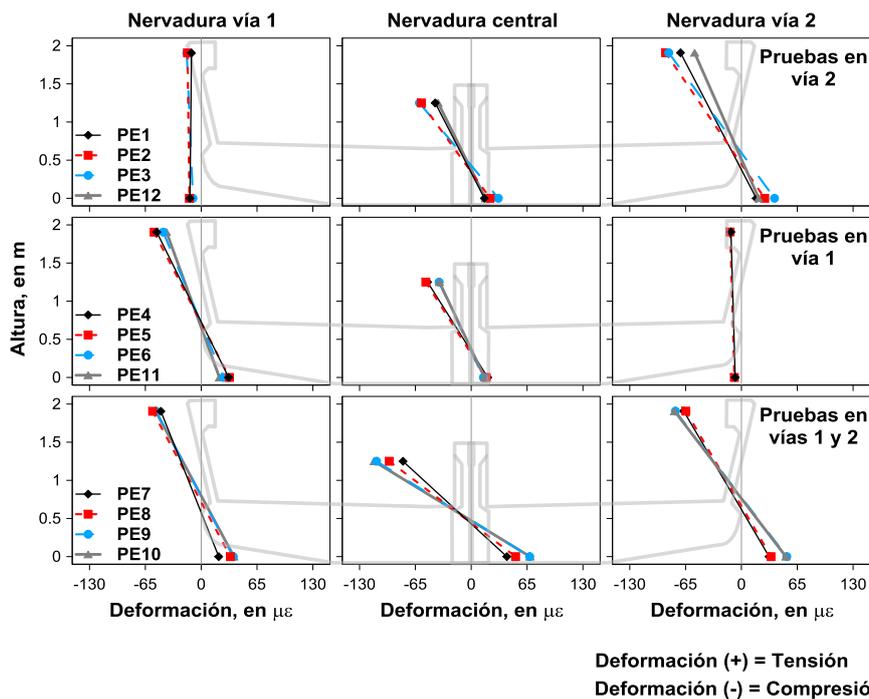


Figura 4.7. Deformaciones en tensión y compresión de las nervaduras de la trabe al centro del claro para las PE.

4.1.2. Columnas

Para las columnas se obtuvieron dos tipos de mediciones: de desplazamiento lateral y de giros. En el caso de las PE, a los desplazamientos laterales se les realizó una corrección por movimiento en los andamios. Se emplearon los giros absolutos alrededor del eje longitudinal medidos en los andamios de cada columna (ITC1 e ITC2). El giro absoluto se le restó al desplazamiento lateral. En la tabla 4.6 se muestran los valores de desplazamiento lateral con y sin giro del andamio, además de las diferencias en porcentaje respecto de los desplazamientos con giro del andamio (%Dcg) para las PE en una sola vía. En el caso de las PE con un tren en cada vía los desplazamientos laterales fueron mucho menores a los que se registraron en las demás PE. Esto provocó que la resolución del sensor no fuera suficiente para medir los pequeños movimientos en los andamios. La diferencia en porcentaje para las PE en una sola vía muestra que el movimiento en los andamios resulta como máximo de 0.26 mm (2% a 13%) y en las PE con un tren en cada vía como máximo de 0.60 mm (menor a 31%). En la figura 4.8 se observan los desplazamientos laterales de las columnas con y sin giro de los andamios para las PE en una sola vía. Los valores de los desplazamientos laterales para las PE se ven en la tabla 4.7. En la figura 4.9 se presentan los desplazamientos laterales para las PE sin corrección por giro de los andamios.

Tabla 4.6. Desplazamientos laterales de las columnas con y sin giro del andamio para las PE, con su diferencia en porcentaje respecto de los desplazamientos con el giro del andamio (%Dcg).

PE	Vía	C5			C6		
		Capitel		%Dcg	Capitel		%Dcg
		Con giro	Sin giro		Con giro	Sin giro	
4	1	0.46	0.48	5.4	0.89	0.91	2.5
5		0.57	0.61	7.4	0.97	1.01	3.7
6		0.80	0.82	2.4	1.00	1.03	3.2
11		0.63	0.66	4.4	0.77	0.81	5.0
12*	2	-1.12	-0.98	12.9	-1.27	-1.21	4.8

*Valor negativo indica desplazamiento hacia extradós.

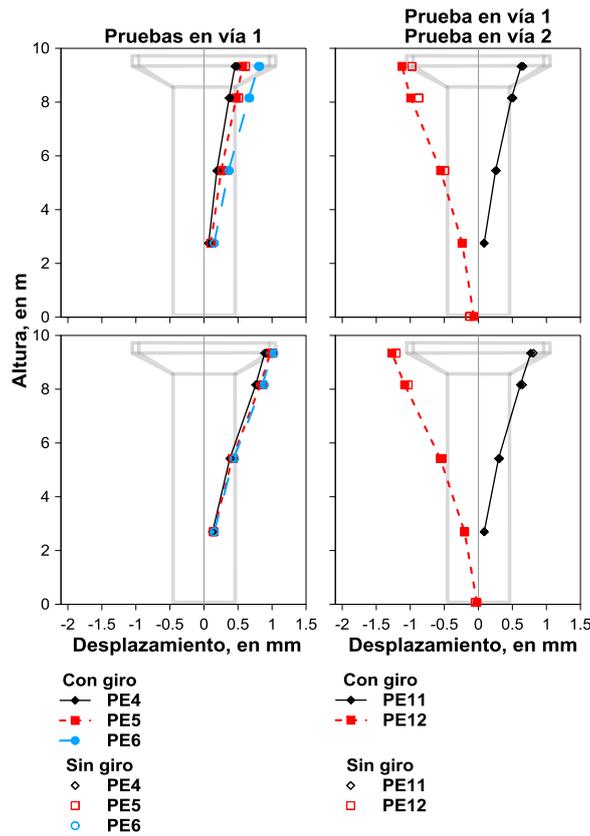


Figura 4.8. Desplazamientos laterales con y sin giro del andamio para las PE en una sola vía.

Tabla 4.7. Desplazamientos laterales de las columnas para las PE.

Columna	Sensor	Altura, en m	Desplazamientos, en mm											
			PE1	PE2	PE3	PE12	PE4	PE5	PE6	PE11	PE7	PE8	PE9	PE10
			Vía 2				Vía 1				Vías 1 y 2			
C5	HA5	9.33	-1.20	-1.27	-1.18	-1.12	0.46	0.57	0.80	0.63	-0.50	-0.80	-0.80	-0.69
	HA4	8.15	-1.01	-1.07	-0.99	-0.99	0.37	0.47	0.66	0.49	-0.46	-0.70	-0.71	-0.62
	HA3	5.45	-0.54	-0.56	-0.51	-0.55	0.19	0.25	0.36	0.25	-0.26	-0.39	-0.39	-0.34
	HA2	2.75	-0.22	-0.21	-0.20	-0.24	0.07	0.10	0.15	0.08	-0.12	-0.17	-0.17	-0.15
	HA1	0.03	-0.06	-0.01	-0.01	-0.07					-0.06	-0.05	-0.05	-0.05
C6	HB5	9.34	-1.02	-1.29	-1.27	-1.27	0.89	0.97	1.00	0.77	-0.15	-0.15	-0.38	-0.27
	HB4	8.16	-0.86	-1.10	-1.08	-1.08	0.76	0.83	0.86	0.62	-0.16	-0.17	-0.38	-0.29
	HB3	5.42	-0.43	-0.54	-0.54	-0.56	0.38	0.42	0.44	0.30	-0.08	-0.09	-0.21	-0.16
	HB2	2.7	-0.14	-0.16	-0.17	-0.20	0.13	0.14	0.15	0.09	-0.03	-0.04	-0.09	-0.07
	HB1	0.07				-0.02					-0.01			

Valor negativo indica desplazamiento hacia extradós.

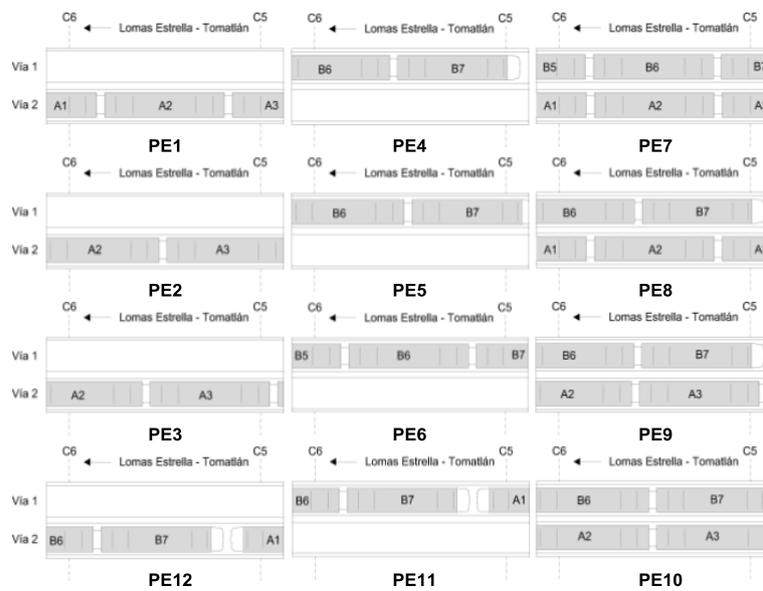
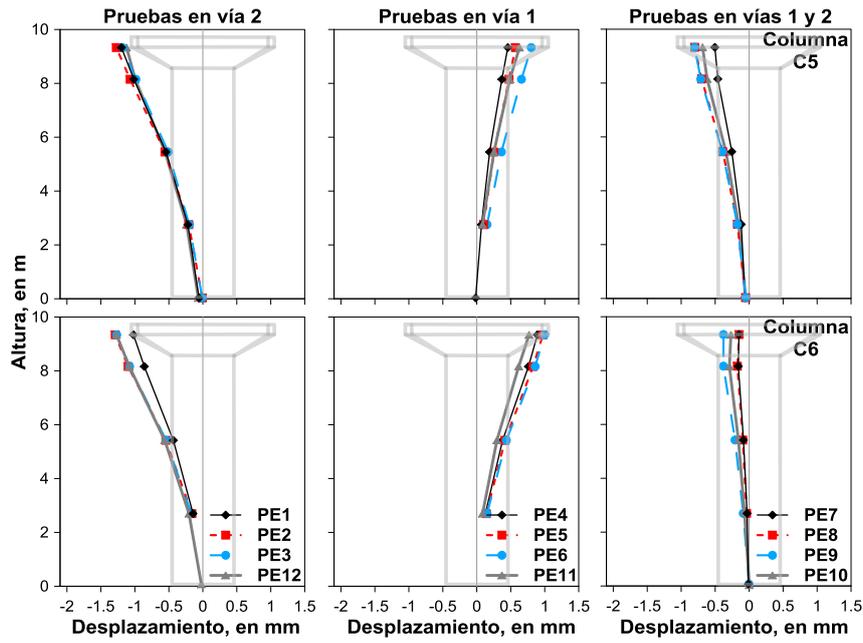


Figura 4.9. Desplazamientos laterales para las PE. El valor negativo indica desplazamiento hacia extradós.

Giros de las columnas

Los giros en el extremo inferior de las columnas se obtuvieron de las historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas y de las historias de giros absolutos alrededor del eje longitudinal de la base de las columnas y del lecho superior de las zapatas (Apéndice A).

Las historias de giros relativos se obtuvieron al procesar las historias de desplazamiento en el extremo inferior de las columnas de potenciómetros y deformímetros. Para el cálculo de giros relativos se utilizó una sola ecuación para los dos casos posibles: desplazamientos con signo diferente y desplazamientos con signo igual (figura 4.10), es decir, la diferencia de los desplazamientos del mismo nivel de cada lado de la columna y dividida por la separación horizontal entre sus puntos de medición [4.6].

$$\theta = \frac{d_i - d_{i+1}}{L} \quad [4.6]$$

Donde

θ : Giro, en rad

d: Desplazamientos en el extremo inferior de las columnas en el mismo nivel, en mm

L: Distancia horizontal entre los puntos de medición de los desplazamientos, en mm

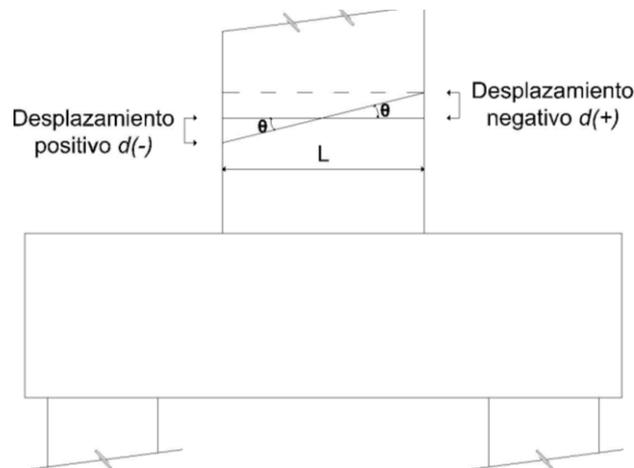


Figura 4.10. Esquemas de medición de los desplazamientos en el extremo inferior de las columnas.

Los valores de giros en la base de las columnas y zapatas se encuentran en la tabla 4.8 y en la figura 4.11. En las tablas 4.9 y 4.10 se observan los valores de giros, en el extremo inferior de las columnas, de potenciómetros y deformímetros, respectivamente. Los giros relativos se acumularon. Los giros en el extremo inferior de las columnas para el cálculo con potenciómetros y deformímetros se presentan en la figura 4.12.

Tabla 4.8. Giros en el lecho superior de la zapata y la base de las columnas para las PE obtenidos con inclinómetros.

Columna	Sensor	Altura, en m	Giros, en rad											
			PE1	PE2	PE3	PE12	PE4	PE5	PE6	PE11	PE7	PE8	PE9	PE10
			Vía 2				Vía 1				Vías 1 y 2			
C5	IAT2	0.71	-8.2E-5	-7.9E-5	-7.8E-5	-7.7E-5	1.7E-5	2.0E-5	2.8E-5	1.6E-5	-5.0E-5	-6.3E-5	-5.6E-5	-5.3E-5
	IAT1	0.00	-3.1E-5	-3.7E-5	-4.0E-5	-3.9E-5	1.9E-5	2.0E-5	2.0E-5	1.3E-5	-1.1E-5	-1.1E-5	-2.0E-5	-1.7E-5
C6	IBT2	0.67	-7.4E-5	-7.7E-5	-7.4E-5	-7.1E-5	4.1E-5	3.9E-5	3.7E-5	1.8E-5	-2.6E-5	-2.4E-5	-3.1E-5	-2.8E-5
	IBT1	0.00	-2.6E-6	-4.1E-6	-3.5E-6	-1.0E-5	-3.5E-6	1.6E-5	1.4E-5	7.2E-6	-5.2E-6	-2.6E-6	4.9E-6	6.7E-6

Tabla 4.9. Giros en el extremo inferior de las columnas para las PE obtenidos con potenciómetros.

Columna	Sensor	Altura, en m	Giros, en rad											
			PE1	PE2	PE3	PE12	PE4	PE5	PE6	PE11	PE7	PE8	PE9	PE10
			Vía 2				Vía 1				Vías 1 y 2			
C5	pA5-pA6	1.63	-2.7E-5	-2.7E-5	-2.5E-5	-2.8E-5	1.0E-5	1.2E-5	1.6E-5	1.3E-5	-1.6E-5	-1.9E-5	-1.9E-5	-1.7E-5
	pA3-pA4	1.12	-1.6E-5	-1.6E-5	-1.5E-5	-2.0E-5	6.5E-6	7.4E-6	1.0E-5	9.0E-6	-8.9E-6	-1.2E-5	-1.2E-5	-1.1E-5
	pA1-pA2	0.61	-5.6E-6	-5.5E-6	-5.1E-6	-9.0E-6	2.7E-6	3.0E-6	3.7E-6	3.5E-6	-4.1E-6	-4.3E-6	-4.0E-6	-3.5E-6
C6	pB5-pB6	1.62	-3.0E-5	-2.7E-5	-2.9E-5	-3.3E-5	1.4E-5	1.4E-5	1.4E-5	1.7E-5	-9.6E-6	-9.3E-6	-1.3E-5	-1.0E-5
	pB3-pB4	1.11	-2.0E-5	-1.8E-5	-1.8E-5	-2.2E-5	7.9E-6	8.0E-6	8.1E-6	9.6E-6	-7.9E-6	-7.0E-6	-9.6E-6	-7.0E-6
	pB1-pB2	0.60	-9.1E-6	-8.2E-6	-8.2E-6	-9.8E-6	2.5E-6	2.6E-6	2.8E-6	3.7E-6	-4.0E-6	-3.4E-6	-4.7E-6	-3.3E-6

Tabla 4.10. Giros en el extremo inferior de las columnas para las PE obtenidos con deformímetros.

Columna	Sensor	Altura, en m	Giros, en rad											
			PE1	PE2	PE3	PE12	PE4	PE5	PE6	PE11	PE7	PE8	PE9	PE10
			Vía 2				Vía 1				Vías 1 y 2			
C5	DA3-DA4	1.12	-1.8E-5	-1.9E-5	-1.7E-5	-1.7E-5	3.5E-6	5.1E-6	8.4E-6	6.9E-6	-6.2E-6	-8.2E-6	-8.5E-6	-6.8E-6
	DA1-DA2	0.69	-9.3E-6	-9.7E-6	-8.7E-6	-8.9E-6	2.0E-6	2.8E-6	4.5E-6	3.5E-6	-4.9E-6	-6.0E-6	-6.1E-6	-5.2E-6
C6	DB1-DB2	0.68	-6.6E-6	-6.7E-6	-7.2E-6	-8.4E-6	4.4E-6	4.7E-6	5.3E-6	3.8E-6	-2.6E-6	-2.5E-6	-3.7E-6	-2.9E-6

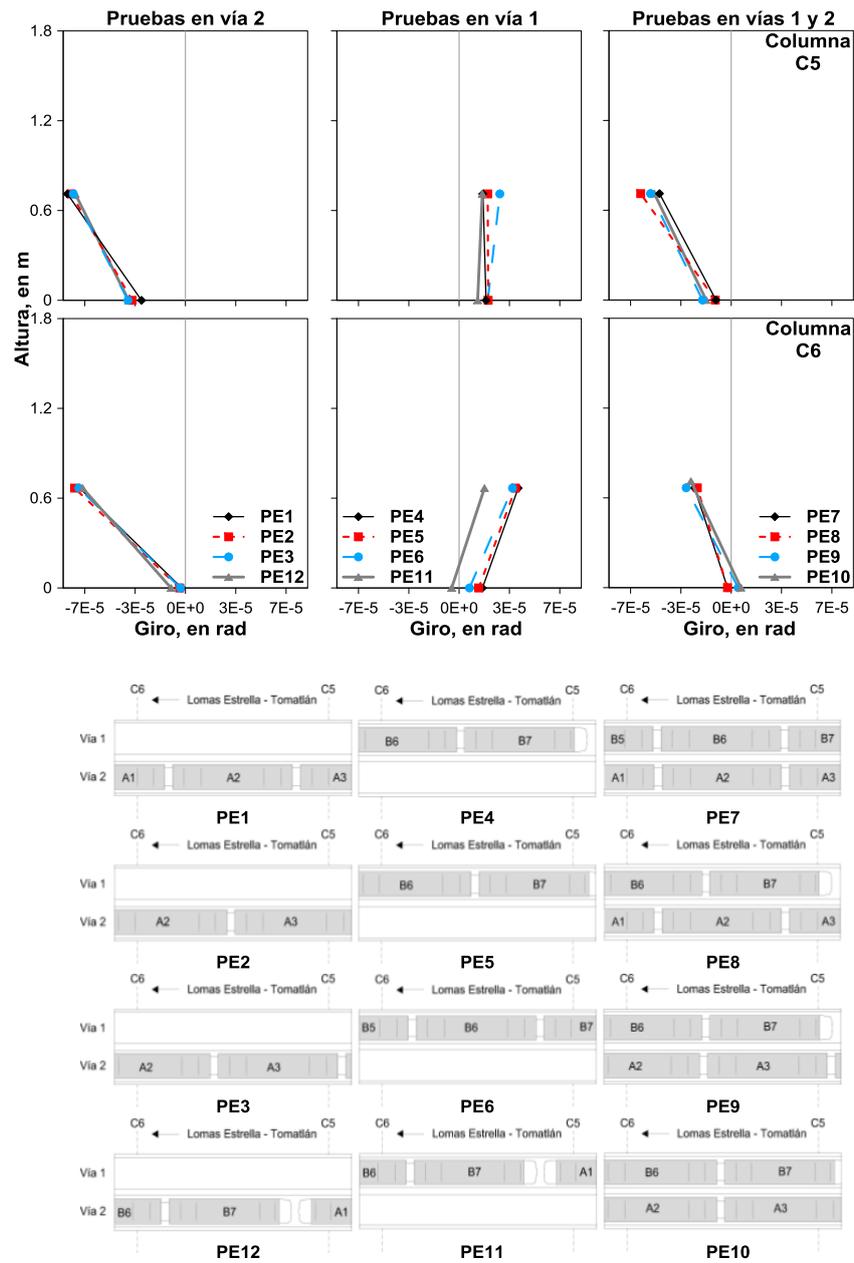


Figura 4.11. Giros en la base de las columnas y lecho superior de las zapatas para las PE obtenidos con los inclinómetros.

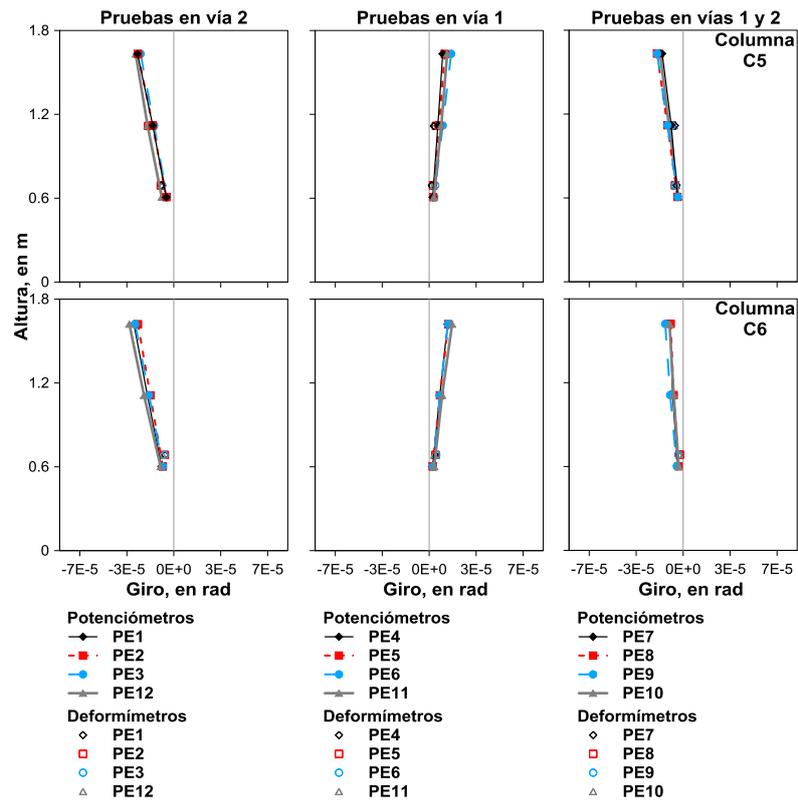


Figura 4.12. Giros en el extremo inferior de las columnas para las PE obtenidos con los potenciómetros y deformímetros.

4.2. Procesamiento pruebas dinámicas

El intervalo representativo de las PD se consideró de tal manera que contemplara el valor máximo absoluto de la respuesta del tramo instrumentado. En la tabla 4.11 se presentan los intervalos elegidos para las PD. Las historias de los registros de las PD se encuentran en el apéndice B.

Tabla 4.11. Intervalos de medición, en segundos, para los sensores colocados en las columnas y la trabe.

PD	Corte		Intervalo de medición	
	Inicio	Fin	Inicio	Fin
1			13	37
2			12	38
3	0	50	16	32
4			16	33
5			7	45
6			12	33
1*			4	25
2*	0	30	4	27
3*			9	20
4*			9	22
5*	0	50	12	42
6*			15	30
5**	0	30	4	25
6**			5	26
7f	0	280	10	50
7a			217	270
8f	0	316	16	41
8a			240	310
9f	0	235	10	43
9a			180	225
10f	0	158	10	30
10a			94	148
11f	0	130	20	41
11a			62	110
12f	0	160	10	32
12a			113	150

*intervalo de pruebas para los desplazamientos verticales

**intervalo de pruebas para las deformaciones unitarias en la trabe

Los tipos de medición para las columnas y la trabe son los mismos que en las PE. Sin embargo, para las PD se obtuvieron de la siguiente manera:

- Desplazamiento vertical, deflexión y deformación de la trabe para el instante donde el desplazamiento vertical a un cuarto (Ve1, Ve3 y Ve2) y centro del claro (Vo1, Vo3 y Vo2) en las tres nervaduras es máximo para cada PD.
- Desplazamiento lateral y de giro relativo para el instante donde el desplazamiento lateral del capitel de cada columna (HA5 y HB5) es máximo para cada PD.
- Valores adicionales de desplazamiento vertical, deflexión y deformación de la trabe en el instante donde el desplazamiento lateral del capitel de cada columna (HA5 y HB5) es máximo.
- Valores adicionales de desplazamientos laterales en columnas en los instantes donde la respuesta de la trabe es máxima, es decir, desplazamiento lateral en el instante donde el desplazamiento vertical a un cuarto (Ve1, Ve3 y Ve2) y centro del claro (Vo1, Vo3 y Vo2) en las tres nervaduras es máximo.

El cálculo de deflexiones y de los giros relativos en el extremo inferior de las columnas fue el mismo para PE y PD.

4.2.1. Trabe

Los valores de desplazamiento vertical se muestran en la tabla 4.12 para los instantes donde el desplazamiento es máximo a un cuarto del claro y en la tabla 4.13 cuando es máximo en el centro del claro. Los desplazamientos verticales se presentan en las figuras 4.13 a 4.16 para el caso del cuarto del claro y en las figuras 4.17 a 4.20 para el centro del claro.

Tabla 4.12. Desplazamientos verticales en el instante donde son máximos a un cuarto del claro de la trabe para las PD.

Nervadura	Sección transversal	Desplazamiento, en mm																	
		PD1	PD3	PD2	PD4	PD11f	PD11a	PD12f	PD12a	PD5	PD6	PD7f	PD7a	PD8f	PD8a	PD9f	PD9a	PD10f	PD10a
		28 km/h	61 km/h	28 km/h	57 km/h	50 km/h		43 km/h		30 km/h	58 km/h	28 km/h	58 km/h	31 km/h	59 km/h				
		Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2									
Vía 1	C5	-1.2	-0.7	1.2	1.5	-0.7	-1.0	1.5	1.2	0.06	1.1	0.1	0.1	1.0	0.2	0.0	0.0	1.0	0.2
	1/4 claro	-4.2	-3.1	1.3	1.8	-3.6	-4.2	1.57	1.2	-2.6	-1.2	-2.7	-3.0	-1.6	-3.0	-2.3	-2.4	-0.7	-2.9
	Centro claro	-4.9	-3.8	1.3	1.9	-4.3	-4.9	1.6	1.2	-3.4	-1.6	-3.7	-4.1	-2.3	-3.9	-2.8	-2.9	-0.9	-3.8
	C6	-1.1	-0.5	1.4	1.8	-0.7	-1.2	1.6	1.4	0.4	1.4	0.0	0.2	1.2	0.3	0.1	0.1	0.9	0.2
Central	C5	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	-0.3	-0.2	-0.6	-0.6	-1.1	-1.3	-1.1	-1.1	-1.2	-1.1	-0.9	-0.9	-0.9	-1.1
	1/4 claro	-2.3	-2.4	-3.1	-3.1	-2.3	-2.2	-3.1	-3.2	-5.6	-5.8	-5.2	-5.5	-5.8	-5.6	-4.8	-4.9	-4.7	-5.5
	Centro claro	-3.1	-3.3	-4.1	-4.0	-3.2	-2.8	-4.0	-4.2	-7.2	-7.4	-6.9	-7.4	-7.6	-7.3	-6.2	-6.3	-6.1	-7.3
	C6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.5	-0.4	-0.6	-0.6	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	-0.9	-0.9	-0.9	-1.1
Vía 2	C5	0.8	0.3	-1.5	-2.0	0.6	0.8	-1.9	-1.5	-0.9	-1.8	-0.7	-0.7	-1.6	-0.7	-0.7	-0.7	-1.6	-0.8
	1/4 claro	1.0	0.2	-5.6	-6.6	0.61	1.1	-6.2	-5.5	-4.8	-6.7	-4.2	-4.4	-6.3	-4.5	-4.0	-4.1	-5.9	-4.5
	Centro claro	0.5	-0.3	-6.4	-7.3	0.2	0.6	-6.9	-6.3	-6.1	-8.0	-5.4	-5.6	-7.6	-5.8	-5.3	-5.3	-7.1	-5.7
	C6	0.8	0.3	-1.5	-1.9	0.6	0.8	-1.7	-1.4	-0.8	-1.7	-0.4	-0.5	-1.4	-0.6	-0.3	-0.3	-1.0	-0.6

Valor negativo indica desplazamiento descendente de la trabe

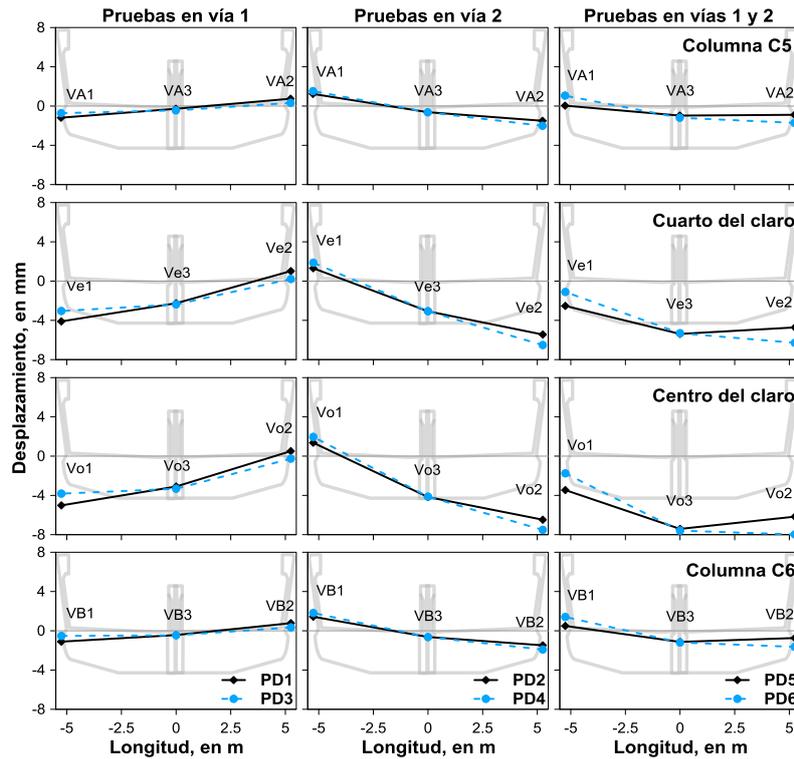


Figura 4.13. Desplazamientos verticales para las PD sin frenado del tren en el instante donde es máximo a un cuarto del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

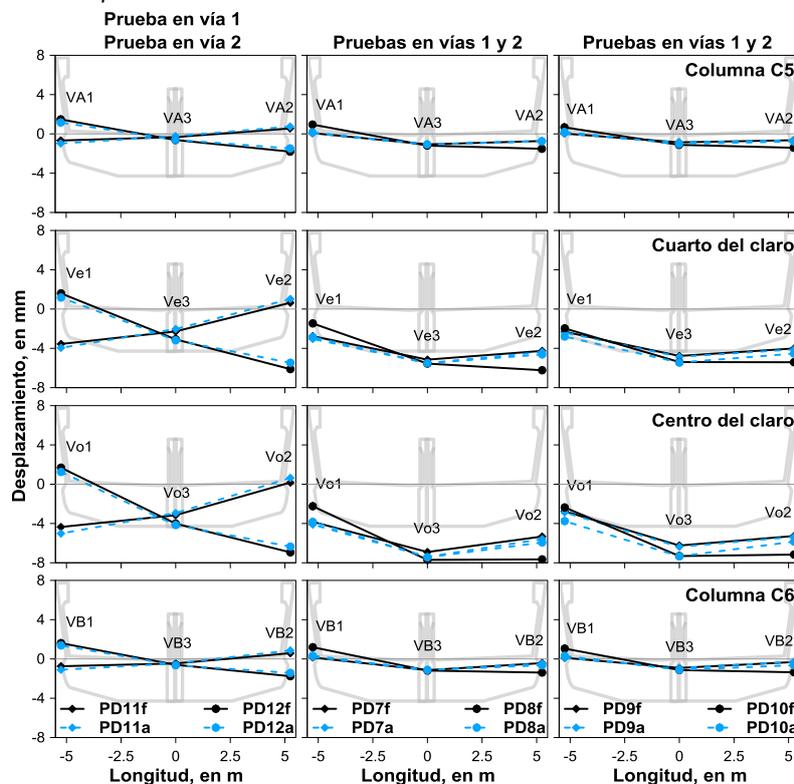


Figura 4.14. Desplazamientos verticales para las PD con frenado del tren en el instante donde es máximo a un cuarto del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

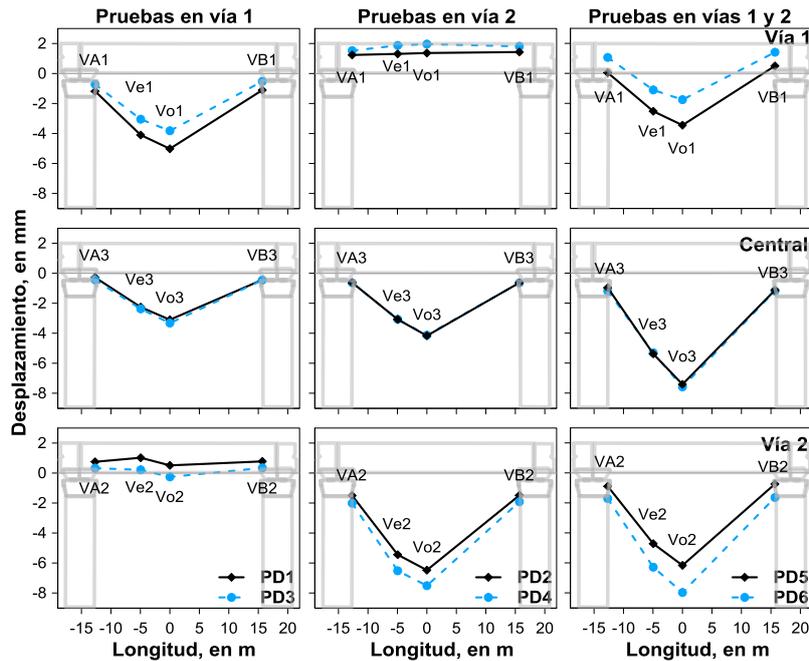


Figura 4.15. Desplazamientos verticales para las PD sin frenado del tren en el instante donde es máximo a un cuarto del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

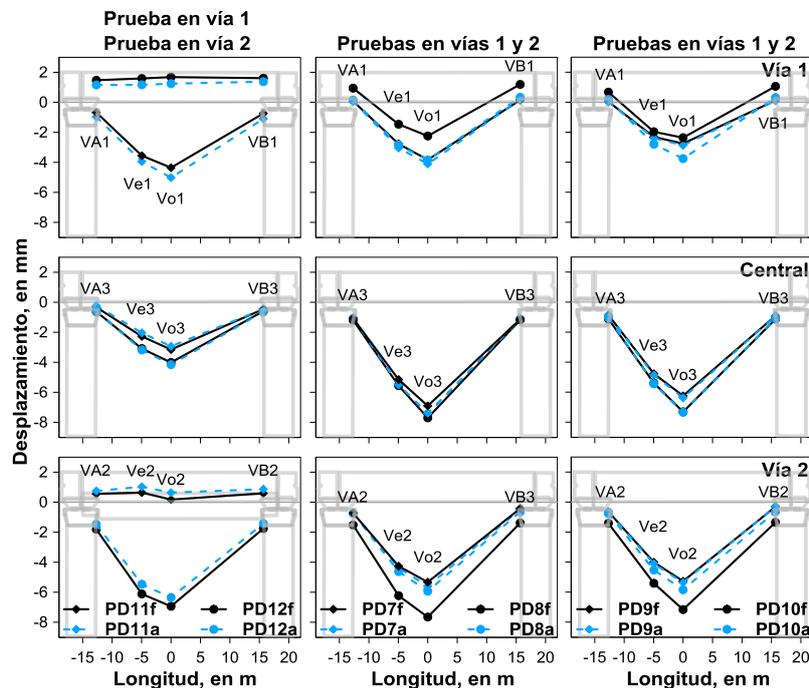


Figura 4.16. Desplazamientos verticales para las PD con frenado del tren en el instante donde es máximo a un cuarto del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

Tabla 4.13. Desplazamientos verticales en el instante donde son máximos en el centro del claro de la trabe para las PD.

Nervadura	Sección transversal	Desplazamiento, en mm																	
		PD1	PD3	PD2	PD4	PD11f	PD11a	PD12f	PD12a	PD5	PD6	PD7f	PD7a	PD8f	PD8a	PD9f	PD9a	PD10f	PD10a
		28 km/h	61 km/h	28 km/h	57 km/h	50 km/h		43 km/h		30 km/h	58 km/h	28 km/h		58 km/h		31 km/h		59 km/h	
Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2											
Vía 1	C5	-1.2	-0.7	1.2	1.5	-0.7	-1.0	1.5	1.2	0.04	1.1	0.1	0.1	0.9	0.2	0.0	0.0	0.7	0.2
	1/4 claro	-4.1	-3.0	1.3	1.9	-3.6	-3.9	1.59	1.2	-2.5	-1.1	-2.8	-3.0	-1.5	-2.9	-2.3	-2.4	-2.0	-2.8
	Centro claro	-5.0	-3.8	1.4	2.0	-4.4	-5.0	1.7	1.2	-3.5	-1.8	-3.8	-4.1	-2.2	-3.8	-2.8	-2.9	-2.4	-3.8
	C6	-1.1	-0.5	1.4	1.8	-0.7	-1.1	1.6	1.4	0.5	1.4	0.2	0.2	1.2	0.3	0.1	0.1	1.1	0.3
Central	C5	-0.3	-0.4	-0.6	-0.6	-0.3	-0.2	-0.6	-0.6	-1.0	-1.2	-1.1	-1.1	-1.2	-1.1	-0.9	-0.9	-1.1	-1.0
	1/4 claro	-2.3	-2.4	-3.1	-3.1	-2.3	-2.0	-3.1	-3.2	-5.4	-5.3	-5.2	-5.5	-5.6	-5.5	-4.8	-4.9	-5.4	-5.4
	Centro claro	-3.1	-3.3	-4.2	-4.1	-3.2	-2.9	-4.0	-4.2	-7.4	-7.6	-6.9	-7.4	-7.7	-7.4	-6.2	-6.4	-7.3	-7.3
	C6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-0.5	-0.5	-0.6	-0.6	-1.1	-1.2	-1.1	-1.1	-1.2	-1.1	-0.9	-0.9	-1.1	-1.1
Vía 2	C5	0.7	0.3	-1.5	-2.0	0.6	0.7	-1.8	-1.5	-0.9	-1.7	-0.7	-0.7	-1.5	-0.8	-0.6	-0.7	-1.4	-0.8
	1/4 claro	1.0	0.2	-5.4	-6.5	0.64	1.0	-6.1	-5.5	-4.7	-6.3	-4.3	-4.4	-6.2	-4.6	-4.0	-4.1	-5.4	-4.5
	Centro claro	0.5	-0.3	-6.5	-7.5	0.2	0.6	-6.9	-6.4	-6.2	-8.0	-5.3	-5.6	-7.7	-5.9	-5.3	-5.4	-7.2	-5.8
	C6	0.8	0.3	-1.5	-1.9	0.6	0.9	-1.8	-1.4	-0.7	-1.6	-0.4	-0.5	-1.4	-0.6	-0.3	-0.3	-1.4	-0.6

Valor negativo indica desplazamiento descendente de la trabe

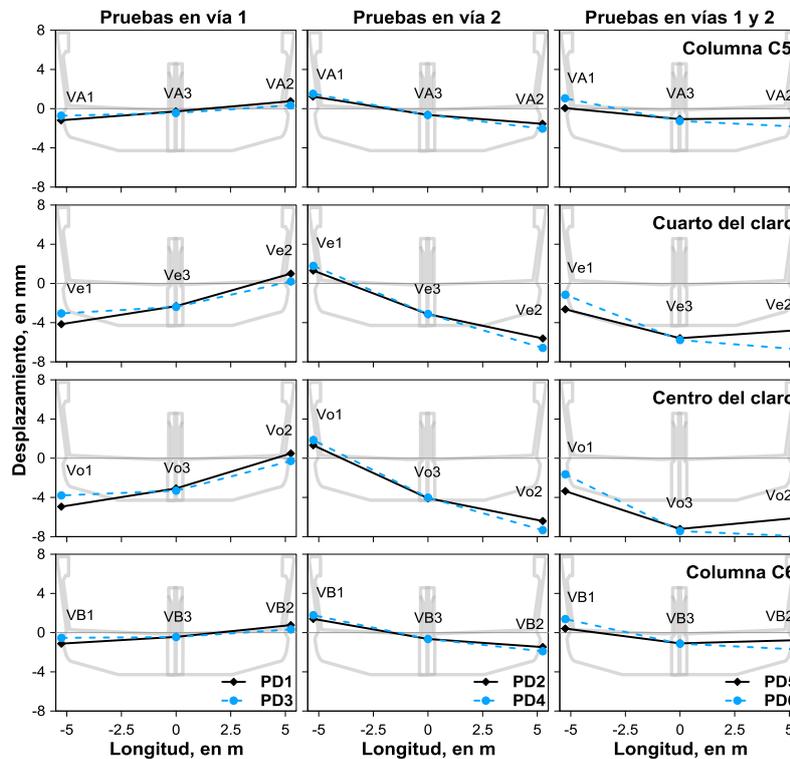


Figura 4.15. Desplazamientos verticales para las PD sin frenado del tren en el instante donde es máximo en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

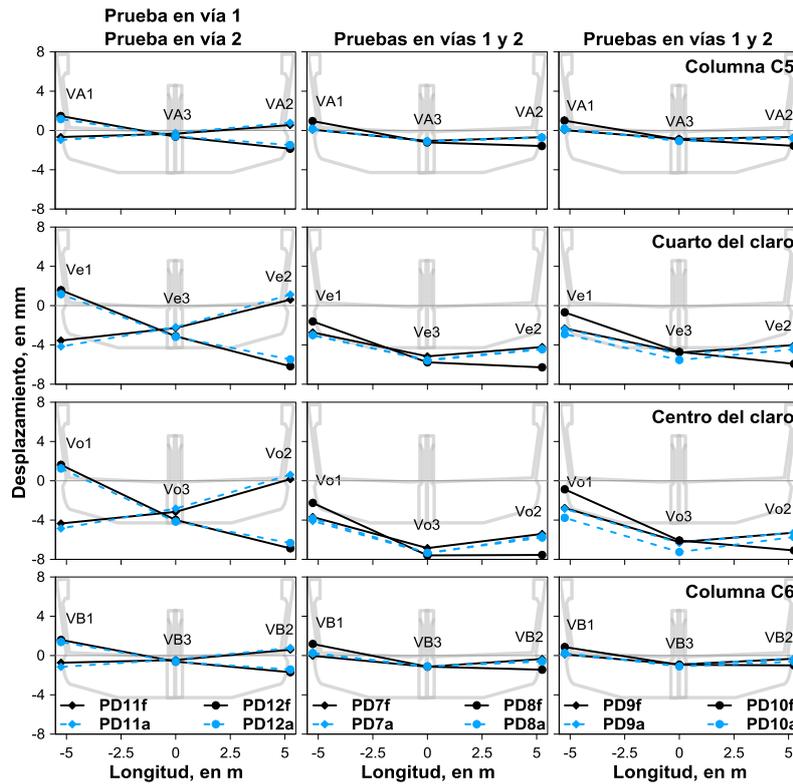


Figura 4.16. Desplazamientos verticales para las PD con frenado del tren en el instante donde es máximo en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

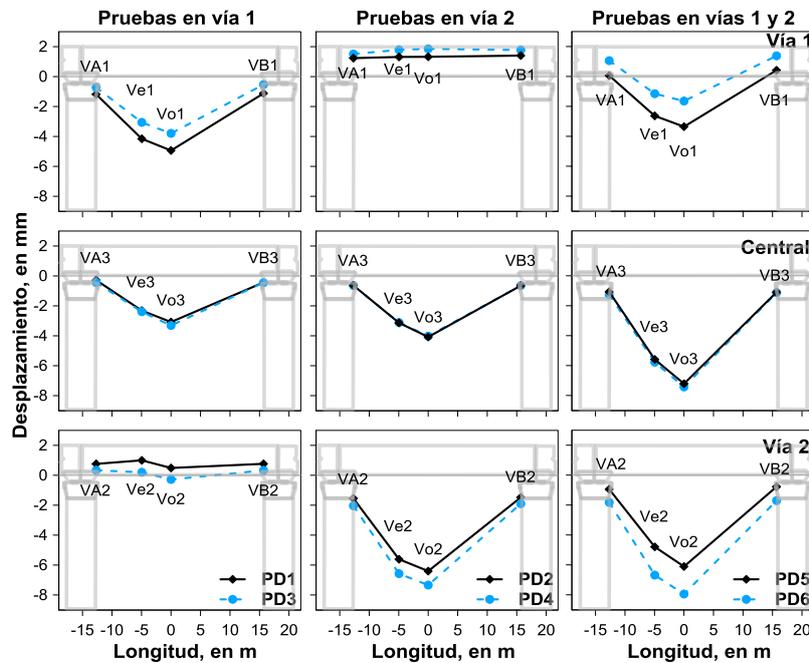


Figura 4.17. Desplazamientos verticales para las PD sin frenado del tren en el instante donde es máximo en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

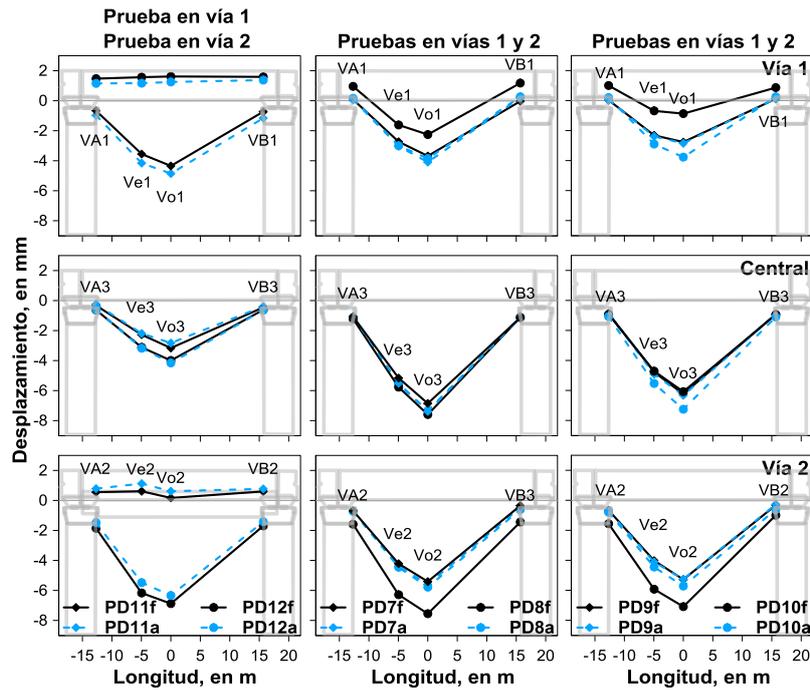


Figura 4.18. Desplazamientos verticales para las PD con frenado del tren en el instante donde es máximo en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

En la tabla 4.14 y en las figuras 4.19 a 4.22 se encuentran las deflexiones longitudinales en el instante donde son máximas a un cuarto del claro. Los valores de deflexión longitudinal en el instante donde son máximos en el centro del claro de la trabe y su valor respecto de la deflexión permisible (%DpL) se presentan en las tablas 4.15 y 4.16. Las deflexiones transversales en el instante donde es máximo en el centro del claro respecto de la nervadura central y su porcentaje respecto de la deflexión permisible (%DpT) se ven en las tablas 4.17 y 4.18. Las deflexiones longitudinal y transversal se muestran en las figuras 4.23 a 4.26 y en las figuras 4.27 a 4.28, respectivamente. El cálculo de las deflexiones transversales y su valor respecto de las deflexiones permisibles (%DpL y %DpT) solo se realizó para las deflexiones longitudinales máximas, es decir, en el instante donde el desplazamiento es máximo en el centro del claro de la trabe.

Tabla 4.14. Deflexiones longitudinales en el instante donde son máximas a un cuarto del claro de la trabe para las PD.

Nervadura	Sección transversal	Deflexión, en mm																	
		PD1 28 km/h	PD3 61 km/h	PD2 28 km/h	PD4 57 km/h	PD11f 50 km/h	PD11a 50 km/h	PD12f 43 km/h	PD12a 43 km/h	PD5 30 km/h	PD6 58 km/h	PD7f 28 km/h	PD7a 28 km/h	PD8f 58 km/h	PD8a 58 km/h	PD9f 31 km/h	PD9a 31 km/h	PD10f 59 km/h	PD10a 59 km/h
		Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2									
Vía 1	1/4 claro	-3.0	-2.4	0.03	0.2	-2.9	-3.1	0.06	0.05	-2.8	-2.3	-2.8	-3.2	-2.5	-3.2	-2.4	-2.4	-1.7	-3.1
	Centro claro	-3.8	-3.1	0.01	0.2	-3.7	-3.7	0.1	0.004	-3.7	-2.8	-3.7	-4.2	-3.3	-4.1	-2.8	-2.9	-1.8	-4.0
Central	1/4 claro	-2.0	-2.0	-2.5	-2.5	-1.9	-1.9	-2.5	-2.6	-4.5	-4.6	-4.1	-4.4	-4.4	-4.5	-3.9	-4.0	-3.8	-4.5
	Centro claro	-2.7	-2.8	-3.4	-3.4	-2.8	-2.5	-3.4	-3.5	-6.3	-6.2	-5.8	-6.3	-6.5	-6.2	-5.4	-5.4	-5.1	-6.2
Vía 2	1/4 claro	0.2	-0.1	-4.1	-4.6	0.04	0.3	-4.4	-4.0	-3.9	-4.9	-3.6	-3.7	-4.8	-3.8	-3.4	-3.5	-4.5	-3.7
	Centro claro	-0.3	-0.6	-4.9	-5.4	-0.4	-0.2	-5.1	-4.9	-5.3	-6.2	-4.9	-5.0	-6.2	-5.1	-4.8	-4.7	-5.8	-5.0

Dpl: deflexión permisible longitudinal de 37.5 mm

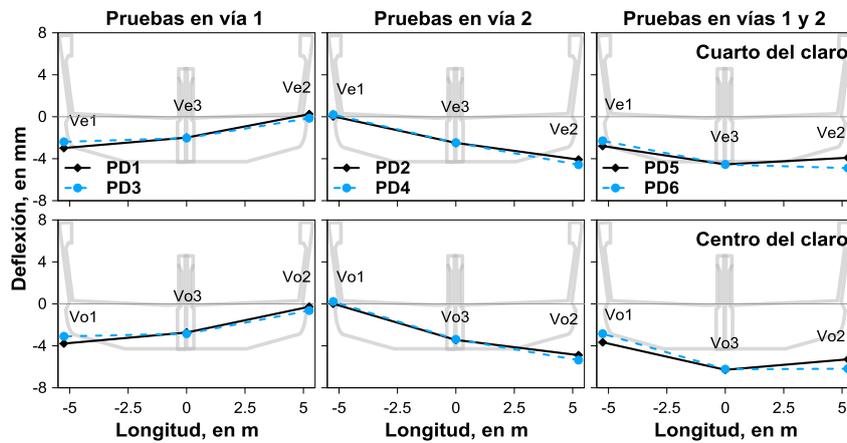


Figura 4.19. Deflexiones longitudinales para las PD sin frenado del tren en el instante donde es máxima a un cuarto del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

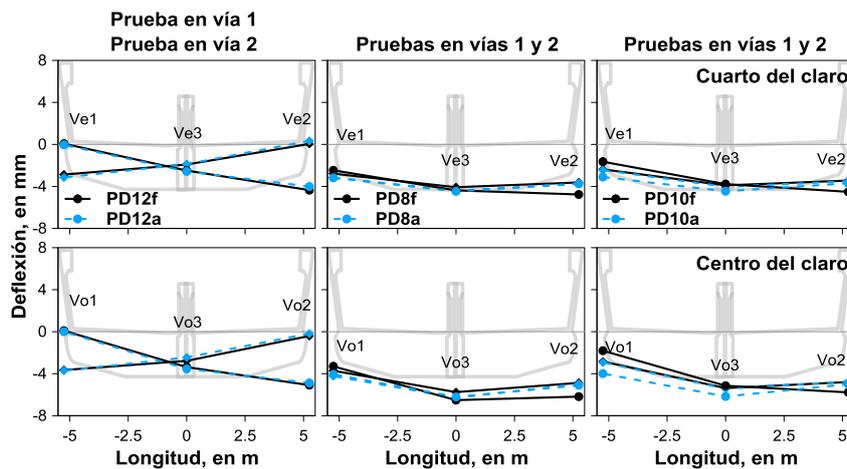


Figura 4.20. Deflexiones longitudinales para las PD con frenado del tren en el instante donde es máxima a un cuarto del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

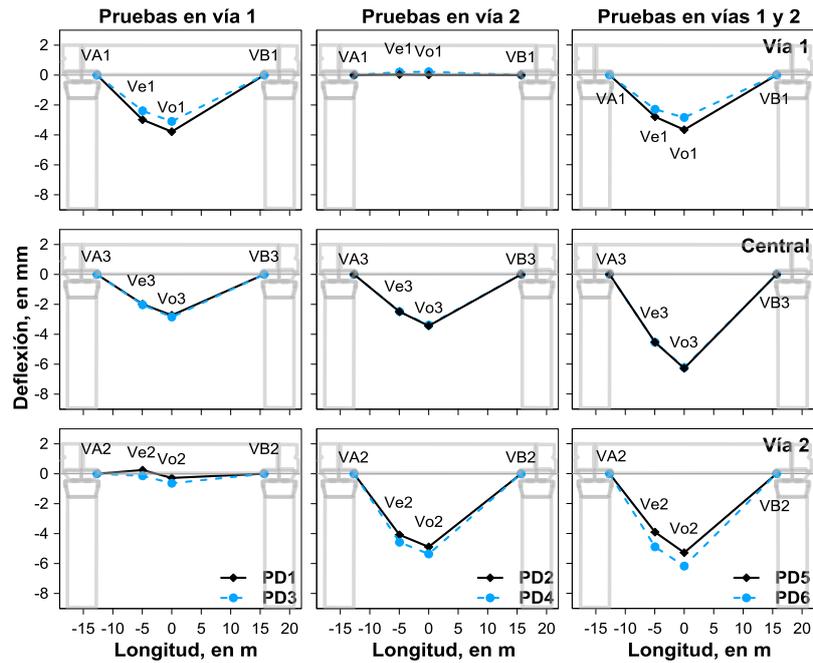


Figura 4.21. Deflexiones longitudinales para las PD sin frenado del tren en el instante donde es máxima a un cuarto del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

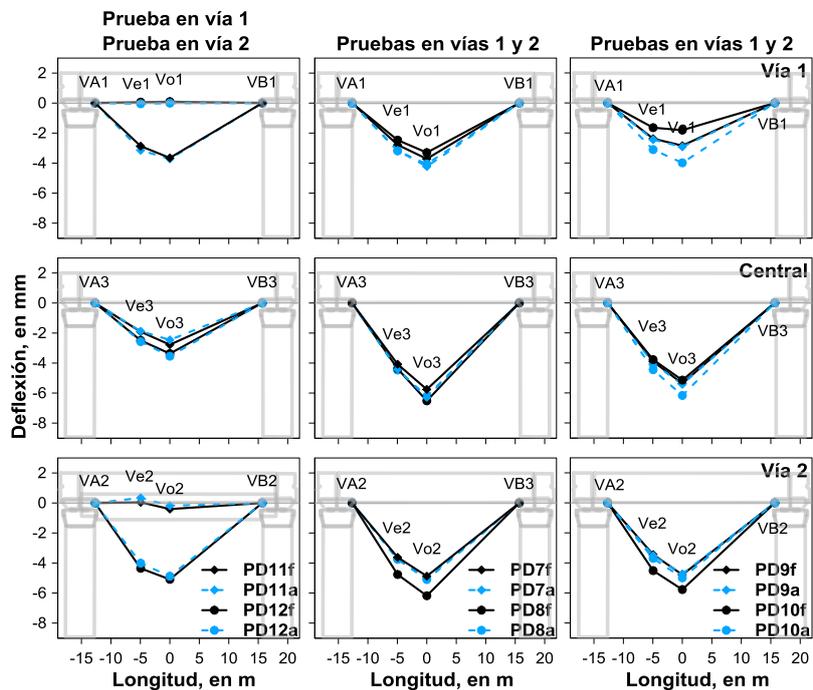


Figura 4.22. Deflexiones longitudinales para las PD con frenado del tren en el instante donde es máxima a un cuarto del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

Tabla 4.15. Deflexiones longitudinales en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe y su porcentaje respecto de la deflexión permisible longitudinal (%DpL) para las PD en una vía.

