



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGON
INGENIERÍA CIVIL

**“Determinación de las propiedades dinámicas y de
las tensiones de los cables de dos puentes
atirantados”**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A
CARLOS HUMBERTO
HUERTA CARPIZO

DIRECTOR DE TESIS: DR. DAVID MURIÀ VILA



ENEP ARAGON

SAN JUAN DE ARAGON, ESTADO DE MEXICO

JULIO DE 2004



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

**ESCUELA NACIONAL DE ESTUDIOS PROFESIONALES
ARAGÓN
H. CONSEJO TÉCNICO**

OFICIO ENAR/CT/0823/2003

**C. CARLOS HUMBERTO HUERTA CARPIZO
P R E S E N T E**

En sesión celebrada el día 19 de junio de 2003 el H. Consejo Técnico de la Escuela Nacional de Estudios Profesionales Aragón, acordó:

Acuerdo No. 8665 Autorizar que el Dr. David Murià Vila dirija la tesis a nivel licenciatura del alumno Carlos Humberto Huerta Carpizo, de la Carrera de Ingeniería Civil, titulada *Determinación de las Propiedades Dinámicas y de las Tensiones de los Cables de Dos Puentes Atirantados*.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para reiterarle mi distinguida consideración.

A T E N T A M E N T E

"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

San Juan de Aragón, Estado de México, a 23 de junio de 2003

LA SECRETARIA DEL H. CONSEJO TÉCNICO



MTRA. CARMEN DE LOURDES LARAQUE Y ESPINOSA

- c.c.p. Arq. Lilia Turcott González,
Presidenta del H. Consejo Técnico de la ENEP Aragón. Presente.
Lic. Alberto Ibarra Rosas,
Secretario Académico. Presente.
Ing. Gilberto García Santamaría González,
Jefe de la División de las Ciencias Físico Matemáticas y de las Ingenierías. Presente.
Lic. Mayra Ordóñez Saleme,
Jefa de la Unidad de Planeación. Presente.
Ing. Martín Ortiz León,
Jefe de la Carrera de Ingeniería Civil. Presente.

CLLE/cfl

Autorizo a la Dirección General de Discipuloss de la UNAM a difundir en forma electrónica impresa el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: _____

FECHA: _____

FIRMA: _____

Con especial dedicación a mis padres Marcos y Adriana quienes me ayudaron a llegar hasta acá

Con un cariño especial a mi Tía Mari y a mi abuelita Filo quienes siempre estuvieron ahí

A Elena por ser un gran ejemplo para mí durante todos estos años

A mi hermana Elvira que sin su apoyo y consejos probablemente jamás habría terminado

A mi hermano Marcos por haberme aguantado y acompañado durante tantos años, recordándome siempre la importancia de mantener los pies en la tierra

A mis queridos sobrinos Daniel, Omar y Brenda, por todas esas satisfacciones y esperando ser un ejemplo positivo para ustedes

Al tío Rafa y Angelita, dónde quiera que estén

A mis queridos compañeros de generación y mi grupo de amigos de la brigada V12...

A mis grandes amigos de la escuela Pedro, Enrique y Cuauhtemoc con quienes compartí grandes y gratificantes experiencias.

A mis grandes amigos de por vida Alberto y Roberto, cuya amistad incondicional me ayudo aún en los momentos más difíciles.

Agradecimientos

A David Murià por su amistad, paciencia, apoyo y orientación para llevar éste proyecto a buen término para lograr hacerlo una realidad

A mis profesores de la carrera quienes con su dedicación me indicaron el camino a seguir

A José Luis Trigos quien con sus ejemplos y amistad me ayudo a valorar como se debe a ésta hermosa carrera

A Gerardo Rodríguez Gutiérrez por su amistad y gran ayuda.

A Roberto Sánchez Ramírez quien invento y desarrolló el dispositivo para llevar a cabo las pruebas de tracción

A Roberto Gómez Martínez por facilitarme su información sobre los puentes estudiados y así conseguir el buen desarrollo de éste estudio

A David Muñoz Vizuet y Ricardo Taborda Ríos por sus consejos y comentarios, que me ayudaron a concluir con éste trabajo

Agradezco al Instituto de Ingeniería de la UNAM por todas las facilidades otorgadas.

Agradecimientos

ÍNDICE

“Determinación de las propiedades dinámicas y de las tensiones de los cables de dos puentes atirantados”

Introducción	3
Capítulo 2 Puentes Estudiados	7
2.1 Puente Coatzacoalcos II	9
2.2 Puente Tampico	14
2.3 Amortiguadores	19
Capítulo 3 Metodología para las Pruebas	21
3.1 Determinación de Tensiones	23
3.2 Determinación de Propiedades Dinámicas	31
Capítulo 4 Pruebas de Campo	43
4.1 Instrumentación	45
4.2 Programa de Pruebas	49
Capítulo 5 Registros Obtenidos y Procesamiento	51
5.1 Procesamiento de Señales de Pruebas de Vibración Ambiental	53
5.2 Procesamiento de Señales de Pruebas de Vibración Libre.	57
Capítulo 6 Resultados y Análisis	61
6.1 Frecuencias Identificadas en las Pruebas de Vibración Ambiental	63
6.2 Frecuencias Identificadas en las Pruebas de Vibración Libre	69
6.3 Comparación de Frecuencias	71
6.4 Determinación de Amortiguamientos	74
6.5 Tensiones Calculadas	82
Conclusiones	95

Referencias

99

Apéndices

Apéndice A: Frecuencias identificadas pruebas de vibración ambiental

Apéndice B: Frecuencias identificadas y amortiguamientos pruebas de vibración libre

Apéndice C: Obtención del peso de los tirantes

Apéndice D: Porcentaje del peso correspondiente a cada material utilizado

Apéndice E: Influencia de los materiales en el cálculo de la tensión

Apéndice F: Tensiones calculadas sin considerar el efecto de curvatura

Apéndice G: Tensiones calculadas considerando el efecto de curvatura

Apéndice H: Influencia de la curvatura en las tensiones calculadas

Apéndice I: Diferencias entre las tensiones calculadas, medidas y de diseño

Apéndice J: Revisión del esfuerzo permisible del acero de los tirantes

Apéndice K: Revisión del control de la estabilidad de las tensiones

Apéndice L: Historias pruebas de vibración libre

Apéndice M: Espectros pruebas de vibración libre

Apéndice N: Espectros pruebas de vibración ambiental



Introducción

INTRODUCCIÓN

México es un país que posee ríos de grandes caudales, la mayoría son parte vital de la economía de ciudades alojadas en torno a ellos, de ahí la importancia de construir un medio para poder cruzarlos y favorecer a los medios de transporte y comunicación terrestre, por esa razón se plantea la construcción de puentes, los cuales deberán ser seguras vías de comunicación.

Cuando el río a cruzar tiene un gran afluente en la mayoría de los casos el claro a librar por el puente es muy grande, por ello es necesario buscar alternativas de construcción que además de ser prácticas sean económicas; una de las mejores alternativas constructivas es un puente atirantado, por el costo y durabilidad que proporciona, tal es el caso de los puentes Tampico y Coatzacoalcos II.

Toda vez que se ha construido un puente atirantado, se deberán llevar a cabo las prácticas de mantenimiento preventivo, lo cual incluye la revisión periódica del estado en que se encuentren estructuralmente, con ese objetivo se establece un programa de pruebas que llevan al puente a trabajar bajo condiciones de diseño, y así determinar sus características y estado actual.

Un puente atirantado tiene una configuración estructural donde la carga en el tablero está balanceada por la longitud e inclinación del sistema de cables, es fundamental conocer las fuerzas reales que están actuando sobre éstos para saber que se encuentran dentro de un intervalo tolerable. Esto es por que si existiera una variación importante en la tensión que provocara una variación en las fuerzas que actúan tanto en las pilas como en el tablero del puente, podría comprometer la estabilidad de éste.

Para determinar la tensión en un cable existen diversas técnicas tales como la estimación de la tensión con gatos hidráulicos colocados en los tensores, un anillo de carga o mediciones topográficas, todas estas técnicas tienen la desventaja de que la mayoría son costosas o pueden resultar complicadas en su ejecución (Casas, 1994).

Un método relativamente sencillo, rápido y barato es identificar las frecuencias de vibración de los tirantes y para la estimación de las fuerzas aplicar la teoría de vibración de una cuerda, considerando además la masa del tirante y la longitud efectiva de éste.

Para conocer las frecuencias naturales de vibración de cada cable, se llevaron a cabo dos tipos de pruebas de vibración: vibración ambiental y vibración libre, y por medio de herramientas de cálculo se determinarán las frecuencias de vibración.

En éste trabajo se busca determinar la probable aplicación de la teoría de vibración de cuerdas, mediante las pruebas de tracción o de vibración ambiental, como una alternativa de cálculo de las fuerzas en los cables, por ésta razón se determinarán las diferencias existentes entre las tensiones calculadas con éste método y las medidas con gatos hidráulicos, que es la herramienta comúnmente utilizada para ésta tarea.

Se buscará conocer las similitudes entre las características de los tirantes de uno y otro puente, para determinar las comunes entre ellos y observar hasta que grado son similares éstas propiedades en ambos puentes.

Capítulo 2



Puentes Estudiados

2 PUENTES ESTUDIADOS

2.1 Puente Coatzacoalcos II

Para la comunicación hacia el sureste del país es necesario cruzar el río Coatzacoalcos. Antes de 1962 este cruce, se realizaba mediante un chalán instalado en el lugar conocido como Nachital, cercano a la ciudad de Coatzacoalcos.

El puente Coatzacoalcos I, en servicio desde 1962, con uno de sus tramos constituidos por una armadura de acero, es levadizo y en 1980, funcionaba una vez al día para permitir el paso de las embarcaciones hacia Minatitlán.

En 1972 ocurrió un accidente en el puente Coatzacoalcos, al chocar un barco contra una de las pilas estructurales, derrumbó dos tramos de 30 m de claro, lo cual originó la suspensión del servicio. Lo anterior ocasionó graves daños a la economía nacional y puso de manifiesto la necesidad de construir otro puente para cruzar el río, sobre todo considerando el creciente tránsito anual, que en 1980 llegó a 17,000 vehículos diarios, ocasionando fuertes demoras para cruzar el puente, esto motivó que se iniciaran los estudios necesarios para definir el proyecto del puente Coatzacoalcos II, que satisficiera la nueva demanda.

Dado que el puente en cuestión debía soportar velocidades de viento de hasta 200 km/h y que en el aspecto sísmico resistiera los efectos de dos espectros de aceleración aplicados en las tres direcciones, se optó por la construcción de un puente atirantado (fig 2.1).

El puente elegido es un puente de 1,170 m de longitud total y un tramo atirantado de 698 m, es un puente de cuatro carriles de circulación, dos para cada sentido con una barrera central dos acotamientos, el tablero es de sección cajón de concreto presforzado (Vargas Gómez, 1982).



Fig 2.1 Vista del puente Coatzacoalcos II

El sistema de tirantes en el puente Coatzacoalcos II está apoyado en dos pilas que alcanzan una altura máxima de 97 m, el atirantamiento es axial, del tipo medio abanico y está compuesto por 68 tirantes de longitudes variables.

A los tirantes se les ha otorgado una nomenclatura numérica de dependiendo de su longitud que va desde el 1 hasta el 17, siendo el número 1 para el más corto y 17 para el más largo (fig. 2.3), además se identifican como D los tirantes que van dirigidos hacia el río y como I a los dirigidos hacia las márgenes de éste (fig 2.2).

Los arreglos de tirantes del puente Coatzacoalcos II son simétricos, por lo que a cada lado de las pila la longitud del tirante será la misma, además ambas pilas tienen el mismo arreglo de tirantes, esto es que un cable del lado izquierdo de una pila tendrá la misma longitud que el cable derecho de ésta y a su vez su similar izquierdo y derecho en la otra pila.

La longitud de los tirantes oscila entre 48 m (tirantes 1) y 155 m (tirantes 17); a su vez el número de torones que conforma cada cable va desde 33 (0.005 m²) hasta 61 torones (0.0092 m²) con una densidad media de 8 t/m³. En las tablas 2.1 y 2.2 se muestran las principales características de los tirantes de cada pila del puente.

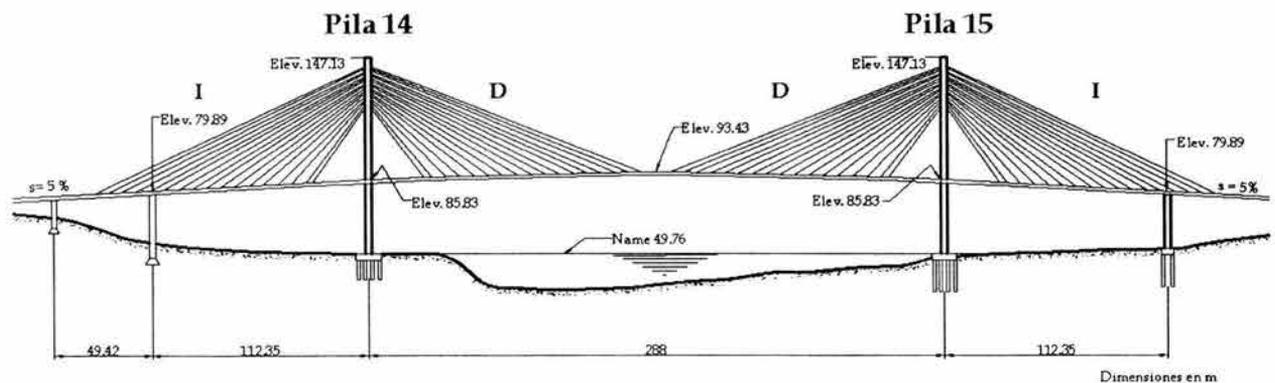


Fig 2.2 Elevación y dimensiones generales del puente Coatzacoalcos II

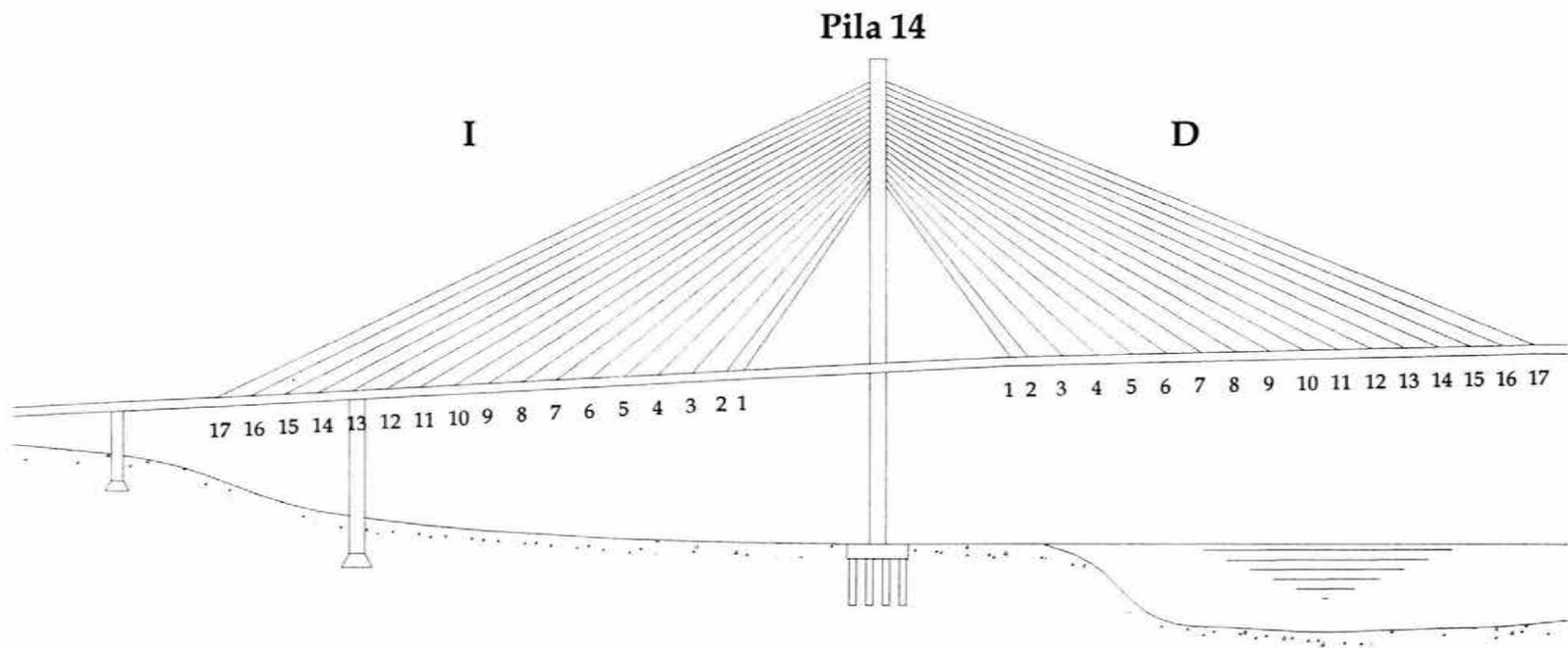


Fig 2.3 Arreglo de tirantes en el puente Coatzacoalcos II de acuerdo a su longitud

Tabla 2.1 Características de los tirantes de la pila 14 del puente Coatzacoalcos II

Tirante	Longitud	Ángulo de inclinación	Número de torones	Área de acero	Peso total del cable	Tensión Inicial
	(m)	grados		(cm ²)	(t)	(t)
T4 - 17 D	154	25	53	79.5	21	446
T4 - 16 D	147	26	56	84.0	21	540
T4 - 15 D	140	27	59	88.5	20	589
T4 - 14 D	133	27	61	91.5	19	625
T4 - 13 D	127	28	61	91.5	18	576
T4 - 12 D	119	29	61	91.5	17	536
T4 - 11 D	112	30	59	88.5	16	497
T4 - 10 D	106	31	53	79.5	15	491
T4 - 09 D	106	32	47	70.5	14	424
T4 - 08 D	99	34	39	58.5	12	373
T4 - 07 D	92	36	38	57.0	11	374
T4 - 06 D	85	38	37	55.5	10	362
T4 - 05 D	79	40	35	52.5	10	320
T4 - 04 D	66	43	34	51.0	8	313
T4 - 03 D	60	46	33	49.5	7	288
T4 - 02 D	54	51	33	49.5	6	352
T4 - 01 D	48	56	33	49.5	6	345
T4 - 01 I	48	54	33	49.5	5	255
T4 - 02 I	54	48	33	49.5	5	367
T4 - 03 I	60	44	33	49.5	6	307
T4 - 04 I	66	40	34	51.0	7	343
T4 - 05 I	79	37	35	52.5	8	343
T4 - 06 I	85	34	37	55.5	9	329
T4 - 07 I	92	32	38	57.0	10	358
T4 - 08 I	99	30	39	58.5	11	379
T4 - 09 I	106	29	47	70.5	12	427
T4 - 10 I	106	27	53	79.5	13	469
T4 - 11 I	112	26	59	88.5	14	530
T4 - 12 I	119	25	61	91.5	15	568
T4 - 13 I	127	24	61	91.5	16	639
T4 - 14 I	133	23	61	91.5	17	669
T4 - 15 I	140	23	59	88.5	18	638
T4 - 16 I	147	22	56	84.0	18	593
T4 - 17 I	154	21	53	79.5	18	461

Tabla 2.2 Características de los tirantes de la pila 15 del puente Coatzacoalcos II

Tirante	Longitud	Ángulo de inclinación	Numero de torones	Área de acero	Peso total del cable	Tensión Inicial
	(m)	grados		(cm ²)		(t)
T5 - 17 D	154	21	53	79.5	18	450
T5 - 16 D	147	22	56	84.0	18	542
T5 - 15 D	140	23	59	88.5	18	579
T5 - 14 D	133	23	61	91.5	17	617
T5 - 13 D	127	24	61	91.5	16	615
T5 - 12 D	119	25	61	91.5	15	533
T5 - 11 D	112	26	59	88.5	14	520
T5 - 10 D	106	27	53	79.5	13	492
T5 - 09 D	106	29	47	70.5	12	431
T5 - 08 D	99	30	39	58.5	11	386
T5 - 07 D	92	32	38	57.0	10	400
T5 - 06 D	85	34	37	55.5	9	354
T5 - 05 D	79	37	35	52.5	8	331
T5 - 04 D	66	40	34	51.0	7	317
T5 - 03 D	60	44	33	49.5	6	306
T5 - 02 D	54	48	33	49.5	5	299
T5 - 01 D	48	54	33	49.5	5	345
T5 - 01 I	48	56	33	49.5	6	315
T5 - 02 I	54	51	33	49.5	6	327
T5 - 03 I	60	46	33	49.5	7	299
T5 - 04 I	66	43	34	51.0	8	327
T5 - 05 I	79	40	35	52.5	10	347
T5 - 06 I	85	38	37	55.5	10	347
T5 - 07 I	92	36	38	57.0	11	342
T5 - 08 I	99	34	39	58.5	12	373
T5 - 09 I	106	32	47	70.5	14	439
T5 - 10 I	106	31	53	79.5	15	484
T5 - 11 I	112	30	59	88.5	16	528
T5 - 12 I	119	29	61	91.5	17	565
T5 - 13 I	127	28	61	91.5	18	649
T5 - 14 I	133	27	61	91.5	19	657
T5 - 15 I	140	27	59	88.5	20	631
T5 - 16 I	147	26	56	84.0	21	574
T5 - 17 I	154	25	53	79.5	21	457

2.2 Puente Tampico

Hasta antes de 1988 para transportarse entre Mata Redonda, Veracruz y Tampico, Tamaulipas, se utilizaban pequeñas embarcaciones (chalanes) y, ocasionalmente, transbordadores, que con el tiempo fueron insuficientes para atender la creciente demanda del paso vehicular. La carretera costera del golfo de México se interrumpía justo en el río Pánuco, y ante la necesidad creciente de facilitar y promover el desarrollo económico de la región e influenciado por el creciente puerto de Altamira, se decide dar continuidad permanente a las redes de transporte terrestre; por ésta razón se construyó el puente Tampico y fue inaugurado el 17 de octubre de 1988.



Fig 2.4 Vista del puente Tampico

El puente Tampico fue el segundo puente atirantado construido en México (fig 2.4). Se localiza en una zona de gran actividad económica agropecuaria y de pesca, así como de explotación e industrialización de hidrocarburos.

La longitud total del puente es de 1543 m con un claro central atirantado de 360 m de acero de sección transversal cajón de tipo ortotrópico; el resto de la superestructura es de concreto pretensado de sección cajón. El ancho total es de 18.1 m y aloja cuatro carriles de circulación con una barrera central y dos acotamientos (Gómez Martínez, *et al*, 1999).

Las pilas que sirven de apoyo a los tirantes tienen una altura de 119 m, el atirantamiento es axial dispuesto en forma de medio abanico, formado por 44 tirantes de longitud variable.

De igual manera que en el puente Coatzacoalcos II, a los tirantes del puente Tampico se le otorgan nombres de acuerdo con su longitud y son mediante letras del alfabeto latino, desde la B hasta la L (fig. 2.6), siendo los tirantes B los más cortos y L los más largos, además se identifican como Tierra (T) o Agua (A) dependiendo del lado del puente hacia el cual están dirigidos (fig. 2.5).

La longitud de éstos tirantes oscila entre 58 (tirantes B) y 206 m (tirantes L); a su vez el número de torones que conforman un tirante varía entre 33 (0.005 m²) y 60 (0.008 m²) con una densidad media de 7.85 t/m³ por cable y alojados en tubos de polietileno de alta densidad e inmersos en cera de alto punto de fusión (Gómez Martínez, *et al*, 1999). En las tablas 2.4 y 2.5 se muestran algunas de las características más importantes de los tirantes de cada pila del puente Tampico.

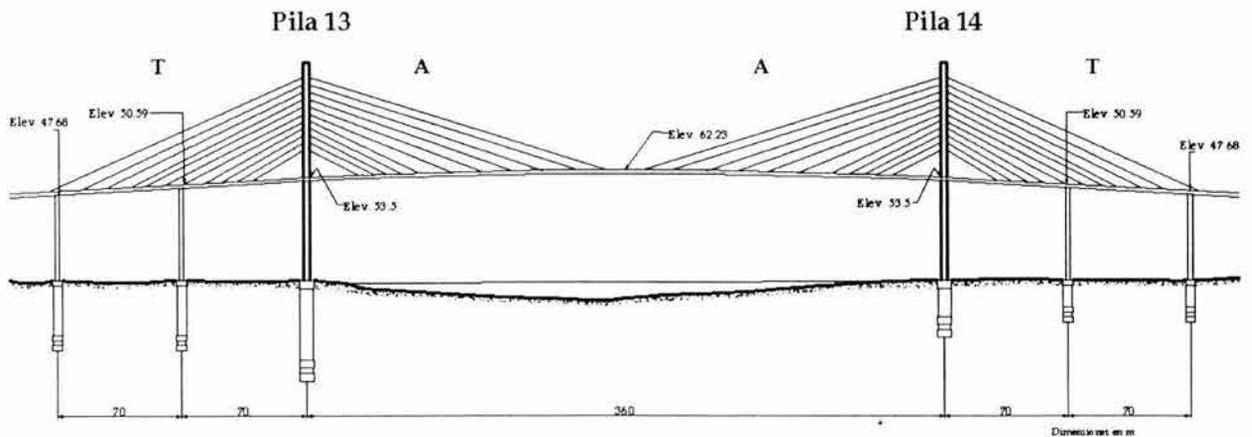


Fig 2.5 Elevación y dimensiones generales del puente Tampico

Pila 13

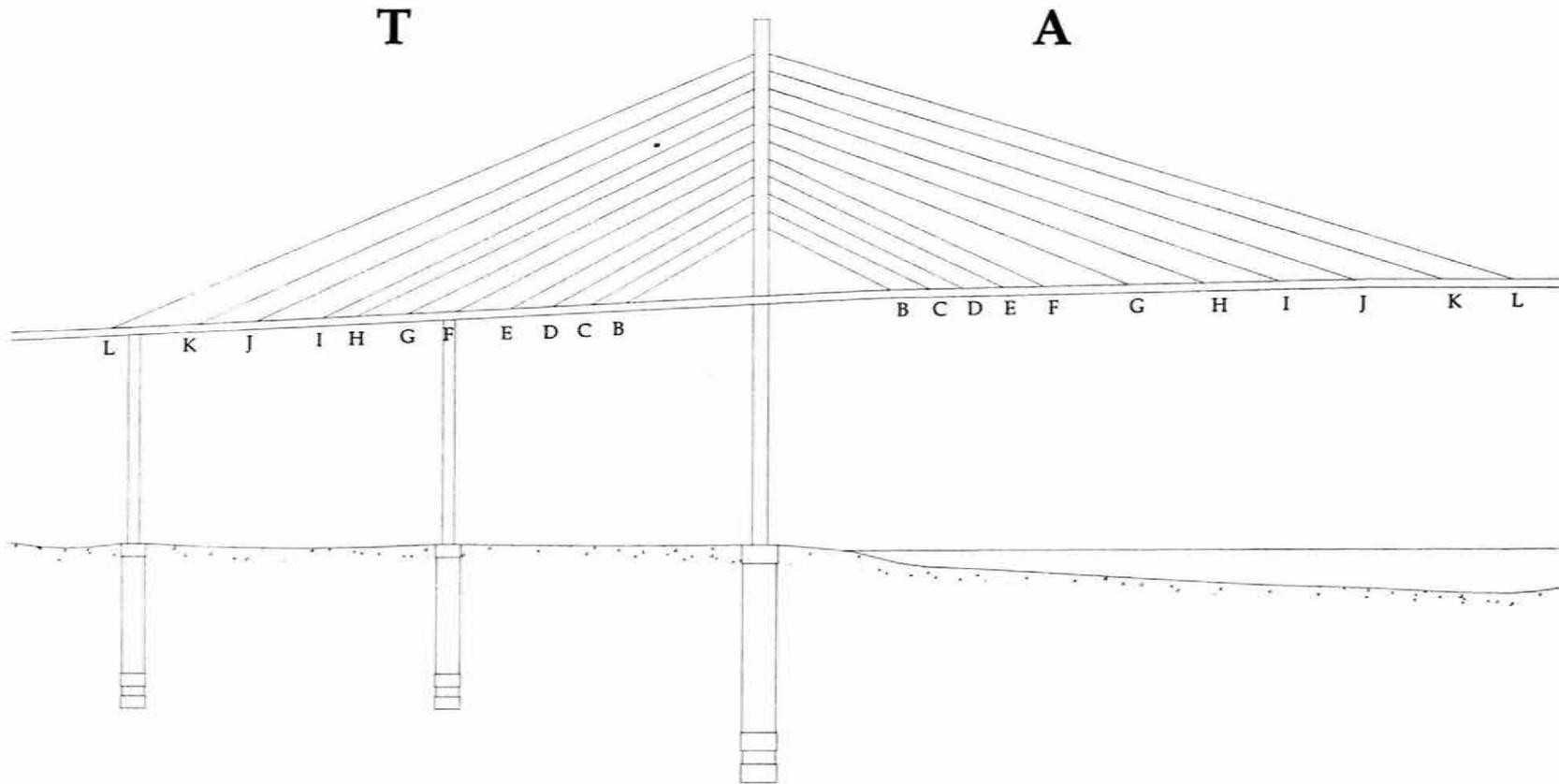


Fig 2.6 Arreglo de tirantes en el puente Tampico de acuerdo a su longitud

Tabla 2.3 Características de los tirantes de la pila 13 del puente Tampico

Tirante	Longitud	Ángulo de inclinación	Número de torones	Área de acero	Peso total del cable	Tensión de Diseño
	(m)	Grados		(cm ²)	(t)	(t)
P13 - L T	211	22	60	90.0	21	574
P13 - K T	196	23	57	85.5	20	456
P13 - J T	181	24	51	76.5	17	389
P13 - I T	167	24	49	73.5	15	334
P13 - H T	152	25	47	70.5	13	281
P13 - G T	139	26	45	67.5	12	308
P13 - F T	125	28	42	63.0	10	305
P13 - E T	111	29	39	58.5	9	284
P13 - D T	96	32	36	54.0	6	243
P13 - C T	83	35	33	49.5	5	228
P13 - B T	69	39	36	54.0	4	308
P13 - B A	62	40	36	54.0	4	365
P13 - C A	73	35	33	49.5	4	205
P13 - D A	86	31	36	54.0	5	244
P13 - E A	95	29	39	58.5	7	288
P13 - F A	108	27	42	63.0	10	280
P13 - G A	120	25	45	67.5	10	290
P13 - H A	132	24	47	70.5	13	293
P13 - I A	144	23	49	73.5	13	299
P13 - J A	156	22	51	76.5	14	393
P13 - K A	169	22	57	85.5	15	464
P13 - L A	182	21	60	90.0	17	560

Tabla 2.4 Características de los tirantes de la pila 14 del puente Tampico

Tirante	Longitud	Ángulo de inclinación	Número de torones	Área de acero	Peso total del cable	Tensión de Diseño
	(m)	Grados		(cm ²)	(t)	(t)
P14 - L T	182	21	60	90.0	18	593
P14 - K T	169	22	57	85.5	16	475
P14 - J T	156	22	51	76.5	14	408
P14 - I T	144	23	49	73.5	12	353
P14 - H T	132	24	47	70.5	13	300
P14 - G T	120	25	45	67.5	11	327
P14 - F T	108	27	42	63.0	10	274
P14 - E T	96	29	39	58.5	7	283
P14 - D T	86	31	36	54.0	4	252
P14 - C T	73	35	33	49.5	4	247
P14 - B T	62	40	36	54.0	4	367
P14 - B A	68	40	36	54.0	4	384
P14 - C A	81	35	33	49.5	5	218
P14 - D A	85	32	36	54.0	6	263
P14 - E A	110	30	39	58.5	9	255
P14 - F A	124	28	42	63.0	9	278
P14 - G A	139	26	45	67.5	11	293
P14 - H A	153	25	47	70.5	14	312
P14 - I A	167	24	49	73.5	15	318
P14 - J A	182	24	51	76.5	18	412
P14 - K A	197	23	57	85.5	20	483
P14 - L A	211	22	60	90.0	22	579

2.3 Amortiguadores

Debido a la flexibilidad propia de los cables y la facilidad de excitación de éstos, muchos puentes atirantados tienen problemas de vibración, conociendo la baja capacidad estructural de los cables de amortiguar éstas vibraciones (Aschrafi, *et al*, 1983), resulta evidente la necesidad de emplear un sistema de amortiguamiento para los tirantes que favorezca la reducción de vibraciones y de esa forma controlar éste problema.

En el caso del puente Tampico se utilizaron amortiguadores a base de neopreno (fig 2.7), que en la parte superior tienen una capa delgada de neopreno, que atenúa los movimientos del cable (Leonhardt y Zellner, 1991), los cuales podrían ser una molestia para el tránsito regular del puente.

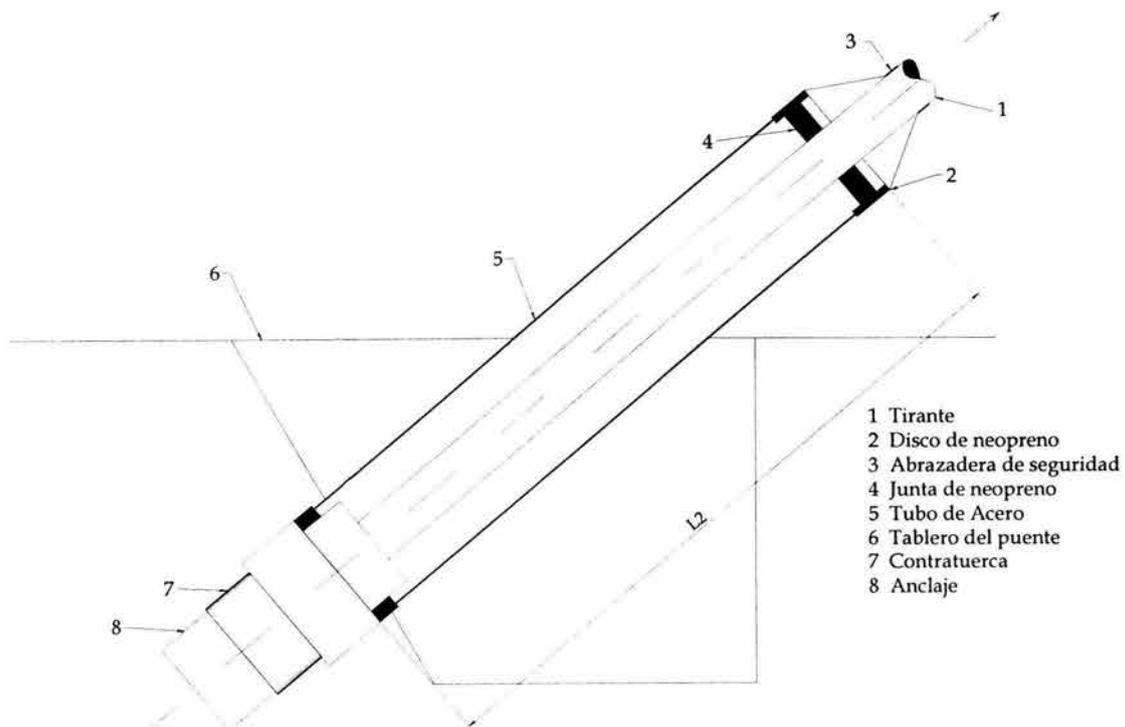


Fig 2.7 Amortiguador utilizado en el anclaje de los tirantes del puente Tampico

Para el puente Coatzacoalcos se utilizó un sistema de amortiguamiento ligeramente distinto, aunque se conserva la base de Neopreno, se implemento un sistema adicional de amortiguadores hidráulicos (fig. 2.8).

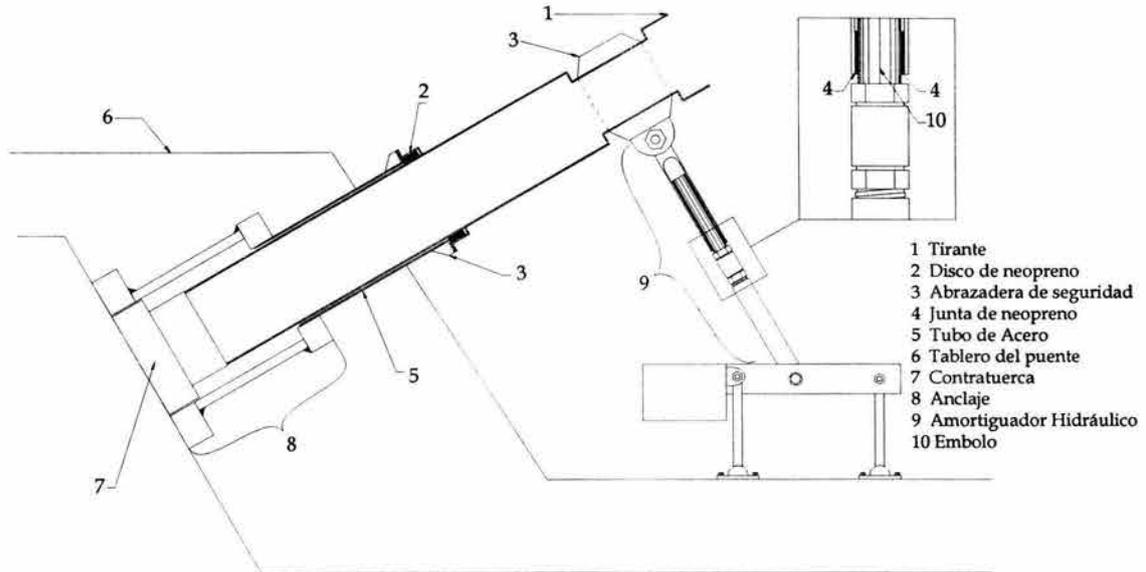


Fig 2.8 Amortiguador utilizado en el anclaje de los tirantes del puente Coatzacoalcos II

Capítulo 3



Metodología para las Pruebas

3 METODOLOGÍA PARA LAS PRUEBAS

3.1 Determinación de tensiones.

Debido las características de continuidad que tienen los tirantes de los puentes estudiados, esto es masa por unidad de longitud y comportamiento elástico lineal, se puede asumir que el comportamiento de éstos es similar al de una cuerda al momento de vibrar, aunque se deberán tomar algunas medidas ya que el comportamiento no es exactamente el mismo.

Una cuerda flexible de masa por unidad de longitud (m) esta trabajando bajo una tensión T . Si se asume que la deflexión lateral y de la cuerda es pequeña, la variación en la tensión debida a dicha deflexión es prácticamente nula y por consiguiente puede despreciarse.

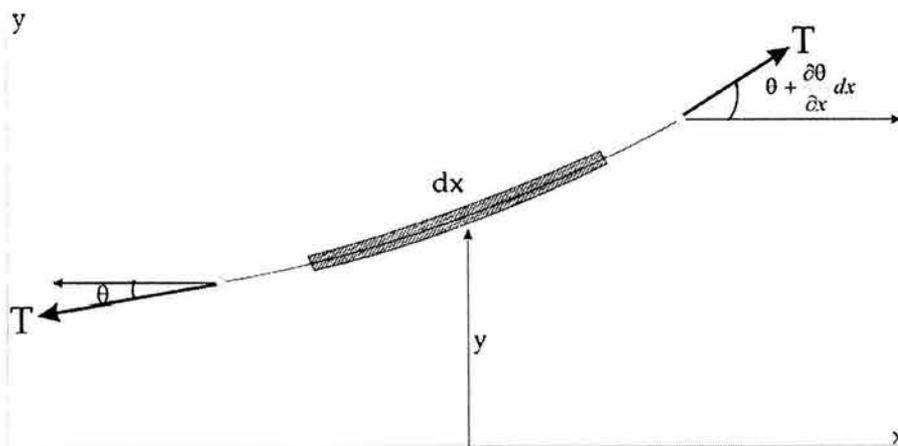


Fig 3.1 Elementos de una cuerda

En la fig 3.1 se muestra el diagrama de cuerpo libre de una fracción de la longitud de un cable dx . Si se asume que las pendientes y deflexiones son pequeñas, la ecuación de movimiento en dirección "y" se escribe

$$T \left(\theta + \frac{\partial \theta}{\partial x} dx \right) - T \theta = m dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

(3.1)

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{m}{T} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

Dado que la pendiente de la cuerda es $\theta = \partial y / \partial x$, la ecuación anterior se reduce a

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

(3.2)

Dónde $c = \sqrt{T/m}$, se expresa como la velocidad de propagación de onda a través de la cuerda. Un método de resolver la ecuación diferencial es la separación de variables, se expresa:

$$y(x, t) = Y(x) G(t) \quad (3.3)$$

Substituyendo en la ec. 3.2

$$Y \frac{d^2 Y}{dx^2} = \frac{1}{c^2} G \frac{d^2 G}{dt^2} \quad (3.4)$$

Se observa que el lado izquierdo de la ecuación es independiente de t, mientras que el lado derecho es independiente de x. Ya que cada lado debe ser una constante, si ambos lados se igualan a $-(\omega/c)^2$, se obtendrán dos ecuaciones diferenciales ordinarias

$$\frac{d^2 Y}{dx^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 Y = 0 \quad (3.5)$$

$$\frac{d^2 G}{dt^2} + \omega^2 G = 0 \quad (3.6)$$

Con la solución general

$$Y = A \sin \frac{\omega}{c} x + B \cos \frac{\omega}{c} x \quad (3.7)$$

$$G = C \sin \omega t + D \cos \omega t \quad (3.8)$$

Las constantes arbitrarias A, B, C, y D se calculan mediante las condiciones de frontera, dado que los tirantes se encuentran anclados entre dos puntos con una distancia l entre ellos, las condiciones de frontera son $y(0,t) = y(l,t) = 0$, de ahí se conoce el valor de B igual a cero y la solución se escribe

$$y = (C \sin \omega t + D \cos \omega t) \sin \frac{\omega}{c} x \quad (3.9)$$

$$\sin \frac{\omega l}{c} = 0$$

o

$$\frac{\omega_n l}{c} = \frac{2\pi}{\lambda} = n\pi, \quad \dots \quad n = 1, 2, 3, \dots, N$$

dónde N es el número de modos

Si se conoce que $\lambda = c/f$ es la amplitud de onda y f es la frecuencia de oscilación, y n corresponde a cada modo normal de vibración se obtiene de la ecuación anterior (Thomson, 1974):

$$f_n = \frac{n}{2l} c = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{T}{m}} \quad n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3.10)$$

Dado que la frecuencia natural está asociada al primer modo de vibración ($n = 1$), la tensión se puede deducir de la ecuación 3.10 de la forma:

$$T = 4l^2 f^2 \frac{w}{g} \quad (3.11)$$

dónde

- T tensión en el cable (t)
- l longitud efectiva o libre del cable (m)
- f frecuencia natural de vibración del cable (Hz)
- w peso del cable por unidad de longitud (t/m)
- g aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

La ecuación anterior se puede expresar tomando en cuenta el ángulo de inclinación del tirante de la manera siguiente (Leonhard, 1988):

$$T = \frac{H}{\cos \alpha} \quad (3.12)$$

$$H = 4L^2 f^2 \frac{w}{g}$$

Dónde H es el componente horizontal de la tensión, L es la longitud horizontal entre los nodos del tirante y α es el ángulo de inclinación del cable (fig 3.2)

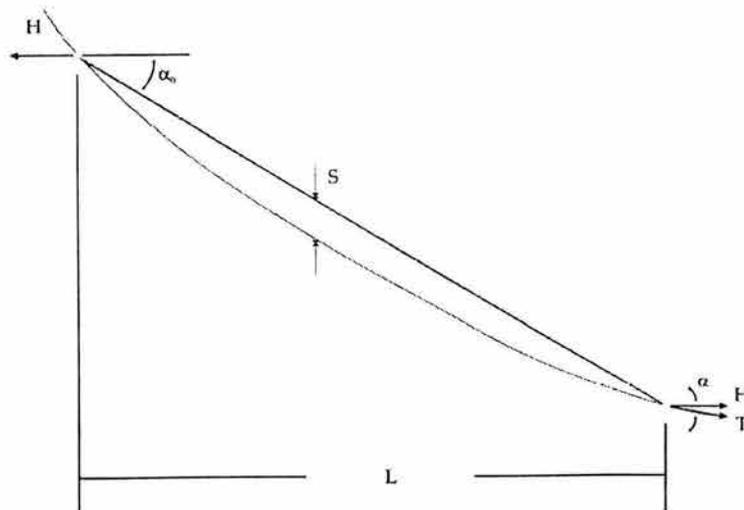


Fig 3.2 Definición de los componentes en un tirante inclinado

Si la teoría es aplicable, existe una correlación lineal entre los modos de vibrar y las frecuencias naturales (fig 3.3), lo cual resulta en un llamado modelo sin dispersión, en ambos casos, las principales aseveraciones de la teoría son:

- El cable es perfectamente flexible o posee una rigidez que puede ser despreciada, como consecuencia se puede asumir que en los apoyos de los tirantes se tiene un comportamiento similar al de una articulación.
- No existe ningún tipo de desplazamiento en los puntos dónde se encuentra anclado el cable, esto es que la posibilidad de que el cable se acople a los mismos modos de vibrar que tiene el tablero del puente o de la pila, sea nula o mínima.
- Las deflexiones transversales de los tirantes, no generan una tensión adicional al cable, es decir el cable es inextensible.

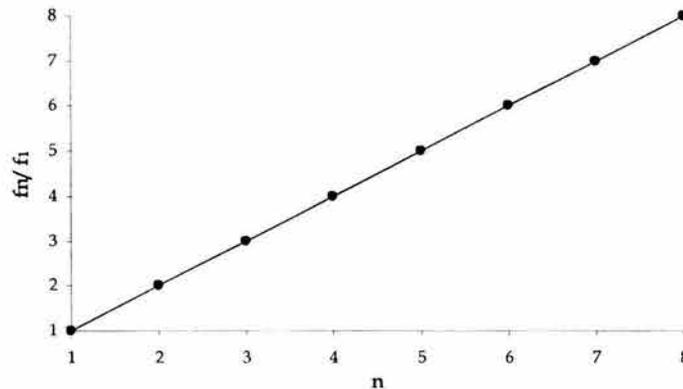


Fig 3.3 Relación entre el número de modo (n) y el cociente de su frecuencia entre la frecuencia fundamental del cable (f_n/f_1).

Si existiera un desplazamiento relativo entre los puntos de anclaje (debido a una flexión del pilón o del tablero), las frecuencias naturales de vibración de los modos inferiores, varían con respecto a cuando se haya perfectamente anclado, lo que se traduce en distorsión del modelo lineal.

Si la rigidez del cable no puede ser despreciada o es muy grande, las frecuencias de los modos superiores son mayores que las estimadas en la teoría de vibración de cuerdas. Un estudio realizado por De Mars y Hardy (1985), concluye que la ec 3.11 puede ser aplicada con un excelente grado de confiabilidad si las primeras siete frecuencias son medidas con una precisión de 0.5 % y además se alinean como se observa en la fig 3.3 (Casas, 1994).

El problema de llevar a cabo el cálculo de la tensión mediante las ecuaciones 3.11 y 3.12 es que en éstas no se considera el efecto causado por la curvatura de los tirantes y los resultados no son confiables cuando ésta (provocado por una baja tensión o las características geométricas del tirante) se encuentra muy pronunciada, por ésta razón resulta conveniente buscar una ecuación que incluya éstos efectos.

Se introduce el parámetro adimensional $\varepsilon = \sqrt{T l / EI}$, dónde T, EI y l son la tensión inicial, la rigidez a la flexión y la longitud vibrante, respectivamente.

Para llevar a cabo la aplicación del parámetro anterior se considera que el factor lineal de curvatura es mucho menor de uno ($\gg 1$), éste se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{s}{L_0} \quad (3.13.a)$$

$$s = \frac{g}{32 f^2} \quad (3.13.b)$$

Donde δ es el factor lineal de curvatura, L_0 es la proyección en x de la longitud del cable y s es el valor de la curvatura del cable (fig 3.2).

Si se toma en cuenta únicamente la vibración del cable en un solo plano, despreciando la vibración lateral, se establece la ecuación dinámica de movimiento de la forma siguiente (Shimada, 1994)

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} - h(t) \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad (3.14)$$

Dónde $v(x,t)$ es la deflexión en el eje y debida a la vibración, y $h(t)$ es la fuerza que se deriva de la vibración del cable; si $v \ll y$, la geometría del cable se puede expresar:

$$y = \frac{4d}{l^2} x(l-x) \quad (3.15)$$

Substituyendo en 3.14:

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = \frac{8d}{l^2} h(t) \quad (3.16)$$

Cuando la fuerza T es pequeña y la curvatura es relativamente grande, los efectos de la fuerza $h(t)$ no pueden ser despreciados para el primer modo de vibración, sin embargo para los modos de segundo o mayor orden, el efecto es mínimo y puede ser despreciado, y la ec 3.16 se rescribe

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} - T \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial x^2} + \frac{w}{g} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = 0$$

La ec 3.16 coincide con la ecuación dinámica de una viga con carga axial de tensión (Humar, 1990), teniendo la separación de variables e introduciendo la frecuencia circular del sistema se tiene

$$EI \frac{d^4 v^*(x)}{dx^4} - T \frac{\partial^2 v^*(x)}{dx^2} - \omega^2 \frac{w}{g} = 0 \quad (3.17)$$

La solución general de 3.17 se puede expresar:

$$v^*(x) = A_1 \sinh(\beta x) + B \cosh(\beta x) + C \sin(\alpha x) + D \cos(\alpha x) \quad (3.18)$$

De dónde:

$$\alpha^2 = \sqrt{(\xi^4 + \gamma^4 - \xi^2)}; \beta^2 = \sqrt{(\xi^4 + \gamma^4 + \xi^2)}$$

Con $\xi^2 = T/2EI$; y $\gamma^4 = w\omega^2/gEI$

Asumiendo que ambos lados del tirante están anclados, se obtiene la ecuación para vibración libre

$$2\alpha l \beta l (1 - \cos \alpha l \cosh \beta l) + (\beta l^2 - \alpha l^2) \sin \alpha l \sinh \beta l = 0 \quad (3.19)$$

Debido a que la ec 3.19 es trascendental, las fuerzas en los cables no pueden ser obtenidas directamente de las frecuencias medidas. Cuando las características dinámicas de un cable son similares a las de una cuerda, normalmente el parámetro adimensional de curvatura ε es alto, se establece un parámetro adimensional η que depende directamente del factor ε de la forma:

$$\eta_1 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 2.2}; \quad (\varepsilon \geq 17) \quad (3.20)$$

$$\eta_1 = 1.075 \sqrt{1 + \left(\frac{6.8}{\eta}\right)^2}; \quad (6 \leq \varepsilon \leq 17) \quad (3.21)$$

$$\eta_2 = \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 2.2}; \quad (\varepsilon \geq 60) \quad (3.22)$$

$$\eta_2 = 0.985 \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 3.1}; \quad (17 \leq \varepsilon \leq 60) \quad (3.23)$$

Dónde 3.20 y 3.21 son ecuaciones aproximadas para el primer modo y 3.22 y 3.23 para el segundo modo (Namita, *et al*, 1996).

Finalmente, basándose en las ecuaciones anteriores, se establecen las ecuaciones para la estimación de las fuerzas del cable, tomando en cuenta el parámetro ε y calculando la flecha.

El factor de flecha se establece

$$\Gamma = \sqrt{\frac{wl}{128EA\delta^3 \cos^5 \theta} \left(\frac{0.31\varepsilon + 0.5}{0.31\varepsilon - 0.5} \right)} \quad (3.24)$$

Dónde EA es la rigidez a la tensión y θ es el ángulo de inclinación del tirante.

Para los casos dónde se utiliza la frecuencia natural de primer orden (con flechas pequeñas $3 \leq \Gamma$), se tienen las ecuaciones

$$T = \frac{4w}{g} (f_1 l)^2 \left[1 - 2.20 \frac{C}{f_1} - 0.55 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right]; \quad (\varepsilon \geq 17) \quad (3.25)$$

$$T = \frac{4w}{g} (f_1 l)^2 \left[0.865 - 11.60 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right]; \quad (6 \leq \varepsilon \leq 17) \quad (3.26)$$

$$T = \frac{4w}{g} (f_1 l)^2 \left[0.828 - 10.50 \left(\frac{C}{f_1} \right)^2 \right]; \quad (0 \leq \varepsilon \leq 6) \quad (3.27)$$

Con $C = \sqrt{\frac{EIg}{wl^4}}$

Cuando se utiliza la frecuencia del segundo modo, esto es para una flecha relativamente grande ($\Gamma \leq 3$), es conveniente utilizar las siguientes ecuaciones

$$T = \frac{w}{g} (f_2 l)^2 \left[1 - 4.40 \frac{C}{f_2} - 1.10 \left(\frac{C}{f_2} \right)^2 \right]; \quad (\varepsilon \geq 60) \quad (3.28)$$

$$T = \frac{w}{g} (f_2 l)^2 \left[1.03 - 6.33 \frac{C}{f_2} - 1.58 \left(\frac{C}{f_2} \right)^2 \right]; \quad (17 \leq \varepsilon \leq 60) \quad (3.29)$$

$$T = \frac{w}{g} (f_2 l)^2 \left[0.882 - 85.0 \left(\frac{C}{f_2} \right)^2 \right]; \quad (0 \leq \varepsilon \leq 17) \quad (3.30)$$

En los casos extremos dónde se deban utilizar los modos superiores al segundo (cables muy largos), se utiliza la ecuación

$$T = \frac{4w}{n^2 g} (f_n l)^2 \left[1 - 2.20 \frac{nC}{f_n} \right]; \quad (\varepsilon \geq 200) \quad (3.31)$$

Las ecuaciones anteriores están expresadas en modo algebraico y las tensiones pueden ser calculadas de forma directa con las frecuencias naturales identificadas. Las ecuaciones pueden ser aplicadas para cualquier cable sin importar la longitud o las fuerzas de éste, siempre que sea posible encontrar el primer y segundo modo de vibración de éste (Namita, *et al*, 1996).

Debido a que un cable muy largo no puede ser fácilmente excitado de forma artificial, la aplicación de la ec 3.31 resulta muy conveniente dado que encontrar la frecuencia de los modos superiores resulta más sencillo.

3.2 Determinación de propiedades dinámicas

En el análisis y en el diseño de estructuras como los puentes Coatzacoalcos II y Tampico, se requiere formular modelos matemáticos que funjan como herramientas para poder revisar el comportamiento de éstos a lo largo de su vida útil.

Para el caso de los tirantes en puentes atirantados, el número de grados de libertad es tan amplio como todas las fuerzas que actúan sobre éstos y el análisis de cada uno requiere un especial cuidado, en este trabajo se presenta solamente el análisis de los amortiguamientos y como tal se tomará en cuenta solamente un grado de libertad, ya que no se consideran los efectos de vibración lateral, teniendo las pruebas de vibración ambiental y las pruebas de vibración libre como apoyo.

Pruebas de Vibración Ambiental

El método de vibración ambiental consiste en medir las vibraciones en el puente producidas por el tránsito de vehículos cuyo peso no excediera 15 t y la acción del viento con velocidades inferiores a 5 m/s.

La conveniencia de éste método es por la facilidad y rapidez que proporciona para obtener datos. Si se efectúa la correcta interpretación de la información que se obtiene es posible determinar las frecuencias naturales de vibración. Se debe recalcar que la aplicación de este método queda limitada al comportamiento lineal de estructuras para desplazamientos pequeños (Gómez Martínez, *et al*, 1999).

En el análisis de fenómenos reales, las vibraciones que se producen no pueden ser descrita fácilmente en el tiempo por una función matemática; en éste caso la vibración es llamada aleatoria, es decir, que las ordenadas de las señales produce la vibración no puede predecirse con certeza, sino con cierta probabilidad de que ocurran.

Debido a éste carácter aleatorio, para poder describir su comportamiento, se les asocia una función de probabilidades. Este tipo de proceso se le llama estocástico y no le corresponde el registro de una sola señal sino todos los que se origina al reproducir bajo las mismas condiciones un fenómeno (Bendat y Piersol, 1989).

Para llevar a cabo el análisis de señales que se producen en una vibración aleatoria es necesario recurrir a herramientas matemáticas de manera que su interpretación sea sencilla de revisar.

La representación matemática de una señal de vibración respecto al tiempo, resultaría muy compleja e intentar llevarlo a cabo resultaría injustificado, debido a la conveniencia de ésta, se utiliza la transformada finita de Fourier, esto con el fin de poder evaluar la señal y a su vez expresar la función original en una suma de funciones más sencillas.

En el cálculo de las señales se utilizan métodos que permitan optimizar el tiempo de cálculo por esa razón se utilizan los algoritmos de la transformada rápida de Fourier (TRF).