PD	Velocidad, en km/h	Nervadura	Número de trenes	Vía	Deflexiones, en mm					
					Cuarto del claro		Centro del claro			
					Deflexión	%DpL	Deflexión	%DpL		
1	28	Vía 1	1	1	-2.9	7.6	-3.9	10.4		
		Central			-1.9	5.0	-2.8	7.4		
		Vía 2			0.2	0.4	-0.3	0.8		
Vía 1	-2.4	6.3			-3.2	8.5				
Central	-1.9	5.1			-2.9	7.7				
Vía 2	-0.1	0.3			-0.6	1.6				
2	28	Vía 1		2	1	0.02	0.05	0.1	0.1	
		Central				-2.5	6.6	-3.5	9.4	
		Vía 2				-4.0	10.5	-5.0	13.3	
4	57	Vía 1			2	2	0.3	0.7	0.3	0.8
		Central					-2.4	6.5	-3.5	9.3
		Vía 2					-4.5	12.0	-5.5	14.8
11f	50	Vía 1	1	1		-2.7	7.3	-3.7	9.7	
		Central				-1.8	4.9	-2.8	7.5	
		Vía 2				-0.01	0.04	-0.4	1.2	
11a		Vía 1		1	1	-3.0	8.1	-4.0	10.7	
						Central	-1.8	4.9	-2.6	7.0
						Vía 2	0.3	0.8	-0.1	0.4
12f	43	Vía 1	2	2	-0.04	0.1	0.1	0.3		
		Central			-2.5	6.6	-3.5	9.3		
		Vía 2			-4.2	11.2	-5.2	14.0		
12a		Vía 1		2	2	-0.1	0.2	0.03	0.1	
						Central	-2.5	6.6	-3.6	9.5
						Vía 2	-3.9	10.4	-4.9	13.1

Dpl: deflexión permisible longitudinal de 37.5 mm

Tabla 4.16. Deflexiones longitudinales en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe y su porcentaje respecto de la deflexión permisible longitudinal (%DpL) para las PD en las dos vía.

PD	Velocidad, en km/h	Nervadura	Número de trenes	Vías	Deflexiones, en mm							
					Cuarto del claro		Centro del claro					
					Deflexión	%DpL	Deflexión	%DpL				
5	30	Vía 1	2	1 y 2	-2.7	7.2	-3.7	9.9				
		Central			-4.4	11.6	-6.4	17.0				
		Vía 2			-3.9	10.3	-5.3	14.2				
6	58	Vía 1			2	1 y 2	-2.3	6.3	-3.1	8.1		
		Central					-4.4	11.7	-6.5	17.3		
		Vía 2					-4.7	12.6	-6.3	16.8		
7f	28	Vía 1				2	1 y 2	-2.9	7.7	-3.9	10.5	
		Central						-4.1	10.8	-5.8	15.5	
		Vía 2						-3.6	9.6	-4.7	12.6	
7a		Vía 1			2		1 y 2	-3.1	8.4	-4.2	11.3	
								Central	-4.4	11.8	-6.3	16.8
								Vía 2	-3.7	10.0	-5.0	13.3
8f	58	Vía 1	2	1 y 2	-2.5	6.6	-3.3	8.8				
		Central			-4.4	11.7	-6.5	17.4				
		Vía 2			-4.7	12.7	-6.2	16.5				
8a		Vía 1		2	1 y 2	-3.1	8.1	-4.1	10.9			
						Central	-4.4	11.8	-6.3	16.9		
						Vía 2	-3.9	10.4	-5.2	14.0		
9f	31	Vía 1	2	1 y 2	-2.4	6.4	-2.9	7.6				
		Central			-3.9	10.4	-5.4	14.3				
		Vía 2			-3.4	9.1	-4.7	12.7				
9a		Vía 1		2	1 y 2	-2.4	6.5	-2.9	7.8			
						Central	-4.0	10.6	-5.5	14.6		
						Vía 2	-3.6	9.5	-4.9	13.0		
10f	59	Vía 1	2	1 y 2	-2.7	7.3	-3.2	8.6				
		Central			-4.3	11.4	-6.2	16.5				
		Vía 2			-4.0	10.7	-5.8	15.4				
10a		Vía 1		2	1 y 2	-3.0	8.1	-4.0	10.7			
						Central	-4.4	11.7	-6.3	16.7		
						Vía 2	-3.8	10.1	-5.1	13.7		

Dpl: deflexión permisible longitudinal de 37.5 mm

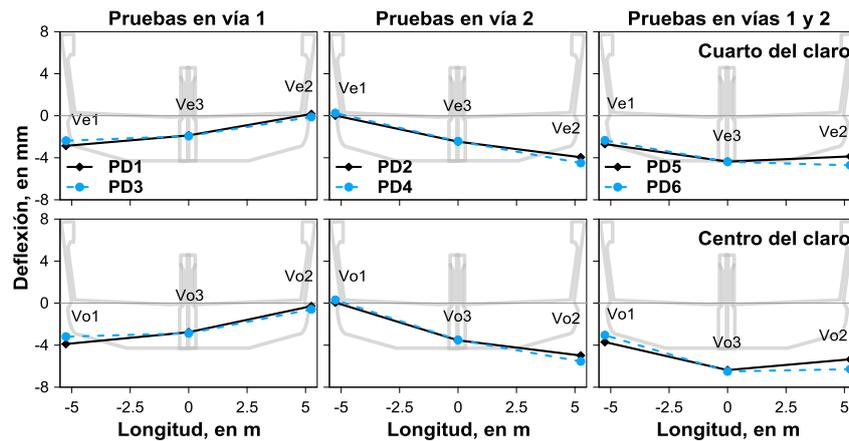


Figura 4.23. Deflexiones longitudinales para las PD sin frenado del tren en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

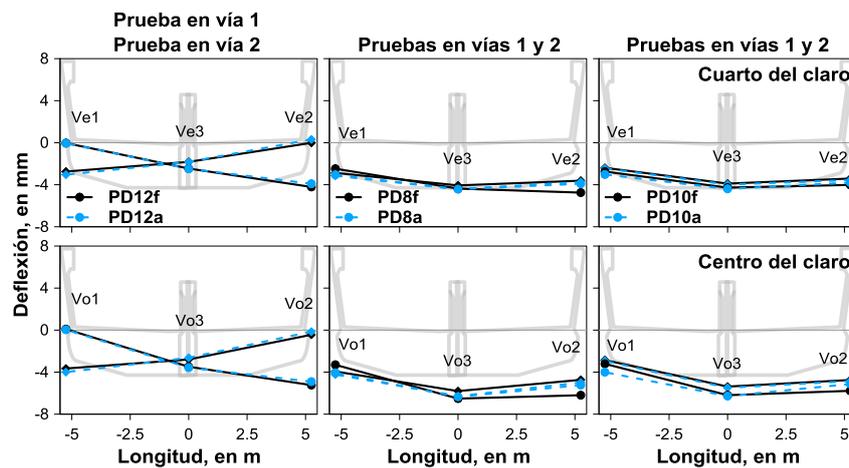


Figura 4.24. Deflexiones longitudinales para las PD con frenado del tren en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

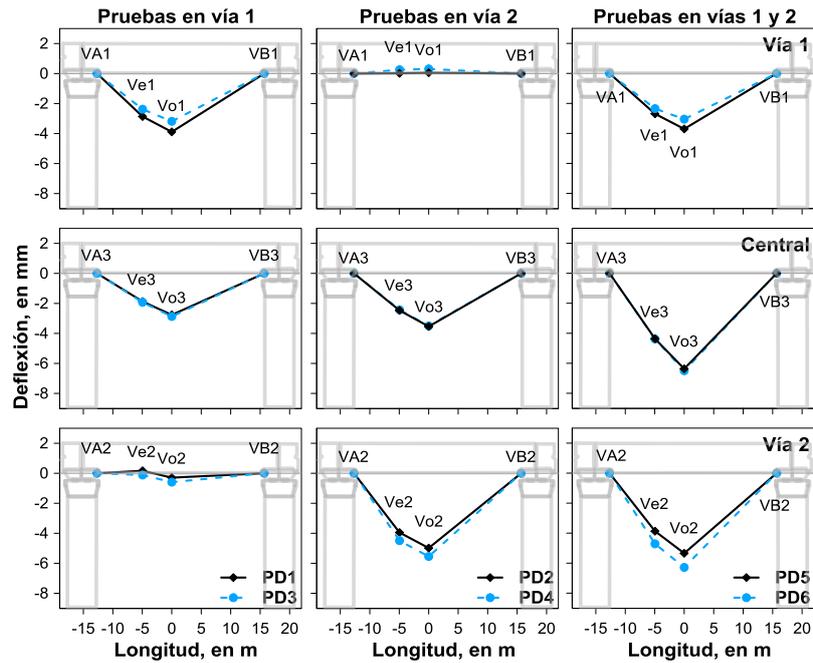


Figura 4.25. Deflexiones longitudinales para las PD sin frenado del tren en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

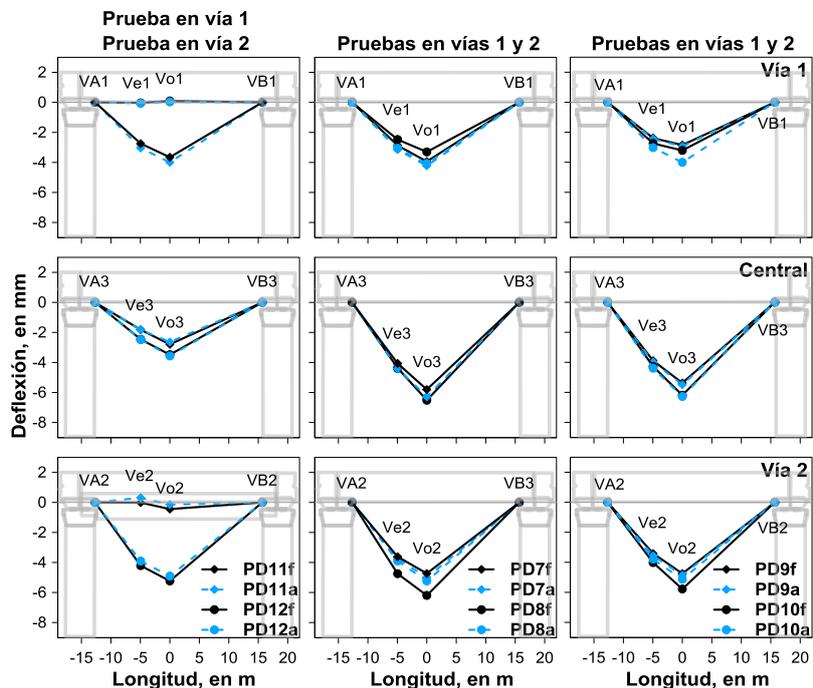


Figura 4.26. Deflexiones longitudinales para las PD con frenado del tren en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

Tabla 4.17. Deflexiones transversales en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe y su porcentaje respecto de la deflexión permisible transversal (%DpT) para las PD en una vía.

PD	Velocidad, en km/h	Nervadura	Número de trenes	Vía	Deflexiones, en mm			
					Cuarto del claro		Centro del claro	
					Deflexión	%Dp	Deflexión	%Dp
1	28	vía 1 vía 2	1	1	-1.0	5.7	-1.1	6.4
					2.0	11.7	2.5	14.1
3	61	vía 1 vía 2		1	-0.5	2.6	-0.3	1.8
					1.8	10.3	2.3	13.0
2	28	vía 1 vía 2		2	2.5	14.2	3.6	20.5
					-1.5	8.5	-1.4	8.3
4	57	vía 1 vía 2		2	2.7	15.3	3.8	21.8
					-2.1	11.8	-2.0	11.7
11f	50	vía 1 vía 2		1	-0.9	5.3	-0.9	4.9
					1.8	10.3	2.4	13.4
11a	50	vía 1 vía 2		1	-1.2	6.9	-1.4	7.8
					2.1	12.2	2.5	14.2
12f	43	vía 1 vía 2	2	2.4	13.8	3.6	20.5	
				-1.8	10.0	-1.7	10.0	
12a	43	vía 1 vía 2	2	2.4	13.9	3.6	20.6	
				-1.4	8.1	-1.3	7.7	

DpT: deflexión permisible transversal de 17.5 mm

Tabla 4.18. Deflexiones transversales en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe y su porcentaje respecto de la deflexión permisible transversal (%DpT) para las PD en las dos vías.

PD	Velocidad, en km/h	Nervadura	Número de trenes	Vía	Deflexiones, en mm			
					Cuarto del claro		Centro del claro	
					Deflexión	%Dp	Deflexión	%Dp
5	30	vía 1 vía 2	2	1 y 2	1.7	9.6	2.7	15.2
					0.5	2.8	1.0	5.9
6	58	vía 1 vía 2			2.0	11.6	3.4	19.7
					-0.3	1.9	0.2	1.2
7f	28	vía 1 vía 2			1.2	6.8	1.9	10.7
					0.5	2.6	1.1	6.1
7a	28	vía 1 vía 2			1.3	7.3	2.1	11.8
					0.7	3.9	1.3	7.4
8f	58	vía 1 vía 2			1.9	10.8	3.2	18.4
					-0.4	2.2	0.3	1.8
8a	58	vía 1 vía 2			1.4	7.8	2.3	13.0
					0.5	3.0	1.1	6.4
9f	31	vía 1 vía 2			1.5	8.6	2.5	14.4
					0.5	2.8	0.6	3.6
9a	31	vía 1 vía 2			1.5	8.8	2.5	14.6
					0.4	2.4	0.6	3.6
10f	59	vía 1 vía 2	1.5	8.8	3.0	17.0		
			0.3	1.5	0.4	2.4		
10a	59	vía 1 vía 2	1.4	7.8	2.3	13.0		
			0.6	3.4	1.1	6.6		

DpT: deflexión permisible transversal de 17.5 mm

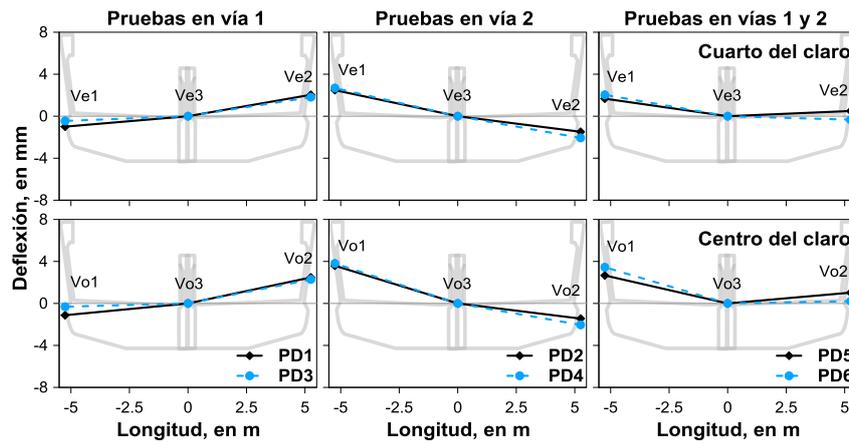


Figura 4.27. Deflexiones transversales para las PD sin frenado del tren en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

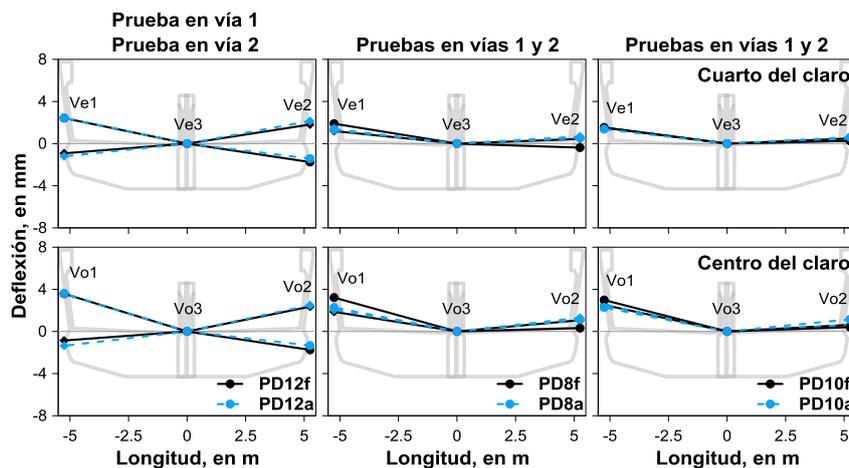


Figura 4.28. Deflexiones transversales para las PD con frenado del tren en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

Deformaciones unitarias

Las deformaciones unitarias en el centro del claro de la trabe para las PD se presentan en la tabla 4.19 y 4.20 para los instantes donde los desplazamientos verticales a un cuarto y centro del claro son máximos, respectivamente. En las figuras 4.29 y 4.30 se muestran las deformaciones unitarias máximas en tensión y compresión en cada nervadura para las PD en el instante donde los desplazamientos a un cuarto del claro son máximos y en las figuras 4.31 y 4.32 en el instante donde los desplazamientos al centro del claro son máximos.

Tabla 4.19. Deformaciones unitarias en el centro del claro de la trabe para las PD en el instante de los desplazamientos verticales a un cuarto del claro.

Nervadura	Lecho de la trabe	Deformaciones, en $\mu\epsilon$																	
		PD1 28 km/h	PD3 61 km/h	PD2 28 km/h	PD4 57 km/h	PD11f 50 km/h	PD11a	PD12f 43 km/h	PD12a	PD5 30 km/h	PD6 58 km/h	PD7f 28 km/h	PD7a	PD8f 58 km/h	PD8a	PD9f 31 km/h	PD9a	PD10f 59 km/h	PD10a
		Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2									
Vía 1	superior	-50.2	-42.6	-3.9	-2.6	-46.7	-47.2	-3.3	-4.8	-52.2	-44.7	-51.6	-59.9	-48.2	-53.2	-42.4	-44.9	-30.4	-57.3
	inferior	28.6	24.6	-4.3	-6.1	27.0	28.2	-5.5	-3.9	24.4	16.1	20.5	34.6	18.8	32.0	17.1	18.8	4.4	25.1
Central	superior	-48.5	-49.3	-45.8	-41.3	-48.9	-45.0	-42.2	-50.1	-94.3	-91.6	-86.1	-106.7	-92.6	-92.7	-82.8	-90.4	-72.7	-98.6
	inferior	23.6	25.3	29.8	29.2	25.0	23.9	28.7	31.1	57.0	56.3	49.3	61.9	55.2	57.6	49.6	52.2	43.0	54.4
Vía2	superior	-6.0	-8.1	-65.2	-71.0	-6.4	-4.7	-67.3	-67.9	-72.0	-81.1	-69.8	-74.4	-79.0	-70.2	-66.1	-68.5	-77.5	-71.4
	inferior	-1.2	4.1	44.4	51.0	1.6	-2.4	47.5	45.2	43.6	56.5	40.6	44.1	53.2	41.7	41.2	41.3	48.8	38.4

Valor negativo indica compresión y valor positivo tensión

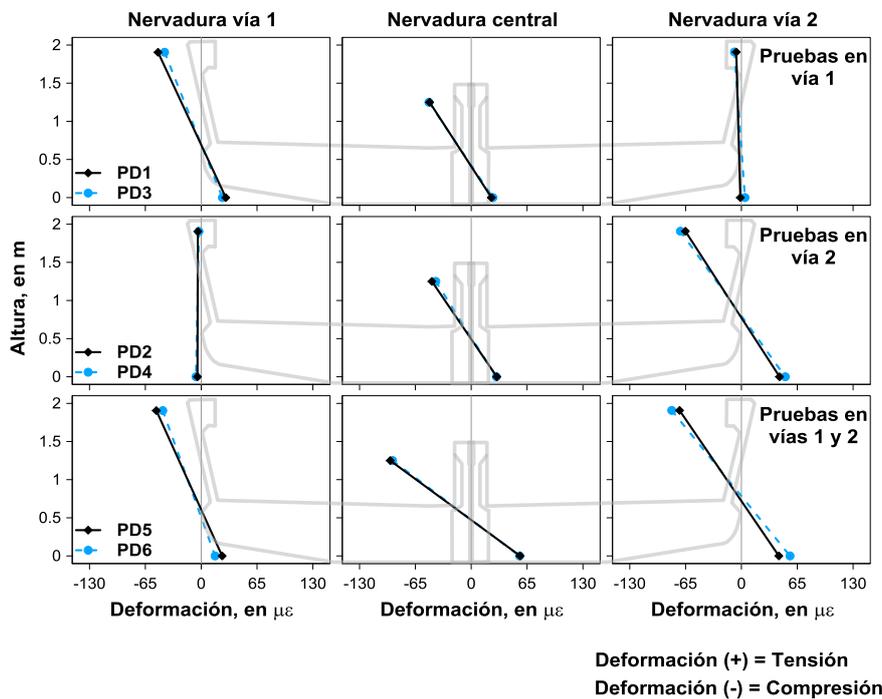


Figura 4.29. Deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD sin frenado del tren. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad. Cálculo para el instante donde los desplazamientos a un cuarto del claro son máximos.

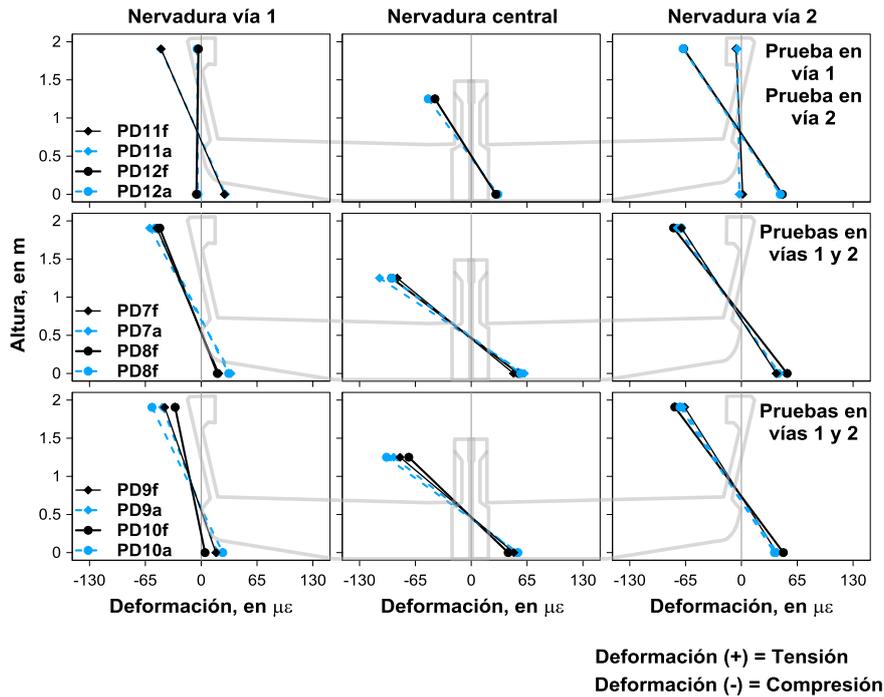


Figura 4.30. Deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD con frenado del tren. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD. Cálculo para el instante donde los desplazamientos a un cuarto del claro son máximos.

Tabla 4.20. Deformaciones unitarias en el centro del claro de la trabe para las PD en el instante de los desplazamientos verticales del centro del claro.

Nervadura	Lecho de la trabe	Deformaciones, en $\mu\epsilon$																	
		PD1	PD3	PD2	PD4	PD11f	PD11a	PD12f	PD12a	PD5	PD6	PD7f	PD7a	PD8f	PD8a	PD9f	PD9a	PD10f	PD10a
		28 km/h	61 km/h	28 km/h	57 km/h	50 km/h	43 km/h	30 km/h	58 km/h	28 km/h	58 km/h	28 km/h	58 km/h	31 km/h	59 km/h				
Vía 1	superior	-51.4	-42.7	-3.5	-1.6	-46.7	-50.5	-2.5	-4.7	-53.8	-44.8	-54.0	-59.9	-47.5	-53.1	-42.5	-44.7	-47.5	-56.9
	inferior	28.9	24.7	-4.9	-7.5	27.0	31.0	-6.5	-3.9	25.8	14.9	26.3	34.6	17.6	32.4	17.1	18.9	19.3	25.5
Central	superior	-48.3	-49.6	-46.5	-43.6	-48.7	-47.1	-44.4	-50.2	-96.8	-94.5	-87.9	-106.6	-96.7	-95.6	-82.9	-91.2	-93.4	-101.6
	inferior	23.4	25.5	29.9	30.4	24.8	25.0	29.6	31.2	56.5	57.0	49.6	62.0	58.5	58.5	49.6	54.3	55.0	55.5
Vía2	superior	-5.8	-7.6	-67.1	-74.2	-6.0	-4.6	-68.3	-68.1	-74.9	-84.5	-67.2	-74.5	-82.1	-73.5	-66.0	-71.2	-78.4	-74.4
	inferior	-1.5	3.9	41.2	47.6	1.5	-2.8	47.4	45.4	43.0	52.2	35.7	44.3	49.5	46.0	41.0	43.3	50.8	42.8

Valor negativo indica compresión y valor positivo tensión

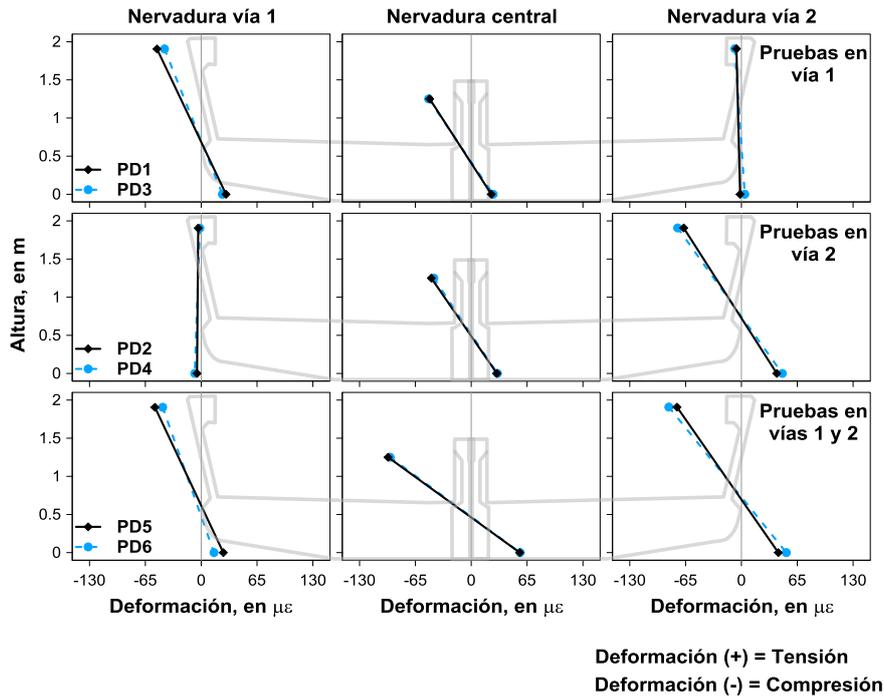


Figura 4.31. Deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD sin frenado del tren. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad. Cálculo para el instante donde los desplazamientos al centro del claro son máximos.

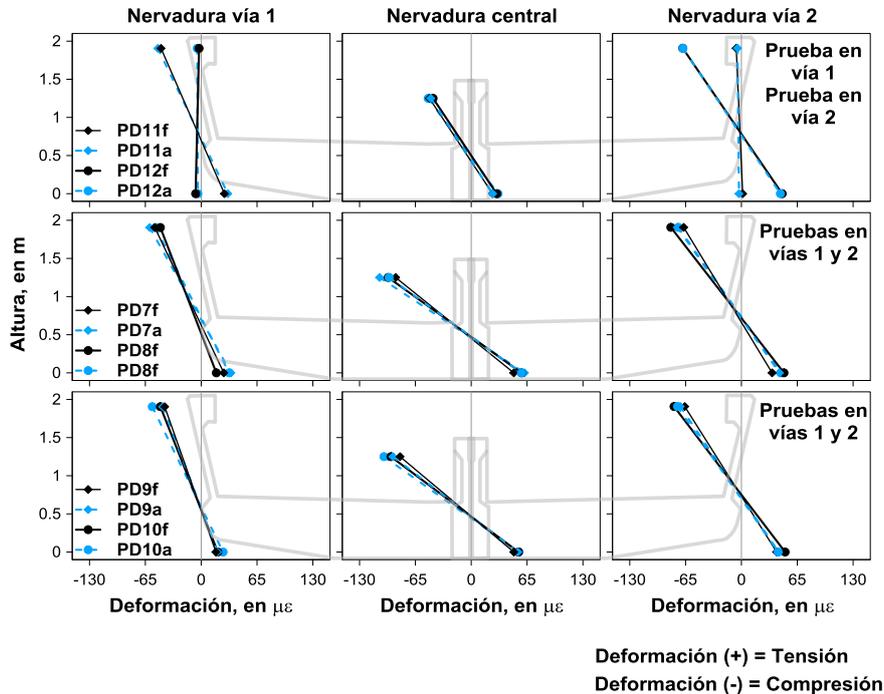


Figura 4.32. Deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD con frenado del tren. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD. Cálculo para el instante donde los desplazamientos al centro del claro son máximos.

4.2.2. Columnas

En la tabla 4.21 se presentan los valores de desplazamiento lateral máximo en las columnas para las PD. Los desplazamientos laterales para las PD sin frenado y con frenado del tren se muestran en las figuras 4.33 y 4.34, respectivamente. El valor de desplazamiento negativo indica que la columna se desplaza hacia extradós. Los valores de los giros para las PD se encuentran en la tabla 4.22 y 4.23 obtenidos con potenciómetros y deformímetros, respectivamente. Los giros en el extremo inferior de las columnas para las PD obtenidos con potenciómetros y deformímetros se presentan gráficamente en las figuras 4.35 y 4.36.

Tabla 4.21. Desplazamientos laterales en las columnas C5 y C6 para las PD.

Columna	Sensor	Altura, en m	Desplazamientos, en mm																																							
			PD1		PD3		PD2		PD4		PD11f		PD11a		PD12f		PD12a		PD5		PD6		PD7f		PD7a		PD8f		PD8a		PD9f		PD9a		PD10f		PD10a					
			28 km/h	41 km/h	28 km/h	41 km/h	28 km/h	57 km/h	50 km/h	50 km/h	43 km/h	43 km/h	30 km/h	30 km/h	58 km/h	58 km/h	28 km/h	28 km/h	58 km/h	58 km/h	31 km/h	31 km/h	59 km/h	59 km/h																		
Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2																																		
C5	HA5	9.33	0.69	0.19	-1.27	-1.90	0.42	0.77	-1.70	-1.22	-1.01	-1.99	-0.58	-0.39	-1.82	-0.93	-0.41	-0.37	-1.63	-1.53																						
	HA4	8.15	0.57	0.09	-1.11	-1.66	0.35	0.63	-1.48	-1.07	-0.90	-1.79	-0.58	-0.35	-1.68	-0.85	-0.41	-0.37	-1.47	-1.35																						
	HA3	5.45	0.30	0.003	-0.62	-0.95	0.17	0.34	-0.84	-0.59	-0.52	-1.07	-0.34	-0.22	-1.02	-0.49	-0.24	-0.21	-0.88	-0.75																						
	HA2	2.75	0.11		-0.26	-0.43	0.05	0.14	-0.37	-0.26	-0.24	-0.52	-0.16	-0.11	-0.49	-0.23	-0.11	-0.10	-0.41	-0.30																						
	HA1	0.03			-0.07	-0.12	-0.04	-0.01	-0.11	-0.08	-0.07	-0.16	-0.10	-0.08	-0.17	-0.10	-0.09	-0.06	-0.14	-0.06																						
C6	HB5	9.34	0.73	0.26	-1.46	-1.97	0.62	0.84	-1.62	-1.44	-1.07	-2.04	-0.49	-0.42	-1.61	-1.05	-0.32	-0.29	-1.03	-0.90																						
	HB4	8.16	0.57	0.23	-1.26	-1.69	0.50	0.68	-1.39	-1.24	-0.93	-1.82	-0.43	-0.36	-1.45	-0.93	-0.29	-0.27	-0.89	-0.79																						
	HB3	5.42	0.29	0.14	-0.67	-0.92	0.24	0.34	-0.74	-0.66	-0.50	-1.04	-0.24	-0.19	-0.82	-0.51	-0.16	-0.15	-0.51	-0.43																						
	HB2	2.70	0.09	0.06	-0.25	-0.35	0.07	0.10	-0.28	-0.24	-0.19	-0.43	-0.08	-0.07	-0.33	-0.21	-0.06	-0.05	-0.23	-0.18																						
	HB1	0.07		0.01	-0.03	-0.03			-0.04	-0.03	-0.02	-0.03	-0.02	0.003	-0.05	-0.04	-0.04	-0.01	-0.05	-0.02																						

Valor negativo desplazamiento hacia extradós.

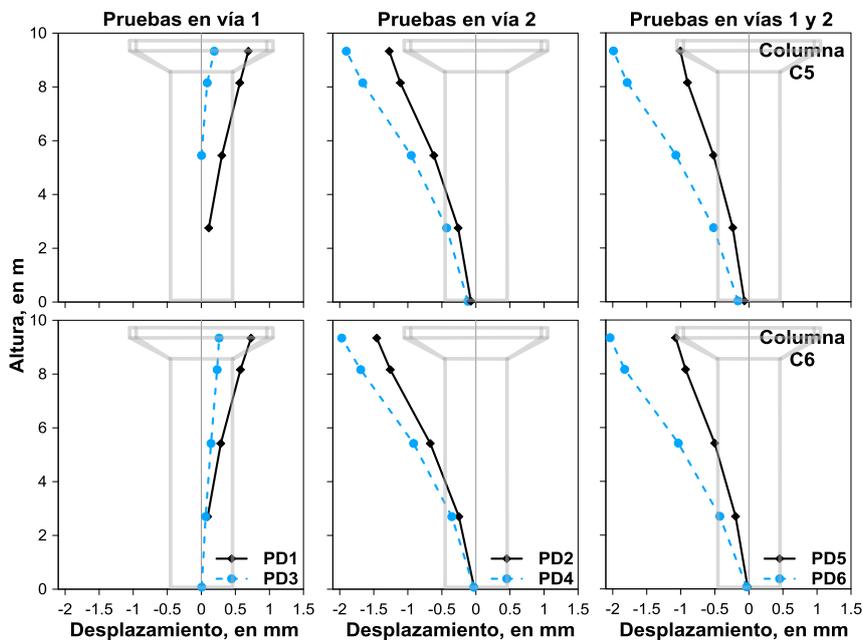


Figura 4.33. Desplazamientos laterales de las columnas para las PD sin frenado del tren. El perfil con línea punteada indica que la PD es a alta velocidad.

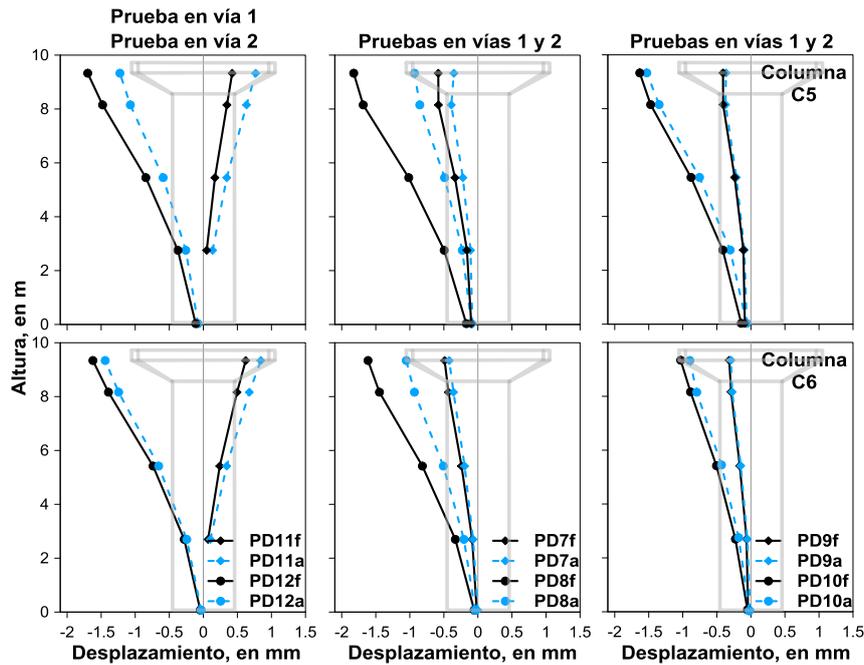


Figura 4.34. Desplazamientos laterales de las columnas para las PD con frenado del tren. El perfil con línea punteada indica el arranque de la PD.

Tabla 4.22. Valores de giros en el extremo inferior de las columnas para las PD obtenidos con los potenciómetros.

Columna	Sensor	Giros, en rad																	
		PD1	PD3	PD2	PD4	PD11f	PD11a	PD12f	PD12a	PD5	PD6	PD7f	PD7a	PD8f	PD8a	PD9f	PD9a	PD10f	PD10a
		28 km/h	61 km/h	28 km/h	57 km/h	50 km/h		45 km/h		30 km/h	58 km/h	28 km/h		58 km/h		31 km/h		59 km/h	
Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2											
C5	pA5-pA6	1.6E-5	2.6E-6	-3.3E-5	-4.8E-5	9.0E-6	1.7E-5	-4.4E-5	-3.4E-5	-2.8E-5	-5.4E-5	-1.9E-5	-1.5E-5	-5.1E-5	-2.6E-5	-1.5E-5	-1.4E-5	-4.4E-5	-2.8E-5
	pA3-pA4	9.3E-6	1.6E-6	-2.1E-5	-3.0E-5	6.6E-6	1.2E-5	-2.7E-5	-2.1E-5	-1.8E-5	-3.4E-5	-1.1E-5	-8.2E-6	-3.3E-5	-1.7E-5	-9.2E-6	-8.2E-6	-2.9E-5	-1.8E-5
	pA1-pA2	3.8E-6	6.1E-7	-7.4E-6	-1.1E-5	2.0E-6	4.4E-6	-1.2E-5	-9.3E-6	-6.9E-6	-1.5E-5	-5.0E-6	-3.4E-6	-1.5E-5	-6.9E-6	-3.3E-6	-3.1E-6	-1.3E-5	-7.4E-6
C6	pB5-pB6	1.7E-5	-6.1E-6	-3.8E-5	-5.0E-5	1.5E-5	2.0E-5	-4.2E-5	-3.8E-5	-3.1E-5	-5.3E-5	-1.6E-5	-1.4E-5	-4.6E-5	-2.9E-5	-1.1E-5	-8.2E-6	-4.3E-5	-2.5E-5
	pB3-pB4	1.0E-5	-4.9E-6	-2.6E-5	-3.4E-5	7.2E-6	1.0E-5	-3.1E-5	-2.7E-5	-2.2E-5	-3.7E-5	-1.3E-5	-1.1E-5	-3.3E-5	-1.9E-5	-8.4E-6	-6.3E-6	-3.2E-5	-1.7E-5
	pB1-pB2	5.0E-6	-2.8E-6	-1.4E-5	-1.8E-5	2.7E-6	4.4E-6	-1.5E-5	-1.2E-5	-1.1E-5	-1.9E-5	-6.2E-6	-5.7E-6	-1.7E-5	-8.3E-6	-4.1E-6	-3.2E-6	-1.6E-5	-7.0E-6

Tabla 4.23. Valores de giros en el extremo inferior de las columnas para las PD obtenidos con los deformímetros.

Columna	Sensor	Giros, en rad																	
		PD1	PD3	PD2	PD4	PD11f	PD11a	PD12f	PD12a	PD5	PD6	PD7f	PD7a	PD8f	PD8a	PD9f	PD9a	PD10f	PD10a
		28 km/h	61 km/h	28 km/h	57 km/h	50 km/h		45 km/h		30 km/h	58 km/h	28 km/h		58 km/h		31 km/h		59 km/h	
Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2											
C5	DA3-DA4	7.7E-6	1.4E-7	-1.8E-5	-2.6E-5	4.3E-6	8.6E-6	-2.4E-5	-1.8E-5	-1.5E-5	-2.8E-5	-1.1E-5	-8.7E-6	-2.7E-5	-1.5E-5	-8.7E-6	-8.0E-6	-2.4E-5	-1.4E-5
	DA1-DA2	3.8E-6	-2.3E-7	-9.7E-6	-1.4E-5	2.0E-6	4.3E-6	-1.3E-5	-9.4E-6	-7.7E-6	-1.5E-5	-6.0E-6	-4.8E-6	-1.5E-5	-7.9E-6	-4.8E-6	-4.4E-6	-1.3E-5	-7.7E-6
C6	DB1-DB2	3.3E-6	-1.5E-6	-9.4E-6	-1.3E-5	2.7E-6	3.8E-6	-1.0E-5	-9.2E-6	-6.6E-6	-1.4E-5	-4.1E-6	-3.6E-6	-1.2E-5	-7.2E-6	-3.0E-6	-2.4E-6	-1.1E-5	-6.3E-6

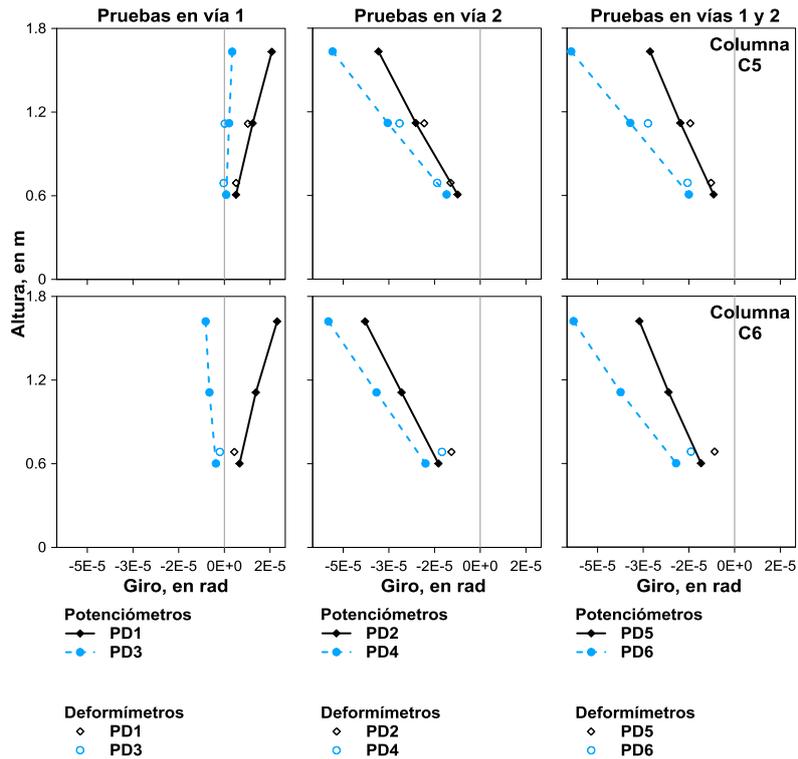


Figura 4.35. Giro en el extremo inferior de las columnas para las PD sin frenado del tren, obtenidos con los potenciómetros y deformímetros.

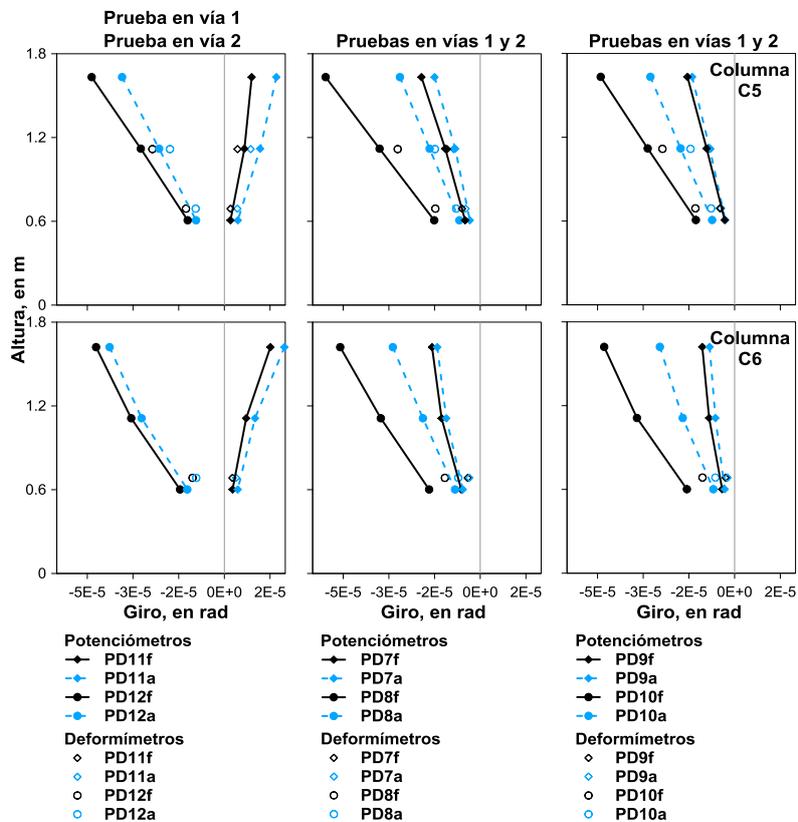


Figura 4.36. Giro en el extremo inferior de las columnas para las PD con frenado del tren, obtenidos con los potenciómetros y deformímetros.

4.2.3. Factor de amplificación dinámico

Al aumento de la respuesta de una estructura por causa del efecto dinámico se le conoce como factor de amplificación dinámico (FAD). Para el cálculo de dicho factor se consideraron dos criterios diferentes, como se indica en la ecuación [4.7] y [4.8]:

1. Emplear la respuesta de una prueba estática (R_E) con características similares a la prueba dinámica. Para el caso de estudio deben coincidir: el número de trenes, la vía de circulación y la carga de los vagones. Para el FAD que se obtuvo con este criterio se emplearon los valores de las pruebas estáticas máximas.

$$FAD_{\text{CRITERIO 1}} = \frac{R_D}{R_E} \quad [4.7]$$

Donde

R_D : Respuesta dinámica

R_E : Respuesta estática

2. Con la respuesta de la prueba dinámica obtener una respuesta "estática", es decir, a la primera se le aplica un filtrado (R_{Df}) para eliminar la respuesta dinámica. Para el caso de estudio se empleó un filtro Butterworth paso bajas con una frecuencia de corte de 0.5 Hz. El FAD obtenido con este criterio es el factor máximo encontrado dentro de un intervalo para cada prueba dinámica. El intervalo debe contener las respuestas máximas absolutas, puntos a la derecha e izquierda del valor máximo de la señal filtrada y encontrarse dentro del efecto dinámico que haya registrado el sensor. Lo anterior se aprecia en las figuras 4.37 a 4.39, donde se observan las historias con y sin filtro para las pruebas dinámicas en las que se obtuvo el FAD máximo.

$$FAD_{\text{CRITERIO 2}} = \frac{R_D}{R_{Df}} \quad [4.8]$$

Donde

R_D : Respuesta dinámica

R_{Df} : Respuesta dinámica filtrada

Para este trabajo, se contó con tres diferentes tipos de registros: desplazamientos laterales en columnas, deflexiones y deformaciones en la trabe. Los valores de FAD con los dos primeros registros proporcionan la amplificación de la deflexión y con el tercero la amplificación del momento (Paultre *et al.*, 1992).

Adicionalmente en los valores de desplazamientos laterales de las columnas, para las pruebas dinámicas, se presenta la fuerza horizontal o fuerza centrífuga al circular el tren sobre la curva del tramo instrumentado. La amplificación que provoca esta fuerza en la respuesta del tramo instrumentado se obtiene al comparar el factor obtenido de cada criterio.

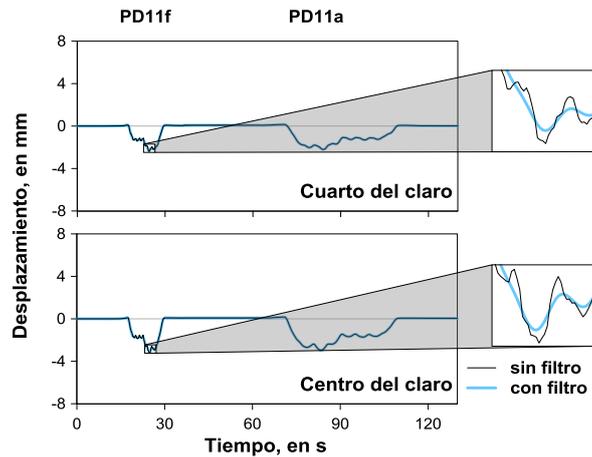


Figura 4.37. Historias de desplazamiento vertical de la trabe empleadas en el criterio 2 con y sin filtro para la PD11 en el frenado.

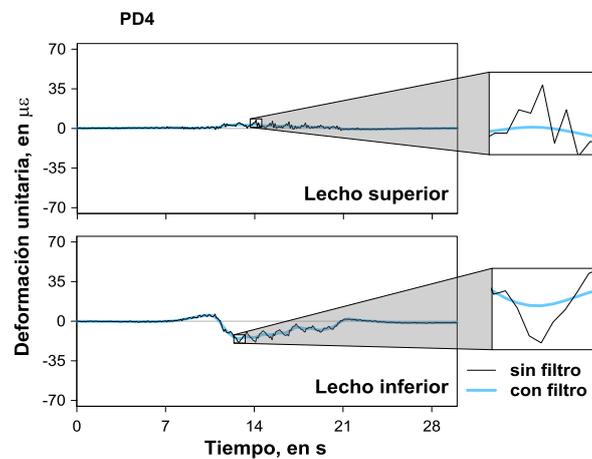


Figura 4.38. Historias de deformación de la trabe empleadas en el criterio 2 con y sin filtro para la PD4.

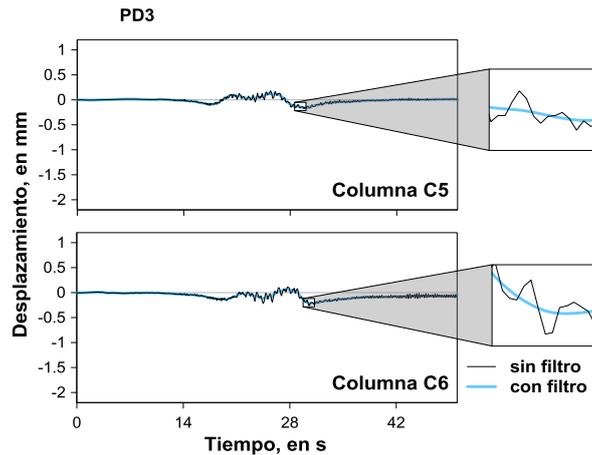


Figura 4.39. Historias de desplazamiento lateral en las columnas empleadas en el criterio 2 con y sin filtro para la PD3.

Para el cálculo del FAD con el criterio 1 se emplearon las PE máximas para cada tipo de prueba, es decir, para pruebas en la vía 1, en la vía 2 y en las dos vías. Estas PE máximas en los desplazamientos verticales y deformaciones fueron PE5, PE3 y PE10. Para los desplazamientos laterales fueron PE6, PE2 y PE9.

Los valores de FAD para el criterio 1 y 2 se presentan en las tablas 4.24 a 4.26, obtenidos con los valores de desplazamientos verticales, deformaciones y desplazamientos laterales, respectivamente. En las figuras 4.40 y 4.41 se observa la relación de la velocidad de los trenes y el FAD calculado con los desplazamientos verticales y deformaciones de la trabe para los dos criterios antes mencionados. En la figura 4.42 se muestra esta relación con los desplazamientos laterales en las columnas.

Tabla 4.24. Valores de FAD calculado con los desplazamientos verticales para el criterio 1 y criterio 2.

		FAD criterio 1																			
		PD	1	3	2	4	11f	11a	12f	12a	5	6	7f	7a	8f	8a	9f	9a	10f	10a	
		Velocidad	28 km/h	61 km/h	28 km/h	57 km/h	50 km/h		43 km/h		30 km/h	58 km/h	28 km/h		58 km/h		31 km/h		59 km/h		
		PE	5		3		5		3		10										
Nervadura	Sección transversal	Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2											
	Vía 1	1/4 claro	1.0	0.8	1.6	2.3	0.9	1.0	2.0	1.4	0.9	0.4	0.9	1.0	0.5	1.0	0.8	0.8	0.7	1.0	
Centro claro		0.9	0.7	2.0	2.9	0.8	0.9	2.5	1.8	0.9	0.4	1.0	1.0	0.6	1.0	0.7	0.7	0.6	1.0		
Central	1/4 claro	1.1	1.2	1.0	0.9	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0		
	Centro claro	1.0	1.1	0.9	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.8	0.8	0.9	1.0		
Vía 2	1/4 claro	1.0	0.2	1.0	1.2	0.6	1.0	1.1	1.0	1.0	1.3	0.9	0.9	1.3	1.0	0.9	0.9	1.2	1.0		
	Centro claro	0.8	0.4	1.0	1.1	0.3	0.9	1.0	0.9	1.0	1.3	0.9	0.9	1.2	1.0	0.9	0.9	1.2	0.9		
		FAD criterio 2																			
Vía 1	1/4 claro	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0		
	Centro claro	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
Central	1/4 claro	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
	Centro claro	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
Vía 2	1/4 claro	1.1	1.3	1.0	1.0	1.4	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		
	Centro claro	1.2	1.3	1.0	1.0	1.3	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0		

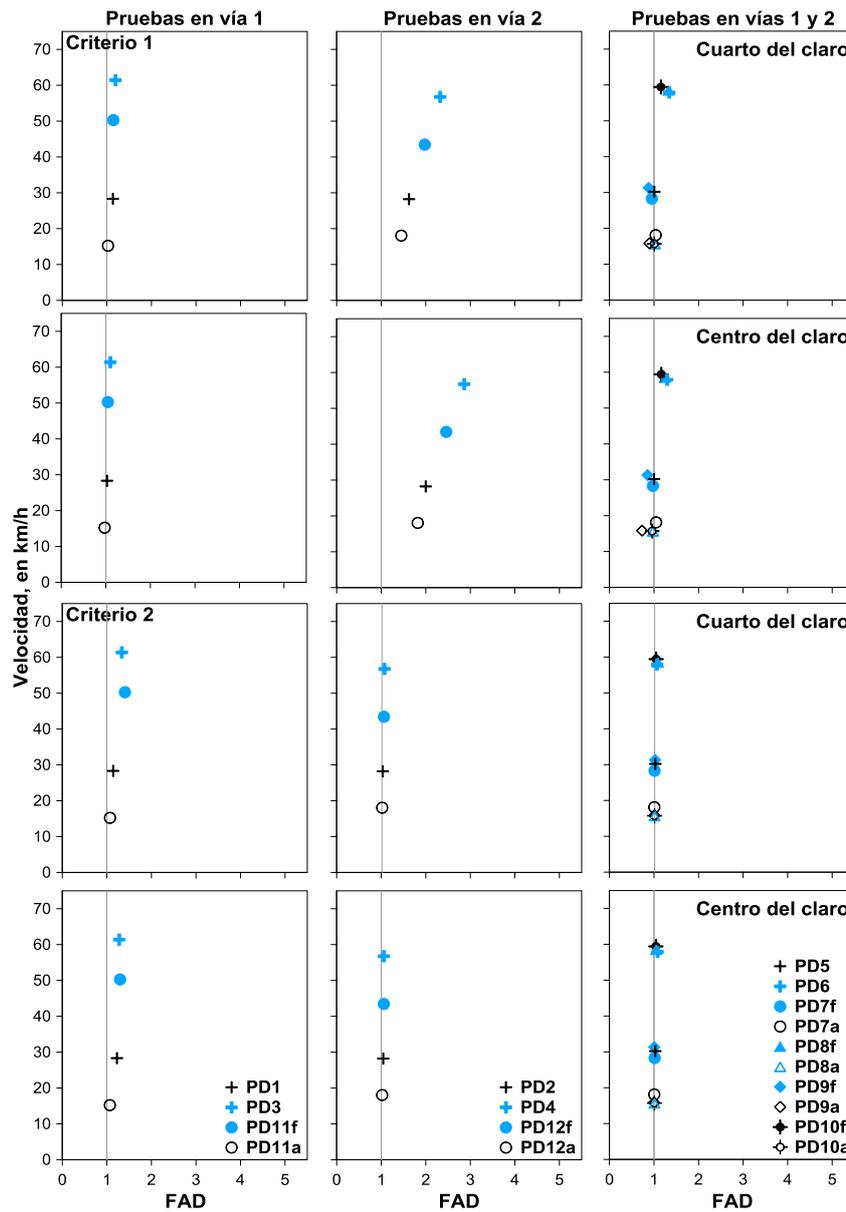


Figura 4.40. Comparación de la velocidad de los trenes de cada PD con el FAD calculado con los desplazamientos verticales de la trabe, para el criterio 1 y criterio 2.

Tabla 4.25. Valores de FAD calculado con las deformaciones de la trabe para el criterio 1 y criterio 2.

		FAD criterio 1																			
		PD	1	3	2	4	11f	11a	12f	12a	5	6	7f	7a	8f	8a	9f	9a	10f	10a	
		Velocidad	28 km/h	61 km/h	28 km/h	57 km/h	50 km/h	43 km/h	30 km/h	58 km/h	28 km/h	58 km/h	28 km/h	58 km/h	31 km/h	59 km/h					
Nervadura	PE	5		3		5		3		10											
	Sensor	Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2											
Lecho superior	Vía 1	Di1	1.0	0.9	0.7	0.5	0.9	1.0	0.6	0.8	1.0	0.9	1.0	1.1	1.0	1.0	0.8	0.9	0.9	1.1	
		Di2	0.9	0.7	0.02	0.1	0.8	0.8	0.04	0.1	1.0	0.8	1.0	1.1	0.8	1.0	0.8	0.8	0.8	1.0	
	Central	Do2	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	1.0	0.9	1.0	0.8	0.9	0.9	1.0	
		Do1	1.0	1.0	0.7	0.7	0.9	1.0	0.6	0.8	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	0.7	0.6	0.7	0.8	0.8	
	Vía 2	De2	0.5	0.6	0.8	0.9	0.5	0.5	0.8	0.8	1.1	1.2	1.0	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	1.2	1.1	
		De1	0.1	0.5	0.8	0.9	0.2	0.1	0.8	0.8	0.8	1.0	0.7	0.8	0.9	0.8	0.7	0.8	0.9	0.8	
Lecho inferior	Vía 1	Di3	0.9	0.8	0.5	0.8	0.8	0.9	0.7	0.4	0.7	0.4	0.7	0.9	0.5	0.9	0.4	0.5	0.5	0.7	
		Do4	1.2	1.3	0.9	0.9	1.3	1.4	0.9	1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.8	0.8	0.7	0.7	0.8	0.8	
	Central	Do3	1.4	1.6	1.0	1.0	1.5	1.5	1.0	1.0	0.8	0.8	0.7	0.9	0.9	0.9	0.7	0.8	0.8	0.8	
		De3	0.2	0.5	1.1	1.2	0.2	0.3	1.2	1.2	0.8	1.0	0.7	0.9	1.0	0.9	0.8	0.8	1.0	0.8	
	Lecho superior	Vía 1	Di1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0
			Di2	1.0	1.0	1.8	2.2	1.0	1.0	1.4	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0
Central		Do2	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	
		Do1	1.1	1.2	1.0	1.1	1.2	1.0	1.1	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	
Vía 2		De2	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	
		De1	1.2	1.5	1.0	1.1	1.6	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0
Lecho inferior	Vía 1	Di3	1.1	1.1	1.1	1.3	1.1	1.0	1.2	1.1	1.1	1.4	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	
	Central	Do4	1.1	1.3	1.1	1.1	1.2	1.0	1.1	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0	
		Do3	1.0	1.2	1.1	1.2	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0
	Vía 2	De3	1.4	1.3	1.1	1.2	1.3	1.1	1.2	1.0	1.1	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.2	1.0

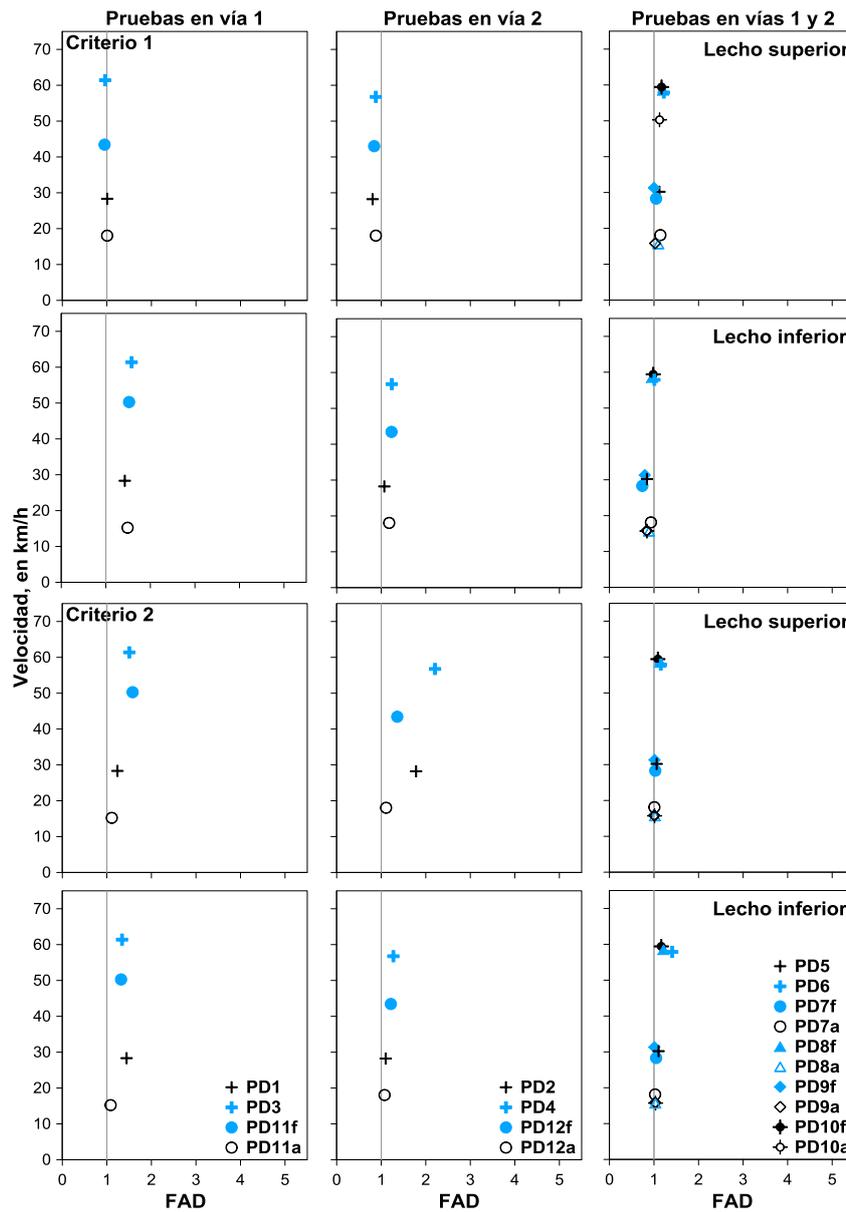


Figura 4.41. Comparación de la velocidad de los trenes de cada PD con el FAD calculado con las deformaciones de la trabe, para el criterio 1 y criterio 2.

Tabla 4.26. Valores de FAD calculado con los desplazamientos laterales de las columnas para el criterio 1 y criterio 2.

		FAD criterio 1																	
PD		1	3	2	4	11f	11a	12f	12a	5	6	7f	7a	8f	8a	9f	9a	10f	10a
Velocidad		28 km/h	61 km/h	28 km/h	57 km/h	50 km/h		43 km/h		30 km/h	58 km/h	28 km/h		58 km/h		31 km/h		59 km/h	
PE		6		2		6		2		9									
Posición		Vía 1		Vía 2		Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2									
Columna		C5		C6		C5		C6		C5									
Capitel		0.9	0.2	1.0	1.5	0.5	1.0	1.3	1.0	1.3	2.5	0.7	0.4	2.3	1.2	0.5	0.5	2.0	1.9
Capitel		0.7	0.3	1.1	1.5	0.6	0.8	1.3	1.1	2.8	5.4	1.3	1.1	4.3	2.8	0.8	0.8	2.7	2.4
		FAD criterio 2																	
Capitel		1.0	1.2	1.0	1.0	1.2	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0
Capitel		1.1	1.2	1.0	1.0	1.1	1.0	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.0	1.0	1.0	1.2	1.1	1.1	1.0

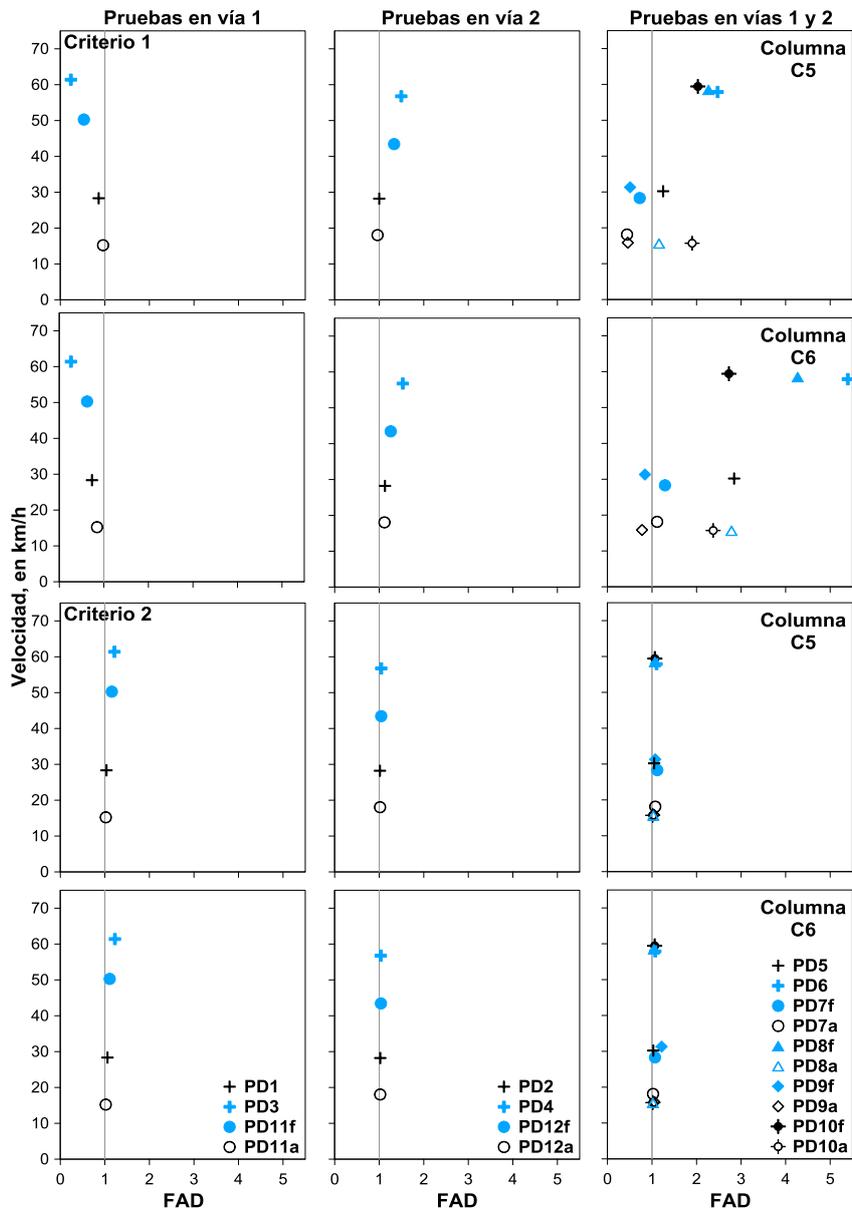


Figura 4.42. Comparación de la velocidad de los trenes de cada PD con el FAD calculado con los desplazamientos laterales de las columnas, para el criterio 1 y criterio 2.

5. Análisis y resultados

5.1. Pruebas estáticas

En el análisis de las pruebas estáticas se identificaron las PE máximas para cada tipo de prueba, es decir, para pruebas en la vía 1, pruebas en la vía 2 y pruebas en las vías 1 y 2.

5.1.1. Trabe

Los valores máximos de desplazamiento vertical de la trabe, en pruebas estáticas, se presentaron en PE3 para pruebas en la vía 2, PE5 en pruebas en la vía 1 y PE10 para pruebas en las vías 1 y 2. En la tabla 5.1 se observan los valores de estas tres pruebas y en la figura 5.1 la comparación de estos desplazamientos en vista transversal y longitudinal.

La PE con desplazamiento máximo al centro del claro en el eje central (Vo3), fue **PE10**, con las características siguientes:

- En esta prueba se tienen cinco ejes en la vía 1 y cinco en la vía 2 del tramo C5-C6.
- Su arreglo en la vía 2 es el mismo de la PE2 y en la vía 1 el arreglo de PE5, que es el máximo para desplazamientos de la trabe en pruebas en esa vía.
- Se observa que aunque PE10 tiene el menor número de ejes sobre C5-C6 con respecto a PE7, PE8 y PE9, solo en esta prueba se concentran próximos al centro del claro (figura 5.1), cuatro ejes del tren A en la vía 2 y cuatro ejes del tren B en la vía 1.
- Se destaca que la PE10 presenta menor desplazamiento en la vía 1 que en PE5. Lo anterior permite suponer que al tener un tren en la vía 2 disminuye la respuesta en la vía 1, como se observa en PE10.

Se observa que en las PE donde se posiciona un tren o dos trenes en la vía 1, los desplazamientos en la vía 2 son mayores a un cuarto del claro (Ve) que en el centro del claro (Vo). Esto a consecuencia del giro de la trabe contrarrestada por la deformación, donde esta deformación, al ser mayor en el centro del claro provoca este efecto en la vía 2 de la trabe. En las PE con un tren en cada vía y en pruebas con un tren en una vía, se observa que los valores de desplazamiento máximo se encuentran en el eje central y en la vía 2.

Tabla 5.1. Desplazamientos verticales de la trabe para las PE máximas.

Nervadura	Sección transversal	Longitud, en m	Desplazamientos, en mm		
			PE3 Vía 2	PE5 Vía 1	PE10 Vías 1 y 2
Vía 1	C5	-12.7	1.1	-1.3	0.4
	1/4 claro	-5	0.8	-4.0	-2.9
	Centro claro	0	0.7	-5.3	-3.9
	C6	15.7	1.4	-1.4	0.1
Central	C5	-12.7	-0.7	-0.4	-1.1
	1/4 claro	-5	-3.2	-2.0	-5.4
	Centro claro	0	-4.6	-3.0	-7.7
	C6	15.7	-0.7	-0.4	-1.1
Vía 2	C5	-12.7	-1.5	0.6	-0.8
	1/4 claro	-5	-5.5	1.0	-4.7
	Centro claro	0	-6.7	0.7	-6.2
	C6	15.7	-1.5	1.0	-0.4

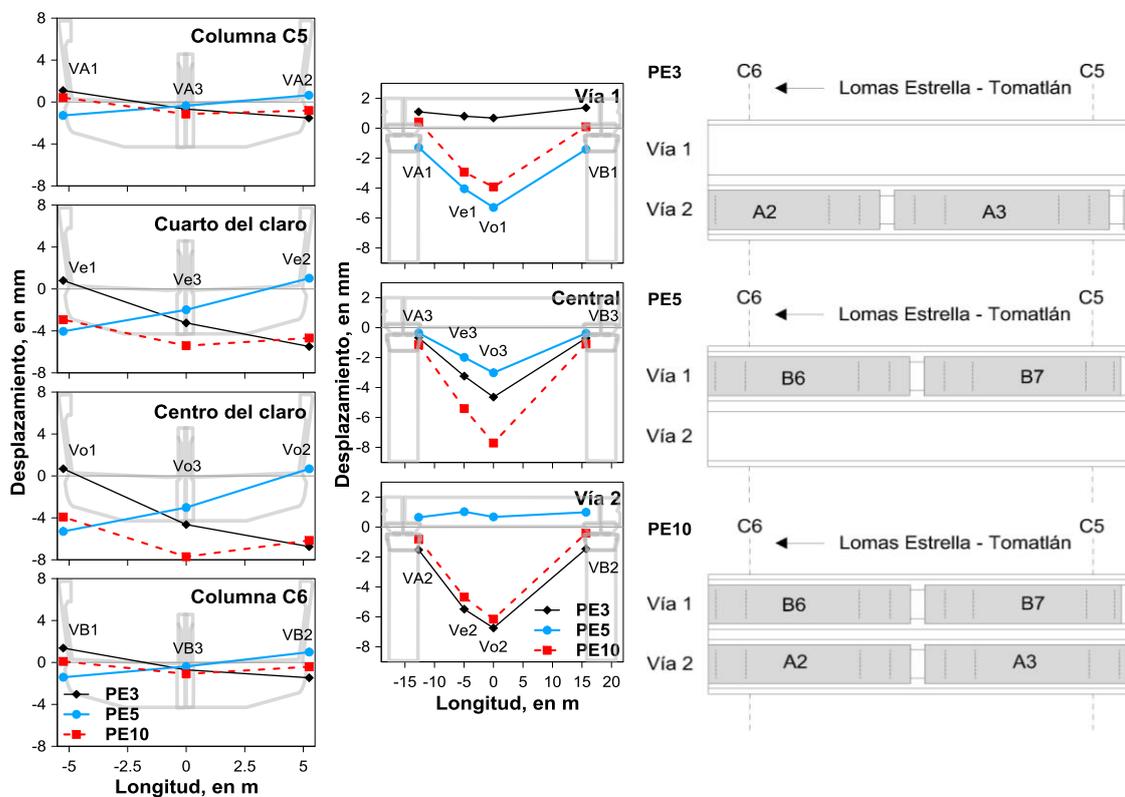


Figura 5.1. Desplazamientos verticales máximos de la trabe para las PE en la vía 2 (PE3), en la vía 1 (PE5) y en las vías 1 y 2 (PE10).

Comparación con la deflexión permisible

Las deflexiones máximas para las PE se presentan en las mismas pruebas de los desplazamientos verticales. En la tabla 5.2 se muestran los valores de deflexión máxima y su porcentaje respecto de la deflexión permisible (DpL) para el cálculo de deflexiones longitudinales. La PE con la deflexión máxima longitudinal a un cuarto y centro del claro fue en la **PE10** y su porcentaje respecto de la deflexión permisible (%DpL) no excedió el 18% de esta.

En la tabla 5.3 se observan las deflexiones para el cálculo transversal. La deflexión máxima respecto de la nervadura central ocurrió en la PE3 en el centro del claro con un porcentaje respecto de la deflexión permisible (%DpT) de 20% en dirección ascendente de la trabe.

En las figuras 5.3 y 5.4 se observan las comparaciones de los valores de las tablas anteriores.

Tabla 5.2. Deflexiones máximas longitudinales a un cuarto y centro del claro con su porcentaje respecto de la deflexión permisible longitudinal (%DpL) para las PE.

PE	Nervadura	Número de trenes	Vía	Deflexiones, en mm			
				Cuarto del claro		Centro del claro	
				Deflexión	%DpL	Deflexión	%DpL
3	Vía 1	1	2	-0.4	1.0	-0.5	1.4
	Central			-2.6	6.8	-4.0	10.5
	Vía 2			-4.0	10.6	-5.2	14.0
5	Vía 1	1	1	-2.7	7.3	-4.0	10.5
	Central			-1.6	4.3	-2.6	7.1
	Vía 2			0.3	0.8	-0.1	0.3
10	Vía 1	2	1 y 2	-3.3	8.7	-4.2	11.2
	Central			-4.3	11.4	-6.6	17.6
	Vía 2			-4.0	10.6	-5.5	14.7

DpL: deflexión permisible longitudinal de 37.5 mm

Tabla 5.3. Deflexiones máximas transversales a un cuarto y centro del claro con su porcentaje respecto de la deflexión permisible transversal (%DpT) para las PE.

PE	Nervadura	Número de trenes	Vía	Deflexiones, en mm			
				Cuarto del claro		Centro del claro	
				Deflexión	%DpT	Deflexión	%DpT
3	Vía 1	1	2	2.2	12.5	3.4	19.5
	Vía 2			-1.4	8.1	-1.3	7.4
5	Vía 1	1	1	-1.1	6.3	-1.3	7.5
	Vía 2			1.9	10.9	2.5	14.4
10	Vía 1	2	1 y 2	1	5.8	2.4	13.7
	Vía 2			0.3	1.7	1.1	6.1

DpT: deflexión permisible transversal de 17.5 mm

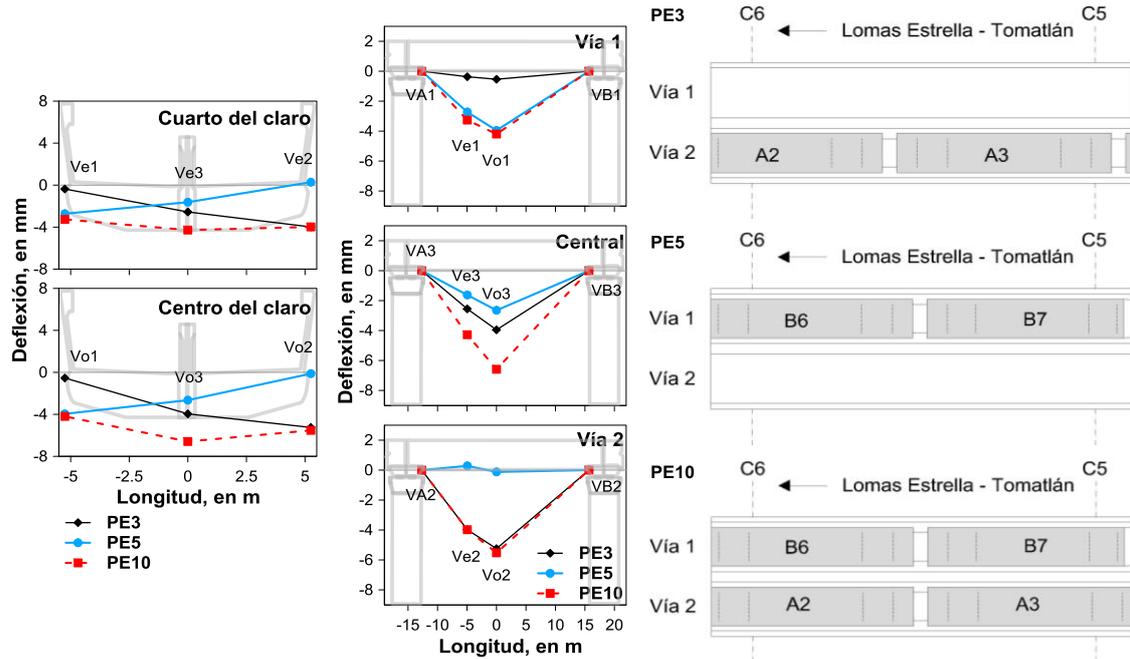


Figura 5.3. Deflexiones longitudinales máximas de la trabe para las PE en la vía 1 (PE3), en la vía 2 (PE5) y en la vía 1 y vía 2 (PE10).

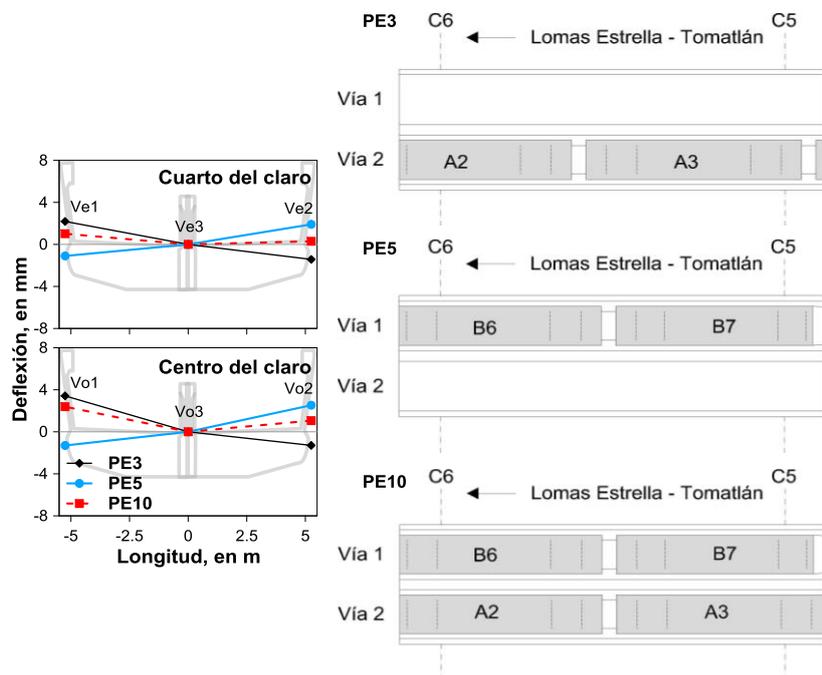


Figura 5.4. Deflexiones transversales máximas de la trabe para las PE en la vía 1 (PE3), en la vía 2 (PE5) y en la vía 1 y vía 2 (PE10).

Deformaciones unitarias

Los incrementos de deformación unitaria obtenidos con los deformímetros colocados al centro del claro de la trabe, presentan tensión con el valor positivo y compresión con el valor negativo. Dichos valores están dados en micro deformaciones ($\mu\epsilon$). En la tabla 5.4 se encuentran los valores de deformación máximos a tensión y compresión de la trabe para las PE. El valor máximo de deformación unitaria en tensión y compresión para las pruebas estáticas se presentó en la **PE10**. Para pruebas en vía 2 el valor máximo a tensión ocurrió en PE3. En pruebas en vía 1 el valor en tensión máximo fue en PE5. Lo anterior es congruente con los valores de desplazamiento vertical y deflexiones de la trabe. Sin embargo, los valores máximos en compresión se presentaron en algunas de estas pruebas y en otras PE. En la tabla 5.5 se observan los valores de esfuerzo a tensión y compresión, obtenidos con las deformaciones medidas y su porcentaje respecto de las resistencias nominales del concreto en tensión ($2\sqrt{f'_c}$, kg/cm²) y en compresión (600 kg/cm²), de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Distrito Federal (2004). El porcentaje máximo en tensión es de 45% y en compresión del 6%, respecto de las resistencias nominales.

En la figura 5.5 se presentan las deformaciones unitarias para las PE máximas de cada tipo de prueba, para el caso de las pruebas en la vía 2 solo se graficaron los valores de PE3, ya que son muy similares a PE2.

Los valores de compresión y tensión de la trabe, para pruebas con uno o dos trenes en una vía son máximos en la vía de posicionamiento del tren y en la vía opuesta se presentan valores pequeños en compresión. Los valores de tensión y compresión son mayores en pruebas en la vía 2 que en pruebas en la vía 1.

En pruebas con un tren en cada vía los valores de deformación en el lecho inferior de la trabe son solo de tensión y en el lecho superior de compresión. Estas deformaciones son máximas en la nervadura central.

Tabla 5.4. Deformaciones unitarias máximas del centro del claro de la trabe, para las PE.

Nervadura	Lecho de la trabe	Deformaciones, en $\mu\epsilon$			
		PE2 Vía 2	PE3 Vía 2	PE5 Vía 1	PE10 Vías 1 y 2
Vía 1	superior	-15.9	-16.8	-54.8	-52.9
	inferior	-13.8	-9.6	32.8	38.1
Central	superior	-58.0	-60.3	-52.9	-113.1
	inferior	22.0	31.6	17.5	68.5
Vía 2	superior	-88.2	-84.6	-13.2	-77.9
	inferior	27.1	38.5	-8.2	51.7

Tabla 5.5. Valores de esfuerzo obtenidos con las deformaciones experimentales para las PE y su valor en porcentaje respecto de las resistencias nominales en tensión y compresión.

Nervadura	Lecho de la trabe	Esfuerzos, en kg/cm ²				% de esfuerzo respecto de las resistencias nominales			
		PE2	PE3	PE5	PE10	PE2	PE3	PE5	PE10
		Vía 2	Vía 1	Vías 1 y 2	Vía 2	Vía 1	Vías 1 y 2		
Vía 1	superior	-5	-5	-17	-17	0.8	0.9	2.9	2.8
	inferior	-4	-3	10	12	0.7	0.5	21.3	24.7
Central	superior	-18	-19	-17	-36	3.1	3.2	2.8	6.0
	inferior	7	10	6	22	14.3	20.5	11.3	44.5
Vía 2	superior	-28	-27	-4	-25	4.7	4.5	0.7	4.1
	inferior	9	12	-3	16	17.6	25.0	0.4	33.6

*Resistencias nominales del concreto en tensión (49 kg/cm²) y en compresión (600 kg/cm²).

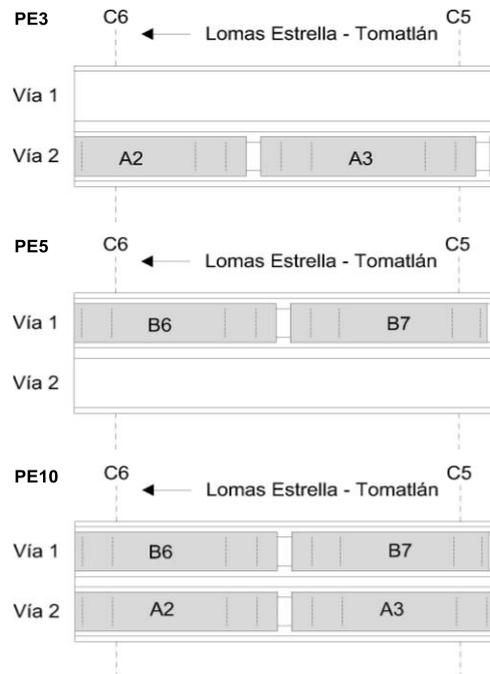
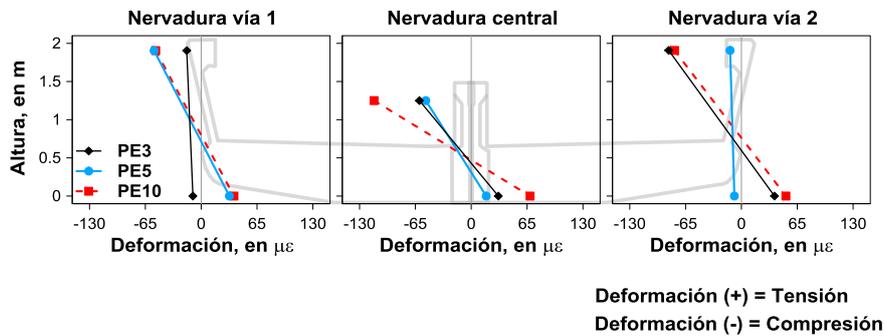


Figura 5.5. Deformaciones unitarias máximas de la trabe al centro del claro, para las PE en la vía 1 (PE3), en la vía 2 (PE5) y en las vías 1 y 2 (PE10).

5.1.2. Columnas

Los valores de desplazamiento lateral máximos de las columnas se presentaron en la PE2, PE6 y PE9 como se observa en la tabla 5.6. En la figura 5.6 se presentan los desplazamientos máximos para cada tipo de prueba. Los desplazamientos máximos se consideraron con el valor del sensor que se colocó en el capitel de cada columna (HA5 y HB5). El signo negativo del perfil indica que la columna se desplazó hacia extradós.

Las PE máximas en las columnas son diferentes a las máximas que se presentaron en la trabe. Esto es de esperarse, ya que mientras que en la trabe la PE que demandó más fue una con un tren en cada vía (PE10), en las columnas la PE que provocó mayores desplazamientos laterales fue **PE2**. Las pruebas máximas para cada tipo de prueba fueron:

- La PE2 arreglo de un tren en la vía 2 con cinco ejes del tren en el tramo C5-C6, es la PE con el menor número de ejes en el tramo de estudio, en pruebas en vía 2.
- La PE6 (prueba en la vía 1) que cuenta con siete ejes en el tramo C5-C6 con desplazamientos laterales menores a PE2.

Lo anterior indica que la peculiaridad del tramo curvo es considerable en pruebas en la vía 1, provocando que se presenten menores desplazamientos en las columnas, lo cual se confirma al observar que el perfil de las columnas de la PE9 (prueba con un tren en cada vía), donde se desplaza en sentido negativo, es decir, hacia extradós.

Tabla 5.6. Desplazamientos laterales de las columnas C5 y C6 para las PE máximas.

Columna	Sensor	Altura, en m	Desplazamientos, en mm		
			PE2 Vía 2	PE6 Vía 1	PE9 Vías 1 y 2
C5	HA5	9.33	-1.27	0.80	-0.80
	HA4	8.15	-1.07	0.66	-0.71
	HA3	5.45	-0.56	0.36	-0.39
	HA2	2.75	-0.21	0.15	-0.17
	HA1	0.03	-0.01		-0.05
C6	HB5	9.34	-1.29	1.00	-0.38
	HB4	8.16	-1.10	0.86	-0.38
	HB3	5.42	-0.54	0.44	-0.21
	HB2	2.7	-0.16	0.15	-0.09
	HB1	0.07			-0.003

Valor negativo indica desplazamiento hacia extradós

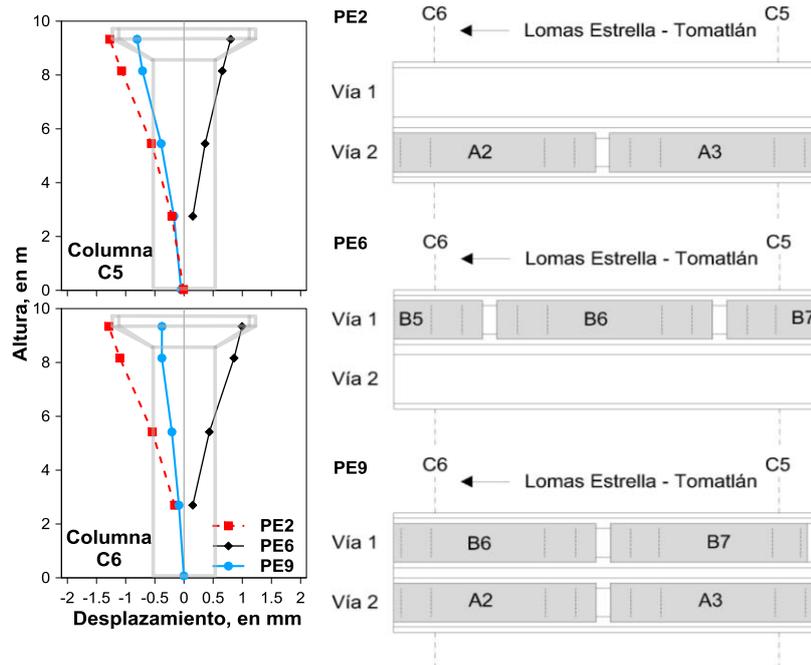


Figura 5.6. Desplazamientos laterales máximos de las columnas C5 y C6 para las PE en la vía 2 (PE2), en la vía 1 (PE6) y en la vía 1 y vía 2 (PE9).

Comparación con la distorsión angular permisible

Al no contar con normativa para regular desplazamientos laterales y distorsiones angulares en columnas de vías elevadas, se consideran las NTCDS (2004) donde especifica que para estructuras donde no se cuente con elementos incapaces de soportar deformaciones apreciables, los desplazamientos no excederán 0.012 veces la diferencia de elevaciones (D_{ap}) o 112 mm de desplazamiento lateral permisible (DL_p).

$$D_{ap} = 0.012$$

$$DL_p = 112 \text{ mm}$$

El valor de la distorsión angular experimental se obtuvo de la diferencia de los desplazamientos laterales de la base de la columna y el capitel (HA5 y HA1 para C5, HB5 y HB1 para C6) dividida entre la altura de cada columna. Se comparó la distorsión angular con la permisible por medio de un cálculo que consistió en el porcentaje de la distorsión experimental respecto de la permisible, como se observa en la ecuación [5.1]. En la tabla 5.7 se presenta este cálculo para las PE.

$$\%D_{ap} = \left[\frac{D_{a \text{ prueba } i}}{D_{ap}} \right] \times 100 \quad [5.1]$$

Los porcentajes de distorsión respecto de la permisible muestran que el valor de las distorsiones experimentales no exceden el 1.2 % de la permisible. Lo anterior es de esperarse debido a que la Dap es para regular distorsiones en otro tipo de estructuras. Así como en los desplazamientos laterales, la distorsión angular máxima se encuentra en la PE2.

Tabla 5.7. Distorsiones angulares de las columnas C5 y C6 para las PE, y su porcentaje respecto de la distorsión angular permisible (%Dap).

PE	Número de trenes	Vía	Distorsión angular		%Dap	
			C5	C6	C5	C6
1	1	2	0.00009	0.00011	0.8	0.9
2			0.00010	0.00015	0.8	1.2
3			0.00009	0.00014	0.7	1.2
12	2		0.00005	0.00011	0.4	1.0
4	1	1	0.00004	0.00008	0.3	0.7
5			0.00005	0.00010	0.4	0.8
6			0.00007	0.00011	0.6	0.9
11	2		0.00006	0.00009	0.5	0.8
7	2	1 y 2	0.00001	0.00001	0.1	0.0
8			0.00005	0.00001	0.4	0.1
9			0.00004	0.00004	0.3	0.3
10			0.00003	0.00002	0.2	0.2

Giros máximos de las columnas

En las tablas 5.8 a 5.10 se muestran los valores de giros obtenidos con potenciómetros, deformímetros e inclinómetros. Se observa que existen diferencias entre los giros obtenidos con cada sensor. Esto debido a la resolución del sensor y la forma de medir los pequeños movimientos de las columnas. Entre potenciómetros y deformímetros la diferencia máxima en las PE es de 0.000002 rad en PE6.

Los valores máximos de giros se presentan en pruebas en la vía 2 (PE2 y PE12), seguidas de las pruebas con un tren en cada vía (PE8 y PE9) y por último las pruebas en la vía 1 (PE6 y PE11). Como se observa en las tablas, las pruebas estáticas máximas cambian de un sensor a otro. Sin embargo, estas diferencias son mínimas. Los valores máximos de giros son congruentes con los valores de desplazamiento lateral, donde el máximo se presentó en una prueba en vía 2.

En la figura 5.7 se observa la comparación de los giros máximos para cada tipo de prueba estática con los tres tipos de sensores mencionados.

Tabla 5.8. Giros en el extremo inferior de las columnas C5 y C6 para las PE máximas, obtenidos con los potenciómetros.

Columna	Sensor	Altura, en m	Giros, en rad					
			PE2	PE12	PE6	PE11	PE8	PE9
			Vía 2		Vía 1		Vías 1 y 2	
C5	pA5-pA6	1.63	-2.7E-5	-2.8E-5	1.6E-5	1.3E-5	-1.9E-5	-1.9E-5
	pA3-pA4	1.12	-1.6E-5	-2.0E-5	1.0E-5	9.0E-6	-1.2E-5	-1.2E-5
	pA1-pA2	0.61	-5.5E-6	-9.0E-6	3.7E-6	3.5E-6	-4.3E-6	-4.0E-6
C6	pB5-pB6	1.62	-2.7E-5	-3.3E-5	1.4E-5	1.7E-5	-9.3E-6	-1.3E-5
	pB3-pB4	1.11	-1.8E-5	-2.2E-5	8.1E-6	9.6E-6	-7.0E-6	-9.6E-6
	pB1-pB2	0.60	-8.2E-6	-9.8E-6	2.8E-6	3.7E-6	-3.4E-6	-4.7E-6

Tabla 5.9. Giros en el extremo inferior de las columnas C5 y C6 para las PE máximas, obtenidos con los deformímetros.

Columna	Sensor	Altura, en m	Giros, en rad					
			PE2	PE12	PE6	PE11	PE8	PE9
			Vía 2		Vía 1		Vías 1 y 2	
C5	DA3-DA4	1.12	-1.9E-5	-1.7E-5	8.4E-6	6.9E-6	-8.2E-6	-8.5E-6
	DA1-DA2	0.69	-9.7E-6	-8.9E-6	4.5E-6	3.5E-6	-6.0E-6	-6.1E-6
C6	DB1-DB2	0.68	-6.7E-6	-8.4E-6	5.3E-6	3.8E-6	-2.5E-6	-3.7E-6

Tabla 5.10. Giros en la base de las columnas y lecho superior de las zapatas para las PE máximas, obtenidos con los inclinómetros.

Columna	Sensor	Altura, en m	Giros, en rad					
			PE2	PE12	PE6	PE11	PE8	PE9
			Vía 2		Vía 1		Vías 1 y 2	
C5	IAT2	0.71	-7.9E-5	-7.7E-5	2.8E-5	1.6E-5	-6.3E-5	-5.6E-5
	IAT1	0.00	-3.7E-5	-3.9E-5	2.0E-5	1.3E-5	-1.1E-5	-2.0E-5
C6	IBT2	0.67	-7.7E-5	-7.1E-5	3.7E-5	1.8E-5	-2.4E-5	-3.1E-5
	IBT1	0.00	-4.1E-6	-1.0E-5	1.4E-5	7.2E-6	-2.6E-6	4.9E-6

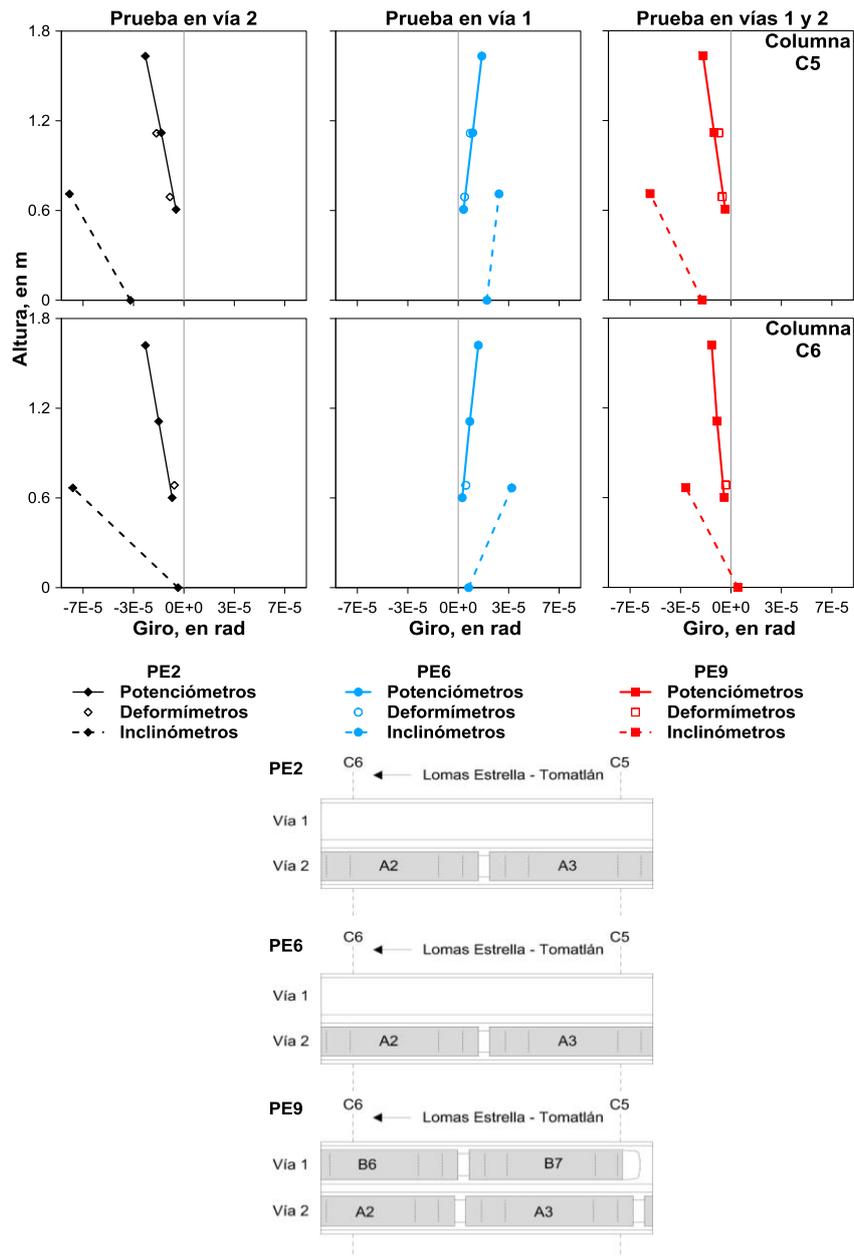


Figura 5.7. Giros para las PE máximas en pruebas en la vía 2 (PE2), pruebas en la vía 1 (PE6) y pruebas en las vía 1 y vía 2 (PE9).

5.2. Pruebas dinámicas

El análisis de la respuesta para pruebas dinámicas se realizó para los diferentes tipos de pruebas, es decir, para pruebas en la vía 1, pruebas en la vía 2 y pruebas en las dos vías. Además de la consideración del frenado del tren.

5.2.1. Trabe

La tabla 5.11 presenta los valores máximos de desplazamiento vertical de la trabe para las PD.

Los valores de desplazamiento en el centro del claro de la trabe fueron máximos en la PD6 y la parte del frenado de la PD8, estos dos tienen la respuesta muy similar, lo que indica que en la respuesta de la trabe no hay diferencia si los dos trenes que circulan al mismo tiempo frenan en el tramo C5-C6 o no. Tampoco se muestra gran relevancia con el frenado en el tramo C4-C5 (PD10f), ya que presenta desplazamientos menores que PD6 y PD8f, lo que indica que el frenado en el claro anterior al tramo de pruebas no afecta más que los otros dos casos.

La parte del arranque de las PD en comparación con la respuesta del frenado, arrojan desplazamientos mayores en la vía 1 en pruebas con un tren en la vía 1 (PD11a) y un tren en cada vía (PD7a, PD8a, PD9a y PD10a).

El frenado en el tramo de C5-C6 y C4-C5 de las PD con un tren en cada vía a baja velocidad (PD7f y PD9f) presentan menor respuesta, que la PD con un tren en cada vía sin frenado a baja velocidad (PD5), en la vía 2 y en el centro del claro, pero la respuesta es mayor en la vía 1.

Para las PD con un tren en la vía 1, el frenado de la PD11 presenta desplazamientos similares a PD3 en la vía 1. Sin embargo, para este tipo de pruebas las que provocaron mayores desplazamientos fueron la PD1 y PD 11 en el arranque, las dos a baja velocidad.

En las PD con un tren en la vía 2, el frenado en el claro C4-C5 del tren y la velocidad alta si afectan los desplazamientos de la trabe como se observa en PD12f y PD4, aun así, la PD4 presenta mayores desplazamientos que la del frenado.

Se observa que como en las PE, las pruebas dinámicas con un tren en la vía 1, los desplazamientos en la vía 2 son mayores a un cuarto del claro (V_e) que en el centro del claro (V_o). Esto a consecuencia del giro de la trabe contrarrestada por la deformación, donde esta deformación al ser mayor en el centro del claro provoca este efecto en la vía 2 de la trabe.

Los desplazamientos verticales máximos de la trabe se muestran en las figuras 5.8 y 5.9 en vista transversal y longitudinal, respectivamente, de acuerdo a cada tipo de prueba. En estas figuras se observa que en pruebas en la vía 1 la velocidad baja (menor a 30 km/h) provoca los mayores desplazamientos cuando el tren circula en esa vía o un tren en cada vía y en las PD con arranque. En la vía 2 se observó que las pruebas con frenado y arranque, la que provoca mayor respuesta es el frenado a velocidad alta. Sin embargo, son menores a los desplazamientos de una PD sin frenado a velocidad alta.

Tabla 5.11. Desplazamientos verticales de la trabe para las PD máximas.