La evaluación de la transformada de Fourier para las señales de tiempo se lleva a cabo de la forma siguiente. Siendo $x(t)$ la señal registrada en el dominio del tiempo, la transformada de Fourier, para esta función se establece como

$$X(f) = \int_0^T x(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (3.32)$$

dónde

- T duración de la señal,
- i -1
- f frecuencia de análisis

De acuerdo con las propiedades de un exponencial la ecuación anterior se puede escribir

$$X(f) = \int_0^T x(t) \cos 2\pi ft dt - i \int_0^T x(t) \sin 2\pi ft dt$$

Lo cual muestra que la función estará compuesta de una parte real y de una parte imaginaria:

$$X(f) = R(f) + i I(f)$$

y a su vez las amplitudes del espectro están dadas por la expresión:

$$X(f) = \left\{ [R(f)]^2 + [I(f)]^2 \right\}^{0.5} \quad (3.33)$$

Lo cual implica obtener el módulo de un número complejo, la ventaja de conocer ésta expresión será la posibilidad de aplicar un suavizado a las ordenadas espectrales y de esa forma poder disminuir los efectos que provocan el ruido instrumental y el cálculo numérico.

El auto espectro de una señal se puede calcular de acuerdo con la expresión:

$$S_{xx}(f) = X^*(f) X(f) \quad (3.34)$$

De la cual se define $X^*(f)$ como el espectro conjugado de Fourier, esto es

$$X(-f) = X^*(f)$$

Debido a que el espectro de amplitud es una función simétrica, implica que:

$$S_{xx}^*(f) = S_{xx}(-f)$$

y de esa forma se define al espectro de potencia de la forma:

$$G_{xx}(f) = \begin{cases} 2S_{xx}(f) & ; f > 0 \\ S_{xx}(f) & ; f = 0 \\ 0 & ; f < 0 \end{cases} \quad (3.35)$$

En el registro de las pruebas de vibración ambiental, la señal se divide en eventos y para asegurar el registro de todas las frecuencias de interés del tirante, deberán tener una duración superior a 20 veces el mayor periodo fundamental de vibración de éstos (Murià Vila y González, 1995).

Por otra parte los espectros finales se obtienen mediante el cálculo del promedio de los espectros obtenidos para cada evento, buscando una resolución de frecuencia Δf , congruente con la menor frecuencia de interés f , es decir $f/\Delta f \geq 10$ (Murià Vila y Gonzalez, 1995), y garantizar un amplio grado de precisión en el procesamiento de los datos (fig 3.4).

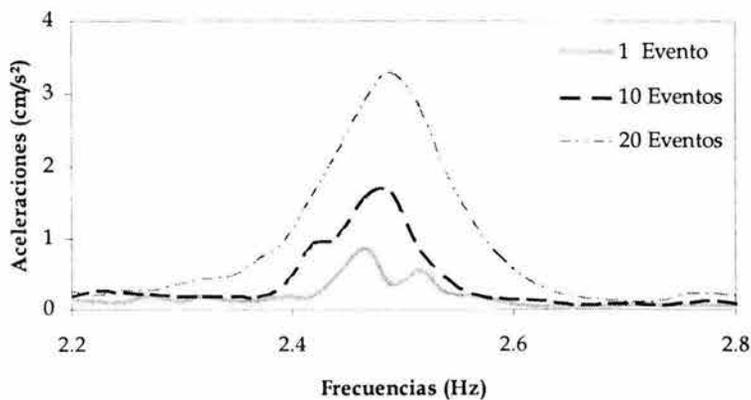


Fig 3.4 Espectro calculado con diferente número de eventos

Una vez conseguidos los espectros se identifican todas aquellas frecuencias que probablemente sean características del tirante (fig 3.5), la primera frecuencia identificada es generalmente la frecuencia fundamental de vibración de éste.

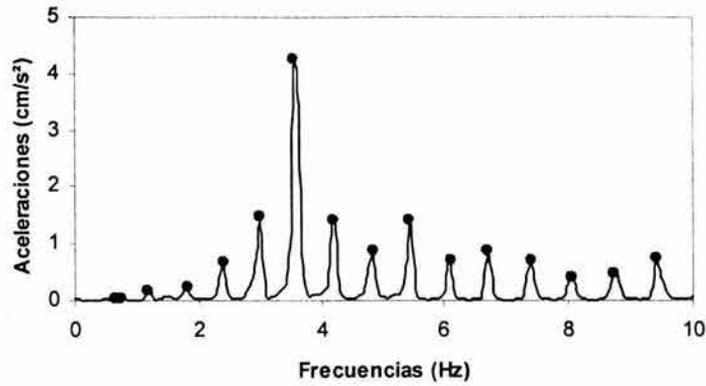


Fig 3.5 Identificación de las frecuencias más representativas

Para obtener la frecuencia natural de cada cable, se utilizan todas aquellas identificadas, suponiendo un estado ideal de la teoría de vibración de tirantes y un comportamiento lineal.

Se deberá calcular el factor de correlación lineal entre la frecuencia de los modos superiores y la primera frecuencia natural, se calcula además la relación de la frecuencia superior con el número de modo y frecuencia media.

$$\eta_n = \frac{f_n}{f_1} \quad (3.36)$$

$$f_2 = \frac{f_n}{n} \quad (3.37)$$

$$f_{\text{media}} = \frac{\sum_{n=2}^N \frac{f_n}{n}}{N} \quad (3.38)$$

Dónde f_n es la frecuencia fundamental de n-ésimo modo superior y N es el número total de frecuencias identificadas, finalmente se obtiene la dispersión mediante la desviación estándar

$$\sigma = \sqrt{\frac{N \sum_{n=1}^N \eta_n^2 - \left(\sum_{n=1}^N \eta_n \right)^2}{N(N-1)}} \quad (3.39)$$

Vibración Libre

Todo sistema estático-lineal es capaz de vibrar libremente, el objetivo de las pruebas de vibración libre consiste en mover a la estructura de su posición de equilibrio mediante la aplicación de una fuerza y dejarla vibrar libremente.

Para hacer vibrar un tirante se requiere provocar un desplazamiento inicial que permita que éste vibre libremente, este desplazamiento se logra anclando un cable a éste y a un punto fijo fuera de la estructura (puente Coatzacoalcos II) o mediante una excitación dentro de la estructura amarrando un cable al tirante y provocando la excitación mediante un peso hasta entrar en resonancia con él (puente Tampico). Una vez conseguido éste objetivo se procede a dejarlo vibrar libremente.

La utilidad de la prueba de vibración libre radica en que la disminución de las aceleraciones, hacia una condición de reposo, permite ajustar una curva, la cual se utiliza para definir el amortiguamiento de los tirantes. También se emplea el criterio basado en el resultado de la suma o resta de las señales registradas y con él, poder también identificar frecuencias características de vibración (Murià-Vila, *et al*, 1991).

Se ha comprobado que el amortiguamiento más representativo está asociado con la frecuencia fundamental de vibración del tirante (Clough y Penzien, 1975), por ésta razón se aplica un filtrado que permita analizar solamente la frecuencia fundamental, cabe destacar que el calcular los amortiguamientos para las señales filtradas a frecuencias superiores o incluso sin realizar filtrado alguno, otorgarán resultados confiables, aunque la dificultad para realizar el ajuste será mayor.

Una vez filtrada la señal, en el dominio del tiempo se obtendrán los puntos máximos, y se procederá al ajuste de la curva a dichos puntos, utilizando para éste fin el método de regresión lineal, asumiendo que la curva se comporta de forma exponencial tal que se puede definir como una recta de la forma $\ln y = \ln a + bx$, donde y será la amplitud de onda y x el valor en el tiempo.

Decremento Logarítmico y Amortiguamiento.

Se sabe que todas las estructuras reales están sujetas a un amortiguamiento relacionado de manera directa a sus frecuencias naturales. Se puede representar tal amortiguamiento como un factor, de acuerdo con la ecuación dinámica de equilibrio esto es

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) = P(t) \quad (3.40)$$

Dónde P (t) es la suma de todas las fuerzas externas, pero para el caso de la vibración libre con amortiguamiento (VLCA) se establece que P(t) = 0, luego

$$M \ddot{x}(t) + C \dot{x}(t) + K x(t) = 0 \quad (3.40.1)$$

Dónde C es el factor de amortiguamiento, el cual para el análisis lineal se considerará constante, si se divide la ec. 3.40.1 entre la masa, ésta se puede escribir de la forma siguiente

$$\ddot{x}(t) + \frac{c}{m} \dot{x}(t) + \omega^2 x(t) = 0 \quad (3.41)$$

Conociendo que $\omega^2 = K / M$

La solución tradicional para la ec 3.41 resulta

$$x(t) = e^{st} \quad (3.42)$$

Dónde s es una constante que substituida en la ecuación diferencial, se tiene

$$(ms^2 + cs + k)e^{st} = 0$$

La cual se satisface por todos los valores de t cuando se iguala a la ec 3.42

$$s^2 + \frac{c}{m}s + \omega^2 = 0 \quad (3.43)$$

De acuerdo con su forma, la ecuación de segundo grado (ec 3.43), conocida como la ecuación característica, posee dos raíces:

$$s_{1,2} = \frac{-\frac{c}{m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{m}\right)^2 - 4\omega^2}}{2} \quad (3.44)$$

Si el radical resulta igual a cero, entonces de la ec 3.19 se tiene

$$\left(\frac{c}{m}\right)^2 = 4\omega^2 \quad (3.45)$$

$$C_c = 2m\omega$$

Dónde C_c es el factor de amortiguamiento crítico, esto es el mínimo factor en que ocurren las oscilaciones en la respuesta real de la estructura.

Si se tiene:

$$h = \frac{C}{C_c} = \frac{C}{2m\omega}$$

La ec 3.44 se puede escribir:

$$s_{1,2} = \frac{-2h\omega \pm \sqrt{(2h\omega)^2 - 4\omega^2}}{2} \quad (3.46)$$

Si el resultado del radical es mayor a cero ($h > 1$), se conoce como sobreamortiguado y no existe posibilidad alguna que oscile.

Para el caso en que el valor del radical es menor a cero ($h < 1$), se convierte en una expresión con números imaginarios, esto es

$$\sqrt{1-h^2} \omega i = \omega' i \quad (3.47)$$

$$\omega' = \omega \sqrt{1-h^2}$$

Dónde i es un número imaginario con valor $i = \sqrt{-1}$ y ω' es la frecuencia circular del movimiento en decremento con un comportamiento logarítmico.

Finalmente la solución general para la ec 3.41 resulta

$$x(t) = e^{-h\omega t} (A \text{Sen}(\omega' t) + B \text{Cos}(\omega' t)) \quad (3.48)$$

$$x'(t) = e^{-h\omega t} [(A\omega' \text{Cos}\omega' t - B\omega' \text{Sen}\omega' t) + (A \text{sen}\omega' t + B \text{Cos}\omega' t)](-h\omega) e^{-h\omega t} \quad (3.49)$$

Mediante condiciones iniciales en el desplazamiento ($d(t)$) y velocidad ($d'(t)$), se pueden calcular los coeficientes A y B

$$B = x_0$$

$$A = \frac{x'_0 + x_0 h \omega}{\omega'}$$

Un ejemplo del amortiguamiento se muestra en la fig 3.6. La frecuencia natural amortiguada no difiere de manera significativa de la frecuencia natural sin amortiguamiento para amortiguamientos pequeños, ($h < 0.2$), como en general ocurre en problemas estructurales. Es común expresar el amortiguamiento en términos de coeficientes de amortiguamiento viscoso, determinado de pruebas de vibración libre.

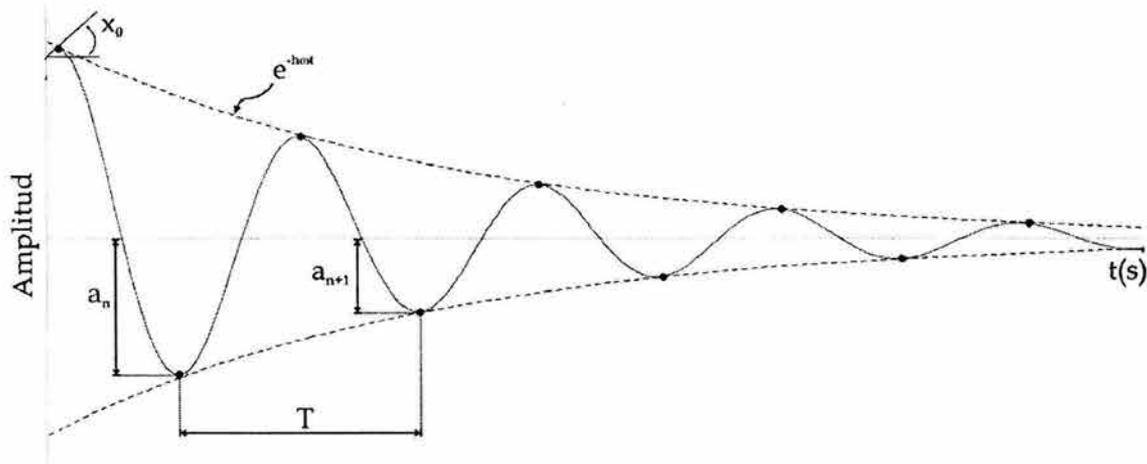


Fig 3.6 Decremento logarítmico en una señal subamortiguada

Si se consideran dos puntos máximos sucesivos a_n y a_{n+1} , en la curva de respuesta (fig 3.6) el cociente de éstos puntos evaluados en la ecuación como $t = t_n$ y $t = t_{n+1} = t_n + T$, resulta

$$\frac{a_n}{a_{n+1}} = \exp\left(\frac{2\pi h\omega}{\omega'}\right) \quad (3.50)$$

Si se aplica el logaritmo natural a ambos lados de la ecuación, se obtiene el decremento logarítmico δ como

$$\delta = \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) = 2\pi h \frac{\omega}{\omega'} = \frac{2\pi h}{\sqrt{1-h^2}} \quad (3.51.a)$$

Si los puntos seleccionados se encuentran entre varios ciclos (T), la ec. 3.51 se deberá escribir:

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+N}}\right)}{N-1} = \frac{2\pi h}{(N-1)\sqrt{1-h^2}} \quad (3.51.b)$$

Dónde N es el número de ciclos entre los puntos evaluados.

Las ecuaciones anteriores pueden ser utilizadas para estimar h de los picos analizados a_n y a_{n+1} , en una prueba de vibración libre

$$h = \frac{\delta}{\sqrt{\delta + 4\pi^2}} \quad (3.52)$$

La ecuación anterior (3.52) es conocida como la ecuación general de amortiguamiento, pero para amortiguamientos muy pequeños ($h < 0.2$), el coeficiente $\sqrt{1 - h^2}$, tiende a ser igual a 1 (Tabla 3.1) por lo que se puede aproximar las ecuaciones de la forma

$$\delta = \ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right) = 2\pi h \quad (3.53 \text{ a})$$

$$\delta = \frac{\ln\left(\frac{a_n}{a_{n+1}}\right)}{N-1} = \frac{2\pi h}{N-1} \quad (3.53 \text{ b})$$

La fracción de amortiguamiento crítico se expresa

$$h = \frac{\delta}{2\pi} \quad (3.54)$$

Tabla 3.1 Relación entre el porcentaje de amortiguamiento y el factor $\sqrt{1 - h^2}$

h (%)	$\omega/\omega' = \sqrt{1 - h^2}$
1	0.9999
2	0.9996
5	0.9975
10	0.99
15	0.9775
20	0.96
25	0.9375
50	0.75
100	0

Para conocer la frecuencia fundamental de vibración existen dos alternativas, calcular la frecuencia promedio empleando los puntos máximos y la identificación de la frecuencia llevando a cabo un análisis espectral.

De los puntos máximos se puede obtener el periodo natural de vibración (T) como se muestra en la fig 3.7

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = a_n - a_{n+1} \quad (3.55.a)$$

y para varios ciclos

$$T = \frac{2\pi}{\omega(N-1)} = \frac{a_n - a_{n+1}}{N-1} \quad (3.55.b)$$

El valor de la frecuencia es igual al inverso del valor del periodo

$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{T} \quad (3.56)$$

y la frecuencia circular se calcula:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (3.57)$$

Análisis Espectral

El aplicar el análisis espectral a las señales de vibración libre, resulta conveniente por la facilidad que éstos presentan para la identificación de las frecuencias de vibración.

La identificación de las frecuencias mediante éste método se lleva a cabo tal y como se explico en el apartado de vibración ambiental, salvo el cálculo de los espectros que no se realiza mediante promedios sino utilizando toda la señal.

El problema de cálculo de la transformada finita de Fourier es obtener la secuencia $X(n)$ de longitud N , esto es

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W^{nk} \quad (3.58)$$

Donde N es el número de puntos de la señal, y es igual a $N = 2^m$

El Factor $W = e^{-\frac{2i\pi}{N}}$ con $e^{-jx} = \cos(x) - i\sin(x)$, es denominado factor de fase.

Con lo anterior el cálculo de un punto de la transformada finita de Fourier está dada por

$$X(k) = x(0)W^0 + x(1)W^k + x(2)W^{2k} + \dots + x(N-1)W^{k(N-1)} \quad (3.59)$$

con $k = 0, 1, 2, \dots, N-1$

Por medio de éste proceso, se puede reducir el cálculo de N transformadas que se acostumbra en el cálculo de la transformada discreta, al cálculo de 1 transformada en m sucesos.

De ésta forma el número de operaciones necesario para el cálculo de la transformada es de $N \cdot \log_2(N)$, lo que es mucho más reducido que si se efectúa la transformada discreta por el método tradicional, que necesita N^2 operaciones.

Con los espectros calculados se identifican las frecuencias de la misma forma que en la vibración ambiental, utilizando las ecs 3.36 a 3.39 como herramientas para asegurar la precisión de la frecuencia identificada.

Capítulo 4



Pruebas de Campo

4 PRUEBAS DE CAMPO

4.1 Instrumentación

Debido a la magnitud que tienen estructuras como los puentes estudiados, para la realización del proceso de adquisición de datos se empleó un dispositivo recientemente modificado que permite el registro simultáneo de hasta 64 señales (Gómez Martínez, *et al* 1999). Basado en las más recientes herramientas de instrumentación virtual, se elaboró un sistema de captura multicanal para adquisición y acondicionamiento de señales.

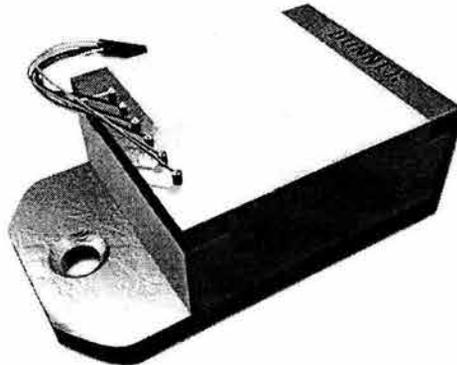


Fig 4.1 Acelerómetro de alta densidad (Donner)

Los Donner son sensores que registran las aceleraciones que presenta una estructura durante un determinado fenómeno. Para obtener un buen registro, es necesario modificar el intervalo de registro de las amplitudes mediante pulsos eléctricos enviados a través del cable por los restauradores de señal(fig 4.2), con la finalidad principal de obtener un registro confiable.

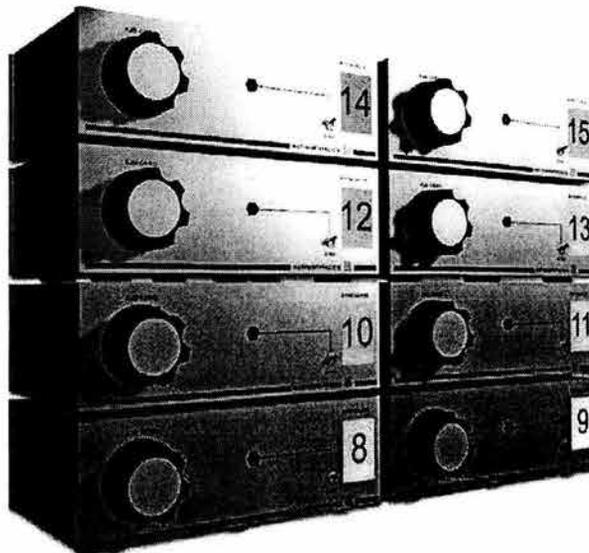


Fig 4.2 Restauradores de Señal

Como uno de los objetivos es calcular las tensiones de los cables, fue necesario llevar a cabo las pruebas de vibración ambiental y vibración libre en ellos, por ello se colocaron sensores sobre ellos y se realizó en análisis de señales respectivo, el dispositivo para llevar a cabo la medición se colocó y configuró como se muestra en la fig 4 .5:

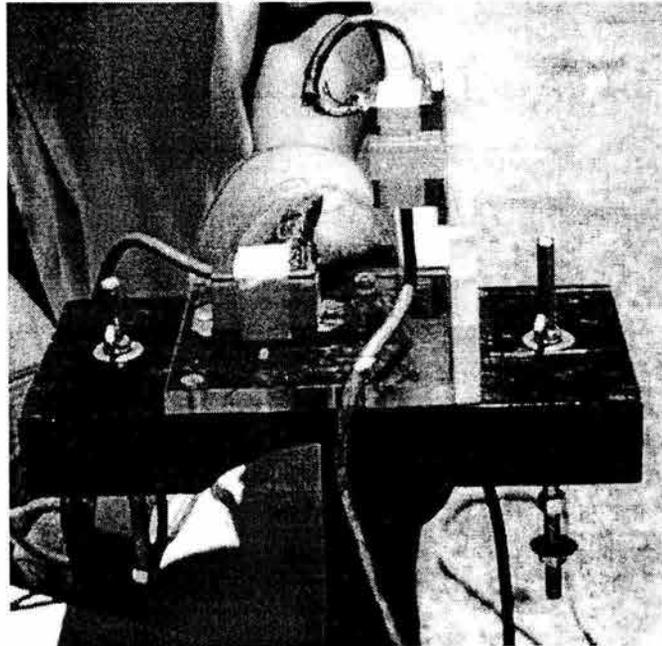


Fig 4.5 Dispositivo utilizado para la medición de aceleraciones en los tirantes

Esto es, sobre una base de madera se coloca una pieza de acrílico a la cual se le hacen perforaciones que van a servir para colocar el acelerómetro de forma transversal al tirante. La base de madera se fija al tirante mediante anillos metálicos.

El registro de los movimientos en las estructuras producidos por las vibraciones ambientales se realizó empleando el mismo arreglo de servo-acelerómetro para ambas pruebas, que se localizaron en cada uno de los tirantes. El dispositivo experimental estuvo compuesto por ocho acelerómetros de alta resolución (fig 4.2).

El dispositivo experimental quedó configurado como se muestra en la fig 4.6

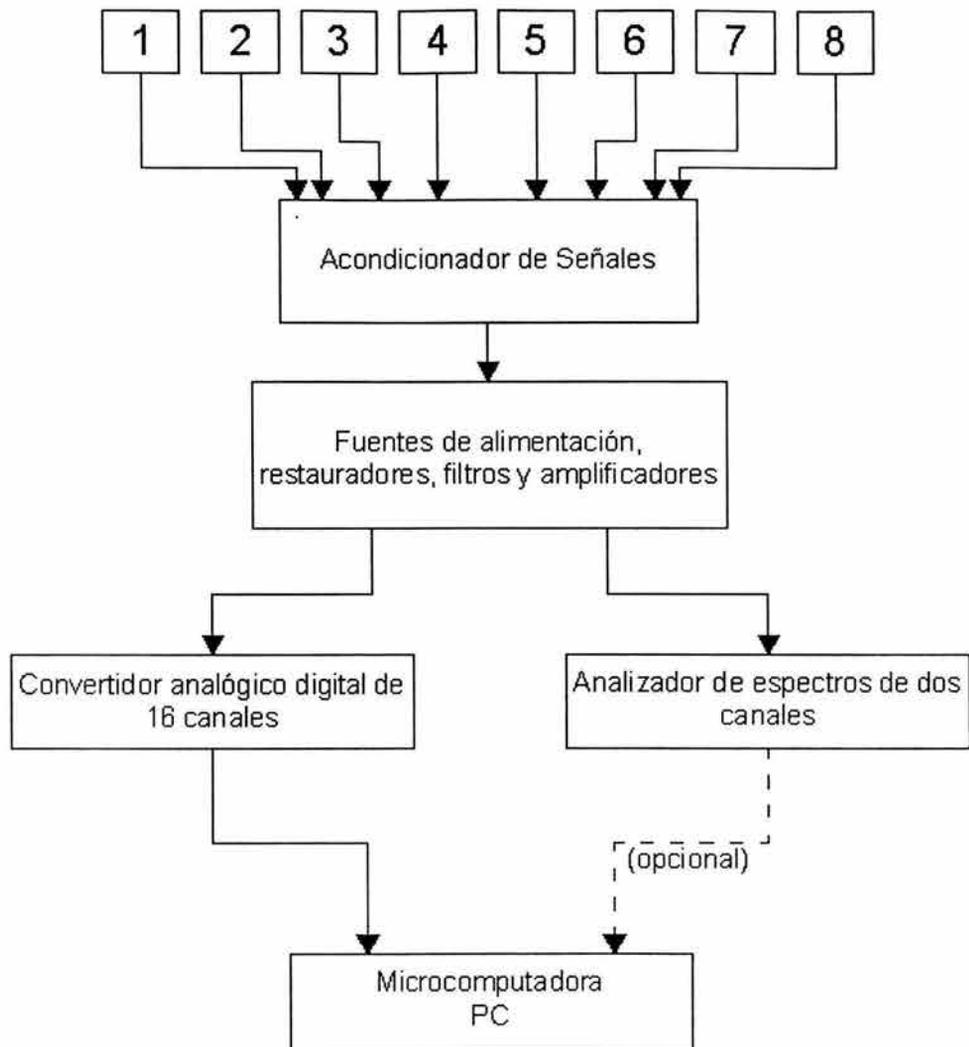


Fig 4.6 Diagrama esquemático del dispositivo experimental

4.2 Programa de Pruebas

Las pruebas de vibración ambiental se llevan a cabo en todos los tirantes de ambos puentes en estudio, y utilizando ocho canales simultáneos en cada prueba (tabla 4.1).

Tabla 4.1 Pruebas de vibración ambiental

Puente Coatzacoalcos				Puente Tampico			
Prueba	Tirante	Prueba	Tirante	Prueba	Tirante	Prueba	Tirante
1	T4 - 17 D	1	T5 - 17 D	4	P13 - L T	15	P14 - L T
	T4 - 16 D		T5 - 16 D		P13 - K T		P14 - K T
	T4 - 15 D		T5 - 15 D		P13 - J T		P14 - J T
	T4 - 14 D		T5 - 14 D		P13 - I T		P14 - I T
	T4 - 13 D		T5 - 13 D		P13 - H T		P14 - H T
	T4 - 12 D		T5 - 12 D		P13 - G T		P14 - G T
	T4 - 11 D		T5 - 11 D		P13 - F T		P14 - F T
	T4 - 10 D		T5 - 10 D	7	P13 - E T	18	P14 - E T
5	T4 - 09 D	T5 - 09 D	P13 - D T		P14 - D T		
	T4 - 08 D	T5 - 08 D	P13 - C T		P14 - C T		
	T4 - 07 D	T5 - 07 D	P13 - B T		P14 - B T		
	T4 - 06 D	T5 - 06 D	P13 - B A		P14 - B A		
	T4 - 05 D	T5 - 05 D	P13 - C A		P14 - C A		
	T4 - 04 D	T5 - 04 D	P13 - D A		P14 - D A		
	T4 - 03 D	T5 - 03 D	12	P13 - E A	21	P14 - E A	
	T4 - 02 D	T5 - 02 D		P13 - F A		P14 - F A	
8	T4 - 01 D	T5 - 01 D		P13 - G A		P14 - G A	
	T4 - 01 I	T5 - 01 I		P13 - H A		P14 - H A	
	T4 - 02 I	T5 - 02 I		P13 - I A		P14 - I A	
	T4 - 03 I	T5 - 03 I		P13 - J A		P14 - J A	
	T4 - 04 I	T5 - 04 I		P13 - K A		P14 - K A	
	T4 - 05 I	T5 - 05 I	15	P13 - L A	P14 - L A		
	T4 - 06 I	T5 - 06 I		9	T5 - 06 I		
	T4 - 07 I	T5 - 07 I	T5 - 07 I				
11	T4 - 08 I	T5 - 08 I	T5 - 08 I				
	T4 - 09 I	T5 - 09 I	T5 - 09 I				
	T4 - 10 I	T5 - 10 I	T5 - 10 I				
	T4 - 11 I	T5 - 11 I	T5 - 11 I				
	T4 - 12 I	T5 - 12 I	T5 - 12 I				
	T4 - 13 I	T5 - 13 I	10		T5 - 13 I		
	T4 - 14 I	T5 - 14 I		T5 - 14 I			
	T4 - 15 I	T5 - 15 I		T5 - 15 I			
1	T4 - 16 I	10	T5 - 16 I				
	T4 - 17 I		T5 - 17 I				

Las pruebas de vibración para el puente Coatzacoalcos II, se llevaron a cabo anclando un cable al tirante pero la excitación en éste caso se llevó a cabo mediante un dispositivo especial desarrollado para éste fin.

Las pruebas para el puente Tampico se llevaron a cabo mediante una cuerda de nylon amarrada los tirantes del puente, provocando la excitación mediante el peso de una persona entrando en resonancia con la frecuencia fundamental del cable.

Tabla 4.2 Pruebas de vibración libre

Puente Coatzacoalcos				Puente Tampico			
Prueba	Tirante	Prueba	Tirante	Prueba	Tirante	Prueba	Tirante
2	T4-17 D	12	T4-14 I	5	P13 - J T	16	P14 - L A
	T4-16 D		T4-15 I		P13 - H T		P14 - J A
3	T4-13 D	2	T5-17 D	6	P13 - F T	17	P14 - H A
	T4-12 D		T5-16 D		P13 - D T		P14 - G A
4	T4-09 D	3	T5-11 D	8	P13 - B T	19	P14 - F A
	T4-08 D		T5-10 D		P13 - B A		P14 - D A
6	T4-05 D	5	T5-09 D	11	P13 - C A	20	P14 - B A
	T4-04 D		T5-08 D		P13 - E A		P14 - D T
7	T4-01 I	6	T5-01 I	13	P13 - G A	22	P14 - E T
	T4-02 I		T5-02 I		P13 - I A		P14 - G T
9	T4-03 I	8	T5-06 I	14	P13 - K A		P14 - I T
	T4-04 I		T5-07 I				
10	T4-06 I					23	P14 - K T
	T4-07 I						

Capítulo 5



Registros Obtenidos y Procesamiento

5 REGISTROS OBTENIDOS Y PROCESAMIENTO

5.1 Procesamiento de Señales de Pruebas de Vibración Ambiental

Análisis Espectral

Para calcular los espectros promedio, se utilizaron todos los eventos capturados, que para las pruebas de vibración ambiental fueron 20, de esa forma en general se eliminan o se atenúan todas aquellas vibraciones ajenas a la estructura.

De igual forma para tener una buena resolución de frecuencia y asegurar el registro de todas las frecuencias naturales de los tirantes, se emplearon eventos de 41 s, lo cual asegura el registro de periodos de vibración de hasta 2 s (0.5 Hz).

Es evidente que el llevar los registros al dominio de la frecuencia resulta más práctico y conveniente, ya que en la señal en el dominio del tiempo identificar los periodos y de ellos las frecuencias, resulta demasiado complicado (fig 5.1).

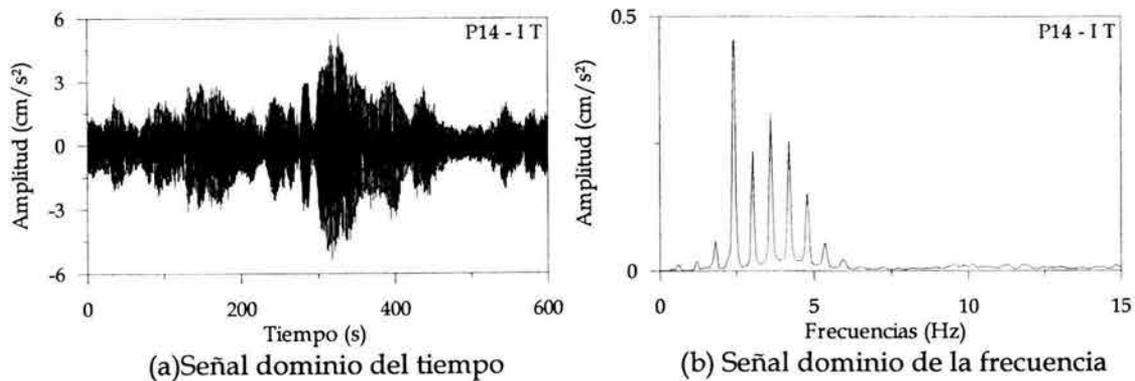


Fig 5.1 Prueba de vibración ambiental del tirante P14 I T del puente Coatzacoalcos II

Identificación de Frecuencias

Con los espectros de potencia obtenidos (apéndice N), se procede a llevar a cabo la identificación de las frecuencias naturales de cada cable, es decir todas aquellas cuya amplitud sea evidente (fig 5.2).

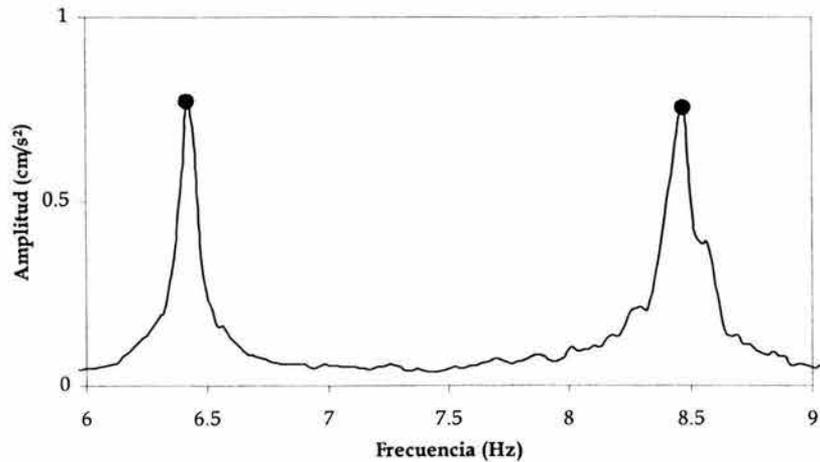


Fig 5.2 Identificación de las frecuencias naturales

Uno de los principales objetivos de llevar a cabo la identificación de las frecuencias es el de localizar la frecuencia fundamental de vibración, pero en algunos casos puede existir cierta incertidumbre para poder definirla, esto se debe a la existencia de frecuencias cercanas entre sí, que por sus características, resultan igualmente válidas (fig 5.3) y descartar alguna no es tan sencillo, éste fenómeno se presenta con mayor regularidad en las frecuencias más bajas ($f < 1$ Hz).

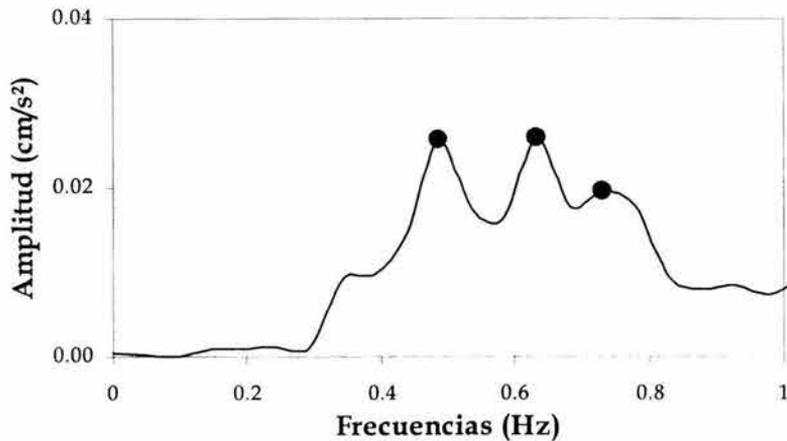


Fig 5.3 Incertidumbre en la identificación de la frecuencia fundamental

Con la intención de definir dicha frecuencia, se lleva a cabo el cálculo de ésta por medio de las frecuencias de los modos superiores, las que en su mayoría ya se encuentran definidas y su identificación no presenta demasiada dificultad.

Para comprobar que las frecuencias identificadas corresponden realmente a los modos superiores, se dividen entre la primera frecuencia identificada o frecuencia base (f_B), buscando que los cocientes obtenidos (conocidos como factores de modo (η_n)), sigan un comportamiento lineal respecto al número de modo (fig 5.4), de esta forma se comprueba si la suposición del modelo es correcta.

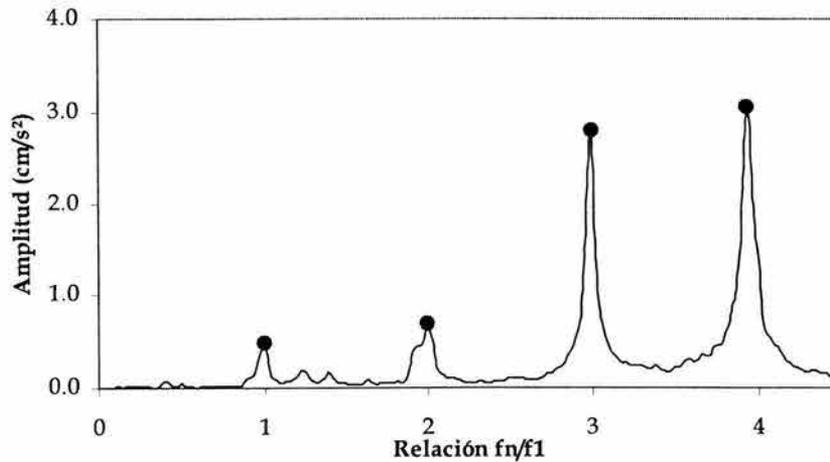


Fig 5.4 Factores de modo

Otra herramienta para comprobar que las frecuencias utilizadas en el cálculo de la frecuencia fundamental, es mediante la obtención de la relación frecuencia / modo (ec 3.37), para cada una de las frecuencias superiores identificadas, de ésta forma, si se cumple con el modelo lineal, la relación de cada frecuencia superior, será semejante al valor de la frecuencia base.

Una vez establecido el modelo lineal, se calcula la frecuencia fundamental por medio de la ec 3.38, ésta frecuencia calculada se compara con las frecuencias identificadas, para hallar la más parecida a ésta (fig 5.5), definiendo de ésta manera la frecuencia fundamental.

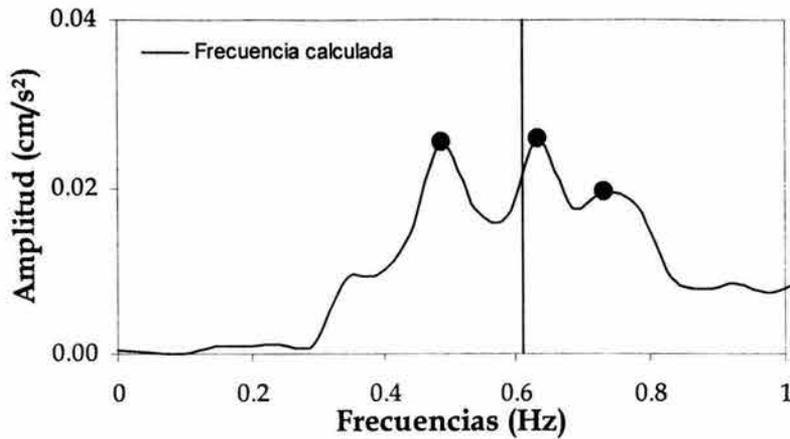


Fig 5.5 Comparación de las frecuencias con incertidumbre y la calculada

Uno de los casos extremos es aquel en el que la frecuencia calculada tiene semejanza con más de una de las frecuencias con incertidumbre y ninguna puede ser descartada, para éste caso es conveniente calcular la frecuencia fundamental utilizando cada una de éstas frecuencias como frecuencia base (f_B).

Para cada caso, se obtiene la dispersión del modelo lineal (ec 3.39), y se calcula el coeficiente de variación,

$$CV = \frac{\sigma}{f_1}$$

Seleccionando a la frecuencia dónde dicho coeficiente resulte ser el menor (fig 5.6).

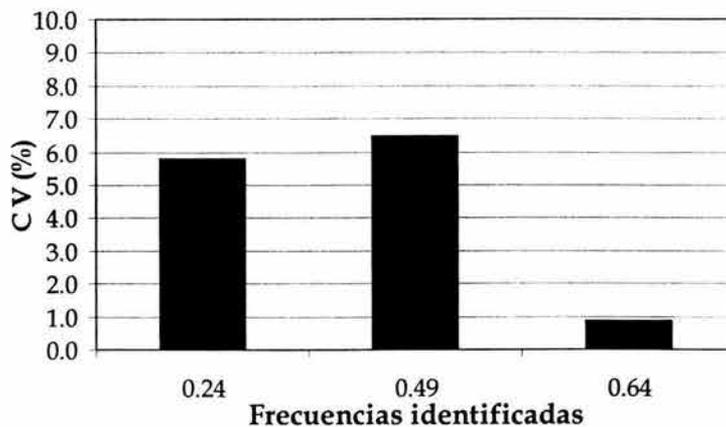


Fig 5.6 Dispersión en frecuencias fundamentales probables

Con el ejemplo mostrado en la fig 5.6, se puede ver que en éste caso la frecuencia con menor variación resultó 0.64 y por ello se selecciona ésta frecuencia como la fundamental.

5.2 Procesamiento de Señales de Pruebas de Vibración Libre

Las pruebas de vibración libre, tienen la finalidad de proporcionar información sobre el amortiguamiento y las frecuencias del tirante, de ahí la importancia del procesamiento de las señales y el análisis de la información (fig. 5.7).

Por ésta razón es importante revisar las señales capturadas con el fin de observar la presencia del fenómeno y descartar aquellas dónde no ha sido posible registrarlo.

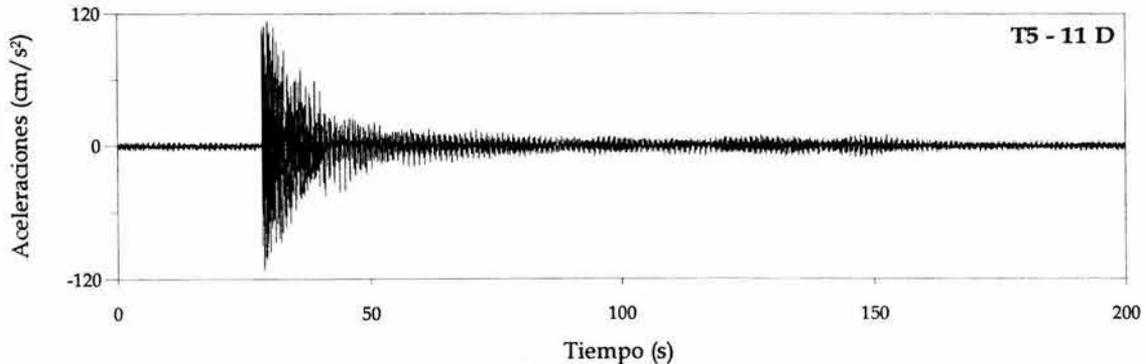


Fig 5.7 Ejemplo de registro en una prueba de vibración libre

Al obtener el registro de las señales para la visualización completa del movimiento, por lo general dicho registro tiene un corrimiento en su línea base, es decir la línea de amplitudes nulas. Por lo tanto es necesario realizar un ajuste para corregir ésta modificación, a éste proceso se le llama corrección de línea base.

Para obtener los amortiguamientos, es conveniente aplicar un filtrado aislando la frecuencia fundamental de las señales de las pruebas, para obtener el amortiguamiento que corresponde a ésta, la cual está directamente relacionada con el amortiguamiento de éste tipo de estructuras.

Para realizar el filtrado se utilizan programas que aprovechando el cálculo de los espectros de Fourier tienen la capacidad de eliminar las frecuencias que queden fuera de intervalos establecidos.

El filtrado utilizado en las pruebas fue el filtro pasabanda tipo Butterworth de 4 polos. Este filtrado elimina todas las frecuencias inferiores y superiores al intervalo establecido (fig 5.8).

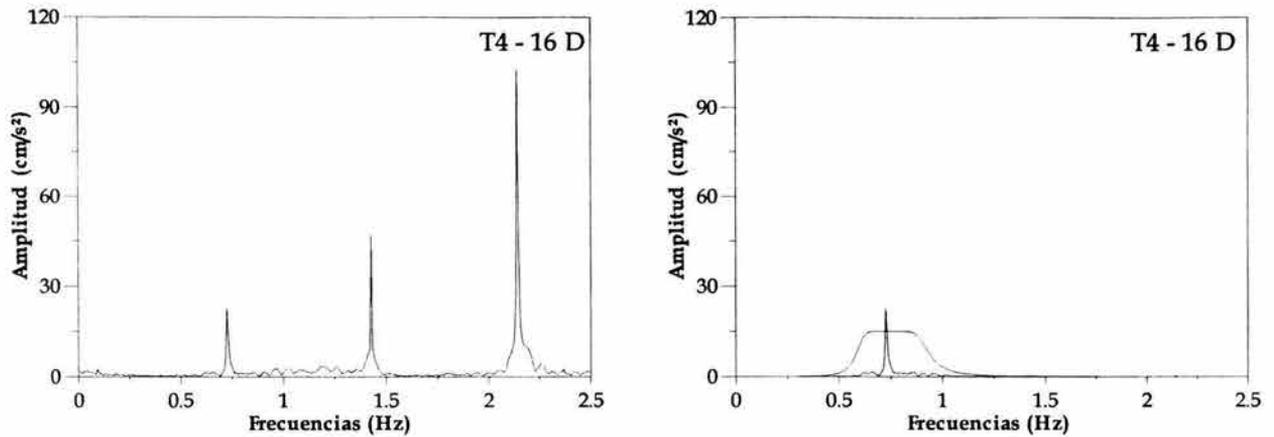


Fig 5.8 Espectro de Fourier con filtro pasa-banda

Se establece un intervalo que no afecte la amplitud de la frecuencia de interés, para evitar generar información errónea.

La identificación de las frecuencias se lleva a cabo de igual manera a la de las pruebas de vibración ambiental. Para éstas pruebas la frecuencia natural se encuentra bien definida y la identificación resulta más sencilla.

Los porcentajes de amortiguamiento crítico se calculan mediante el método del decremento logarítmico con las ecs 3.51 y 3.52.

Para ello se necesita identificar las amplitudes máximas positivas y amplitudes máximas negativas (fig 5.9), las cuales tienden a seguir una pendiente negativa con un comportamiento logarítmico.

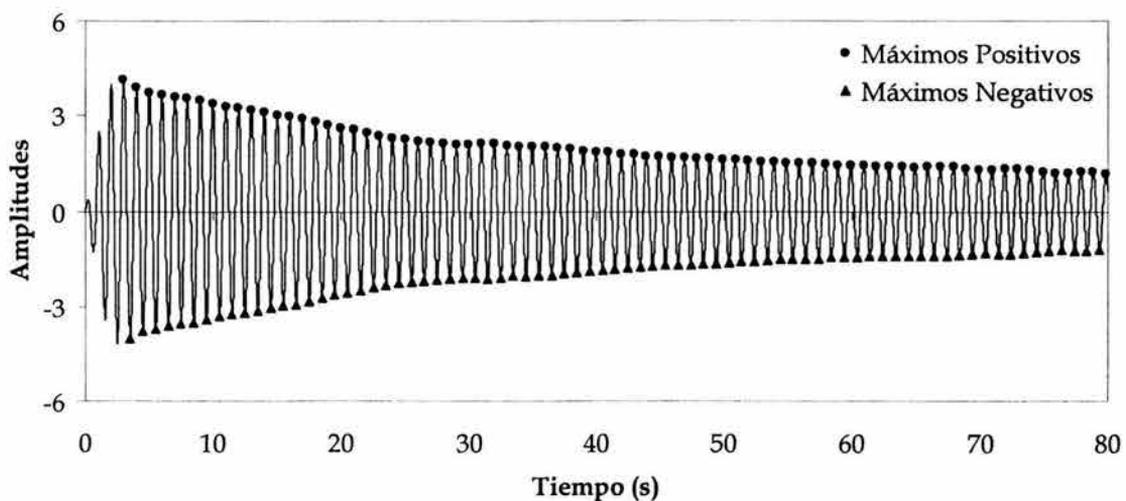


Fig 5.9 Amplitudes máximas positivas y negativas de un registro

Durante la captura y procesamiento de los registros ocurren eventos que provocan que en la vibración exista el efecto de pulsación y por ello se hace necesario realizar un ajuste de la expresión $\ln \ddot{y} = \ln a + bt$ mediante el método de regresión lineal, donde a y b son las constantes de la recta y t e \ddot{y} son los valores del tiempo y amplitud de aceleraciones, respectivamente.

Al realizar el ajuste es necesario definir intervalos de la señal, los cuales dependerán de la pendiente que sigue la recta y en estos intervalos se puede determinar el decremento promedio y el amortiguamiento de acuerdo con las ecs 3.51.b y 3.52.

El fenómeno de pulsación se da por la presencia de frecuencias de vibración cercanas (fig 5.10), las cuales no pueden ser eliminadas con el filtrado.

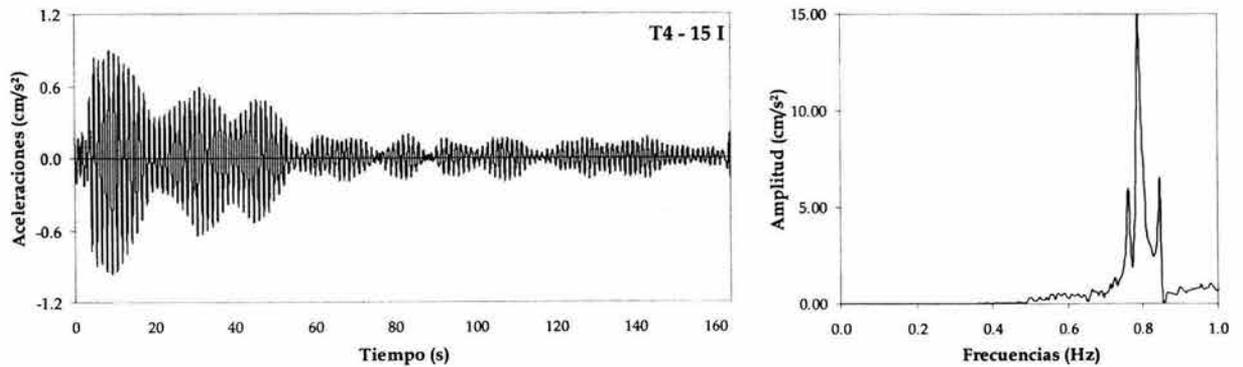


Fig 5.10 Efecto de pulsación en una señal filtrada

Cuando se presenta el efecto de pulsación, el ajuste se lleva a cabo para toda la señal a partir del primer punto donde aparezca el decremento, puesto que el amortiguamiento de esa señal está dado por la amplitud más alta antes del decremento y la amplitud mínima a la que se llega al final del fenómeno (fig 5.11).

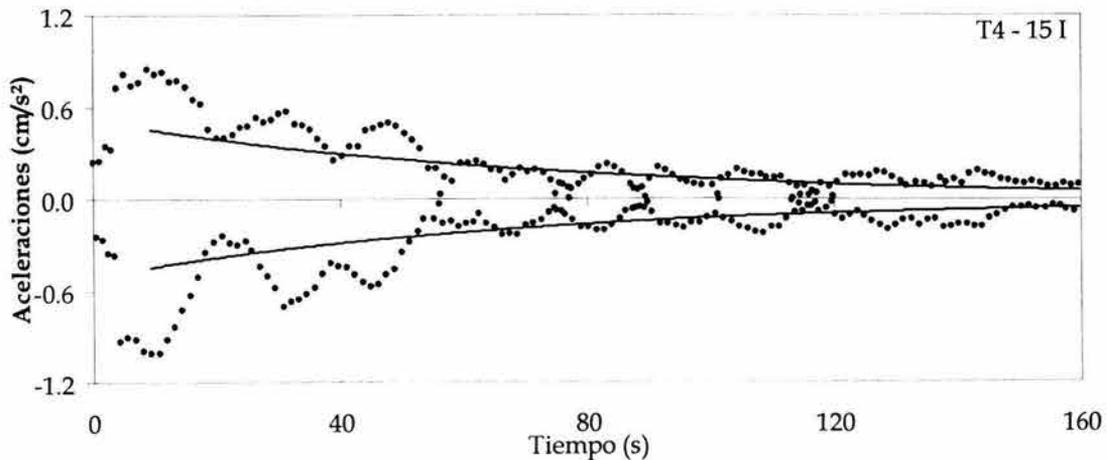


Fig 5.11 Ajuste de la señal con modulación

En otros casos el cambio de pendiente es muy evidente y resulta práctico definir ése primer intervalo, y así conocer el amortiguamiento en ésos primeros ciclos (fig 5.12).

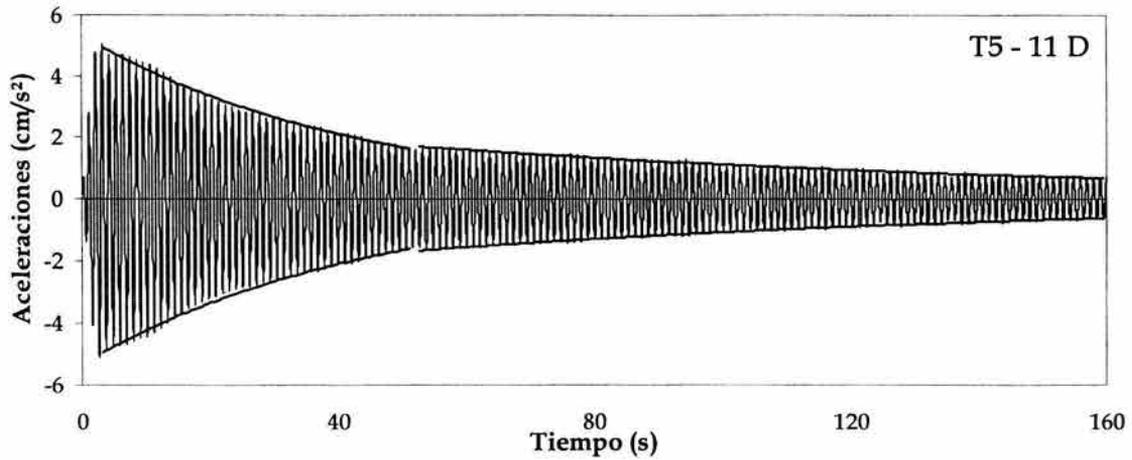


Fig 5.12 Ajuste en intervalos

Es de notar la influencia que tiene la magnitud de las amplitudes con el amortiguamiento, como se muestra en la tabla 5.1 con el ejemplo del tirante T4 -6 I del puente Coatzacoalcos II, cuanto mayor sea la amplitud, el amortiguamiento será mayor y de forma contraria cuando las amplitudes sean bajas el amortiguamiento será menor.

Amplitud Inicial	Amplitud Final	δ	h (%)
13.46	1.85	0.0684	1.09
1.84	0.29	0.0110	0.17

Finalmente con las amplitudes utilizadas para calcular el amortiguamiento se puede calcular el periodo de vibración promedio y dado que la frecuencia es el inverso de éste se puede calcular la frecuencia promedio.

$$T = \frac{a_1 - a_n}{n - 1}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

Capítulo 6



Resultados y Análisis

6 RESULTADOS Y ANALISIS

6.1 Frecuencias identificadas en las pruebas de vibración ambiental

Puente Coatzacoalcos II

Con los espectros de potencia calculados (Apéndice N), se llevó a cabo la identificación de las frecuencias más representativas de cada cable, las cuales se muestran en el apéndice A, en la tabla A.1 para la pila 14 y la tabla A.2 para la pila 15.

Por medio de los modos superiores, se calculó la frecuencia fundamental, y para determinar la validez de ésta, fue conveniente revisar las diferencias existentes con la identificada en los espectros de potencia.

Mediante éste procedimiento se encontró que la diferencia entre las frecuencias identificadas respecto a la calculada en los cables del puente Coatzacoalcos II (apéndice A), es en promedio de 1.3 %, y en ningún caso se supera el 5 % (fig 6.1).

Por otra parte, se estableció la validez del modelo lineal, por medio de la gráfica de la relación f_n/f_1 versus el número de modo (fig 6.2), tomando en cuenta todas las frecuencias identificadas, recordando que para establecer el modelo es necesario que por lo menos las siete primeras frecuencias estén alineadas (Casas, 1994).