Nervadura	Sección transversal	Longitud, en m	Desplazamientos, en mm					
			PD1 28 km/h	PD11a	PD4 57 km/h	PD12f 43 km/h	PD6 58 km/h	PD8f 58 km/h
			Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2	
Vía 1	C5	-12.7	-1.2	-1.0	1.5	1.5	1.1	0.9
	1/4 claro	-5	-4.1	-3.9	1.9	1.6	-1.1	-1.5
	Centro claro	0	-5.0	-5.0	2.0	1.7	-1.8	-2.2
	C6	15.7	-1.1	-1.1	1.8	1.6	1.4	1.2
Central	C5	-12.7	-0.3	-0.2	-0.6	-0.6	-1.2	-1.2
	1/4 claro	-5	-2.3	-2.0	-3.1	-3.1	-5.3	-5.6
	Centro claro	0	-3.1	-2.9	-4.1	-4.0	-7.6	-7.7
	C6	15.7	-0.4	-0.5	-0.6	-0.6	-1.2	-1.2
Vía 2	C5	-12.7	0.7	0.7	-2.0	-1.8	-1.7	-1.5
	1/4 claro	-5	1.0	1.0	-6.5	-6.1	-6.3	-6.2
	Centro claro	0	0.5	0.6	-7.5	-6.9	-8.0	-7.7
	C6	15.7	0.8	0.9	-1.9	-1.8	-1.6	-1.4

Valor negativo indica movimiento descendente de la trabe

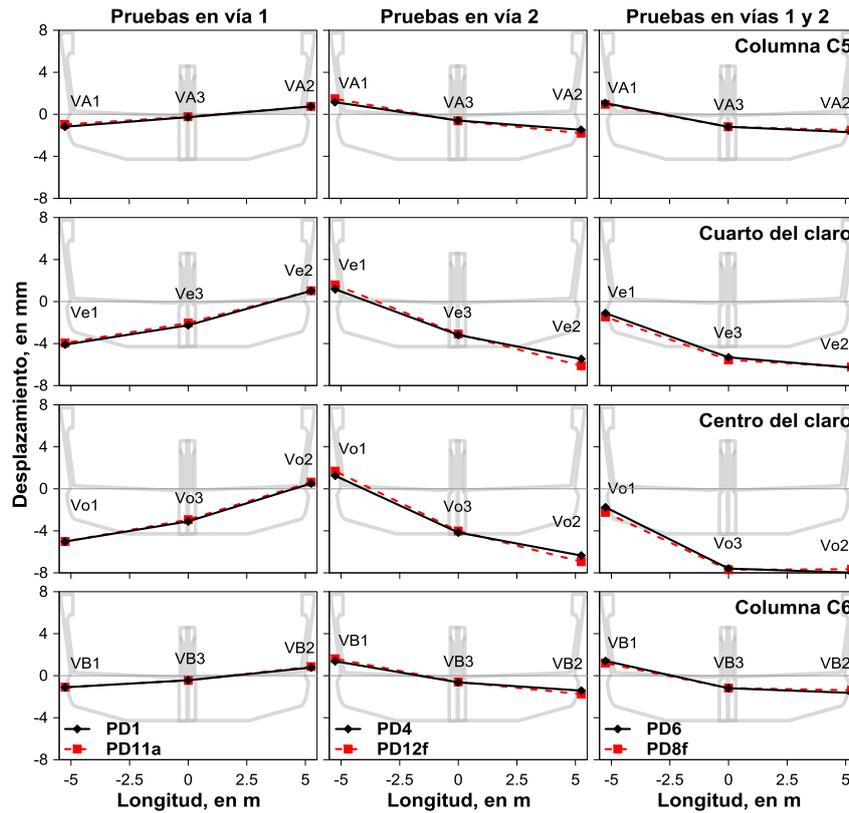


Figura 5.8. Vista transversal de los desplazamientos verticales para las PD máximas en la vía 1 (PD1 y PD11a), en la vía 2 (PD4 y PD12f) y en las vías 1 y 2 (PD6 y PD8f).

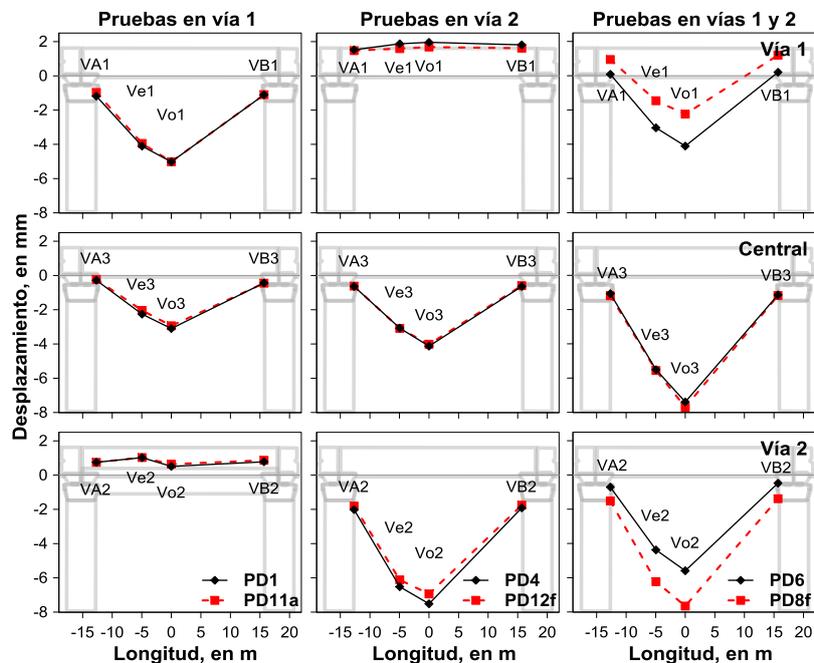


Figura 5.9. Vista longitudinal de los desplazamientos verticales para las PD máximas en la vía 1 (PD1 y PD11a), en la vía 2 (PD4 y PD12f) y en las vías 1 y 2 (PD6 y PD8f).

Comparación con la deflexión permisible

Los valores de deflexión en el instante donde es máxima en el centro del claro para las PD se compararon con la deflexión permisible longitudinal y transversal (NTCDS, 2004). Las deflexiones máximas para las PD y sus porcentajes respecto de la deflexión permisible se aprecian en las tablas 5.12 y 5.13 para la deflexión permisible longitudinal (DpL) y transversal (DpT), respectivamente. Los valores máximos de deflexión longitudinal se presentaron en la pruebas dinámicas con un tren en cada vía, como el valor máximo de la deflexión en el centro del claro en la parte del frenado de la PD8 con un valor respecto de la deflexión permisible longitudinal de 17.4 %. Lo anterior coincide con los valores de desplazamientos verticales, ya que no existe mucha diferencia entre la PD6 y la PD8f.

Las deflexiones transversales máximas no excedieron el 22% de la deflexión permisible transversal, como es el caso de la PD4. Los %DpT máximos se presentaron en la vía 1. En las figuras 5.10 y 5.11 se muestran las deflexiones longitudinales en vista transversal y longitudinal, respectivamente. En la figura 5.12 las deflexiones transversales.

Tabla 5.12. Deflexiones longitudinales en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe para las PD máximas, y su valor respecto de la deflexión permisible longitudinal (%DpL).

PD	Velocidad, en km/h	Nervadura	Número de trenes	Vía	Deflexiones, en mm			
					Cuarto del claro		Centro del claro	
					Deflexión	%DpL	Deflexión	%DpL
1	28	Vía 1	1	1	-2.9	7.6	-3.9	10.4
		Central			-1.9	5.0	-2.8	7.4
		Vía 2			0.2	0.4	-0.3	0.8
11a		Vía 1	1	1	-3.0	8.1	-4.0	10.7
		Central			-1.8	4.9	-2.6	7.0
		Vía 2			0.3	0.8	-0.1	0.4
4	57	Vía 1	1	2	0.3	0.7	0.3	-0.8
		Central			-2.4	6.5	-3.5	9.3
		Vía 2			-4.5	12.0	-5.5	14.8
12f	43	Vía 1	1	2	-0.04	0.1	0.1	0.3
		Central			-2.5	6.6	-3.5	9.3
		Vía 2			-4.2	11.2	-5.2	14.0
6	58	Vía 1	2	1 y 2	-2.3	6.3	-3.1	8.1
		Central			-4.4	11.7	-6.5	17.3
		Vía 2			-4.7	12.6	-6.3	16.8
8f	58	Vía 1	2	1 y 2	-2.5	6.6	-3.3	8.8
		Central			-4.4	11.7	-6.5	17.4
		Vía 2			-4.7	12.7	-6.2	16.5

DpL: deflexión permisible longitudinal de 37.5 mm

Tabla 5.13. Deflexiones transversales en el instante donde son máximas en el centro del claro de la trabe para las PD máximas, y su valor respecto de la deflexión permisible transversal (%DpT).

PD	Velocidad, en km/h	Nervadura	Número de trenes	Vía	Deflexiones, en mm			
					Cuarto del claro		Centro del claro	
					Deflexión	%DpT	Deflexión	%DpT
1	28	Vía 1	1	1	-1.0	5.7	-1.1	6.4
		Vía 2			2.0	11.7	2.5	14.1
11a	Vía 1	-1.2			-6.9	-1.4	7.8	
	Vía 2	2.1			12.2	2.5	14.2	
4	57	Vía 1	1	2	2.7	15.3	3.8	21.8
		Vía 2			-2.1	11.8	-2.0	11.7
12f	Vía 1	2.4			13.8	3.6	20.5	
	Vía 2	-1.8			10	-1.7	10	
6	58	Vía 1	2	1 y 2	2	11.6	3.4	19.7
		Vía 2			-0.3	1.9	0.2	1.2
8f	Vía 1	1.9			10.8	3.2	18.4	
	Vía 2	-0.4			2.2	0.3	1.8	

DpT: deflexión permisible transversal de 17.5 mm

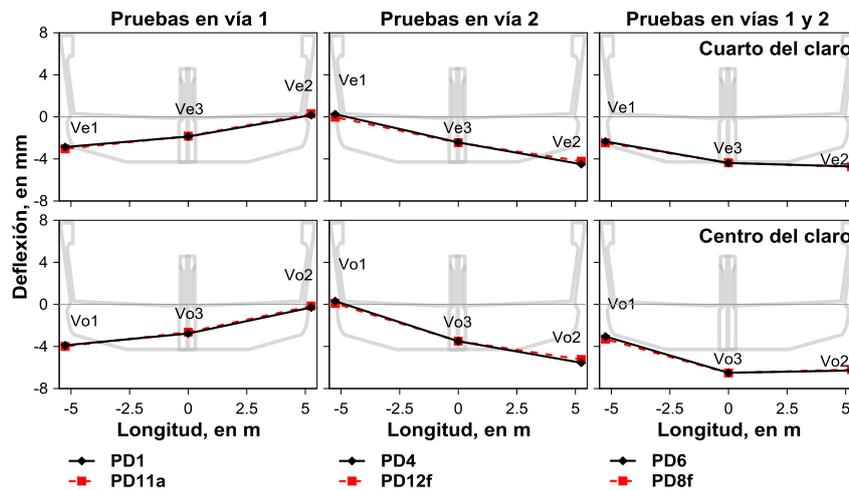


Figura 5.10. Vista transversal de las deflexiones longitudinales para las PD máximas en la vía 1 (PD1 y PD11a), en la vía 2 (PD4 y PD12f) y en las vías 1 y 2 (PD6 y PD8f).

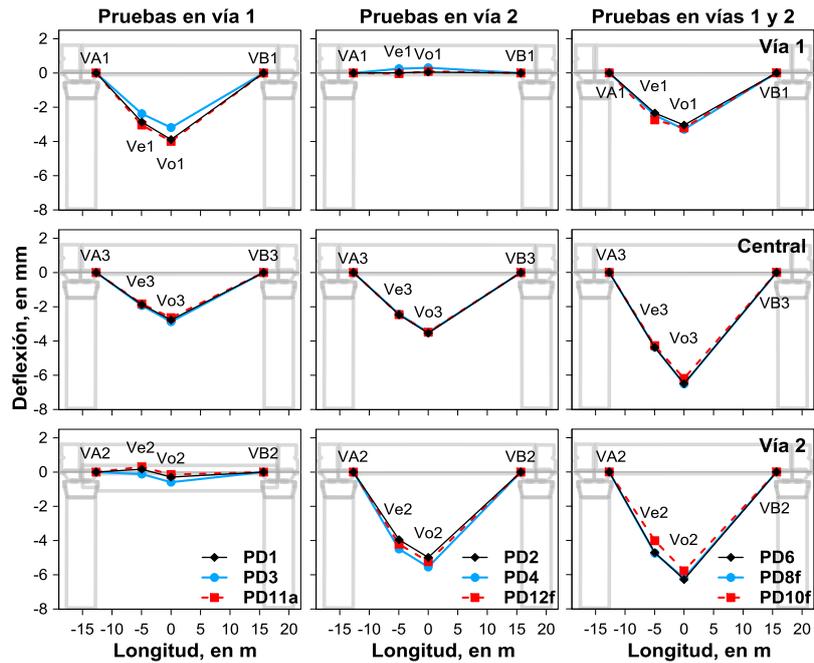


Figura 5.11. Vista longitudinal de las deflexiones longitudinales para las PD máximas en la vía 1 (PD1 y PD11a), en la vía 2 (PD4 y PD12f) y en las vías 1 y 2 (PD6 y PD8f).

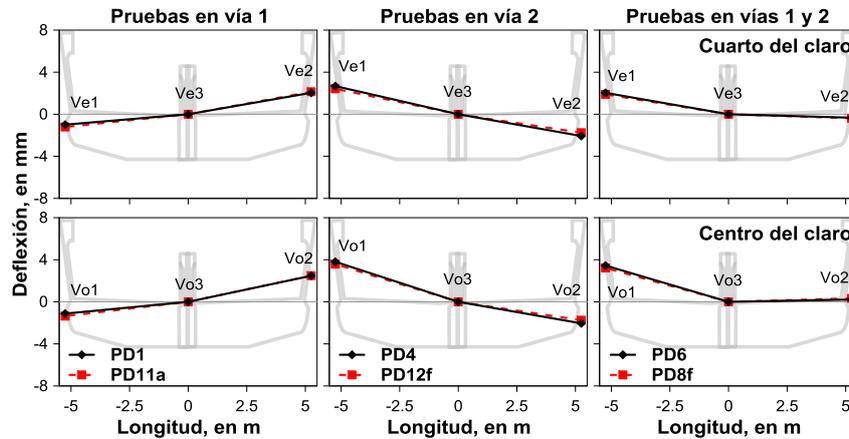


Figura 5.12. Deflexiones transversales para las PD máximas en la vía 1 (PD1 y PD11a), en la vía 2 (PD4 y PD12f) y en las vías 1 y 2 (PD6 y PD8f).

Deformaciones unitarias

Los incrementos de deformaciones unitarias máximas para las PD obtenidas con los deformímetros del centro del claro de la trabe en el instante donde el desplazamiento vertical al centro del claro es máximo, se presentan en la tabla 5.14. Los valores positivos representan deformaciones a tensión y negativos a compresión.

Los valores máximos de deformación en tensión y compresión para las PD ocurrieron en pruebas con un tren en cada vía. Las PD6 y PD7 en el arranque obtuvieron las mayores deformaciones, siendo la PD6 con las deformaciones máximas a tensión y compresión en la vía 2 y la PD7a en la nervadura central y en la vía 1. Los valores máximos en tensión y compresión para pruebas con un tren en una vía se presentaron en la PD1 y PD11 en el arranque para pruebas en la vía 1. Para pruebas en la vía 2 en la PD4 y PD12 en el arranque.

En la tabla 5.15 se observan los valores de esfuerzo a tensión y compresión, obtenidos con las deformaciones medidas y su valor respecto de las resistencias nominales del concreto en tensión ($2\sqrt{f'_c}$, kg/cm²) y en compresión (600 kg/cm²), de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto del Distrito Federal (2004). El porcentaje máximo en tensión es de 40% y en compresión del 6%, respecto de las resistencias nominales.

En la figura 5.13 se encuentran las comparaciones de las deformaciones máximas para cada caso.

Tabla 5.14. Deformaciones unitarias al centro del claro de la trabe, para las PD máximas.

Nervadura	Lecho de la trabe	Deformaciones, en $\mu\epsilon$						
		PD1 28 km/h Vía 1	PD11a	PD4 57km/h Vía 2	PD12a	PD6 58km/h	PD7a Vías 1 y 2	PD8f 58 km/h
Vía 1	superior	-51.4	-50.5	-1.6	-4.7	-44.8	-59.9	-47.5
	inferior	28.9	31.0	-7.5	-3.9	14.9	34.6	17.6
Central	superior	-48.3	-47.1	-43.6	-50.2	-94.5	-106.6	-96.7
	inferior	23.4	25.0	30.4	31.2	57.0	62.0	58.5
Vía2	superior	-5.8	-4.6	-74.2	-68.1	-84.5	-74.5	-82.1
	inferior	-1.5	-2.8	47.6	45.4	52.2	44.3	49.5

Tabla 5.15. Valores de esfuerzo obtenidos con las deformaciones experimentales y su valor en porcentaje respecto de las resistencias nominales en tensión y compresión.

Nervadura	Lecho de la trabe	Esfuerzos, en kg/cm ²		% de esfuerzo respecto de las resistencias nominales	
		PD6 58 km/h	PD7a 18 km/h	PD6 58 km/h	PD7a 18 km/h
		Vías 1 y 2		Vías 1 y 2	
Vía 1	superior	-14	-19	2.4	3.2
	inferior	5	11	9.7	22.5
Central	superior	-30	-34	5.0	5.7
	inferior	18	20	37.0	40.3
Vía2	superior	-27	-24	4.5	4.0
	inferior	17	14	33.9	28.7

*Resistencias nominales del concreto en tensión (49 kg/cm²) y en compresión (600 kg/cm²).

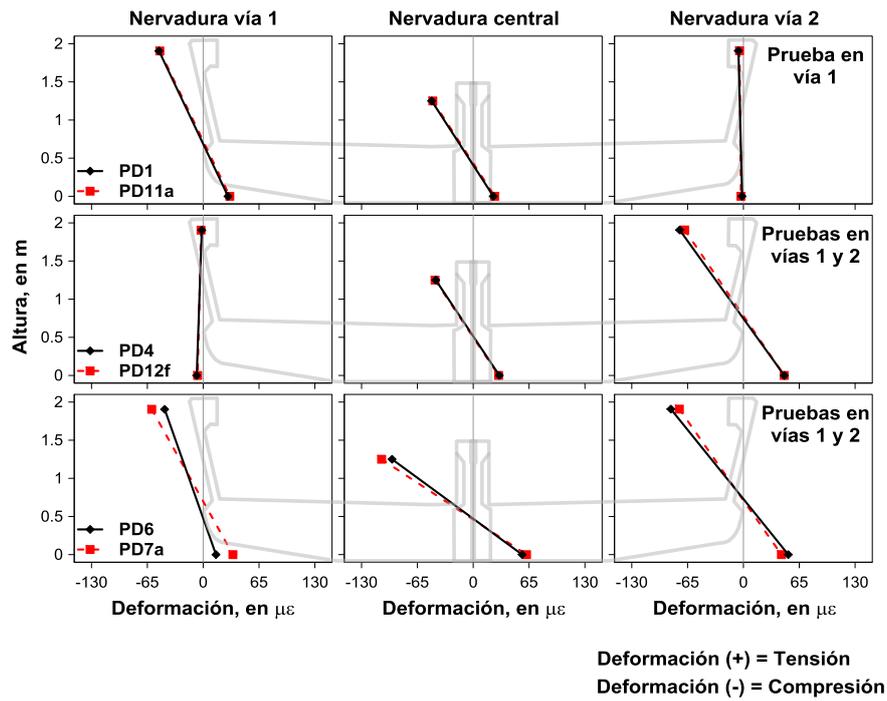


Figura 5.13. Deformaciones unitarias máximas al centro del claro de la trabe para las PD en la vía 1, la vía 2 y las vías 1 y 2.

5.2.2. Columnas

Los desplazamientos laterales de las columnas para las PD máximas se obtuvieron con respecto al valor máximo del desplazamiento lateral del capitel de cada columna (HA5 y HB5).

Los valores se presentan en la tabla 5.16, los cuales registran movimiento hacia extradós con un valor negativo.

El desplazamiento lateral máximo se presentó en **PD6**, prueba con un tren en cada vía a velocidad alta (58 km/h) y de acuerdo con el signo del desplazamiento este se mueve en dirección a extradós. Se tienen desplazamientos muy cercanos a PD6 en la PD4, prueba con un tren en vía 2 a velocidad alta (57 km/h). Con estos dos casos se concluye que la velocidad influye en el comportamiento de las columnas, pero sin frenado del tren, ya que la PD8f y PD12f con desplazamientos por debajo de PD6 y PD4. Las pruebas en vía 1 tuvieron los desplazamientos máximos con desplazamiento hacia intradós en la PD11 en el arranque del tren.

La figura 5.14 muestra la comparación de los desplazamientos máximos de las PD para cada tipo de prueba, es decir, en la vía 1, en la vía 2 y en las dos vías. Se observa que la velocidad afecta más cuando el tren circula en vía 2 que en vía 1, es decir, la velocidad alta provoca mayores desplazamientos laterales en las columnas hacia extradós y la velocidad baja provoca mayores desplazamientos laterales de las columnas hacia intradós. De igual manera, el frenado provoca mayor desplazamiento hacia extradós y el arranque hacia intradós. La fuerza centrífuga es otro factor que afecta los desplazamientos laterales, esto al ser una fuerza horizontal hacia extradós, provoca que el desplazamiento hacia intradós disminuya y hacia extradós aumente.

Tabla 5.16. Desplazamientos laterales de las columnas C5 y C6 para las PD máximas.

Columna	Sensor	Altura, en m	PD1	PD11a	PD4	PD12f	PD6	PD8f
			28 km/h		57km/h	43 km/h	58km/h	58 km/h
			Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2	
C5	HA5	9.33	0.69	0.77	-1.90	-1.70	-1.99	-1.82
	HA4	8.15	0.57	0.63	-1.66	-1.48	-1.79	-1.68
	HA3	5.45	0.30	0.34	-0.95	-0.84	-1.07	-1.02
	HA2	2.75	0.11	0.14	-0.43	-0.37	-0.52	-0.49
	HA1	0.03			-0.12	-0.11	-0.16	-0.17
C6	HB5	9.34	0.73	0.84	-1.97	-1.62	-2.04	-1.61
	HB4	8.16	0.57	0.68	-1.69	-1.39	-1.82	-1.45
	HB3	5.42	0.29	0.34	-0.92	-0.74	-1.04	-0.82
	HB2	2.7	0.09	0.10	-0.35	-0.28	-0.43	-0.33
	HB1	0.07			-0.03	-0.04	-0.03	-0.05

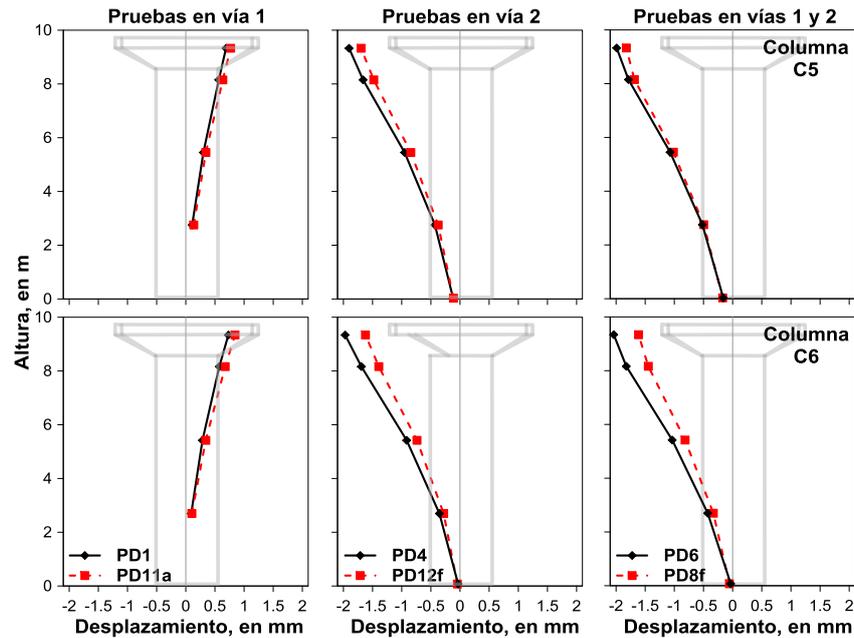


Figura 5.14. Desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para las PD máximas en la vía 1 (PD1 y PD11a), en la vía 2 (PD4 y PD12f) y en las vías 1 y 2 (PD6 y PD8f). El perfil con línea punteada indica la PD con frenado o arranque del tren.

Comparación con la distorsión angular permisible

Las distorsiones angulares de las PD como en las PE se compararon con el valor de la distorsión angular de 0.012 de las NTCDS (2004).

En la tabla 5.17 se presentan los porcentajes de la distorsión angular experimental respecto de la permisible (%Dpa) para las PD sin frenado y con frenado, respectivamente. El porcentaje máximo de distorsión angular respecto de la permisible fue de 1.8 %, lo que indica que las pruebas experimentales dinámicas provocan mayores desplazamientos que las estáticas (%Dap de 1.2 %).

Tabla 5.17. Distorsiones angulares de las columnas C5 y C6, para las PD máximas y su porcentaje respecto de la distorsión angular permisible (%Dap).

PD	Número de trenes	Vía	Distorsión angular		%Dap	
			C5	C6	C5	C6
1	1	1	0.00008	0.00008	0.6	0.7
11a			0.00008	0.00009	0.7	0.8
4	1	2	0.00019	0.00021	1.6	1.7
12f			0.00017	0.00017	1.4	1.4
6	2	1 y 2	0.00020	0.00021	1.6	1.8
8f			0.00018	0.00017	1.5	1.4

%Dap: porcentaje de la distorsión angular experimental respecto de la distorsión angular permisible

Giros máximos de las columnas

En las tablas 5.18 y 5.19 se muestran los valores de los giros en el extremo inferior de las columnas para las PD máximas obtenidas con potenciómetros y deformímetros, respectivamente. En la figura 5.15 se observan los giros máximos de cada tipo de PD. Los valores de giros presentan el signo congruente con los valores de desplazamiento lateral de las columnas.

El valor máximo de giro en el extremo inferior de las columnas se presenta en la **PD6** igual que en los desplazamientos laterales, seguida de la prueba con frenado PD8f, después las pruebas PD4 y PD12 f. Por último y sin mucha diferencia PD11a y PD1. La diferencia máxima entre giros obtenidos con potenciómetros y deformímetros es de 0.000001 rad.

Tabla 5.18. Giros en el extremo inferior de las columnas C5 y C6 para las PD máximas, obtenidos con los potenciómetros.

Columna	Sensor	Altura, en m	Giro, en rad					
			PD1	PD11a	PD4	PD12f	PD6	PD8f
			28 km/h		57 km/h	43 km/h	58 km/h	58 km/h
			Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2	
C5	pA5-pA6	1.63	1.6E-5	1.7E-5	-4.8E-5	-4.4E-5	-5.4E-5	-5.1E-5
	pA3-pA4	1.12	9.3E-6	1.2E-5	-3.0E-5	-2.7E-5	-3.4E-5	-3.3E-5
	pA1-pA2	0.61	3.8E-6	4.4E-6	-1.1E-5	-1.2E-5	-1.5E-5	-1.5E-5
C6	pB5-pB6	1.62	1.7E-5	2.0E-5	-5.0E-5	-4.2E-5	-5.3E-5	-4.6E-5
	pB3-pB4	1.11	1.0E-5	1.0E-5	-3.4E-5	-3.1E-5	-3.7E-5	-3.3E-5
	pB1-pB2	0.60	5.0E-6	4.4E-6	-1.8E-5	-1.5E-5	-1.9E-5	-1.7E-5

Tabla 5.19. Giros en el extremo inferior de las columnas C5 y C6 para las PD máximas, obtenidos con los deformímetros.

Columna	Sensor	Altura, en m	Giro, en rad					
			PD1	PD11a	PD4	PD12f	PD6	PD8f
			28 km/h		57 km/h	43 km/h	58 km/h	58 km/h
			Vía 1		Vía 2		Vías 1 y 2	
C5	DA3-DA4	1.12	7.7E-6	8.6E-6	-2.6E-5	-2.4E-5	-2.8E-5	-2.7E-5
	DA1-DA2	0.69	3.8E-6	4.3E-6	-1.4E-5	-1.3E-5	-1.5E-5	-1.5E-5
C6	DB1-DB2	0.68	3.3E-6	3.8E-6	-1.3E-5	-1.0E-5	-1.4E-5	-1.2E-5

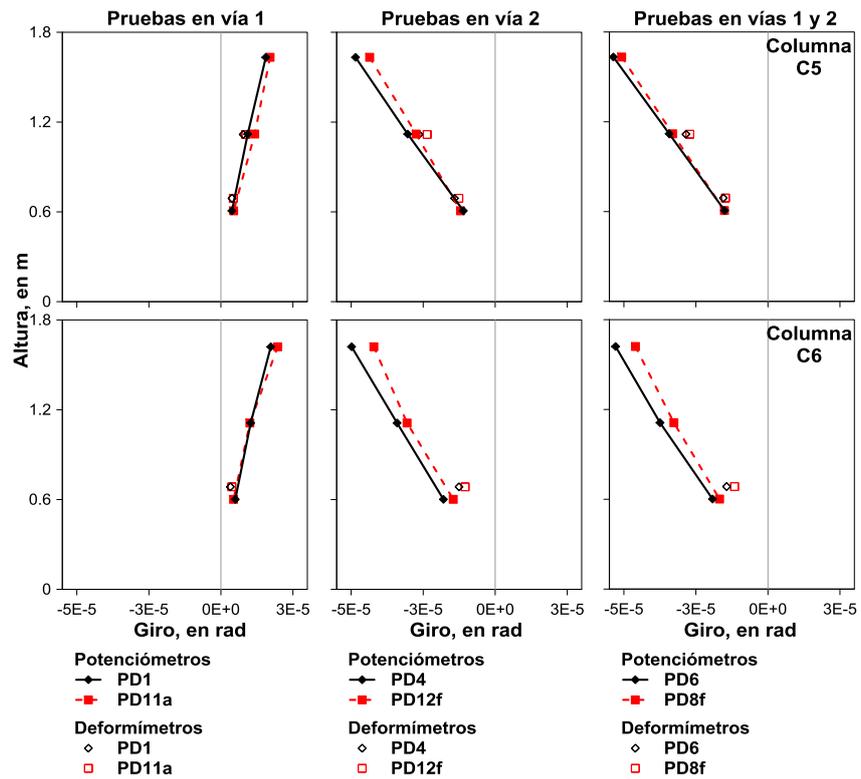


Figura 5.15. Giros en el extremo inferior de las columnas C5 y C6 para las PD máximas en la vía 1 (PD1 y PD11a), en la vía 2 (PD4 y PD12f) y en las vías 1 y 2 (PD6 y PD8f).

5.2.3. Factor de amplificación dinámico

Los valores máximos de FAD obtenidos con los desplazamientos verticales, deformaciones y desplazamientos laterales para el criterio 1 y criterio 2 se encuentran en las tablas 5.20 a 5.22. En la figura 5.16 se presentan los FAD máximos y las velocidades de las PD. En las tablas y en la figura se observa que el FAD es diferente en la trabe y las columnas.

Factor de amplificación dinámico en la trabe:

- **Criterio 1** (*prueba dinámica entre prueba estática*)

En los desplazamientos de la trabe los FAD se presentaron en pruebas con el paso de un tren en vía 2 a 57 y 43 km/h, esto en, PD4 (2.9) y PD12 en el frenado (2.5), respectivamente en el centro del claro de la vía 1.

Con respecto a las deformaciones de la trabe los valores de FAD para tensión se presentaron en la prueba con el paso de un tren en vía 1 a 61 km/h y para compresión en la prueba con el paso de un tren en cada vía a 58 km/h, es decir, en PD3 (1.6 en el eje central) y PD6 (1.2 en la vía 2), respectivamente.

- **Criterio 2** (*prueba dinámica entre prueba dinámica filtrada*)

Los valores obtenidos con los desplazamientos verticales se presentaron en pruebas con el paso de un tren en la vía 1 a 50 y 61 km/h, es decir, PD11 en el frenado y PD3, respectivamente. Ambas con un FAD en el centro del claro de la vía 2 de 1.3. Sin embargo, en la PD11f el FAD aumentó a 1.4 en un cuarto del claro.

Para las deformaciones los FAD en compresión fueron en pruebas con el paso de un tren en vía 2 a 57 km/h y con el paso de un tren en la vía 1 con frenado a 50 km/h, es decir, PD4 (2.2) y PD11f (1.6), en ambos casos en la vía contraria al paso del tren. En el lecho inferior los FAD se presentaron en la vía 1 en la prueba PD6 (1.4) y en la vía 2 en la prueba PD1 (1.4), paso de un tren en la vía 1 a 28 km/h.

Factor de amplificación dinámico en las columnas:

En el criterio 1 el FAD máximo para los desplazamientos laterales se presenta en PD6, con valores de FAD de 2.5 y 5.4 para la columna C5 y C6, respectivamente. Los valores de los factores máximos para este criterio indican que la amplificación por el efecto dinámico y la fuerza centrífuga es mayor en pruebas con un tren en cada vía.

Para el criterio 2 la amplificación máxima sucedió en la PD3 con valores de 1.2 en ambas columnas. Es de importancia mencionar que en el FAD de PD3 en el criterio 1 es el menor de los máximos, esto seguramente por la fuerza centrífuga que al tener movimiento hacia extradós ocasiona que los desplazamientos en esta prueba disminuyan al aumentar la velocidad.

Los FAD máximos obtenidos con el criterio 1 y 2 con desplazamientos verticales, deformaciones y desplazamientos laterales se presentaron en las pruebas dinámicas a velocidad considerada como alta.

Tabla 5.20. Valores de FAD máximos para las PD, obtenidos con los desplazamientos verticales de la trabe.

Nervadura	PD Velocidad	FAD criterio 1						
		1 28 km/h	3 61 km/h	11f 50 km/h	4 57 km/h	12f 43 km/h	6 58 km/h	8f 58 km/h
	PE	5			3		10	
	Sección transversal	Vía 1			Vía 2		Vías 1 y 2	
Vía 1	1/4 claro	1.0	0.8	0.9	2.3	2.0	0.4	0.5
	Centro claro	0.9	0.7	0.8	2.9	2.5	0.4	0.6
Central	1/4 claro	1.1	1.2	1.1	0.9	1.0	1.0	1.0
	Centro claro	1.0	1.1	1.0	0.9	0.9	1.0	1.0
Vía 2	1/4 claro	1.0	0.2	0.6	1.2	1.1	1.3	1.3
	Centro claro	0.8	0.4	0.3	1.1	1.0	1.3	1.2
FAD criterio 2								
Vía 1	1/4 claro	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1
	Centro claro	1.0	1.1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.0
Central	1/4 claro	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
	Centro claro	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0	1.1	1.0
Vía 2	1/4 claro	1.1	1.3	1.4	1.0	1.0	1.1	1.0
	Centro claro	1.2	1.3	1.3	1.0	1.0	1.0	1.0

Tabla 5.21. Valores de FAD máximos para las PD, obtenidos con las deformaciones de la trabe.

Nervadura	PD Velocidad	FAD criterio 1							
		1 28 km/h	3 61 km/h	11f 50 km/h	4 57 km/h	12f 43 km/h	6 58 km/h	8f 58 km/h	
	PE	5			3		10		
	Sensor	Vía 1			Vía 2		Vías 1 y 2		
Lecho superior	Vía 1	Di1	1.0	0.9	0.9	0.5	0.6	0.9	1.0
		Di2	0.9	0.7	0.8	0.1	0.04	0.8	0.8
	Central	Do2	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.9	0.9
		Do1	1.0	1.0	0.9	0.7	0.6	0.8	0.8
	Vía 2	De2	0.5	0.6	0.5	0.9	0.8	1.2	1.2
		De1	0.1	0.5	0.2	0.9	0.8	1.0	0.9
Lecho inferior	Vía 1	Di3	0.9	0.8	0.8	0.8	0.7	0.4	0.5
		Do4	1.2	1.3	1.3	0.9	0.9	0.8	0.8
	Central	Do3	1.4	1.6	1.5	1.0	1.0	0.8	0.9
		De3	0.2	0.5	0.2	1.2	1.2	1.0	1.0
	FAD criterio 2								
	Lecho superior	Vía 1	Di1	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Di2			1.0	1.0	1.0	2.2	1.4	1.1	1.0
Central		Do2	1.0	1.1	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1
		Do1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.2	1.1
Vía 2	De2	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	
	De1	1.2	1.5	1.6	1.1	1.0	1.1	1.1	
Lecho inferior	Vía 1	Di3	1.1	1.1	1.1	1.3	1.2	1.4	1.2
		Do4	1.1	1.3	1.2	1.1	1.1	1.2	1.2
	Central	Do3	1.0	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1	1.1
		De3	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2

Tabla 5.22. Valores de FAD máximos para las PD, obtenidos con los desplazamientos laterales de las columnas.

Posición	PD	FAD criterio 1						
		1	3	11f	4	12f	6	8f
		28 km/h	61 km/h	50 km/h	43 km/h	58 km/h	58 km/h	
	PE	6			2		9	
	Columna	Vía 1			Vía 2		Vías 1 y 2	
Capitel	C5	0.9	0.2	0.5	1.5	1.3	2.5	2.3
	C6	0.7	0.3	0.6	1.5	1.3	5.4	4.3
		FAD criterio 2						
Capitel	C5	1.0	1.2	1.2	1.0	1.0	1.1	1.1
	C6	1.1	1.2	1.1	1.0	1.0	1.1	1.0

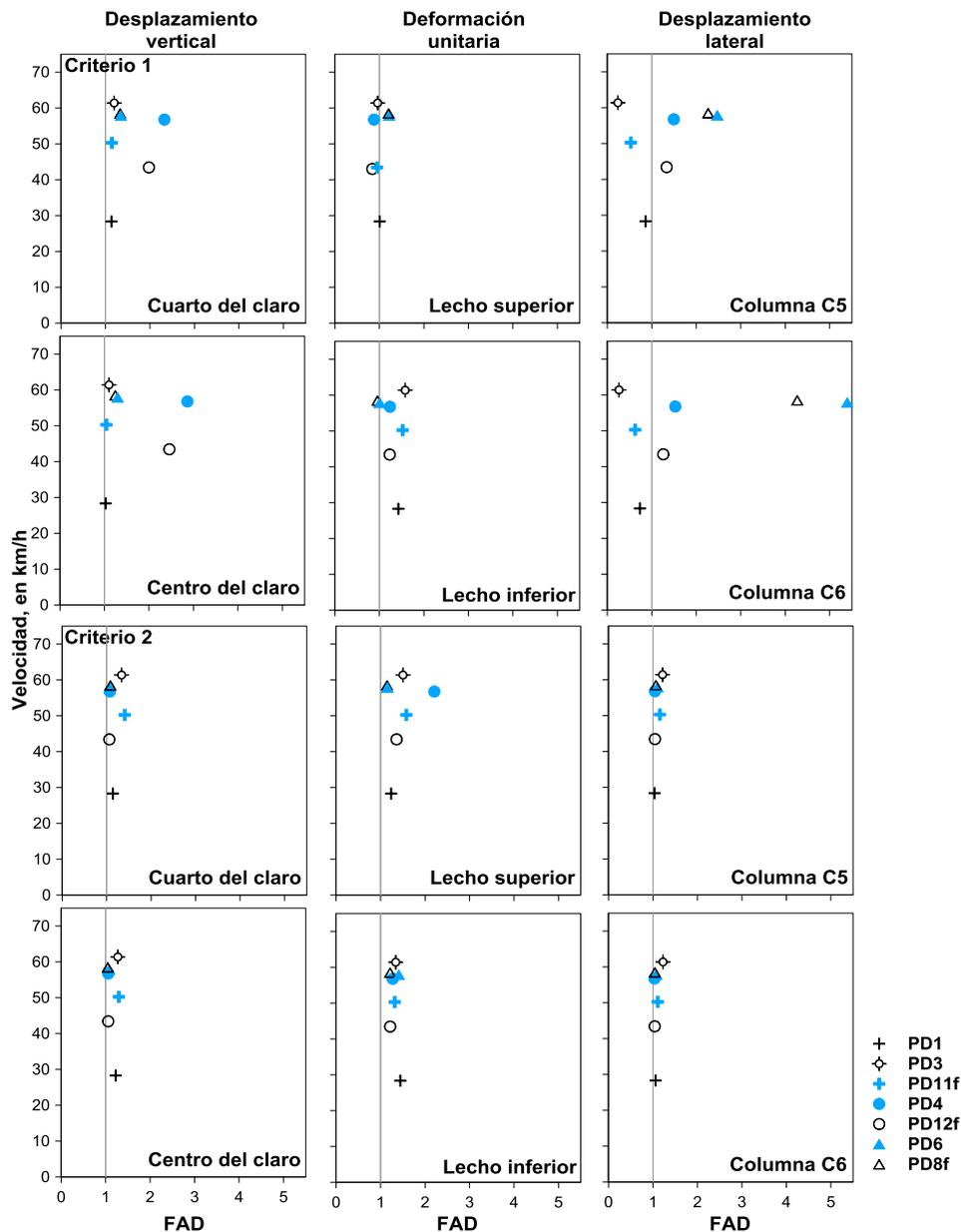


Figura 5.16. Factores de amplificación dinámicos máximos para las PD y sus velocidades, calculados con los desplazamientos verticales, deformaciones unitarias y desplazamientos laterales.

6. Comparaciones

6.1. Comparación de velocidades

En las pruebas dinámicas los trenes circularon a diferentes velocidades. Previo a las pruebas se propusieron velocidades de 30 y 60 km/h como velocidad alta y baja, respectivamente.

Se calcularon velocidades con las historias de los deformímetros colocados en el centro del claro de la trabe. Estas velocidades estimadas se obtuvieron empleando la longitud entre ejes exteriores del tren y el intervalo en segundos de estos ejes en la historia de deformaciones (Figura 6.1).

En la tabla 6.1 se presentan los valores de las velocidades propuestas y las calculadas con las historias de deformímetros de la trabe. La coherencia entre las velocidades confirma que las historias de deformímetros muestran una velocidad real del tren.

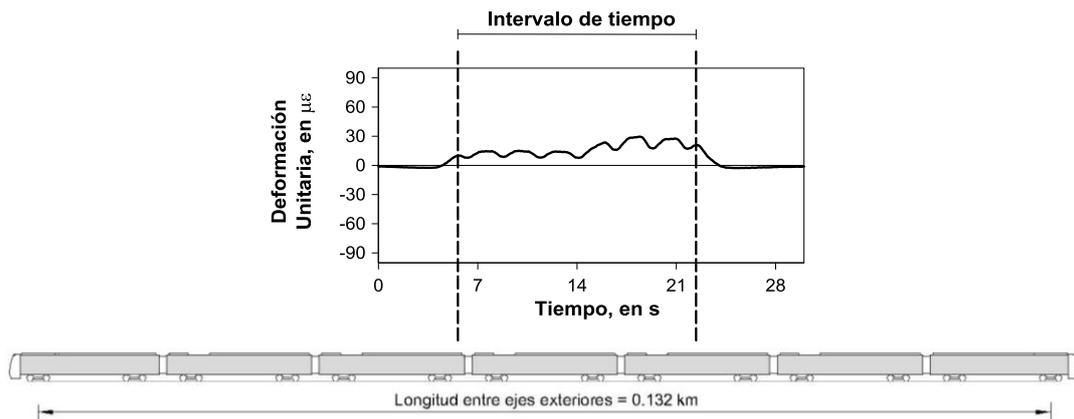


Figura 6.1. Ejemplo de valores empleados en el cálculo de velocidades de los trenes con las historias de deformímetros de la trabe para las PD.

Tabla 6.1. Comparación y diferencia en porcentaje de las velocidades propuestas y las calculadas con las historias de deformímetros de la trabe para las PD.

PD	Vía de circulación	Velocidad propuesta, en km/h	Velocidad deformímetros, en km/h
1	1	30	28.3
2	2	30	28.2
3	1	60	61.4
4	2	60	56.8
5	1 y 2	30	30.2
6	1 y 2	60	57.9
7f	1 y 2	30	28.3
7a	1 y 2		18.1
8f	1 y 2	60	58.5
8a	1 y 2		15.6
9f	1 y 2	30	31.3
9a	1 y 2		15.8
10f	1 y 2	60	59.4
10a	1 y 2		15.7
11f	1	60	50.3
11a	1		15.2
12f	2	60	43.4
12a	2		18.0

6.2. Comparación entre pruebas dinámicas en una sola vía

En este subcapítulo se compararon historias de las respuestas de las columnas y la trabe para las pruebas dinámicas en una sola vía con características similares, es decir, la PD3 y PD11, pruebas con un tren en vía 1 a velocidad alta y PD4 con PD12, pruebas con un tren en vía 2 a velocidad alta.

En la figura 6.2 se ven características similares entre la PD3 y el inicio de la PD11 en el frenado. También se observa que en las columnas se incrementa la respuesta cuando hay frenado en la vía 1. Al contrario de pruebas en la vía 2, donde al comparar la PD4 y la PD12 en el frenado, se observa que la respuesta de las columnas es mayor o igual en la PD4 (Figura 6.3). Sin embargo, en las figuras 6.4 y 6.5 donde se comparan PD3 y PD4 con el arranque de PD11 y PD12, respectivamente, se concluye que el arranque en la vía 1 provoca mayores amplitudes que el frenado y en la vía 2 el arranque menos amplitudes que el frenado en las columnas.

Las comparaciones anteriores también se realizaron con las historias de desplazamiento vertical de la trabe. En estas comparaciones se corroboró que en la vía 1 el arranque o la circulación de un tren a baja velocidad provoca mayores amplitudes. En la vía 2 el frenado y circulación de un tren a alta velocidad ocasiona amplitudes iguales. Esto se observa en las figuras 6.6 a 6.9.

En las comparaciones de las figuras 6.2 a 6.9 se observa que las historias de las pruebas 11 y 12 en el frenado y arranque presentan diferencias al final y al inicio, respectivamente, con las pruebas dinámicas 3 y 4, esto debido a que después del frenado el tren se detuvo un intervalo de tiempo antes de comenzar el arranque.

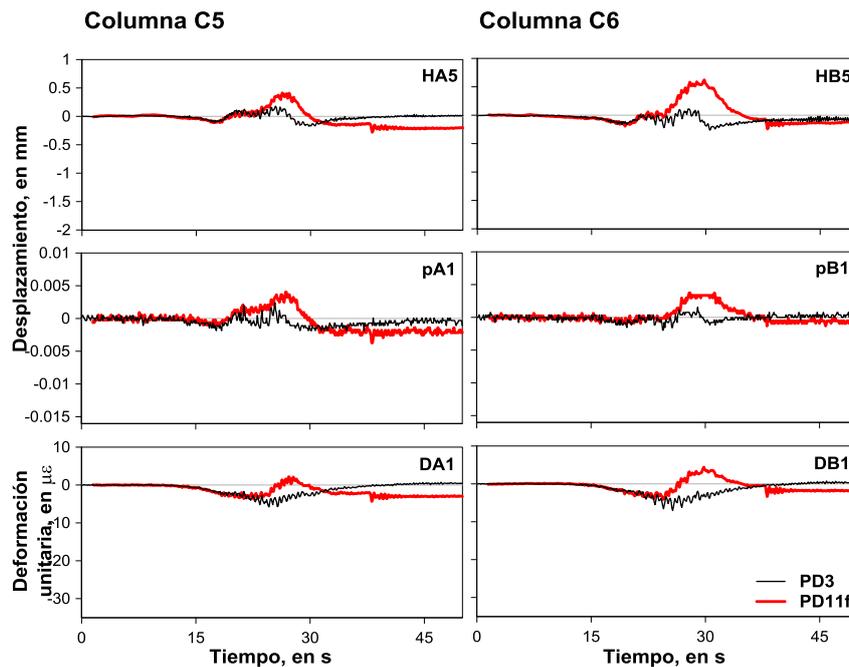


Figura 6.2. Comparación entre PD3 y PD11f de las historias de la respuesta en la columna C5 y C6.

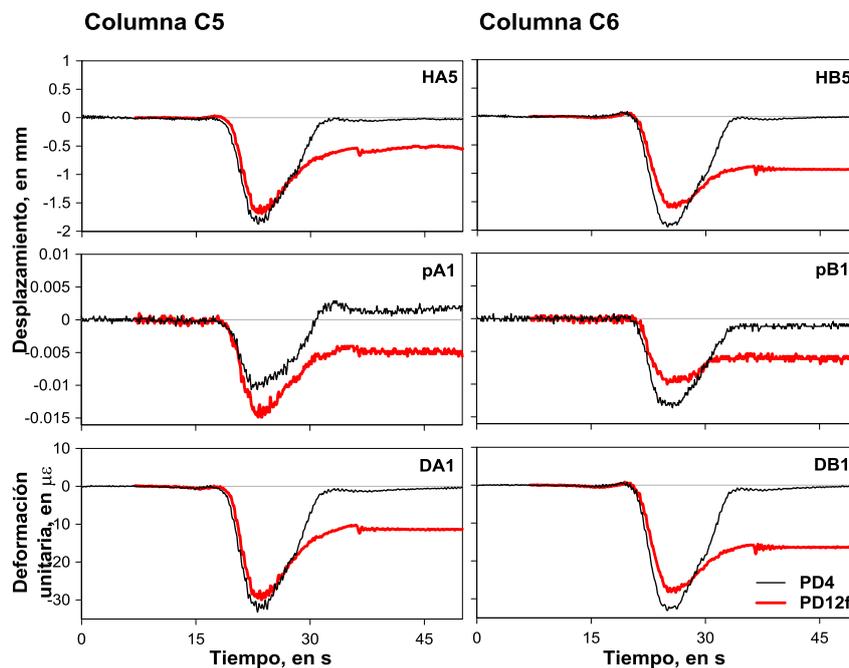


Figura 6.3. Comparación entre PD4 y PD12f de las historias de la respuesta en la columna C5 y C6.

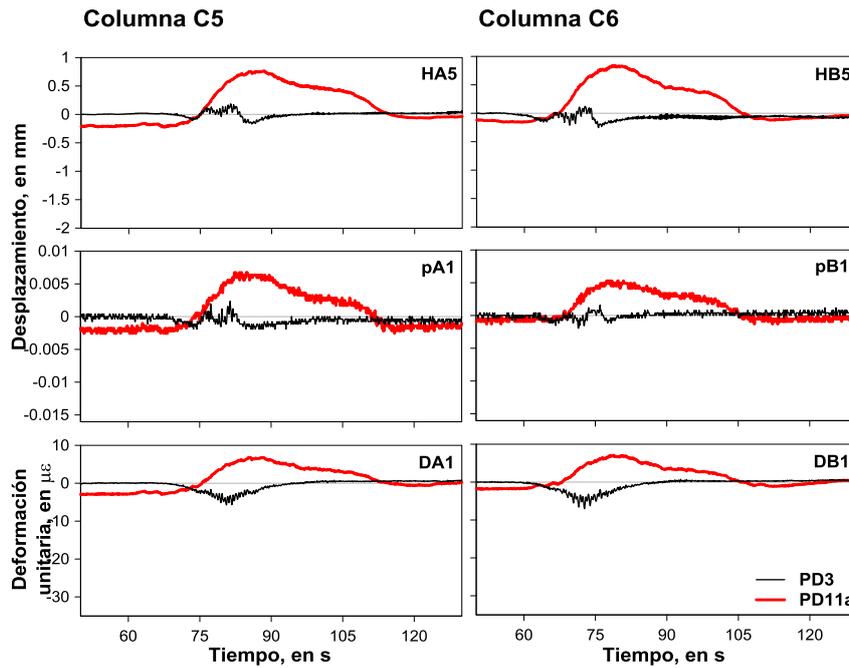


Figura 6.4. Comparación entre PD3 y PD11a de las historias de la respuesta en la columna C5 y C6.

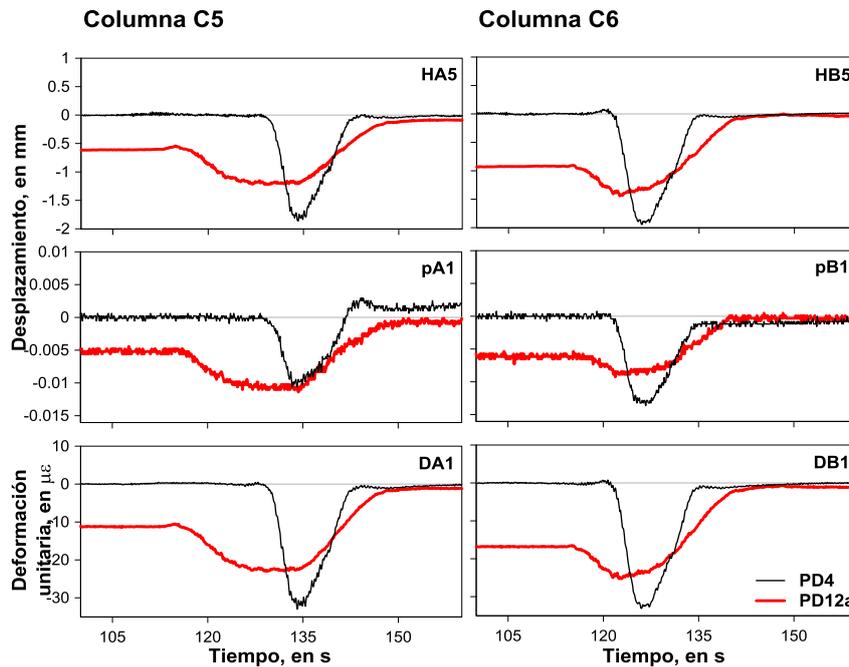


Figura 6.5. Comparación entre PD4 y PD12a de las historias de la respuesta en la columna C5 y C6.

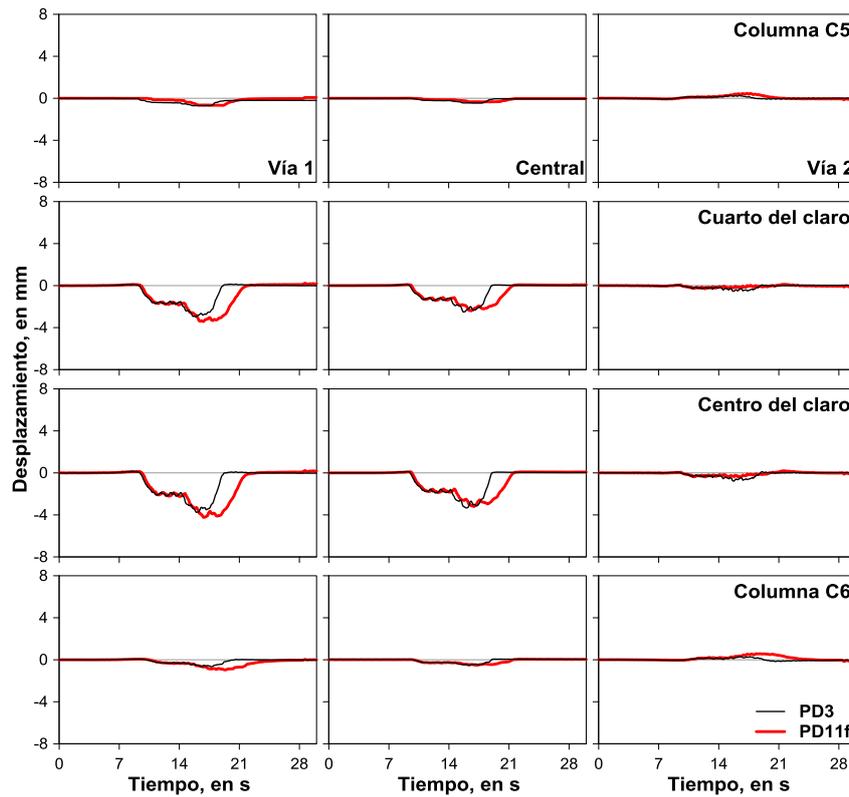


Figura 6.6. Comparación entre PD3 y PD11f de las historias de desplazamiento vertical de la trabe.