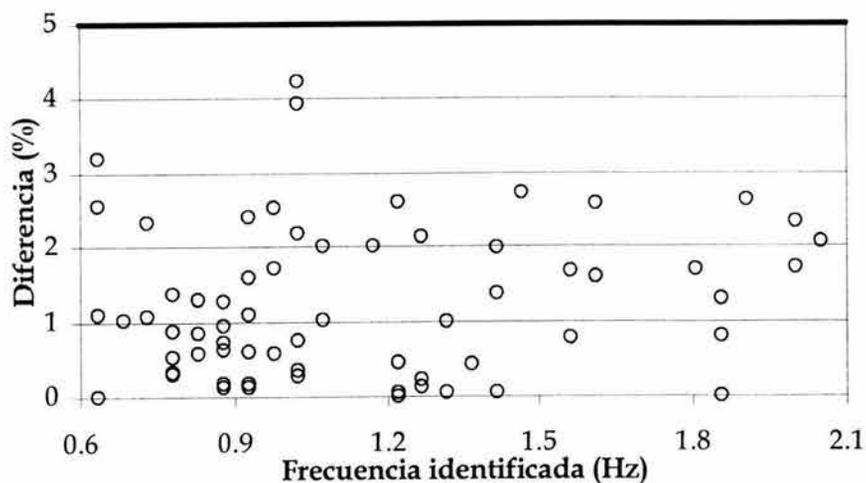


Fig 6.1 Diferencias entre la frecuencia identificada y la calculada

Para tener una buena base para demostrar tal linealidad, se seleccionaron algunos tirantes donde existen las mayores diferencias entre la frecuencia calculada e identificada. Los tirantes seleccionados son: T4-14 I, T4-10 I, T4-08 I, T4-07 I, T5-06 I, T5-08 I, T5-09 I y T5-17 I.

Al observar las gráficas de dichos tirantes (fig 6.2), se encuentra que las primeras siete frecuencias prácticamente tienen una relación lineal, y es hasta la octava frecuencia donde, en algunos casos, se observa dispersión.

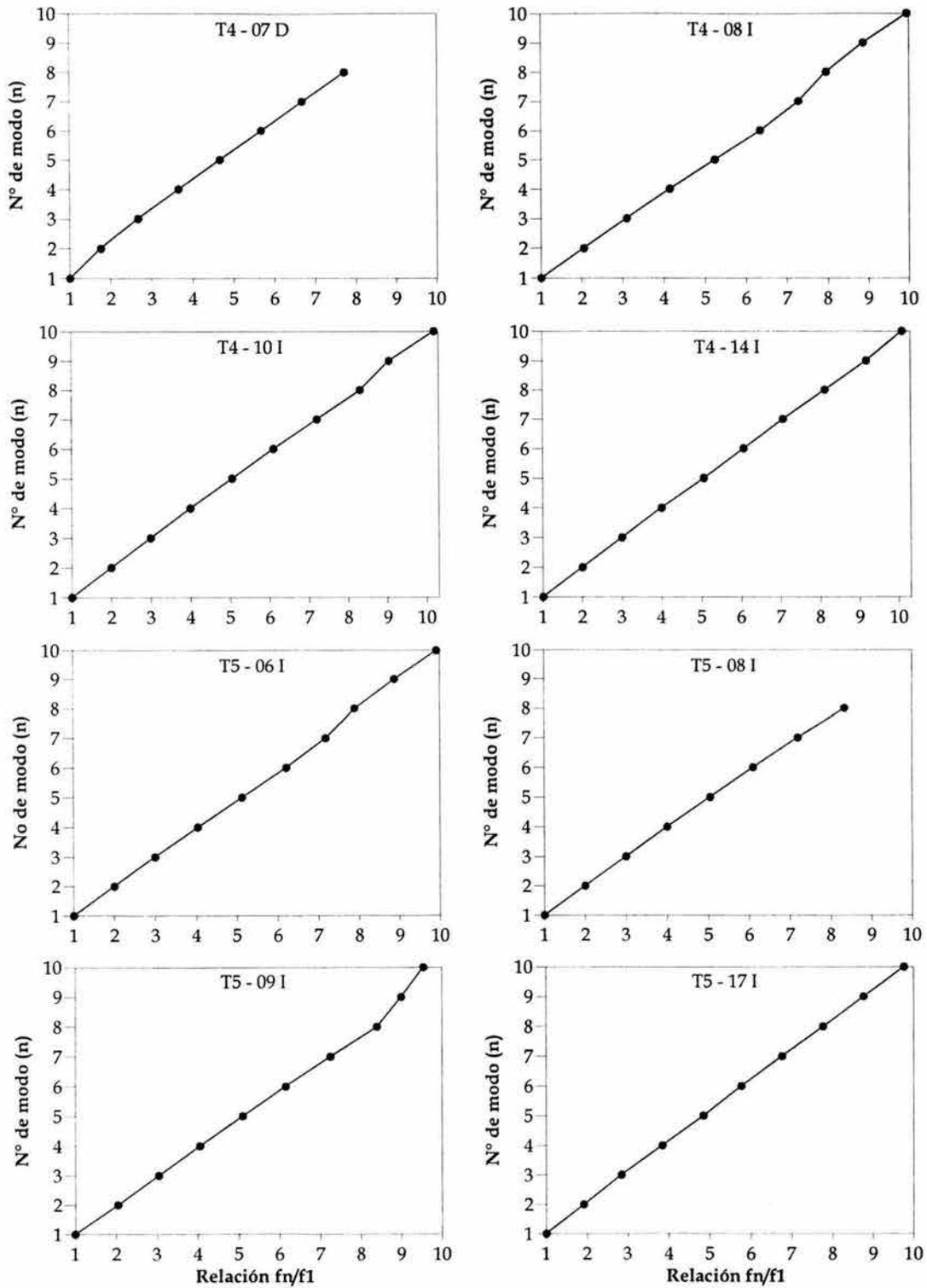


Fig 6.2 Identificación del modelo lineal propuesto

Puente Tampico.

El trabajo de identificación de las frecuencias en los tirantes del puente Tampico se lleva a cabo de la misma forma utilizada en el puente Coatzacoalcos II.

Las frecuencias calculada e identificada y la diferencia existente entre éstas aparecen en las tablas A3 y A4 del apéndice A.

En el puente Tampico, ésta diferencia es en promedio 1.6 %, y tampoco se supera el 5 % (fig 6.3).

Para revisar la validez del modelo lineal, se seleccionaron aquellos tirantes dónde existe una mayor diferencia entre las frecuencias. En el puente Tampico éstos tirantes fueron P13-K A, P13-F T, P13-F A, P13-I T, P14-K A, P14-G T, P14-I A y P14-J T.

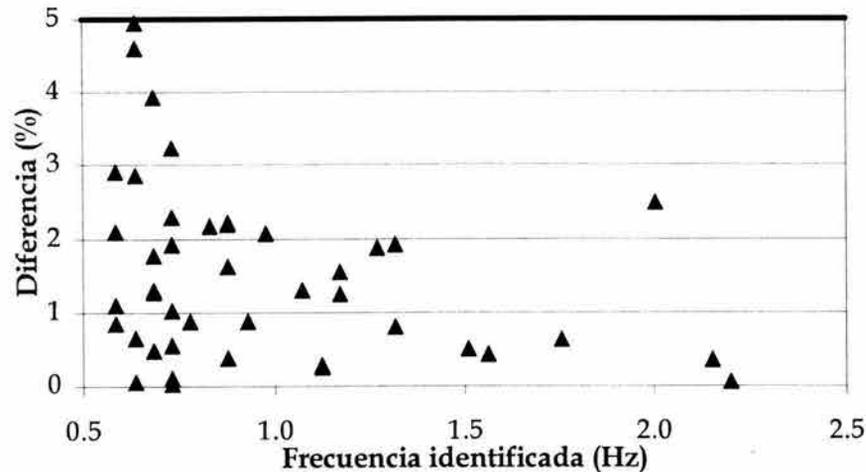


Fig 6.3 Diferencias entre la frecuencia identificada y la calculada

En el puente Tampico al revisar el modelo lineal (fig 6.4), se distingue que las primeras siete frecuencias, existe una relación lineal entre f_n/f_1 y el número de modo.

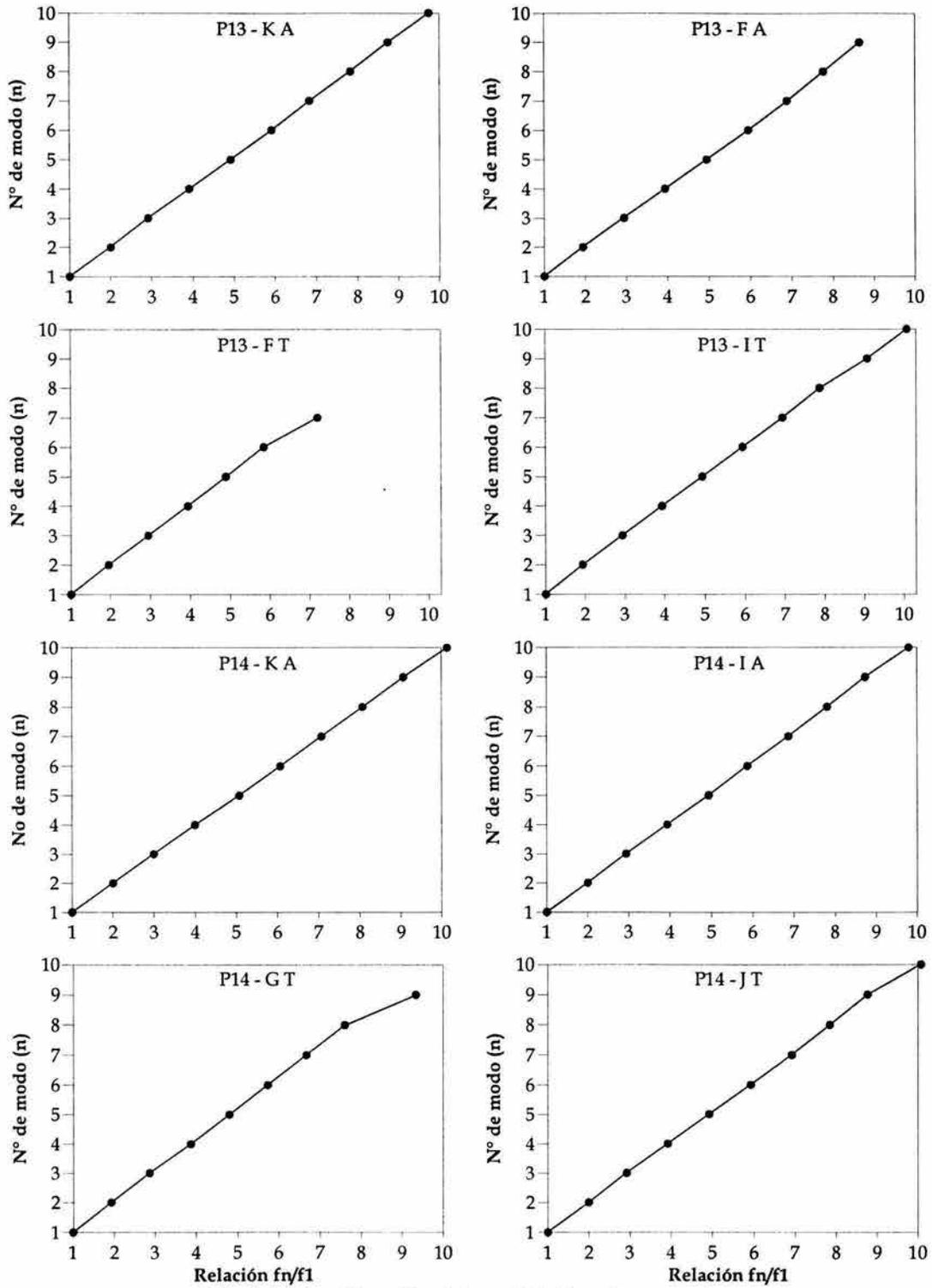


Fig 6.4 Identificación del modelo lineal propuesto

Resumen de Frecuencias

Las frecuencias de vibración fundamental de los tirantes identificadas en los puentes Coatzacoalcos II y Tampico (apéndice A) se agrupan de acuerdo a su longitud (tablas 6.1 y 6.2) para de ésta forma identificar la relación longitud *versus* frecuencia.

Para cada grupo de tirantes fue conveniente obtener el coeficiente de variación de las frecuencias, y así conocer la dispersión relacionada con la longitud.

Tabla 6.1 Valor de las frecuencias en el puente Coatzacoalcos II

Longitud (m)	Nº de Tirantes	Frecuencias (Hz)			CV %
		Mínima	Media	Máxima	
150 ≤ l < 160	8	0.62	0.62	0.63	1
140 ≤ l < 150	8	0.69	0.75	0.78	3
115 ≤ l < 140	4	0.82	0.86	0.89	3
95 ≤ l < 115	8	0.93	1.00	1.05	6
80 ≤ l < 95	16	1.09	1.20	1.27	5
70 ≤ l < 80	12	1.30	1.36	1.41	5
60 ≤ l < 70	8	1.42	1.52	1.65	7
40 ≤ l < 60	4	1.71	1.92	2.09	6

Tabla 6.2 Valor de las frecuencias en el puente Tampico

Longitud (m)	Nº de Tirantes	Frecuencias (Hz)			CV %
		Mínima	Media	Máxima	
190 ≤ l < 210	4	0.57	0.59	0.60	2
160 ≤ l < 190	4	0.61	0.65	0.70	6
140 ≤ l < 160	6	0.63	0.69	0.73	6
125 ≤ l < 140	4	0.71	0.73	0.74	2
110 ≤ l < 125	4	0.79	0.83	0.86	4
100 ≤ l < 110	6	0.88	0.91	0.96	4
80 ≤ l < 100	4	1.06	1.16	1.33	8
70 ≤ l < 80	8	1.29	1.42	1.57	10
55 ≤ l < 70	4	1.77	2.01	2.20	10

En el puente Coatzacoalcos II, la variación más baja ocurre en los cables mayores a 140 m, y ésta aumenta conforme las longitudes disminuyen (fig 6.5).

La mayor variación fue para los cables menores a 115 m de longitud, y de acuerdo con lo previamente observado, se puede establecer la existencia de cierta relación entre el coeficiente de variación y la longitud de los tirantes.

En el caso del puente Tampico, se observa en la tabla 6.4, que al igual que en el puente Coatzacoalcos II, la variación es menor en los cables más largos y se incrementa conforme aumenta la longitud. En los cables menores a 100 m, ésta variación llega a ser de hasta 10 % (fig 6.5).

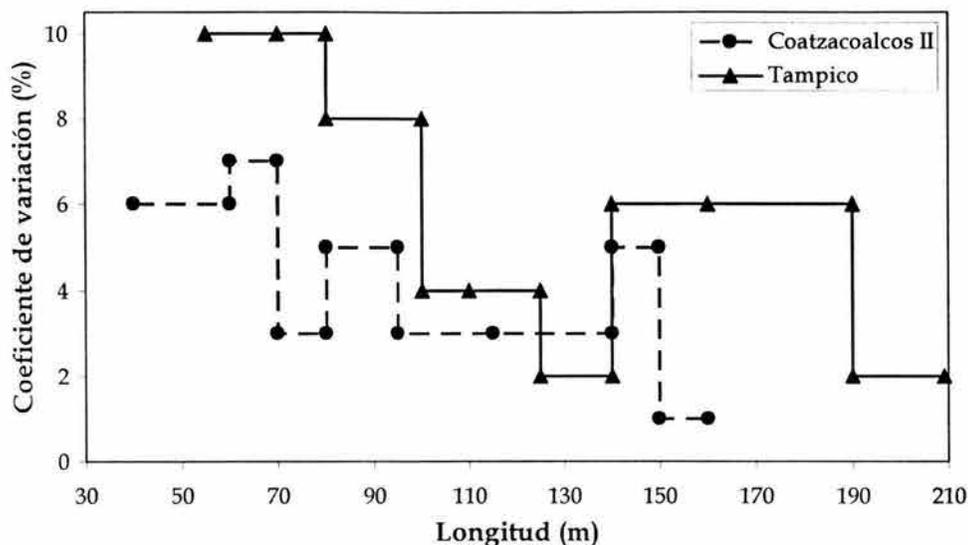


Fig 6.5 Relación longitud *versus* coeficiente de variación, pruebas de vibración ambiental

Los coeficientes de variación en el puente Tampico son mayores a los del puente Coatzacoalcos II. Lo anterior se puede deber, en buena parte, a las diferencias entre las características de los cables, que son desde los materiales, el sistema de amortiguadores e incluso el nivel de esfuerzos de cada uno.

6.2 Frecuencias identificadas en las pruebas de vibración libre

De igual forma que en las pruebas de vibración ambiental, se identificaron las frecuencias en los espectros obtenidos para las pruebas de vibración libre (Apéndice M), además de corroborar ciertas frecuencias. Las frecuencias identificadas se encuentran en el apéndice B, en la tabla B.1 para Coatzacoalcos II y en la tabla B.2 para Tampico.

En el puente Coatzacoalcos II, las frecuencias calculadas con respecto a las identificadas difieren en promedio 1.03 %. Para el caso del puente Tampico tales frecuencias tienen en promedio una diferencia de 0.84 %.

Para las pruebas de vibración libre en ambos puentes en ningún caso se supera el 3 %, lo cual muestra que las diferencias entre las frecuencias resultan menores que las obtenidas en las pruebas de vibración ambiental.

Resumen de Frecuencias

De igual forma que en la vibración ambiental, mediante las frecuencias identificadas (Apéndice B), se establece una tabla resumen de las frecuencias de cada puente (Tablas 6.3 y 6.4), además se calculó el coeficiente de variación para conocer la dispersión.

De acuerdo con la tabla 6.3, los coeficientes de variación de las frecuencias de los cables del puente Coatzacoalcos II en las pruebas de vibración libre con respecto a la longitud tienen un comportamiento similar al observado en las pruebas de vibración ambiental (fig 6.6).

En el caso del puente Tampico, los coeficientes de variación son menores a los obtenidos en la vibración ambiental, y el comportamiento respecto a la longitud es similar (fig 6.6).

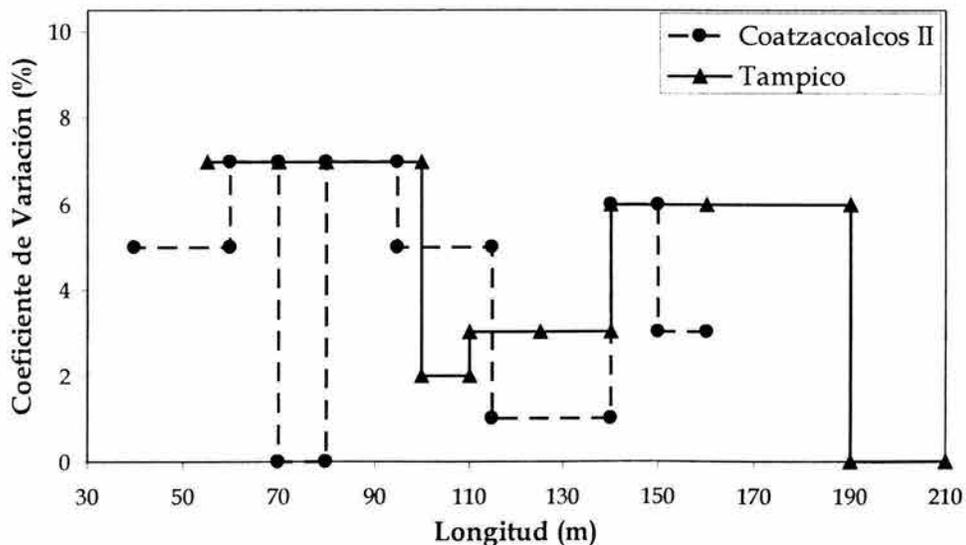


Fig 6.6 Relación longitud *versus* coeficiente de variación, pruebas de vibración libre

Tabla 6.3 Valor de las frecuencias en el puente Coatzacoalcos II

Longitud (m)	Nº de Tirantes	Frecuencias (Hz)			CV %
		Mínima	Media	Máxima	
$150 \leq l < 160$	2	0.62	0.63	0.65	3
$140 \leq l < 150$	3	0.71	0.74	0.79	6
$115 \leq l < 140$	3	0.85	0.86	0.87	1
$95 \leq l < 115$	6	0.95	1.02	1.09	5
$80 \leq l < 95$	4	1.07	1.17	1.26	7
$70 \leq l < 80$	1	1.30	1.30	1.30	0
$60 \leq l < 70$	3	1.38	1.48	1.59	7
$40 \leq l < 60$	4	1.79	1.93	2.03	5

Tabla 6.4 Valor de las frecuencias en el puente Tampico

Longitud (m)	Nº de Tirantes	Frecuencias (Hz)			CV %
		Mínima	Media	Máxima	
$190 \leq l < 210$	1	0.61	0.61	0.61	0
$160 \leq l < 190$	4	0.61	0.65	0.70	6
$140 \leq l < 160$	3	0.65	0.70	0.73	6
$125 \leq l < 140$	2	0.70	0.72	0.74	3
$110 \leq l < 125$	3	0.81	0.85	0.87	3
$100 \leq l < 110$	2	0.89	0.90	0.91	2
$80 \leq l < 100$	4	1.11	1.17	1.30	7
$70 \leq l < 80$	2	1.49	1.63	1.77	7
$55 \leq l < 70$	2	1.99	2.10	2.20	7

6.3 Comparación de frecuencias

Vibración ambiental *versus* vibración libre

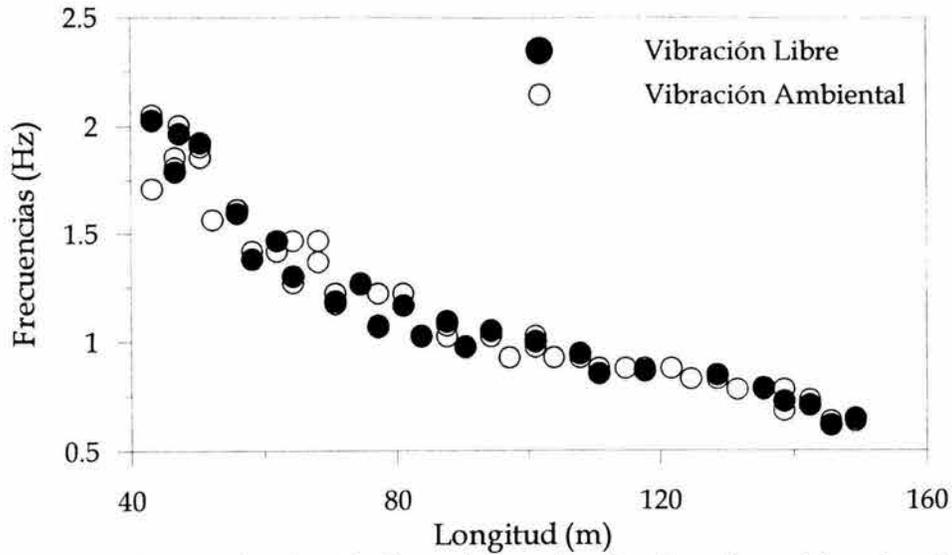


Fig 6.7 Relación frecuencia – longitud para las pruebas de vibración ambiental y vibración libre en los cables del puente Coatzacoalcos II

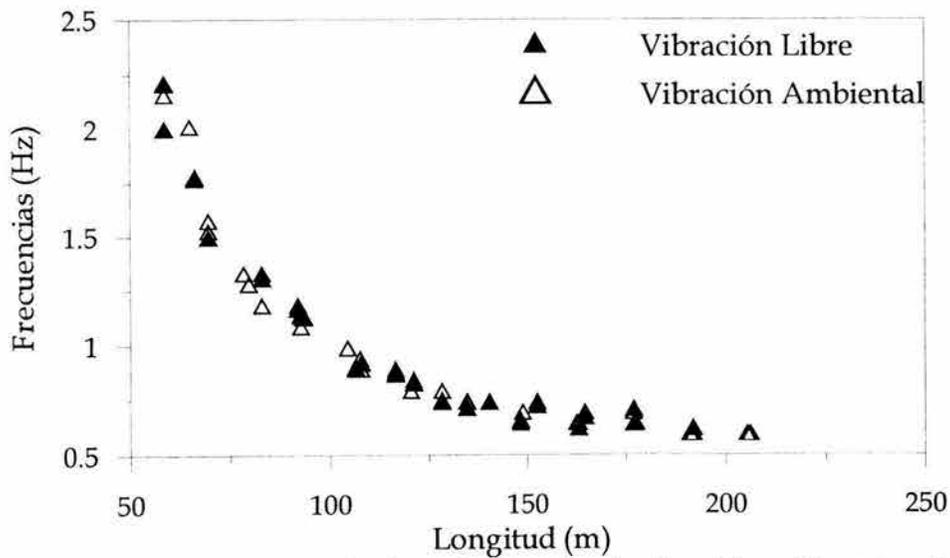


Fig 6.8 Relación frecuencia – longitud para las pruebas de vibración ambiental y vibración libre en los cables del puente Tampico

Las frecuencias obtenidas con las pruebas de vibración ambiental y vibración libre son casi idénticas (figs 6.7 y 6.8), lo cual implica que ambas pruebas son válidas para determinar las frecuencias de vibración de los cables.

Cabe destacar que para realizar la identificación de las frecuencias en los registros de vibración ambiental, existe una mayor dificultad respecto a los registros de vibración libre, ya que en éstas, es común la presencia de frecuencias de vibración que probablemente pertenecen al puente (tablero o sistema de cables).

Otra diferencia importante es la magnitud de las amplitudes de los espectros, pues en las pruebas de vibración libre éstas son mayores a las de la vibración ambiental, lo cual facilita la identificación (fig 6.9)

Dadas estas condiciones es necesario tener especial cuidado para evitar identificaciones erróneas de las frecuencias propias de los cables.

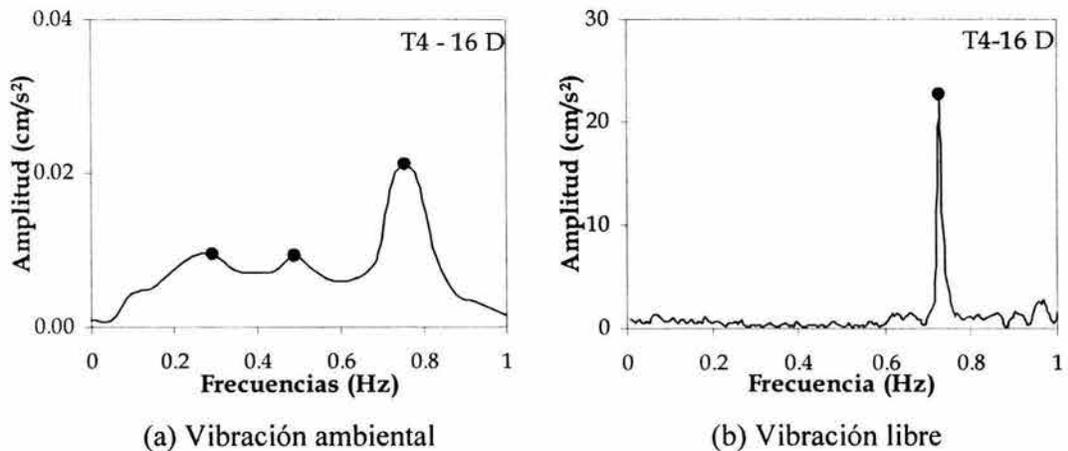


Fig 6.9 Dificultad en la identificación de frecuencias en las pruebas de vibración ambiental

Comparación de las frecuencias entre ambos puentes.

La variación de las frecuencias fundamentales de vibración de los cables de las pruebas de vibración ambiental y vibración libre en función de la longitud se muestra en las figs 6.10 y 6.11.

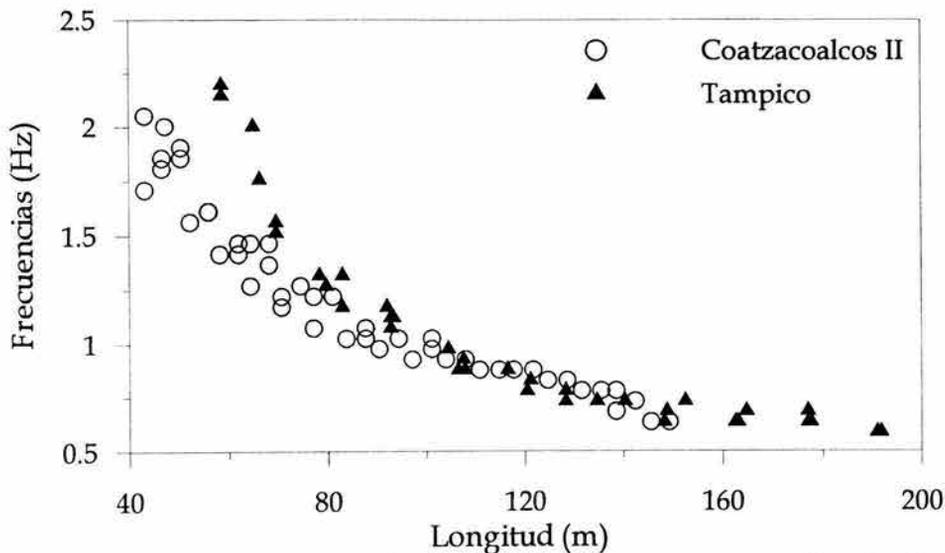


Fig 6.10 Relación frecuencia *versus* longitud en ambos puentes en pruebas de vibración ambiental

Se aprecia para ambos tipos de prueba que la relación de las frecuencias con la longitud de ambos puentes, son casi iguales para longitudes mayores a 100 m. Para longitudes menores a 100 m las frecuencias del puente Tampico tienden a ser mayores.

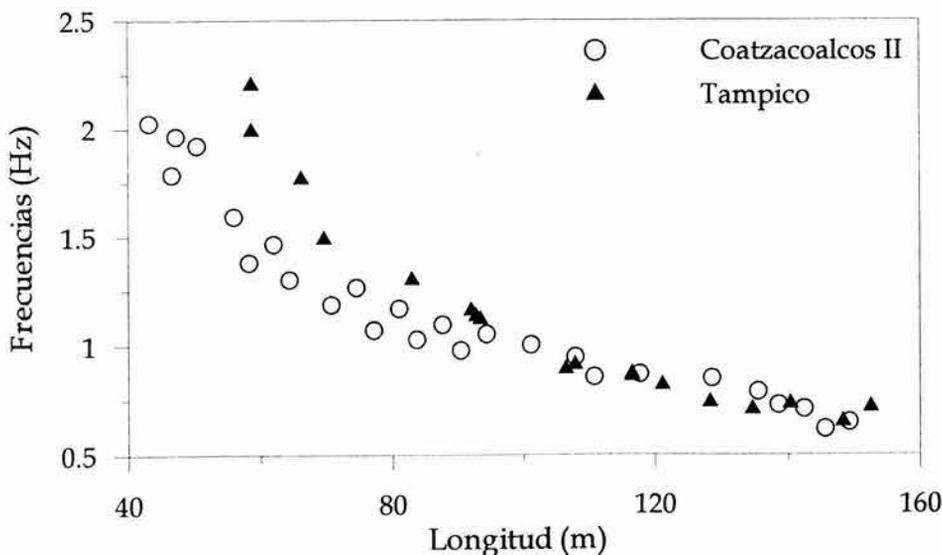


Fig 6.11 Relación frecuencia *versus* longitud para las pruebas de vibración libre en ambos puentes.

6.4 Determinación de amortiguamientos

Para poder determinar el valor de la fracción de amortiguamiento crítico se utilizaron todos los registros de las pruebas donde ocurre la vibración libre asociada esencialmente a la frecuencia de vibración fundamental con disminución de las amplitudes, como se ilustra en la fig 6.12.

Existen ciertas diferencias entre la calidad de los registros ya que en el puente Coatzacoalcos II dónde se realizaron éstas pruebas de una forma más formal (con un dispositivo especial), se consiguió obtener excelentes registros en todos los cables instrumentados (Apéndice L).

Para el caso del puente Tampico, estas pruebas se llevaron a cabo de una forma más rudimentaria, en consecuencia solo unos cuantos tirantes tenían un registro aceptable para estimar el amortiguamiento (Apéndice L).

Los amortiguamientos se calcularon utilizando dos criterios:

- 1 Se calculó el amortiguamiento con el registro completo (hc) cuando en la señal no se observa algún cambio notorio en la pendiente de las oscilaciones (fig 6.12)
- 2 Cuando los cambios de pendiente en las oscilaciones de la señal registrada fueron evidentes (fig 6.13), se obtuvieron tres valores de amortiguamiento: en el intervalo donde ocurre el primer cambio de pendiente (h1), con el registro restante (h2) y con todo el registro (hc).

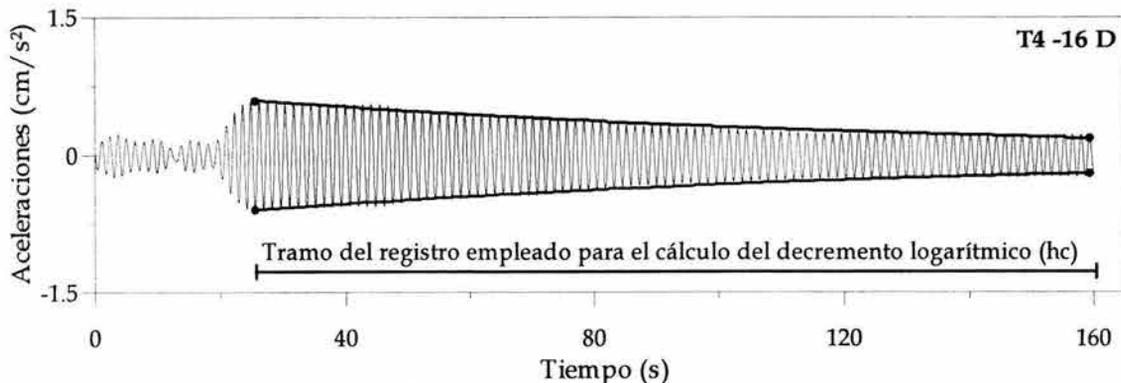


Fig 6.12 Registro de vibración libre sin cambio notorio de la pendiente

La finalidad de calcular éstos tres valores de amortiguamiento, es observar su comportamiento con respecto a la amplitud de la oscilación, puesto que en resultados experimentales obtenidos en estudios realizados en diferentes estructuras, se encontró que el amortiguamiento depende, entre otros factores, de dicha amplitud (Jeary, 1985) (Davenport y Hill, 1986).

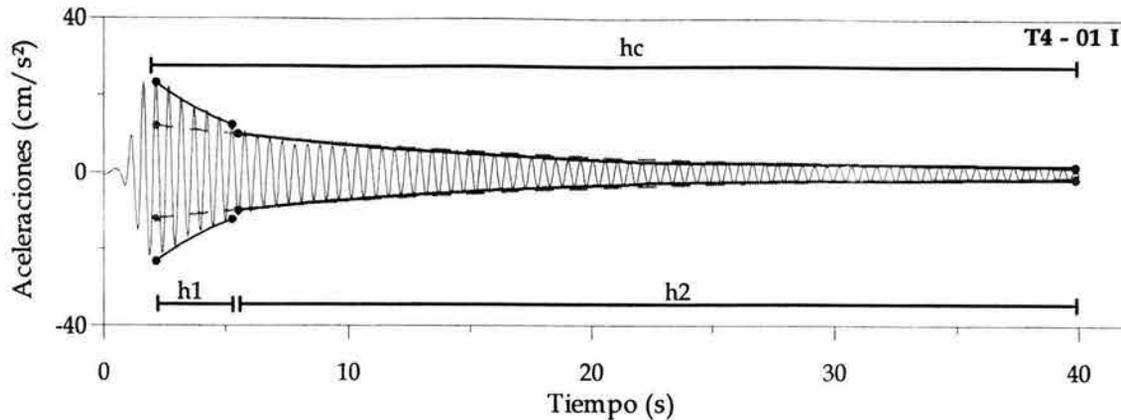


Fig 6.13 Registros de vibración libre con notorios cambios de pendiente

Amortiguamientos calculados en las señales sin cambios notorios en la pendiente

De acuerdo con la tabla 6.5, los valores de amortiguamiento del puente Coatzacoalcos II están en un intervalo entre 0.14 y 0.51 %, mientras que para los cables del puente Tampico, éstos valores se encuentran en un intervalo entre 0.17 y 0.60 %. Lo anterior refleja un bajo factor de amortiguamiento en los cables de ambos puentes. Los valores de amortiguamiento obtenidos con todo el registro en ambos puentes, en ningún caso superan el 1%, tal como se menciona en la referencia de Leonard (1998).

Tabla 6.5 Amortiguamiento en señales sin cambios notorios en la pendiente

Tirante	F1 (Hz)	l m	Amplitud		hc %
			Inicial	Final	
T4-17 D	0.60	154	0.90	0.34	0.20
T4-13 D	0.86	127	1.76	0.09	0.36
T4-12 D	0.86	119	0.96	0.05	0.35
T4-09 D	0.98	106	3.49	1.01	0.14
T4-07 I	1.18	92	3.12	0.49	0.17
T4-14 I	0.85	140	0.45	0.05	0.26
T4-15 I	0.79	133	2.53	0.76	0.31
T5-17 D	0.64	154	0.65	0.19	0.19
T5-16 D	0.70	147	1.03	0.12	0.30
T5-09 D	1.05	106	8.16	1.53	0.17
T5-01 I	2.05	48	25.28	11.61	0.16
T5-06 I	1.20	85	6.65	0.52	0.51
T5-07 I	1.07	92	14.94	2.12	0.44

Tirante	F1 (Hz)	l m	Amplitud		hc %
			Inicial	Final	
P13-H T	0.65	154	0.67	0.39	0.17
P13-F T	0.81	147	6.89	1.85	0.52
P13-B A	2.20	119	32.03	2.60	0.25
P13-G A	0.86	99	6.17	0.40	0.60
P14-J T	0.71	147	0.35	0.11	0.17
P14-H T	0.74	112	0.23	0.09	0.33
P14-G T	0.87	112	10.36	1.02	0.59
P14-D A	1.16	54	21.38	1.16	0.32
P14-G A	0.70	48	3.43	0.58	0.48

Amortiguamientos en los registros con notorios cambios de pendiente

Éste fenómeno se presentó en solamente la mitad de los tirantes instrumentados, tal como se observa en las tablas B.1 y B.2 del apéndice B.

El criterio para definir los intervalos de cálculo fue mediante la observación de los puntos en el registro donde ocurren cambios importantes en la pendiente de la oscilación (fig 6.13).

Para el primer intervalo (h_1), en los cables del puente Coatzacoalcos II, se encontró que el valor del amortiguamiento se encuentra en un intervalo entre 0.29 y 1.09% (tablas B.1 y 6.6). Para los cables del puente Tampico, los amortiguamientos se encuentran ubicados en un intervalo entre 0.22 y 0.94 %, de acuerdo con la tabla 6.7.

Estos intervalos de amortiguamientos de ambos puentes son semejantes al intervalo encontrado por Ohashi (1991), dónde señala que los amortiguamientos de los tirantes se encuentran en un intervalo entre 0.3 y 1.2 %.

Los amortiguamientos para el registro restante (h_2) y con el registro completo (h_c), de acuerdo con las tablas 6.6 y 6.7 son casi idénticos entre sí, teniendo una relación cercana a la unidad.

Cabe destacar que los valores de h_c se encuentran entre 0.13 y 0.34 para el puente Coatzacoalcos II y entre 0.14 y 0.64 % para el puente Tampico, además en ningún caso se supera el 1%.

Para determinar el comportamiento del amortiguamiento con respecto a la amplitud de la oscilación, se establece la relación entre el amortiguamiento en los primeros ciclos y el obtenido con el tramo restante del registro (h_1/h_2).

De ésta relación se distingue que el amortiguamiento calculado con las amplitudes mayores (h_1) es, en promedio, 2.7 y 2.1 veces mayor que el obtenido con h_2 , para los puentes Coatzacoalcos II y Tampico, respectivamente.

Tabla 6.6 Relación de amortiguamientos de acuerdo a la amplitud del movimiento en las pruebas en los tirantes del puente Coatzacoalcos II

Tirante	F1 (Hz)	l m	Amplitud		h1 %	Amplitud		h2 %	Amplitud		hc %	h1/h2	h2/hc
			Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final			
T4-16 D	0.73	147	0.6	0.4	0.29	0.4	0.2	0.16	0.5	0.2	0.21	1.7	0.8
T4-08 D	1.03	99	3.8	2.8	0.28	2.7	1.1	0.12	3.3	1.1	0.13	2.3	0.9
T4-05 D	1.32	79	3.8	3.0	0.24	2.8	0.4	0.18	3.8	0.4	0.19	1.3	1.0
T4-04 D	1.38	66	4.9	1.6	0.44	1.6	0.1	0.29	4.8	0.0	0.29	1.5	1.0
T4-01 I	1.97	48	16.9	3.3	0.80	3.1	0.2	0.19	4.4	0.1	0.19	4.2	1.0
T4-02 I	1.95	54	22.7	11.7	0.29	13.8	1.0	0.19	21.1	0.5	0.19	1.5	1.0
T4-03 I	1.57	60	5.8	2.3	0.58	1.7	0.2	0.17	2.9	0.2	0.19	3.5	0.9
T4-04 I	1.49	66	9.9	2.6	0.59	2.5	0.1	0.26	9.7	0.1	0.26	2.3	1.0
T4-06 I	1.25	85	13.5	1.9	1.09	1.8	0.3	0.23	13.0	0.3	0.23	4.7	1.0
T5-11 D	0.95	112	4.3	1.6	0.39	1.7	0.6	0.15	3.2	0.6	0.19	2.6	0.8
T5-10 D	1.01	106	3.9	1.8	0.34	1.7	0.6	0.14	3.0	0.5	0.17	2.3	0.8
T5-08 D	1.10	99	2.4	0.8	0.49	0.8	0.2	0.14	1.5	0.2	0.18	3.4	0.8
T5-02 I	1.82	54	16.6	2.6	0.99	3.1	0.2	0.31	7.5	0.2	0.34	3.2	0.9

Tabla 6.7 Relación de amortiguamientos de acuerdo a la amplitud del movimiento en las pruebas en los tirantes del puente Tampico

Tirante	F1 (Hz)	l m	Amplitud		h1 %	Amplitud		h2 %	Amplitud		hc %	h1/h2	h2/hc
			Inicial	Final		Inicial	Final		Inicial	Final			
P13 - C A	1.48	73	6.4	1.3	0.94	0.9	0.6	0.22	6.2	0.6	0.64	4.2	0.3
P14 - L T	0.71	182	5.2	3.5	0.22	3.7	2.7	0.13	4.8	2.7	0.14	1.7	0.9
P14 - F T	0.91	108	8.8	3.3	0.74	3.3	0.4	0.43	8.6	0.4	0.52	1.7	0.8
P14 - D T	1.31	86	19.3	9.5	0.42	9.3	2.4	0.27	20.1	1.2	0.27	1.6	1.0
P14 - B A	1.99	68	12.9	4.3	0.73	9.1	0.7	0.33	5.9	0.8	0.33	2.2	1.0
P14 - I A	0.62	167	1.5	1.2	0.33	1.1	0.6	0.25	1.5	0.6	0.27	1.3	0.9

Comparación de los amortiguamientos entre ambos puentes.

Es notoria la existencia de cierta semejanza entre los amortiguamientos de los tirantes de ambos puentes, para corroborar tal semejanza, se compara el valor de amortiguamiento en los tirantes bajo condiciones parecidas, esto es: tirantes de longitudes y amplitudes de oscilación semejantes. Los tirantes donde fue posible tener longitudes y amplitudes similares, se presentan en la tabla 6.8.

Tabla 6.8 Comparación de los amortiguamientos entre ambos puentes

Tirante	Puente	l m	Amplitud (cm/s ²)		h1 %	Relación		h1 _{tamp} /h1 _{coatz}
			inicial	final		inicial	final	
P14 - I A	Tampico	157	1.5	0.8	0.30	2.7	2.0	1.07
T4-16 D	Coatzacoalcos II	157	0.6	0.4	0.29			
P14 - F T	Tampico	108	3.1	2.4	0.36	0.8	1.4	1.05
T5-10 D	Coatzacoalcos II	108	3.9	1.8	0.34			
P14 - D T	Tampico	86	14.8	11.6	0.65	1.1	6.2	0.59
T4-06 I	Coatzacoalcos II	86	13.5	1.9	1.09			
P13 - C A	Tampico	79	0.8	0.6	0.70	0.8	0.9	3.91
T4-05 D	Coatzacoalcos II	79	1.1	0.6	0.18			
P14 - B A	Tampico	68	12.9	4.3	0.73	1.3	1.6	1.25
T4-04 I	Coatzacoalcos II	68	9.9	2.6	0.59			

Los datos de la tabla 6.8 sugieren que con amplitudes semejantes, el amortiguamiento es muy similar en longitudes menores a 79 m y superiores a 108 m los amortiguamientos son muy similares en ambos puentes, pero en las longitudes intermedias, existen amplias diferencias.

Para estimar de forma más precisa los límites dónde ocurre la dispersión en los amortiguamientos, se grafican en la fig 6.14 los datos h1 de todos los cables. Se distingue que en los cables con longitudes superiores a 70 m y menores a 120 m, ocurre la mayor dispersión en los amortiguamientos de ambos puentes. Si se grafican con los valores de h2 y hc de las señales sin cambios en la pendiente de ambos puentes, se aprecia una variación de los amortiguamientos similar (fig 6.15).

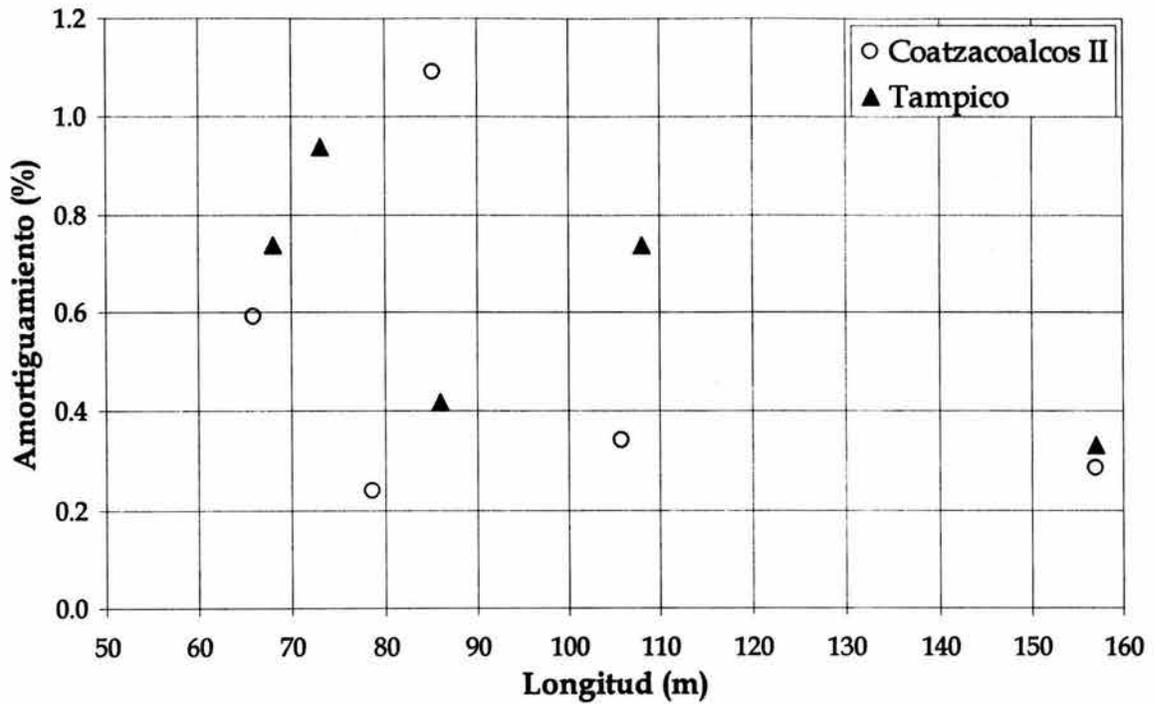


Fig 6.14 Relación de los amortiguamientos h1 versus longitud

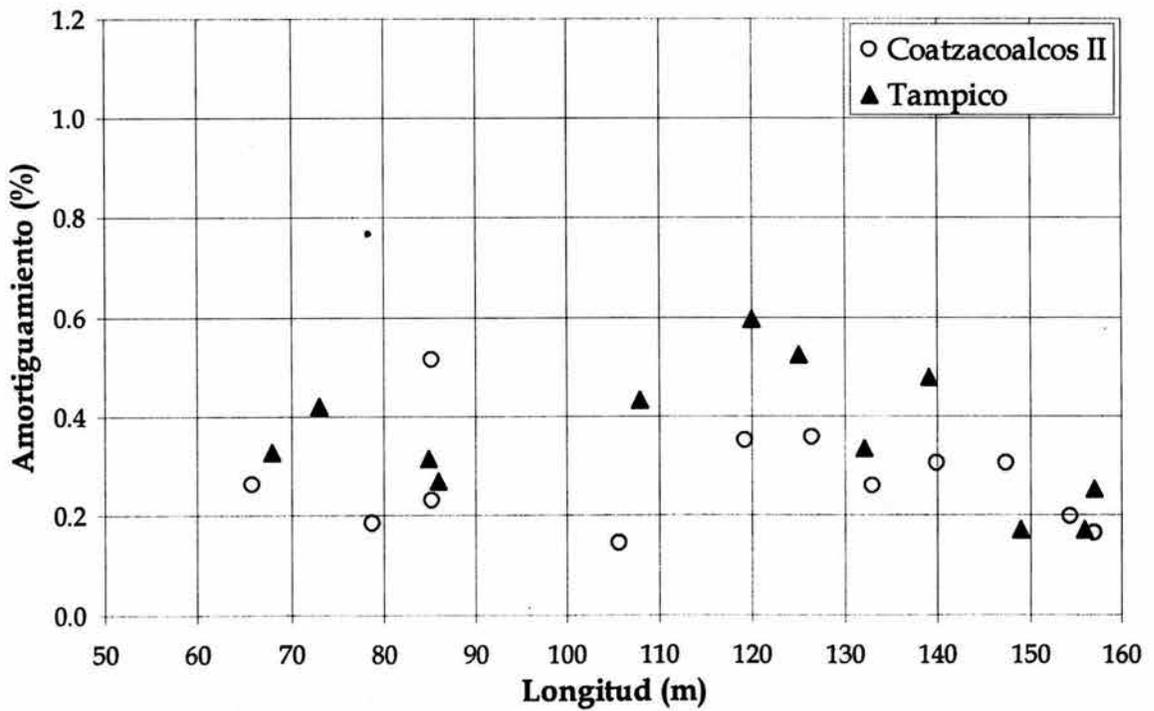


Fig 6.15 Relación de los amortiguamientos h2 y hc versus longitud

Relación entre la amplitud y los amortiguamientos

Para estimar el comportamiento del amortiguamiento con respecto a la amplitud de la oscilación, se estableció en las tablas 6.6 y 6.7 la relación entre el amortiguamiento en los primeros ciclos y el obtenido con todo el registro, resultado en promedio 2.7 y 2.1 mayor, para Coatzacoalcos II y Tampico, respectivamente.

Para poder establecer tal relación, es necesario tener un criterio de análisis que sea congruente para todos los cables, de tal forma que se puedan observar las modificaciones del amortiguamiento conforme varía la amplitud.

Se comparan los amortiguamientos h_1 , con respecto a la amplitud de la oscilación máxima con la que fueron calculados, tal como se observa en la fig 6.16 Para el puente Coatzacoalcos II dicha relación aumenta en función de la amplitud, mientras que para el puente Tampico no se define una tendencia.

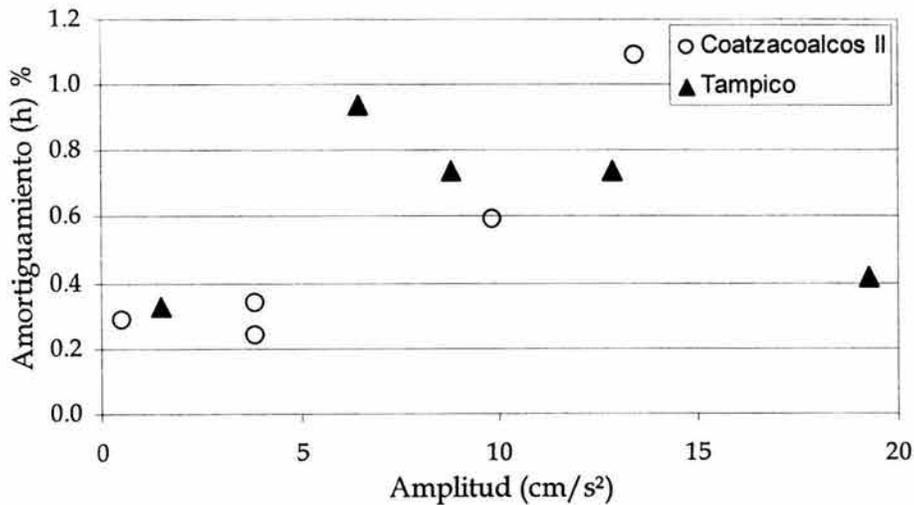


Fig 6.16 Amortiguamiento h_1 en los tirantes de los puentes Coatzacoalcos II y Tampico

Debido a que en la observación anterior no se muestra de forma clara el comportamiento del amortiguamiento con respecto a la longitud, es necesario observar tal comportamiento en los tirantes donde existen cambios evidentes en la pendiente de la oscilación. Los tirantes en la fig 6.17 están ordenados de acuerdo a su longitud, y en los tirantes con longitud semejante se utilizó el mismo símbolo para identificarlos.

En la fig 6.17 se puede observar que en ambos puentes el valor del amortiguamiento varía con la amplitud. Se distingue además, que el amortiguamiento en los tirantes con respecto a la longitud tiene el mismo comportamiento encontrado previamente, ya que en longitudes menores a 70 m y mayores a 120 m, existe una menor dispersión que en los datos que se encuentran dentro de éste intervalo.

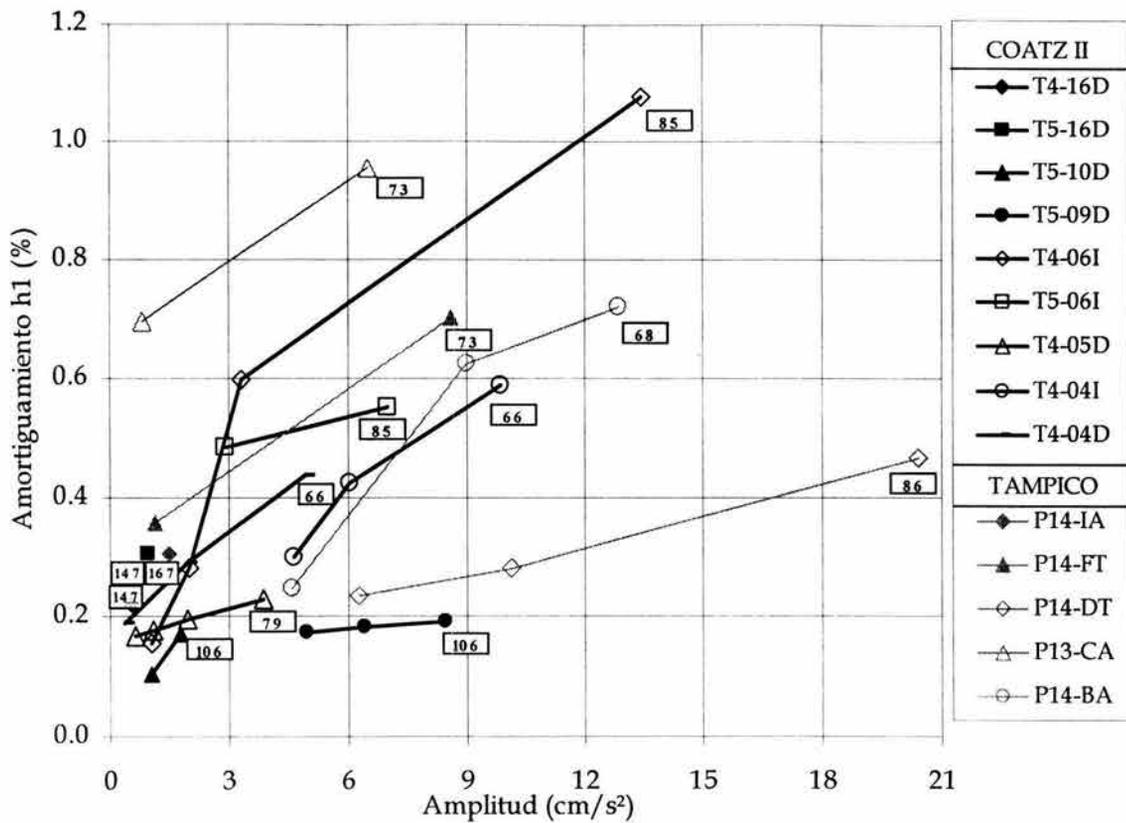


Fig 6.17 Relación amortiguamiento *versus* amplitud ordenados con respecto a la longitud indicada (en m)

La fig 6.17 muestra que en los tirantes con longitud superior a 120 m, el amortiguamiento no supera el 0.4 %, y en longitudes menores a 70 m, éste valor oscila entre 0.4 y 0.8 %.

En dicha figura se aprecia que los amortiguamientos de los cables, siguen una tendencia creciente en función de la amplitud. Es importante destacar la existencia de una gran dispersión en los amortiguamientos, incluso en cables de un mismo puente con longitudes similares, esto indica que aparentemente no existe un correcto acoplamiento entre el amortiguador y el tirante, y probablemente sea necesario efectuar un ajuste de éste dispositivo.

6.5 Tensiones calculadas

Obtención del peso de los tirantes

Para calcular las tensiones en los tirantes, es necesario conocer el peso por metro lineal de cada uno, tomando en cuenta cada uno de los materiales de los elementos que conforman el tirante: torones, relleno y recubrimiento. De los planos de cada puente se obtuvieron los pesos volumétricos de éstos materiales (tabla 6.5).

Tabla 6.9 Peso volumétrico en t/m^3 de los materiales de los tirantes

Elemento	Material	Coatzacoalcos II	Tampico
Torones	Acero	8.01	7.85
Relleno	Lechada / cera	1.70	1.00
Recubrimiento	PEAD	0.95	0.95

PEAD= Polietileno de alta densidad

La influencia de los materiales componentes de cada cable en el peso total de éste y por consiguiente en la tensión, se encuentran en las tablas D.1 a D.4 y tablas E.1 a E.4 de los apéndices D y E, para cada puente. En las tablas 6.10 y 6.11 se muestran los valores promedio de los tirantes de cada puente.

Con respecto al material de relleno surge una circunstancia adicional, ya que a diferencia de los otros materiales no se tiene ningún elemento o referencia, que permita establecer el área exacta que éste ocupa en el tirante. Por lo tanto, hay una incertidumbre sobre el porcentaje de relleno efectivo. Para fines prácticos se supone que estos valores podrán ser 100, 90 y 80 %, para de esa forma evaluar su implicación en el cálculo de las tensiones.

De las tablas 6.10 y 6.11 se establece que el peso del tubo de recubrimiento en ambos puentes corresponde aproximadamente al 13 % del peso total. Por otra parte, para el acero se presenta una diferencia importante entre los dos puentes, puesto que en Coatzacoalcos II éste peso representa aproximadamente el 48 %, mientras que en Tampico corresponde al 67%.

Cabe destacar que aunque el número de torones utilizado en los tirantes de ambos puentes es semejante, ésta diferencia se debe a que en el puente Coatzacoalcos II se utilizó una mayor cantidad de material de relleno, pues además de ser más pesado que en el puente Tampico (tabla 6.9), ocupa una mayor área, ya que el diámetro de los tubos de recubrimiento utilizados en Coatzacoalcos II, es mayor a los del puente Tampico (Apéndice C).

Con respecto al peso del material de relleno, la influencia en el puente Tampico es cercana al 20 %(cera), mientras que en Coatzacoalcos II (lechada), representa prácticamente el mismo peso del acero, esto es entre 44 y 49 %.

Tabla 6.10 Promedio del porcentaje del peso de cada material con respecto al peso total y su influencia en la tensión en los tirantes del puente Coatzacoalcos II

Porcentaje de Relleno	Peso en porcentaje			Influencia en la tensión %			
	Acero	Tubo	Relleno	Tubo	CV	Relleno	CV
100	40	11	49	11	8	49	12
90	42	12	46	12	8	46	13
80	44	13	44	13	9	44	13

Tabla 6.11 Promedio del porcentaje del peso de cada material con respecto al peso total y su influencia en la tensión en los tirantes del puente Tampico

Porcentaje de Relleno	Peso en porcentaje			Influencia en la tensión %			
	Acero	Tubo	Relleno	Tubo	CV	Relleno	CV
100	66	12	22	12	15	22	16
90	67	13	20	13	15	20	17
80	69	13	19	13	15	19	17

Ya que existe incertidumbre en el peso total del tirante debida al porcentaje de relleno, las tensiones se calcularon utilizando cada porcentaje propuesto (figs 6.18 y 6.19), determinando las diferencias entre dichas tensiones para conocer su implicación en el cálculo. Las diferencias se calcularon con la expresión:

$$D_{100-n} = \left(\frac{T_{100} - T_n}{T_{100}} \right) 100$$

donde

D_{100-n} diferencia en porcentaje de las tensiones T_{100} y T_n

T_{100} tensión calculada suponiendo un relleno de 100 %

T_n tensión calculada suponiendo un porcentaje n del material de relleno

Las diferencias evaluadas fueron 100-90 (D_{100-90}) y 100-80 (D_{100-80}), estas diferencias calculadas se encuentran en las tablas E.5 y E.6 del apéndice E.

En el puente Coatzacoalcos la diferencia D_{100-90} en promedio alcanzó 5.2 %, y para la diferencia D_{100-80} el valor obtenido en promedio fue 10.4%.

Para el puente Tampico en la diferencia D_{100-90} se obtuvo el valor de 2.2 %, mientras que en D_{100-80} el valor fue de 4.5 %.

Además de conocer éstas diferencias, se busca conocer el incremento de la tensión en cada torón, al suponer la falla de uno o cuatro de ellos. Los resultados aparecen en las tablas E.3 y E.4 del apéndice E.

La tensión en los torones, se incrementa en promedio 2 y 10 % cuando falla uno y cuatro torones, respectivamente. Cabe mencionar que éste incremento se presentan con la misma magnitud en los dos puentes.

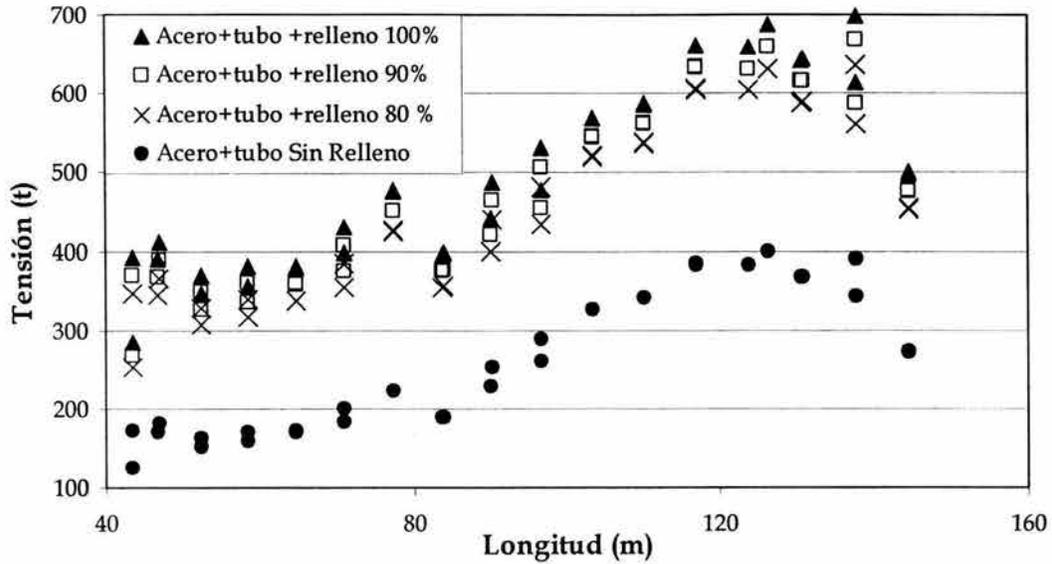


Fig 6.18 Tensiones obtenidas con diferentes porcentajes de relleno en el puente Coatzacoalcos II

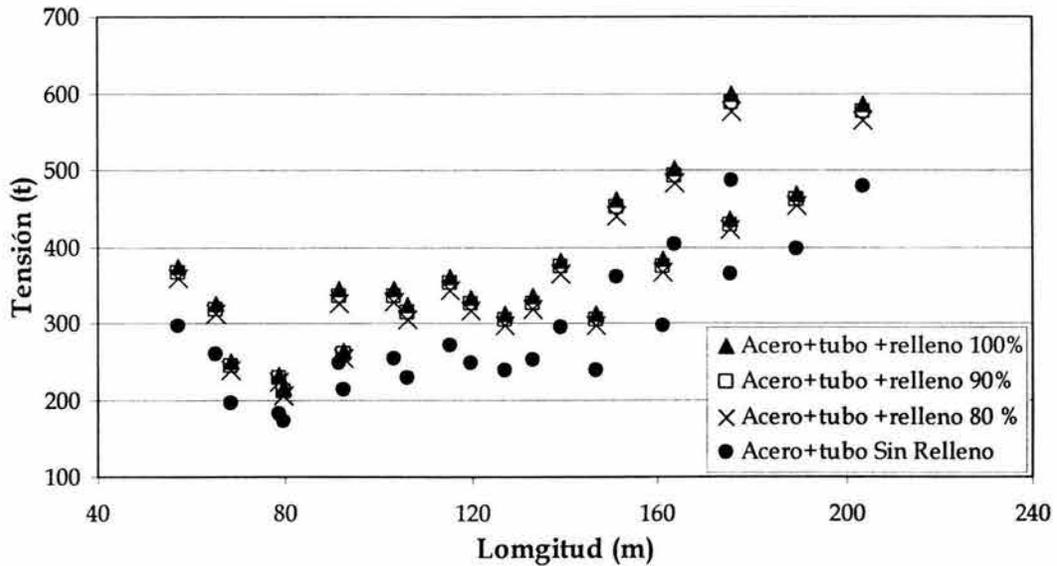


Fig 6.19 Tensiones obtenidas con diferentes porcentajes de relleno en el puente Tampico

Cálculo de las tensiones

El cálculo de las tensiones se llevó a cabo sin considerar los efectos de curvatura (ec 3.11) y considerando tales efectos (ecs 3.25-3.30), esto con el fin de conocer su influencia.

Debido a que el parámetro ϵ , requiere el conocimiento de una tensión cercana a la del tirante, se utilizaron las tensiones medidas por medio de gatos-hidráulicos, realizadas previamente. Estas tensiones corresponden a las indicadas en las tablas del apéndice G como tensiones medidas.

Para conocer el efecto que causa la curvatura en el cálculo de la tensión se requiere comparar la diferencia entre la tensión calculada con y sin dichos efectos, las diferencias se determinan mediante la siguiente expresión:

$$\Delta T = \left(\frac{T_{cc} - T_{sc}}{T_{cc}} \right) 100$$

dónde

- Tsc – Tensión sin efecto de curvatura
- Tcc – Tensión con efecto de curvatura

Las diferencias entre las tensiones calculadas con y sin tomar en cuenta la curvatura del cable, no sobrepasan el 5 % en ambos puentes, como se observa en el Apéndice H y la fig 6.20; lo cual muestra que la influencia de la curvatura en éstos puentes es baja.

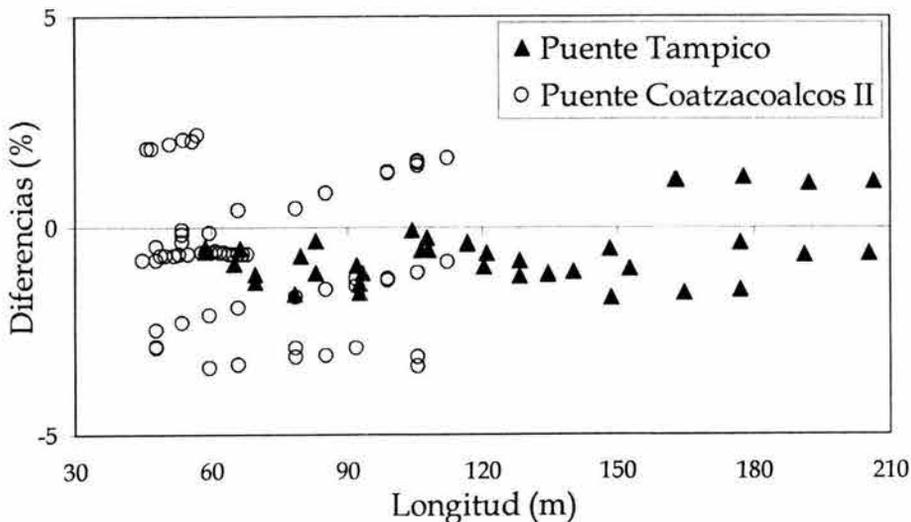


Fig 6.20 Diferencia entre las tensiones calculadas con o sin el efecto de curvatura para ambos puentes

Comparación de las tensiones calculadas respecto a las medidas con gatos hidráulicos

Conocer la diferencia entre las tensiones calculadas y las medidas con gatos es una de las formas de demostrar si la teoría es confiable al realizar la estimación de las tensiones; éstas diferencias se muestran en las figs 6.21 a 6.23 con los datos de las pila 15 de Coatzacoalcos II y la pila 13 de Tampico (apéndice I), que son las pilas dónde existe mayor diferencia; éstas se calculan con la expresión siguiente:

$$D_{cm} = \left(\frac{T_{PD} - T_m}{T_{PD}} \right) 100$$

donde

T_{PD} tensión calculada por medio de las pruebas dinámicas
 T_m tensión medida con los gatos hidráulicos

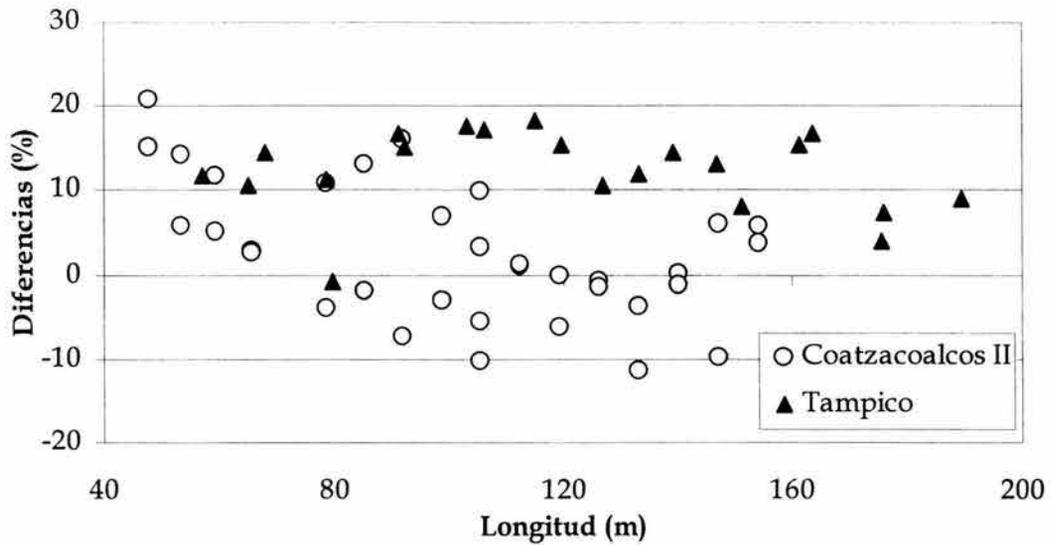


Fig 6.21 Diferencia entre las tensiones obtenidas con pruebas dinámicas y con los gatos hidráulicos, considerando 100 % de relleno en los puentes Coatzacoalcos II y Tampico.

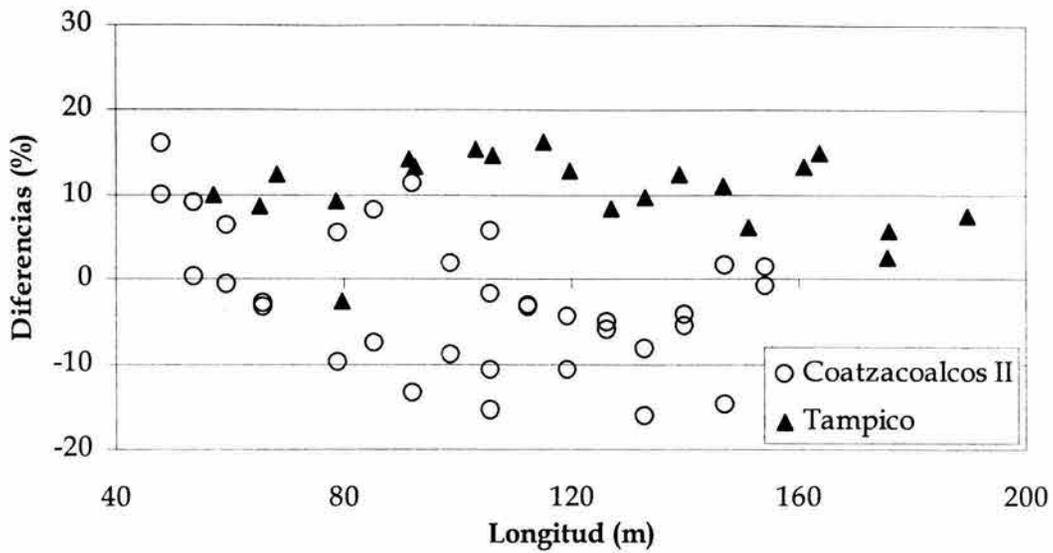


Fig 6.22 Diferencia entre las tensiones obtenidas con pruebas dinámicas y con los gatos hidráulicos, considerando 90 % de relleno en los puentes Coatzacoalcos II y Tampico.

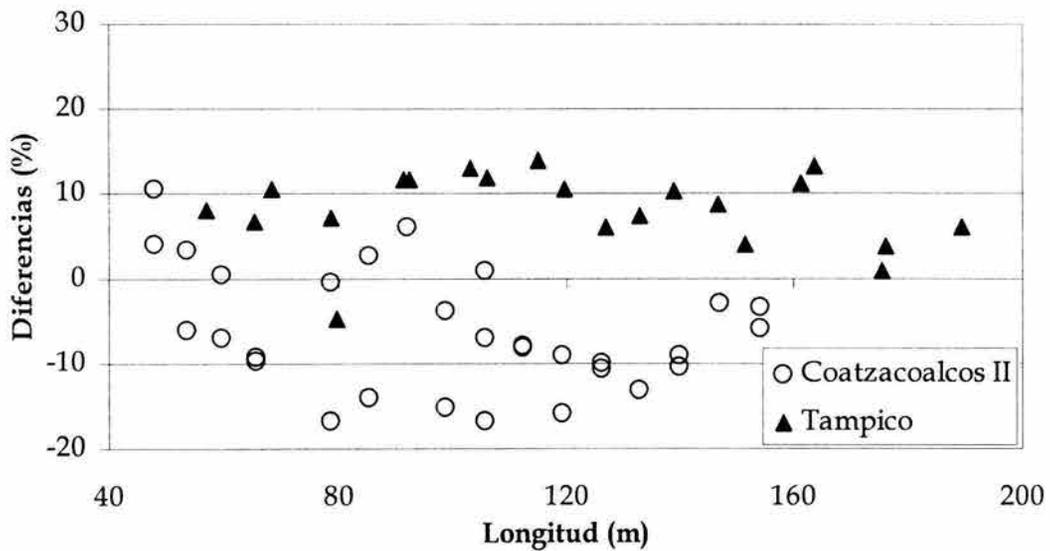


Fig 6.23 Diferencia entre las tensiones obtenidas con pruebas dinámicas y con los gatos hidráulicos, considerando 80 % de relleno en los puentes Coatzacoalcos II y Tampico.

Finalmente, en la fig 6.24, se hace una comparación de las tensiones calculadas para ambos puentes.

Se observa que las tensiones de los tirantes del puente Coatzacoalcos II, aumentan conforme aumenta la longitud, pero comienzan a disminuir a partir de 120 m. Por otro lado en el puente Tampico aumentan de igual forma con la longitud, sin disminuir.

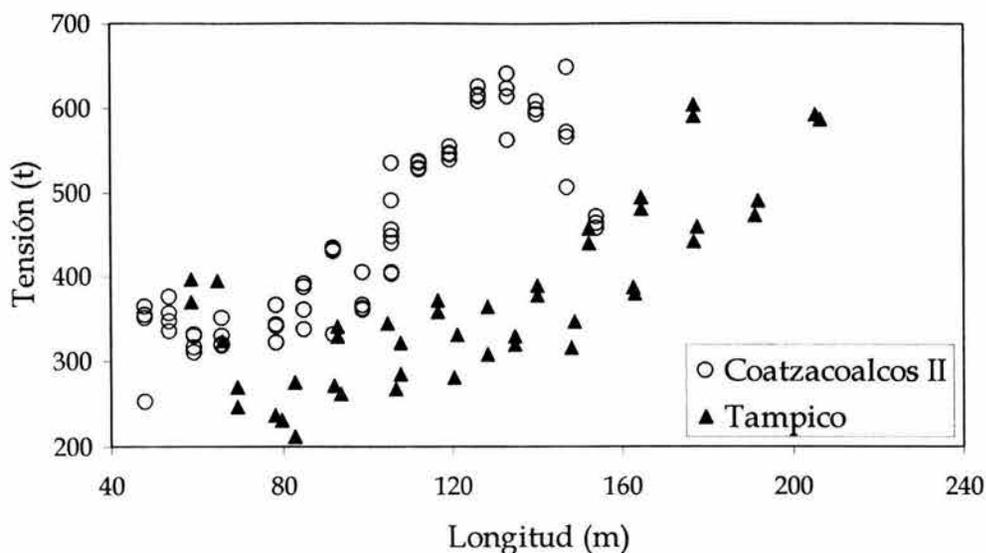


Fig 6.24 Comparación de las tensiones calculadas entre ambos puentes

La tensión en los tirantes del puente Coatzacoalcos II difiere de las de Tampico, cuando sus longitudes están comprendidas entre 80 y 150 m.

Para entender éste hecho, es importante destacar que además de las diferencias existentes en los materiales de los tirantes, el peso del claro central de cada puente al ser de diferente material, es distinto. Éste peso es de aproximadamente 22 t/m en el puente Coatzacoalcos II que es de concreto reforzado, mientras que en Tampico que es de acero, el peso es de de 13 t/m.

Revisión del esfuerzo permisible del acero de los tirantes.

Con las tensiones finales conocidas es conveniente revisar el estado límite de falla del acero de los tirantes para saber si no existe algún problema estructural en ellos.

El estado límite se revisa de acuerdo con lo establecido en la norma AASHTO M 203 (ASTM A 416), para elementos de acero que trabajan bajo tensión axial, por ello la tensión permisible de los cables se calcula con la expresión:

$$T_p = 0.55 Fr A_t$$

dónde

- T_p tensión permisible
- Fr esfuerzo de ruptura del torón
- A_t área total de acero del cable

Los esfuerzos de ruptura de los torones son de 18,600 kg/cm² para el puente Coatzacoalcos II y de 16,550 kg/cm² para el puente Tampico.

La revisión se lleva a cabo buscando la diferencia entre la tensión calculada y la tensión permisible, una diferencia negativa indicará que los torones se encuentran debajo del esfuerzo permisible, y una diferencia positiva indicará un sobreesfuerzo, estas diferencias calculadas se encuentran en el apéndice J.

La revisión del esfuerzo permisible en el acero de los tirantes se lleva a cabo utilizando la tensión considerando que el relleno del cable se encuentra al 100 %, pues éste porcentaje resulta ser el más desfavorable, ya que en el se encuentra los valores más altos de las tensiones. El cálculo se presenta en el apéndice H (tablas H.1 y H.2)

Se observa que los tirantes de ambos puentes se encuentran trabajando a tensiones por debajo de las permisibles (figs 6.25 y 6.26).

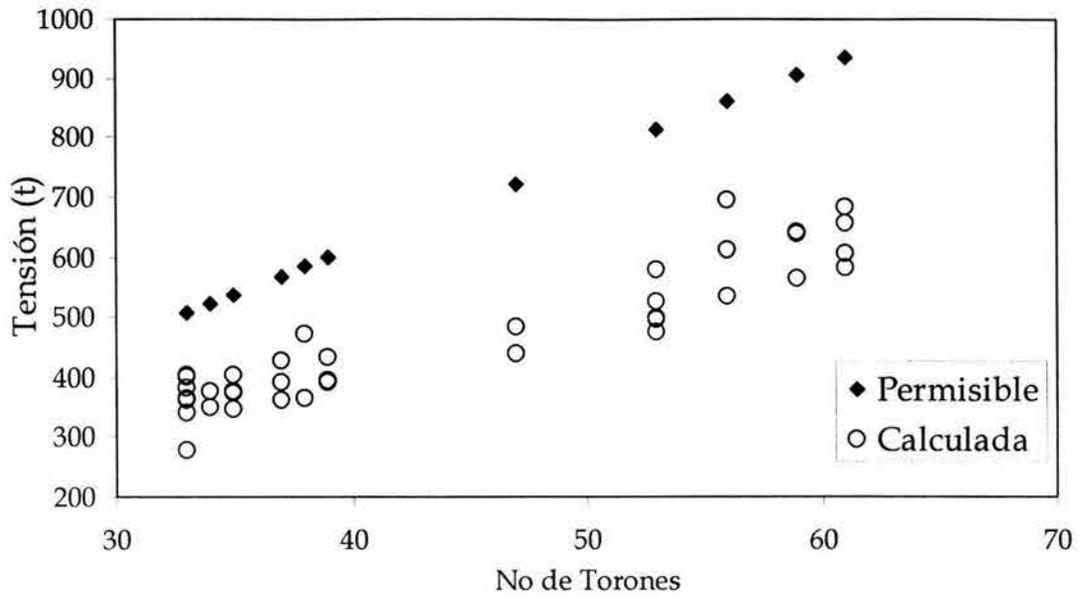


Fig 6.25 Diferencias entre la tensión permisible y la calculada, puente Coatzacoalcos II

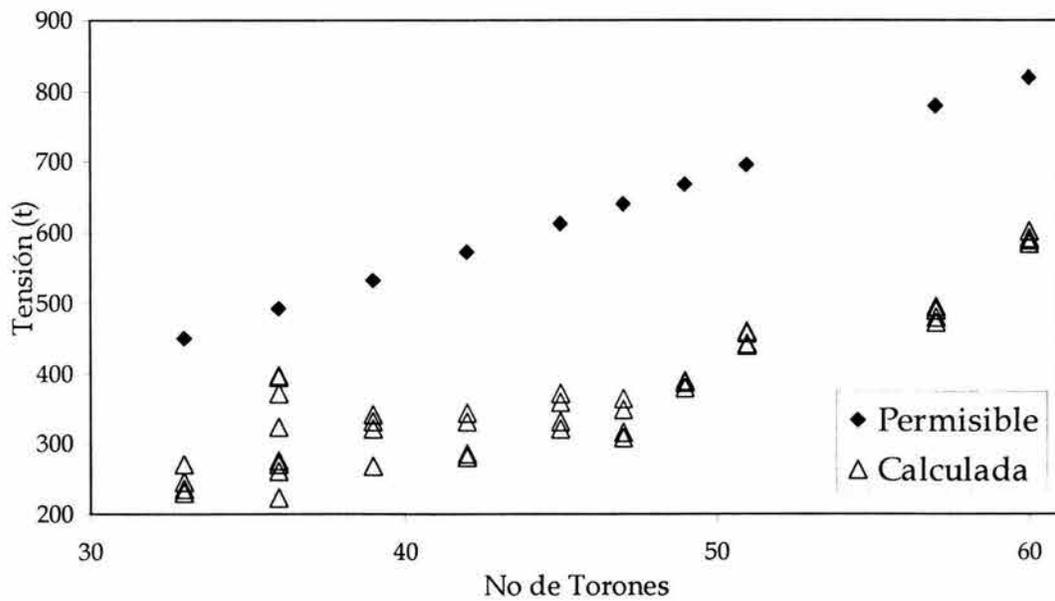


Fig 6.26 Diferencias entre la tensión permisible y la calculada, puente Tampico

Revisión de control de la estabilidad de las tensiones

De acuerdo con Dyke, *et al* (2003), la tensión en los tirantes deberá permanecer dentro de un intervalo tolerable de valores. Un valor inferior es necesario para revisar que el cable se encuentra trabajando correctamente, y un valor máximo da un cierto factor de seguridad que garantiza la prevención de una falla del cable.

Cabe destacar que el límite inferior de la tensión en los tirantes de ambos puentes, se propuso suponiendo que la tensión es mayor al peso del tirante, para así determinar si el cable soporta por lo menos su propio peso.

En ésta referencia se menciona que la tensión de los cables no deberá ser mayor a $0.7T_p$ ni será inferior a $0.2T_p$, dónde T_p es la tensión máxima permisible.

Las diferencias con los límites inferior y superior se calculan mediante las expresiones:

$$D_{0.2T_p} = \left(\frac{T_{PD} - 0.2T_p}{T_{PD}} \right) 100$$

$$D_{0.7T_p} = \left(\frac{0.7T_p - T_{PD}}{0.7T_p} \right) 100$$

Al igual que en el esfuerzo de los tirantes ésta revisión se lleva a cabo utilizando las tensiones que resultaron mayores; los datos obtenidos en cada tirante se presentan en el apéndice K.

De acuerdo con la fig 6.27, todas las tensiones en el puente Coatzacoalcos II están por encima del valor mínimo, y en su mayoría quedan por debajo del límite superior, aunque en algunos casos se sobrepasa éste valor límite.

Para el caso de Tampico todas las tensiones quedaron por encima del límite inferior y la gran mayoría por debajo del valor máximo (fig 6.28), de igual forma algunas tensiones de los cables superan éste valor.

En ambos puentes solamente el 5 % del total de los cables sobrepasan el valor límite superior.

Esta revisión se realiza con las tensiones en un estado relativamente estático, pero para asegurar que el funcionamiento de los tirantes es de forma adecuada, es necesario realizar la revisión ante solicitaciones dinámicas de diseño, lo cual queda fuera de los alcances del presente trabajo.

Se recomienda llevar a cabo ésta revisión pues con la revisión estática, algunos tirantes la tensión sobrepasa los valores límite, y probablemente al realizar la revisión de solicitaciones dinámicas se haga más evidente éste hecho.

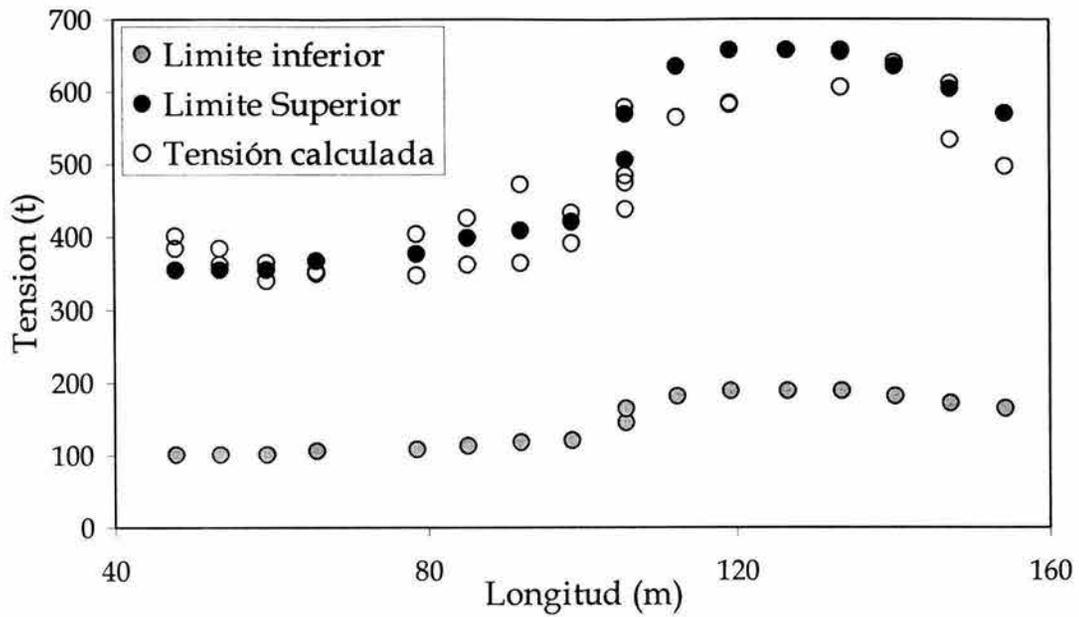


Fig 6.27 Revisión del control de la estabilidad de las tensiones, puente Coatzacoalcos II

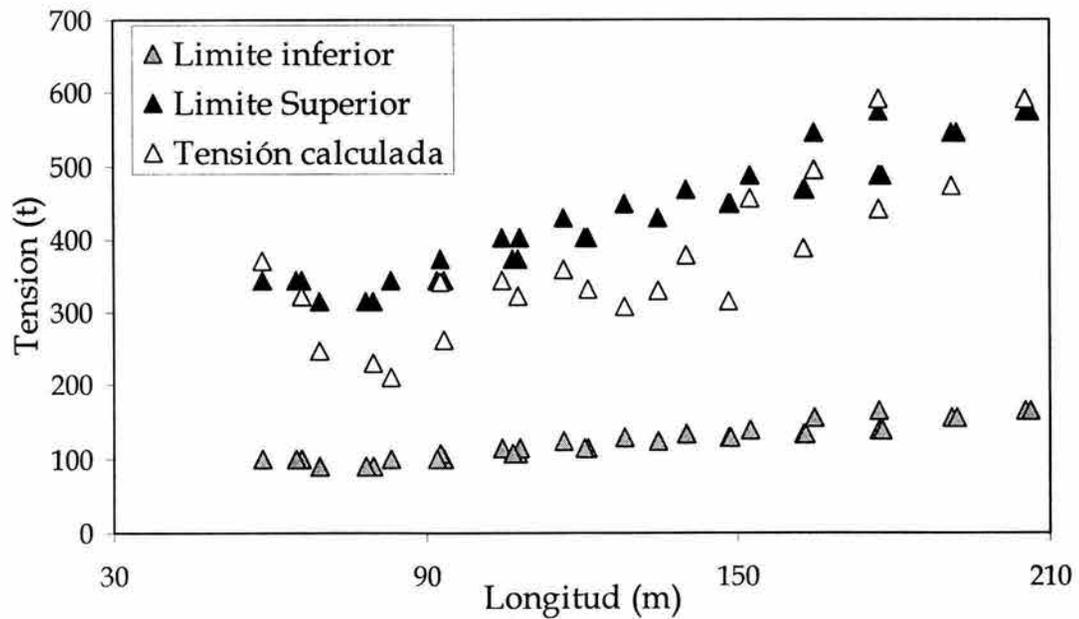


Fig 6.28 Revisión del control de la estabilidad de las tensiones, puente Tampico

Revisión de las diferencias de la tensión de diseño respecto a la tensión calculada

Se deberá revisar que el incremento de las tensiones de diseño (T_d) no exceda del 19 % (Dyke *et al*, 2003), éste calculo se presenta en el apéndice I (tablas I.1 a I.6) para Coatzacoalcos II y Tampico con la expresión siguiente

$$D_{cd} = \left(\frac{T_{PD} - T_d}{T_{PD}} \right) 100$$

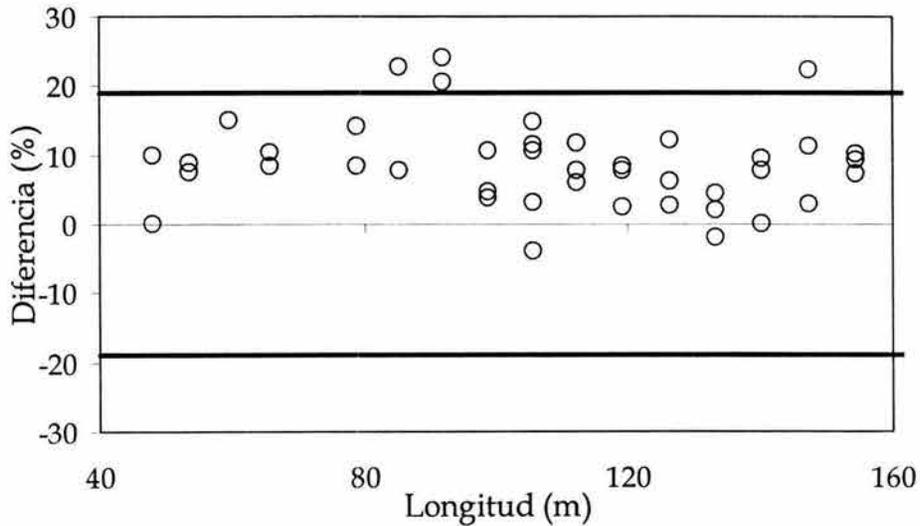


Fig 6.29 Diferencias entre T_d y T_{PD} en el puente Coatzacoalcos II

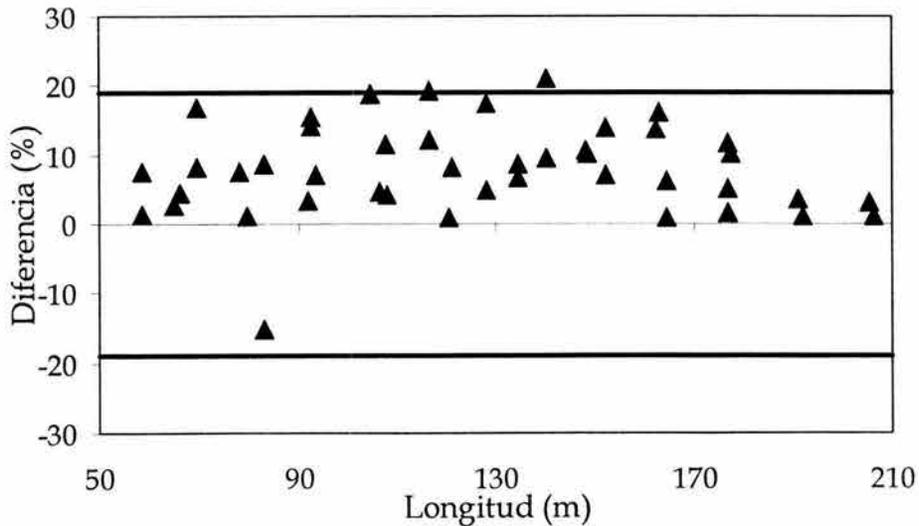


Fig 6.30 Diferencias entre T_d y T_{PD} en el puente Tampico

Se observa en las figs 6.29 y 6.30, que en ambos puentes cuatro cables superan ésta diferencia y probablemente será necesario llevar a cabo un reajuste de la tensión en estos tirantes.



Conclusiones

7 CONCLUSIONES

Se presentaron los resultados de un programa de pruebas de campo no destructivas realizadas en los cables de dos grandes puentes atirantados (Coatzacoalcos II y Tampico) que comprendieron pruebas de vibración ambiental y pruebas de vibración libre.

Las frecuencias fundamentales de vibración obtenidas en los cables donde se llevaron a cabo las pruebas de vibración ambiental y vibración libre resultaron prácticamente idénticas, estableciendo la validez de las frecuencias identificadas. Por lo tanto, éste tipo de pruebas mostraron ser una excelente herramienta para determinar las propiedades dinámicas de los tirantes de éstos puentes.

Se observa una relación inversa entre la frecuencia natural de vibración y la longitud de los tirantes, ya que al aumentar la longitud, la frecuencia de vibración disminuye.

Con respecto a los amortiguamientos de los cables, se encontró en los dos puentes que tienen una gran dispersión cuando la longitud de los cables está entre 70 y 120 m, disminuyendo considerablemente cuando su longitud ésta por fuera de éste intervalo.

Para obtener los amortiguamientos, es importante establecer criterios de cálculo y obtenerlos bajo condiciones similares para de esa forma asegurar que los resultados obtenidos son correctos.

En el cálculo de la tensión por medio de la ecuación clásica de vibración de cuerdas tomando las consideraciones previamente descritas, se obtienen resultados confiables de las tensiones, y al encontrar que en los cables estudiados la influencia de la curvatura en la tensión es baja, se corroboró que obtener las tensiones de ésta forma es aceptable.

El analizar la influencia de los pesos permitió estimar hasta que punto afecta en el cálculo de la tensión de los tirantes, el ignorar o estimar de forma errónea el peso de alguno de sus componentes.

Las tensiones calculadas fueron semejantes a las obtenidas por medio de los gatos hidráulicos. De igual forma al comparar las tensiones obtenidas con las permisibles, se encontró que éstas se encuentran por debajo de los valores límite.

En la revisión de la estabilidad en las tensiones que propone Dyke (*et al*, 2003) y suponiendo que éstos criterios sean válidos para los dos puentes estudiados, se encontró que tendrían que ajustarse las tensiones en algunos cables tanto de Coatzacoalcos II como de Tampico, puesto que éstas superan los valores límite propuestos.

Es recomendable realizar estudios más detallados para establecer parámetros de evaluación para que, dentro de los trabajos de mantenimiento, se realice la revisión de las tensiones en los cables. Siendo importante que en éstos parámetros estén incluidos los efectos de viento y fuerzas a las que están sometidos los puentes atirantados, ya que aunque existen algunos, las condiciones bajo las cuales son determinados podrían no ser aplicables en los puentes del país.



Referencias

REFERENCIAS

AASHTO "Standard Specification for Highway Bridges", Sección 10, 2002, AASHTO, Estados Unidos

Ambaradar, A.; (1999); "Analog and digital signal processing"; Thomson Publishing, Cincinnati

Aschrafi, M.; Hirsch, G. H.; (1983); "Control of wind-induced vibrations of cable-stayed bridges"; Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics No 14; Amsterdam; Holanda; pags. 235-246

Bendat, J. S.; Piersol, A. G.; (1989); "Random data: analysis and measurements procedures"; 2ª edición; Wiley Interscience; Nueva York

Casas, J. R.; (1994); "A combined method for measuring cable forces; the cable – stayed Alamillo bridge, Spain"; ASCE; Journal of Structural Engineering; V 120; n° 4; p 235-240

Clough, R.W.; Penzien J.; (1975); "Dynamic structures"; McGraw Hill; Nueva York

Davenport, A.G.; Hill-Carroll, P.; (1986); "Damping in tall buildings: its variability and treatment in design"; Building Motion in Wind; ASCE; Nueva York; p 42-57

Dyke, S.J.; Caicedo, J.M.; Turan, G.; Bergman, L.A.; Hague, S.; (2003) "Phase I Benchmark Control Problem for Seismic Response of Cable-Stayed Bridges"; Journal of Structural Engineering: Special Issue on semi-active control; ASCE; V 129; n° 7

Gómez Martínez, R.; Murià Vila D.; Escobar Sánchez, J. A.; Sánchez R.; Rodríguez, G.; (1999); "Estudio de prueba estática y dinámica y modelación matemática de la estructura del tramo principal del puente de cuota Tampico", Informe Final. Instituto de Ingeniería UNAM.

Gómez Martínez, R.; Murià Vila D.; Escobar Sánchez, J. A.; Sánchez R.; (2001); "Detección experimental y analítica de cambios estructurales de un puente atirantado"; Información tecnológica; La Serena, Chile; p 134-145

Humar, J. L.;(1990); "Dynamics of structures"; Prentice Hall; Nueva Jersey

Irvine, M.; (1981); "Cable Structures"; MIT Press; Massachusetts

Jeary; A. P.; (1986); "Damping in tall buildings – a mechanism and a predictor"; Earthquake engineering and structural dynamics; Inglaterra; n° 14; p 733 - 750

Leonard, J.W.; (1998); "Tension structures: behavior and analysis"; McGraw Hill; Nueva York

Leonhardt, F; (1982);"Ponts-Puentes"; Presses polytechniques romandes; Lausana; Suiza

Leonhardt, F.; Zellner, W.; (1991); "Past, present and future of cable stayed bridges"; Elsevier Science Publishers, Amsterdam, "Cable stayed bridges, recent developments and their future"; p 1-33

Murià Vila, D.; González Alcorta, R.; (1995); "Propiedades dinámicas de edificios de la ciudad de México"; Revista de Ingeniería Sísmica; México; n° 51; p 25 - 45

Murià Vila D.; Gómez, R.; King, C.; (1991); "Dynamic structural properties of cable-stayed Tampico bridge"; Journal of Structural Engineering; V 117; n° 11; p 3396-3416

Murià Vila D.; Rodríguez, G.; (1999); "Análisis de los registros sísmicos obtenidos de 1993 a 1998 en el edificio Jal"; Informe; Instituto de Ingeniería, UNAM

Narita, N.; Yokoyama, K.; "A summarized account of damping capacity and measures against wind action in cable-stayed bridges in Japan"; Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1991, "Cable stayed bridges, recent developments and their future"; p 257-278

Ohashi, M.; "Cables for cable stayed bridges"; Elsevier Science Publishers, Amsterdam, (1991), "Cable stayed bridges, recent developments and their future"; p 125-150

Pacheco, B. M.; Fujino, Y.; Sulekh, A.; (1993); "Estimation curve for modal damping in stay cables with viscous damper"; ASCE; Journal of Structural Engineering; V 119; n° 6; p 1961 - 1979

Sánchez Ramírez, A. R.; (1991); "Disparador automático para pruebas de tracción en estructuras"; Proyecto 1730; Instituto de Ingeniería; UNAM.

Thomson, W.T.; Dillon, M.; (1998); "Theory of vibration with applications"; Prentice Hall; Nueva Jersey

Vargas Gómez, F.; (1982); "Construcción de un nuevo puente sobre el río Coatzacoalcos"; CICM; México

Virlogeux, M.; (1999); "Recent evolution of cable-stayed bridges", Elsevier Science; n° 21; p 735-755

Walpole, R. E.; Myers, R. H.; (1987); "Probabilidad y estadística para ingenieros"; Interamericana; México DF

Zui, H.; Shinke, T; Namita, Y; (1996); "Practical formulas for estimation of cable tension by vibration method"; ASCE; Journal of Structural Engineering; V 122; n° 6; p 651-656

Apéndice A



Frecuencias identificadas
pruebas de vibración ambiental

Apéndice A Frecuencias identificadas pruebas de vibración ambiental

Tabla A.1 Frecuencias identificadas en la pila 14, puente Coatzacoalcos II

Tirante	F1 calculada (Hz)	Frecuencias identificadas (Hz)							$D = \left \frac{F_{ic} - F_{ind}}{F_{ic}} \right 100$
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	%
T4-17 D	0.62	0.64	1.17	1.81	2.39	2.98	3.56	4.20	3.20
T4-16 D	0.77	0.78	1.42	2.15	2.88	3.61	4.35	5.81	0.87
T4-15 D	0.78	0.78	1.56	2.30	3.08	3.86	4.64	5.42	0.30
T4-14 D	0.83	0.83	1.61	2.49	3.32	4.15	4.98	5.86	0.56
T4-13 D	0.87	0.88	1.71	2.59	3.42	4.30	5.18	6.06	0.62
T4-12 D	0.87	0.88	1.71	2.54	3.42	4.30	5.18	6.10	0.73
T4-11 D	0.93	0.93	1.81	2.69	3.61	4.54	5.47	6.40	0.16
T4-10 D	0.94	0.93	1.86	2.78	3.71	4.64	5.62	6.59	1.09
T4-09 D	0.98	0.98	1.90	2.88	3.86	4.88	5.86	6.89	0.56
T4-08 D	1.02	1.03	2.00	3.03	4.05	5.13	6.20	7.32	0.35
T4-07 D	1.22	1.22	2.39	3.66	4.35	6.69	7.47	7.91	0.45
T4-06 D	1.22	1.22	2.30	3.47	4.64	5.86	7.13	8.45	0.04
T4-05 D	1.33	1.32	2.59	3.91	5.23	6.64	8.11	9.67	0.98
T4-04 D	1.39	1.42	2.73	4.10	5.47	6.89	8.45	10.11	1.99
T4-03 D	1.58	1.56	3.13	4.69	6.35	8.11	10.06	10.30	0.78
T4-02 D	1.85	1.86	3.71	5.66	7.72	9.91	10.30	12.31	0.00
T4-01 D	1.83	1.86	3.71	5.71	7.13	9.33	10.35	13.14	1.28
T4-01 I	1.97	2.00	3.91	6.01	8.30	9.81	10.94	13.97	1.70
T4-02 I	1.96	1.90	3.81	5.76	7.86	10.16			2.63
T4-03 I	1.64	1.61	3.13	4.79	6.49	8.35	10.40		1.58
T4-04 I	1.51	1.47	2.93	4.44	5.96	7.62	9.42		2.71
T4-05 I	1.32	1.32	2.59	3.96	5.27	6.69	7.72	8.15	0.06
T4-06 I	1.27	1.27	2.49	3.81	5.08	6.40	7.81	9.28	0.13
T4-07 I	1.19	1.22	2.30	3.47	4.64	5.86	7.13	8.45	2.59
T4-08 I	1.07	1.03	2.10	3.17	4.25	5.37	6.49	7.67	4.23
T4-09 I	1.03	1.03	2.00	3.03	4.05	5.08	6.15	7.28	0.27
T4-10 I	0.99	0.98	1.95	2.93	3.91	4.93	5.96	7.03	1.71
T4-11 I	0.93	0.93	1.86	2.73	3.66	4.64	5.57	6.54	0.13
T4-12 I	0.89	0.88	1.76	2.64	3.52	4.395	5.322	6.25	0.95
T4-13 I	0.89	0.88	1.71	2.54	3.42	4.30	5.13	6.06	0.95
T4-14 I	0.84	0.83	1.66	2.49	3.32	4.20	5.03	5.86	1.30
T4-15 I	0.77	0.78	1.56	2.34	3.13	3.91	4.69	5.47	1.37
T4-16 I	0.72	0.73	1.42	2.15	2.88	3.56	4.30	5.03	1.07
T4-17 I	0.63	0.64	1.22	1.86	2.44	3.13	3.71	4.30	1.09

Tabla A.2 Frecuencias identificadas en la pila 15, puente Coatzacoalcos II

Tirante	F1 calculada (Hz)	Frecuencias identificadas (Hz)							$D = \left \frac{F_{ic} - F_{ind}}{F_{ic}} \right 100$
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	%
T5-17 D	0.63	0.64	1.27	1.86	2.49	3.13	3.76	4.44	0.01
T5-16 D	0.72	0.73	1.37	2.05	2.78	3.52	4.25	4.93	2.32
T5-15 D	0.78	0.78	1.51	2.34	3.13	3.91	4.69	5.47	0.33
T5-14 D	0.79	0.78	1.66	2.49	3.32	4.20			0.51
T5-13 D	0.89	0.88	1.76	2.64	3.52	4.44	5.32	6.25	1.25
T5-12 D	0.89	0.88	1.76	2.64	3.52	4.40	5.27	6.20	0.95
T5-11 D	0.94	0.93	1.86	2.78	3.76	4.69	5.66	6.64	1.58
T5-10 D	1.02	1.03	2.00	2.98	4.00	4.98	6.01	7.08	0.75
T5-09 D	1.05	1.03	2.05	3.13	4.15	5.23	6.30	7.42	2.17
T5-08 D	1.10	1.07	2.15	3.22	4.35	5.47	6.59	7.81	2.01
T5-07 D	1.22	1.22	2.39	3.56	4.79	6.01	7.28	8.64	0.01
T5-06 D	1.27	1.27	2.49	3.76	5.03	6.35	7.76	9.23	0.23
T5-05 D	1.37	1.37	2.69	4.00	5.42	6.84	8.40	10.06	0.42
T5-04 D	1.44	1.42	2.88	4.30	5.71	7.18	8.64		1.35
T5-03 D	1.65	1.61	3.17	4.83	6.49	8.25	10.35	12.06	2.57
T5-02 D	1.87	1.86	3.61	5.52	7.52	9.77			0.79
T5-01 D	2.05	2.00	4.00	6.10	8.45				2.32
T5-01 I	2.09	2.05	4.05	6.15	8.45	10.94			2.06
T5-02 I	1.84	1.81	3.61	5.42	7.37	9.47			1.67
T5-03 I	1.59	1.56	3.08	4.69	6.30	8.06	9.96		1.66
T5-04 I	1.42	1.42	2.78	4.00	5.62	7.23	8.89	10.60	0.05
T5-05 I	1.30	1.27	2.54	3.86	5.13	6.49	7.86	9.38	2.12
T5-06 I	1.20	1.17	2.34	3.52	4.74	6.01	7.28	8.64	2.01
T5-07 I	1.09	1.07	2.10	3.17	4.30	5.42	6.54	7.76	1.01
T5-08 I	1.07	1.03	2.05	3.08	4.10	5.18	6.25	7.37	3.94
T5-09 I	1.00	0.98	2.00	2.98	3.96	4.98	6.01	7.08	2.53
T5-10 I	0.95	0.93	1.86	2.83	3.76	4.74	5.71	6.69	2.41
T5-11 I	0.93	0.93	1.86	2.73	3.66	4.59	5.57	6.49	0.60
T5-12 I	0.88	0.88	1.71	2.59	3.47	4.35	5.23	6.10	0.18
T5-13 I	0.88	0.88	1.71	2.59	3.47	4.35	5.18	6.10	0.12
T5-14 I	0.84	0.83	1.66	2.49	3.32	4.15	4.98	5.81	0.85
T5-15 I	0.78	0.78	1.56	2.34	3.08	3.86	4.64	5.47	0.32
T5-16 I	0.69	0.68	1.37	2.05	2.73	3.47	4.15	4.83	1.01
T5-17 I	0.62	0.64	1.22	1.81	2.44	3.08	3.66	4.30	2.54

Tabla A.3 Frecuencias identificadas en la pila 13, puente Tampico

Tirante	F1 calculada (Hz)	Frecuencias identificadas (Hz)							$D = \left \frac{F_{1c} - F_{1id}}{F_{1c}} \right 100$
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	%
P13-L T	0.59	0.59	1.17	1.81	2.39	2.98	3.56	4.15	0.85
P13-K T	0.57	0.59	1.17	1.71	2.30	2.88	3.47	4.00	2.10
P13-J T	0.63	0.64	1.27	1.90	2.54	3.17	3.81	4.44	0.64
P13-I T	0.62	0.64	1.22	1.86	2.49	3.13	3.71	4.35	2.87
P13-H T	0.63	0.64	1.27	1.90	2.54	3.17	3.86	4.44	0.05
P13-G T	0.73	0.73	1.47	2.20	2.93	3.66	4.40	5.08	0.55
P13-F T	0.81	0.83	1.61	2.44	3.27	4.10	4.93	5.71	2.18
P13-E T	0.92	0.93	1.86	2.78	3.71	4.64	5.52	6.35	0.86
P13-D T	1.12	1.12	2.20	3.32	4.40	5.47	6.49	7.47	0.26
P13-C T	1.29	1.27	2.54	3.81	5.08	6.30	7.42	9.47	1.86
P13-B T	1.77	1.76	3.56	5.37	7.13	8.84	10.55	12.26	0.62
P13-B A	2.14	2.15	4.30	6.45	8.45	10.35	12.74	15.67	0.36
P13-C A	1.51	1.51	2.98	4.49	5.96	7.42	8.74	10.60	0.49
P13-D A	1.19	1.17	2.49	3.52	4.98	6.15	7.28	8.15	1.24
P13-E A	1.13	1.12	2.25	3.37	4.49	5.57	6.64	7.62	0.27
P13-F A	0.96	0.98	1.90	2.88	3.86	4.79	5.71		2.07
P13-G A	0.86	0.88	1.71	2.59	3.42	4.30	5.18	5.96	2.19
P13-H A	0.74	0.73	1.47	2.20	2.98	3.71	4.44	5.13	1.01
P13-I A	0.73	0.73	1.42	2.15	2.88	3.61	4.35	5.08	0.09
P13-J A	0.73	0.73	1.47	2.20	2.93	3.66	4.35	5.03	0.01
P13-K A	0.66	0.68	1.27	1.95	2.64	3.27	3.91	4.54	3.94
P13-L A	0.69	0.68	1.37	2.05	2.73	3.42	4.10	4.79	0.48