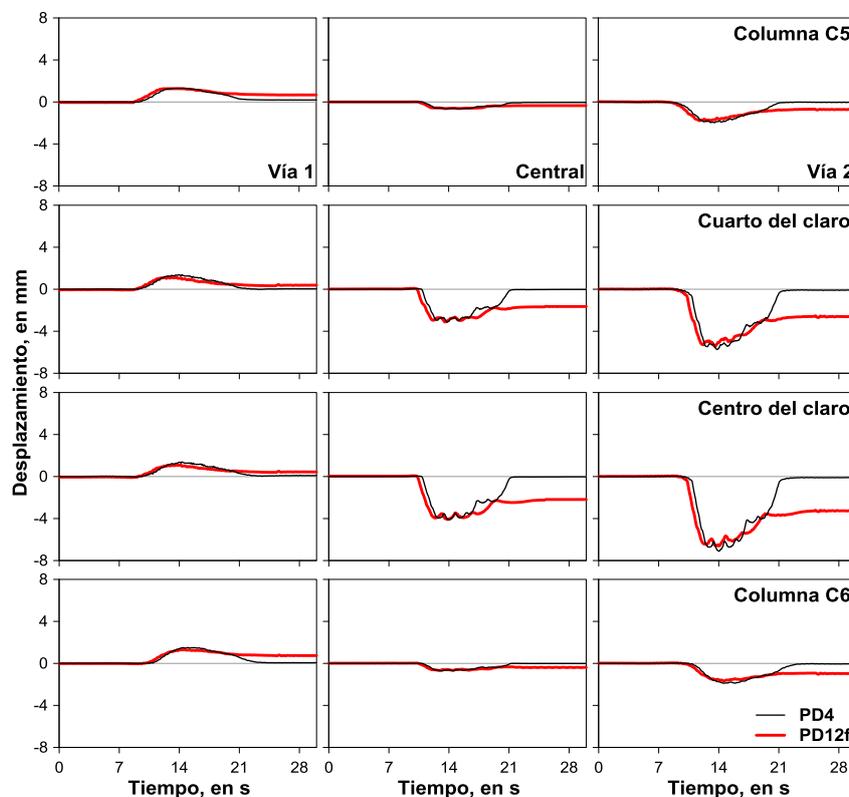


Figura 6.7. Comparación entre PD4 y PD12f de las historias de desplazamiento vertical de la trabe.

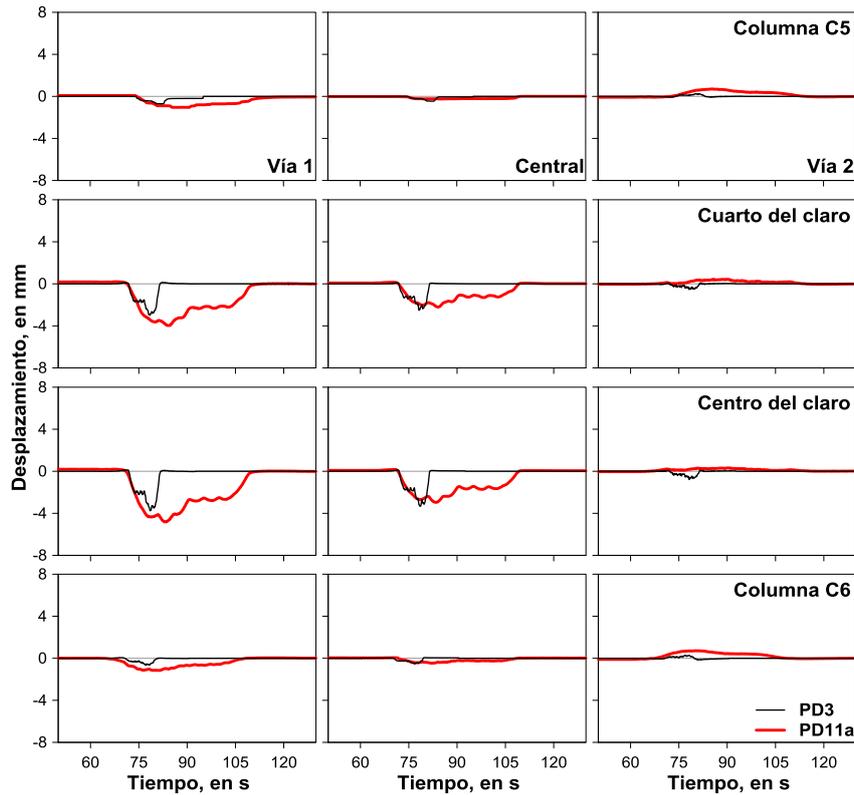


Figura 6.8. Comparación entre PD3 y PD11a de las historias de desplazamiento vertical de la trabe.

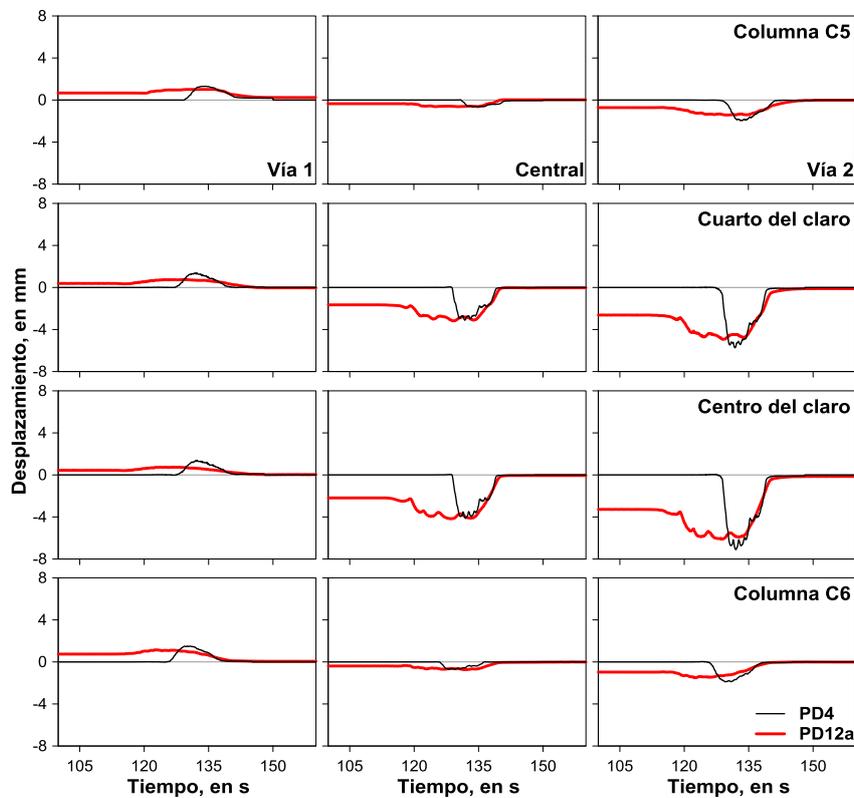


Figura 6.9. Comparación entre PD4 y PD12a de las historias de desplazamiento vertical de la trabe.

6.3. Comparación de instantes de valores máximos

La comparación de los instantes máximos se realizó para los cuatro puntos de medición del tramo en estudio: columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6. Se revisaron los instantes máximos por prueba en cada uno de estos puntos, en el caso de las PD7 a PD12 se analizaron por separado frenado y arranque. En la tabla 6.2 se muestra en orden ascendente los instantes máximos y donde ocurrieron para cada PD.

En las PD1 a PD4, PD6, PD8f, PD11a y PD12f los desplazamientos máximos se presentan en el orden como se esperaría en un tramo de eje longitudinal recto, es decir, si la dirección del tren fuera de C5-C6 el primer máximo sería en la columna C5, después a un cuarto del claro, seguido del centro del claro y por último en la columna C6.

El comportamiento en algunas pruebas dinámicas a baja velocidad con un tren en cada vía como PD5, PD8a, PD10a y PD12a con dirección del tren C6-C5 el máximo se presenta en el siguiente orden: columna C6, columna C5, centro del claro y a un cuarto del claro.

Las PD9a y PD11f presentan el mismo comportamiento con una secuencia ascendente de máximos, iniciando en el centro del claro, a un cuarto del claro, columna C5 y columna C6. Las pruebas restantes PD7f, PD7a, PD9f y PD10f presentan un comportamiento individual.

En las figuras 6.10 a 6.20 se observa el comportamiento de estos cuatro puntos del tramo cuando el desplazamiento máximo ocurre en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y en la columna C6 para las pruebas dinámicas 1 a 6, 7a, 8f, 9a, 11f y 12f, las figuras para las demás PD se muestran en el apéndice B.

Para la trabe y las columnas sus desplazamientos son similares sin importar la posición del tren para los siguientes casos: tren en vía 1 a baja velocidad, tren en vía 2 a baja y alta velocidad, un tren en cada vía a alta velocidad. Solo existen diferencias en pruebas con un tren en cada vía a baja velocidad y en pruebas con un tren en vía 1 a alta velocidad. Lo anterior indica que la peculiaridad de la curva provoca que la velocidad alta y la velocidad baja, en diferentes casos, ocasione que la respuesta de la vía elevada presente mayores diferencias de una posición del tren a otra.

Tabla 6.2. Instantes máximos de los desplazamientos en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y en la columna C6.

PD	Dirección del tren	Secuencia de instantes, en s			
		C5	1/4 claro	CC	C6
1	C5-C6	25.89	27.85	28.05	30.43
2	C5-C6	19.6	21.04	21.42	25.16
3	C5-C6	24.84	25.97	25.99	30.49
4	C5-C6	23.17	23.76	23.96	24.94
5	C6-C5	C6 16.62	C5 21.29	CC 25.57	1/4 claro 26.03
6	C5-C6	C5 21.99	1/4 claro 22.07	CC 22.44	C6 23.21
7f	C5-C6	C5 34.97	C6 38.09	CC 40.97	1/4 claro 42.86
7a	C6-C5	CC 220.02	1/4 claro 220.27	C6 221.4	C5 239.98
8f	C5-C6	C5 21.97	1/4 claro 23.4	CC 23.62	C6 23.79
8a	C6-C5	C6 248.3	C5 254.65	CC 265.2	1/4 claro 265.64
9f	C5-C6	C6 34.65	C5 34.71	1/4 claro 37.89	CC 37.92
9a	C6-C5	CC 180.24	1/4 claro 182.55	C5 184.16	C6 193.24
10f	C5-C6	C5 14.65	1/4 claro 15.43	C6 17.08	CC 17.14
10a	C6-C5	C6 100.83	C5 105.59	CC 116.51	1/4 claro 116.96
11f	C5-C6	CC 24.8	1/4 claro 24.81	C5 24.84	C6 28.29
11a	C6-C5	C6 78.45	CC 82.97	1/4 claro 84.34	C5 88.38
12f	C5-C6	C5 16.14	1/4 claro 17.52	CC 17.65	C6 19.06
12a	C6-C5	C6 122.5	C5 128.87	CC 129	1/4 claro 129.02

C5: columna C5, 1/4 claro: a un cuarto del claro, CC: centro del claro, C6: columna C6

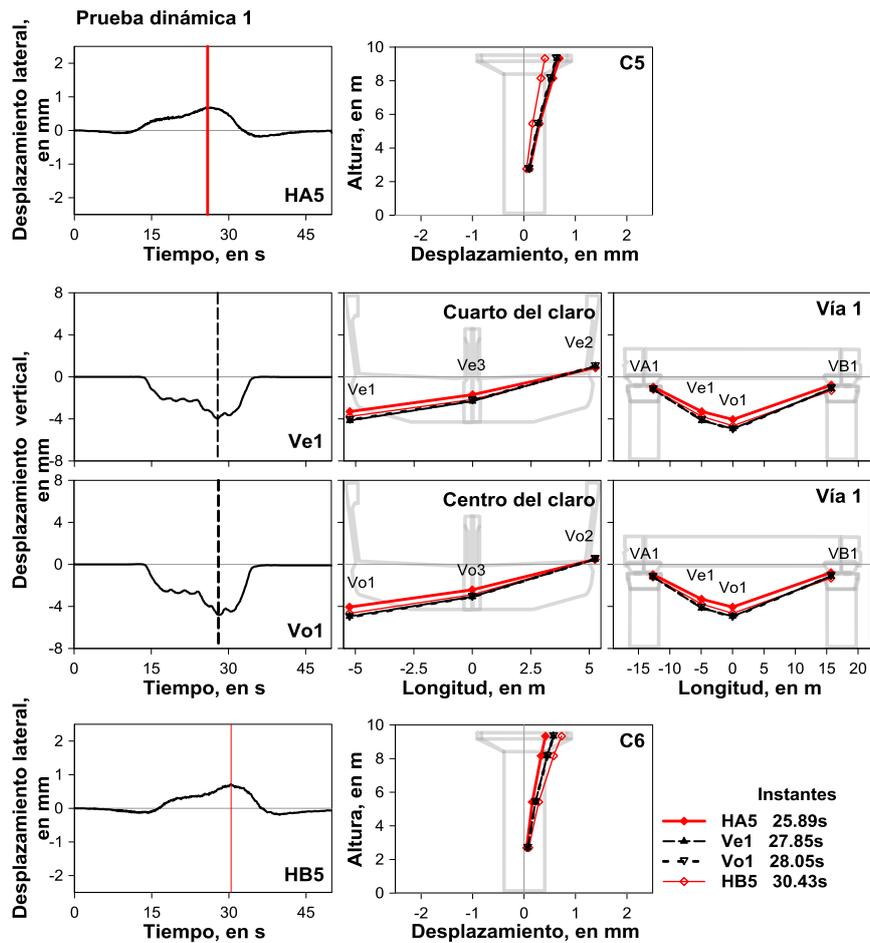


Figura 6.10. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD1.

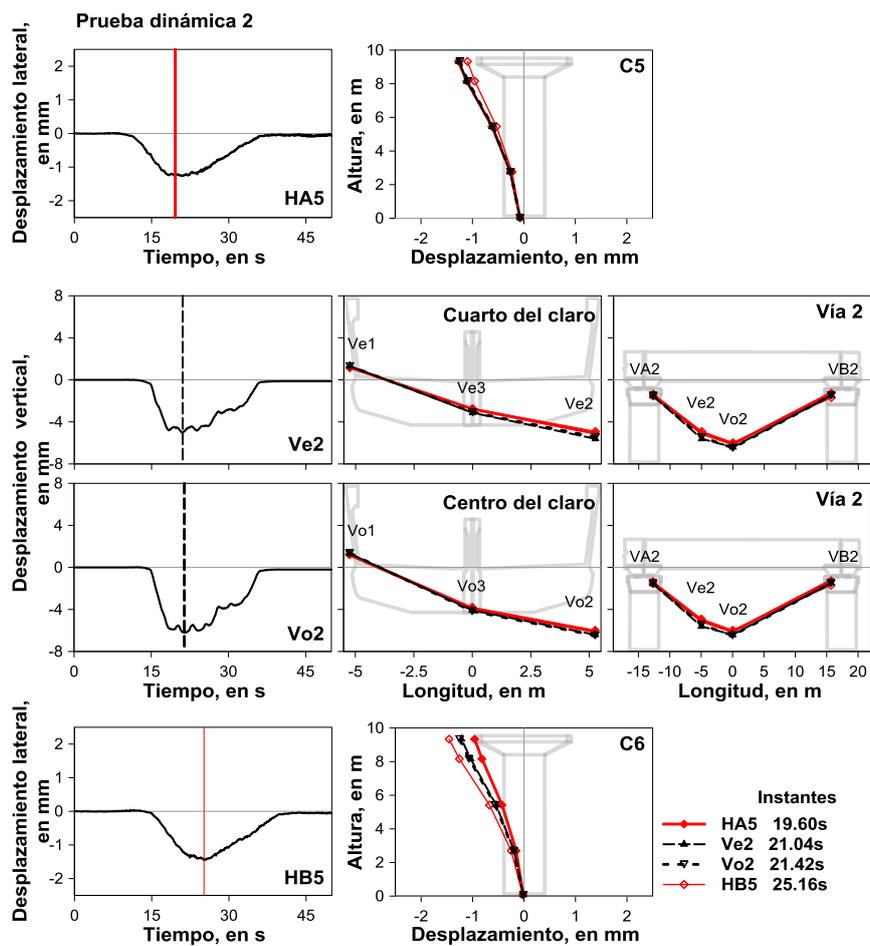


Figura 6.11. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD2.

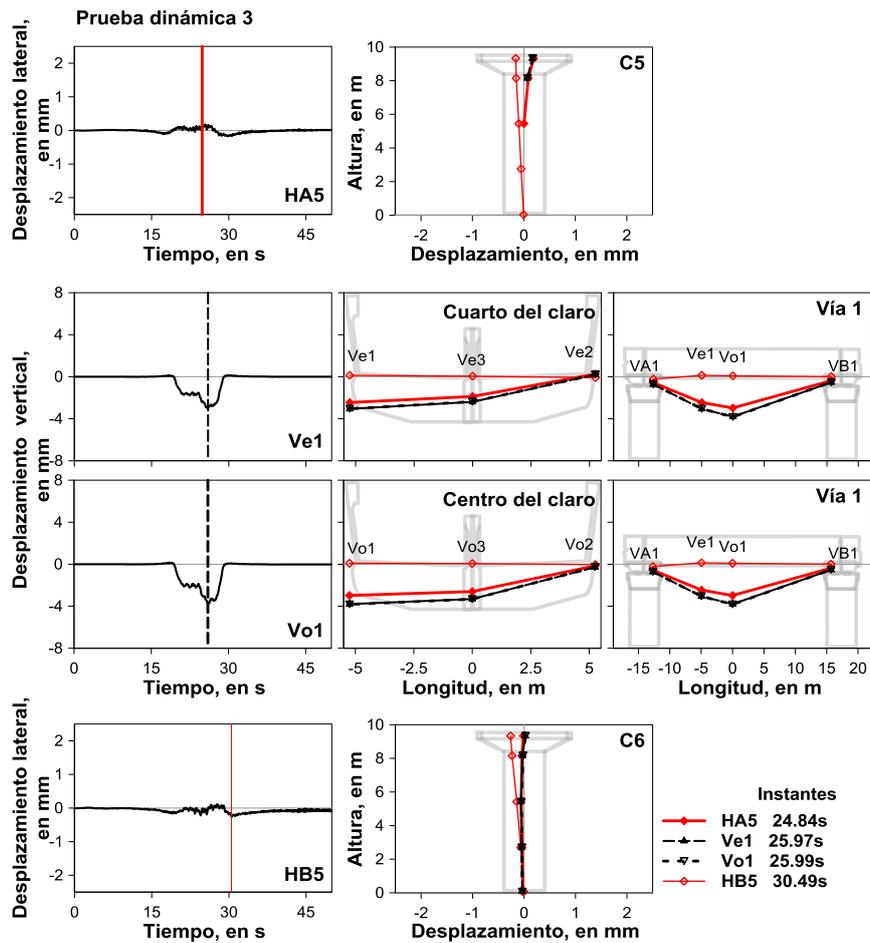


Figura 6.12. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD3.

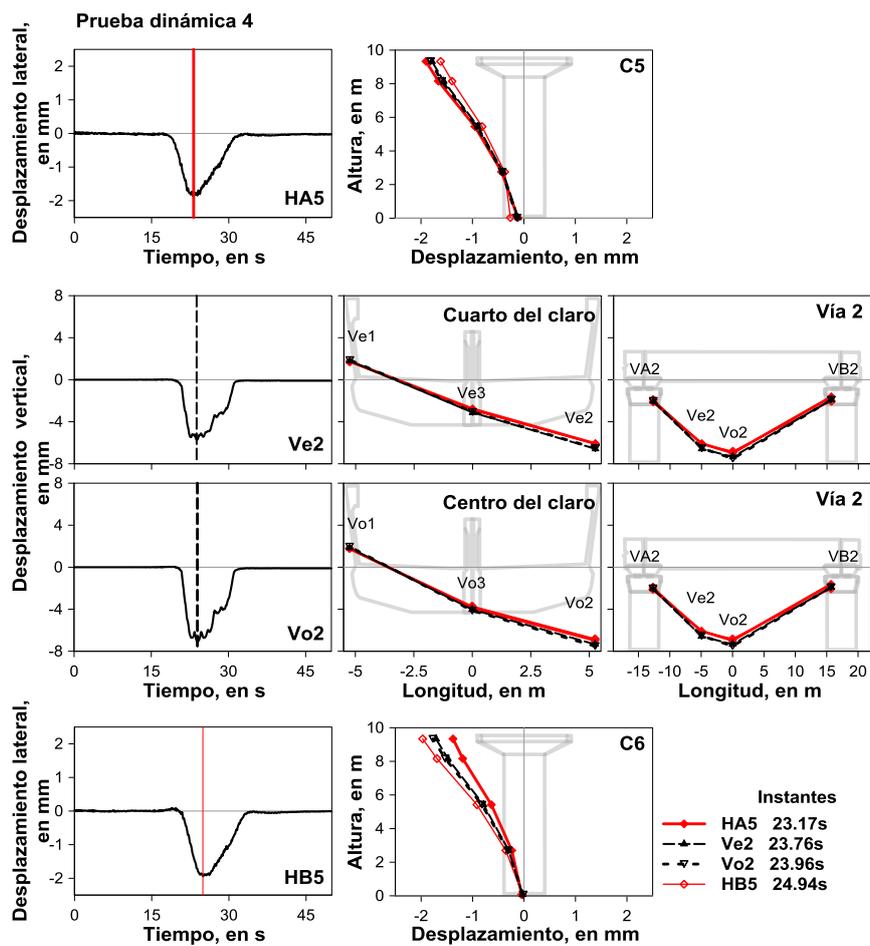


Figura 6.13. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD4.

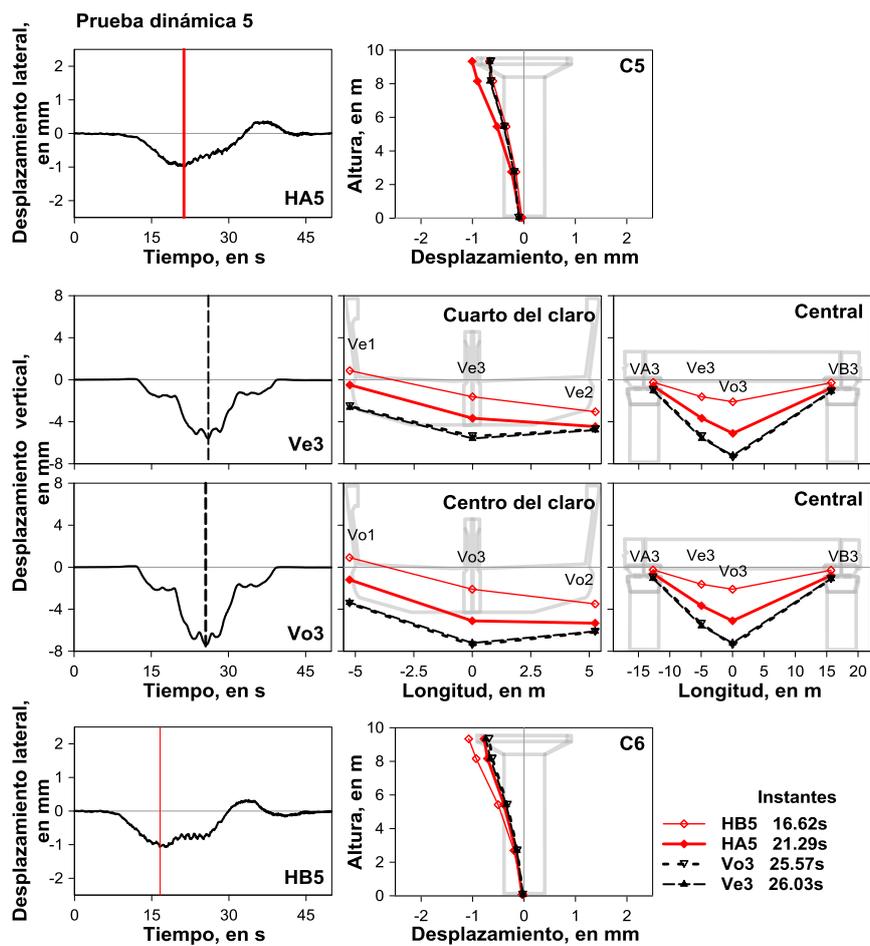


Figura 6.14. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD5.

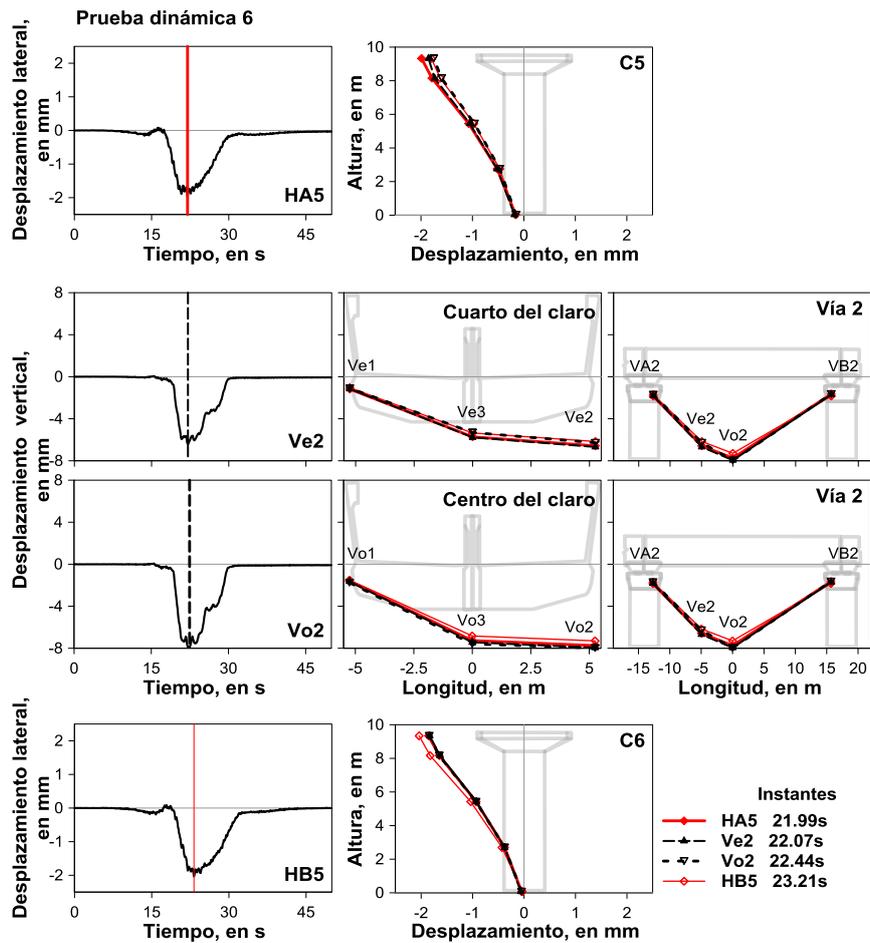


Figura 6.15. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD6.

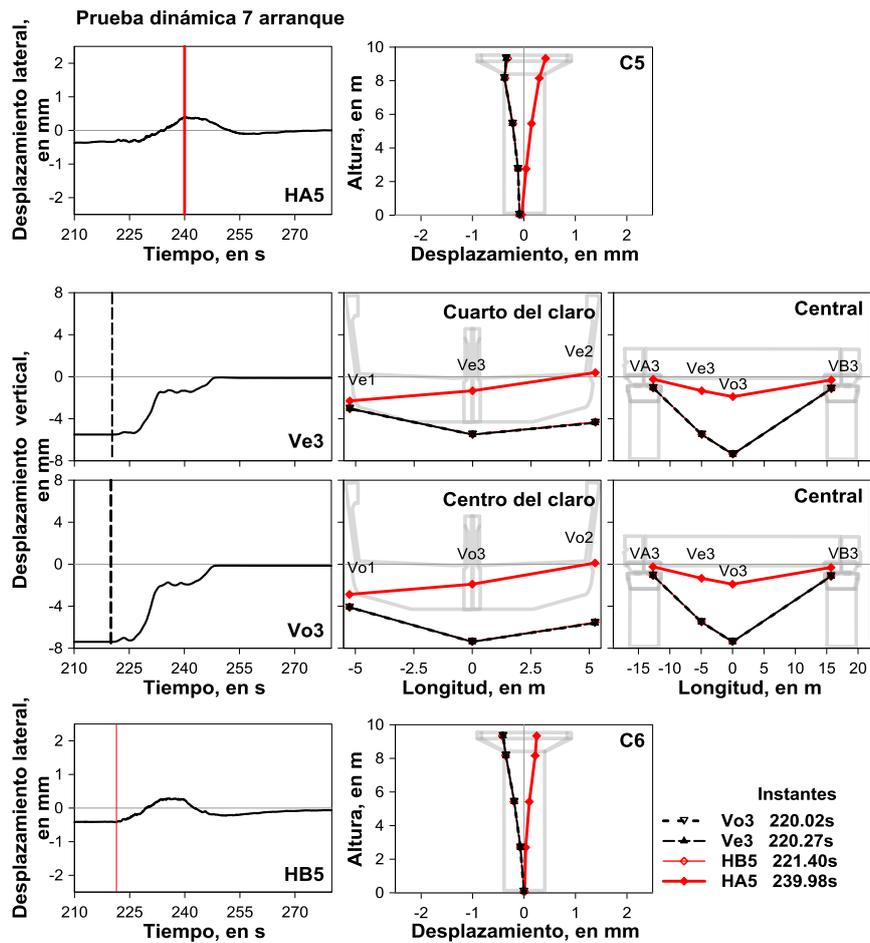


Figura 6.16. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD7a.

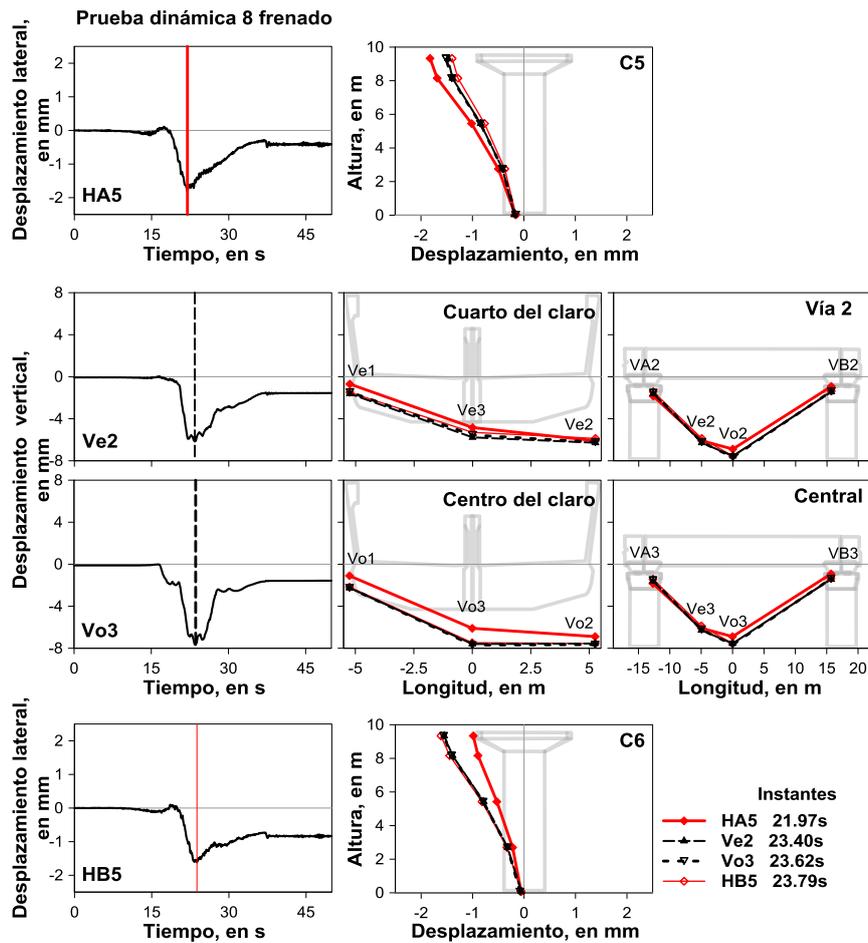


Figura 6.17. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD8f.

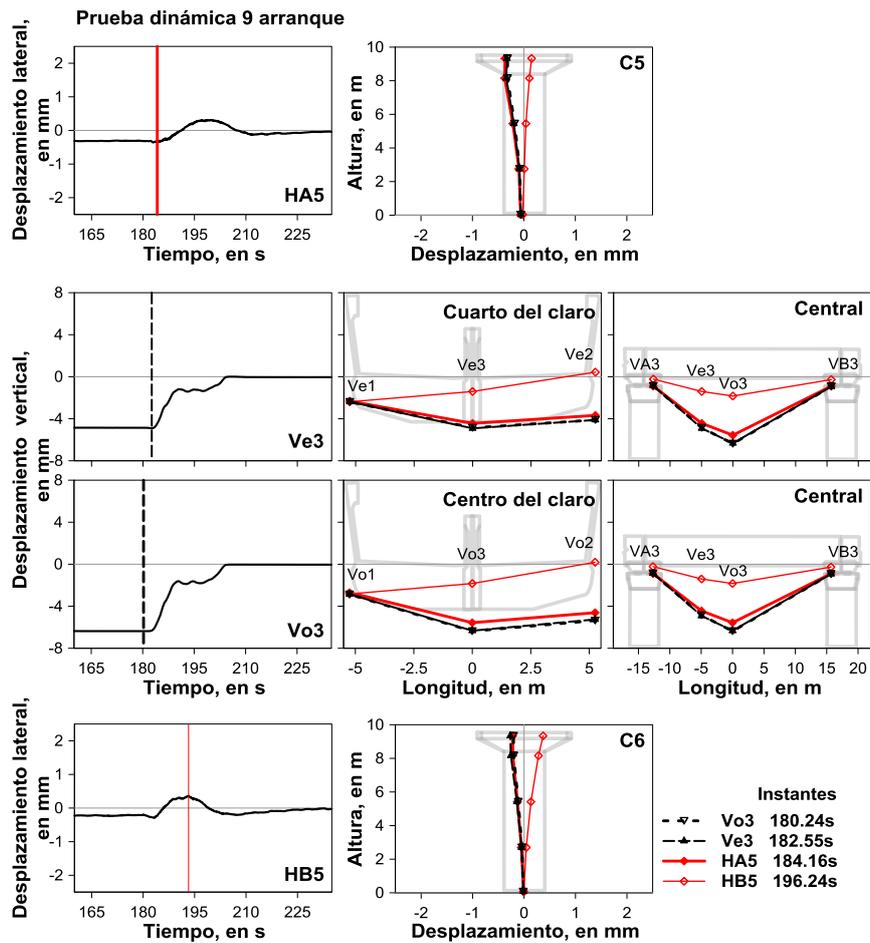


Figura 6.18. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD9a.

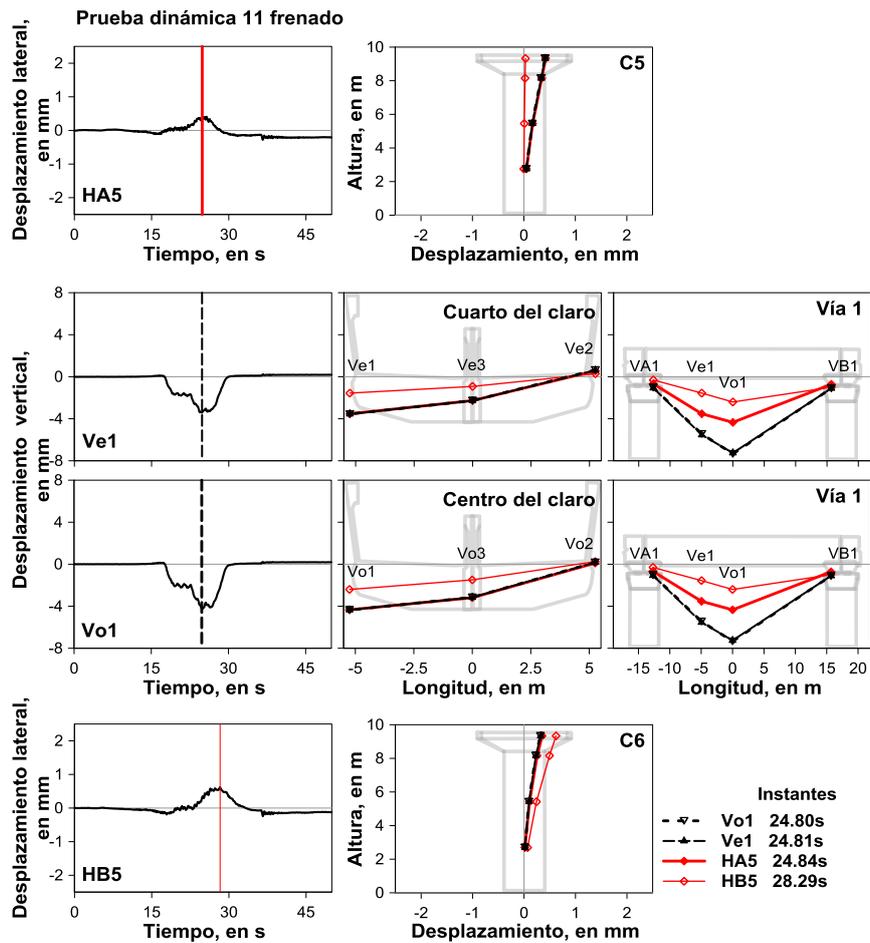


Figura 6.19. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD11f.

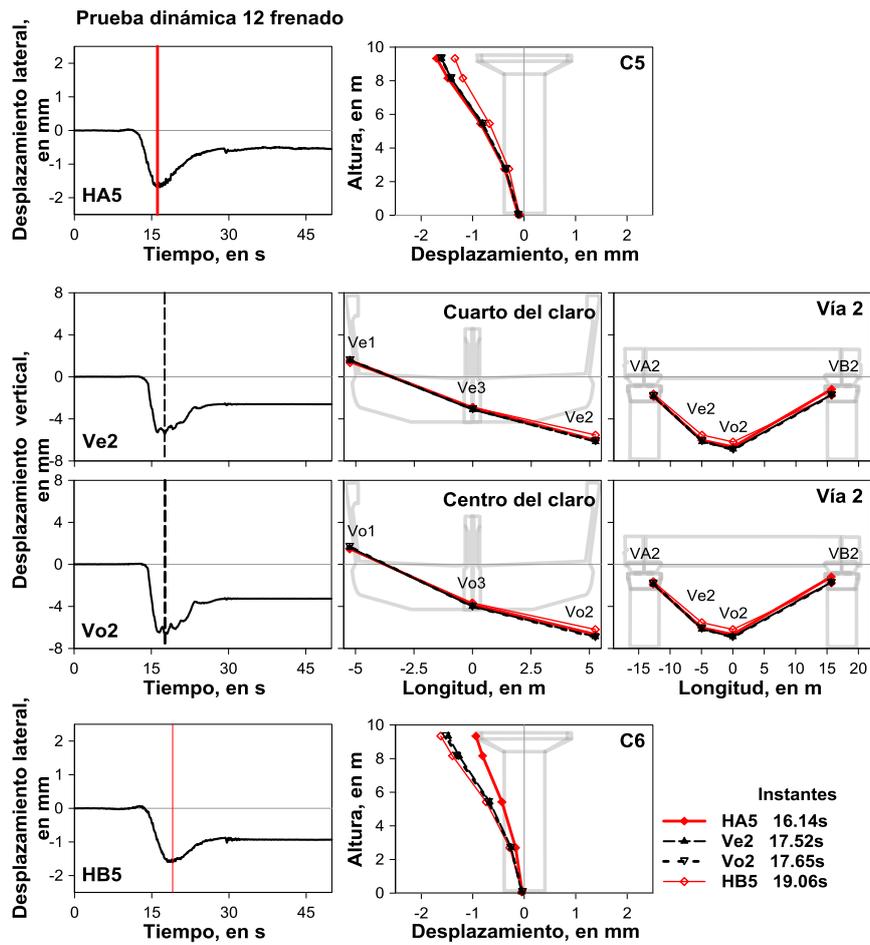


Figura 6.20. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD12f.

7. Conclusiones

Los valores máximos de las deflexiones longitudinales se presentaron en pruebas con un tren en cada vía, para el caso de las pruebas estáticas en la PE10 y en las dinámicas la PD6 a 58 km/h (velocidad alta), con valor en el centro del claro de 6.6 y 6.5 mm, respectivamente, las cuales no rebasaron el 18% del valor de la deflexión permisible longitudinal (37.5 mm). En el caso de las deflexiones transversales estas no superaron el 20 y 22% de la deflexión permisible transversal en las PE y PD, respectivamente. Estos valores máximos de deflexión transversal se observaron en la vía 1 en la PE2 (un tren en vía 2) y en la PD4 paso de un tren en vía 2 a 57 km/h (alta velocidad). Los valores de deflexión respecto de las permisibles indican que para cargas de servicio la deflexión cumple con lo establecido en las normas.

En el caso de las deformaciones unitarias medidas en el centro del claro de la trabe, las pruebas estática y dinámica que ocasionaron respuesta máxima en la nervadura central fueron la PE10 (prueba con un tren en cada vía) con valores en compresión y tensión de -113 y 69 $\mu\epsilon$, respectivamente; y PD7 en el arranque (prueba con el paso de un tren en cada vía a 18 km/h) con valores en compresión de -107 $\mu\epsilon$ y de tensión de 62 $\mu\epsilon$. Para el caso de las pruebas estáticas los valores de esfuerzo en tensión y compresión respecto de las resistencias nominales (NTC-DCEC, 2004) fueron de 45 y 6%. Para las pruebas dinámicas estos porcentajes fueron de 40 y 6%, respectivamente. Es necesario señalar que los valores de deformación son incrementos debidos las cargas de los trenes.

Los desplazamientos laterales máximos de las columnas en las pruebas estáticas se presentaron en la PE2 (prueba con un tren en vía 2) con desplazamientos de -1.27 y -1.29 mm para la columna C5 y C6, respectivamente, con movimiento hacia extradós. En pruebas dinámicas los desplazamientos laterales máximos ocurrieron en la prueba con el paso de un tren en cada vía a 58 km/h, es decir, en la PD6 con un desplazamiento en la columna C5 de -1.99 mm y en la columna C6 de -2.04 mm con movimiento hacia extradós. Estos desplazamientos no superaron el 1.8% de la distorsión angular de 0.012 que se estableció como permisible.

Los giros máximos en el extremo inferior de las columnas para las pruebas estáticas se presentaron en las pruebas PE2 (prueba con un tren en vía 2) y PE12 (prueba con dos trenes en vía 2). En el caso de las pruebas dinámicas estos ocurrieron en la PD6.

El factor de amplificación dinámico (FAD) para el caso del criterio 2 (*prueba dinámica entre prueba dinámica filtrada*) donde se refleja el aumento de la respuesta por el efecto dinámico. Los valores máximos de FAD obtenidos con los desplazamientos verticales en el centro del claro fue 1.3, en pruebas con el paso de un tren en la vía 1 a 61 km/h y el frenado a 50 km/h, es decir, PD3 y PD11f, respectivamente. Este valor refleja que el incremento por impacto es menor al 30% empleado en las normas de diseño, con excepción de la amplificación de 1.4 registrada a un cuarto del claro (PD11f). Sin embargo, se debe considerar que las cargas empleadas en el diseño fueron las que ocasionaban la respuesta más desfavorable de la vía elevada, es decir, mayores a las de las pruebas experimentales. El FAD máximo para el criterio 2 con los desplazamientos laterales de las columnas se observó en la PD3 (1.2).

En el caso de los FAD obtenidos con el criterio 1 (*prueba dinámica entre prueba estática*), para los desplazamientos en las columnas el FAD máximo se presentó en PD6 con valores de 2.5 y 5.4 en la columna C5 y C6, respectivamente. En el FAD del criterio 1 se observa que además del efecto dinámico, se tiene la presencia de la fuerza centrífuga. Esta fue más notoria en los desplazamientos en el capitel de las columnas, en pruebas a velocidad considerada como alta, disminuyendo 4.2 veces, para pruebas dinámicas con un tren en vía intradós, o incrementando 1.5 veces en pruebas dinámicas con un tren en vía extradós, esto atribuido a la dirección de la fuerza, es decir, hacia extradós. Para pruebas dinámicas con un tren en cada vía a velocidad considerada como alta, los desplazamientos en el capitel aumentaron hasta 5.4 veces. La disminución o aumento fue con respecto a los valores de desplazamientos máximos de las pruebas estáticas para cada caso.

La información obtenida durante las pruebas de campo indica que la estructura recobró completamente su estado original. Se observó que el eje longitudinal curvo del tramo en estudio y la velocidad del tren provocan diferentes respuestas en la trabe y en las columnas cuando el tren circula en intradós o extradós. En el caso de las pruebas estáticas la respuesta fue mayor en pruebas con un tren en extradós (columnas) y en pruebas con un tren en cada vía (trabe), que en pruebas con un tren en intradós. En pruebas dinámicas, se observó que cuando el tren circuló en intradós a velocidad considerada como baja la respuesta es mayor que cuando el tren circula a velocidad considerada como alta. De manera contraria sucedió en extradós, al circular un tren en extradós a velocidad considerada como alta la respuesta es mayor que cuando circuló a velocidad baja. En pruebas donde circuló un tren en cada vía la respuesta es mayor a velocidad alta que a velocidad baja.

De acuerdo a los valores permisibles se considera que la estructura se encuentra del lado de la seguridad para cargas de servicio, como fue el caso con las amplificaciones de desplazamientos laterales en columnas de hasta cinco veces, estos desplazamientos menores de 2 mm se encuentran por debajo de los valores permisibles. Lo anterior indica que los criterios de diseño son conservadores para este tipo de estructuras.

Apéndice A. Historias de pruebas estáticas

En las historias de este apéndice se presentan los intervalos de medición de cada una de las PE, este se muestra por medio de una franja gris en las figuras. En las figuras A.1 a A.5 se observan las historias de desplazamientos verticales de la trabe, con valores negativos que indican su desplazamiento descendente. De las figuras A.6 a A.8 se presentan las historias de deformación unitaria medidas en el lecho superior e inferior del centro del claro de la trabe, donde los valores positivos representan tensión y los negativos compresión. Las historias de desplazamientos laterales en las columnas se ven en las figuras A.9 a A.13, el valor negativo de estos desplazamientos indica movimiento de la columna hacia extradós. En las figuras A.10 a A.13 también se presentan las historias de giros de los inclinómetros colocados en los andamios alrededor del eje longitudinal (T) y la temperatura que registraron. Las historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas obtenidas con los deformímetros y potenciómetros se aprecian en las figuras A.14 a A.18. Las historias de giros absolutos alrededor el eje transversal (L) y longitudinal (T) en el lecho superior de la zapata y en la base de las columnas se ven en las figuras A.19 a A.23.

A.1. Desplazamientos verticales

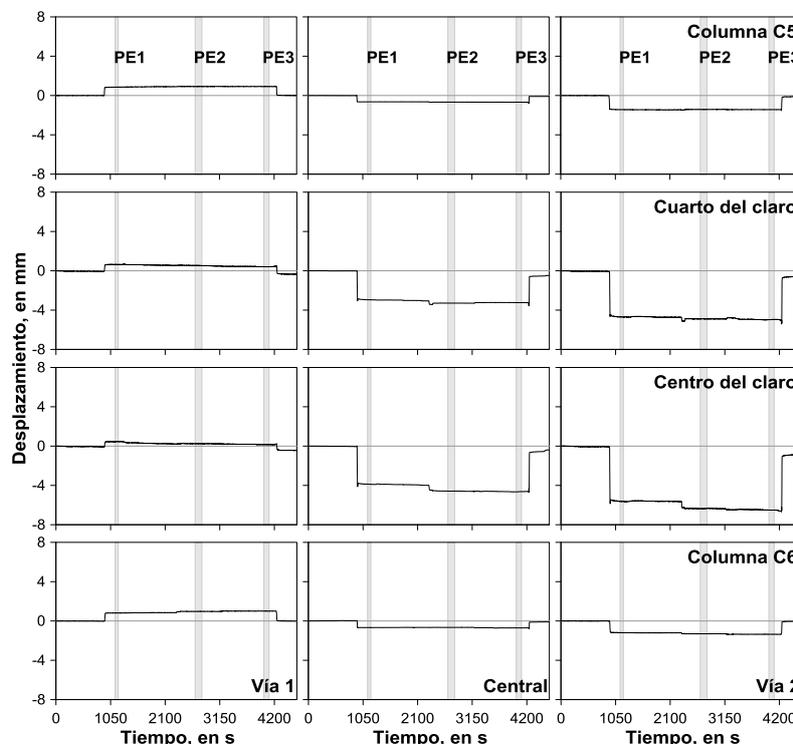


Figura A.1. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para las PE con un tren en la vía 2.

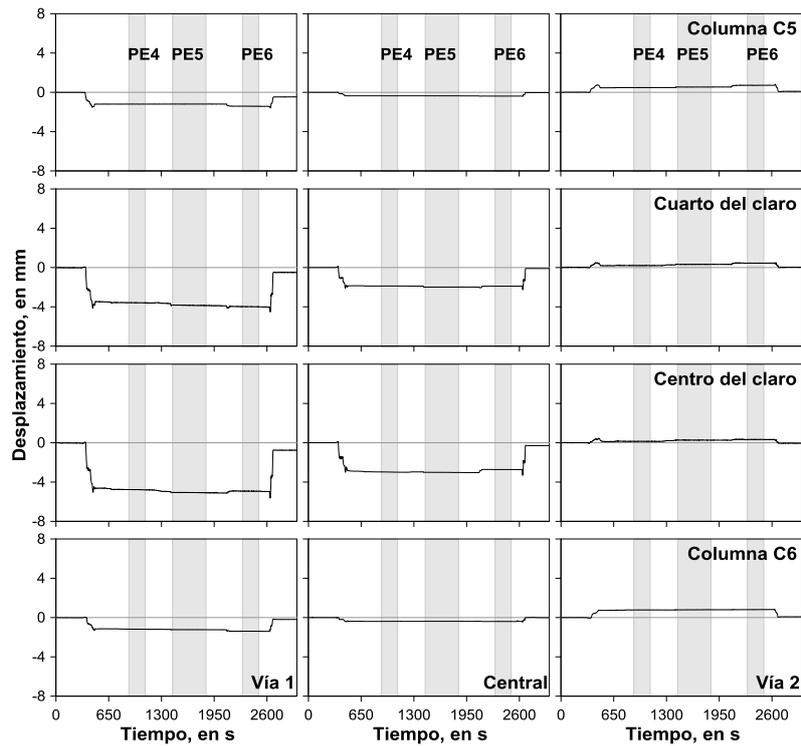


Figura A.2. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para las PE con un tren en la vía 1.

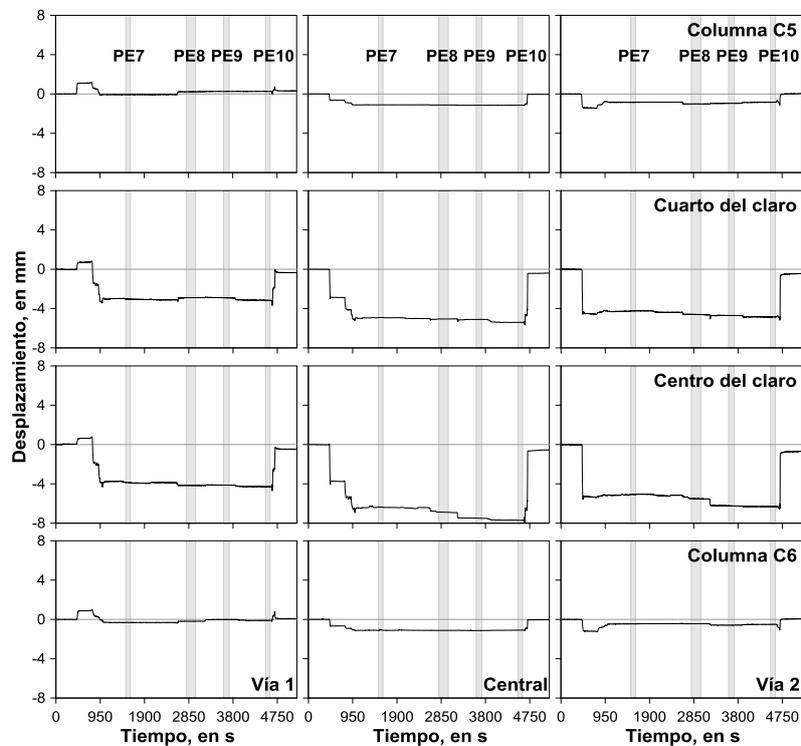


Figura A.3. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para las PE con un tren en la vía 1 y en la vía 2.

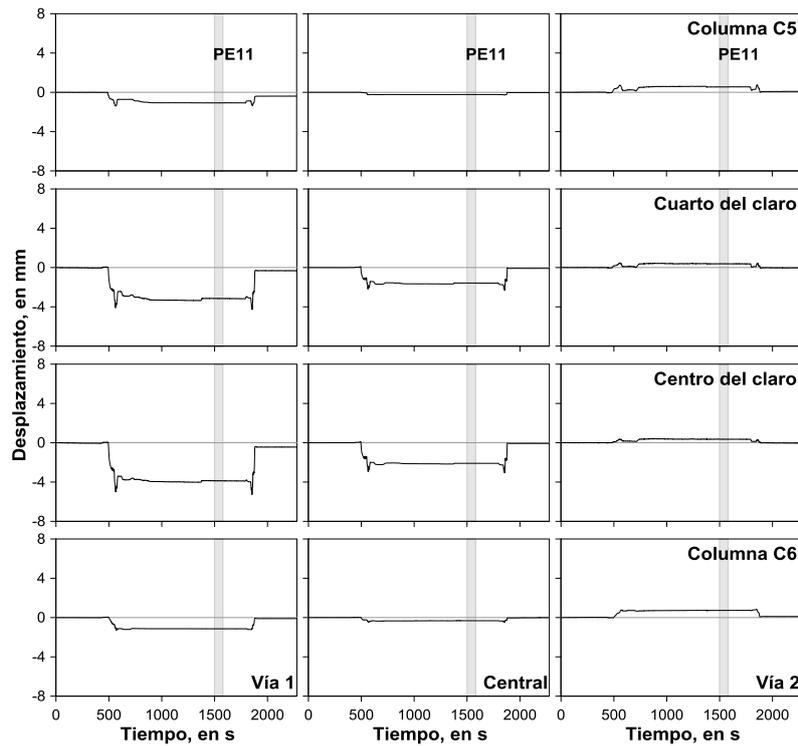


Figura A.4. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para las PE con dos trenes en la vía 1.