Tabla A.4 Frecuencias identificadas en la pila 14, puente Tampico

Tirante	F1 calculada (Hz)	Frecuencias identificadas (Hz)							$D = \left \frac{F_{1c} - F_{1id}}{F_{1c}} \right 100$
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	%
P14-L T	0.70	0.68	1.42	2.10	2.78	3.52	4.20	4.88	1.76
P14-K T	0.69	0.68	1.37	2.05	2.73	3.47	4.15	4.83	1.27
P14-J T	0.72	0.73	1.42	2.15	2.88	3.56	4.30	4.98	2.29
P14-I T	0.72	0.73	1.47	2.15	2.88	3.61	4.30	5.03	1.90
P14-H T	0.74	0.78	1.47	2.20	2.98	3.71	4.44	5.13	5.67
P14-G T	0.86	0.88	1.71	2.59	3.47	4.30	5.18	5.96	2.22
P14-F T	0.89	0.88	1.81	2.73	3.61	4.54	5.42	6.30	1.62
P14-E T	1.06	1.07	2.10	3.17	4.20	5.27	6.20	7.32	1.29
P14-D T	1.33	1.32	2.64	3.96	5.23	6.54	7.76	9.67	0.80
P14-C T	1.57	1.56	3.13	4.69	6.20	7.67	9.72	11.13	0.43
P14-B T	2.20	2.20	4.35	6.49	8.55	11.43	13.33		0.04
P14-B A	1.95	2.00	4.00	5.96	7.86	9.67	11.28		2.49
P14-C A	1.29	1.32	2.59	3.86	5.18	6.40	7.52	9.47	1.91
P14-D A	1.15	1.17	2.34	3.47	4.64	5.76	6.79		1.54
P14-E A	0.88	0.88	1.76	2.69	3.56	4.35	5.23	6.06	0.38
P14-F A	0.79	0.78	1.56	2.39	3.17	3.96	4.69	5.42	0.88
P14-G A	0.71	0.73	1.42	2.10	2.83	3.52	4.20	4.88	3.25
P14-H A	0.68	0.68	1.32	2.00	2.64	3.32	3.96	4.59	1.30
P14-I A	0.61	0.64	1.22	1.81	2.44	3.03	3.61	4.20	4.94
P14-J A	0.61	0.64	1.27	1.86	2.49	3.13	3.76	4.40	4.59
P14-K A	0.60	0.59	1.22	1.81	2.44	3.03	3.61	4.25	2.91
P14-L A	0.59	0.59	1.17	1.81	2.39	2.98	3.56	4.15	1.11

Apéndice B



Frecuencias identificadas y
amortiguamientos pruebas de
vibración libre

Tabla B.1 Frecuencias y amortiguamientos identificados en el puente Coatzacoalcos II

Tirante	F1 calculada (Hz)	Frecuencias identificadas (Hz)							$D = \left \frac{F_{ic} - F_{lid}}{F_{ic}} \right 100$	h1	h2	h3
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	%	%	%	%
T4-17 D	0.60	0.62	1.18	1.78	2.37	2.97	3.56	4.17	1.92	-	-	0.20
T4-16 D	0.73	0.73	1.43	2.14	2.86	3.58	4.32	5.05	0.07	0.29	0.16	0.21
T4-13 D	0.86	0.87	1.70	2.56	3.31	4.27	5.14	6.02	0.24	-	-	0.36
T4-12 D	0.86	0.85	1.68	2.52	3.39	4.24	5.11	6.02	0.39	-	-	0.35
T4-09 D	0.98	0.98	1.92	2.89	3.86	4.83	5.82	6.88	0.43	-	-	0.14
T4-08 D	1.03	1.03	2.02	3.03	4.06	5.08	6.17	7.29	0.61	0.28	0.12	0.13
T4-05 D	1.32	1.30	2.58	3.89	5.23	6.62	8.07	9.62	1.75	0.24	0.18	0.19
T4-04 D	1.38	1.38	2.73	4.14	5.50	6.88	8.23	9.65	0.25	0.44	0.29	0.29
T4-01 I	1.97	1.97	3.83	5.91	8.08				0.17	0.80	0.19	0.19
T4-02 I	1.95	1.92	3.81	5.77	7.84	10.14			1.64	0.29	0.19	0.19
T4-03 I	1.57	1.59	3.14	4.68	6.26	7.86			1.76	0.58	0.17	0.19
T4-04 I	1.49	1.46	2.94	4.43	5.97	7.62			1.67	0.59	0.26	0.26
T4-06 I	1.25	1.26	2.47	3.72	4.96	6.20	7.44	9.16	1.05	1.09	0.23	0.23
T4-07 I	1.18	1.17	2.30	3.46	4.64	5.85	7.11	8.42	1.08	-	-	0.17
T4-14 I	0.85	0.85	1.67	2.50	3.33	4.17	5.02	5.88	0.23	-	-	0.26
T4-15 I	0.79	0.79	1.55	2.33	3.11	3.89	4.68	5.47	0.02	-	-	0.31
T5-17 D	0.64	0.65	1.25	1.87	2.50	3.13	3.77	4.40	1.58	-	-	0.19
T5-16 D	0.70	0.71	1.39	2.09	2.80	3.50	4.18	4.90	1.03	-	-	0.30
T5-11 D	0.95	0.95	1.86	2.79	3.72	4.68	5.62	6.59	0.04	0.39	0.15	0.19
T5-10 D	1.01	1.00	1.98	2.97	3.97	4.98	6.01	7.07	0.71	0.34	0.14	0.17
T5-09 D	1.05	1.05	2.06	3.10	4.14	5.20	6.28	7.39	0.02	-	-	0.17
T5-08 D	1.10	1.09	2.15	3.21	4.32	5.43	6.57	7.74	0.51	0.49	0.14	0.18
T5-01 I	2.05	2.03	4.04	6.13	8.38				1.28	-	-	0.16
T5-02 I	1.82	1.79	3.58	5.38	7.33	9.42			1.99	0.99	0.31	0.34
T5-06 I	1.20	1.18	2.33	3.51	4.68	5.94	7.23	8.62	1.09	-	-	0.51
T5-07 I	1.07	1.07	2.10	3.16	4.23	5.29	6.45	7.63	0.03	-	-	0.44

h1 - amortiguamiento calculado con los primeros ciclos

h2 - amortiguamiento calculado con todo el registro

Tabla B.2 Frecuencias identificadas en el puente Tampico

Tirante	F1 calculada (Hz)	Frecuencias identificadas (Hz)							$D = \left \frac{F_{1c} - F_{1d}}{F_{1c}} \right 100$	h1	h2	h3
		F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	%	%	%	
P13-J T	0.63	0.65	1.28	1.92	2.55	3.16	3.80	4.43	2.17	-	-	-
P13-H T	0.65	0.65	1.27	1.91	2.54	3.19	3.83	4.46	1.02	-	-	0.17
P13-F T	0.81	0.82	1.64	2.45	3.26	4.08	4.89	5.71	0.45	-	-	0.52
P13-D T	1.11	1.11	2.20	3.30	4.38	5.46	6.49	7.44	0.36	-	-	-
P13-B A	2.20	2.17	4.32	6.38	8.45	10.39	13.62	15.80	1.30	-	-	0.25
P13-C A	1.49	1.48	2.97	4.46	5.90	7.38	8.88	10.38	0.19	0.94	0.22	0.64
P13-E A	1.13	1.12	2.20	3.36	4.47	5.59	6.66	7.58	0.59	-	-	-
P13-G A	0.86	0.87	1.71	2.62	3.44	4.31	5.14	5.97	1.21	-	-	0.60
P13-I A	0.73	0.73	1.43	2.17	2.88	3.61	4.33	5.04	0.33	-	-	-
P13-K A	0.66	0.66	1.29	1.96	2.62	3.27	3.92	4.55	0.41	-	-	-
P14-L T	0.70	0.71	1.42	2.11	2.81	3.50	4.19	4.87	0.99	0.22	0.13	0.14
P14-J T	0.71	0.73	1.43	2.14	2.85	3.57	4.25	4.94	2.01	-	-	0.17
P14-H T	0.74	0.76	1.46	2.20	2.93	3.68	4.39	5.13	2.70	-	-	0.33
P14-G T	0.87	0.87	1.74	2.57	3.44	4.31	5.17	6.04	0.05	-	-	0.59
P14-F T	0.91	0.91	1.81	2.72	3.63	4.52	5.44	6.32	0.12	0.74	0.43	0.52
P14-D T	1.30	1.30	2.61	3.94	5.22	6.46	7.70	9.06	0.19	0.42	0.27	0.27
P14-B A	1.99	1.99	4.02	6.01	7.85	9.92			0.01	0.73	0.33	0.33
P14-D A	1.16	1.17	2.33	3.49	4.62	5.70			0.90	-	-	0.32
P14-E A	0.89	0.92	1.78	2.67	3.55	4.35	5.24	6.04	2.88	-	-	-
P14-G A	0.70	0.72	1.40	2.11	2.81	3.52	4.21	4.88	2.33	-	-	0.48
P14-I A	0.61	0.62	1.21	1.81	2.41	3.02	3.61	4.19	2.01	0.33	0.25	0.27
P14-K A	0.61	0.61	1.21	1.82	2.42	3.03	3.63	4.24	0.68	-	-	-

h1 - amortiguamiento calculado con los primeros ciclos

h2 - amortiguamiento calculado con todo el registro

Apéndice C



Obtención del peso de los
tirantes

Tabla C.1 Obtención del peso de los tirantes de la pila 14 del puente Coatzacoalcos II

Tirantes	Acero			Recubrimiento			Relleno (lechada)						Peso Total		
	No de torones	Área total	Peso	ϕ ext	Área	Peso	Área (100%)	Peso	Área (90%)	Peso	Área (80%)	Peso	100%	90%	80%
		(m ²)	t/m	(m)	(m ²)	t/m	t/m	t/m	t/m						
T4-17	53	0.008	0.06	0.284	0.017	0.02	0.039	0.07	0.035	0.06	0.031	0.05	0.15	0.14	0.13
T4-16	56	0.008	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.07	0.035	0.06	0.031	0.05	0.15	0.14	0.14
T4-15	59	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.14	0.14
T4-14	61	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.15	0.14
T4-13	61	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.15	0.14
T4-12	61	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.15	0.14
T4-11	59	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.14	0.14
T4-10	53	0.008	0.06	0.284	0.017	0.02	0.039	0.07	0.035	0.06	0.031	0.05	0.15	0.14	0.13
T4-09	47	0.007	0.06	0.284	0.017	0.02	0.040	0.07	0.036	0.06	0.032	0.05	0.14	0.13	0.13
T4-08	39	0.006	0.05	0.284	0.017	0.02	0.041	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.13	0.12
T4-07	38	0.006	0.05	0.284	0.017	0.02	0.041	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.12
T4-06	37	0.006	0.04	0.284	0.017	0.02	0.041	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.12
T4-05	35	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11
T4-04	34	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11
T4-03	33	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.038	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11
T4-02	33	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.038	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11
T4-01	33	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.038	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11

Nota: El peso de los tirantes tiene la misma magnitud para ambos lados de la pila ($T4 - D = T4 - I$)

Tabla C.2 Obtención del peso de los tirantes de la pila 15 del puente Coatzacoalcos II

Tirantes	Acero			Recubrimiento			Relleno (lechada)						Peso Total		
	N° de torones	Área total	Peso	ϕ ext	Área	Peso	Área (100%)	Peso	Área (90%)	Peso	Área (80%)	Peso	100%	90%	80%
		(m ²)	t/m	(m)	(m ²)	t/m	t/m	t/m	t/m						
T5-17	53	0.008	0.06	0.284	0.017	0.02	0.039	0.07	0.035	0.06	0.031	0.05	0.15	0.14	0.13
T5-16	56	0.008	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.07	0.035	0.06	0.031	0.05	0.15	0.14	0.14
T5-15	59	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.14	0.14
T5-14	61	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.15	0.14
T5-13	61	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.15	0.14
T5-12	61	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.15	0.14
T5-11	59	0.009	0.07	0.284	0.017	0.02	0.038	0.06	0.034	0.06	0.030	0.05	0.15	0.14	0.14
T5-10	53	0.008	0.06	0.284	0.017	0.02	0.039	0.07	0.035	0.06	0.031	0.05	0.15	0.14	0.13
T5-09	47	0.007	0.06	0.284	0.017	0.02	0.040	0.07	0.036	0.06	0.032	0.05	0.14	0.13	0.13
T5-08	39	0.006	0.05	0.284	0.017	0.02	0.041	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.13	0.12
T5-07	38	0.006	0.05	0.284	0.017	0.02	0.041	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.12
T5-06	37	0.006	0.04	0.284	0.017	0.02	0.041	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.12
T5-05	35	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11
T5-04	34	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.037	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11
T5-03	33	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.038	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11
T5-02	33	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.038	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11
T5-01	33	0.005	0.04	0.284	0.017	0.02	0.042	0.07	0.038	0.06	0.033	0.06	0.13	0.12	0.11

Nota: El peso de los tirantes tiene la misma magnitud para ambos lados de la pila (T5 – D = T5 – I)

Tabla C.3 Obtención del peso de los tirantes de la pila 13 del puente Tampico

Tirantes	Acero			Recubrimiento			Relleno (lechada)						Peso Total		
	Nº de torones	Área total	Peso	ϕ ext	Área	Peso	Área (100%)	Peso	Área (90%)	Peso	Área (80%)	Peso	100%	90%	80%
		(m ²)	t/m	(m)	(m ²)	t/m	(m ²)	t/m	(m ²)	t/m	(m ²)	t/m	t/m	t/m	t/m
P13-L T	60	0.009	0.071	0.219	0.004	0.012	0.018	0.02	0.016	0.02	0.015	0.01	0.101	0.099	0.097
P13-K T	57	0.009	0.067	0.219	0.003	0.012	0.014	0.01	0.013	0.01	0.011	0.01	0.093	0.092	0.090
P13-J T	51	0.008	0.060	0.219	0.003	0.012	0.014	0.01	0.013	0.01	0.011	0.01	0.086	0.085	0.083
P13-I T	49	0.007	0.058	0.219	0.003	0.012	0.020	0.02	0.018	0.02	0.016	0.02	0.090	0.088	0.086
P13-H T	47	0.007	0.055	0.219	0.002	0.012	0.021	0.02	0.019	0.02	0.017	0.02	0.088	0.086	0.084
P13-G T	45	0.007	0.053	0.219	0.002	0.012	0.021	0.02	0.019	0.02	0.017	0.02	0.086	0.084	0.082
P13-F T	42	0.006	0.049	0.219	0.002	0.012	0.022	0.02	0.019	0.02	0.017	0.02	0.083	0.081	0.079
P13-E T	39	0.006	0.046	0.219	0.002	0.012	0.024	0.02	0.021	0.02	0.019	0.02	0.082	0.079	0.077
P13-D T	36	0.005	0.042	0.168	0.001	0.006	0.012	0.01	0.011	0.01	0.009	0.01	0.060	0.059	0.058
P13-C T	33	0.005	0.039	0.168	0.001	0.006	0.012	0.01	0.011	0.01	0.010	0.01	0.057	0.056	0.055
P13-B T	36	0.005	0.042	0.168	0.001	0.006	0.012	0.01	0.011	0.01	0.010	0.01	0.060	0.059	0.058
P13-B A	36	0.005	0.042	0.168	0.001	0.006	0.012	0.01	0.011	0.01	0.010	0.01	0.061	0.059	0.058
P13-C A	33	0.005	0.039	0.168	0.001	0.006	0.013	0.01	0.011	0.01	0.010	0.01	0.057	0.056	0.055
P13-D A	36	0.005	0.042	0.168	0.001	0.006	0.012	0.01	0.011	0.01	0.010	0.01	0.060	0.059	0.058
P13-E A	39	0.006	0.046	0.219	0.002	0.012	0.023	0.02	0.020	0.02	0.018	0.02	0.080	0.078	0.076
P13-F A	42	0.006	0.049	0.219	0.002	0.012	0.022	0.02	0.020	0.02	0.018	0.02	0.083	0.081	0.079
P13-G A	45	0.007	0.053	0.219	0.002	0.012	0.022	0.02	0.019	0.02	0.017	0.02	0.086	0.084	0.082
P13-H A	47	0.007	0.055	0.219	0.002	0.012	0.021	0.02	0.019	0.02	0.017	0.02	0.088	0.086	0.084
P13-I A	49	0.007	0.058	0.219	0.003	0.012	0.021	0.02	0.019	0.02	0.017	0.02	0.090	0.088	0.086
P13-J A	51	0.008	0.060	0.219	0.003	0.012	0.020	0.02	0.018	0.02	0.016	0.02	0.092	0.090	0.088
P13-K A	57	0.009	0.067	0.219	0.003	0.012	0.019	0.02	0.017	0.02	0.015	0.02	0.098	0.096	0.094
P13-L A	60	0.009	0.071	0.219	0.004	0.012	0.019	0.02	0.017	0.02	0.015	0.02	0.101	0.100	0.098

Tabla C.4 Obtención del peso de los tirantes de la pila 14 del puente Tampico

Tirantes	Acero			Recubrimiento			Relleno (lechada)						Peso Total		
	N° de torones	Área total	Peso	ϕ ext	Área	Peso	Área (100%)	Peso	Área (90%)	Peso	Área (80%)	Peso	100%	90%	80%
		(m ²)	t/m	(m)	(m ²)	t/m	(m ²)	t/m		t/m		t/m	t/m	t/m	t/m
P14-L T	60	0.009	0.071	0.219	0.012	0.012	0.021	0.02	0.019	0.02	0.017	0.02	0.104	0.102	0.099
P14-K T	57	0.009	0.067	0.219	0.012	0.012	0.016	0.02	0.015	0.01	0.013	0.01	0.095	0.094	0.092
P14-J T	51	0.008	0.060	0.219	0.012	0.012	0.017	0.02	0.015	0.02	0.013	0.01	0.089	0.087	0.085
P14-I T	49	0.007	0.058	0.219	0.012	0.012	0.023	0.02	0.021	0.02	0.019	0.02	0.093	0.091	0.088
P14-H T	47	0.007	0.055	0.219	0.012	0.012	0.024	0.02	0.022	0.02	0.019	0.02	0.091	0.089	0.086
P14-G T	45	0.007	0.053	0.219	0.012	0.012	0.025	0.02	0.022	0.02	0.020	0.02	0.089	0.087	0.084
P14-F T	42	0.006	0.049	0.219	0.012	0.012	0.024	0.02	0.022	0.02	0.019	0.02	0.086	0.083	0.081
P14-E T	39	0.006	0.046	0.219	0.012	0.012	0.028	0.03	0.025	0.02	0.022	0.02	0.085	0.083	0.080
P14-D T	36	0.005	0.042	0.168	0.006	0.006	0.013	0.01	0.012	0.01	0.011	0.01	0.062	0.060	0.059
P14-C T	33	0.005	0.039	0.168	0.006	0.006	0.014	0.01	0.013	0.01	0.011	0.01	0.059	0.057	0.056
P14-B T	36	0.005	0.042	0.168	0.006	0.006	0.014	0.01	0.012	0.01	0.011	0.01	0.062	0.061	0.059
P14-B A	36	0.005	0.042	0.168	0.006	0.006	0.011	0.01	0.010	0.01	0.009	0.01	0.059	0.058	0.057
P14-C A	33	0.005	0.039	0.168	0.006	0.006	0.011	0.01	0.010	0.01	0.009	0.01	0.056	0.055	0.054
P14-D A	36	0.005	0.042	0.168	0.006	0.006	0.011	0.01	0.010	0.01	0.009	0.01	0.059	0.058	0.057
P14-E A	39	0.006	0.046	0.219	0.012	0.012	0.020	0.02	0.018	0.02	0.016	0.02	0.078	0.076	0.074
P14-F A	42	0.006	0.049	0.219	0.012	0.012	0.019	0.02	0.017	0.02	0.015	0.02	0.080	0.078	0.076
P14-G A	45	0.007	0.053	0.219	0.012	0.012	0.019	0.02	0.017	0.02	0.015	0.01	0.083	0.082	0.080
P14-H A	47	0.007	0.055	0.219	0.012	0.012	0.018	0.02	0.016	0.02	0.014	0.01	0.085	0.083	0.082
P14-I A	49	0.007	0.058	0.219	0.012	0.012	0.018	0.02	0.016	0.02	0.014	0.01	0.087	0.086	0.084
P14-J A	51	0.008	0.060	0.219	0.012	0.012	0.017	0.02	0.015	0.02	0.014	0.01	0.089	0.087	0.086
P14-K A	57	0.009	0.067	0.219	0.012	0.012	0.017	0.02	0.015	0.01	0.013	0.01	0.095	0.094	0.092
P14-L A	60	0.009	0.071	0.219	0.012	0.012	0.016	0.02	0.015	0.01	0.013	0.01	0.099	0.097	0.096

Apéndice D



Porcentaje del peso
correspondiente a cada material
utilizado

Apéndice D Porcentaje del peso correspondiente a cada material utilizado

Tabla D.1 Porcentaje en del peso del tirante de cada material en los tirantes de la pila 14, puente Coatzacoalcos II

Tirante	100 % relleno			90 % relleno			80 % relleno		
	Acero	Tubo	Relleno	Acero	Tubo	Relleno	Acero	Tubo	Relleno
T4-17 D	44	11	45	46	11	43	48	12	40
T4-16 D	45	11	44	47	11	41	50	12	39
T4-15 D	47	10	43	49	11	40	51	11	37
T4-14 D	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T4-13 D	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T4-12 D	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T4-11 D	47	10	43	49	11	40	51	11	37
T4-10 D	44	11	45	46	11	43	48	12	40
T4-09 D	40	11	48	42	12	46	45	12	43
T4-08 D	35	12	53	37	13	50	40	13	47
T4-07 D	35	12	53	37	13	51	39	13	48
T4-06 D	34	12	54	36	13	51	38	14	48
T4-05 D	33	12	55	35	13	52	37	14	49
T4-04 D	32	12	56	34	13	53	36	14	50
T4-03 D	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T4-02 D	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T4-01 D	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T4-01 I	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T4-02 I	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T4-03 I	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T4-04 I	32	12	56	34	13	53	36	14	50
T4-05 I	33	12	55	35	13	52	37	14	49
T4-06 I	34	12	54	36	13	51	38	14	48
T4-07 I	35	12	53	37	13	51	39	13	48
T4-08 I	35	12	53	37	13	50	40	13	47
T4-09 I	40	11	48	42	12	46	45	12	43
T4-10 I	44	11	45	46	11	43	48	12	40
T4-11 I	47	10	43	49	11	40	51	11	37
T4-12 I	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T4-13 I	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T4-14 I	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T4-15 I	47	10	43	49	11	40	51	11	37
T4-16 I	45	11	44	47	11	41	50	12	39
T4-17 I	44	11	45	46	11	43	48	12	40

Apéndice D Porcentaje del peso correspondiente a cada material utilizado

Tabla D.2 Porcentaje en del peso del tirante de cada material en los tirantes de la pila 15, puente Coatzacoalcos II

Tirante	100 % relleno			90 % relleno			80 % relleno		
	Acero	Tubo	Relleno	Acero	Tubo	Relleno	Acero	Tubo	Relleno
T5-17 D	44	11	45	46	11	43	48	12	40
T5-16 D	45	11	44	47	11	41	50	12	39
T5-15 D	47	10	43	49	11	40	51	11	37
T5-14 D	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T5-13 D	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T5-12 D	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T5-11 D	47	10	43	49	11	40	51	11	37
T5-10 D	44	11	45	46	11	43	48	12	40
T5-09 D	40	11	48	42	12	46	45	12	43
T5-08 D	35	12	53	37	13	50	40	13	47
T5-07 D	35	12	53	37	13	51	39	13	48
T5-06 D	34	12	54	36	13	51	38	14	48
T5-05 D	33	12	55	35	13	52	37	14	49
T5-04 D	32	12	56	34	13	53	36	14	50
T5-03 D	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T5-02 D	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T5-01 D	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T5-01 I	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T5-02 I	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T5-03 I	31	12	56	33	13	54	35	14	51
T5-04 I	32	12	56	34	13	53	36	14	50
T5-05 I	33	12	55	35	13	52	37	14	49
T5-06 I	34	12	54	36	13	51	38	14	48
T5-07 I	35	12	53	37	13	51	39	13	48
T5-08 I	35	12	53	37	13	50	40	13	47
T5-09 I	40	11	48	42	12	46	45	12	43
T5-10 I	44	11	45	46	11	43	48	12	40
T5-11 I	47	10	43	49	11	40	51	11	37
T5-12 I	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T5-13 I	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T5-14 I	48	10	42	50	11	39	52	11	36
T5-15 I	47	10	43	49	11	40	51	11	37
T5-16 I	45	11	44	47	11	41	50	12	39
T5-17 I	44	11	45	46	11	43	48	12	40

Tabla D.3 Porcentaje en del peso del tirante de cada material en los tirantes de la pila 13, puente Tampico

Tirante	100 % relleno			90 % relleno			80 % relleno		
	Acero	Tubo	Relleno	Acero	Tubo	Relleno	Acero	Tubo	Relleno
P13-L T	70	12	18	71	12	17	73	12	15
P13-K T	72	13	15	73	13	14	74	13	13
P13-J T	70	14	17	71	14	15	72	14	14
P13-I T	64	13	23	66	13	21	67	14	19
P13-H T	63	13	24	64	14	22	66	14	20
P13-G T	62	14	25	63	14	23	65	14	21
P13-F T	60	14	26	61	15	24	63	15	22
P13-E T	56	14	29	58	15	27	60	15	25
P13-D T	71	10	20	72	10	18	74	10	16
P13-C T	68	10	22	70	10	20	71	11	18
P13-B T	70	10	20	72	10	19	73	10	17
P13-B A	70	10	21	71	10	19	73	10	17
P13-C A	68	10	22	69	10	20	71	11	18
P13-D A	70	10	20	72	10	18	73	10	17
P13-E A	57	15	28	59	15	26	61	16	24
P13-F A	59	14	26	61	15	24	63	15	22
P13-G A	61	14	25	63	14	23	65	14	21
P13-H A	63	13	24	64	14	22	66	14	20
P13-I A	64	13	23	65	13	21	67	14	19
P13-J A	65	13	22	67	13	20	68	13	18
P13-K A	68	12	20	70	12	18	71	13	16
P13-L A	70	12	19	71	12	17	72	12	16

Apéndice D Porcentaje del peso correspondiente a cada material utilizado

Tabla D.4 Porcentaje en del peso del tirante de cada material en los tirantes de la pila 14, puente Tampico

Tirante	100 % relleno			90 % relleno			80 % relleno		
	Acero	Tubo	Relleno	Acero	Tubo	Relleno	Acero	Tubo	Relleno
P14-L T	68	11	20	70	12	18	72	12	16
P14-K T	70	12	17	72	13	15	74	13	14
P14-J T	68	13	19	70	14	16	71	14	15
P14-I T	62	13	25	64	13	22	66	14	20
P14-H T	61	13	26	63	14	23	65	14	21
P14-G T	59	13	28	62	14	24	64	14	22
P14-F T	58	14	28	60	14	25	62	15	23
P14-E T	54	14	32	57	15	29	59	15	26
P14-D T	69	9	22	71	10	19	73	10	17
P14-C T	66	10	24	68	10	21	70	10	19
P14-B T	68	9	22	71	10	20	72	10	18
P14-B A	71	10	19	73	10	17	75	10	15
P14-C A	70	10	20	72	11	18	73	11	16
P14-D A	72	10	18	74	10	16	75	10	14
P14-E A	59	15	25	62	16	23	63	16	20
P14-F A	62	15	24	64	15	21	65	16	19
P14-G A	63	14	22	66	15	20	67	15	18
P14-H A	65	14	21	67	14	19	69	15	17
P14-I A	66	14	20	68	14	18	70	14	16
P14-J A	67	13	19	69	14	17	71	14	15
P14-K A	70	12	17	72	13	15	73	13	14
P14-L A	72	12	17	73	12	14	75	12	13

Apéndice E



Influencia de los materiales en
el cálculo de la tensión

Tabla E.1 Contribución de cada material del tirante, puente Coatzacoalcos II

Tirante	Tubo			Relleno			Tirante	Tubo			Relleno		
	100%	90%	80%	100%	90%	80%		100%	90%	80%	100%	90%	80%
	%	%	%	%	%	%		%	%	%	%	%	%
T4-17 D	11	11	12	45	43	40	T5-17 D	11	11	12	45	43	40
T4-16 D	11	11	12	44	41	39	T5-16 D	11	11	12	44	41	39
T4-15 D	10	11	11	43	40	37	T5-15 D	10	11	11	43	40	37
T4-14 D	10	11	11	42	39	36	T5-14 D	10	11	11	42	39	36
T4-13 D	10	11	11	42	39	36	T5-13 D	10	11	11	42	39	36
T4-12 D	10	11	11	42	39	36	T5-12 D	10	11	11	42	39	36
T4-11 D	10	11	11	43	40	37	T5-11 D	10	11	11	43	40	37
T4-10 D	11	11	12	45	43	40	T5-10 D	11	11	12	45	43	40
T4-09 D	11	12	12	48	46	43	T5-09 D	11	12	12	48	46	43
T4-08 D	12	13	13	53	50	47	T5-08 D	12	13	13	53	50	47
T4-07 D	12	13	13	53	51	48	T5-07 D	12	13	13	53	51	48
T4-06 D	12	13	14	54	51	48	T5-06 D	12	13	14	54	51	48
T4-05 D	12	13	14	55	52	49	T5-05 D	12	13	14	55	52	49
T4-04 D	12	13	14	56	53	50	T5-04 D	12	13	14	56	53	50
T4-03 D	12	13	14	56	54	51	T5-03 D	12	13	14	56	54	51
T4-02 D	12	13	14	56	54	51	T5-02 D	12	13	14	56	54	51
T4-01 D	12	13	14	56	54	51	T5-01 D	12	13	14	56	54	51
T4-01 I	12	13	14	56	54	51	T5 - 01 I	12	13	14	56	54	51
T4-02 I	12	13	14	56	54	51	T5 - 02 I	12	13	14	56	54	51
T4 - 03 I	12	13	14	56	54	51	T5 - 03 I	12	13	14	56	54	51
T4 - 04 I	12	13	14	56	53	50	T5 - 04 I	12	13	14	56	53	50
T4 - 05 I	12	13	14	55	52	49	T5 - 05 I	12	13	14	55	52	49
T4 - 06 I	12	13	14	54	51	48	T5 - 06 I	12	13	14	54	51	48
T4 - 07 I	12	13	13	53	51	48	T5 - 07 I	12	13	13	53	51	48
T4 - 08 I	12	13	13	53	50	47	T5 - 08 I	12	13	13	53	50	47
T4 - 09 I	11	12	12	48	46	43	T5 - 09 I	11	12	12	48	46	43
T4 - 10 I	11	11	12	45	43	40	T5 - 10 I	11	11	12	45	43	40
T4 - 11 I	10	11	11	43	40	37	T5 - 11 I	10	11	11	43	40	37
T4 - 12 I	10	11	11	42	39	36	T5 - 12 I	10	11	11	42	39	36
T4 - 13 I	10	11	11	42	39	36	T5 - 13 I	10	11	11	42	39	36
T4 - 14 I	10	11	11	42	39	36	T5 - 14 I	10	11	11	42	39	36
T4 - 15 I	10	11	11	43	40	37	T5 - 15 I	10	11	11	43	40	37
T4 - 16 I	11	11	12	44	41	39	T5 - 16 I	11	11	12	44	41	39
T4 - 17 I	11	11	12	45	43	40	T5 - 17 I	11	11	12	45	43	40

100%,90% y 80% = porcentaje de relleno considerado

Tabla E.2 Contribución en la tensión de cada material del tirante, puente Tampico

Tirante	Tubo			Relleno			Tirante	Tubo			Relleno		
	100%	90%	80%	100%	90%	80%		100%	90%	80%	100%	90%	80%
	%	%	%	%	%	%		%	%	%	%	%	%
P13-L T	12	12	12	18	17	15	P14-L T	12	12	12	18	17	15
P13-K T	13	13	13	15	14	13	P14-K T	13	13	13	15	14	13
P13-J T	14	14	14	17	15	14	P14-J T	14	14	14	17	15	14
P13-I T	13	13	14	23	21	19	P14-I T	13	13	14	23	21	19
P13-H T	13	14	14	24	22	20	P14-H T	13	14	14	24	22	20
P13-G T	14	14	14	25	23	21	P14-G T	14	14	14	25	23	21
P13-F T	14	15	15	26	24	22	P14-F T	14	15	15	26	24	22
P13-E T	14	15	15	29	27	25	P14-E T	14	15	15	29	27	25
P13-D T	10	10	10	20	18	16	P14-D T	10	10	10	20	18	16
P13-C T	10	10	11	22	20	18	P14-C T	10	10	11	22	20	18
P13-B T	10	10	10	20	19	17	P14-B T	10	10	10	20	19	17
P13-B A	10	10	10	21	19	17	P14-B A	10	10	10	21	19	17
P13-C A	10	10	11	22	20	18	P14-C A	10	10	11	22	20	18
P13-D A	10	10	10	20	18	17	P14-D A	10	10	10	20	18	17
P13-E A	15	15	16	28	26	24	P14-E A	15	15	16	28	26	24
P13-F A	14	15	15	26	24	22	P14-F A	14	15	15	26	24	22
P13-G A	14	14	14	25	23	21	P14-G A	14	14	14	25	23	21
P13-H A	13	14	14	24	22	20	P14-H A	13	14	14	24	22	20
P13-I A	13	13	14	23	21	19	P14-I A	13	13	14	23	21	19
P13-J A	13	13	13	22	20	18	P14-J A	13	13	13	22	20	18
P13-K A	12	12	13	20	18	16	P14-K A	12	12	13	20	18	16
P13-L A	12	12	12	19	17	16	P14-L A	12	12	12	19	17	16

100%,90% y 80% = porcentaje de relleno considerado

Tabla E.3 Incremento en la tensión de cada toron del tirante, suponiendo la falla de uno o cuatro torones, puente Coatzacoalcos II

Tirante	1 toron			4 torones			Tirante	1 toron			4 torones		
	100%	90%	80%	100%	90%	80%		100%	90%	80%	100%	90%	80%
	%	%	%	%	%	%		%	%	%	%	%	%
T4-17 D	2	2	2	8	8	8	T5-17 D	2	2	2	8	8	8
T4-16 D	2	2	2	7	7	7	T5-16 D	2	2	2	7	7	7
T4-15 D	2	2	2	7	7	7	T5-15 D	2	2	2	7	7	7
T4-14 D	2	2	2	7	7	7	T5-14 D	2	2	2	7	7	7
T4-13 D	2	2	2	7	7	7	T5-13 D	2	2	2	7	7	7
T4-12 D	2	2	2	7	7	7	T5-12 D	2	2	2	7	7	7
T4-11 D	2	2	2	7	7	7	T5-11 D	2	2	2	7	7	7
T4-10 D	2	2	2	8	8	8	T5-10 D	2	2	2	8	8	8
T4-09 D	2	2	2	9	9	9	T5-09 D	2	2	2	9	9	9
T4-08 D	3	3	3	10	10	10	T5-08 D	3	3	3	10	10	10
T4-07 D	3	3	3	11	11	11	T5-07 D	3	3	3	11	11	11
T4-06 D	3	3	3	11	11	11	T5-06 D	3	3	3	11	11	11
T4-05 D	3	3	3	11	11	11	T5-05 D	3	3	3	11	11	11
T4-04 D	3	3	3	12	12	12	T5-04 D	3	3	3	12	12	12
T4-03 D	3	3	3	12	12	12	T5-03 D	3	3	3	12	12	12
T4-02 D	3	3	3	12	12	12	T5-02 D	3	3	3	12	12	12
T4-01 D	3	3	3	12	12	12	T5-01 D	3	3	3	12	12	12
T4-01 I	3	3	3	12	12	12	T5 - 01 I	3	3	3	12	12	12
T4-02 I	3	3	3	12	12	12	T5 - 02 I	3	3	3	12	12	12
T4 - 03 I	3	3	3	12	12	12	T5 - 03 I	3	3	3	12	12	12
T4 - 04 I	3	3	3	12	12	12	T5 - 04 I	3	3	3	12	12	12
T4 - 05 I	3	3	3	11	11	11	T5 - 05 I	3	3	3	11	11	11
T4 - 06 I	3	3	3	11	11	11	T5 - 06 I	3	3	3	11	11	11
T4 - 07 I	3	3	3	11	11	11	T5 - 07 I	3	3	3	11	11	11
T4 - 08 I	3	3	3	10	10	10	T5 - 08 I	3	3	3	10	10	10
T4 - 09 I	2	2	2	9	9	9	T5 - 09 I	2	2	2	9	9	9
T4 - 10 I	2	2	2	8	8	8	T5 - 10 I	2	2	2	8	8	8
T4 - 11 I	2	2	2	7	7	7	T5 - 11 I	2	2	2	7	7	7
T4 - 12 I	2	2	2	7	7	7	T5 - 12 I	2	2	2	7	7	7
T4 - 13 I	2	2	2	7	7	7	T5 - 13 I	2	2	2	7	7	7
T4 - 14 I	2	2	2	7	7	7	T5 - 14 I	2	2	2	7	7	7
T4 - 15 I	2	2	2	7	7	7	T5 - 15 I	2	2	2	7	7	7
T4 - 16 I	2	2	2	7	7	7	T5 - 16 I	2	2	2	7	7	7
T4 - 17 I	2	2	2	8	8	8	T5 - 17 I	2	2	2	8	8	8

100%,90% y 80% = porcentaje de relleno considerado

Tabla E.4 Incremento en la tensión de cada toron del tirante, suponiendo la falla de uno o cuatro torones, puente Tampico

Tirante	1 toron			4 torones			Tirante	4 torones			1 toron		
	100%	90%	80%	100%	90%	80%		100%	90%	80%	100%	90%	80%
	%	%	%	%	%	%		%	%	%	%	%	%
P13-L T	2	2	2	7	7	7	P14-L T	2	2	2	7	7	7
P13-K T	2	2	2	7	7	7	P14-K T	2	2	2	7	7	7
P13-J T	2	2	2	8	8	8	P14-J T	2	2	2	8	8	8
P13-I T	2	2	2	8	8	8	P14-I T	2	2	2	8	8	8
P13-H T	2	2	2	9	9	9	P14-H T	2	2	2	9	9	9
P13-G T	2	2	2	9	9	9	P14-G T	2	2	2	9	9	9
P13-F T	2	2	2	10	10	10	P14-F T	2	2	2	10	10	10
P13-E T	3	3	3	10	10	10	P14-E T	3	3	3	10	10	10
P13-D T	3	3	3	11	11	11	P14-D T	3	3	3	11	11	11
P13-C T	3	3	3	12	12	12	P14-C T	3	3	3	12	12	12
P13-B T	3	3	3	11	11	11	P14-B T	3	3	3	11	11	11
P13-B A	3	3	3	11	11	11	P14-B A	3	3	3	11	11	11
P13-C A	3	3	3	12	12	12	P14-C A	3	3	3	12	12	12
P13-D A	3	3	3	11	11	11	P14-D A	3	3	3	11	11	11
P13-E A	3	3	3	10	10	10	P14-E A	3	3	3	10	10	10
P13-F A	2	2	2	10	10	10	P14-F A	2	2	2	10	10	10
P13-G A	2	2	2	9	9	9	P14-G A	2	2	2	9	9	9
P13-H A	2	2	2	9	9	9	P14-H A	2	2	2	9	9	9
P13-I A	2	2	2	8	8	8	P14-I A	2	2	2	8	8	8
P13-J A	2	2	2	8	8	8	P14-J A	2	2	2	8	8	8
P13-K A	2	2	2	7	7	7	P14-K A	2	2	2	7	7	7
P13-L A	2	2	2	7	7	7	P14-L A	2	2	2	7	7	7

100%,90% y 80% = porcentaje de relleno considerado

Tabla E.5 Diferencia en las tensiones calculadas considerando diferentes porcentajes de relleno, puente Coatzacoalcos II

Tirante	Diferencias en la Tensión		Tirante	Diferencias en la Tensión	
	D ₁₀₀₋₉₀	D ₁₀₀₋₉₀		D ₁₀₀₋₉₀	D ₁₀₀₋₉₀
	%	%		%	%
T4-17 D	5	9	T5-17 D	5	9
T4-16 D	4	9	T5-16 D	4	9
T4-15 D	4	9	T5-15 D	4	9
T4-14 D	4	8	T5-14 D	4	8
T4-13 D	4	8	T5-13 D	4	8
T4-12 D	4	8	T5-12 D	4	8
T4-11 D	4	9	T5-11 D	4	9
T4-10 D	5	9	T5-10 D	5	9
T4-09 D	5	10	T5-09 D	5	10
T4-08 D	5	11	T5-08 D	5	11
T4-07 D	5	11	T5-07 D	5	11
T4-06 D	5	11	T5-06 D	5	11
T4-05 D	5	11	T5-05 D	5	11
T4-04 D	6	11	T5-04 D	6	11
T4-03 D	6	11	T5-03 D	6	11
T4-02 D	6	11	T5-02 D	6	11
T4-01 D	6	11	T5-01 D	6	11
T4-01 I	6	11	T5 - 01 I	6	11
T4-02 I	6	11	T5 - 02 I	6	11
T4 - 03 I	6	11	T5 - 03 I	6	11
T4 - 04 I	6	11	T5 - 04 I	6	11
T4 - 05 I	5	11	T5 - 05 I	5	11
T4 - 06 I	5	11	T5 - 06 I	5	11
T4 - 07 I	5	11	T5 - 07 I	5	11
T4 - 08 I	5	11	T5 - 08 I	5	11
T4 - 09 I	5	10	T5 - 09 I	5	10
T4 - 10 I	5	9	T5 - 10 I	5	9
T4 - 11 I	4	9	T5 - 11 I	4	9
T4 - 12 I	4	8	T5 - 12 I	4	8
T4 - 13 I	4	8	T5 - 13 I	4	8
T4 - 14 I	4	8	T5 - 14 I	4	8
T4 - 15 I	4	9	T5 - 15 I	4	9
T4 - 16 I	4	9	T5 - 16 I	4	9
T4 - 17 I	5	9	T5 - 17 I	5	9

100%,90% y 80% = porcentaje de relleno considerado

Tabla E.6 Diferencia en las tensiones calculadas considerando diferentes porcentajes de relleno, puente Tampico

Tirante	Diferencias en la Tensión		Tirante	Diferencias en la Tensión	
	D ₁₀₀₋₉₀	D ₁₀₀₋₉₀		D ₁₀₀₋₉₀	D ₁₀₀₋₉₀
	%	%		%	%
P13-L T	2	4	P14-L T	2	4
P13-K T	2	3	P14-K T	2	3
P13-J T	2	3	P14-J T	2	4
P13-I T	2	5	P14-I T	3	5
P13-H T	2	5	P14-H T	3	5
P13-G T	2	5	P14-G T	3	6
P13-F T	3	5	P14-F T	3	6
P13-E T	3	6	P14-E T	3	6
P13-D T	2	4	P14-D T	2	4
P13-C T	2	4	P14-C T	2	5
P13-B T	2	4	P14-B T	2	4
P13-B A	2	4	P14-B A	2	4
P13-C A	2	4	P14-C A	2	4
P13-D A	2	4	P14-D A	2	4
P13-E A	3	6	P14-E A	3	5
P13-F A	3	5	P14-F A	2	5
P13-G A	2	5	P14-G A	2	4
P13-H A	2	5	P14-H A	2	4
P13-I A	2	5	P14-I A	2	4
P13-J A	2	4	P14-J A	2	4
P13-K A	2	4	P14-K A	2	3
P13-L A	2	4	P14-L A	2	3

100%,90% y 80% = porcentaje de relleno considerado

Apéndice F



Tensiones calculadas sin
considerar el efecto de
curvatura

Tabla F.1 Tensiones calculadas en los tirantes D de la pila 14 en el puente Coatzacoalcos II, sin considerar el efecto de curvatura.

Tirante	Longitud (m)	Frecuencia (Hz)	Masa (t/m)	Masa (t/m)	Masa (t/m)	Tensión (t)	Tensión (t)	Tensión (t)
			R 100%	R 90%	R 80 %	R 100%	R 90%	R 80 %
T4 - 17 D	144.47	0.64	0.15	0.14	0.13	498.9	476.2	453.6
T4 - 16 D	137.62	0.78	0.15	0.14	0.14	698.2	667.5	636.8
T4 - 15 D	130.72	0.78	0.15	0.14	0.14	642.0	614.6	587.2
T4 - 14 D	123.82	0.83	0.15	0.15	0.14	658.6	631.1	603.6
T4 - 13 D	117.01	0.88	0.15	0.15	0.14	659.7	632.1	604.6
T4 - 12 D	110.22	0.88	0.15	0.15	0.14	585.4	560.9	536.5
T4 - 11 D	103.46	0.93	0.15	0.14	0.14	567.8	543.6	519.4
T4 - 10 D	96.65	0.93	0.15	0.14	0.13	476.9	455.2	433.6
T4 - 09 D	90.17	0.98	0.14	0.13	0.13	442.1	420.8	399.4
T4 - 08 D	83.68	1.03	0.13	0.13	0.12	396.4	375.5	354.7
T4 - 07 D	77.26	1.22	0.13	0.12	0.12	476.0	450.7	425.4
T4 - 06 D	70.86	1.22	0.13	0.12	0.12	397.5	376.1	354.8
T4 - 05 D	64.60	1.32	0.13	0.12	0.11	378.8	358.0	337.2
T4 - 04 D	58.44	1.42	0.13	0.12	0.11	355.7	335.9	316.2
T4 - 03 D	52.43	1.56	0.13	0.12	0.11	346.3	326.9	307.4
T4 - 02 D	46.87	1.86	0.13	0.12	0.11	389.8	367.9	346.0
T4 - 01 D	43.48	1.71	0.13	0.12	0.11	284.7	268.7	252.7

R100 %, R90%, R80 % = Porcentaje de material de relleno considerado

Tabla F.2 Tensiones calculadas en los tirantes I de la pila 14 en el puente Coatzacoalcos II, sin considerar el efecto de curvatura.

Tirante	Longitud (m)	Frecuencia (Hz)	Masa (t/m)	Masa (t/m)	Masa (t/m)	Tensión (t)	Tensión (t)	Tensión (t)
			R 100%	R 90%	R 80 %	R 100%	R 90%	R 80 %
T4 - 01 I	43.56	2.00	0.13	0.12	0.11	392.1	370.1	348.0
T4 - 02 I	46.95	1.90	0.13	0.12	0.11	412.0	388.9	365.7
T4 - 03 I	52.51	1.61	0.13	0.12	0.11	369.0	348.3	327.6
T4 - 04 I	58.52	1.47	0.13	0.12	0.11	381.8	360.6	339.4
T4 - 05 I	64.68	1.32	0.13	0.12	0.11	380.4	359.5	338.6
T4 - 06 I	70.94	1.27	0.13	0.12	0.12	431.1	407.9	384.7
T4 - 07 I	77.34	1.22	0.13	0.12	0.12	477.1	451.7	426.3
T4 - 08 I	83.87	1.03	0.13	0.13	0.12	398.1	377.2	356.2
T4 - 09 I	90.26	1.03	0.14	0.13	0.13	487.6	464.0	440.5
T4 - 10 I	96.74	0.98	0.15	0.14	0.13	529.5	505.5	481.4
T4 - 11 I	103.55	0.93	0.15	0.14	0.14	568.8	544.5	520.3
T4 - 12 I	110.31	0.88	0.15	0.15	0.14	586.3	561.8	537.3
T4 - 13 I	117.10	0.88	0.15	0.15	0.14	660.7	633.1	605.5
T4 - 14 I	126.45	0.83	0.15	0.15	0.14	687.0	658.2	629.5
T4 - 15 I	130.81	0.78	0.15	0.14	0.14	642.9	615.5	588.0
T4 - 16 I	137.71	0.73	0.15	0.14	0.14	614.1	587.1	560.1
T4 - 17 I	144.56	0.64	0.15	0.14	0.13	499.5	476.8	454.2

R100 %, R90%, R80 % = Porcentaje de material de relleno considerado

Tabla F.3 Tensiones calculadas en los tirantes D de la pila 15 en el puente Coatzacoalcos II, sin considerar el efecto de curvatura.

Tirante	Longitud (m)	Frecuencia (Hz)	Masa (t/m)	Masa (t/m)	Masa (t/m)	Tensión (t)	Tensión (t)	Tensión (t)
			R 100%	R 90%	R 80 %	R 100%	R 90%	R 80 %
T5 - 17 D	144.56	0.64	0.15	0.14	0.13	499.5	476.8	454.2
T5 - 16 D	137.71	0.73	0.15	0.14	0.14	614.1	587.1	560.1
T5 - 15 D	130.81	0.78	0.15	0.14	0.14	642.9	615.5	588.0
T5 - 14 D	126.45	0.78	0.15	0.15	0.14	608.2	582.8	557.4
T5 - 13 D	117.10	0.88	0.15	0.15	0.14	660.7	633.1	605.5
T5 - 12 D	110.31	0.88	0.15	0.15	0.14	586.3	561.8	537.3
T5 - 11 D	103.55	0.93	0.15	0.14	0.14	568.8	544.5	520.3
T5 - 10 D	96.74	1.03	0.15	0.14	0.13	582.8	556.4	529.9
T5 - 09 D	90.26	1.03	0.14	0.13	0.13	487.6	464.0	440.5
T5 - 08 D	83.87	1.07	0.13	0.13	0.12	437.1	414.1	391.1
T5 - 07 D	77.34	1.22	0.13	0.12	0.12	477.1	451.7	426.3
T5 - 06 D	70.94	1.27	0.13	0.12	0.12	431.1	407.9	384.7
T5 - 05 D	64.68	1.37	0.13	0.12	0.11	409.2	386.7	364.2
T5 - 04 D	58.52	1.42	0.13	0.12	0.11	356.7	336.9	317.1
T5 - 03 D	52.60	1.61	0.13	0.12	0.11	370.3	349.5	328.7
T5 - 02 D	46.95	1.86	0.13	0.12	0.11	391.1	369.1	347.1
T5 - 01 D	43.56	2.00	0.13	0.12	0.11	392.1	370.1	348.0

R100 %, R90%, R80 % = Porcentaje de material de relleno considerado

Tabla F.4 Tensiones calculadas en los tirantes I de la pila 15 en el puente Coatzacoalcos II, sin considerar el efecto de curvatura.

Tirante	Longitud (m)	Frecuencia (Hz)	Masa (t/m) R 100%	Masa (t/m) R 90%	Masa (t/m) R 80 %	Tensión (t) R 100%	Tensión (t) R 90%	Tensión (t) R 80 %
T5 - 01 I	43.48	2.05	0.13	0.12	0.11	410.1	387.0	364.0
T5 - 02 I	46.87	1.81	0.13	0.12	0.11	369.9	349.1	328.3
T5 - 03 I	52.52	1.56	0.13	0.12	0.11	347.5	328.0	308.4
T5 - 04 I	58.44	1.42	0.13	0.12	0.11	355.7	335.9	316.2
T5 - 05 I	64.60	1.27	0.13	0.12	0.11	352.3	332.9	313.5
T5 - 06 I	70.86	1.17	0.13	0.12	0.12	366.3	346.6	326.9
T5 - 07 I	77.26	1.07	0.13	0.12	0.12	368.3	348.7	329.1
T5 - 08 I	83.68	1.03	0.13	0.13	0.12	396.4	375.5	354.7
T5 - 09 I	90.17	0.98	0.14	0.13	0.13	442.1	420.8	399.4
T5 - 10 I	96.65	0.93	0.15	0.14	0.13	476.9	455.2	433.6
T5 - 11 I	103.46	0.93	0.15	0.14	0.14	567.8	543.6	519.4
T5 - 12 I	110.22	0.88	0.15	0.15	0.14	585.4	560.9	536.5
T5 - 13 I	117.01	0.88	0.15	0.15	0.14	659.7	632.1	604.6
T5 - 14 I	123.82	0.83	0.15	0.15	0.14	658.6	631.1	603.6
T5 - 15 I	130.72	0.78	0.15	0.14	0.14	642.0	614.6	587.2
T5 - 16 I	137.62	0.68	0.15	0.14	0.14	535.5	512.0	488.4
T5 - 17 I	144.47	0.64	0.15	0.14	0.13	498.9	476.2	453.6

R100 %, R90%, R80 % = Porcentaje de material de relleno considerado

Tabla F.5 Tensiones calculadas de los tirantes en la pila 13 del puente Tampico, sin considerar el efecto de curvatura.

Tirante	Longitud (m)	Frecuencia (Hz)	Masa (t/m)	Masa (t/m)	Masa (t/m)	Tensión (t)	Tensión (t)	Tensión (t)
			R 100%	R 90%	R 80 %	R 100%	R 90%	R 80 %
P13 - L T	203.76	0.59	0.10	0.10	0.10	585.6	575.0	564.4
P13 - K T	189.45	0.59	0.09	0.09	0.09	468.1	460.9	453.8
P13 - J T	175.41	0.64	0.09	0.08	0.08	436.3	429.0	421.7
P13 - I T	161.13	0.64	0.09	0.09	0.09	383.2	374.5	365.9
P13 - H T	146.88	0.64	0.09	0.09	0.08	311.7	304.4	297.0
P13 - G T	133.27	0.73	0.09	0.08	0.08	334.0	325.8	317.5
P13 - F T	119.71	0.83	0.08	0.08	0.08	333.7	325.0	316.3
P13 - E T	106.09	0.93	0.08	0.08	0.08	322.5	313.1	303.7
P13 - D T	92.47	1.12	0.06	0.06	0.06	263.9	258.7	253.5
P13 - C T	78.72	1.27	0.06	0.06	0.05	232.7	227.7	222.6
P13 - B T	65.29	1.76	0.06	0.06	0.06	324.8	318.2	311.6
P13 - B A	57.17	2.15	0.06	0.06	0.06	373.2	365.5	357.8
P13 - C A	68.24	1.51	0.06	0.06	0.05	249.5	244.0	238.5
P13 - D A	79.68	1.17	0.06	0.06	0.06	214.0	209.7	205.5
P13 - E A	91.36	1.12	0.08	0.08	0.08	345.2	335.5	325.7
P13 - F A	103.20	0.98	0.08	0.08	0.08	344.8	335.7	326.7
P13 - G A	115.16	0.88	0.09	0.08	0.08	360.8	351.8	342.8
P13 - H A	127.20	0.73	0.09	0.09	0.08	311.7	304.3	296.8
P13 - I A	139.26	0.73	0.09	0.09	0.09	382.5	373.7	364.9
P13 - J A	151.47	0.73	0.09	0.09	0.09	460.7	450.7	440.7
P13 - K A	163.67	0.68	0.10	0.10	0.09	501.7	491.9	482.1
P13 - L A	175.91	0.68	0.10	0.10	0.10	599.1	587.9	576.7

R100 %, R90%, R80 % = Porcentaje de material de relleno considerado

Tabla F.6 Tensiones calculadas de los tirantes en la pila 14 del puente Tampico, sin considerar el efecto de curvatura.

Tirante	Longitud (m)	Frecuencia (Hz)	Masa (t/m) R 100%	Masa (t/m) R 90%	Masa (t/m) R 80 %	Tensión (t) R 100%	Tensión (t) R 90%	Tensión (t) R 80 %
P14 - L T	175.91	0.68	0.10	0.10	0.10	611.9	599.4	586.9
P14 - K T	163.56	0.68	0.10	0.09	0.09	486.9	478.5	470.1
P14 - J T	151.45	0.73	0.09	0.09	0.09	443.7	435.4	427.0
P14 - I T	139.29	0.73	0.09	0.09	0.09	394.1	384.2	374.2
P14 - H T	127.18	0.78	0.09	0.09	0.09	366.5	356.9	347.3
P14 - G T	115.14	0.88	0.09	0.09	0.08	373.4	363.1	352.8
P14 - F T	103.18	0.88	0.09	0.08	0.08	287.0	278.8	270.7
P14 - E T	91.34	1.07	0.09	0.08	0.08	335.2	324.3	313.5
P14 - D T	79.66	1.32	0.06	0.06	0.06	276.5	270.5	264.5
P14 - C T	68.21	1.56	0.06	0.06	0.06	273.0	266.4	259.8
P14 - B T	57.15	2.20	0.06	0.06	0.06	398.9	390.0	381.1
P14 - B A	64.05	2.00	0.06	0.06	0.06	398.7	391.2	383.6
P14 - C A	77.41	1.32	0.06	0.05	0.05	237.3	232.5	227.7
P14 - D A	91.11	1.17	0.06	0.06	0.06	274.3	269.3	264.3
P14 - E A	105.02	0.88	0.08	0.08	0.07	269.3	262.4	255.6
P14 - F A	119.06	0.78	0.08	0.08	0.08	283.0	276.3	269.6
P14 - G A	133.20	0.73	0.08	0.08	0.08	323.5	316.3	309.1
P14 - H A	147.40	0.68	0.09	0.08	0.08	353.4	345.9	338.4
P14 - I A	161.65	0.64	0.09	0.09	0.08	375.4	367.7	360.0
P14 - J A	175.94	0.64	0.09	0.09	0.09	453.4	444.6	435.9
P14 - K A	190.25	0.59	0.10	0.09	0.09	483.8	475.4	467.0
P14 - L A	204.59	0.59	0.10	0.10	0.10	579.1	569.5	559.9

R100 %, R90%, R80 % = Porcentaje de material de relleno considerado

Apéndice G



Tensiones calculadas
considerando el efecto de
curvatura

Tabla G.1 Tensiones calculadas de los tirantes D de la pila 14 en el puente Coatzacoalcos II, considerando el efecto de curvatura.

Tirante	Masa (100 %)	Masa (90 %)	Masa (80 %)	Longitud (m)	F1 (c)	F2 (c)	Tensión Medida (t)	EI (t m ²)	ε	δ	Γ	C	Tensión (100%)	Tensión (90 %)	Tensión (80 %)
	(t/m)	(t/m)	(t/m)		(Hz)	(Hz)	(t)						(t)	(t)	
T4-17 D	0.15	0.14	0.13	144.47	0.64	1.17	472.98	22.6	59	0.005	3	0.0019	495.7	473.1	450.5
T4-16 D	0.15	0.14	0.14	137.62	0.78	1.42	591.72	22.7	63	0.004	6	0.0020	694.2	663.5	632.9
T4-15 D	0.15	0.14	0.14	130.72	0.78	1.56	635.26	22.8	62	0.004	5	0.0023	637.9	610.6	583.3
T4-14 D	0.15	0.15	0.14	123.82	0.83	1.61	674.83	22.9	60	0.004	5	0.0025	654.3	626.8	599.4
T4-13 D	0.15	0.15	0.14	117.01	0.88	1.71	631.31	22.9	55	0.004	5	0.0028	655.1	627.6	600.1
T4-12 D	0.15	0.15	0.14	110.22	0.88	1.71	573.91	22.9	49	0.004	5	0.0032	580.8	556.4	532.0
T4-11 D	0.15	0.14	0.14	103.46	0.93	1.81	542.24	22.8	45	0.004	6	0.0036	563.0	538.9	514.7
T4-10 D	0.15	0.14	0.13	96.65	0.93	1.86	501.47	22.6	41	0.004	5	0.0042	472.1	450.6	429.1
T4-09 D	0.14	0.13	0.13	90.17	0.98	1.90	445.27	22.4	36	0.004	6	0.0049	437.3	416.0	394.8
T4-08 D	0.13	0.13	0.12	83.68	1.03	2.00	393.03	22.1	31	0.004	7	0.0058	391.5	370.7	350.0
T4-07 D	0.13	0.12	0.12	77.26	1.22	2.15	385.90	22.0	28	0.003	11	0.0068	470.2	445.0	419.8
T4-06 D	0.13	0.12	0.12	70.86	1.22	2.30	365.08	22.0	25	0.003	9	0.0081	391.7	370.5	349.3
T4-05 D	0.13	0.12	0.11	64.60	1.32	2.59	348.14	21.9	23	0.003	9	0.0098	372.6	352.0	331.3
T4-04 D	0.13	0.12	0.11	58.44	1.42	2.73	345.54	21.9	20	0.003	6	0.0120	349.1	329.5	309.9
T4-03 D	0.13	0.12	0.11	52.43	1.56	3.13	281.42	21.8	17	0.003	7	0.0150	339.0	319.7	300.5
T4-02 D	0.13	0.12	0.11	46.87	1.86	3.71	304.23	21.8	17	0.003	7	0.0187	381.1	359.4	337.8
T4-01 D	0.13	0.12	0.11	43.48	1.71	3.71	264.04	21.8	17	0.004	4	0.0218	276.7	260.9	245.2

(c) - calculada
 100 %, 90%, 80 % - porcentaje de material de relleno considerado

Tabla G.2 Tensiones calculadas de los tirantes I de la pila 14 en el puente Coatzacoalcos II, considerando el efecto de curvatura.

Tirante	Masa (100 %)	Masa (90 %)	Masa (80 %)	Longitud (m)	F1 (c)	F2 (c)	Tensión Medida (t)	EI (t m ²)	ε	δ	Γ	C	Tensión (100%)	Tensión (90 %)	Tensión (80 %)
	(t/m)	(t/m)	(t/m)		(Hz)	(Hz)	(t)						(t)	(t)	
T4 - 01 I	0.13	0.12	0.11	43.56	2.00	3.91	265.12	21.84	17	0.003	7	0.0217	382.7	361.0	339.2
T4 - 02 I	0.13	0.12	0.11	46.95	1.90	3.81	366.60	21.84	17	0.002	8	0.0187	403.1	380.2	357.3
T4 - 03 I	0.13	0.12	0.11	52.51	1.61	3.13	309.67	21.84	17	0.003	7	0.0149	361.5	341.0	320.5
T4 - 04 I	0.13	0.12	0.11	58.52	1.47	2.93	346.61	21.88	20	0.003	6	0.0120	374.9	353.9	332.9
T4 - 05 I	0.13	0.12	0.11	64.68	1.32	2.59	349.87	21.91	23	0.003	7	0.0098	374.2	353.4	332.7
T4 - 06 I	0.13	0.12	0.12	70.94	1.27	2.49	347.82	21.99	25	0.003	8	0.0081	425.0	402.0	379.0
T4 - 07 I	0.13	0.12	0.12	77.34	1.22	2.30	381.95	22.02	28	0.003	8	0.0068	471.2	446.0	420.8
T4 - 08 I	0.13	0.13	0.12	83.87	1.03	2.10	395.80	22.06	31	0.003	5	0.0058	393.2	372.4	351.6
T4 - 09 I	0.14	0.13	0.13	90.26	1.03	2.00	443.29	22.36	36	0.003	6	0.0049	482.5	459.1	435.6
T4 - 10 I	0.15	0.14	0.13	96.74	0.98	1.95	497.92	22.58	40	0.003	5	0.0042	524.5	500.6	476.7
T4 - 11 I	0.15	0.14	0.14	103.55	0.93	1.86	536.30	22.80	45	0.004	4	0.0036	563.9	539.8	515.6
T4 - 12 I	0.15	0.15	0.14	110.31	0.88	1.76	568.76	22.87	49	0.004	4	0.0031	581.7	557.3	532.9
T4 - 13 I	0.15	0.15	0.14	117.10	0.88	1.71	629.31	22.87	55	0.003	5	0.0028	656.1	628.6	601.0
T4 - 14 I	0.15	0.15	0.14	126.45	0.83	1.66	672.84	22.87	61	0.004	5	0.0024	682.6	654.0	625.3
T4 - 15 I	0.15	0.14	0.14	130.81	0.78	1.56	627.33	22.80	61	0.004	4	0.0022	638.8	611.5	584.1
T4 - 16 I	0.15	0.14	0.14	137.71	0.73	1.42	586.96	22.69	63	0.004	4	0.0020	610.4	583.4	556.5
T4 - 17 I	0.15	0.14	0.13	144.56	0.64	1.22	471.00	22.58	59	0.005	3	0.0019	496.3	473.7	451.1

(c) - calculada

100 %, 90%, 80 % - porcentaje de material de relleno considerado

Tabla G.3 Tensiones calculadas de los tirantes D en la pila 15 en el puente Coatzacoalcos II, considerando el efecto de curvatura.

Tirante	Masa (100 %)	Masa (90 %)	Masa (80 %)	Longitud (m)	F1 (c)	F2 (c)	Tensión Medida (t)	EI (t m ²)	ε	δ	Γ	C	Tensión (100%)	Tensión (90 %)	Tensión (80 %)
	(t/m)	(t/m)	(t/m)		(Hz)	(Hz)	(t)						(t)	(t)	
T5 - 17 D	0.15	0.14	0.13	144.56	0.64	1.27	467.04	22.58	55	0.005	3	0.0019	496.3	473.7	451.1
T5 - 16 D	0.15	0.14	0.14	137.71	0.73	1.37	573.90	22.69	59	0.004	5	0.0020	610.4	583.4	556.5
T5 - 15 D	0.15	0.14	0.14	130.81	0.78	1.51	638.01	22.80	61	0.004	5	0.0022	638.8	611.5	584.1
T5 - 14 D	0.15	0.15	0.14	126.45	0.78	1.66	672.84	22.87	61	0.004	5	0.0024	604.1	578.8	553.5
T5 - 13 D	0.15	0.15	0.14	117.10	0.88	1.76	660.97	22.87	58	0.003	6	0.0028	656.1	628.6	601.0
T5 - 12 D	0.15	0.15	0.14	110.31	0.88	1.76	581.81	22.87	53	0.004	6	0.0031	581.7	557.3	532.9
T5 - 11 D	0.15	0.14	0.14	103.55	0.93	1.86	558.07	22.80	50	0.004	6	0.0036	563.9	539.8	515.6
T5 - 10 D	0.15	0.14	0.13	96.74	1.03	2.00	520.47	22.58	47	0.003	7	0.0042	577.6	551.3	524.9
T5 - 09 D	0.14	0.13	0.13	90.26	1.03	2.05	467.04	22.36	43	0.003	8	0.0049	482.5	459.1	435.6
T5 - 08 D	0.13	0.13	0.12	83.87	1.07	2.15	401.74	22.06	39	0.003	9	0.0058	432.0	409.1	386.2
T5 - 07 D	0.13	0.12	0.12	77.34	1.22	2.39	395.81	22.02	37	0.003	11	0.0068	471.2	446.0	420.8
T5 - 06 D	0.13	0.12	0.12	70.94	1.27	2.49	369.44	21.99	35	0.003	11	0.0081	425.0	402.0	379.0
T5 - 05 D	0.13	0.12	0.11	64.68	1.37	2.69	359.65	21.91	33	0.003	10	0.0098	402.7	380.4	358.1
T5 - 04 D	0.13	0.12	0.11	58.52	1.42	2.88	340.09	21.88	30	0.003	6	0.0120	350.1	330.4	310.8
T5 - 03 D	0.13	0.12	0.11	52.60	1.61	3.17	320.54	21.84	28	0.003	7	0.0149	362.8	342.2	321.6
T5 - 02 D	0.13	0.12	0.11	46.95	1.86	3.61	328.14	21.84	27	0.002	7	0.0187	382.4	360.7	339.0
T5 - 01 D	0.13	0.12	0.11	43.56	2.00	4.00	303.15	21.84	25	0.003	6	0.0217	382.7	361.0	339.2

(c) - calculada

100 %, 90%, 80 % - porcentaje de material de relleno considerado

Tabla G.4 Tensiones calculadas de los tirantes I de la pila 15 en el puente Coatzacoalcos II, considerando el efecto de curvatura.

Tirante	Masa (100 %)	Masa (90 %)	Masa (80 %)	Longitud	F1 (c)	F2 (c)	Tensión Medida	EI	ϵ	δ	Γ	C	Tensión (100%)	Tensión (90 %)	Tensión (80 %)
	(t/m)	(t/m)	(t/m)		(m)	(Hz)							(Hz)	(t)	(t)
T5 - 01 I	0.13	0.12	0.11	43.48	2.05	4.05	302.08	21.84	25	0.003	6	0.0218	400.5	377.7	354.9
T5 - 02 I	0.13	0.12	0.11	46.87	1.81	3.61	340.10	21.84	27	0.003	6	0.0187	361.4	340.9	320.3
T5 - 03 I	0.13	0.12	0.11	52.52	1.56	3.08	322.72	21.84	28	0.003	5	0.0149	340.2	320.9	301.6
T5 - 04 I	0.13	0.12	0.11	58.44	1.42	2.78	340.10	21.88	30	0.003	5	0.0120	349.1	329.5	309.9
T5 - 05 I	0.13	0.12	0.11	64.60	1.27	2.54	359.66	21.91	33	0.003	5	0.0098	346.3	327.1	307.9
T5 - 06 I	0.13	0.12	0.12	70.86	1.17	2.34	367.26	21.99	34	0.003	5	0.0081	360.7	341.1	321.6
T5 - 07 I	0.13	0.12	0.12	77.26	1.07	2.10	389.85	22.02	37	0.004	5	0.0068	363.2	343.7	324.2
T5 - 08 I	0.13	0.13	0.12	83.68	1.03	2.05	403.71	22.06	39	0.004	5	0.0058	391.5	370.7	350.0
T5 - 09 I	0.14	0.13	0.13	90.17	0.98	2.00	461.10	22.36	43	0.004	5	0.0049	437.3	416.0	394.8
T5 - 10 I	0.15	0.14	0.13	96.65	0.93	1.86	520.46	22.58	47	0.004	4	0.0042	472.1	450.6	429.1
T5 - 11 I	0.15	0.14	0.14	103.46	0.93	1.86	556.09	22.80	50	0.004	4	0.0036	563.0	538.9	514.7
T5 - 12 I	0.15	0.15	0.14	110.22	0.88	1.71	616.81	22.87	55	0.004	4	0.0032	580.8	556.4	532.0
T5 - 13 I	0.15	0.15	0.14	117.01	0.88	1.71	664.94	22.87	58	0.004	5	0.0028	655.1	627.6	600.1
T5 - 14 I	0.15	0.15	0.14	123.82	0.83	1.66	678.79	22.87	61	0.004	4	0.0025	654.3	626.8	599.4
T5 - 15 I	0.15	0.14	0.14	130.72	0.78	1.56	645.15	22.80	61	0.004	4	0.0023	637.9	610.6	583.3
T5 - 16 I	0.15	0.14	0.14	137.62	0.68	1.37	583.81	22.69	60	0.005	3	0.0020	532.0	508.5	485.0
T5 - 17 I	0.15	0.14	0.13	144.47	0.64	1.22	476.94	22.58	55	0.005	3	0.0019	495.7	473.1	450.5

(c) - calculada

100 %, 90%, 80 % - porcentaje de material de relleno considerado

Tabla G.5 Tensiones calculadas de los tirantes de la pila 13 en el puente Tampico, considerando el efecto de curvatura.

Tirante	Masa (100%)	Masa (90 %)	Masa (80 %)	Longitud	F1 (c)	F2 (c)	Tensión Medida	EI	ε	δ	Γ	C	Tensión (100%)	Tensión (90 %)	Tensión (80 %)
	(t/m)	(t/m)	(t/m)		(m)	(Hz)	(Hz)	(t)	(t m ²)					(t)	(t)
P13-L T	0.10	0.10	0.10	203.76	0.59	1.17	550.00	11.9	97	0.005	4	0.0008	591.8	581.0	570.3
P13-K T	0.09	0.09	0.09	189.45	0.59	1.17	430.50	11.8	83	0.005	4	0.0010	472.8	465.5	458.3
P13-J T	0.09	0.08	0.08	175.41	0.64	1.27	423.50	11.5	81	0.005	4	0.0012	441.4	434.0	426.7
P13-I T	0.09	0.09	0.09	161.13	0.64	1.22	328.00	11.4	68	0.005	3	0.0014	387.4	378.7	369.9
P13-H T	0.09	0.09	0.08	146.88	0.64	1.27	273.50	11.3	60	0.006	3	0.0016	314.9	307.4	300.0
P13-G T	0.09	0.08	0.08	133.27	0.73	1.47	291.00	11.1	59	0.005	4	0.0020	330.2	322.0	313.8
P13-F T	0.08	0.08	0.08	119.71	0.83	1.61	281.00	11.0	55	0.004	5	0.0025	331.5	322.8	314.1
P13-E T	0.08	0.08	0.08	106.09	0.93	1.86	266.50	10.8	51	0.004	5	0.0032	321.5	312.0	302.6
P13-D T	0.06	0.06	0.06	92.47	1.12	2.20	221.50	4.5	68	0.003	6	0.0032	260.8	255.7	250.5
P13-C T	0.06	0.06	0.05	78.72	1.27	2.54	205.00	4.3	61	0.003	6	0.0044	231.0	225.9	220.8
P13-B T	0.06	0.06	0.06	65.29	1.76	3.56	289.00	4.5	65	0.002	11	0.0063	322.9	316.3	309.8
P13-B A	0.06	0.06	0.06	57.17	2.15	4.30	327.00	4.5	65	0.002	15	0.0082	370.7	363.0	355.4
P13-C A	0.06	0.06	0.05	68.24	1.51	2.98	210.50	4.3	58	0.002	7	0.0058	246.0	240.6	235.1
P13-D A	0.06	0.06	0.06	79.68	1.17	2.49	213.00	4.5	62	0.003	4	0.0043	211.5	207.3	203.1
P13-E A	0.08	0.08	0.08	91.36	1.12	2.25	284.00	10.8	49	0.003	6	0.0044	340.4	330.8	321.1
P13-F A	0.08	0.08	0.08	103.20	0.98	1.90	283.50	11.0	52	0.003	5	0.0034	344.3	335.2	326.1
P13-G A	0.09	0.08	0.08	115.16	0.88	1.71	293.50	11.1	55	0.004	4	0.0027	359.2	350.2	341.2
P13-H A	0.09	0.09	0.08	127.20	0.73	1.47	275.50	11.3	56	0.005	3	0.0022	307.9	300.6	293.2
P13-I A	0.09	0.09	0.09	139.26	0.73	1.42	323.50	11.4	63	0.004	3	0.0018	378.3	369.6	360.9
P13-J A	0.09	0.09	0.09	151.47	0.73	1.47	419.00	11.5	74	0.004	4	0.0015	456.1	446.2	436.2
P13-K A	0.10	0.10	0.09	163.67	0.68	1.27	411.50	11.8	76	0.004	3	0.0013	493.8	484.1	474.4
P13-L A	0.10	0.10	0.10	175.91	0.68	1.37	546.50	11.9	90	0.004	4	0.0011	590.0	579.0	567.9

(c) - calculada 100 %, 90%, 80 % - porcentaje de material de relleno considerado

Tabla G.6 Tensiones calculadas de los tirantes de la pila 14 en el puente Tampico, considerando el efecto de curvatura.

Tirante	Masa (100%)	Masa (90 %)	Masa (80 %)	Longitud (m)	F1 (c)	F2 (c)	Tensión Medida (t)	EI (t m ²)	ε	δ	Γ	C	Tensión (100%) (t)	Tensión (90 %) (t)	Tensión (80 %) (t)
	(t/m)	(t/m)	(t/m)		(Hz)	(Hz)									
P14-L T	0.10	0.10	0.10	175.91	0.68	1.42	443.00	11.9	81	0.004	4	0.0011	602.6	590.3	577.9
P14-K T	0.10	0.09	0.09	163.56	0.68	1.37	461.00	11.8	80	0.004	4	0.0013	479.2	470.9	462.7
P14-J T	0.09	0.09	0.09	151.45	0.73	1.42	389.50	11.5	72	0.004	4	0.0016	439.2	431.0	422.7
P14-I T	0.09	0.09	0.09	139.29	0.73	1.47	330.00	11.4	64	0.004	4	0.0018	389.8	380.0	370.1
P14-H T	0.09	0.09	0.09	127.18	0.78	1.47	273.00	11.3	56	0.004	3	0.0022	363.4	353.8	344.2
P14-G T	0.09	0.09	0.08	115.14	0.88	1.71	300.00	11.1	56	0.004	5	0.0026	371.7	361.5	351.2
P14-F T	0.09	0.08	0.08	103.18	0.88	1.81	252.00	11.0	49	0.004	4	0.0033	285.2	277.1	269.0
P14-E T	0.09	0.08	0.08	91.34	1.07	2.10	253.00	10.8	46	0.003	5	0.0042	329.8	319.1	308.3
P14-D T	0.06	0.06	0.06	79.66	1.32	2.64	233.50	4.5	64	0.003	7	0.0042	275.3	269.4	263.4
P14-C T	0.06	0.06	0.06	68.21	1.56	3.13	227.50	4.3	60	0.002	8	0.0058	269.7	263.2	256.6
P14-B T	0.06	0.06	0.06	57.15	2.20	4.35	337.00	4.5	66	0.001	15	0.0082	396.7	387.8	378.9
P14-B A	0.06	0.06	0.06	64.05	2.00	4.00	356.50	4.5	71	0.002	14	0.0066	395.0	387.5	380.0
P14-C A	0.06	0.05	0.05	77.41	1.32	2.59	204.50	4.3	60	0.003	6	0.0046	236.2	231.4	226.6
P14-D A	0.06	0.06	0.06	91.11	1.17	2.34	248.50	4.5	71	0.003	5	0.0033	271.7	266.7	261.7
P14-E A	0.08	0.08	0.07	105.02	0.88	1.76	243.50	10.8	49	0.004	3	0.0034	267.6	260.8	253.9
P14-F A	0.08	0.08	0.08	119.06	0.78	1.56	267.50	11.0	54	0.005	3	0.0026	280.2	273.6	266.9
P14-G A	0.08	0.08	0.08	133.20	0.73	1.42	284.00	11.1	58	0.005	3	0.0020	319.8	312.6	305.4
P14-H A	0.09	0.08	0.08	147.40	0.68	1.32	306.50	11.3	63	0.005	3	0.0017	347.4	340.0	332.6
P14-I A	0.09	0.09	0.08	161.65	0.64	1.22	315.00	11.4	67	0.005	3	0.0014	379.5	371.8	364.0
P14-J A	0.09	0.09	0.09	175.94	0.64	1.27	412.00	11.5	80	0.005	3	0.0011	458.8	449.9	441.0
P14-K A	0.10	0.09	0.09	190.25	0.59	1.22	480.00	11.8	88	0.005	3	0.0010	488.6	480.2	471.7
P14-L A	0.10	0.10	0.10	204.59	0.59	1.17	567.00	11.9	99	0.005	3	0.0008	585.2	575.5	565.8

(c) - calculada

100 %, 90%, 80 % - porcentaje de material de relleno considerado

Apéndice H



Influencia de la curvatura en
las tensiones calculadas

Tabla H.1 Influencia de la curvatura en los tirantes de la pila 14, puente Coatzacoalcos II

Tirante	R 100 %		R 90 %		R 80 %		R100%, R90% R80%
	Tcc (t)	Tsc (t)	Tcc (t)	Tsc (t)	Tcc (t)	Tsc (t)	DT %
T4-17 D	496	499	473	476	451	454	-1
T4-16 D	694	698	664	667	633	637	-1
T4-15 D	638	642	611	615	583	587	-1
T4-14 D	654	659	627	631	599	604	-1
T4-13 D	655	660	628	632	600	605	-1
T4-12 D	581	585	556	561	532	536	-1
T4-11 D	563	568	539	544	515	519	-1
T4-10 D	472	477	451	455	429	434	-1
T4-09 D	437	442	416	421	395	399	-1
T4-08 D	391	396	371	376	350	355	-1
T4-07 D	470	476	445	451	420	425	-1
T4-06 D	392	398	370	376	349	355	-2
T4-05 D	373	379	352	358	331	337	-2
T4-04 D	349	356	329	336	310	316	-2
T4-03 D	339	346	320	327	300	307	-2
T4-02 D	381	390	359	368	338	346	-2
T4-01 D	277	285	261	269	245	253	-3
T4-01 I	383	392	361	370	339	348	-3
T4-02 I	403	412	380	389	357	366	-2
T4-03 I	362	369	341	348	320	328	-2
T4-04 I	375	382	354	361	333	339	-2
T4-05 I	374	380	353	359	333	339	-2
T4-06 I	425	431	402	408	379	385	-1
T4-07 I	471	477	446	452	421	426	-1
T4-08 I	393	398	372	377	352	356	-1
T4-09 I	482	488	459	464	436	440	-1
T4-10 I	525	530	501	505	477	481	-1
T4-11 I	564	569	540	545	516	520	-1
T4-12 I	582	586	557	562	533	537	-1
T4-13 I	656	661	629	633	601	605	-1
T4-14 I	683	687	654	658	625	630	-1
T4-15 I	639	643	611	615	584	588	-1
T4-16 I	610	614	583	587	556	560	-1
T4-17 I	496	500	474	477	451	454	-1

Tsc - Tensión sin efecto de curvatura

Tcc - Tensión con efecto de curvatura

DT - Diferencia entre las tensiones con y sin efecto de curvatura

Tabla H.2 Influencia de la curvatura en los tirantes de la pila 15, puente Coatzacoalcos II

Tirante	R 100 %		R 90 %		R 80 %		R100%, R90% R80%
	Tcc (t)	Tsc (t)	Tcc (t)	Tsc (t)	Tcc (t)	Tsc (t)	DT %
T5-17 D	496	500	474	477	451	454	-1
T5-16 D	610	614	583	587	556	560	-1
T5-15 D	639	643	611	615	584	588	-1
T5-14 D	604	608	579	583	553	557	-1
T5-13 D	656	661	629	633	601	605	-1
T5-12 D	582	586	557	562	533	537	-1
T5-11 D	564	569	540	545	516	520	-1
T5-10 D	578	583	551	556	525	530	-1
T5-09 D	482	488	459	464	436	440	-1
T5-08 D	432	437	409	414	386	391	-1
T5-07 D	471	477	446	452	421	426	-1
T5-06 D	425	431	402	408	379	385	-1
T5-05 D	403	409	380	387	358	364	-2
T5-04 D	350	357	330	337	311	317	-2
T5-03 D	363	370	342	349	322	329	-2
T5-02 D	382	391	361	369	339	347	-2
T5-01 D	383	392	361	370	339	348	-3
T5-01 I	400	410	378	387	355	364	-2
T5-02 I	361	370	341	349	320	328	-2
T5-03 I	340	348	321	328	302	308	-2
T5-04 I	349	356	329	336	310	316	-2
T5-05 I	346	352	327	333	308	314	-2
T5-06 I	361	366	341	347	322	327	-2
T5-07 I	363	368	344	349	324	329	-1
T5-08 I	391	396	371	376	350	355	-1
T5-09 I	437	442	416	421	395	399	-1
T5-10 I	472	477	451	455	429	434	-1
T5-11 I	563	568	539	544	515	519	-1
T5-12 I	581	585	556	561	532	536	-1
T5-13 I	655	660	628	632	600	605	-1
T5-14 I	654	659	627	631	599	604	-1
T5-15 I	638	642	611	615	583	587	-1
T5-16 I	532	536	509	512	485	488	-1
T5-17 I	496	499	473	476	451	454	-1

Tsc - Tensión sin efecto de curvatura

Tcc - Tensión con efecto de curvatura

DT - Diferencia entre las tensiones con y sin efecto de curvatura

Tabla H.3 Influencia de la curvatura en los tirantes de la pila 13, puente Tampico

Tirante	R 100 %		R 90 %		R 80 %		R100%, R90%, R80%
	Tcc (t)	Tsc (t)	Tcc (t)	Tsc (t)	Tcc (t)	Tsc (t)	DT %
P13 - L T	592	586	581	575	570	564	1
P13 - K T	473	468	466	461	458	454	1
P13 - J T	441	436	434	429	427	422	1
P13 - I T	387	383	379	375	370	366	1
P13 - H T	315	312	307	304	300	297	1
P13 - G T	330	334	322	326	314	318	-1
P13 - F T	331	334	323	325	314	316	-1
P13 - E T	321	323	312	313	303	304	0
P13 - D T	261	264	256	259	251	253	-1
P13 - C T	231	233	226	228	221	223	-1
P13 - B T	323	325	316	318	310	312	-1
P13 - B A	371	373	363	365	355	358	-1
P13 - C A	246	249	241	244	235	238	-1
P13 - D A	212	214	207	210	203	205	-1
P13 - E A	340	345	331	335	321	326	-1
P13 - F A	344	345	335	336	326	327	0
P13 - G A	359	361	350	352	341	343	0
P13 - H A	308	312	301	304	293	297	-1
P13 - I A	378	382	370	374	361	365	-1
P13 - J A	456	461	446	451	436	441	-1
P13 - K A	494	502	484	492	474	482	-2
P13 - L A	590	599	579	588	568	577	-2

Tsc - Tensión sin efecto de curvatura

Tcc - Tensión con efecto de curvatura

DT - Diferencia entre las tensiones con y sin efecto de curvatura

Tabla H.4 Influencia de la curvatura en los tirantes de la pila 14, puente Tampico

Tirante	R 100 %		R 90 %		R 80 %		R100%, R90% R80%
	Tcc (t)	Tsc (t)	Tcc (t)	Tsc (t)	Tcc (t)	Tsc (t)	DT %
P14 - L T	603	612	590	599	578	587	-2
P14 - K T	479	487	471	479	463	470	-2
P14 - J T	439	444	431	435	423	427	-1
P14 - I T	390	394	380	384	370	374	-1
P14 - H T	363	367	354	357	344	347	-1
P14 - G T	372	373	361	363	351	353	0
P14 - F T	285	287	277	279	269	271	-1
P14 - E T	330	335	319	324	308	313	-2
P14 - D T	275	276	269	270	263	264	0
P14 - C T	270	273	263	266	257	260	-1
P14 - B T	397	399	388	390	379	381	-1
P14 - B A	395	399	387	391	380	384	-1
P14 - C A	236	237	231	233	227	228	0
P14 - D A	272	274	267	269	262	264	-1
P14 - E A	268	269	261	262	254	256	-1
P14 - F A	280	283	274	276	267	270	-1
P14 - G A	320	324	313	316	305	309	-1
P14 - H A	347	353	340	346	333	338	-2
P14 - I A	380	375	372	368	364	360	1
P14 - J A	459	453	450	445	441	436	1
P14 - K A	489	484	480	475	472	467	1
P14 - L A	585	579	576	569	566	560	1

Tsc – Tensión sin efecto de curvatura

Tcc – Tensión con efecto de curvatura

DT – Diferencia entre las tensiones con y sin efecto de curvatura

Apéndice I



Diferencias entre las tensiones
calculadas, medidas y de
diseño

Tabla I.1 Diferencia de las tensiones calculadas, medidas y de diseño (Coatzacoalcos II)

Tirante	T _d	T _{GH}	R100%	R90%	R80%	D _d GH	R100%		R90%		R80%	
			T _{PD}	T _{PD}	T _{PD}		D _{PD} d	D _{PD} GH	D _{PD} d	D _{PD} GH	D _{PD} d	D _{PD} GH
	(t)	(t)	(t)	(t)	(t)	%	%	%	%	%	%	%
T4-17 D	446	473	496	473	451	-6	10	5	6	0	1	-5
T4-16 D	540	592	694	664	633	-10	22	15	19	11	15	7
T4-15 D	589	635	638	611	583	-8	8	0	4	-4	-1	-9
T4-14 D	625	675	654	627	599	-8	5	-3	0	-8	-4	-13
T4-13 D	576	631	655	628	600	-10	12	4	8	-1	4	-5
T4-12 D	536	574	581	556	532	-7	8	1	4	-3	-1	-8
T4-11 D	497	542	563	539	515	-9	12	4	8	-1	3	-5
T4-10 D	491	501	472	451	429	-2	-4	-6	-9	-11	-14	-17
T4-09 D	424	445	437	416	395	-5	3	-2	-2	-7	-7	-13
T4-08 D	373	393	391	371	350	-5	5	0	-1	-6	-7	-12
T4-07 D	374	386	470	445	420	-3	21	18	16	13	11	8
T4-06 D	362	365	392	370	349	-1	8	7	2	1	-4	-5
T4-05 D	320	348	373	352	331	-9	14	7	9	1	4	-5
T4-04 D	313	346	349	329	310	-11	10	1	5	-5	-1	-11
T4-03 D	288	281	339	320	300	2	15	17	10	12	4	6
T4-02 D	352	304	381	359	338	14	8	20	2	15	-4	10
T4-01 D	277	264	277	261	245	5	0	5	-6	-1	-13	-8
T4-01 I	345	265	383	361	339	23	10	31	4	18	-2	22
T4-02 I	367	367	403	380	357	0	9	9	3	4	-3	-3
T4-03 I	307	310	362	341	320	-1	15	14	10	9	4	3
T4-04 I	343	347	375	354	333	-1	8	8	3	2	-3	-4
T4-05 I	343	350	374	353	333	-2	8	6	3	1	-3	-5
T4-06 I	329	348	425	402	379	-6	23	18	18	13	13	8
T4-07 I	358	382	471	446	421	-7	24	19	20	14	15	9
T4-08 I	379	396	393	372	352	-4	4	-1	-2	-6	-8	-13
T4-09 I	427	443	482	459	436	-4	11	8	7	3	2	-2
T4 - 10 I	469	498	525	501	477	-6	11	5	6	1	2	-4
T4 - 11 I	530	536	564	540	516	-1	6	5	2	1	-3	-4
T4 - 12 I	568	569	582	557	533	0	2	2	-2	-2	-7	-7
T4 - 13 I	639	629	656	629	601	2	3	4	-2	0	-6	-5
T4 - 14 I	669	673	683	654	625	-1	2	1	-2	-3	-7	-8
T4 - 15 I	638	627	639	611	584	2	0	2	-4	-3	-9	-7
T4 - 16 I	593	587	610	583	556	1	3	4	-2	-1	-7	-5
T4 - 17 I	461	471	496	474	451	-2	7	5	3	1	-2	-4

T_d - tensión de diseño, T_{GH} - tensión medida con gatos hidráulicos, T_{PD} - tensión calculada con las frecuencias de las pruebas dinámicas, D_{PD d} - diferencia T_{PD} - T_d,
D_{PD GH} - diferencia T_{PD} - T_{GH}, D_{d GH} - diferencia T_d - T_{GH}

Tabla I.2 Diferencia de las tensiones calculadas, medidas y de diseño (Coatzacoalcos II)

Tirante	T _d	T _{GH}	R100%	R90%	R80%	D _d GH	R100%		R90%		R80%	
			T _{PD}	T _{PD}	T _{PD}		D _{PD} d	D _{PD} GH	D _{PD} d	D _{PD} GH	D _{PD} d	D _{PD} GH
	(t)	(t)	(t)	(t)	(t)	%	%	%	%	%	%	%
T5-17 D	450	467	496	474	451	-4	9	6	5	1	-4	-10
T5-16 D	542	574	610	583	556	-6	11	6	7	2	-3	-10
T5-15 D	579	638	639	611	584	-10	9	0	5	-4	-9	-9
T5-14 D	617	673	604	579	553	-9	-2	-11	-7	-16	-22	-9
T5-13 D	615	661	656	629	601	-7	6	-1	2	-5	-10	-9
T5-12 D	533	582	582	557	533	-9	8	0	4	-4	-9	-9
T5-11 D	520	558	564	540	516	-7	8	1	4	-3	-8	-9
T5-10 D	492	520	578	551	525	-6	15	10	11	6	1	-10
T5-09 D	431	467	482	459	436	-8	11	3	6	-2	-7	-11
T5-08 D	386	402	432	409	386	-4	11	7	6	2	-4	-12
T5-07 D	400	396	471	446	421	1	15	16	10	11	6	-12
T5-06 D	354	369	425	402	379	-4	17	13	12	8	3	-12
T5-05 D	331	360	403	380	358	-9	18	11	13	5	0	-12
T5-04 D	317	340	350	330	311	-7	9	3	4	-3	-9	-13
T5-03 D	306	321	363	342	322	-5	16	12	11	6	0	-13
T5-02 D	299	328	382	361	339	-10	22	14	17	9	3	-13
T5-01 D	345	303	383	361	339	12	10	21	4	16	11	-13
T5-01 I	335	340	400	378	355	-2	16	15	11	10	4	-13
T5-02 I	327	340	361	341	320	-4	10	6	4	0	-6	-13
T5-03 I	299	323	340	321	302	-8	12	5	7	-1	-7	-13
T5-04 I	327	340	349	329	310	-4	6	3	1	-3	-10	-13
T5-05 I	347	360	346	327	308	-4	0	-4	-6	-10	-17	-12
T5-06 I	347	367	361	341	322	-6	4	-2	-2	-8	-14	-12
T5-07 I	342	390	363	344	324	-14	6	-7	1	-13	-20	-12
T5-08 I	373	404	391	371	350	-8	5	-3	-1	-9	-15	-12
T5-09 I	439	461	437	416	395	-5	0	-5	-6	-11	-17	-11
T5-10 I	484	520	472	451	429	-8	-2	-10	-7	-16	-21	-10
T5-11 I	528	556	563	539	515	-5	6	1	2	-3	-8	-9
T5-12 I	565	617	581	556	532	-9	3	-6	-1	-11	-16	-9
T5-13 I	649	665	655	628	600	-3	1	-2	-3	-6	-11	-9
T5-14 I	657	679	654	627	599	-3	0	-4	-5	-8	-13	-9
T5-15 I	631	645	638	611	583	-2	1	-1	-3	-6	-11	-9
T5-16 I	574	584	532	509	485	-2	-8	-10	-13	-15	-20	-10
T5-17 I	457	477	496	473	451	-4	8	4	3	-1	-6	-10

T_d - tensión de diseño, T_{GH} - tensión medida con gatos hidráulicos, T_{PD} - tensión calculada con las frecuencias de las pruebas dinámicas, D_{PD d} - diferencia T_{PD} - T_d,
D_{PD GH} - diferencia T_{PD} - T_{GH}, D_{d GH} - diferencia T_d - T_{GH}

Tabla I.3 Diferencia de las tensiones calculadas, medidas y de diseño (Tampico)

Tirante	T _d	T _{GH}	R100%	R90%	R80%	D _d GH	R100%		R90%		R80%	
			T _{PD}	T _{PD}	T _{PD}		D _{PD} d	D _{PD} GH	D _{PD} d	D _{PD} GH	D _{PD} d	D _{PD} GH
	(t)	(t)	(t)	(t)	(t)	%	%	%	%	%	%	%
P13 - L T	574	550	592	581	570	4	3	7	1	5	-1	4
P13 - K T	456	431	473	466	458	6	4	9	2	8	1	6
P13 - J T	389	424	441	434	427	-9	12	4	10	2	9	1
P13 - I T	334	328	387	379	370	2	14	15	12	13	10	11
P13 - H T	281	274	315	307	300	3	11	13	8	11	6	9
P13 - G T	308	291	330	322	314	6	7	12	4	10	2	7
P13 - F T	305	281	331	323	314	8	8	15	6	13	3	11
P13 - E T	284	267	321	312	303	6	12	17	9	15	6	12
P13 - D T	243	222	261	256	251	9	7	15	5	13	3	12
P13 - C T	228	205	231	226	221	10	1	11	-1	9	-3	7
P13 - B T	308	289	323	316	310	6	5	11	3	9	0	7
P13 - B A	365	327	371	363	355	11	1	12	-1	10	-3	8
P13 - C A	205	211	246	241	235	-3	17	14	15	13	13	10
P13 - D A	244	213	212	207	203	13	-15	-1	-18	-3	-20	-5
P13 - E A	288	284	340	331	321	1	15	17	13	14	10	12
P13 - F A	280	284	344	335	326	-1	19	18	16	15	14	13
P13 - G A	290	294	359	350	341	-1	19	18	17	16	15	14
P13 - H A	293	276	308	301	293	6	5	11	2	8	0	6
P13 - I A	299	324	378	370	361	-8	21	14	19	12	17	10
P13 - J A	393	419	456	446	436	-7	14	8	12	6	10	4
P13 - K A	464	412	494	484	474	11	6	17	4	15	2	13
P13 - L A	560	547	590	579	568	2	5	7	3	6	1	4

T_d - tensión de diseño, T_{GH} - tensión medida con gatos hidráulicos, T_{PD} - tensión calculada con las frecuencias de las pruebas dinámicas, D_{PD d} - diferencia T_{PD} - T_d,

D_{PD GH} - diferencia T_{PD} - T_{GH}, D_{d GH} - diferencia T_d - T_{GH}

Tabla I.4 Diferencia de las tensiones calculadas, medidas y de diseño (Tampico)

Tirante	T _d	T _{GH}	R100%	R90%	R80%	D _d GH	R100%		R90%		R80%	
			T _{PD}	T _{PD}	T _{PD}		D _{PD} d	D _{PD} GH	D _{PD} d	D _{PD} GH	D _{PD} d	D _{PD} GH
	(t)	(t)	(t)	(t)	(t)	%	%	%	%	%	%	%
P14 - L T	593	443	603	590	578	25	2	26	0	25	-3	23
P14 - K T	475	461	479	471	463	3	1	4	-1	2	-3	0
P14 - J T	408	390	439	431	423	5	7	11	5	10	3	8
P14 - I T	353	330	390	380	370	7	9	15	7	13	5	11
P14 - H T	300	273	363	354	344	9	17	25	15	23	13	21
P14 - G T	327	300	372	361	351	8	12	19	10	17	7	15
P14 - F T	274	252	285	277	269	8	4	12	1	9	-2	6
P14 - E T	283	253	330	319	308	11	14	23	11	21	8	18
P14 - D T	252	234	275	269	263	7	9	15	7	13	4	11
P14 - C T	247	228	270	263	257	8	8	16	6	14	4	11
P14 - B T	367	337	397	388	379	8	7	15	5	13	3	11
P14 - B A	384	357	395	387	380	7	3	10	1	8	-1	6
P14 - C A	218	205	236	231	227	6	8	13	6	12	4	10
P14 - D A	263	249	272	267	262	5	3	9	1	7	0	5
P14 - E A	255	244	268	261	254	5	5	9	2	7	0	4
P14 - F A	278	268	280	274	267	4	1	5	-2	2	-4	0
P14 - G A	293	284	320	313	305	3	9	11	6	9	4	7
P14 - H A	312	307	347	340	333	2	10	12	8	10	6	8
P14 - I A	318	315	380	372	364	1	16	17	14	15	13	13
P14 - J A	412	412	459	450	441	0	10	10	8	8	7	7
P14 - K A	483	480	489	480	472	1	1	2	-1	0	-2	-2
P14 - L A	579	567	585	576	566	2	1	3	-1	1	-2	0

T_d - tensión de diseño, T_{GH} - tensión medida con gatos hidráulicos, T_{PD} - tensión calculada con las frecuencias de las pruebas dinámicas, D_{PD d} - diferencia T_{PD} - T_d,
D_{PD GH} - diferencia T_{PD} - T_{GH}, D_{d GH} - diferencia T_d - T_{GH}

Apéndice J



Revisión del esfuerzo
permisible del acero de los
tirantes

Tabla J.1 Revisión de la tensión permisible puente Coatzacoalcos II

Tirantes	torones	At (cm ²)	Tp (t)	Tc (t)	Dif %
T4 - 17 D	53	79.5	813	496	-39
T4 - 16 D	56	84.0	859	694	-19
T4 - 15 D	59	88.5	905	638	-30
T4 - 14 D	61	91.5	936	654	-30
T4 - 13 D	61	91.5	936	655	-30
T4 - 12 D	61	91.5	936	581	-38
T4 - 11 D	59	88.5	905	563	-38
T4 - 10 D	53	79.5	813	472	-42
T4 - 09 D	47	70.5	721	437	-39
T4 - 08 D	39	58.5	598	391	-35
T4 - 07 D	38	57.0	583	470	-19
T4 - 06 D	37	55.5	567	392	-31
T4 - 05 D	35	52.5	537	373	-31
T4 - 04 D	34	51.0	521	349	-33
T4 - 03 D	33	49.5	506	339	-33
T4 - 02 D	33	49.5	506	381	-25
T4 - 01 D	33	49.5	506	277	-45
T4 - 01 I	33	49.5	506	383	-24
T4 - 02 I	33	49.5	506	403	-20
T4 - 03 I	33	49.5	506	362	-29
T4 - 04 I	34	51.0	521	375	-28
T4 - 05 I	35	52.5	537	374	-30
T4 - 06 I	37	55.5	567	425	-25
T4 - 07 I	38	57.0	583	471	-19
T4 - 08 I	39	58.5	598	393	-34
T4 - 09 I	47	70.5	721	482	-33
T4 - 10 I	53	79.5	813	525	-35
T4 - 11 I	59	88.5	905	564	-38
T4 - 12 I	61	91.5	936	582	-38
T4 - 13 I	61	91.5	936	656	-30
T4 - 14 I	61	91.5	936	683	-27
T4 - 15 I	59	88.5	905	639	-29
T4 - 16 I	56	84.0	859	610	-29
T4 - 17 I	53	79.5	813	496	-39
T5 - 17 D	53	79.5	813	496	-39
T5 - 16 D	56	84.0	859	610	-29
T5 - 15 D	59	88.5	905	639	-29
T5 - 14 D	61	91.5	936	604	-35
T5 - 13 D	61	91.5	936	656	-30
T5 - 12 D	61	91.5	936	582	-38
T5 - 11 D	59	88.5	905	564	-38
T5 - 10 D	53	79.5	813	578	-29
T5 - 09 D	47	70.5	721	482	-33
T5 - 08 D	39	58.5	598	432	-28
T5 - 07 D	38	57.0	583	471	-19
T5 - 06 D	37	55.5	567	425	-25
T5 - 05 D	35	52.5	537	403	-25
T5 - 04 D	34	51.0	521	350	-33
T5 - 03 D	33	49.5	506	363	-28
T5 - 02 D	33	49.5	506	382	-24
T5 - 01 D	33	49.5	506	383	-24
T5 - 01 I	33	49.5	506	400	-21
T5 - 02 I	33	49.5	506	361	-29
T5 - 03 I	33	49.5	506	340	-33
T5 - 04 I	34	51.0	521	349	-33
T5 - 05 I	35	52.5	537	346	-36
T5 - 06 I	37	55.5	567	361	-36
T5 - 07 I	38	57.0	583	363	-38
T5 - 08 I	39	58.5	598	391	-35
T5 - 09 I	47	70.5	721	437	-39
T5 - 10 I	53	79.5	813	472	-42
T5 - 11 I	59	88.5	905	563	-38
T5 - 12 I	61	91.5	936	581	-38
T5 - 13 I	61	91.5	936	655	-30
T5 - 14 I	61	91.5	936	654	-30
T5 - 15 I	59	88.5	905	638	-30
T5 - 16 I	56	84.0	859	532	-38
T5 - 17 I	53	79.5	813	496	-39

At - Área total de acero, Tp- Tensión permisible,
Tc - Tensión calculada, Dif - Diferencia permisible-calculada

Tabla J.2 Revisión de la tensión permisible puente Tampico

Tirantes	torones	At (cm ²)	Tp (t)	Tc (t)	Dif %
P13 - L T	60	90.0	819	592	-28
P13 - K T	57	85.5	778	473	-39
P13 - J T	51	76.5	696	441	-37
P13 - I T	49	73.5	669	387	-42
P13 - H T	47	70.5	641	315	-51
P13 - G T	45	67.5	614	330	-46
P13 - F T	42	63.0	573	331	-42
P13 - E T	39	58.5	532	321	-40
P13 - D T	36	54.0	491	261	-47
P13 - C T	33	49.5	450	231	-49
P13 - B T	36	54.0	491	323	-34
P13 - B A	36	54.0	491	371	-25
P13 - C A	33	49.5	450	246	-45
P13 - D A	36	54.0	491	212	-57
P13 - E A	39	58.5	532	340	-36
P13 - F A	42	63.0	573	344	-40
P13 - G A	45	67.5	614	359	-41
P13 - H A	47	70.5	641	308	-52
P13 - I A	49	73.5	669	378	-43
P13 - J A	51	76.5	696	456	-34
P13 - K A	57	85.5	778	494	-37
P13 - L A	60	90.0	819	590	-28
P14 - L T	60	90.0	819	603	-26
P14 - K T	57	85.5	778	479	-38
P14 - J T	51	76.5	696	439	-37
P14 - I T	49	73.5	669	390	-42
P14 - H T	47	70.5	641	363	-43
P14 - G T	45	67.5	614	372	-39
P14 - F T	42	63.0	573	285	-50
P14 - E T	39	58.5	532	330	-38
P14 - D T	36	54.0	491	275	-44
P14 - C T	33	49.5	450	270	-40
P14 - B T	36	54.0	491	397	-19
P14 - B A	36	54.0	491	395	-20
P14 - C A	33	49.5	450	236	-48
P14 - D A	36	54.0	491	272	-45
P14 - E A	39	58.5	532	268	-50
P14 - F A	42	63.0	573	280	-51
P14 - G A	45	67.5	614	320	-48
P14 - H A	47	70.5	641	347	-46
P14 - I A	49	73.5	669	380	-43
P14 - J A	51	76.5	696	459	-34
P14 - K A	57	85.5	778	489	-37
P14 - L A	60	90.0	819	585	-29

At - Área total de acero, Tp- Tensión permisible,

Tc - Tensión calculada, Dif - Diferencia permisible-calculada

Apéndice K



Revisión del control de la
estabilidad de las tensiones

Tabla K.1 Revisión de la estabilidad de las tensiones, puente Coatzacoalcos II

Tirantes	Tp (t)	Tc (t)	0.2Tp %	0.7Tp %
T4 - 17 D	813	496	67	13
T4 - 16 D	859	694	75	-15
T4 - 15 D	905	638	72	-1
T4 - 14 D	936	654	71	0
T4 - 13 D	936	655	71	0
T4 - 12 D	936	581	68	11
T4 - 11 D	905	563	68	11
T4 - 10 D	813	472	66	17
T4 - 09 D	721	437	67	13
T4 - 08 D	598	391	69	6
T4 - 07 D	583	470	75	-15
T4 - 06 D	567	392	71	1
T4 - 05 D	537	373	71	1
T4 - 04 D	521	349	70	4
T4 - 03 D	506	339	70	4
T4 - 02 D	506	381	73	-8
T4 - 01 D	506	277	63	22
T4 - 01 I	506	383	74	-8
T4 - 02 I	506	403	75	-14
T4 - 03 I	506	362	72	-2
T4 - 04 I	521	375	72	-3
T4 - 05 I	537	374	71	0
T4 - 06 I	567	425	73	-7
T4 - 07 I	583	471	75	-15
T4 - 08 I	598	393	70	6
T4 - 09 I	721	482	70	4
T4 - 10 I	813	525	69	8
T4 - 11 I	905	564	68	11
T4 - 12 I	936	582	68	11
T4 - 13 I	936	656	71	0
T4 - 14 I	936	683	73	-4
T4 - 15 I	905	639	72	-1
T4 - 16 I	859	610	72	-2
T4 - 17 I	813	496	67	13

Tirantes	Tp (t)	Tc (t)	0.2Tp %	0.7Tp %
T5 - 17 D	813	496	67	13
T5 - 16 D	859	610	72	-2
T5 - 15 D	905	639	72	-1
T5 - 14 D	936	604	69	8
T5 - 13 D	936	656	71	0
T5 - 12 D	936	582	68	11
T5 - 11 D	905	564	68	11
T5 - 10 D	813	578	72	-1
T5 - 09 D	721	482	70	4
T5 - 08 D	598	432	72	-3
T5 - 07 D	583	471	75	-15
T5 - 06 D	567	425	73	-7
T5 - 05 D	537	403	73	-7
T5 - 04 D	521	350	70	4
T5 - 03 D	506	363	72	-2
T5 - 02 D	506	382	74	-8
T5 - 01 D	506	383	74	-8
T5 - 01 I	506	400	75	-13
T5 - 02 I	506	361	72	-2
T5 - 03 I	506	340	70	4
T5 - 04 I	521	349	70	4
T5 - 05 I	537	346	69	8
T5 - 06 I	567	361	69	9
T5 - 07 I	583	363	68	11
T5 - 08 I	598	391	69	6
T5 - 09 I	721	437	67	13
T5 - 10 I	813	472	66	17
T5 - 11 I	905	563	68	11
T5 - 12 I	936	581	68	11
T5 - 13 I	936	655	71	0
T5 - 14 I	936	654	71	0
T5 - 15 I	905	638	72	-1
T5 - 16 I	859	532	68	12
T5 - 17 I	813	496	67	13

Tabla K.2 Revisión del control de la estabilidad de las tensiones, puente Tampico

Tirantes	Tp (t)	Tc (t)	0.2Tp %	0.7Tp %
P13 - L T	819	592	72	-3
P13 - K T	778	473	67	13
P13 - J T	696	441	68	9
P13 - I T	669	387	65	17
P13 - H T	641	315	59	30
P13 - G T	614	330	63	23
P13 - F T	573	331	65	17
P13 - E T	532	321	67	14
P13 - D T	491	261	62	24
P13 - C T	450	231	61	27
P13 - B T	491	323	70	6
P13 - B A	491	371	74	-8
P13 - C A	450	246	63	22
P13 - D A	491	212	54	38
P13 - E A	532	340	69	9
P13 - F A	573	344	67	14
P13 - G A	614	359	66	16
P13 - H A	641	308	58	31
P13 - I A	669	378	65	19
P13 - J A	696	456	69	6
P13 - K A	778	494	68	9
P13 - L A	819	590	72	-3

Tirantes	Tp (t)	Tc (t)	0.2Tp %	0.7Tp %
P14 - L T	819	603	73	-5
P14 - K T	778	479	68	12
P14 - J T	696	439	68	10
P14 - I T	669	390	66	17
P14 - H T	641	363	65	19
P14 - G T	614	372	67	14
P14 - F T	573	285	60	29
P14 - E T	532	330	68	11
P14 - D T	491	275	64	20
P14 - C T	450	270	67	14
P14 - B T	491	397	75	-15
P14 - B A	491	395	75	-15
P14 - C A	450	236	62	25
P14 - D A	491	272	64	21
P14 - E A	532	268	60	28
P14 - F A	573	280	59	30
P14 - G A	614	320	62	26
P14 - H A	641	347	63	23
P14 - I A	669	380	65	19
P14 - J A	696	459	70	6
P14 - K A	778	489	68	10
P14 - L A	819	585	72	-2

Apéndice L



Historias pruebas de vibración libre

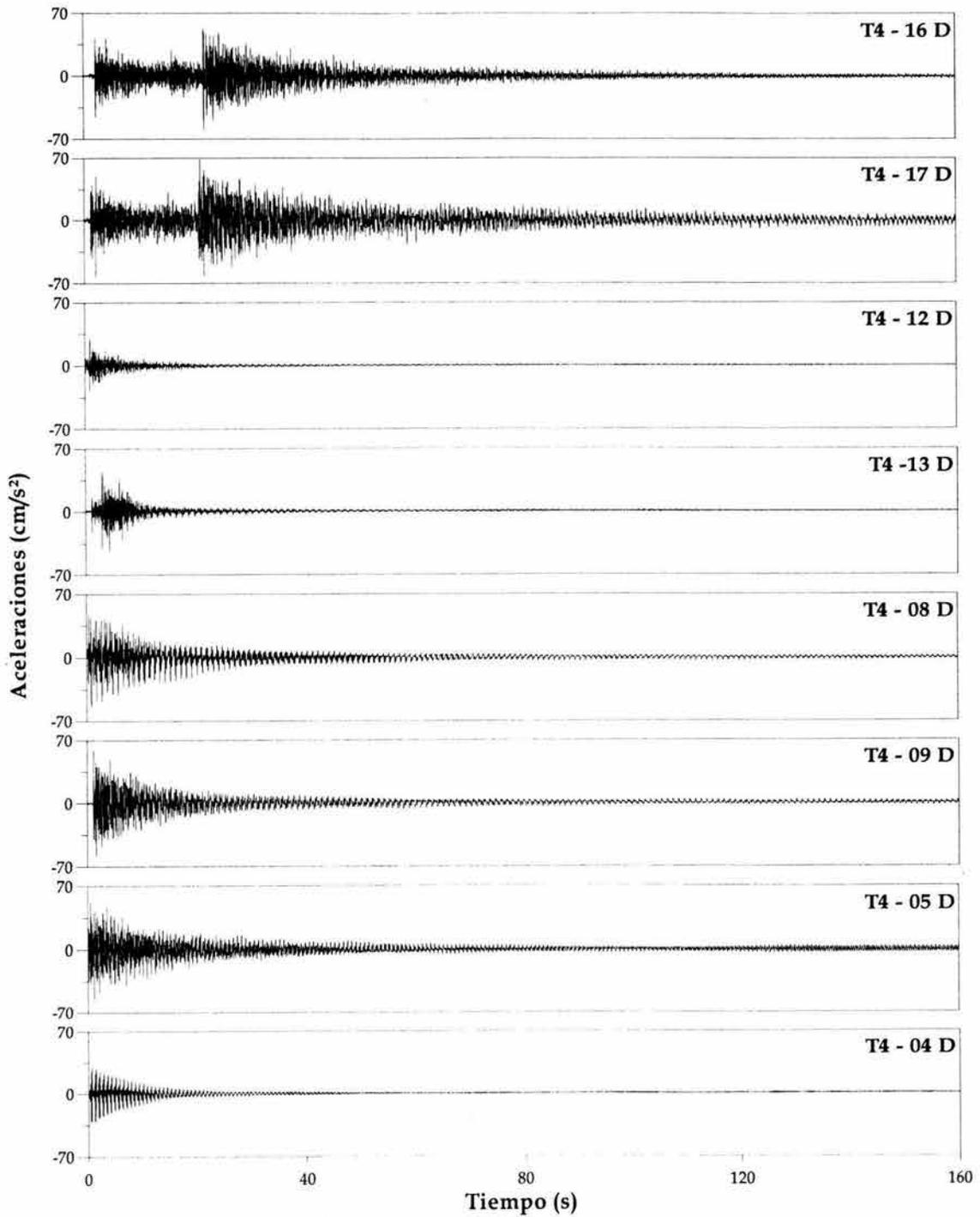


Fig L.1 Pruebas de vibración libre en la pila 14 del puente Coatzacoalcos II

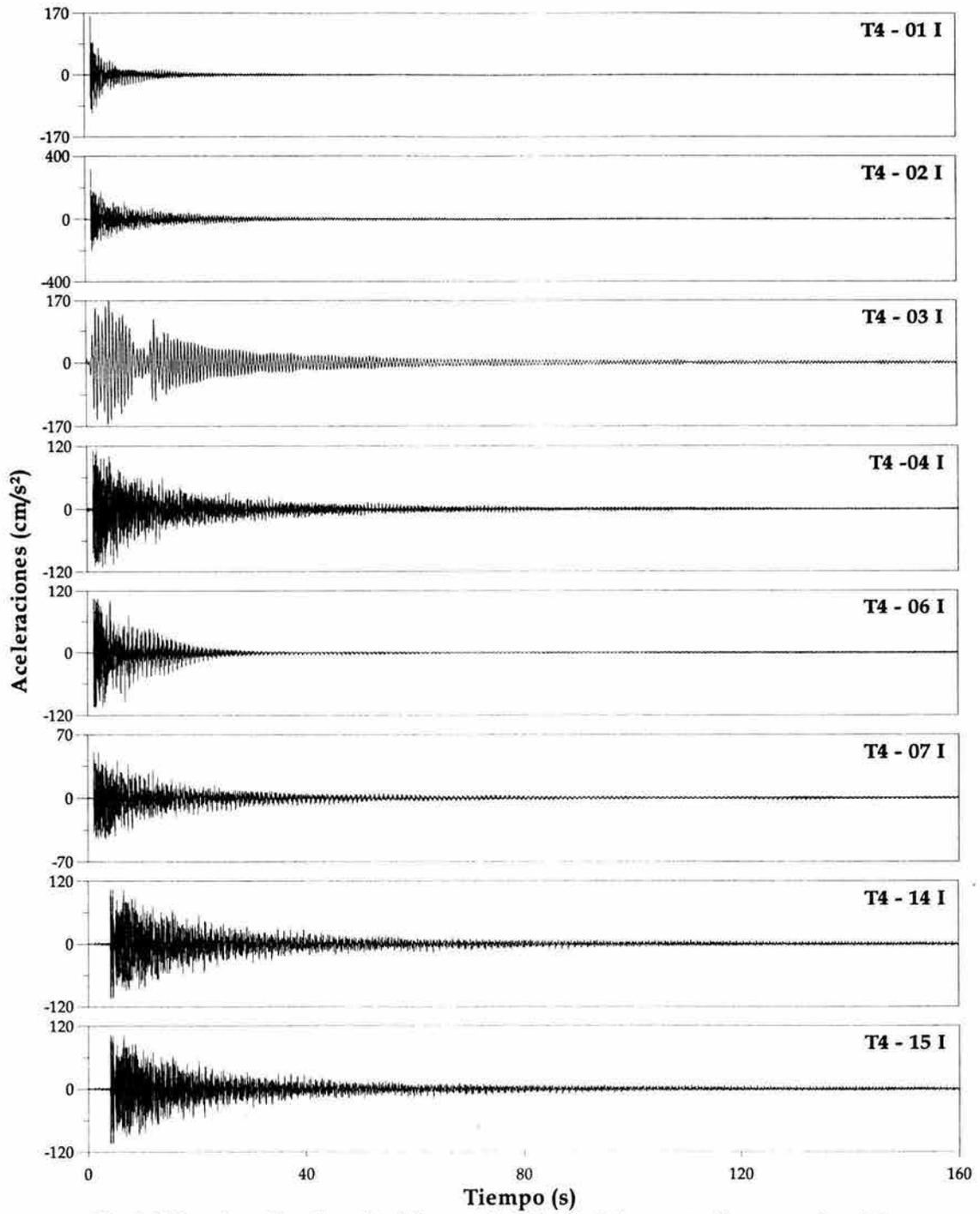


Fig L.2 Pruebas de vibración libre en la pila 14 del puente Coatzacoalcos II

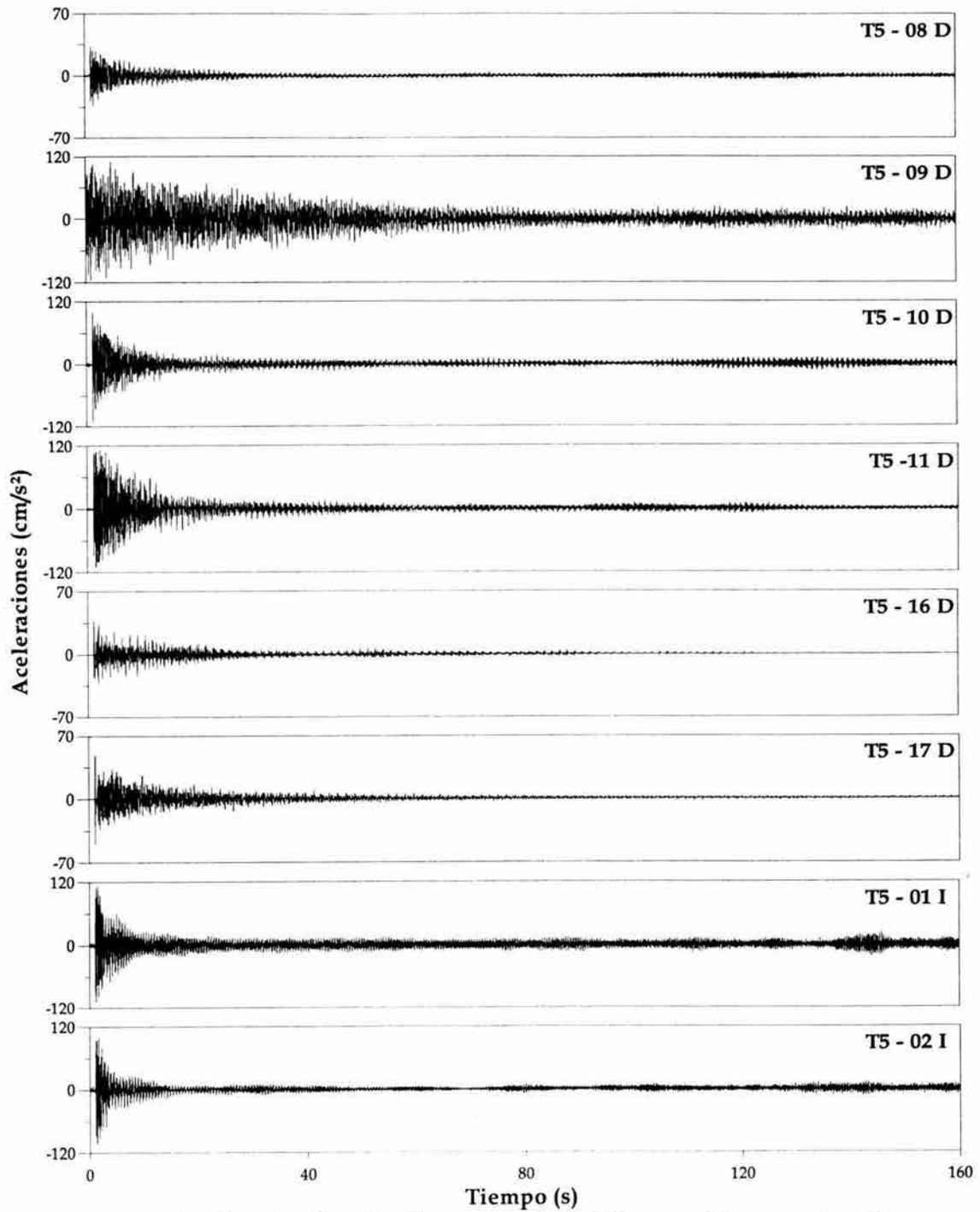


Fig L.3 Pruebas de vibración libre en la pila 15 del puente Coatzacoalcos II.