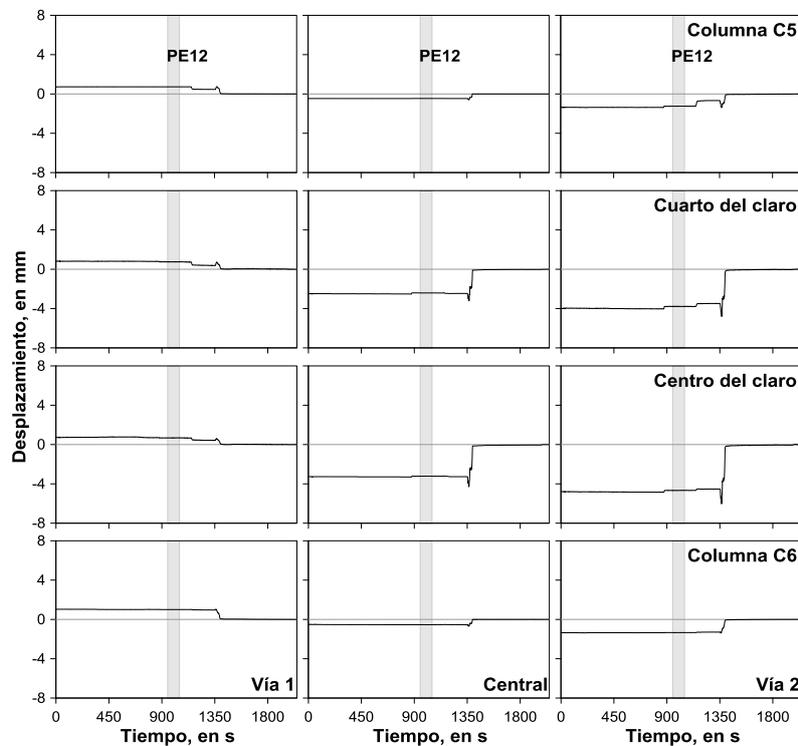


Figura A.5. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para las PE con dos trenes en la vía 2.

A.2. Deformaciones unitarias

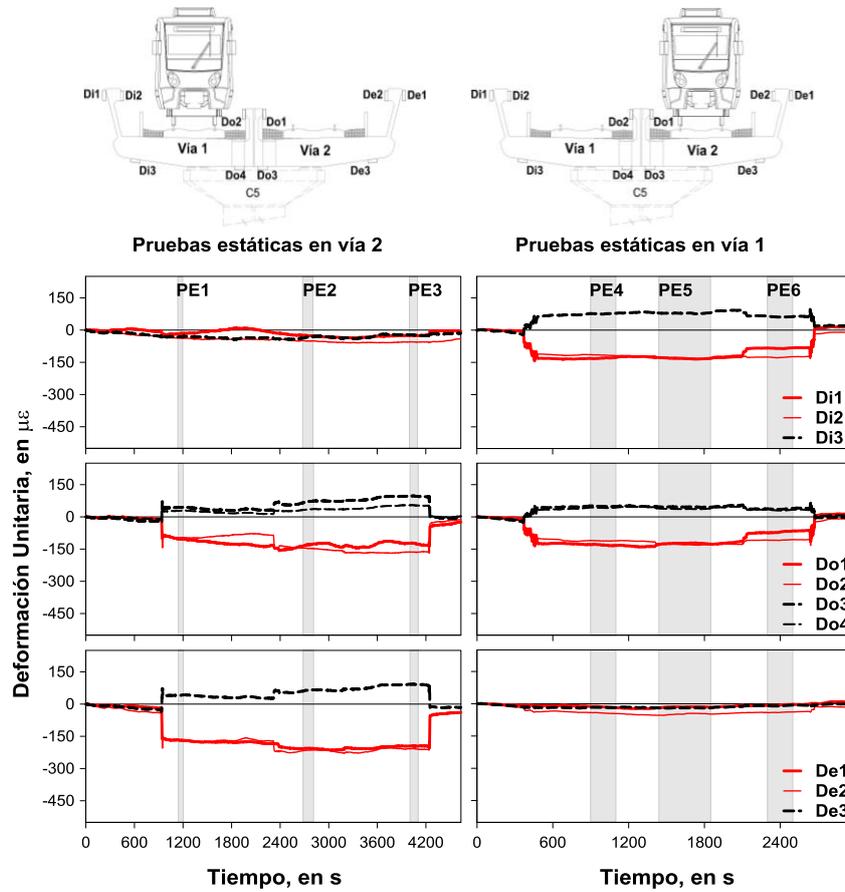


Figura A.6. Historias de deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PE con un tren en la vía 2 y las PE con un tren en la vía 1.

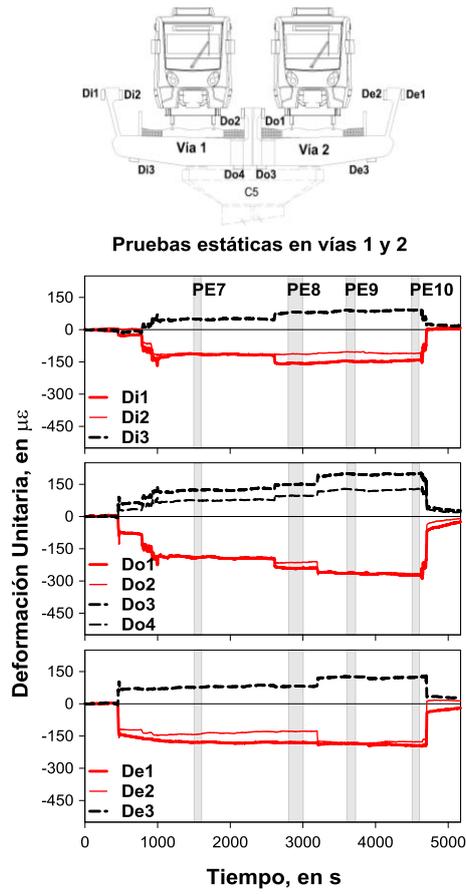


Figura A.7. Historias de deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PE con un tren en las vías 1 y 2.

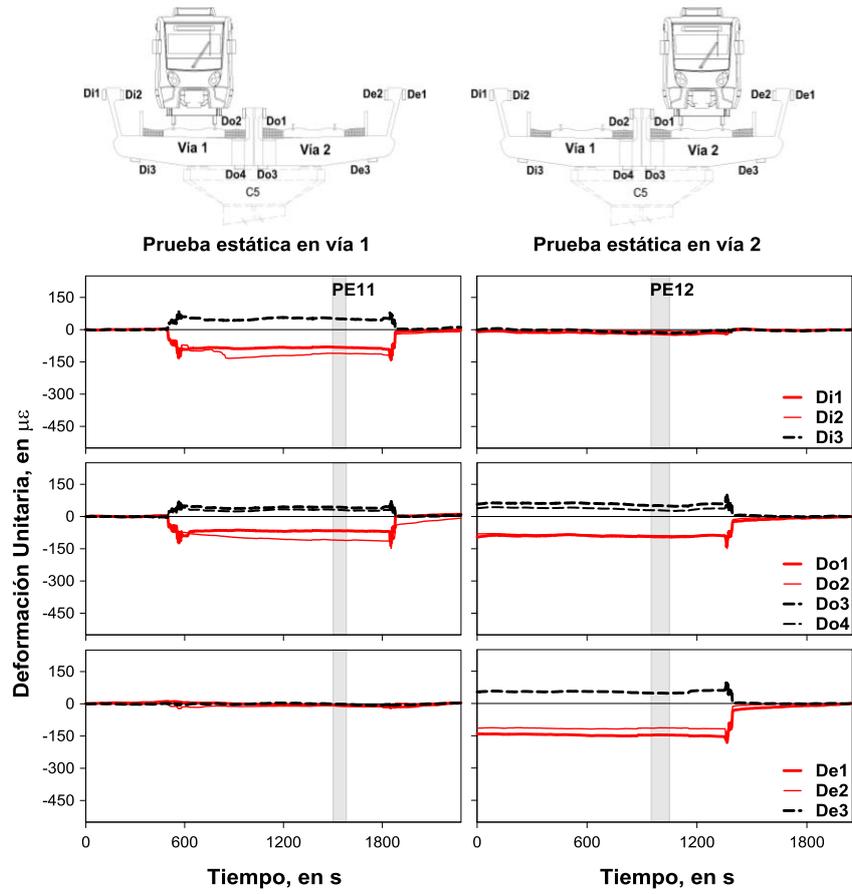


Figura A.8. Historias de deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PE con dos trenes en la vía 1 y en la vía 2.

A.3. Desplazamientos laterales

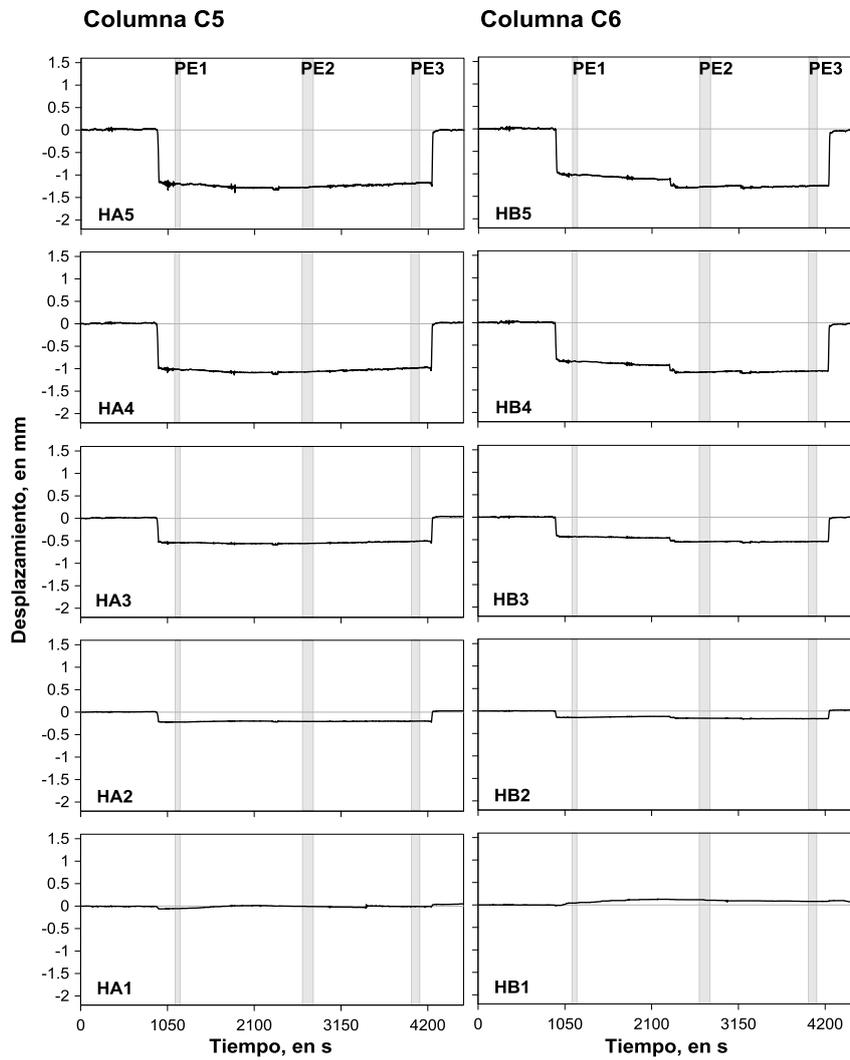


Figura A.9. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para las PE con un tren en la vía 2.

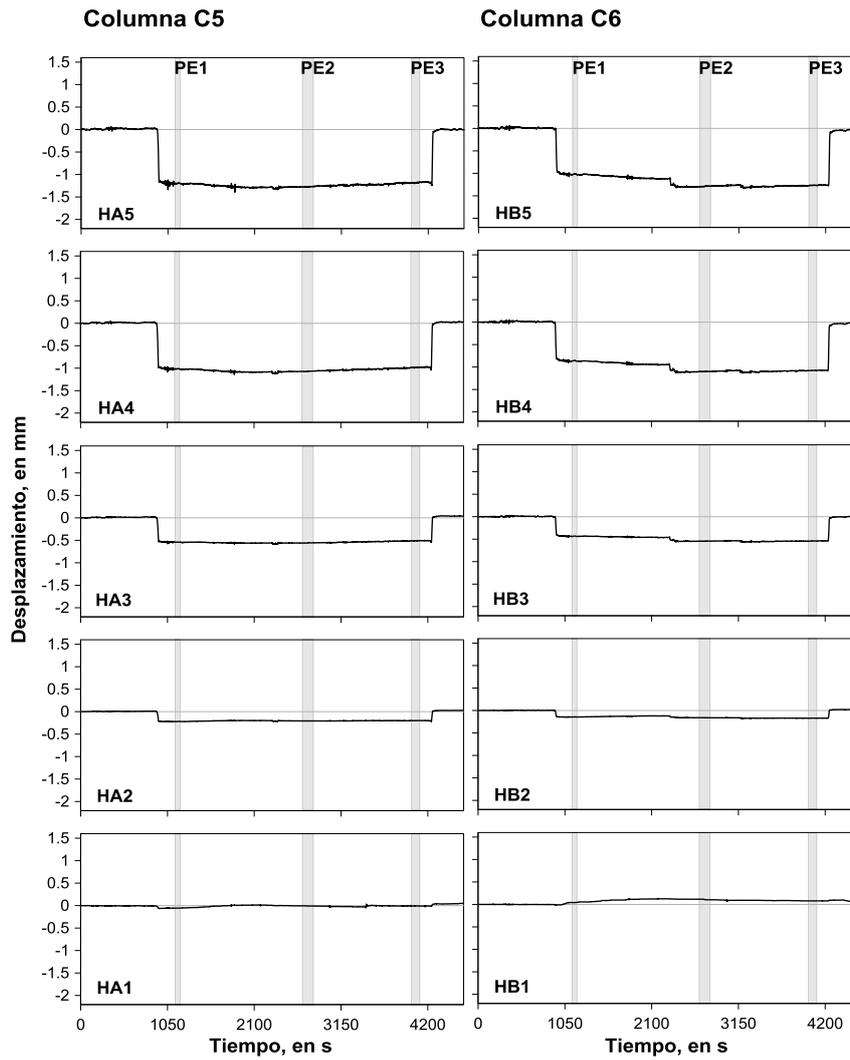


Figura A.10. Historias de desplazamiento lateral y giro absoluto en los andamios de las columnas C5 y C6 para las PE con un tren en la vía 1.

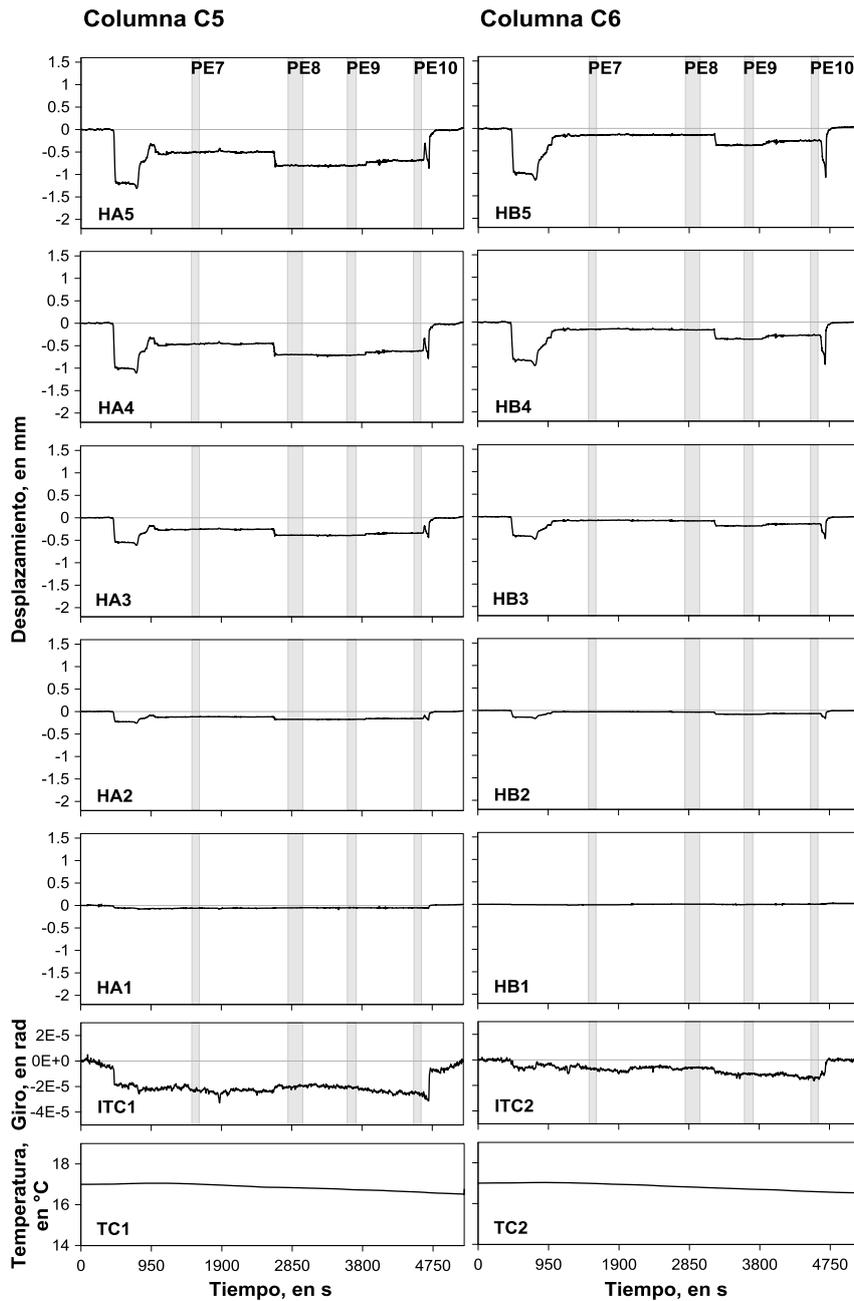


Figura A.11. Historias de desplazamiento lateral y giro absoluto en los andamios de las columnas C5 y C6 para las PE con un tren en la vía 1 y en la vía 2.

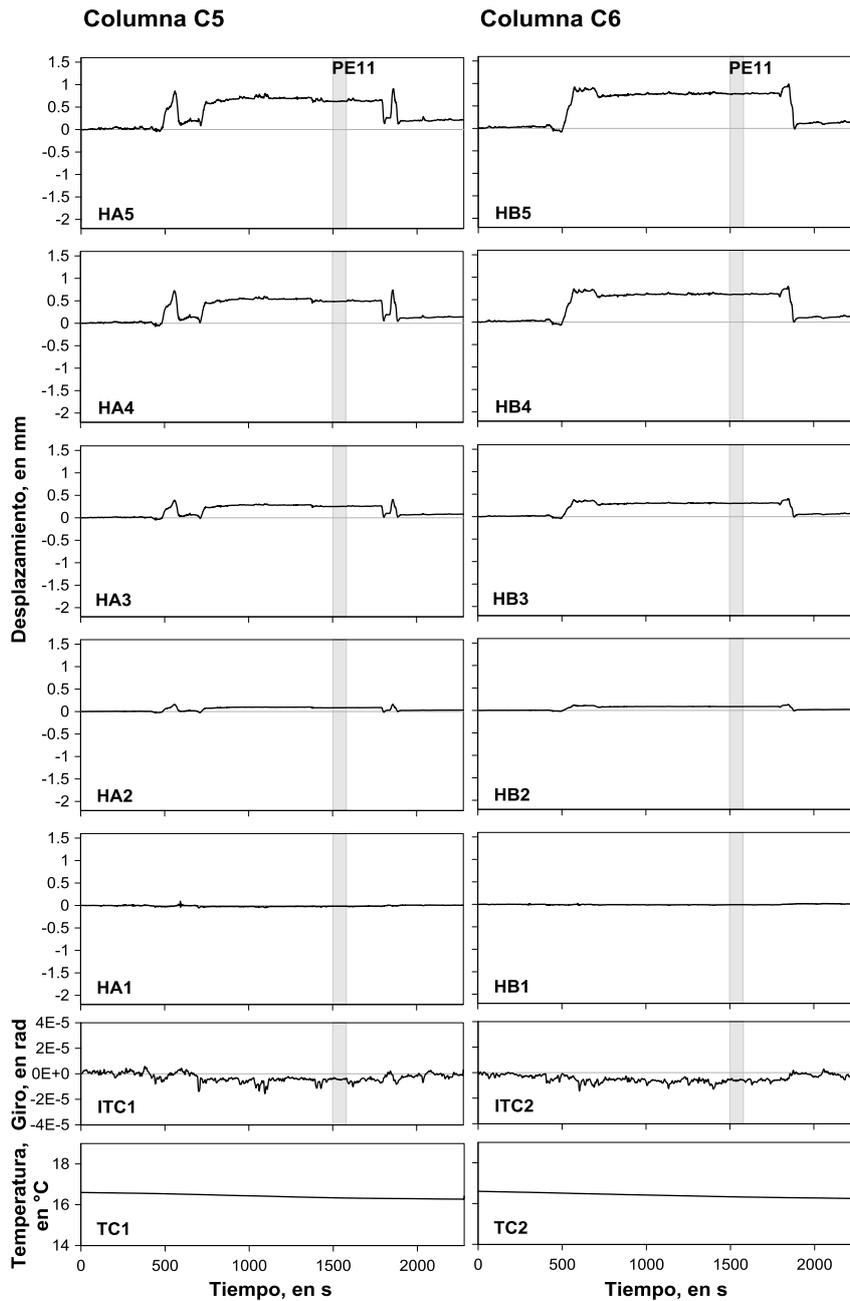


Figura A.12. Historias de desplazamiento lateral y giro absoluto en los andamios de las columnas C5 y C6 para las PE con dos trenes en la vía 1.

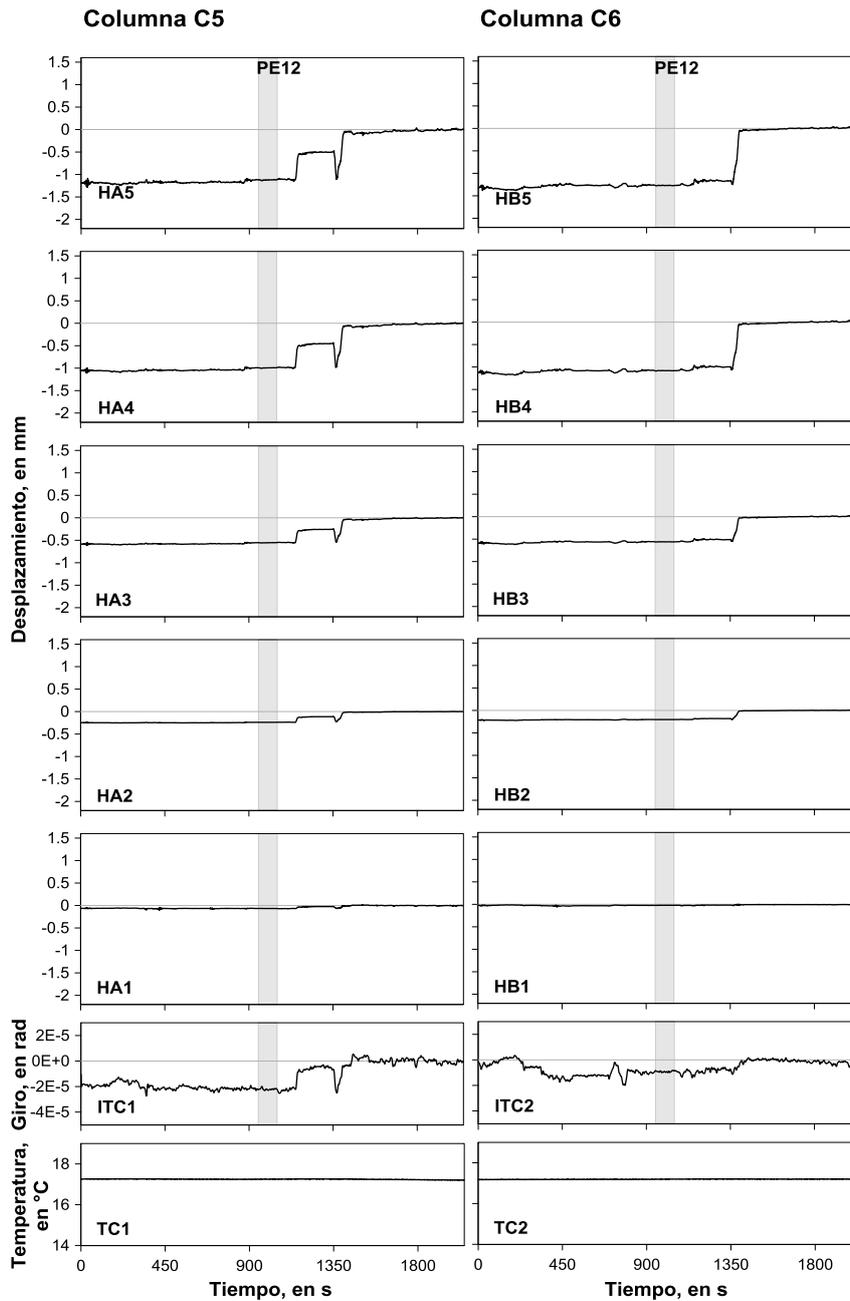


Figura A.13. Historias de desplazamiento lateral y giro absoluto en los andamios de las columnas C5 y C6 para las PE con dos trenes en la vía 2.

A.4. Giros relativos y absolutos

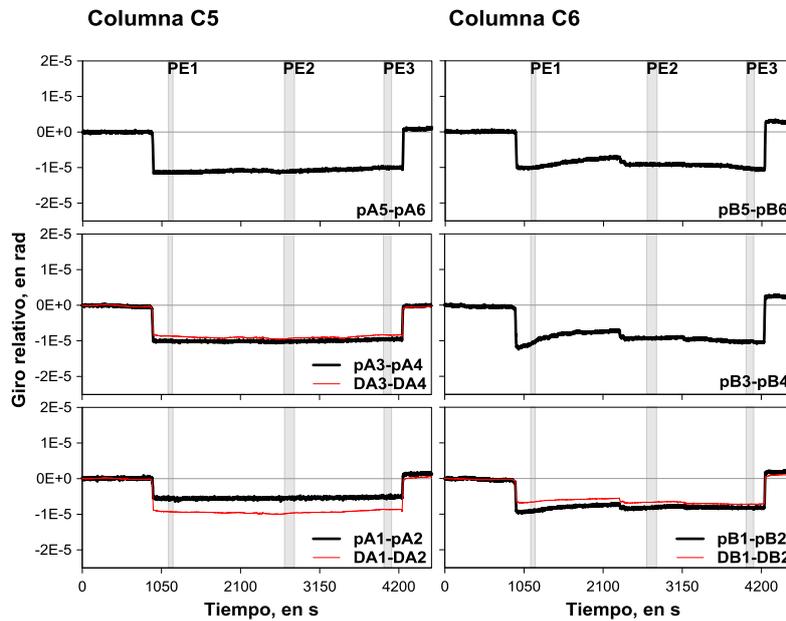


Figura A.14. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para las PE con un tren en la vía 2.

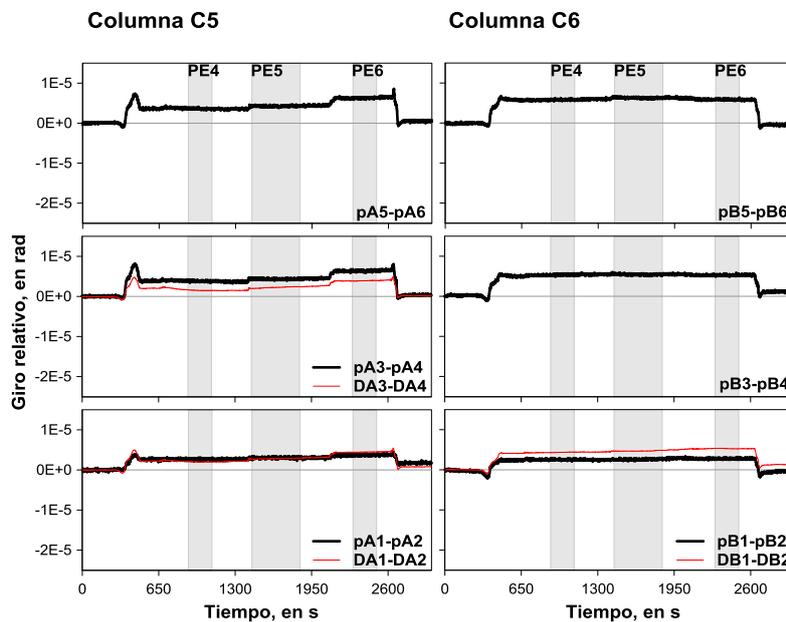


Figura A.15. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para las PE con un tren en la vía 1.

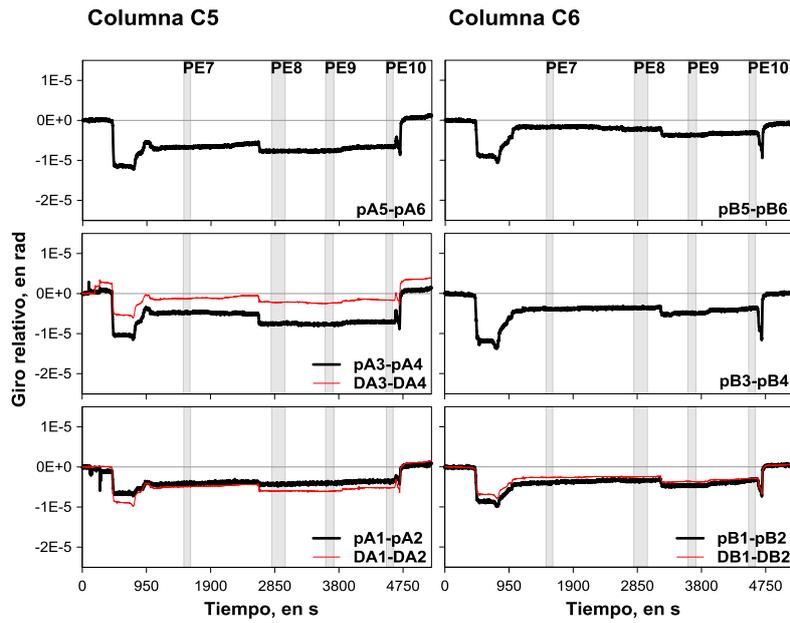


Figura A.16. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para las PE con un tren en la vía 1 y la vía 2.

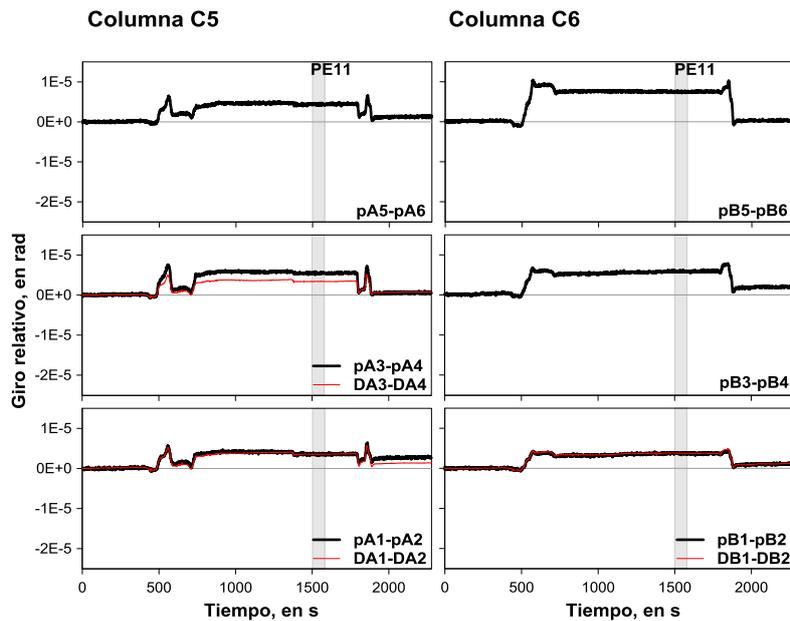


Figura A.17. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para las PE con dos trenes en la vía 1.

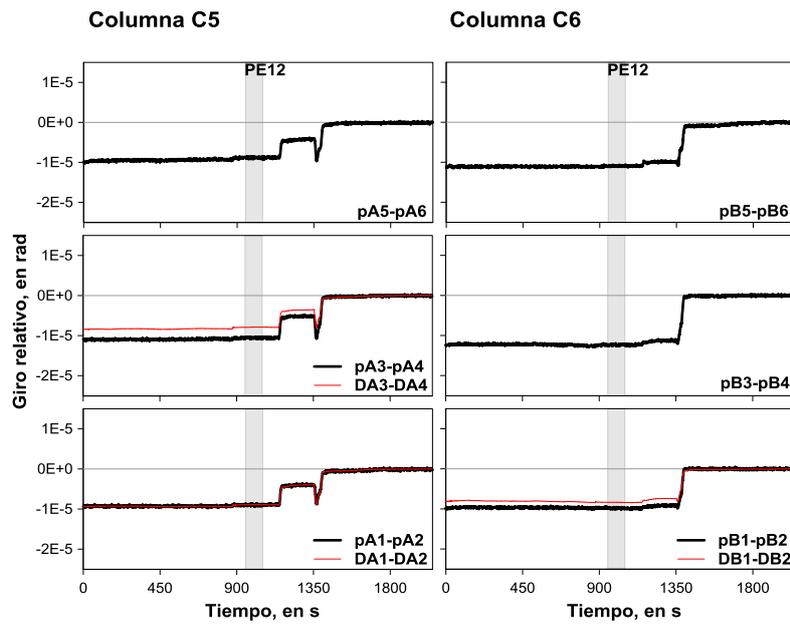


Figura A.18. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para las PE con dos trenes en la vía 2.

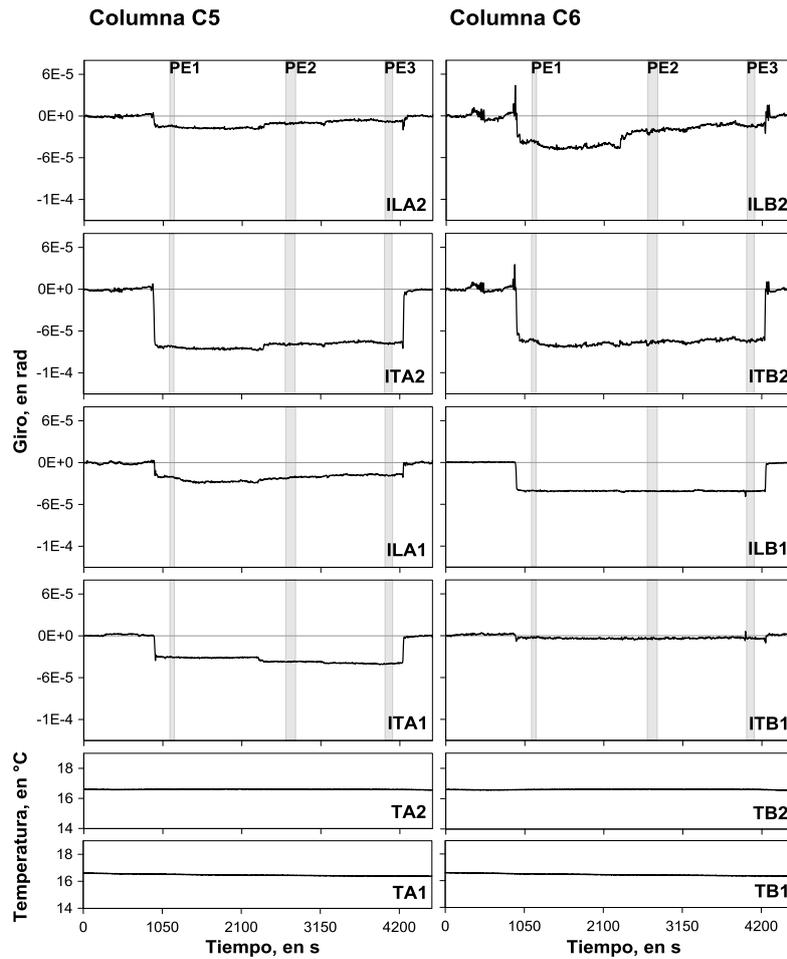


Figura A.19. Historias de giros absolutos del lecho superior de la zapata y la base de las columnas para las PE con un tren en la vía 2.

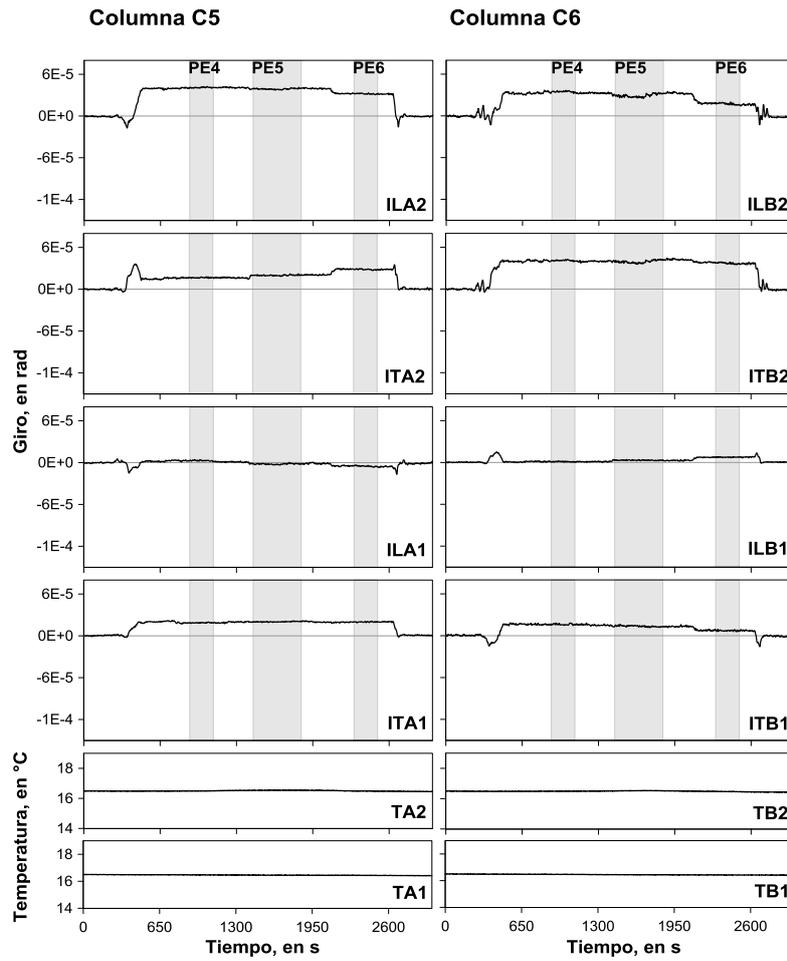


Figura A.20. Historias de giros absolutos del lecho superior de la zapata y la base de las columnas para las PE con un tren en la vía 1.

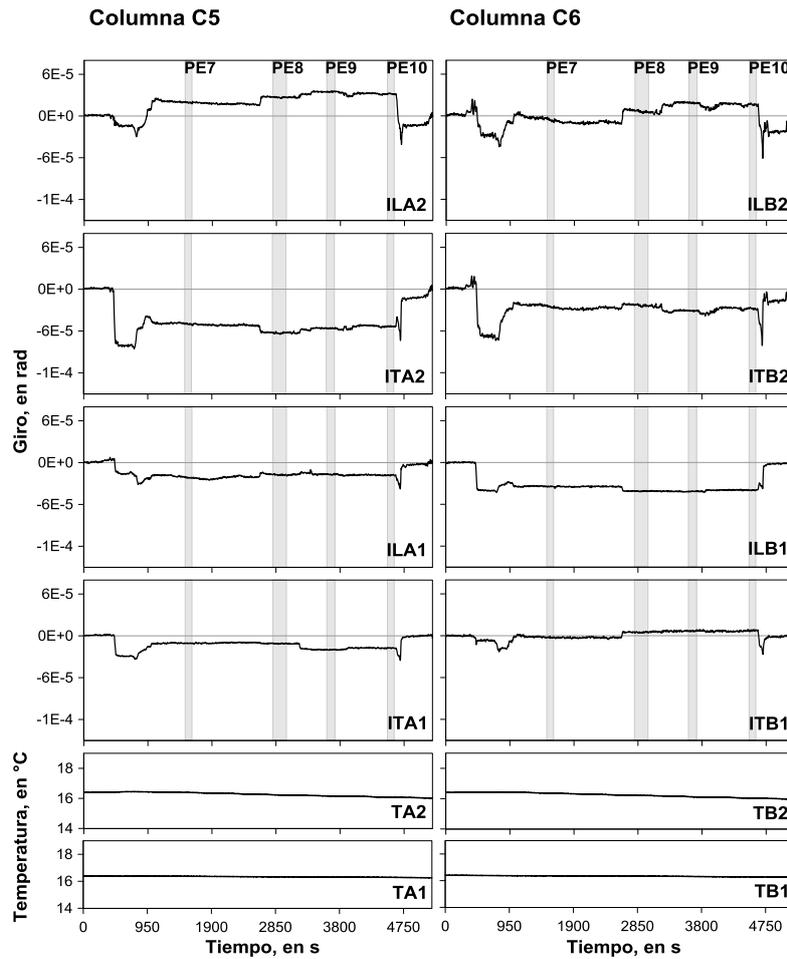


Figura A.21. Historias de giros absolutos del lecho superior de la zapata y la base de las columnas para las PE con un tren en la vía 1 y la vía 2.

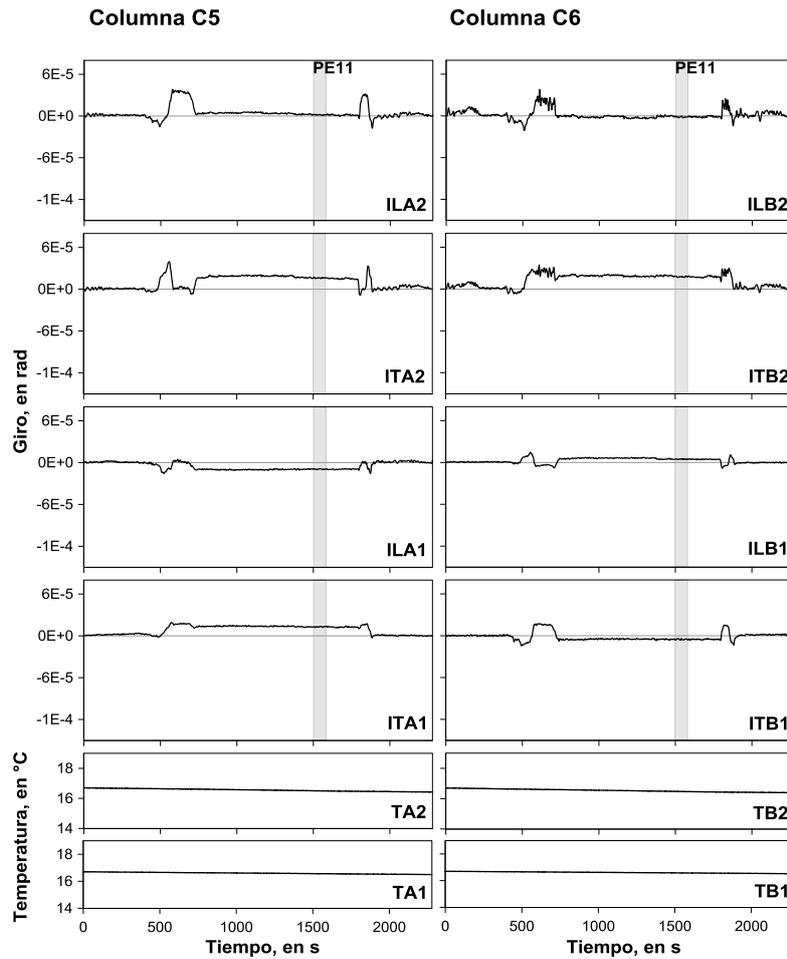


Figura A.22. Historias de giros absolutos del lecho superior de la zapata y la base de las columnas para las PE con dos trenes en la vía 1.

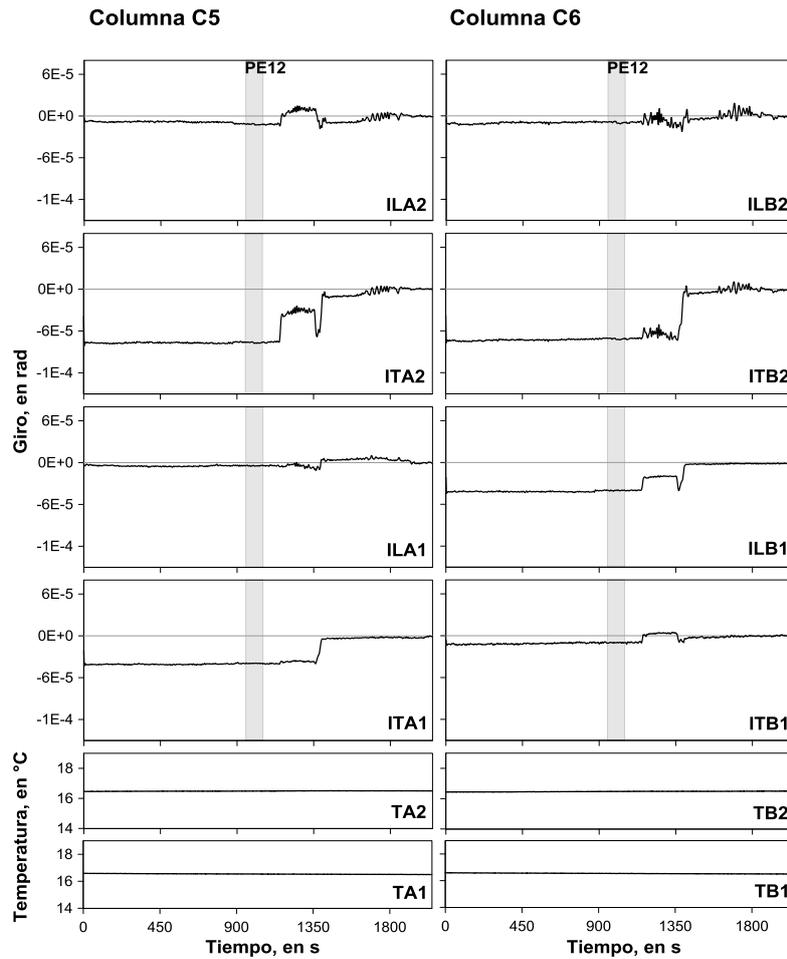


Figura A.23. Historias de giros absolutos del lecho superior de la zapata y la base de las columnas para las PE con dos trenes en la vía 2.

Apéndice B. Historias de pruebas dinámicas

Para las historias de las pruebas dinámicas se marcó con franja gris el intervalo donde ocurre la prueba. Para el caso de las pruebas dinámicas con frenado se identificaron dos intervalos en cada historia: el de la prueba en el frenado y el de la prueba en el arranque. Las historias de desplazamientos verticales de la trabe se observan en las figuras B.1 a B.12, donde el valor negativo indica desplazamiento descendente de la trabe. Las historias de deformación unitaria para las pruebas dinámicas presentan valor positivo como tensión y negativo como compresión y se observan en las figuras B.13 a B.18. En las figuras B.19 a B.30 se encuentran las historias de desplazamiento lateral de las columnas, donde el valor negativo del desplazamiento indica que la columna se movió hacia extradós. Las historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas obtenidos con los deformímetros y potenciómetros se muestran en las figuras B.31 a B.42. Para las pruebas dinámicas se obtuvieron los instantes donde la respuesta es máxima en los cuatro puntos de medición del tramo elevado columna C5, a un cuarto del claro, en el centro del claro y en la columna C6. En las figuras B.43 a B.49 se presentan los desplazamientos de la trabe y las columnas en estos instantes máximos para las pruebas dinámicas que no se presentaron en el cuerpo principal de este trabajo.

B.1. Desplazamientos verticales

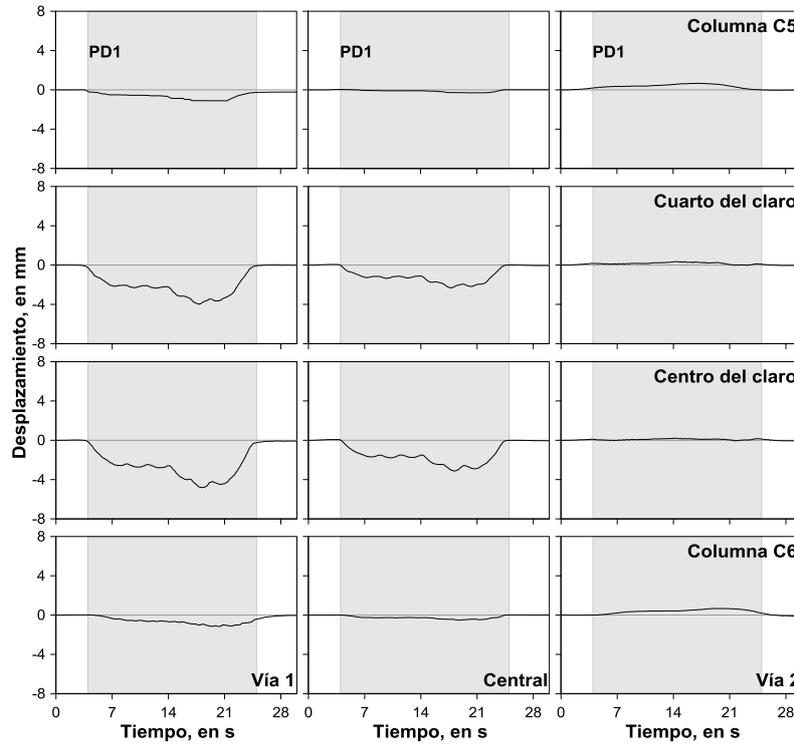


Figura B.1. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD1.

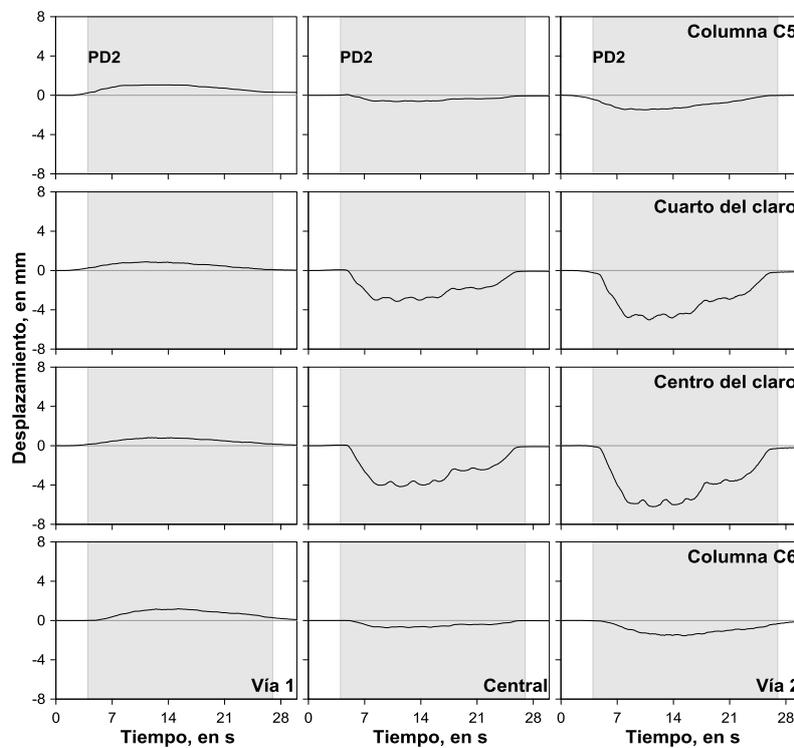


Figura B.2. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD2.

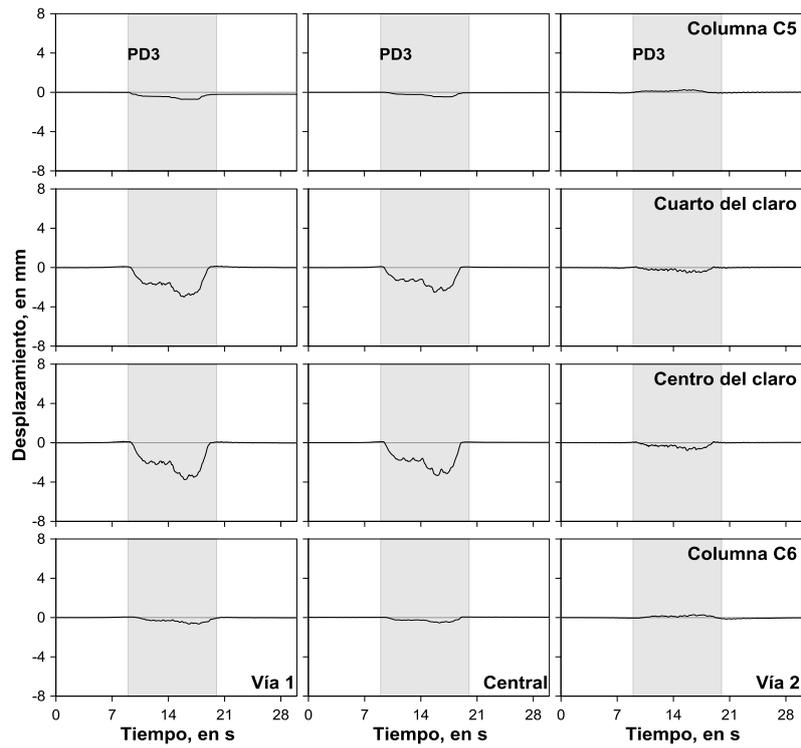


Figura B.3. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD3.