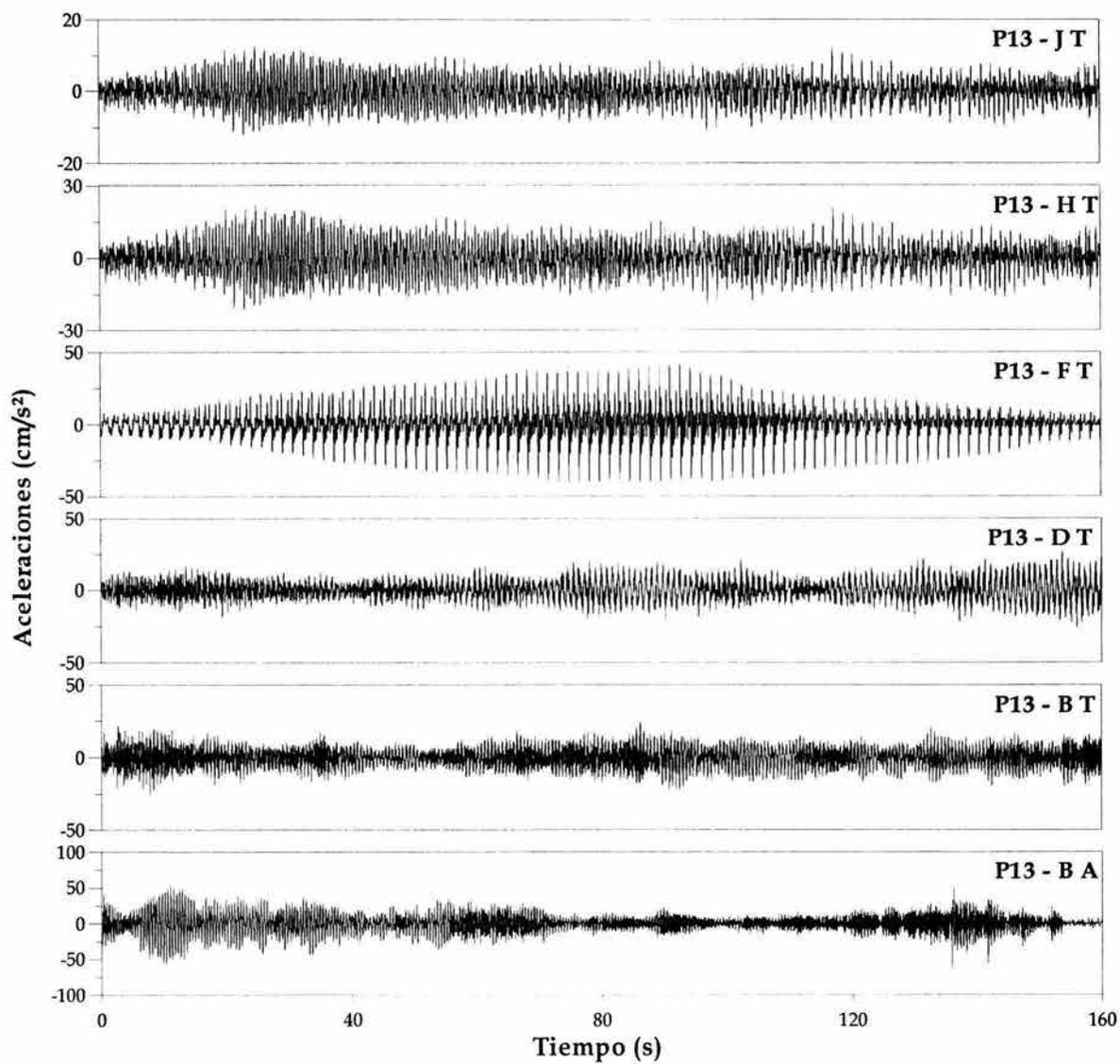


Fig L.4 Pruebas de vibración libre en la pila 13 del puente Tampico

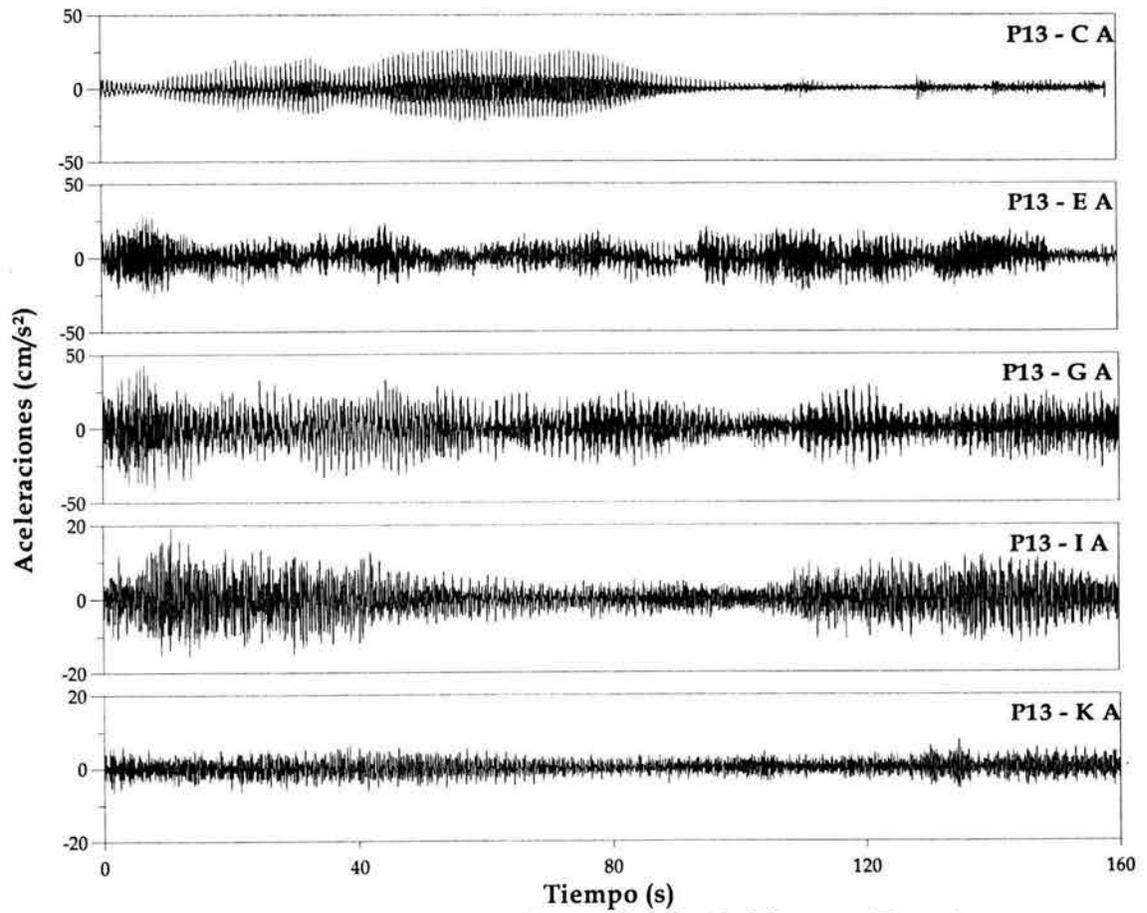


Fig L.5 Pruebas de vibración libre en la pila 13 del puente Tampico

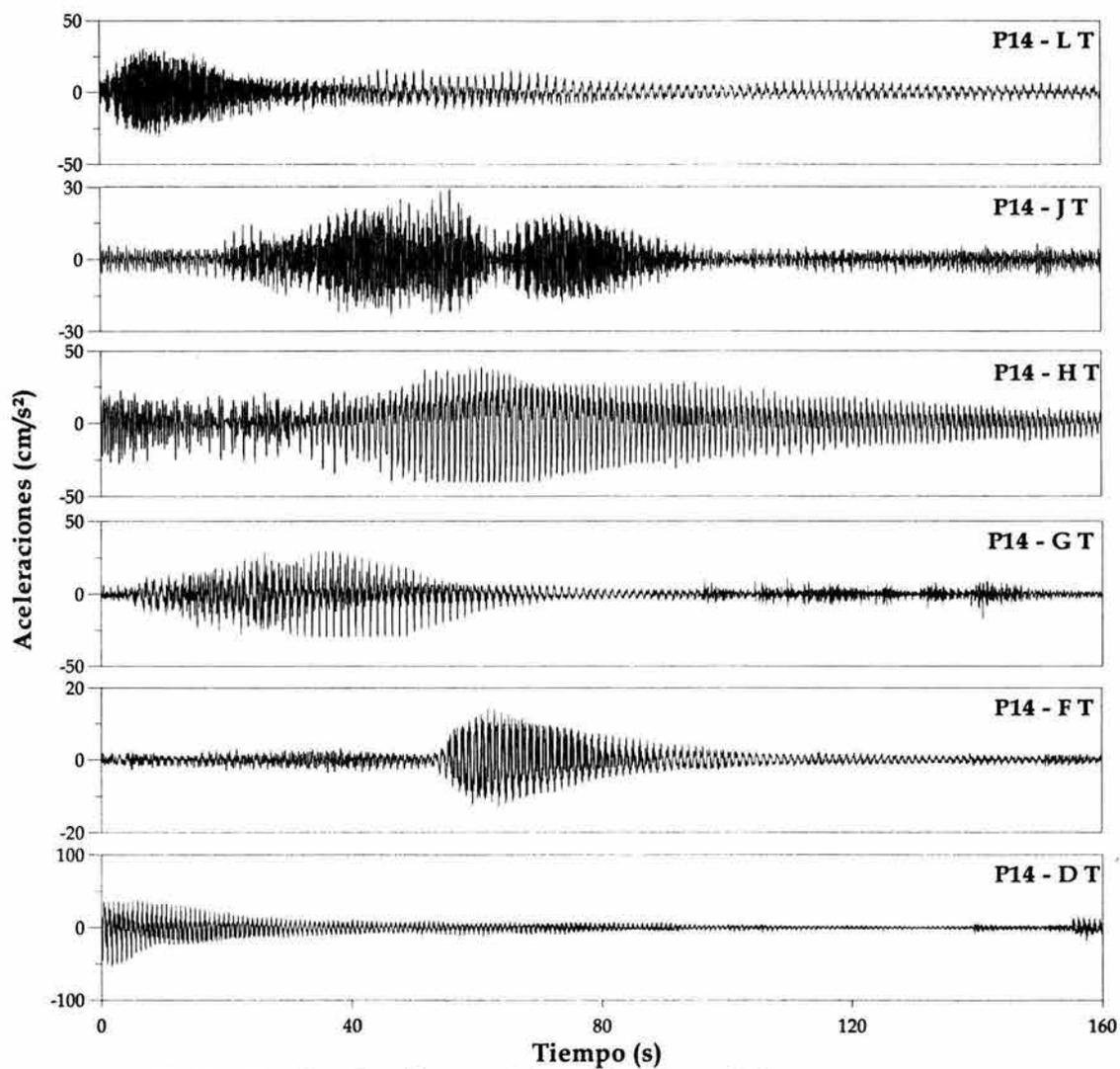


Fig L.6 Pruebas de vibración libre en la pila 14 del puente Tampico

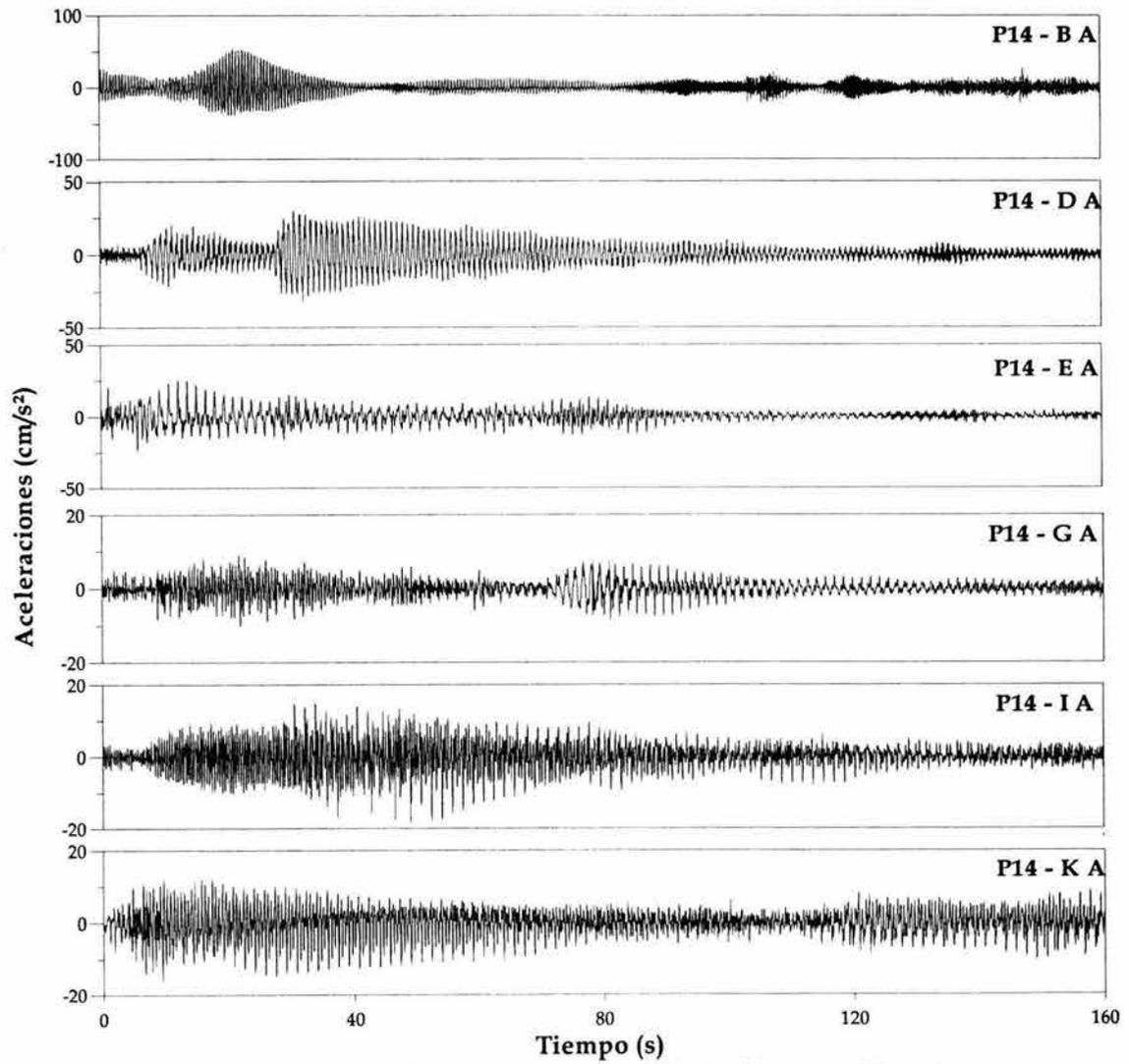


Fig L.7 Pruebas de vibración libre en la pila 14 del puente Tampico

Apéndice M



Espectros pruebas de vibración libre

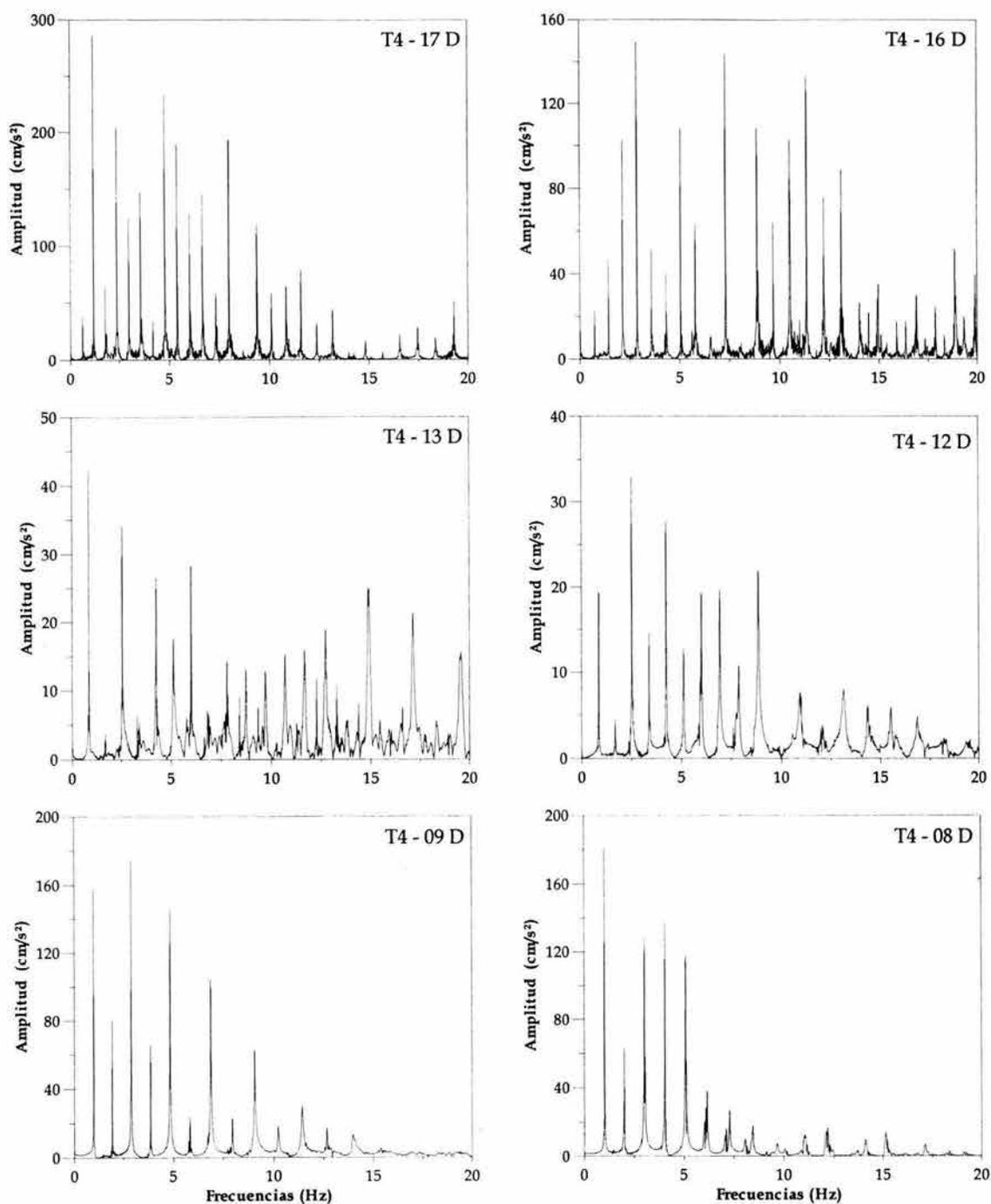


Fig M.1 Espectros de vibración libre pila 14, puente Coatzacoalcos II

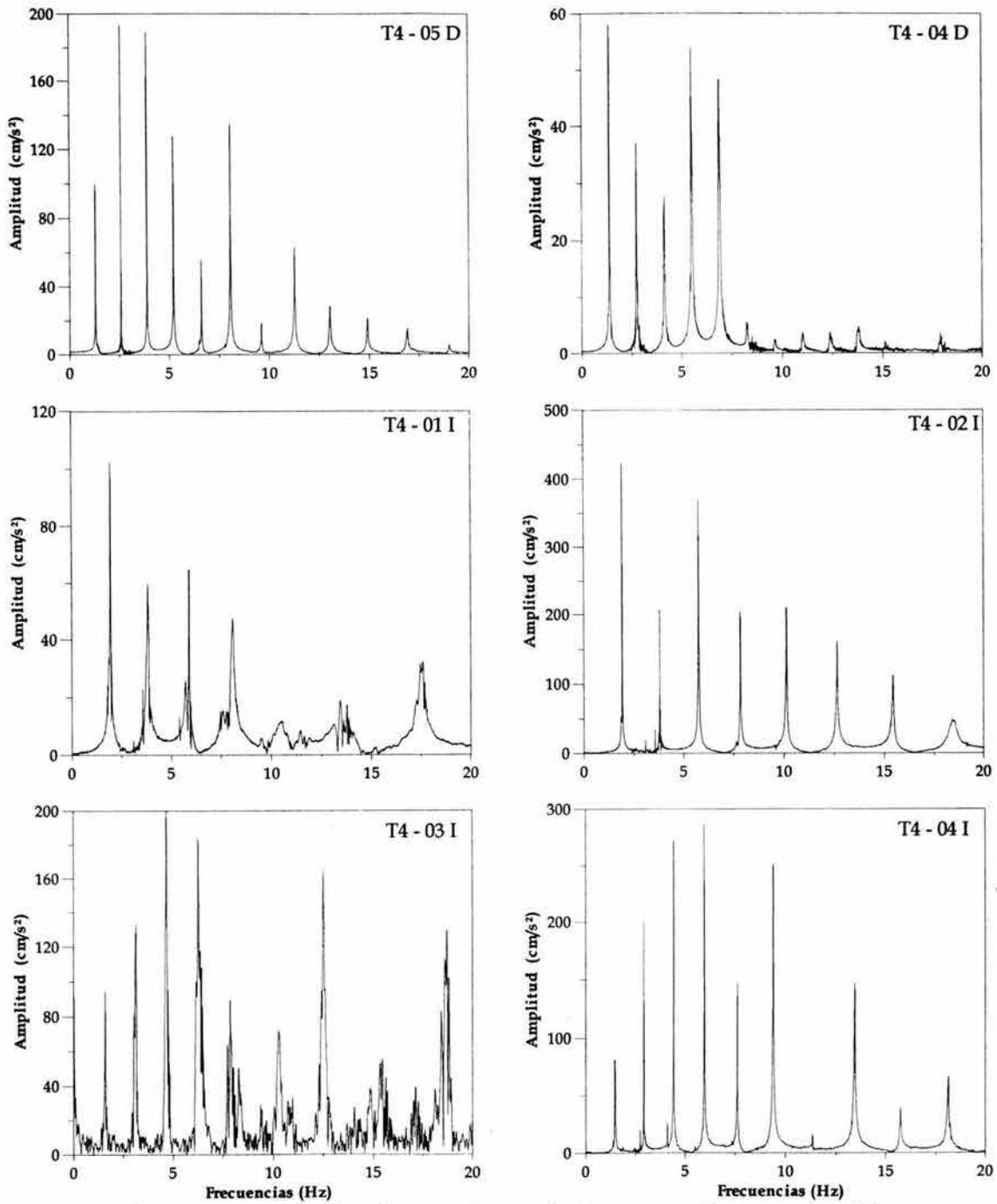


Fig M.2 Espectros de vibración libre pila 14, puente Coatzacoalcos II

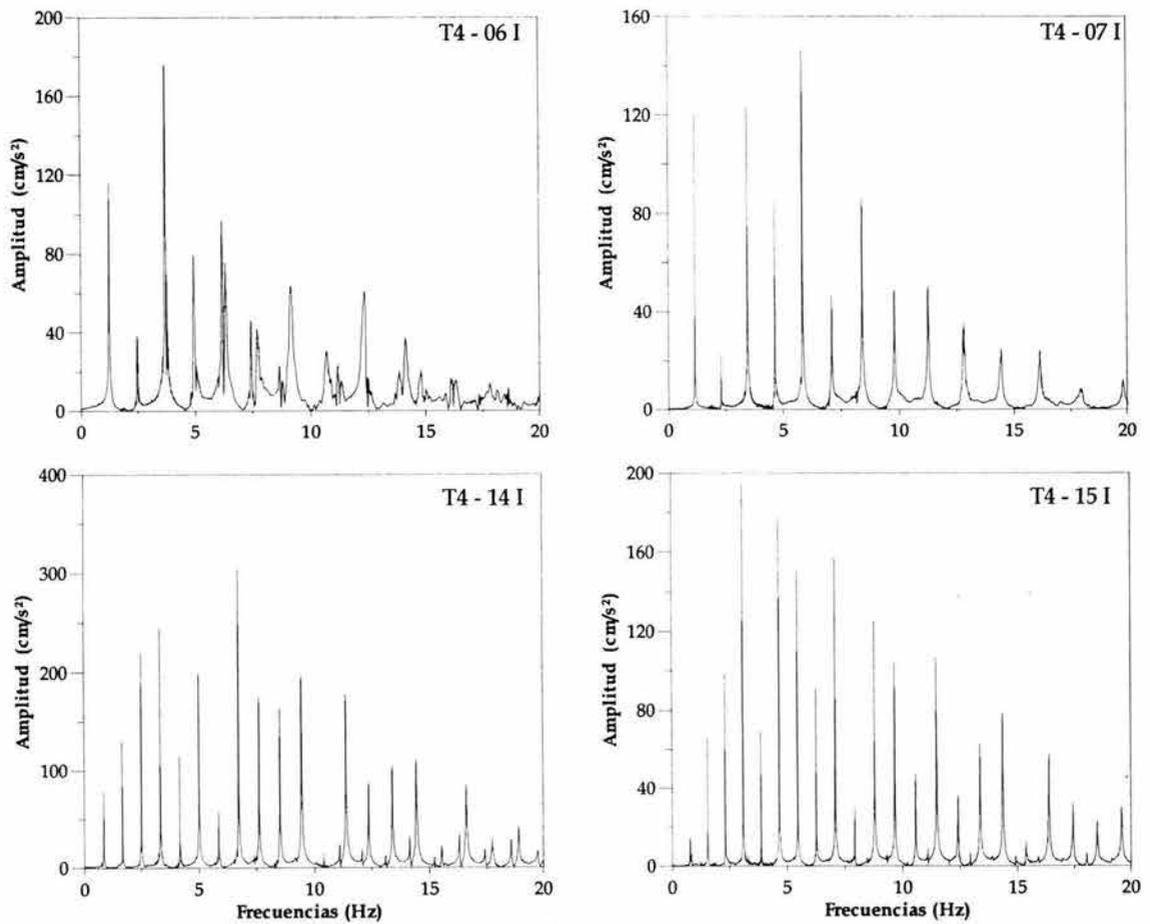


Fig M.3 Espectros de vibración libre pila 14, puente Coatzacoalcos II

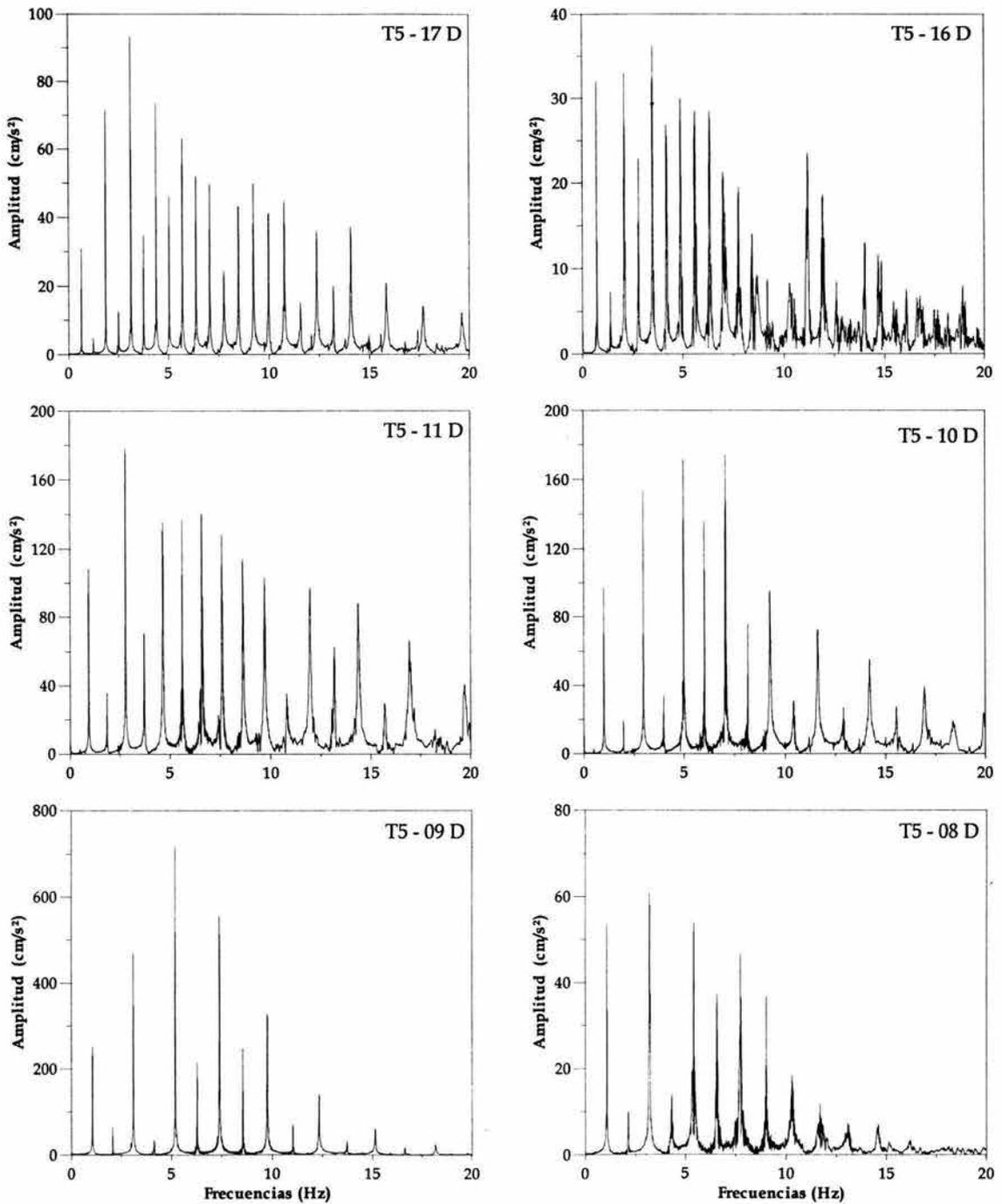


Fig M.4 Espectros de vibración libre pila 15, puente Coatzacoalcos II

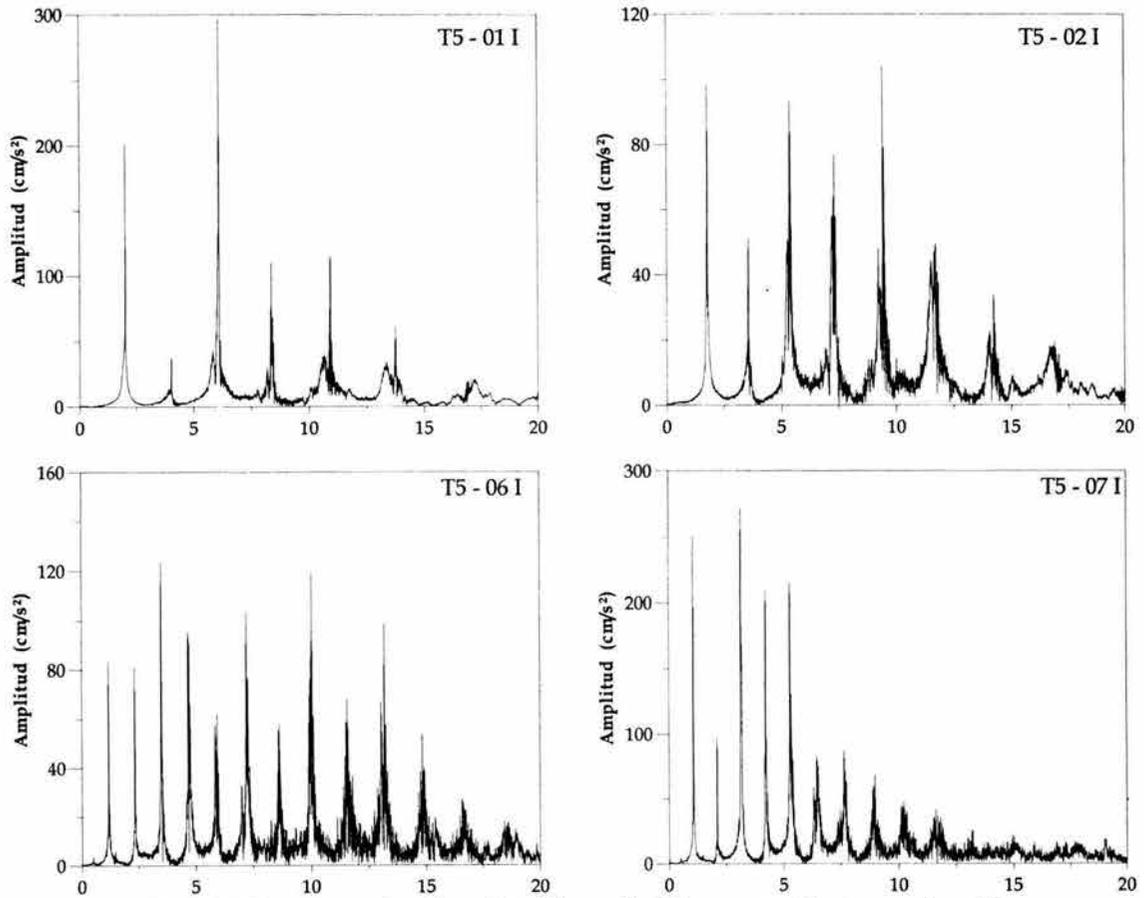


Fig M.5 Espectros de vibración libre pila 15, puente Coatzacoalcos II

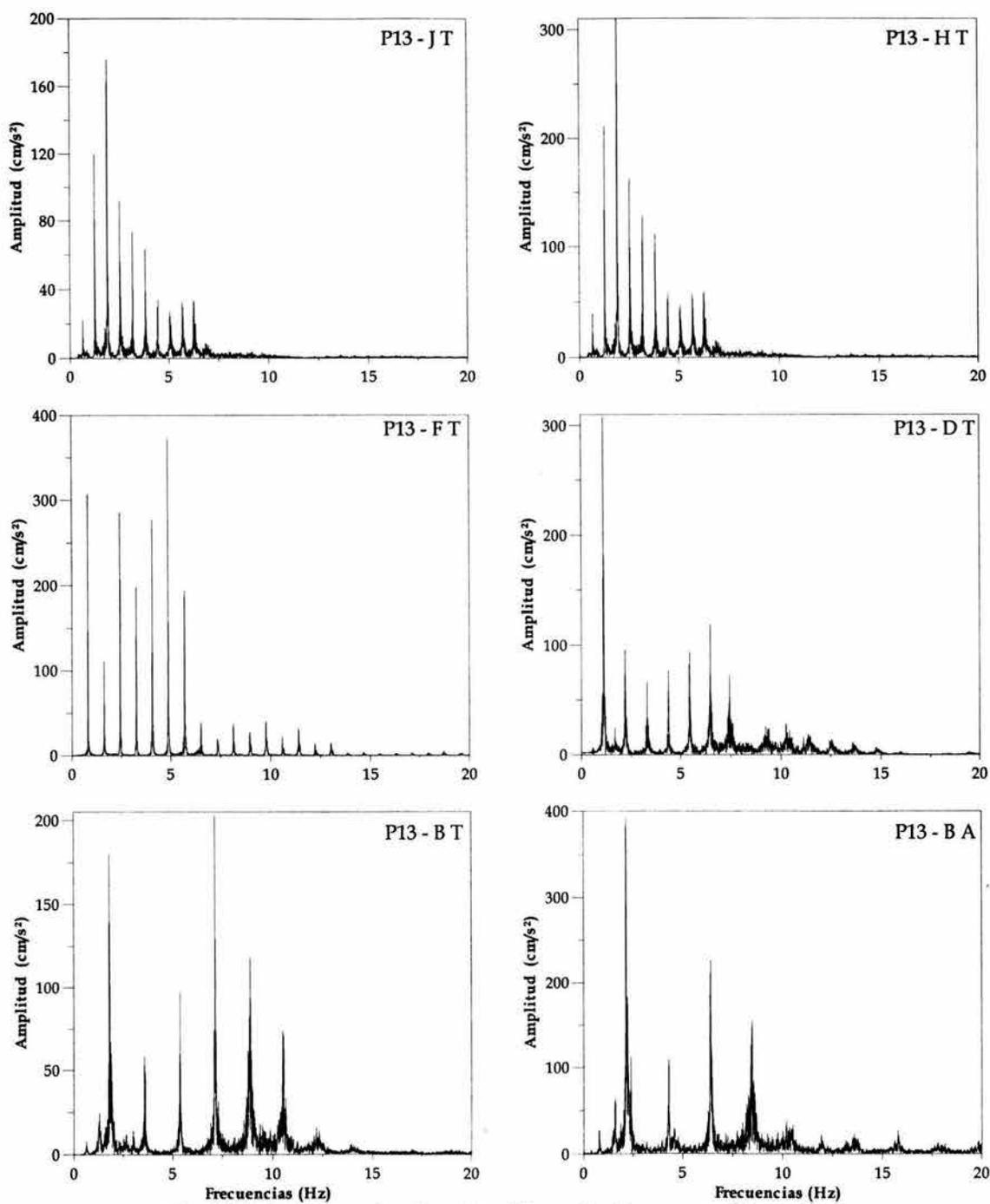


Fig M.6 Espectros de vibración libre pila 13, puente Tampico

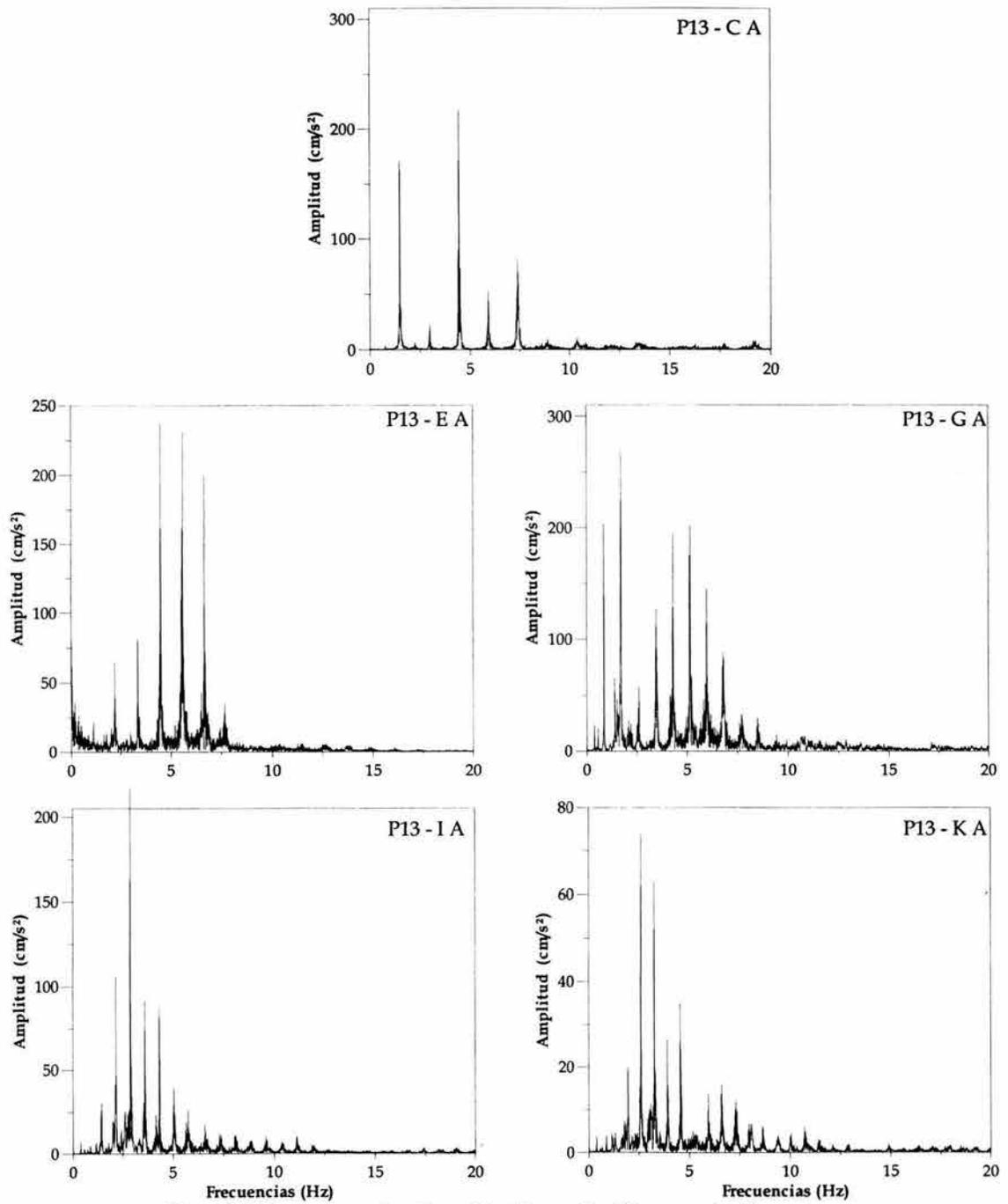


Fig M.7 Espectros de vibración libre pila 13, puente Tampico

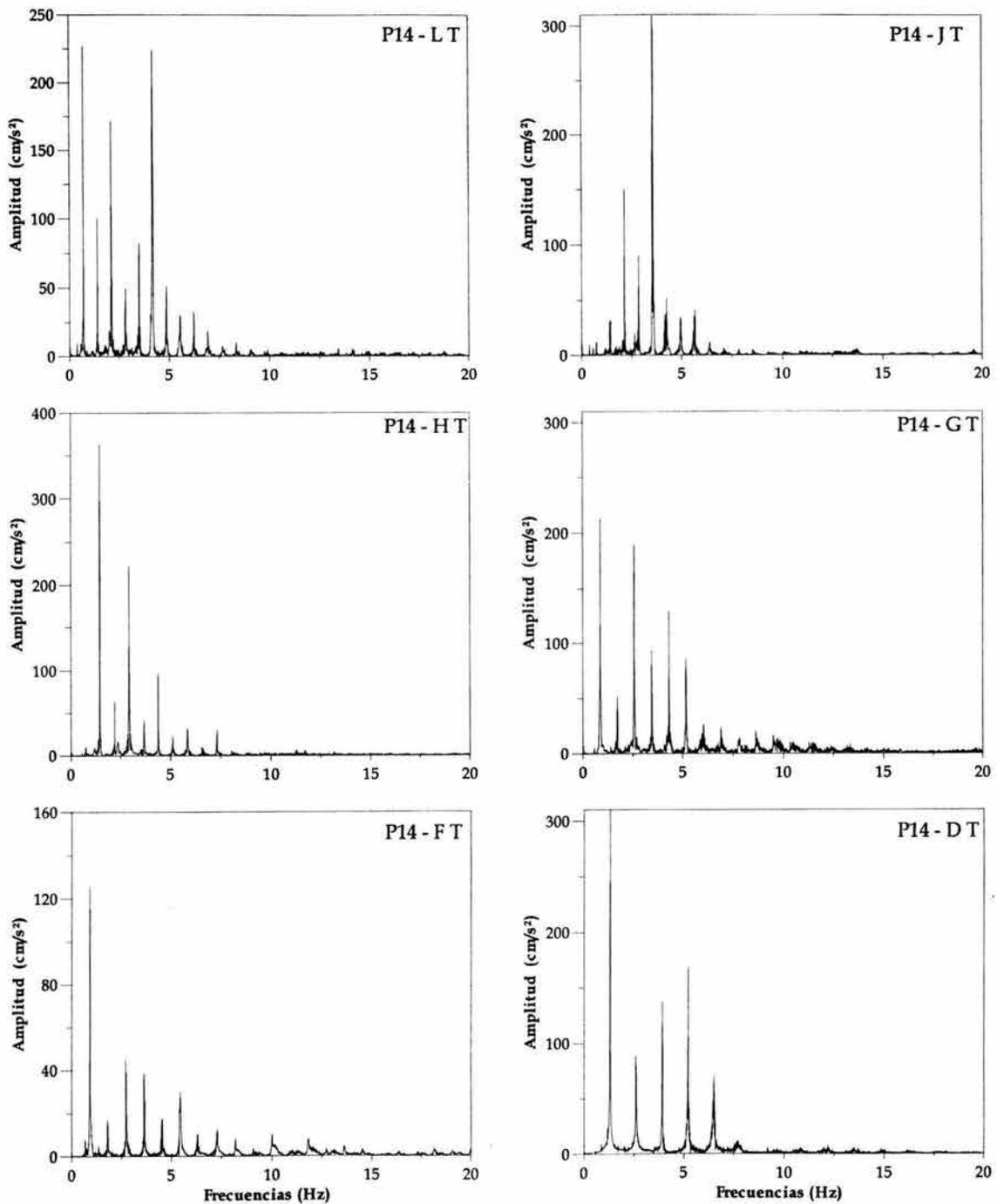


Fig M.8 Espectros de vibración libre pila 14, puente Tampico

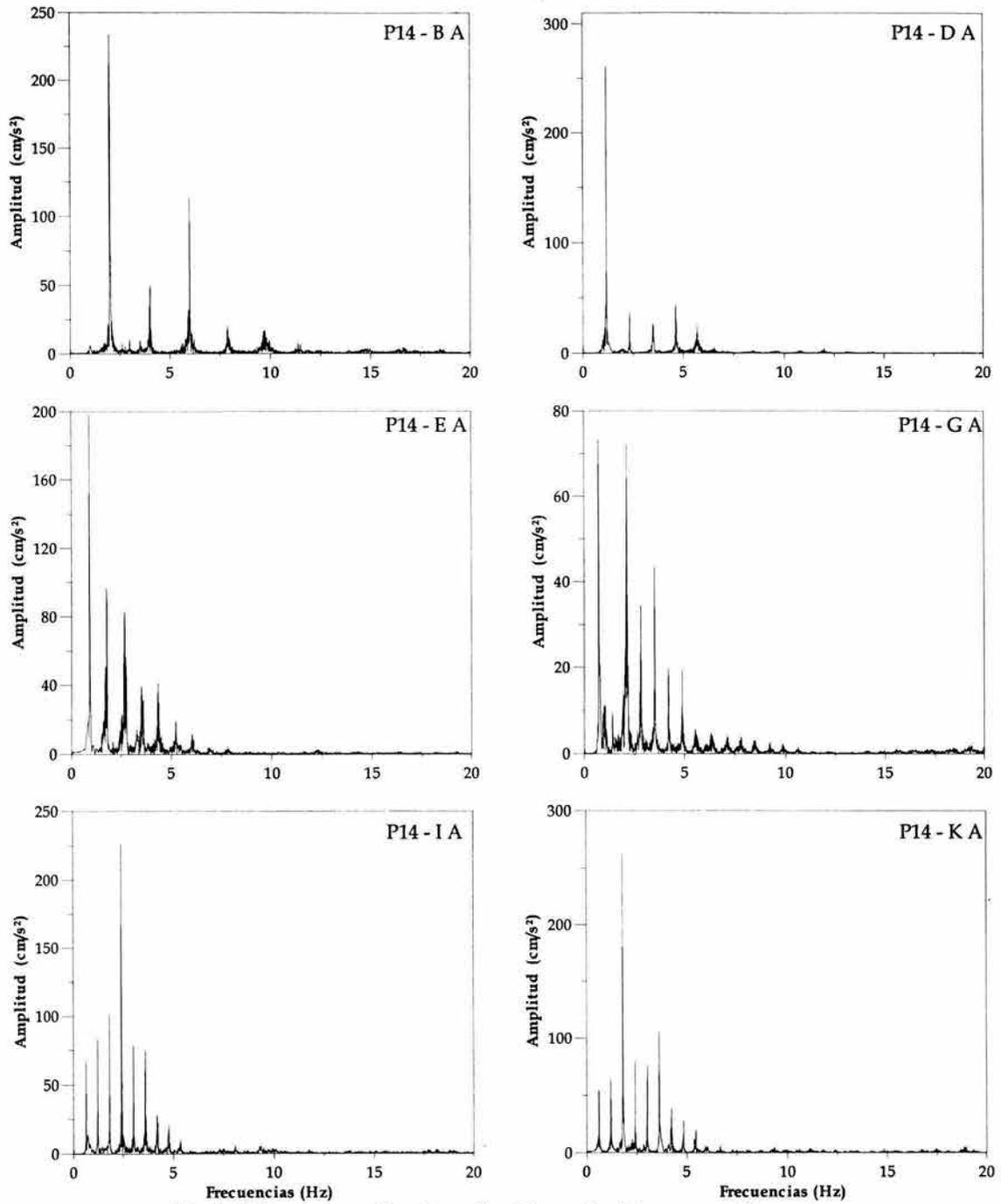


Fig M.9 Espectros de vibración libre pila 14, puente Tampico

Apéndice N



Espectros pruebas de vibración
ambiental

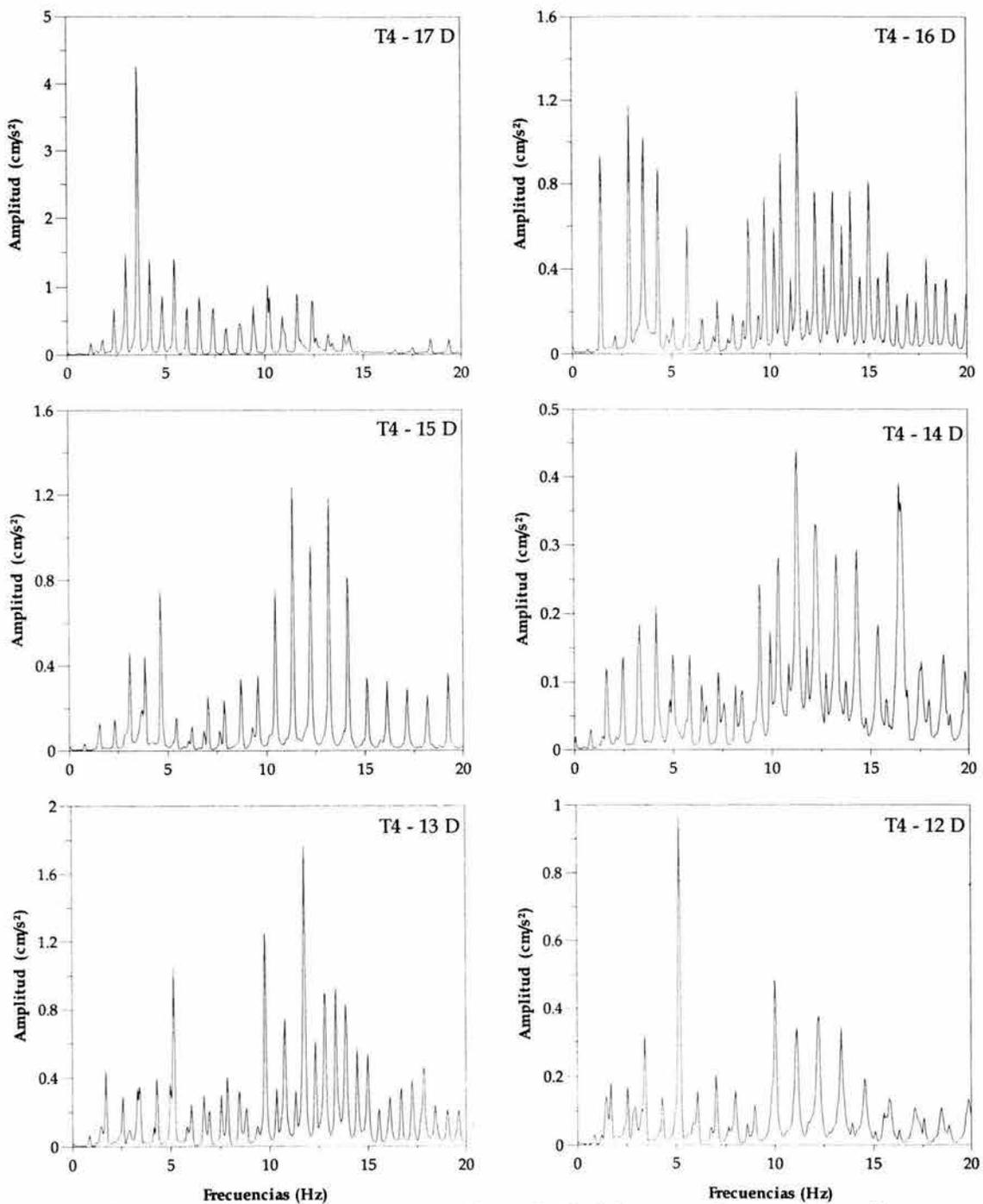


Fig N.1 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Coatzacoalcos II