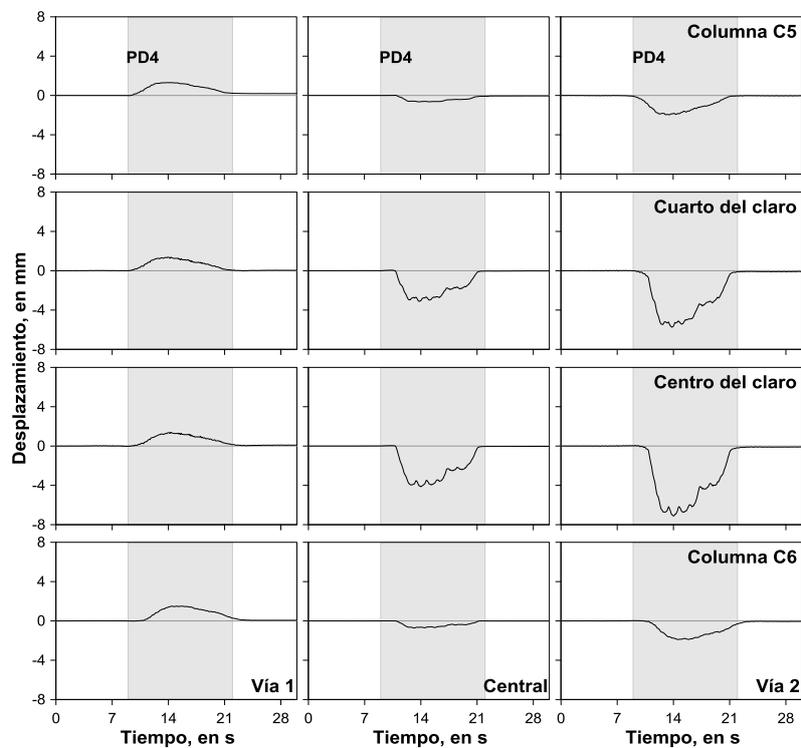


Figura B.4. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD4.

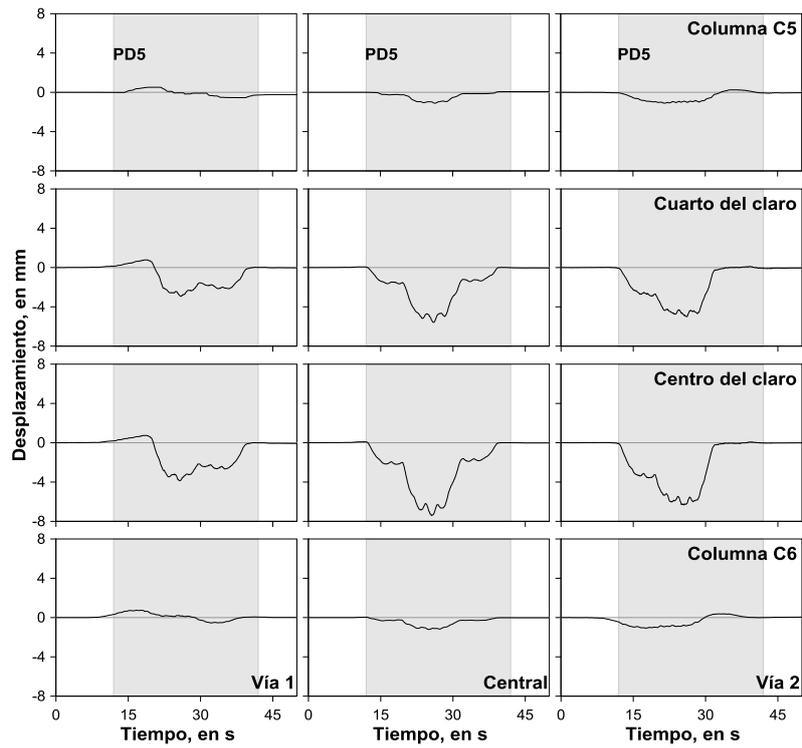


Figura B.5. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD5.

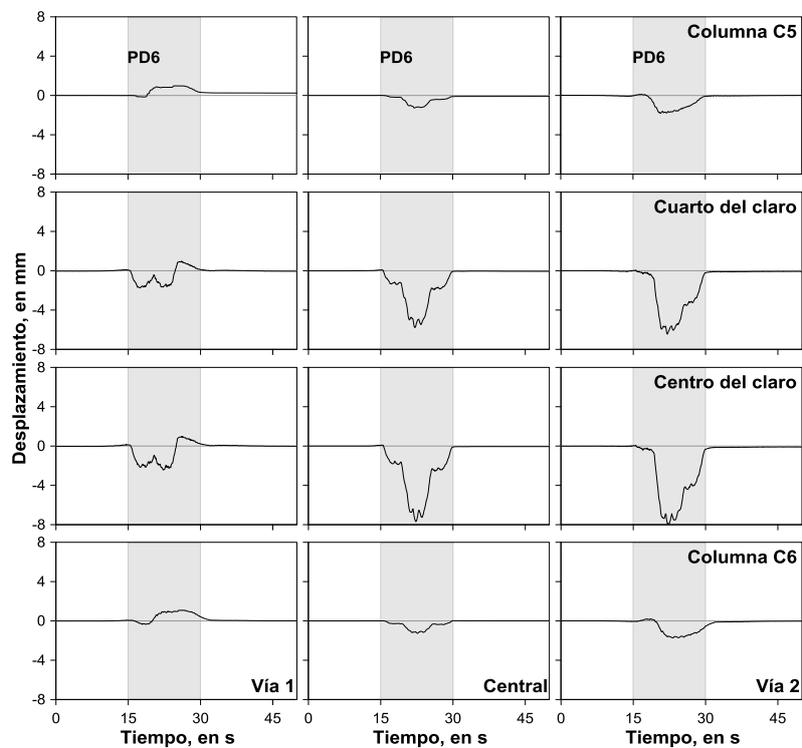


Figura B.6. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD6.

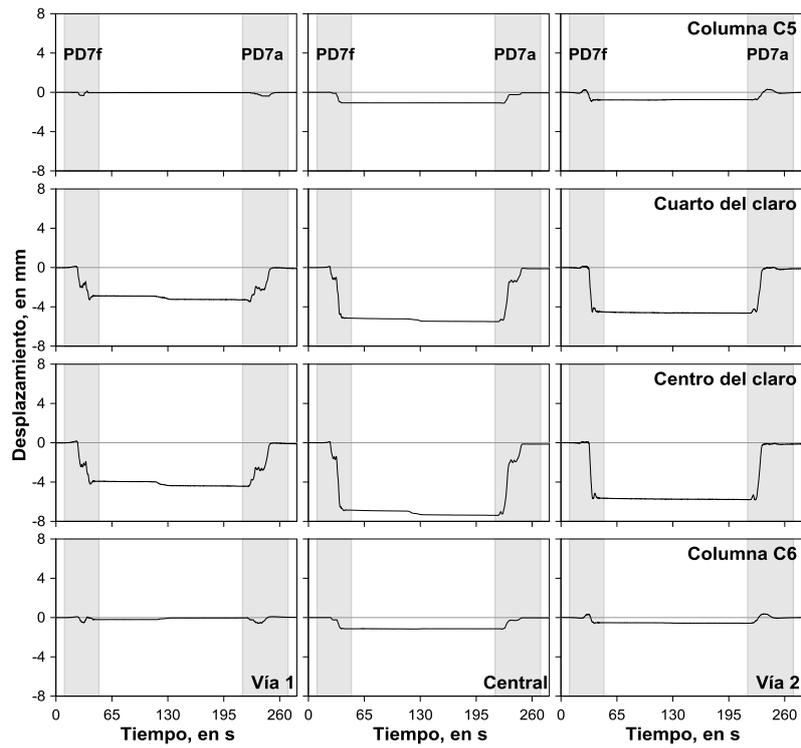


Figura B.7. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD7.

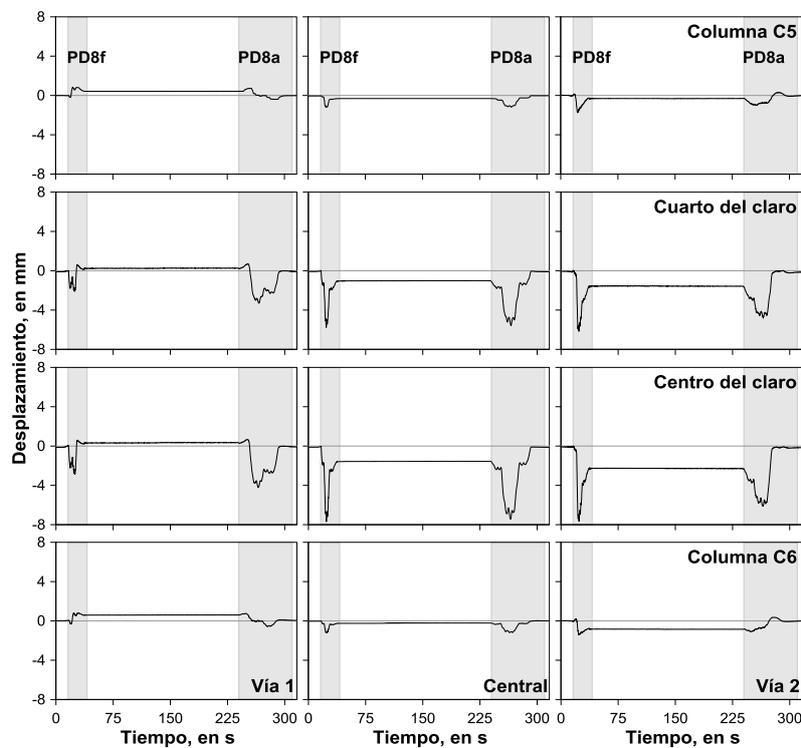


Figura B.8. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD8.

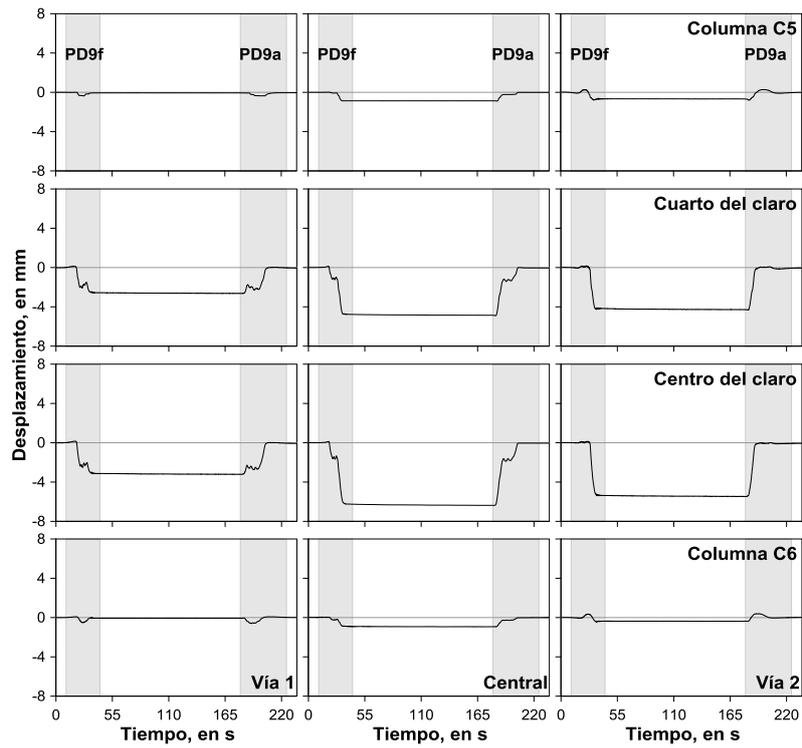


Figura B.9. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD9.

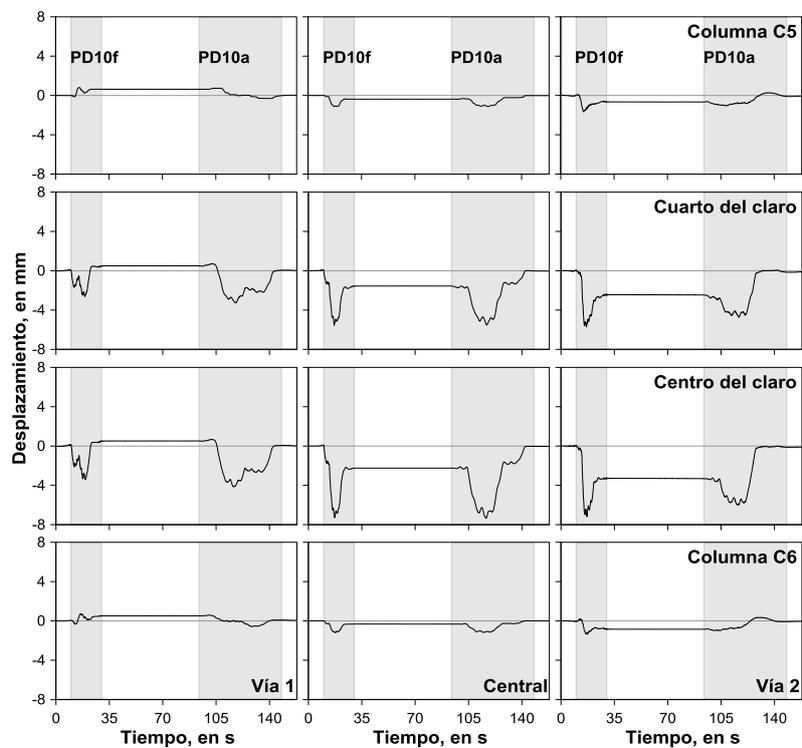


Figura B.10. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD10.

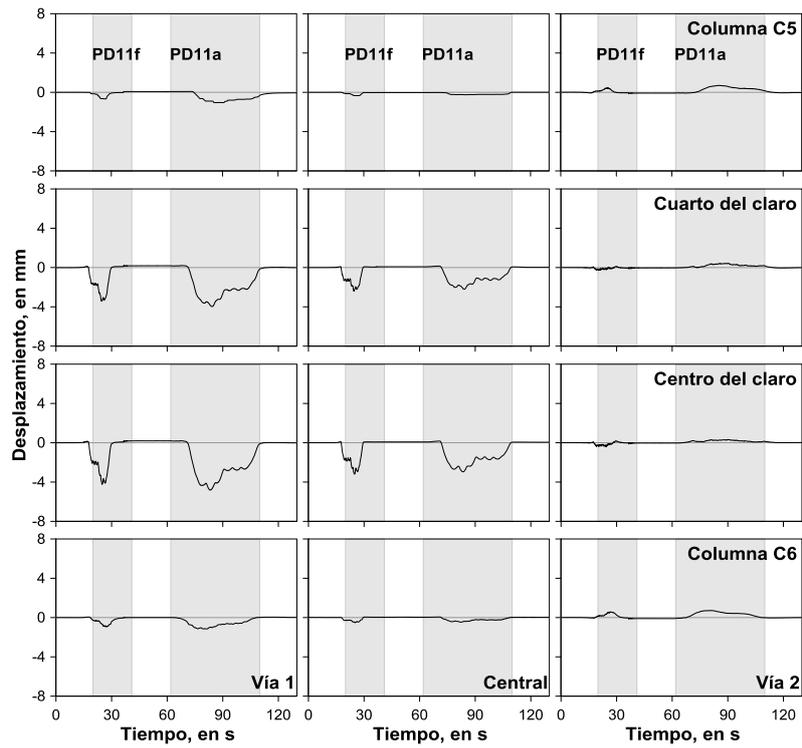


Figura B.11. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD11.

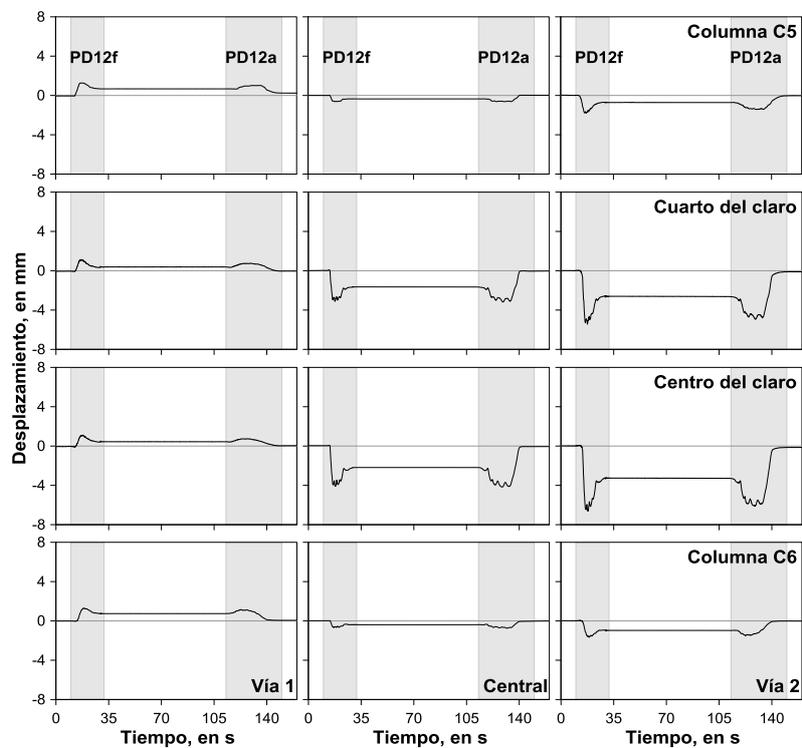


Figura B.12. Historias de desplazamiento vertical de la trabe para la PD12.

B.2. Deformaciones unitarias

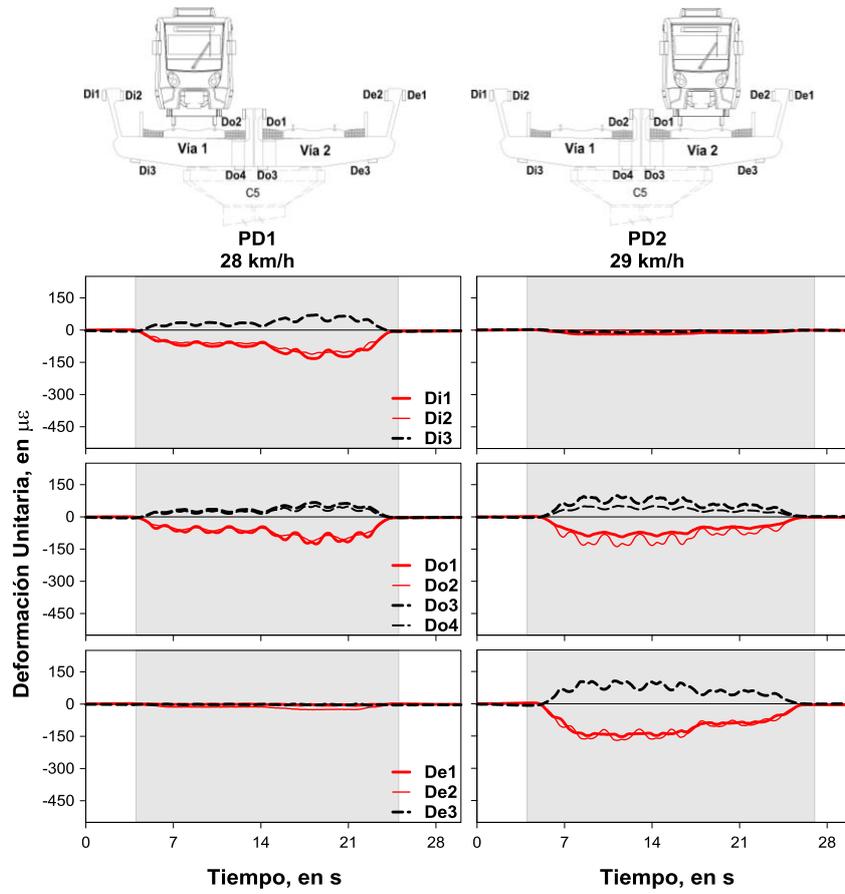


Figura B.13. Historias de deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD1 y PD2.

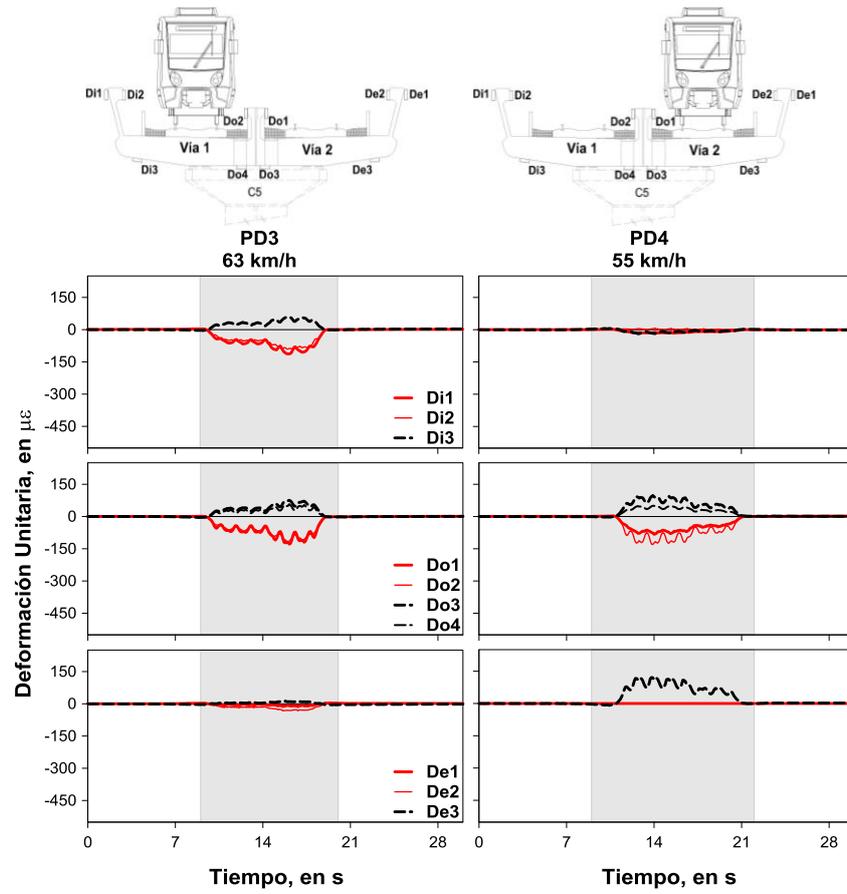


Figura B.14. Historias de deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD3 y PD4.

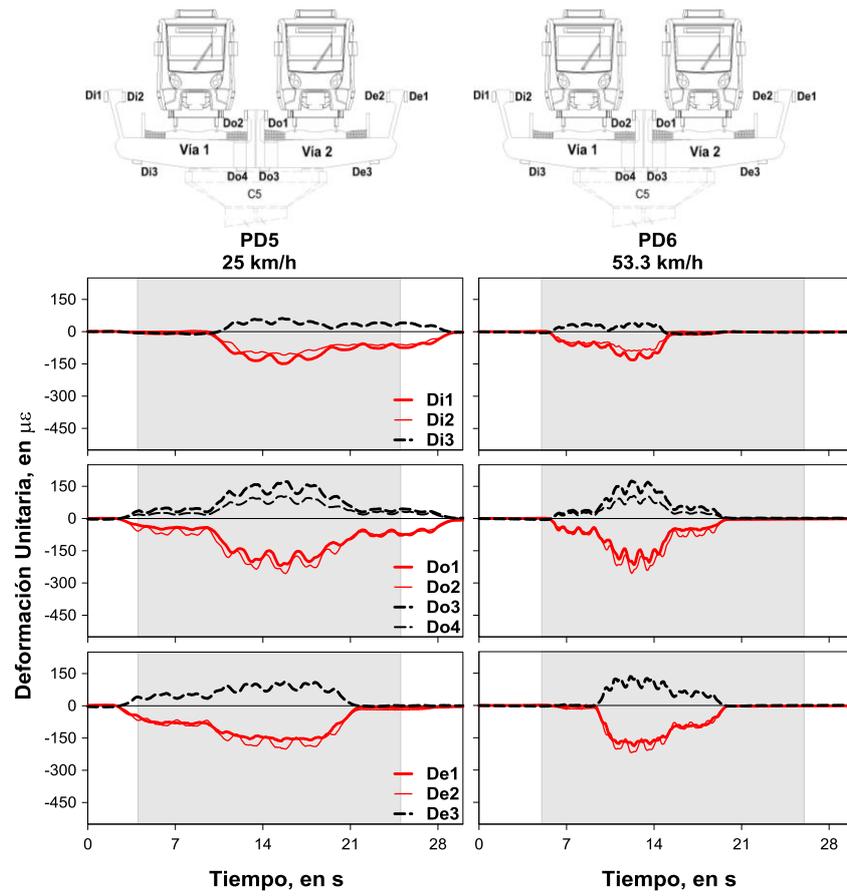


Figura B.15. Historias de deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD5 y PD6.

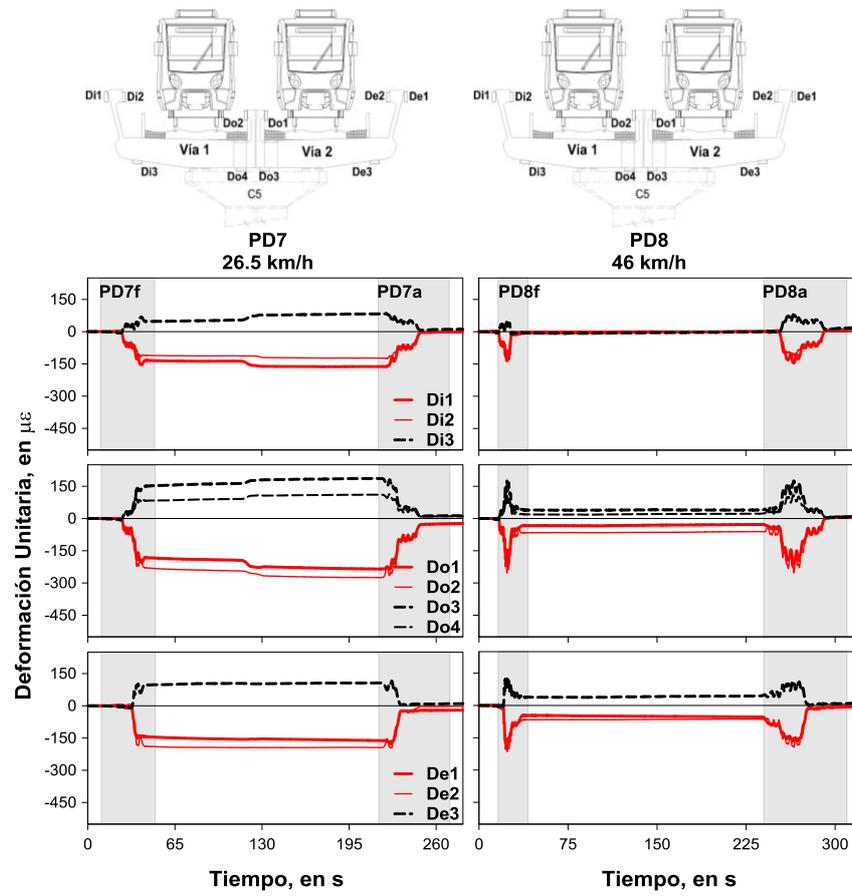


Figura B.16. Historias de deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD7 y PD8.

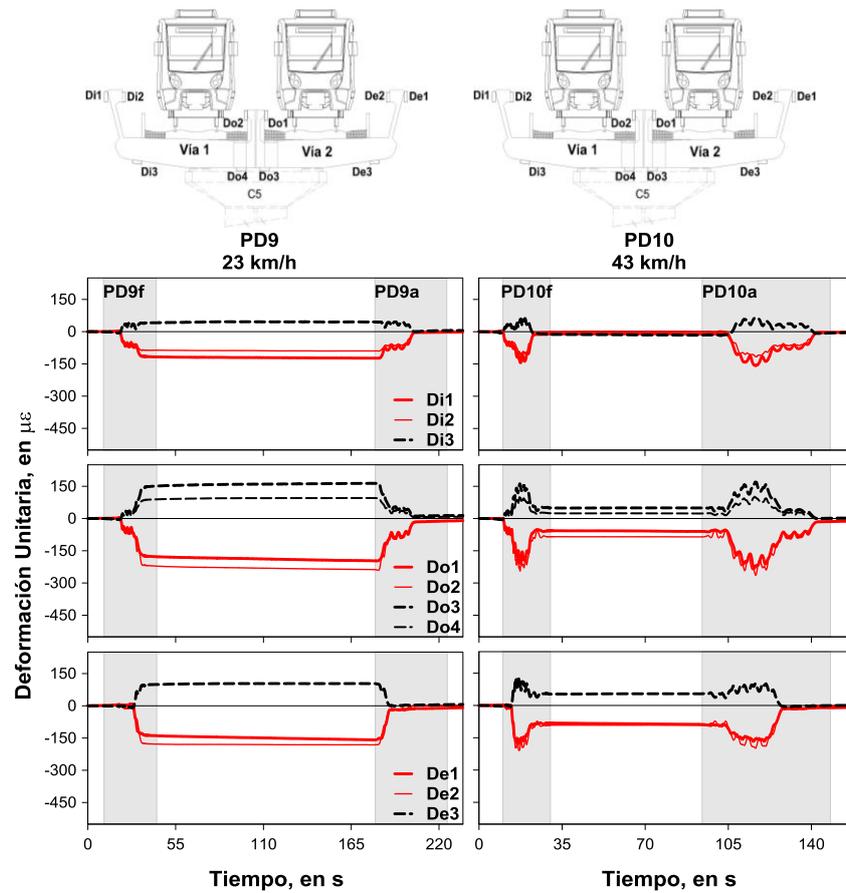


Figura B.17. Historias de deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD9 y PD10.

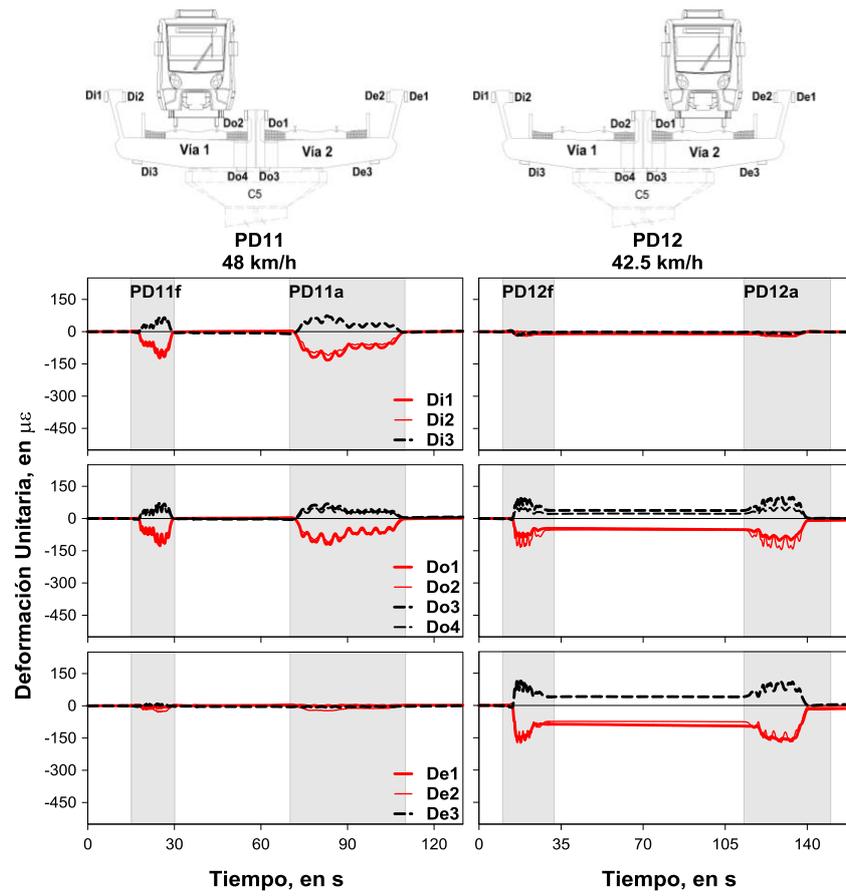


Figura B.18. Historias de deformación unitaria en el centro del claro de la trabe para las PD11 y PD12.

B.3. Desplazamientos laterales

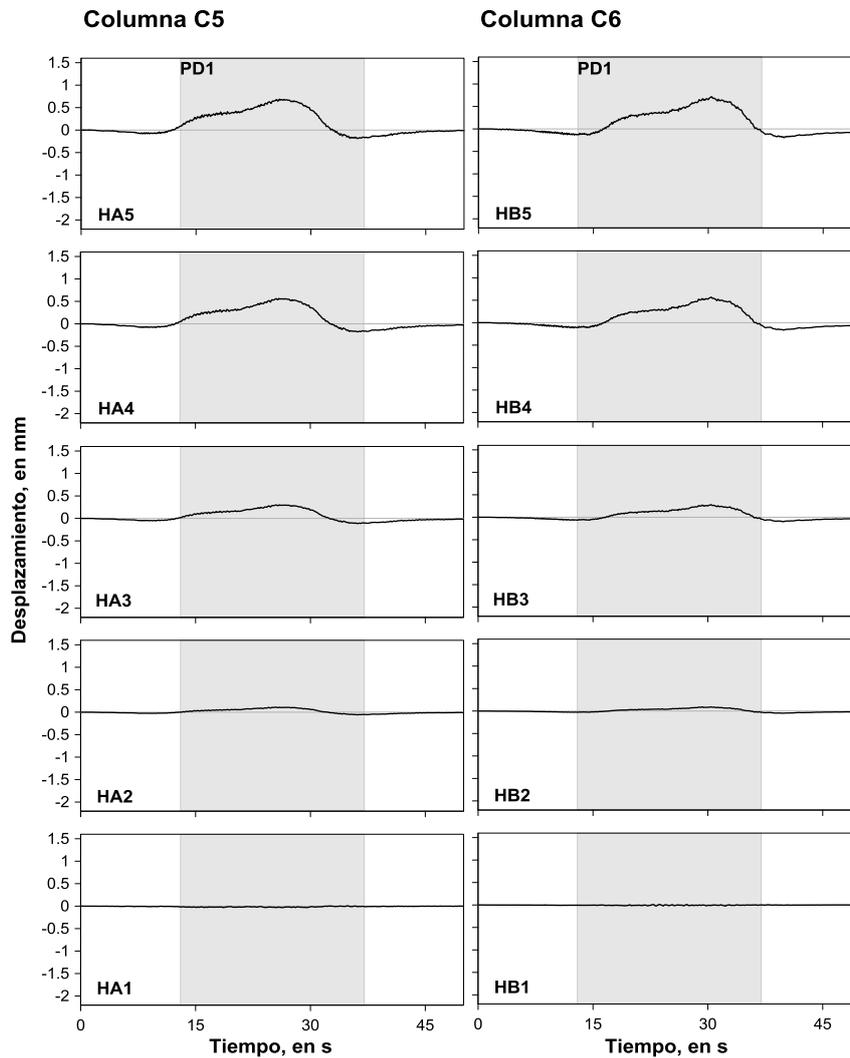


Figura B.19. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD1.

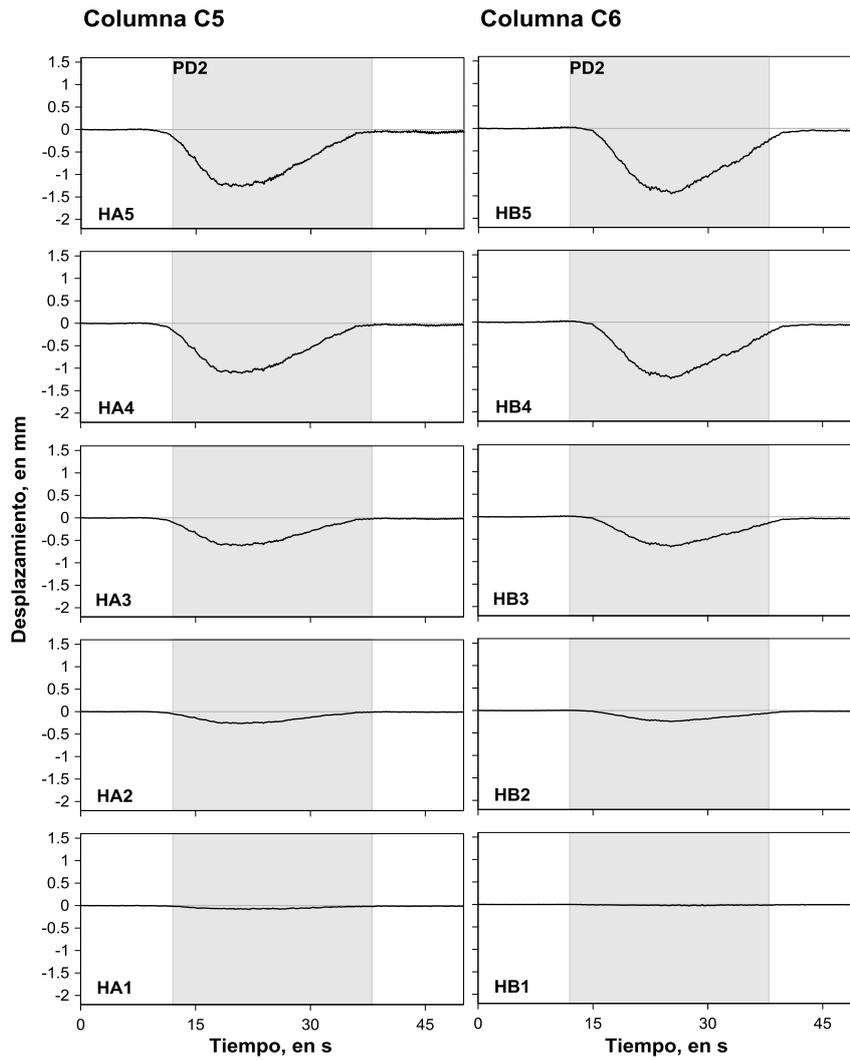


Figura B.20. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD2.

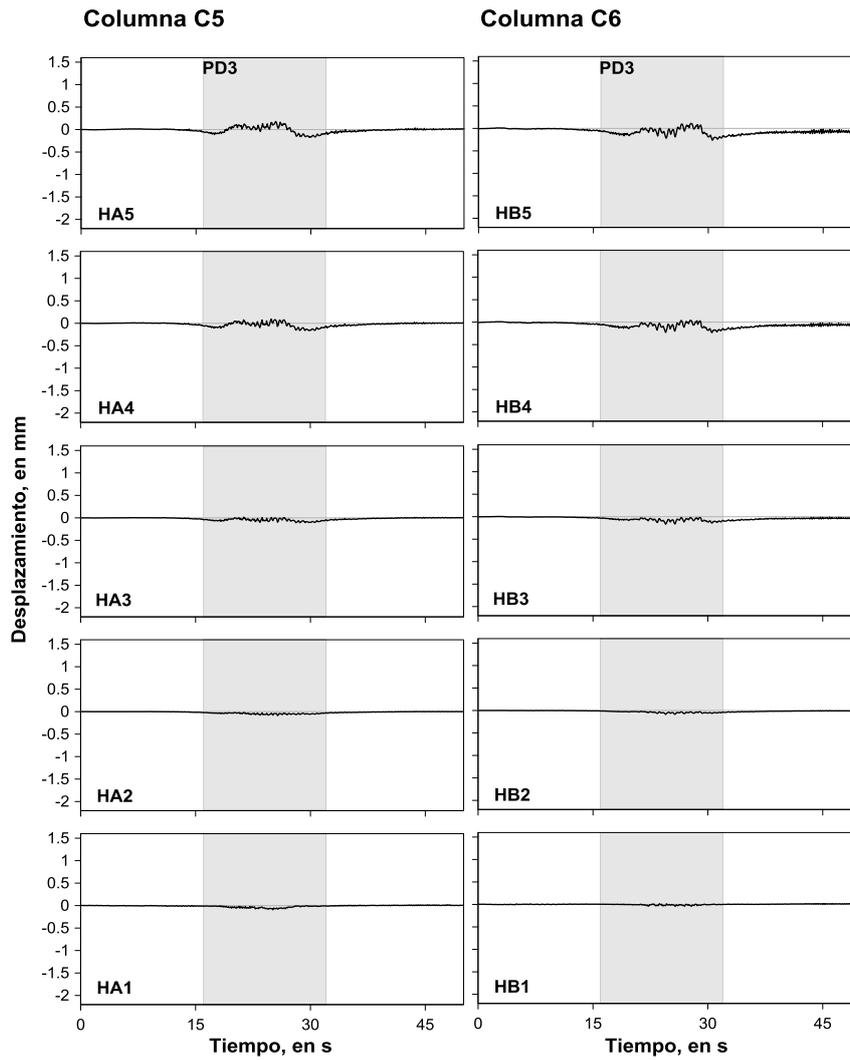


Figura B.21. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD3.

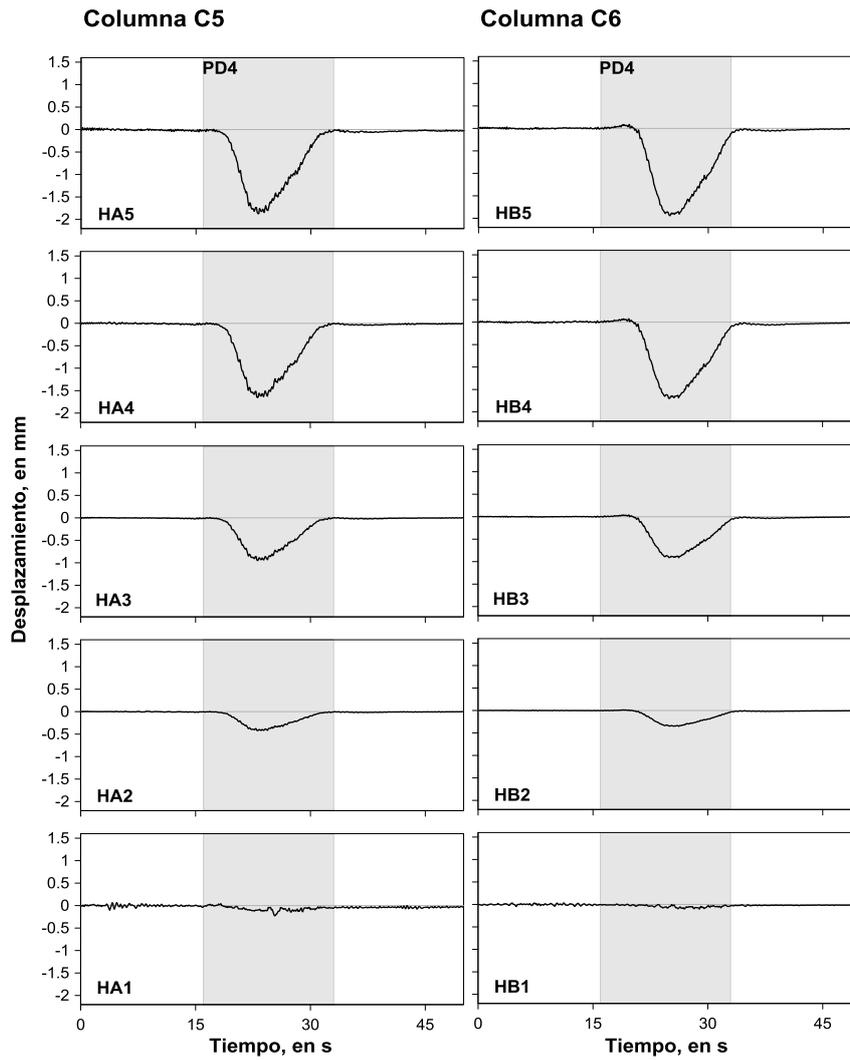


Figura B.22. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD4.

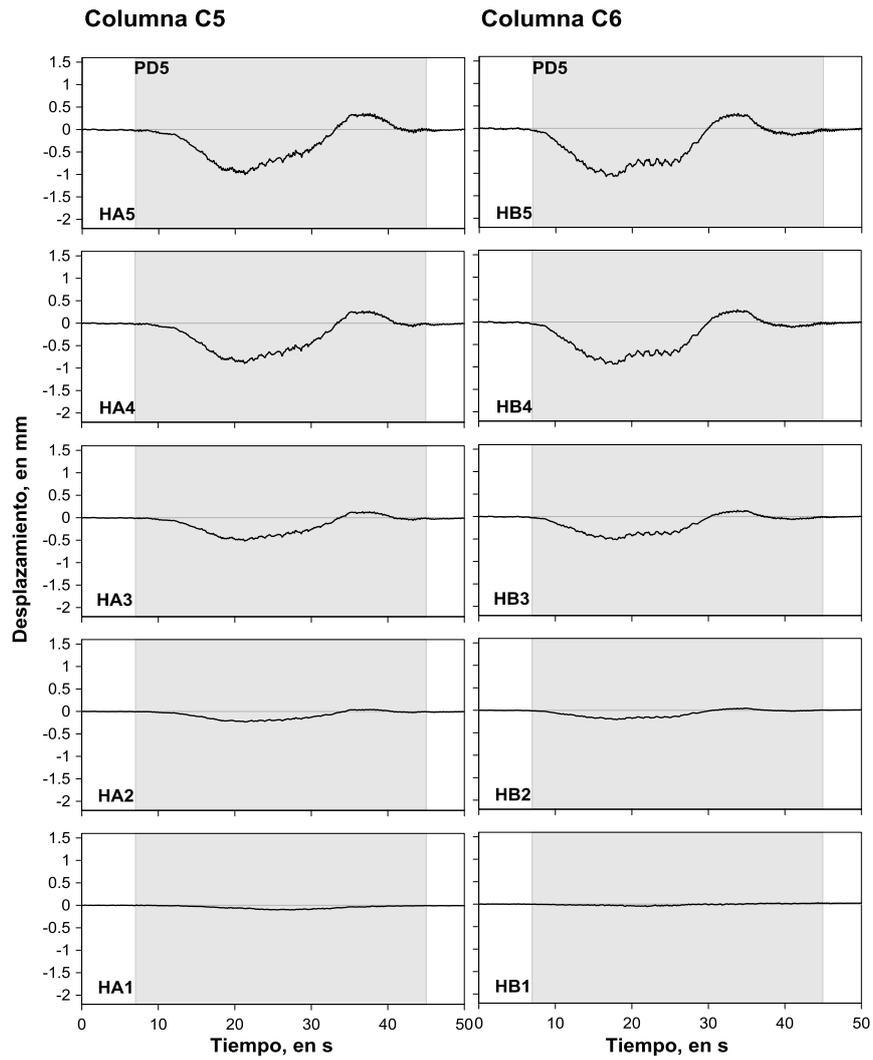


Figura B.23. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD5.

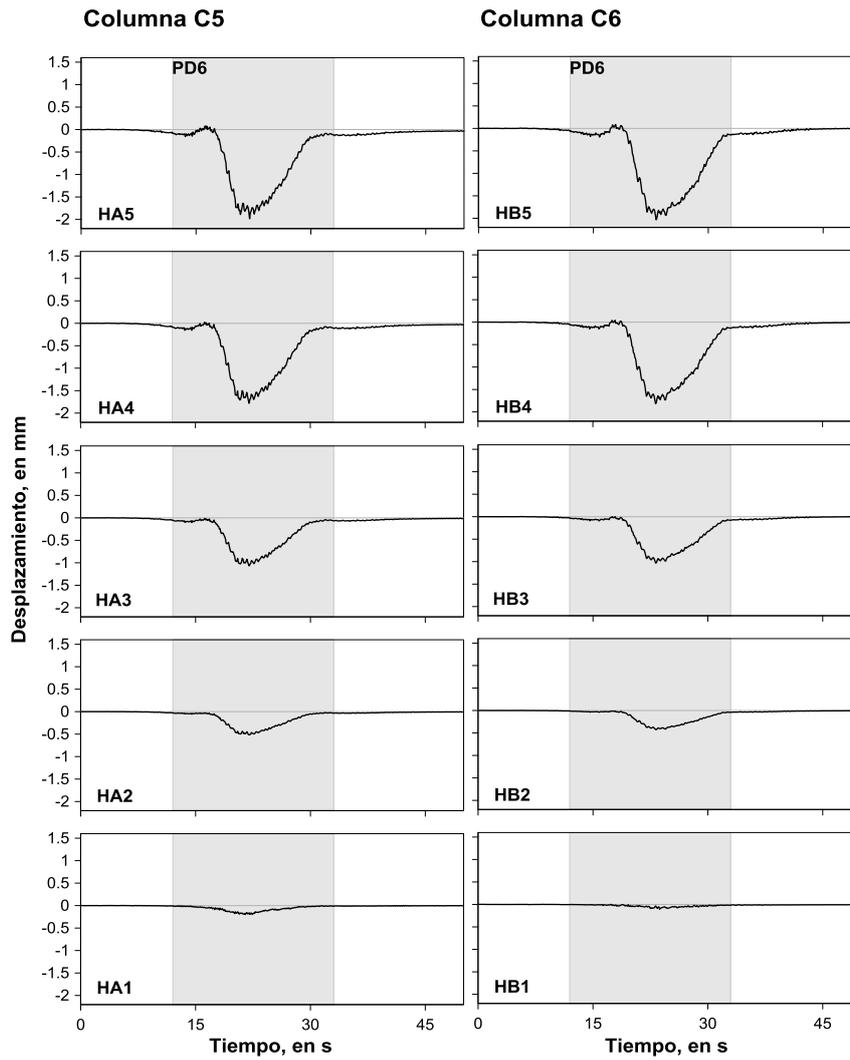


Figura B.24. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD6.

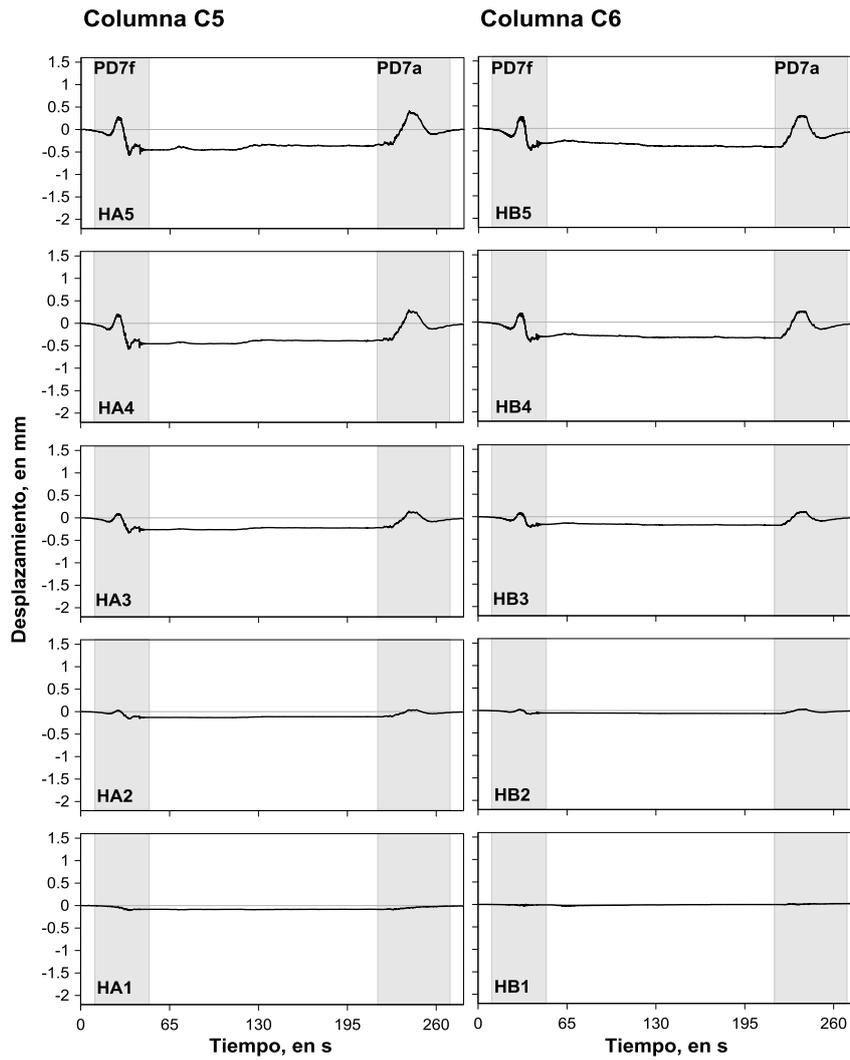


Figura B.25. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD7.

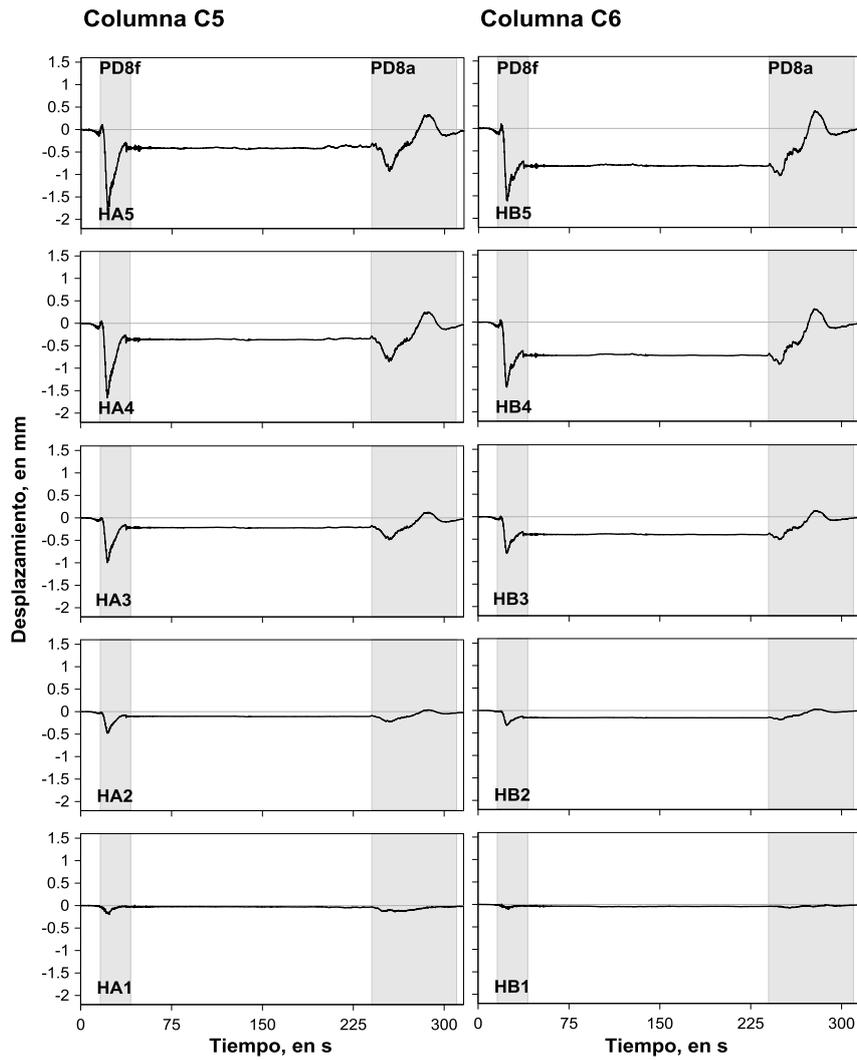


Figura B.26. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD8.

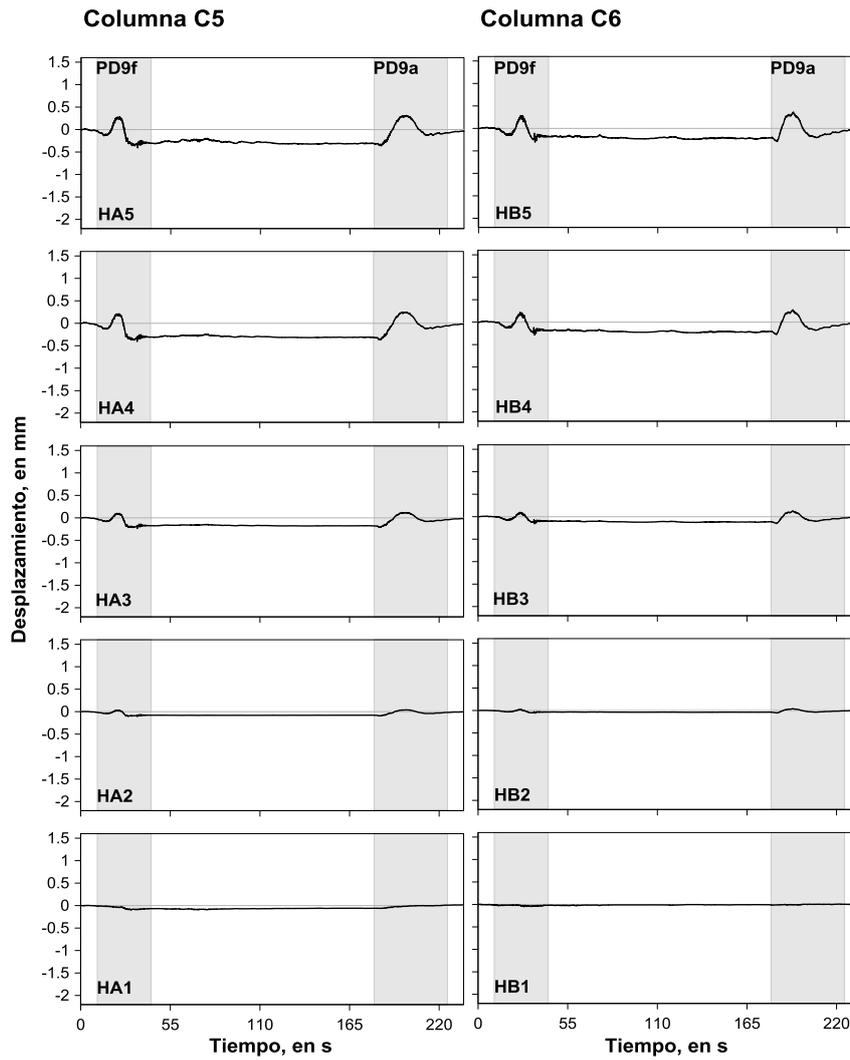


Figura B.27. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD9.

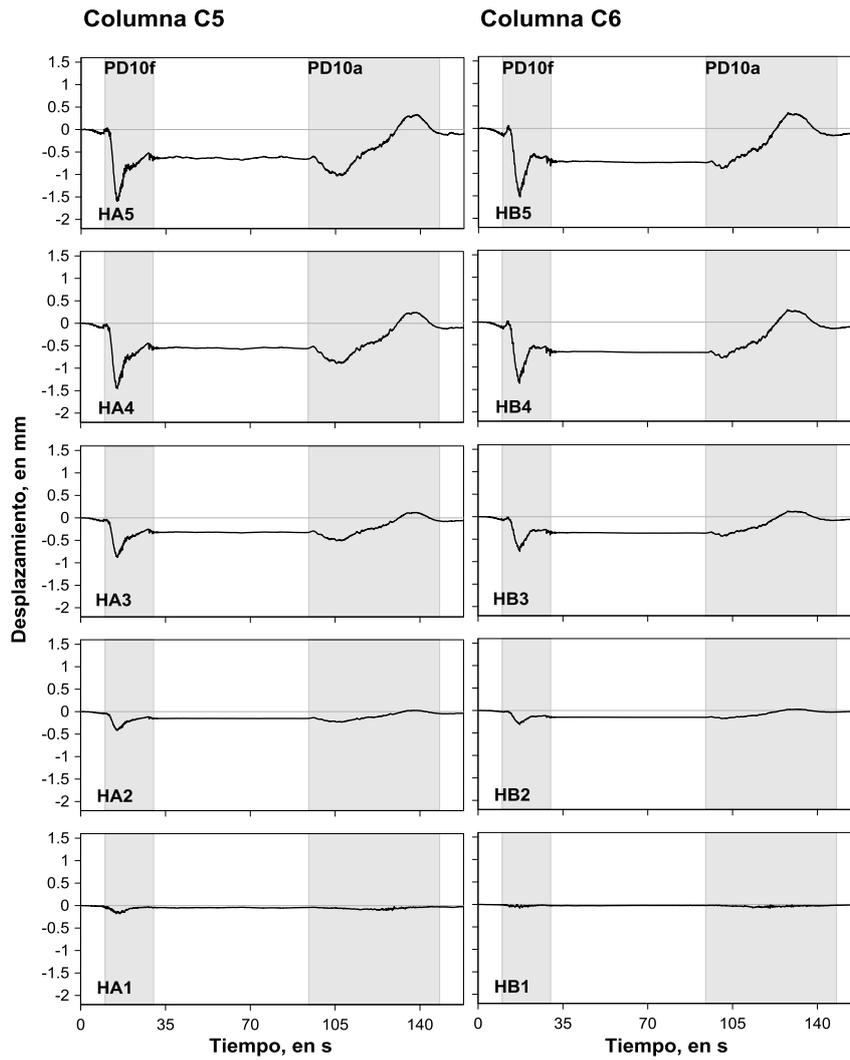


Figura B.28. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD10.

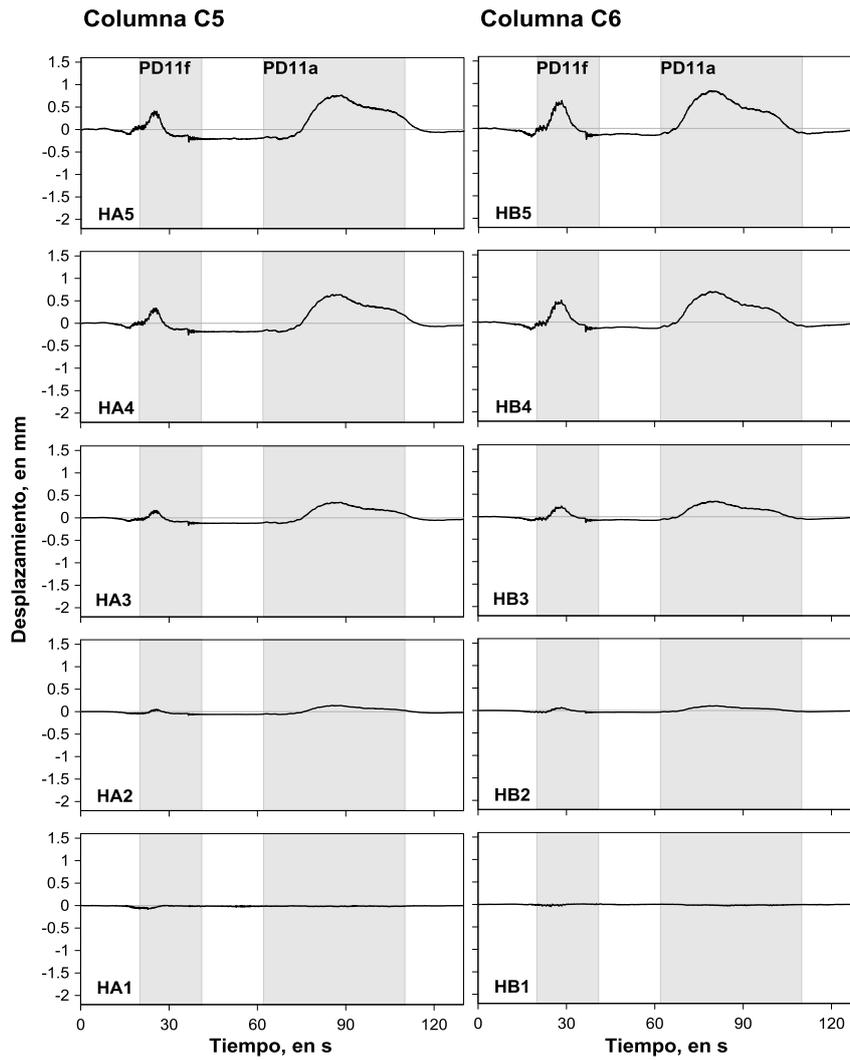


Figura B.29. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD11.

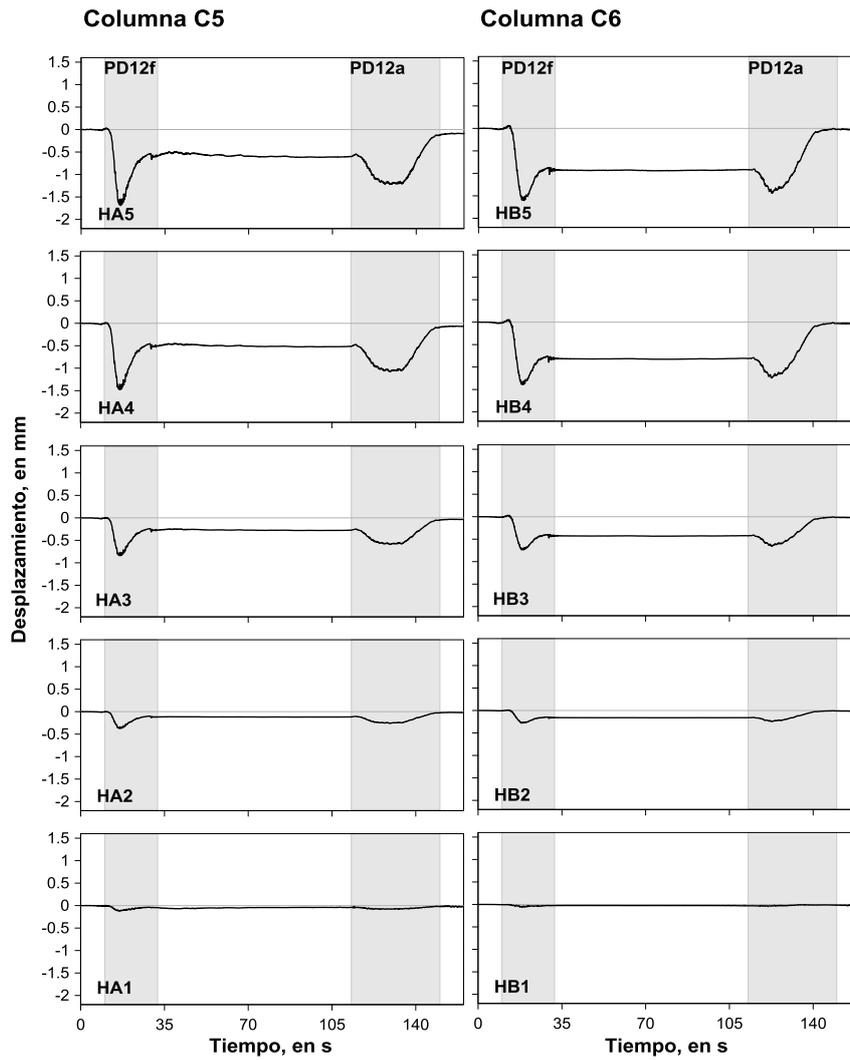


Figura B.30. Historias de desplazamiento lateral de las columnas C5 y C6 para la PD12.

B.4. Giros relativos

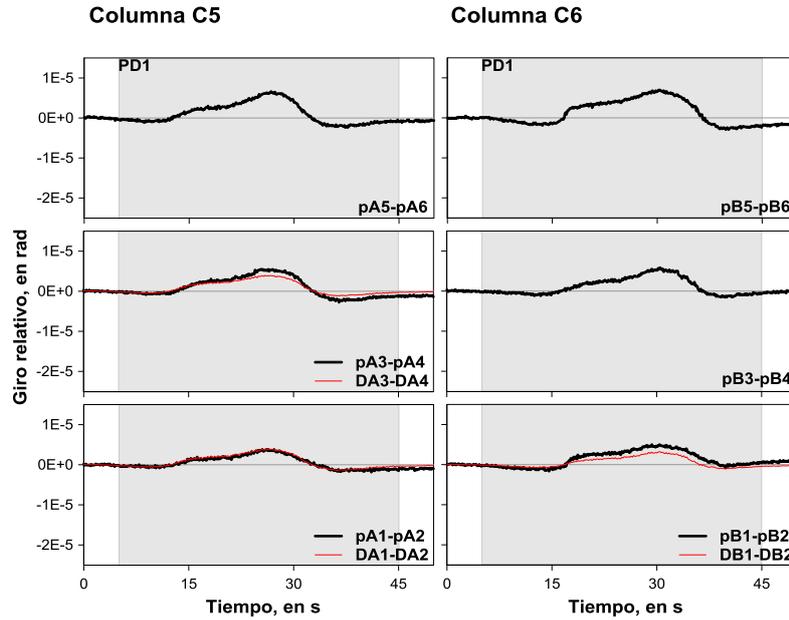


Figura B.31. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD1.

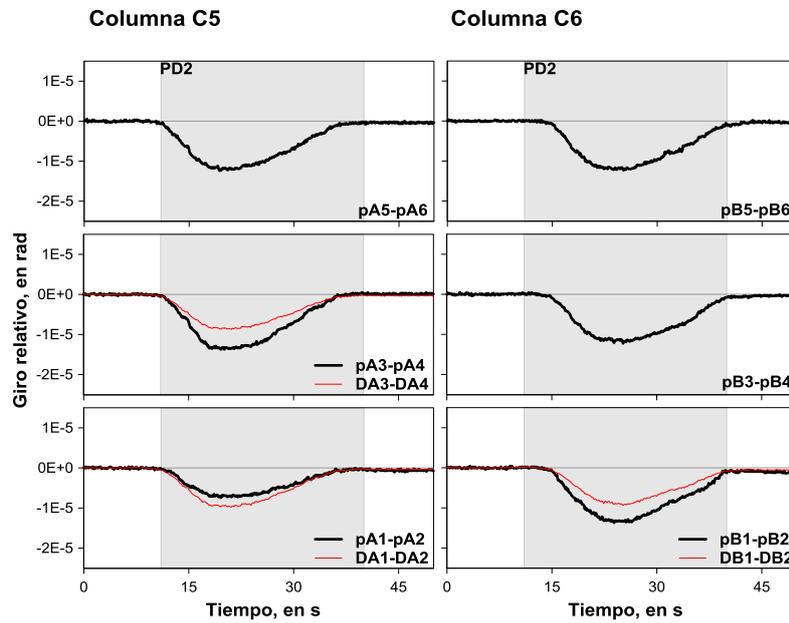


Figura B.32. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD2.

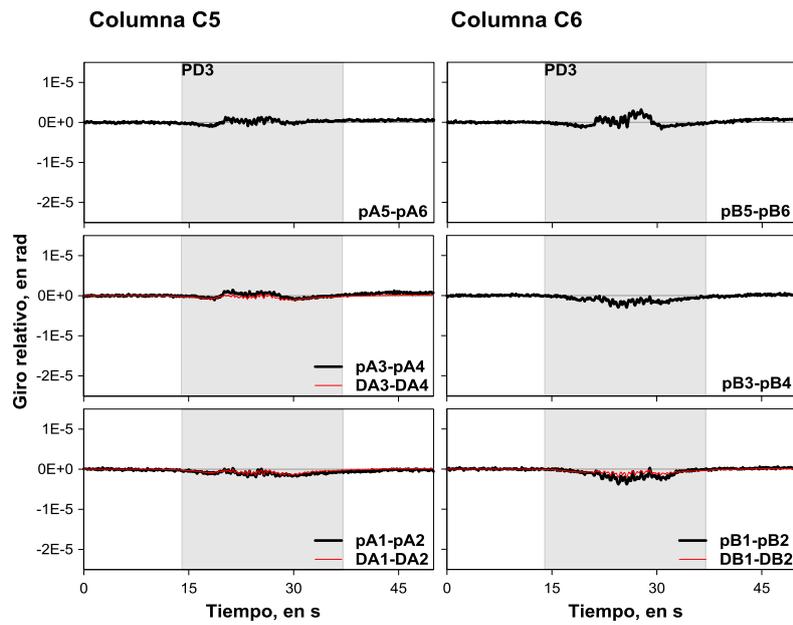


Figura B.33. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD3.

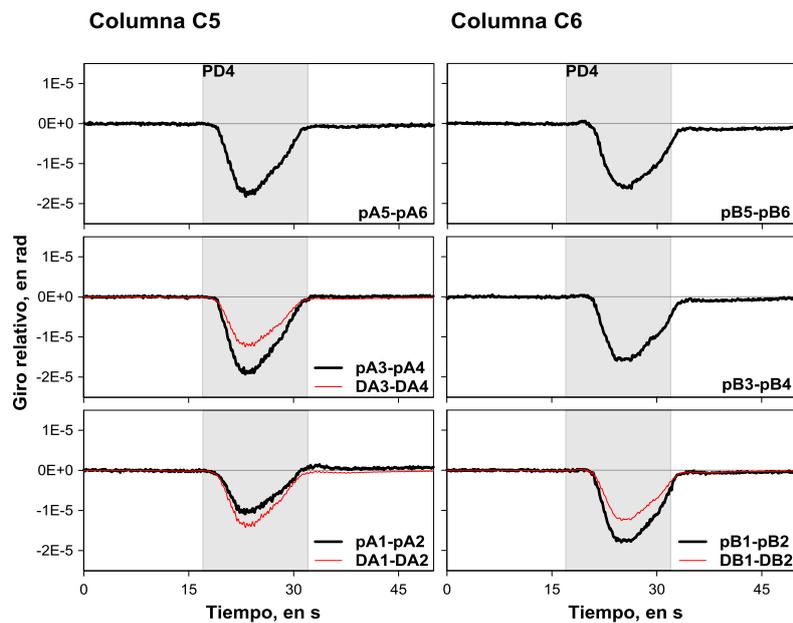


Figura B.34. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD4.

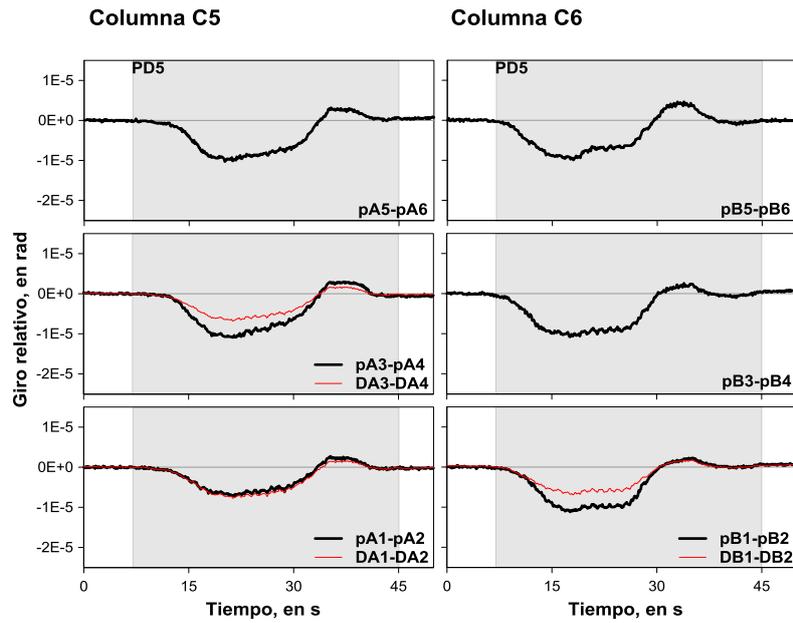


Figura B.35. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD5.

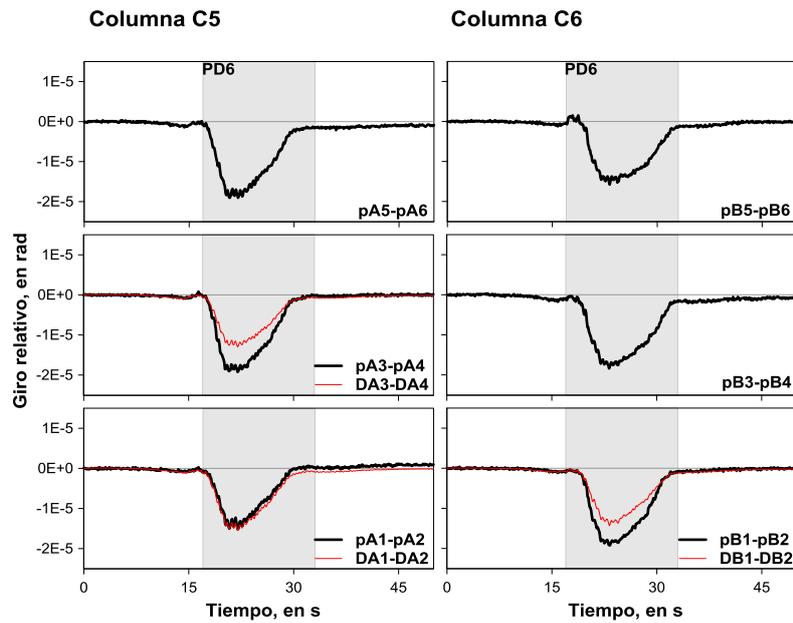


Figura B.36. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD6.

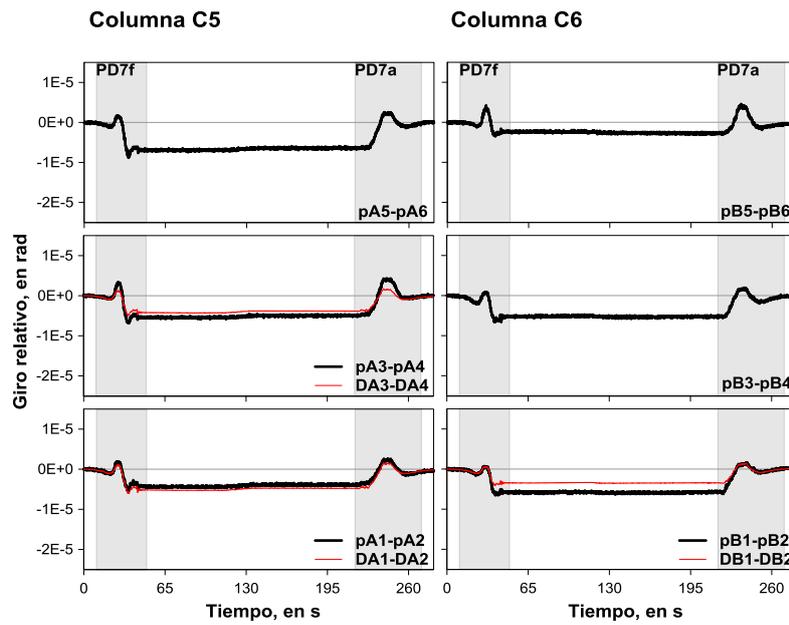


Figura B.37. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD7.

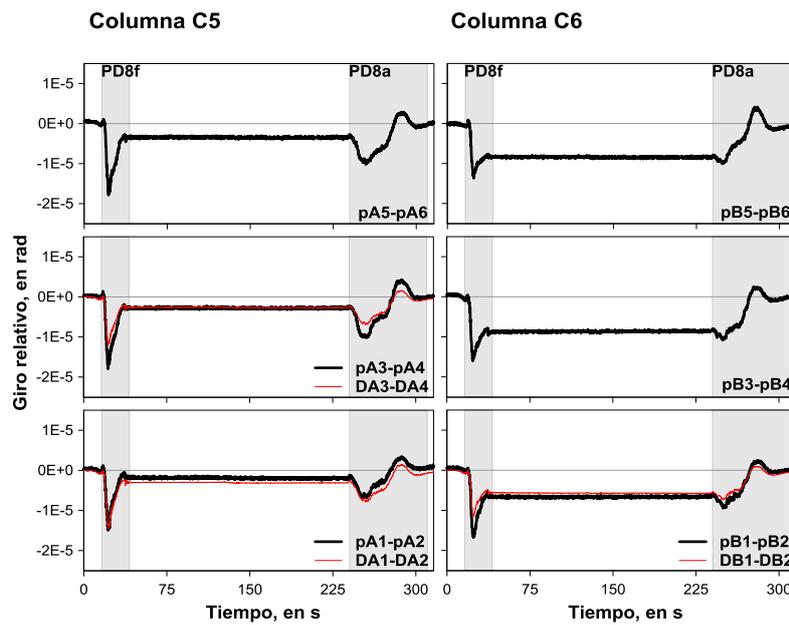


Figura B.38. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD8.

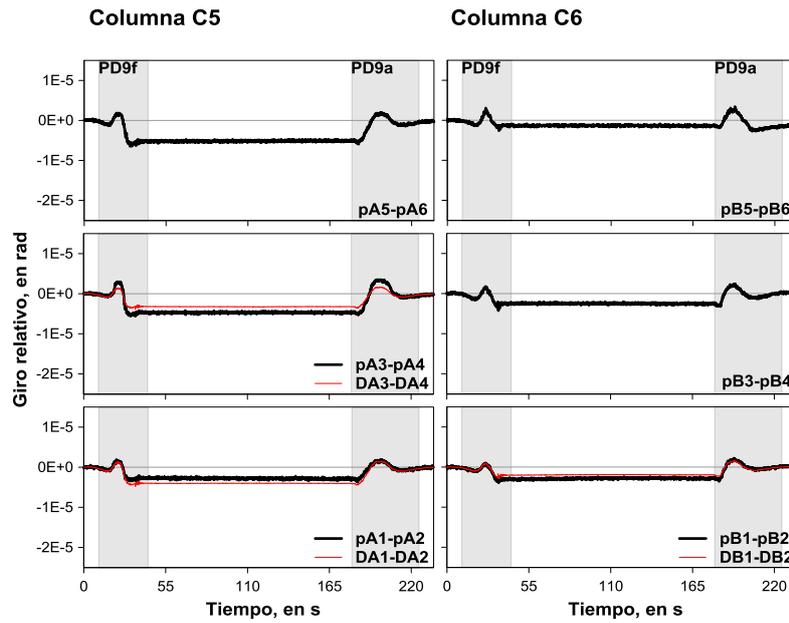


Figura B.39. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD9.

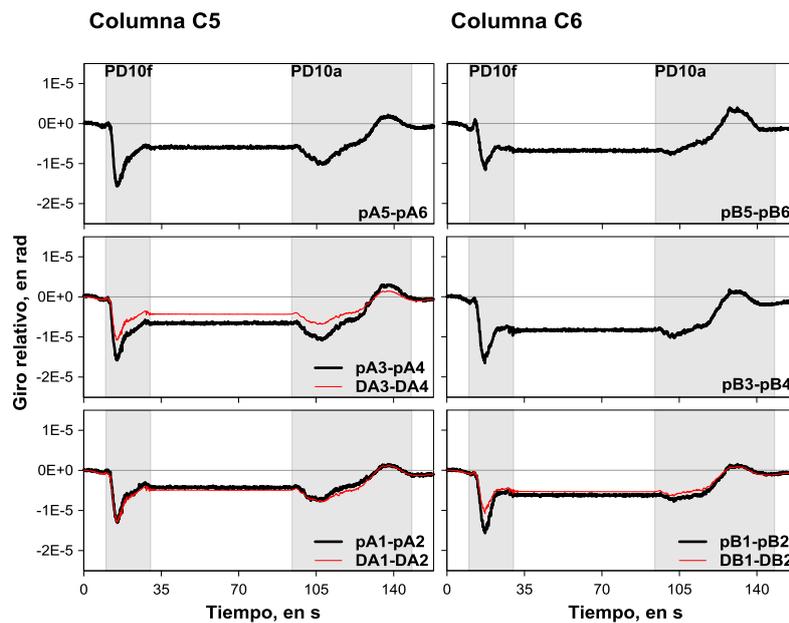


Figura B.40. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD10.

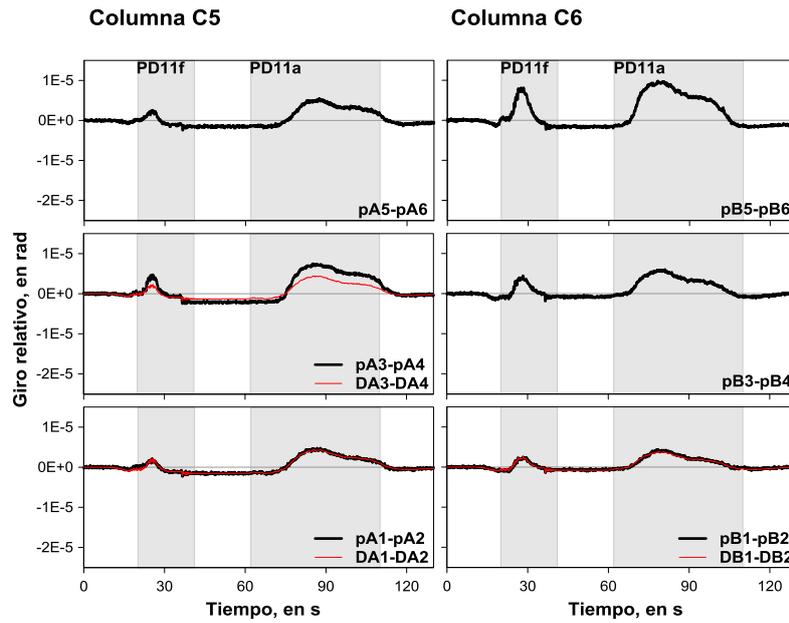


Figura B.41. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD11.

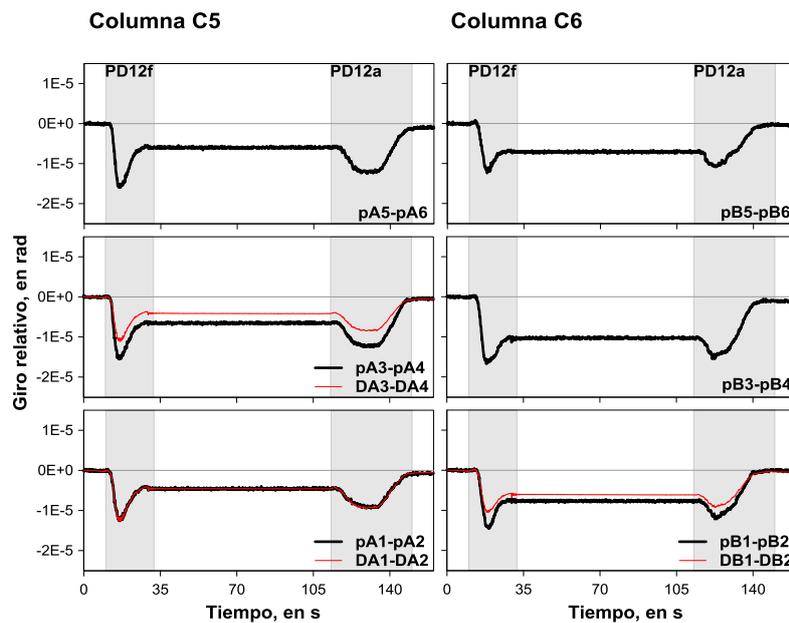


Figura B.42. Historias de giros relativos en el extremo inferior de las columnas para la PD12.

B.5. Comparación de instantes de valores máximos

En las figuras B.43 a B.49 se presentan las comparaciones para las pruebas dinámicas de los desplazamientos de trabe y columnas en los instantes donde los cuatro puntos de medición de la vía elevada son máximos, es decir, en la columna C5, a un cuarto del claro, en el centro del claro y en la columna C6. Los valores negativos en los perfiles de columnas indican que la columna se movió con dirección a extradós.

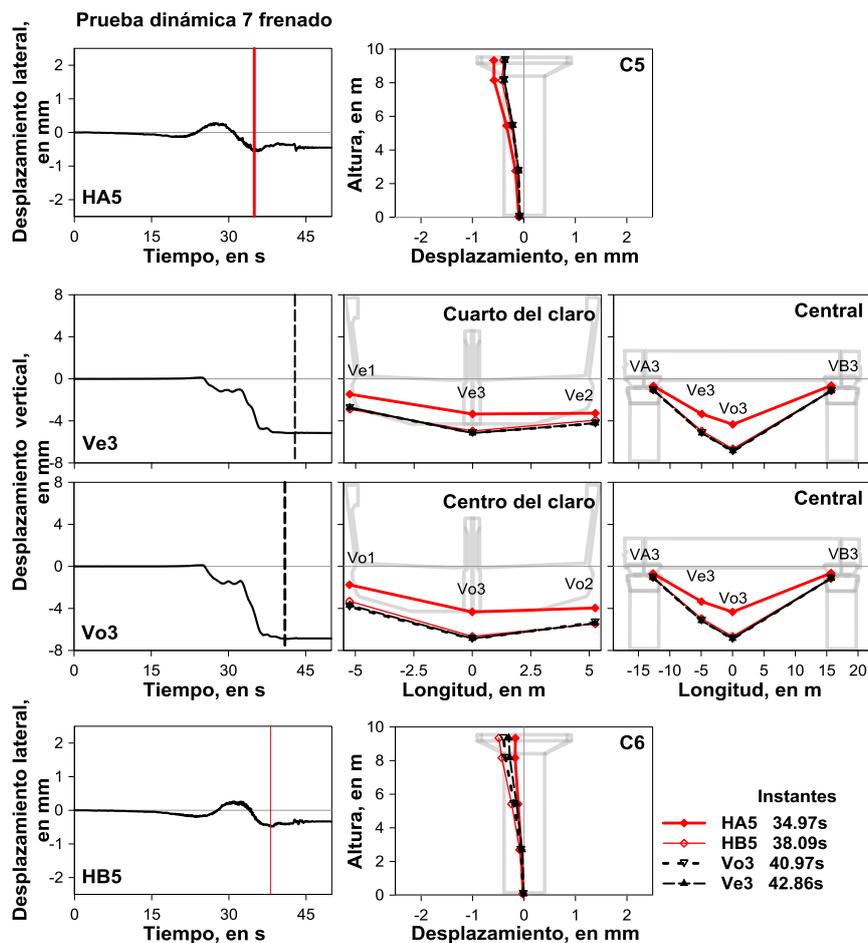


Figura B.43. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD7f.

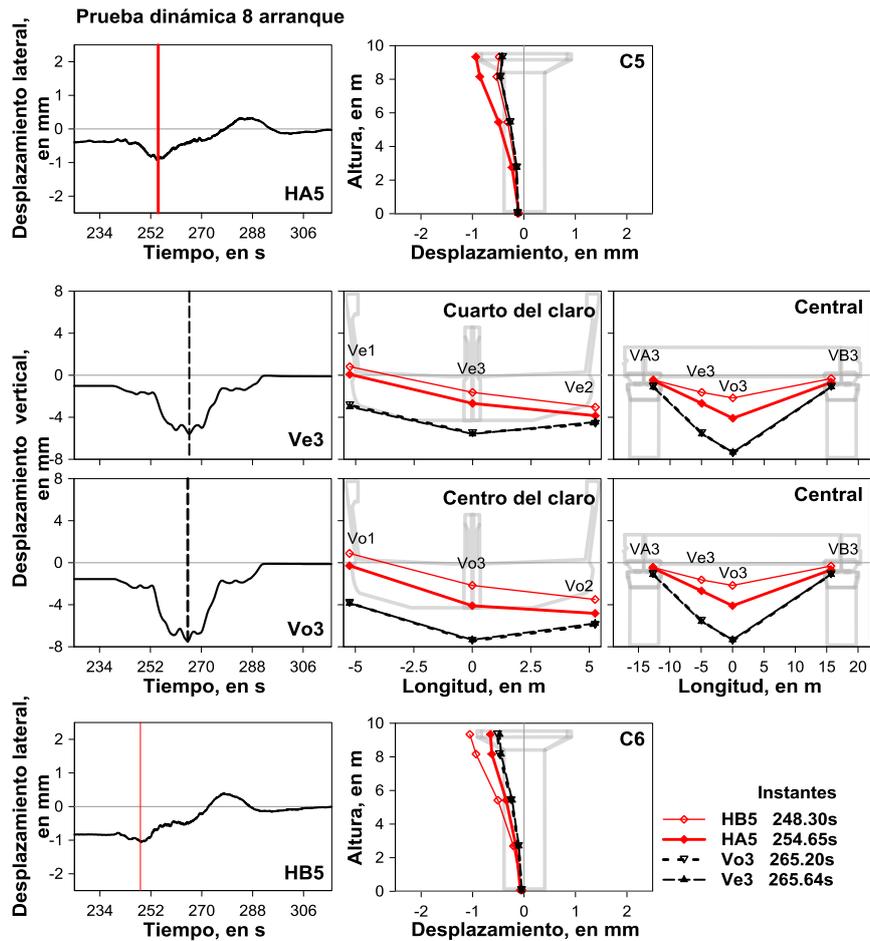


Figura B.44. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD8a.

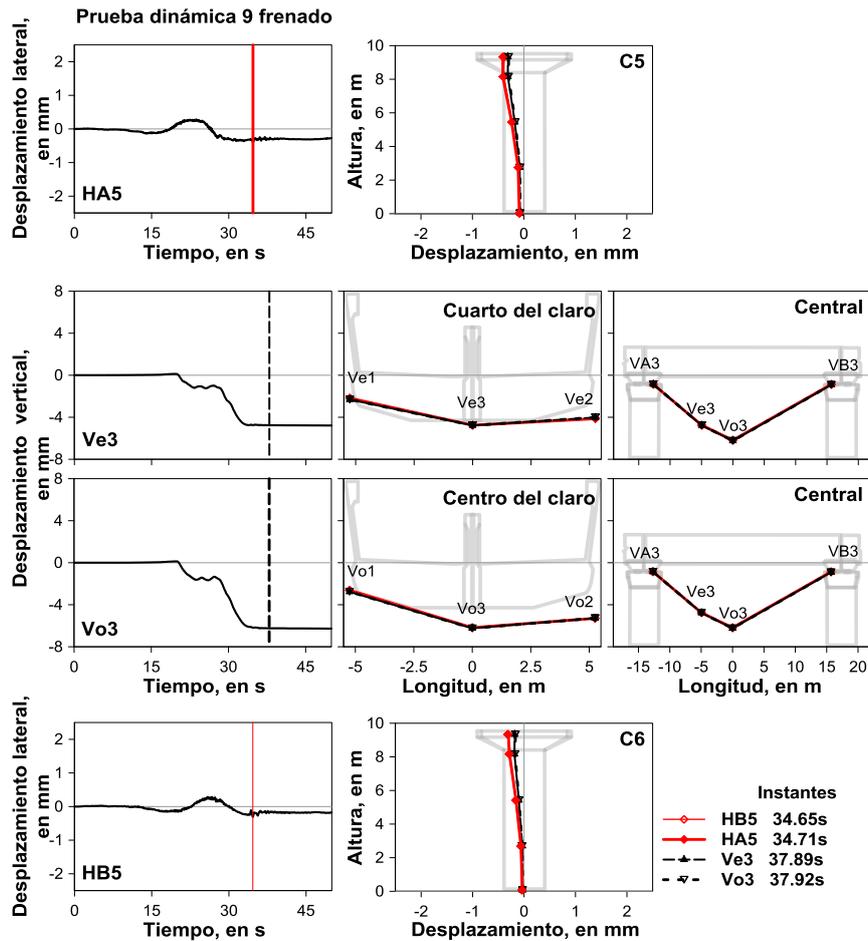


Figura B.45. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD9f.

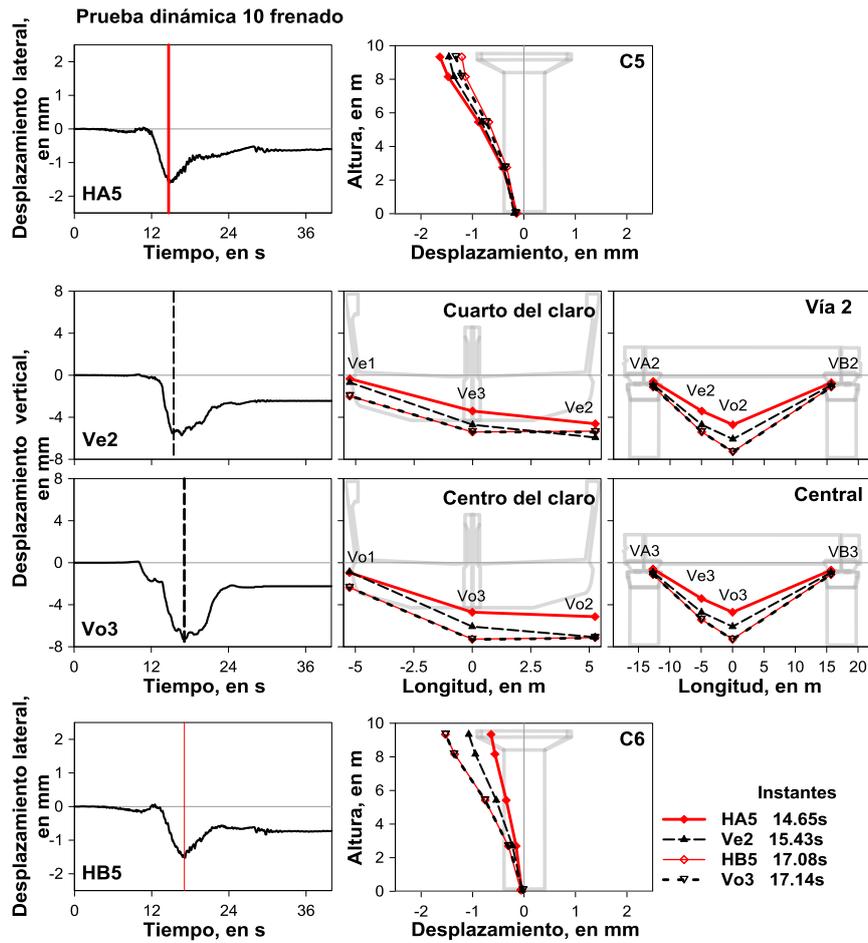


Figura B.46. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD10f.

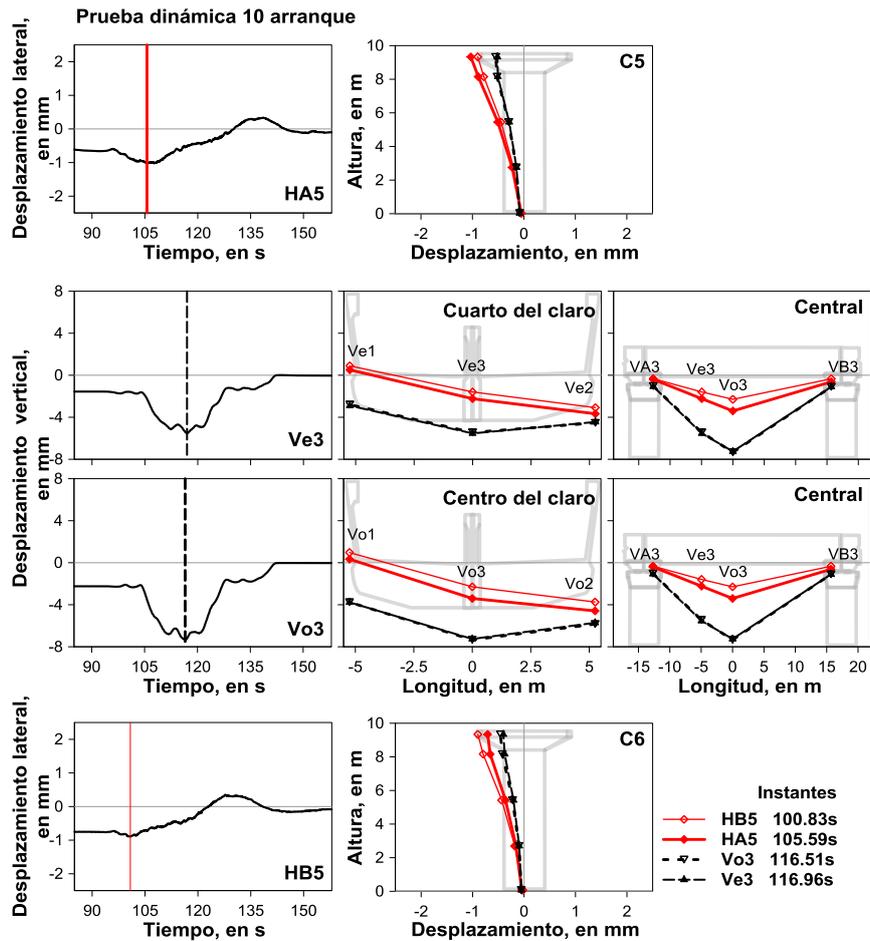


Figura B.47. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD10a.

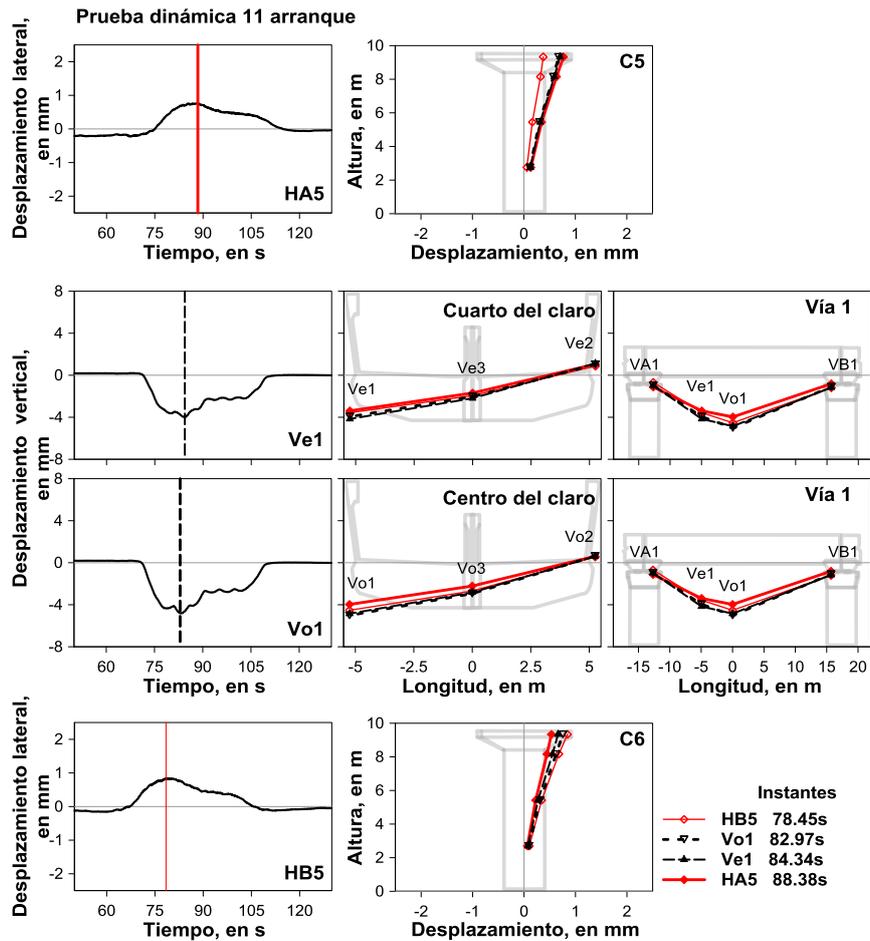


Figura B.48. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD11a.

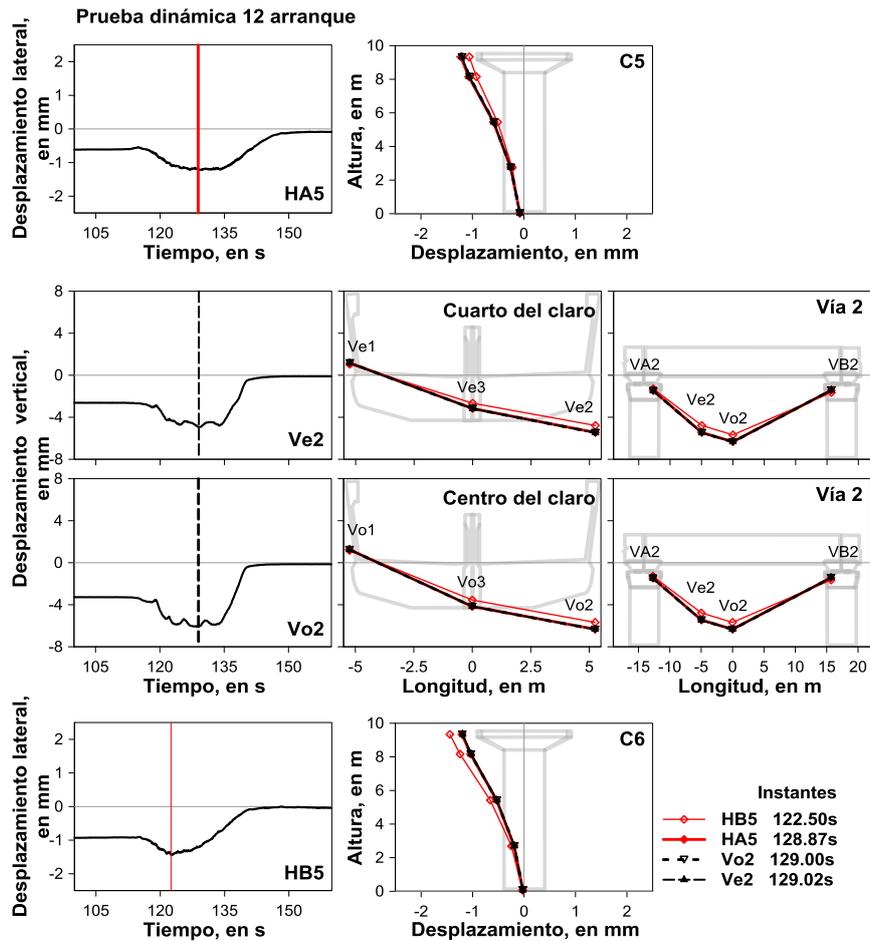


Figura B.49. Desplazamiento en trabe y columnas para los instantes donde se presenta el máximo en la columna C5, a un cuarto del claro, centro del claro y columna C6 para la PD12a.

Referencias

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

Murià Vila D., Sánchez R., Huerta C., Carrillo R., Camargo J., Loera S., López Y., Mendoza M., Aguilar G., Rodríguez G., Suarez J., Olivares L., Cadena N., (2012), "Pruebas de campo en un sitio típico del tramo elevado de la Línea 12 del Metro", Aspectos estructurales, IIUNAM, Informe final, México.

Murià Vila D., Sánchez R., Huerta C., Aguilar G., Camargo J., Carrillo R., (2014a)."Field tests of elevated viaducts in Mexico city", ASCE, Journal of Structural Engineering, 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001086, D4014001.

Murià Vila D., Sánchez R., Huerta C., Aguilar G., Camargo J., López Y., (2014b),"Field tests of a curve in an elevated urban railroad", 9th International Conference on Structural Dynamic, Portugal.

NTC-DCC (2004),"Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones", Gaceta oficial del Distrito Federal, México.

NTC-DCEC (2004),"Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de estructuras de concreto", Gaceta oficial del Distrito Federal, México.

NTC-DS (2004),"Normas técnicas complementarias para diseño por sismo", Gaceta oficial del Distrito Federal, México.

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.

Proyectista, (2010a). "Planos del proyecto de la Línea 12 del Metro de la ciudad de México".

Proyectista, (2010b). "Memoria de cálculo cimentación con pilas del proyecto zona geotécnica: Lago, cadenamamiento 14+814.206 al 15+104.646 tramo Santa María Tomatlán-San Andrés Tomatlán".

Vázquez Galán A., (2013). "Representación de la respuesta de una vía elevada en la ciudad de México", Tesis de maestría, Posgrado UNAM, México.

Agradecimientos

A Dios por tomar mi mano en cada instante de mi vida y darme la fortaleza para afrontar todos los momentos difíciles.

A la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por la oportunidad que me brindó para ingresar a la maestría en ingeniería.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) y al Instituto de Ingeniería de la UNAM (IIUNAM) por otorgarme una beca para realizar mis estudios de maestría y para la elaboración de esta tesis.

Al Dr. David Murià Vila muchas gracias por su confianza, por la oportunidad brindada, la excelente asesoría y los valiosos consejos académicos y personales.

A los miembros del comité M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, Dr. Jaime García Pérez, Dr. Marcos Mauricio Chávez Cano, M. I. Abraham Roberto Sánchez Ramírez gracias por su valiosa participación y sugerencias.

A los Ing. Raul Carrillo Cruz, Ing. Julián Andrés Suarez Arango, M. I. Alberto Mauricio Vázquez Galán, M. I. Daniel Baruo Aldama Sánchez, M. I. Carlos Humberto Huerta Carpizo y Dr. José Camargo Pérez gracias por compartir su conocimiento, sus vivencias y por supuesto su amistad.

Al Dr. José Manuel Jara Guerrero gracias por creer y confiar en mí. Por compartir su pasión y conocimientos por la ingeniería.

A toda mi familia por su amor y por el ejemplo de superación que me da cada uno de ustedes. Especial reconocimiento a mis padres Estela y Enrique solo quiero decirles que no existen palabras para agradecer todo su amor y apoyo incondicional. A mis hermanos Alberto y Jorge por su cariño, por los momentos de alegría y los momentos difíciles donde ellos siempre aligeran la carga.

A mis amigos por darme muchos días felices y llenos de risas, por dejarme entrar en sus vidas y compartir conmigo un poquito de cada uno de ustedes.

Con especial dedicatoria a mi esposo Omar André Ochoa Valdés mi gran amor, el pilar en mi vida, gracias por no dejarme caer, por enseñarme que la vida es mejor al compartirla, por escucharme, por tus consejos y por el amor tan grande que me tienes que me hace sentir que puedo lograr todo lo que me proponga.