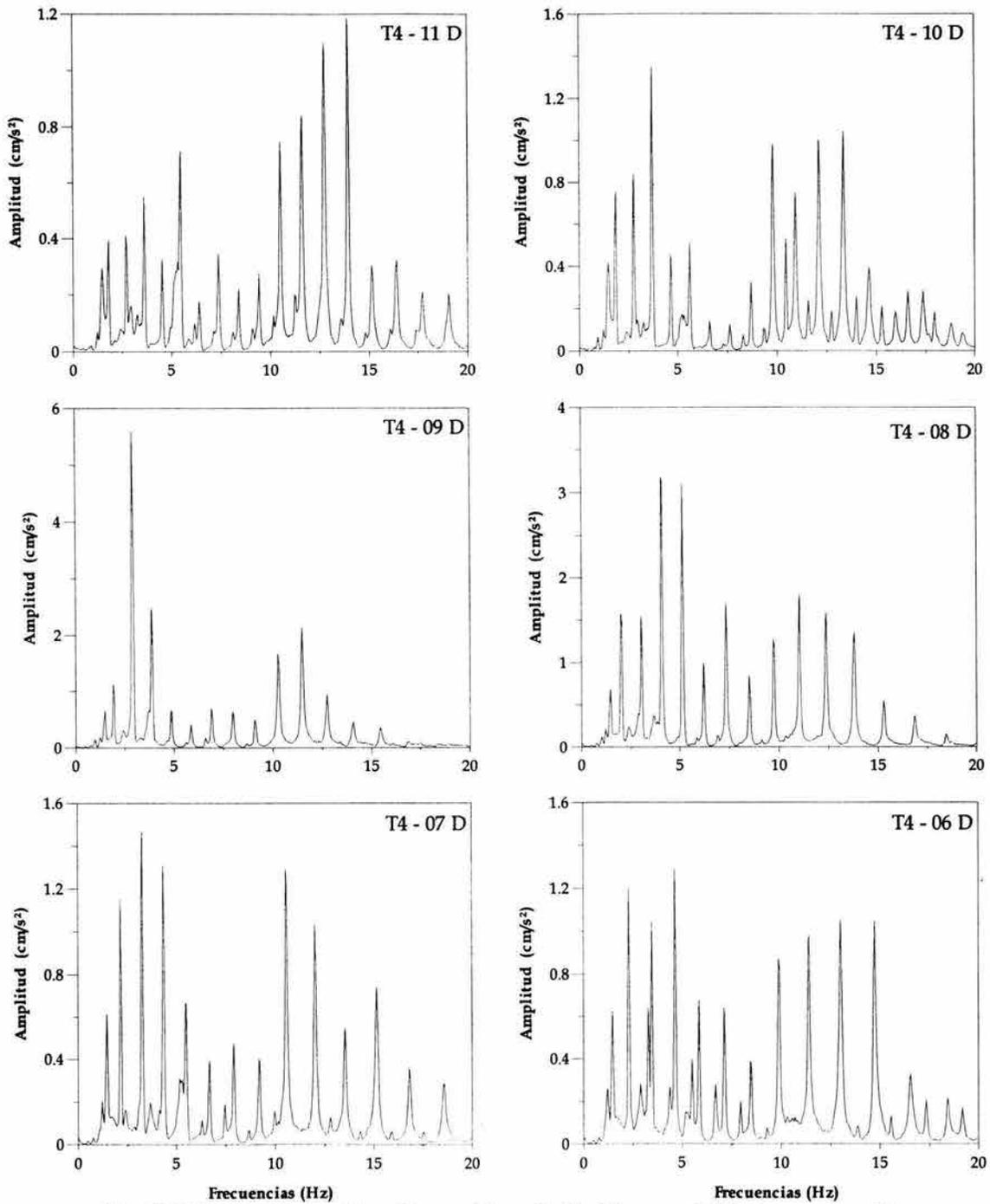


Fig N.2 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Coatzacoalcos II

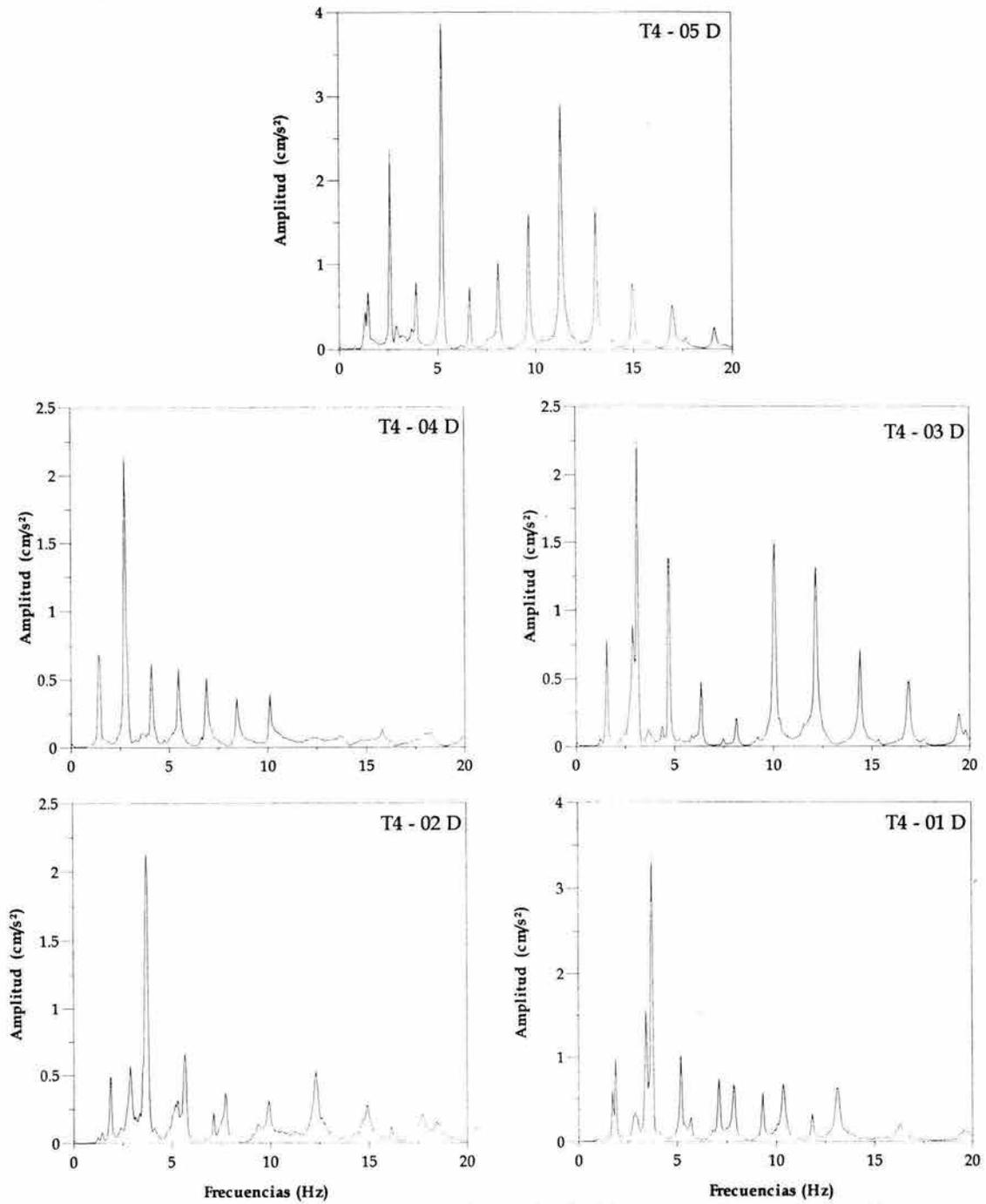


Fig N.3 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Coatzacoalcos II

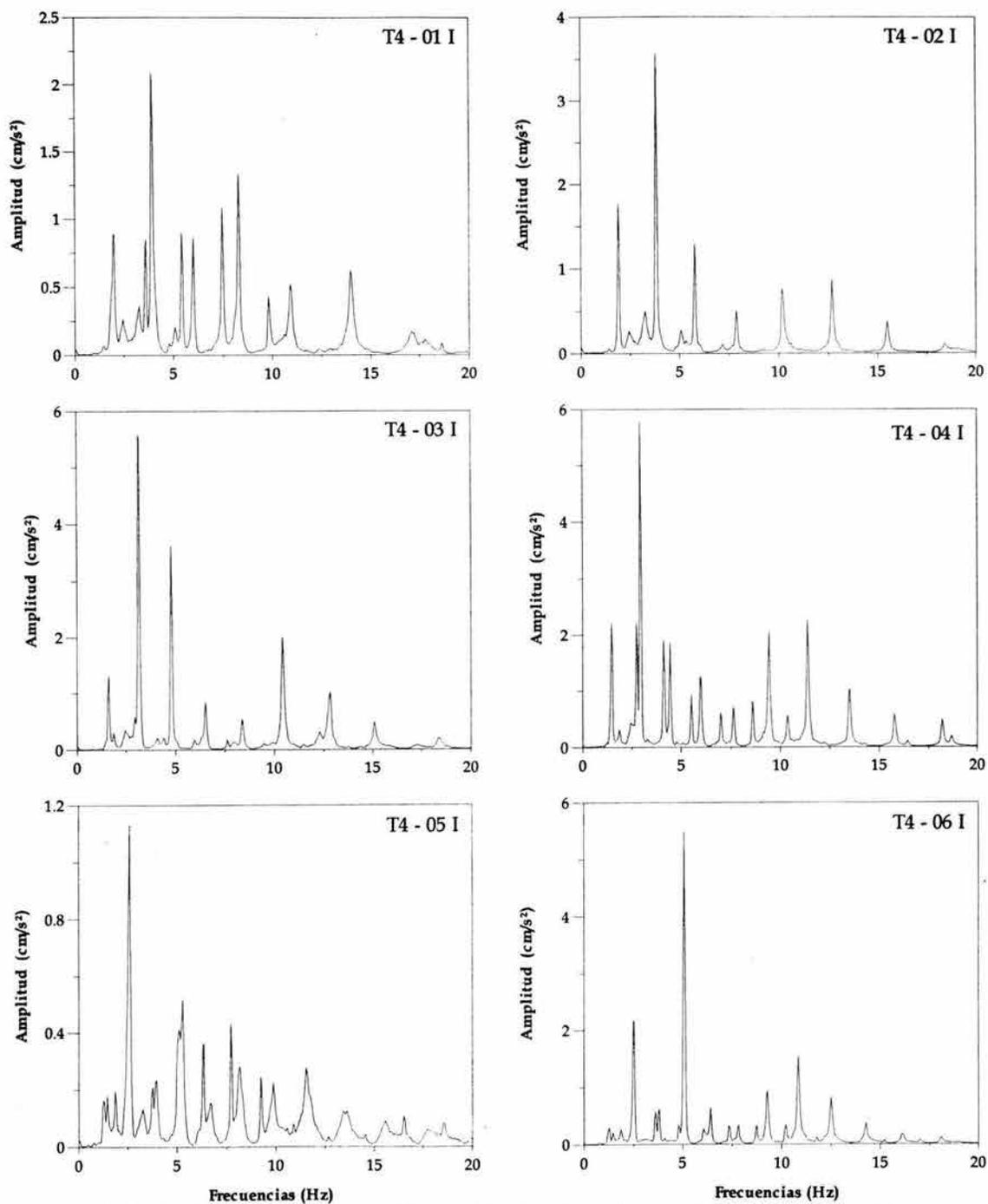


Fig N.4 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Coatzacoalcos II

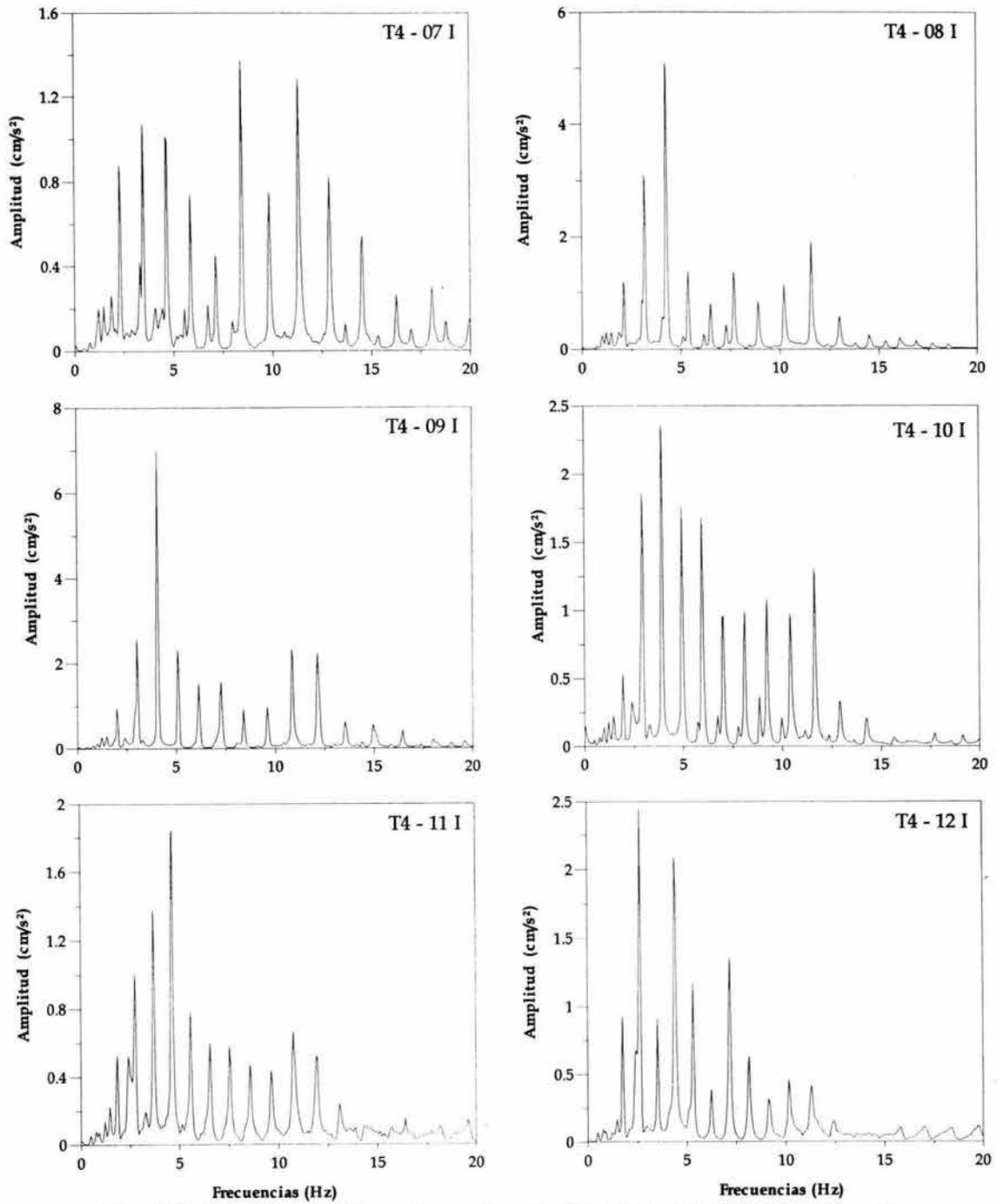


Fig N.5 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Coatzacoalcos II

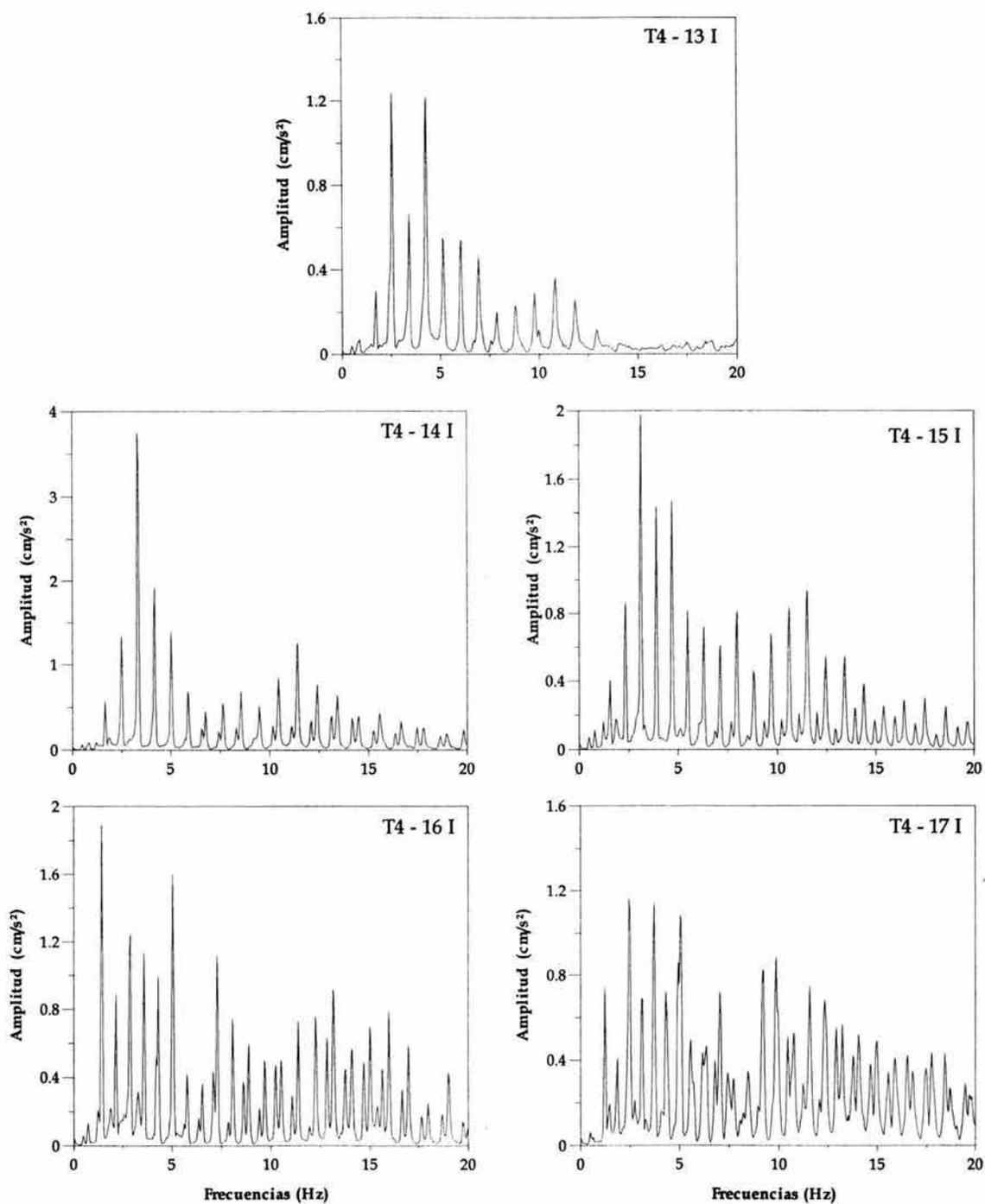


Fig N.6 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Coatzacoalcos II

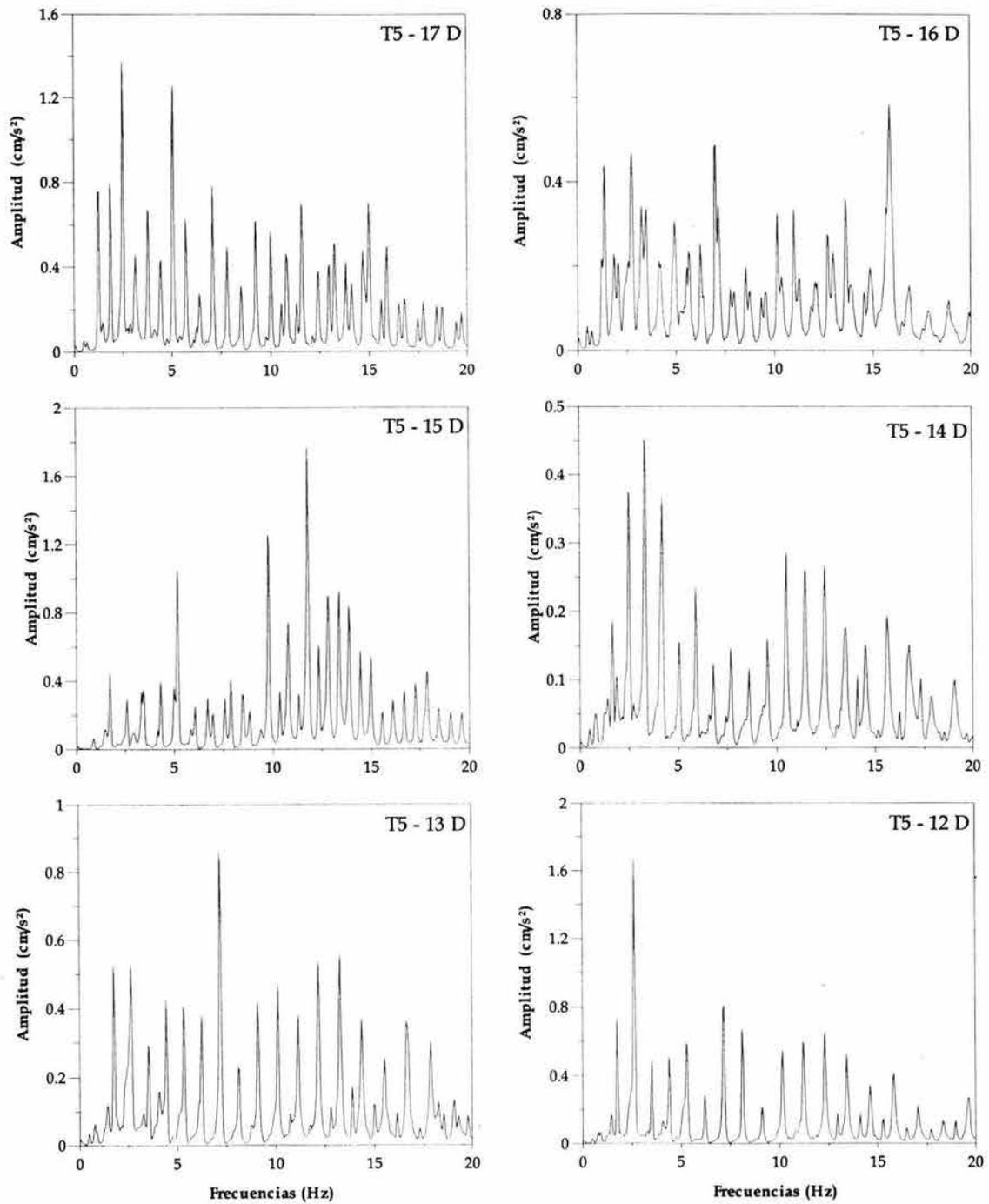


Fig N.7 Espectros de vibración ambiental pila 15, puente Coatzacoalcos II

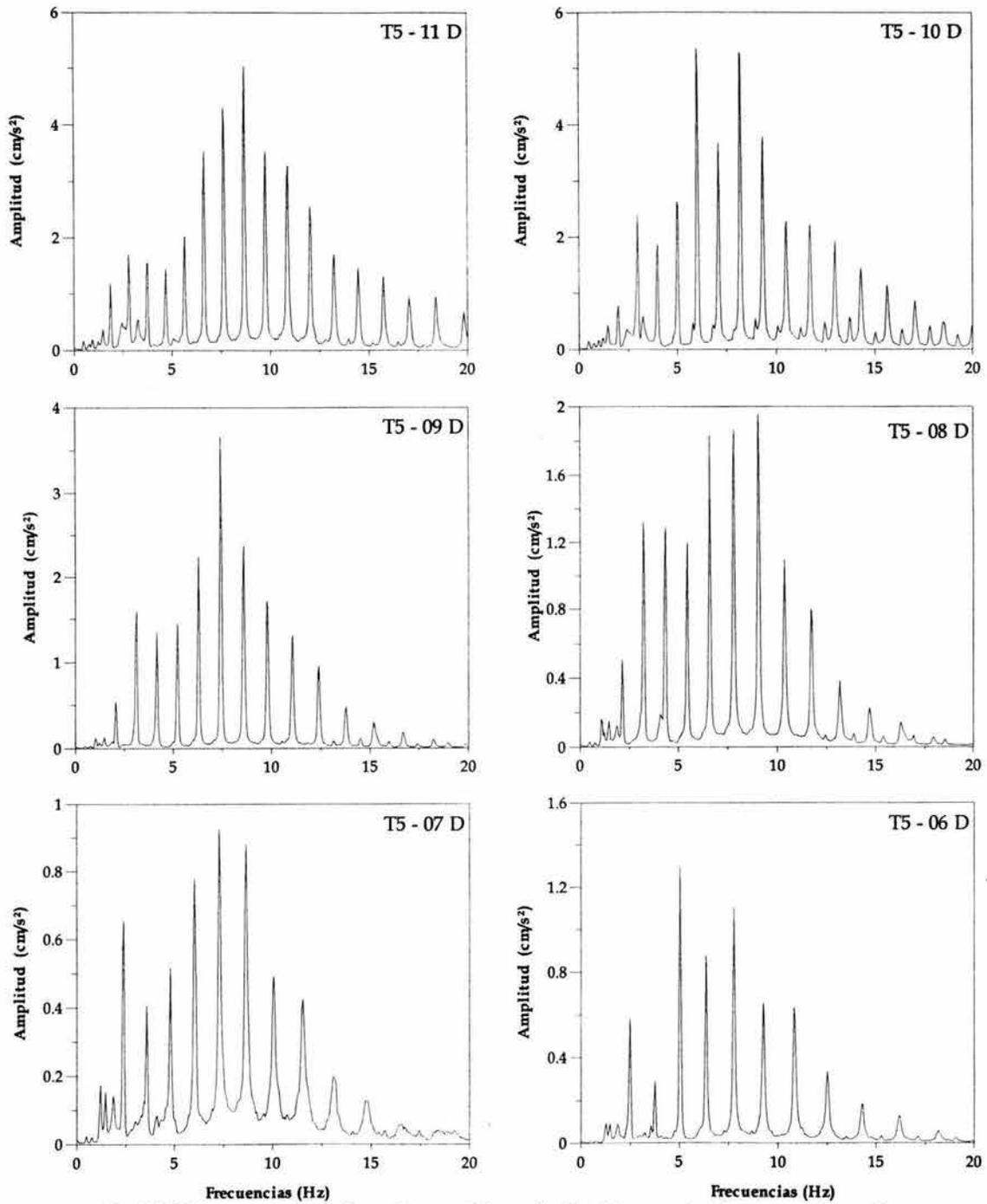


Fig N.8 Espectros de vibración ambiental pila 15, puente Coatzacoalcos II

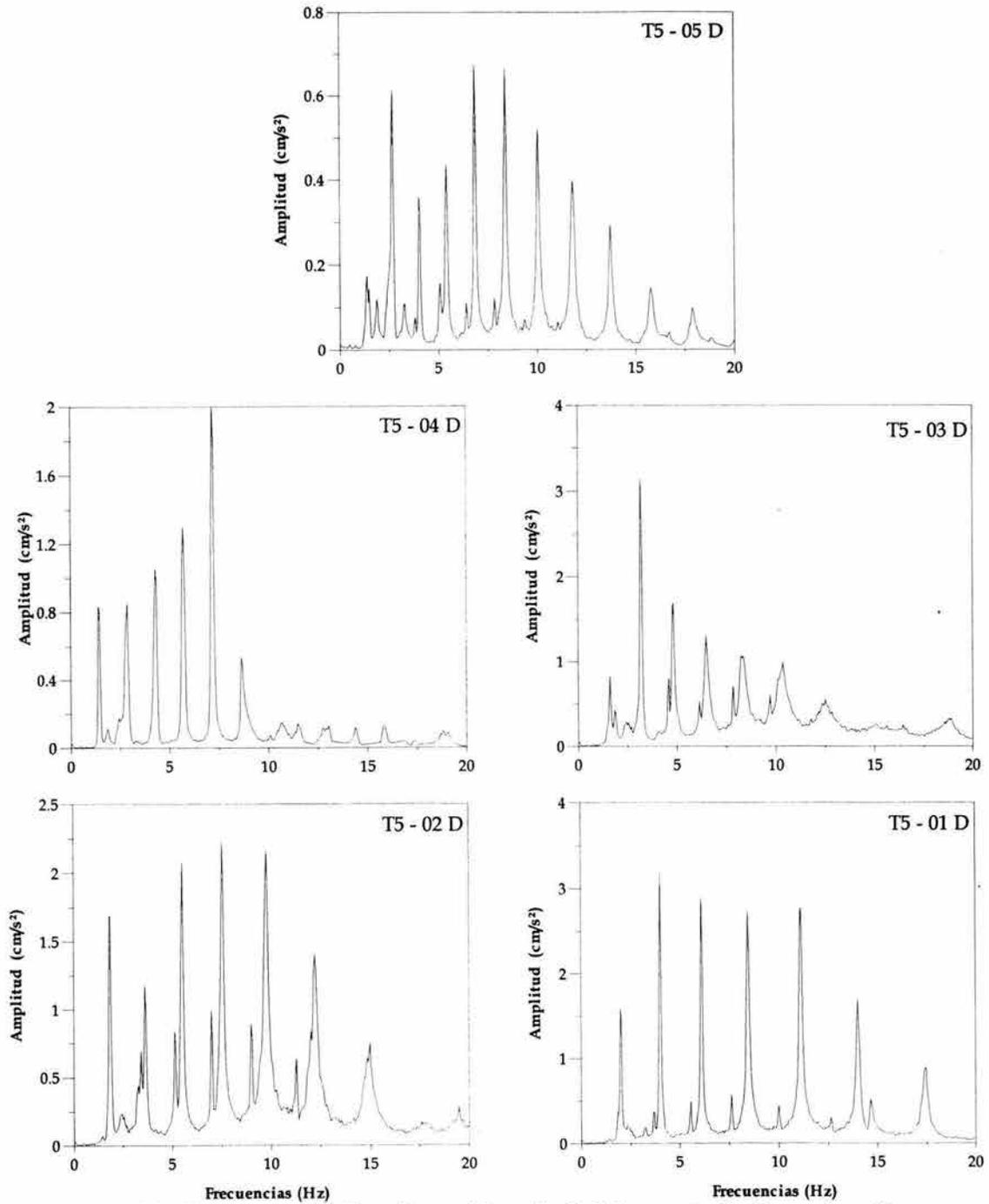


Fig N.9 Espectros de vibración ambiental pila 15, puente Coatzacoalcos II

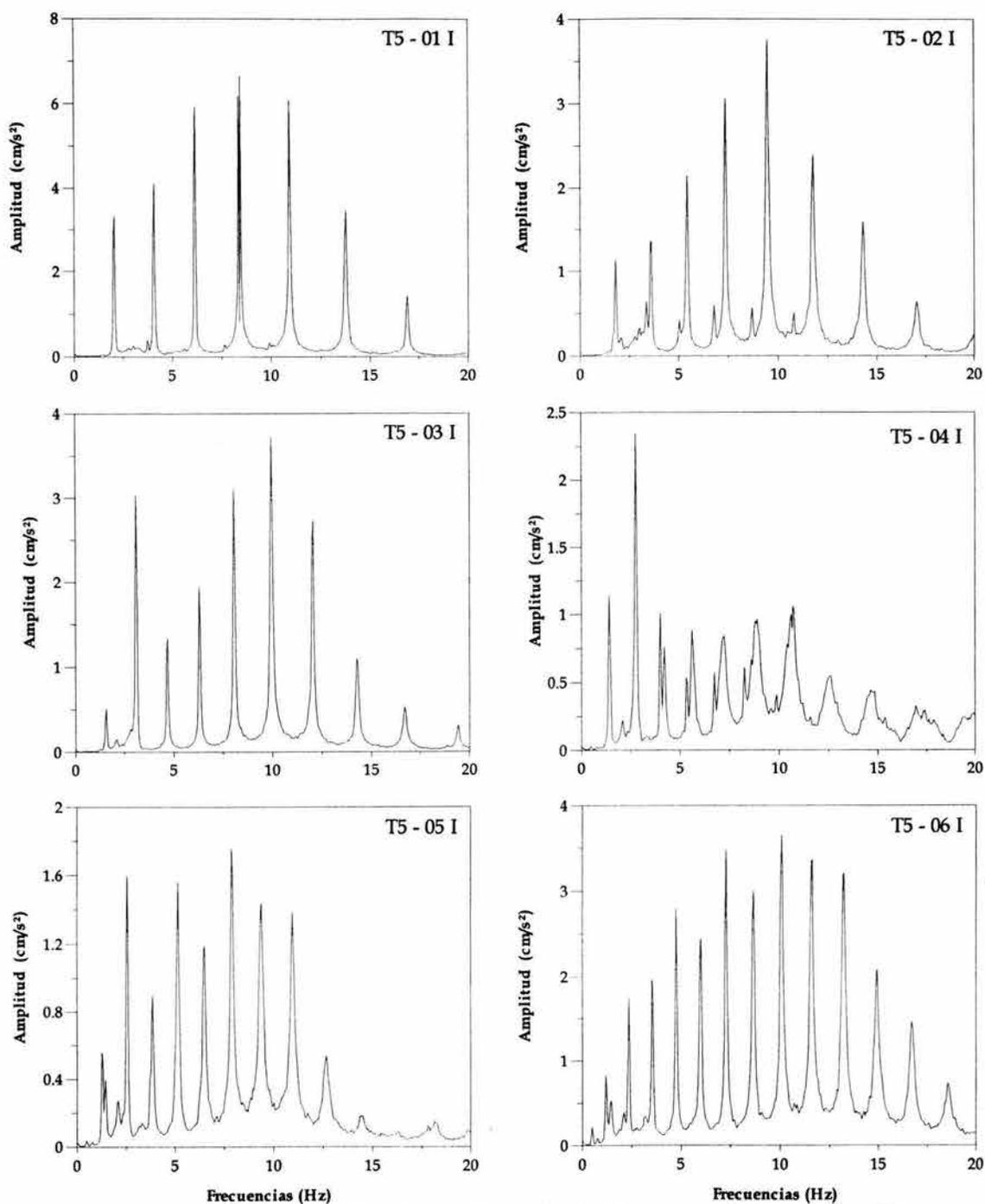


Fig N.10 Espectros de vibración ambiental pila 15, puente Coatzacoalcos II

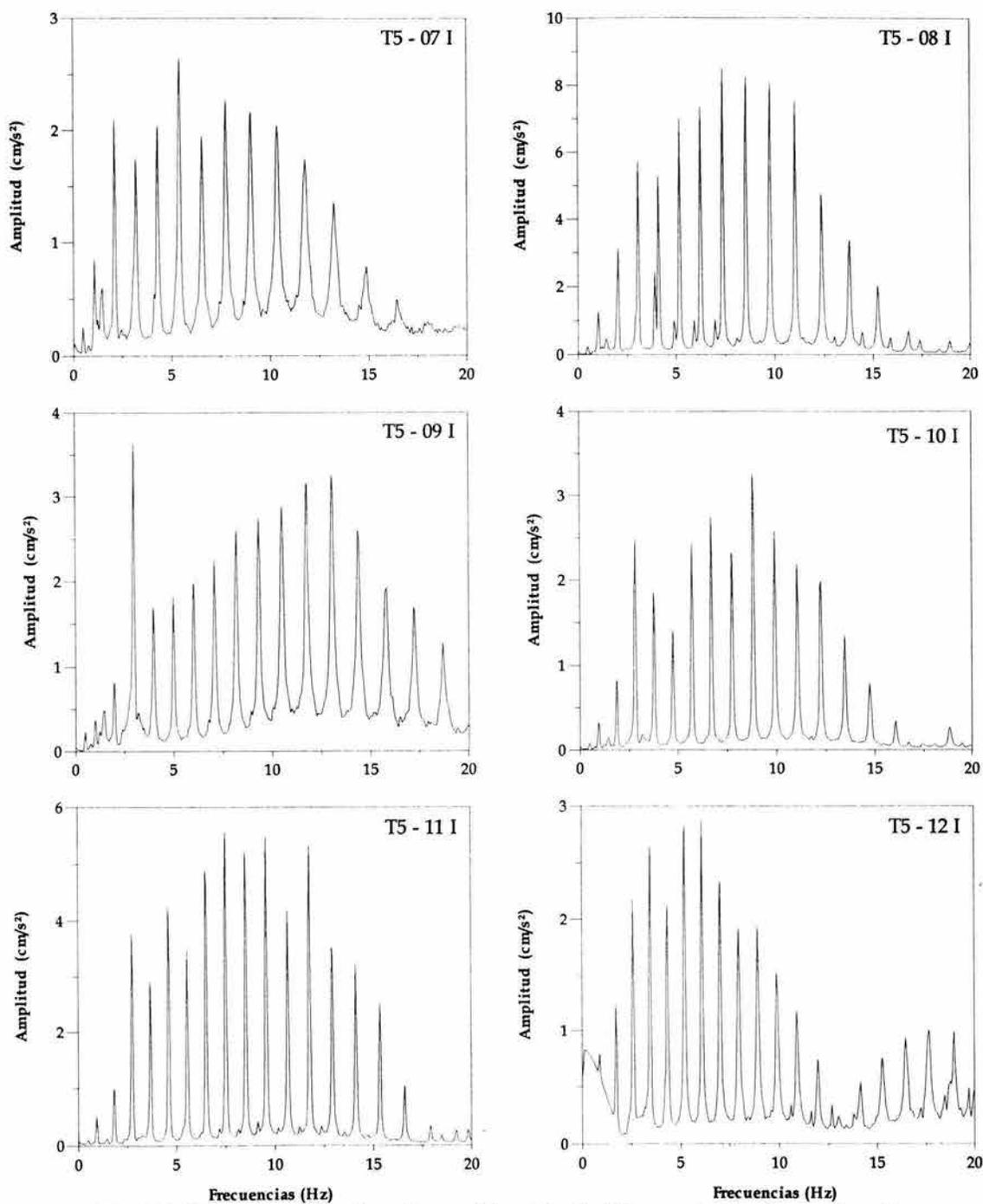


Fig N.11 Espectros de vibración ambiental pila 15, puente Coatzacoalcos II

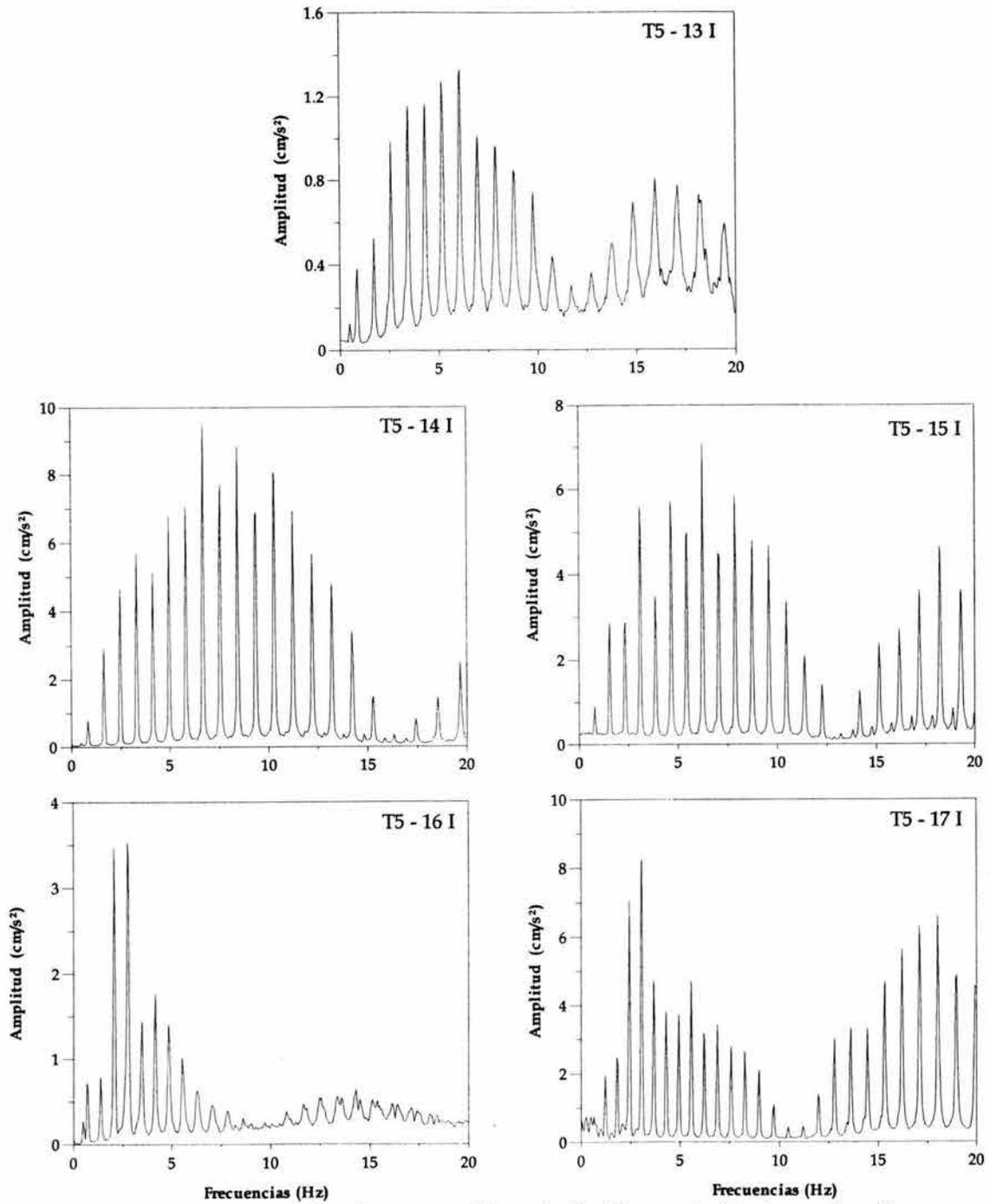


Fig N.12 Espectros de vibración ambiental pila 15, puente Coatzacoalcos II

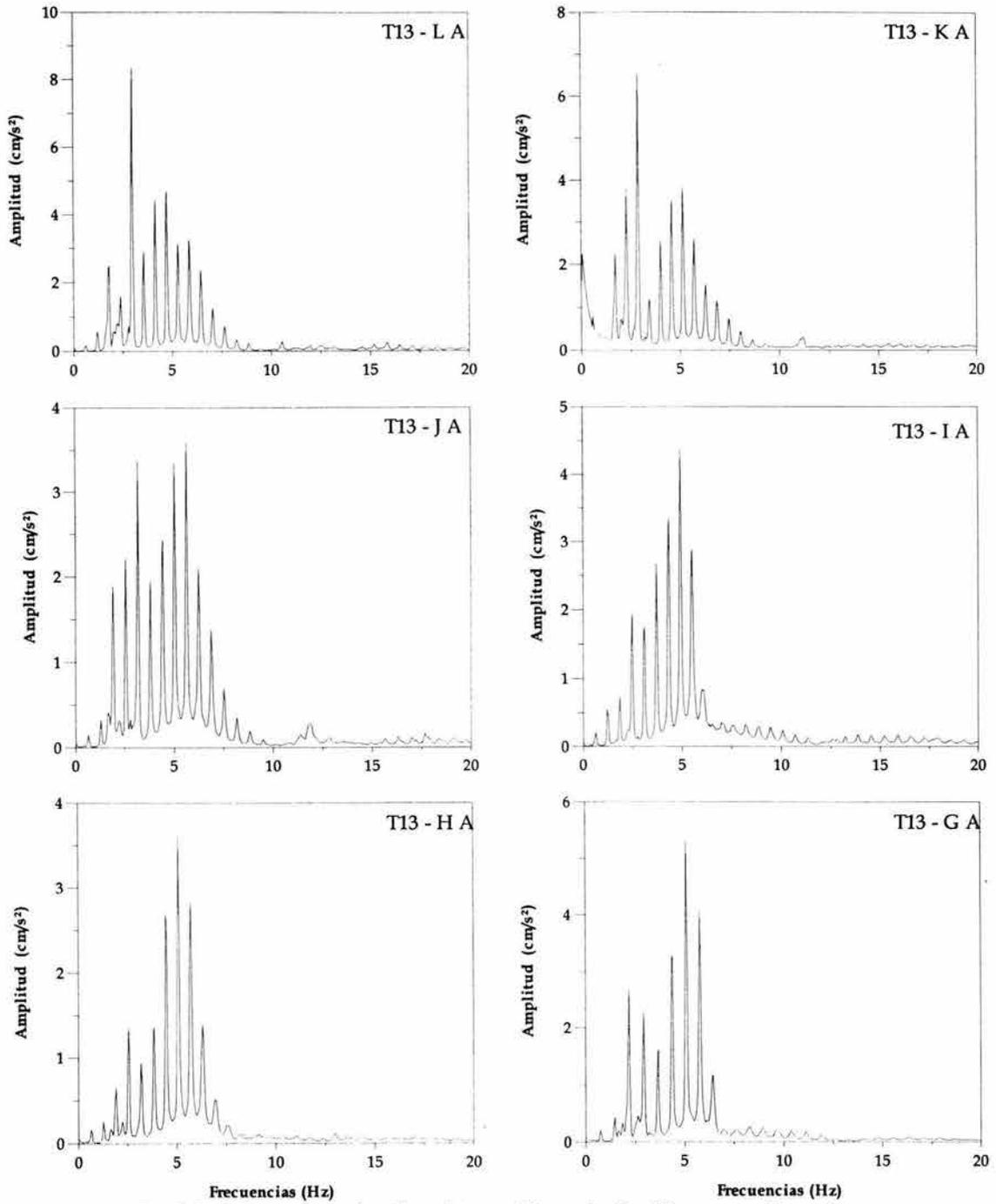


Fig N.13 Espectros de vibración ambiental pila 13, puente Tampico

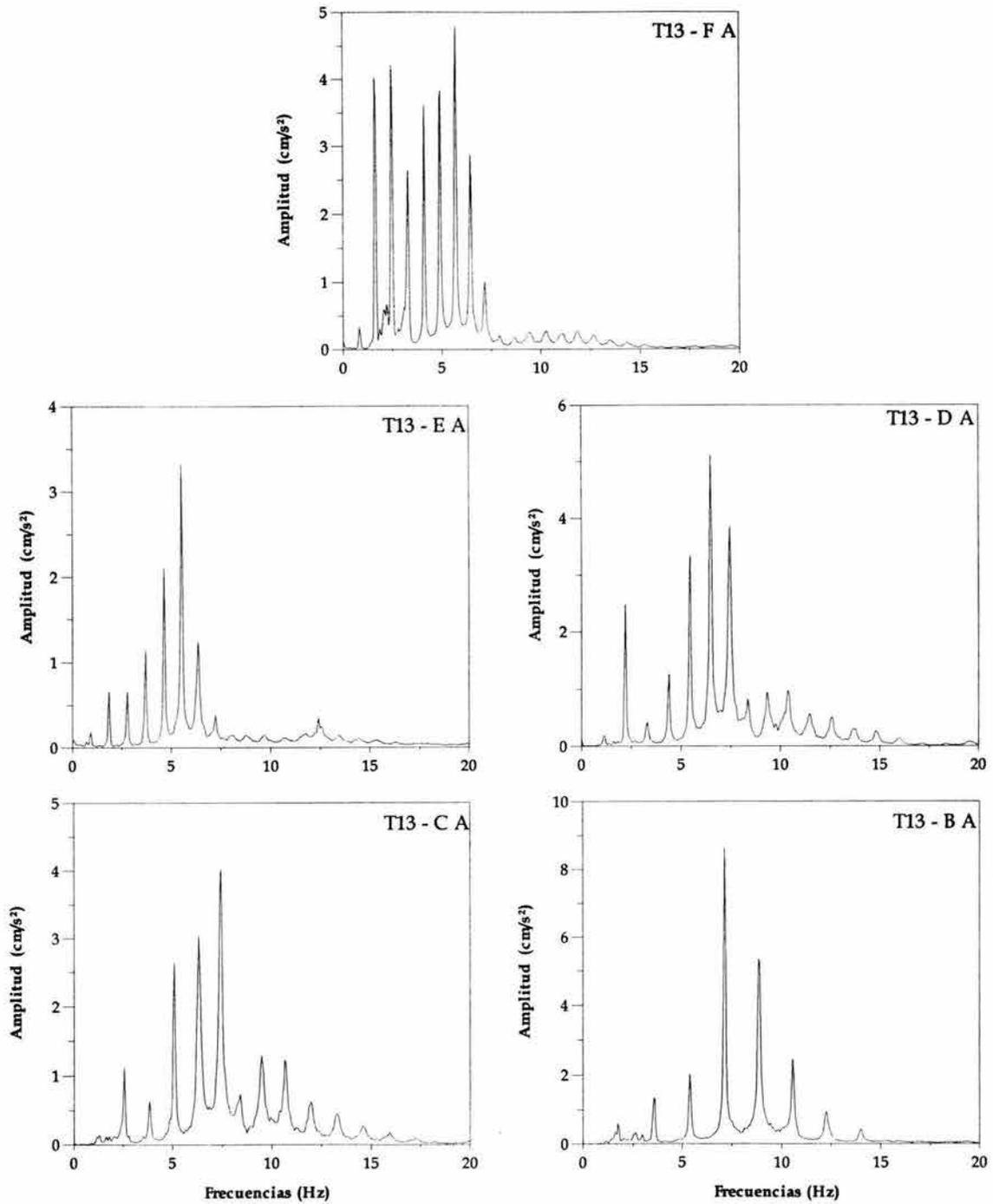


Fig N.14 Espectros de vibración ambiental pila 13, puente Tampico

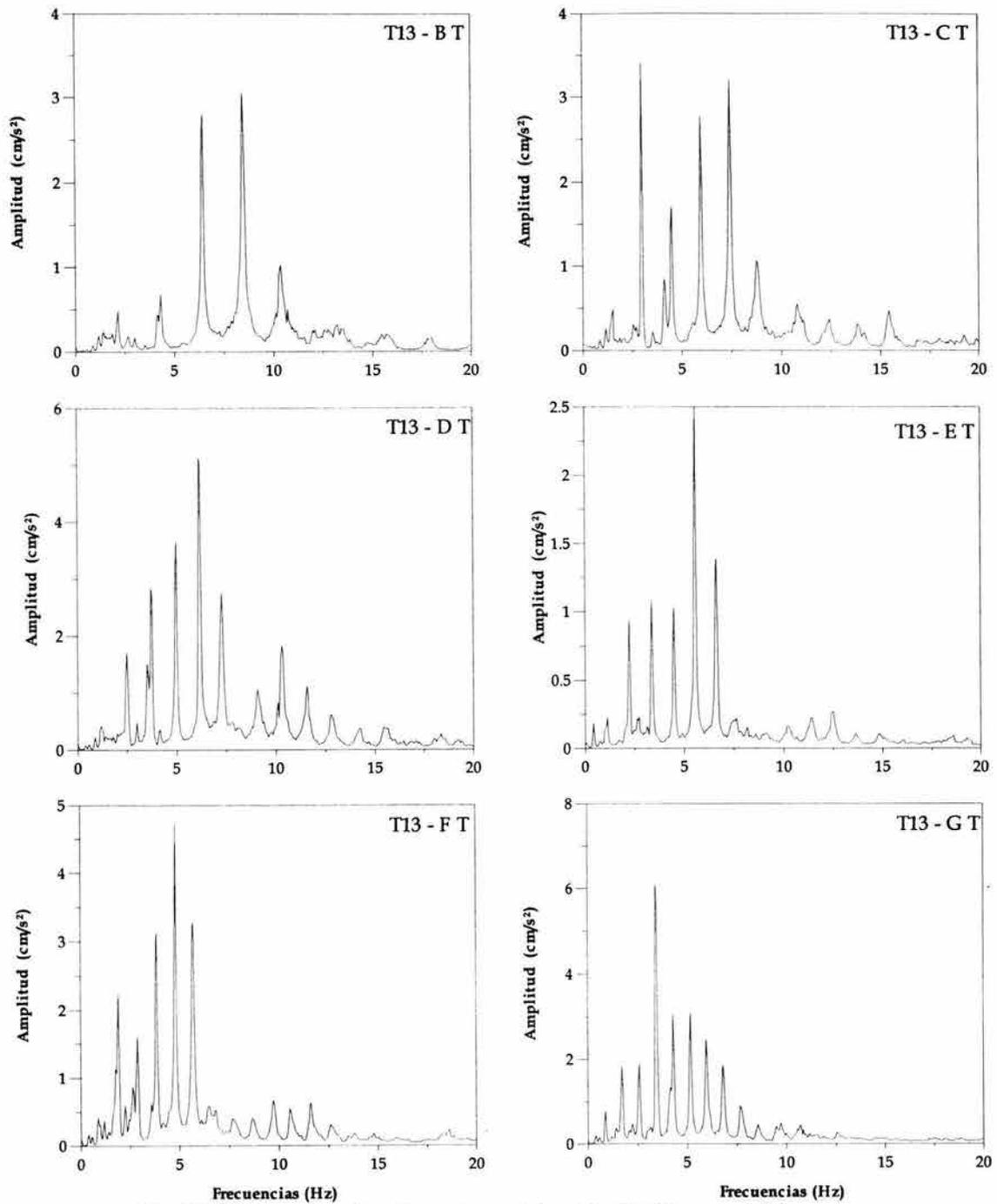


Fig N.15 Espectros de vibración ambiental pila 13, puente Tampico

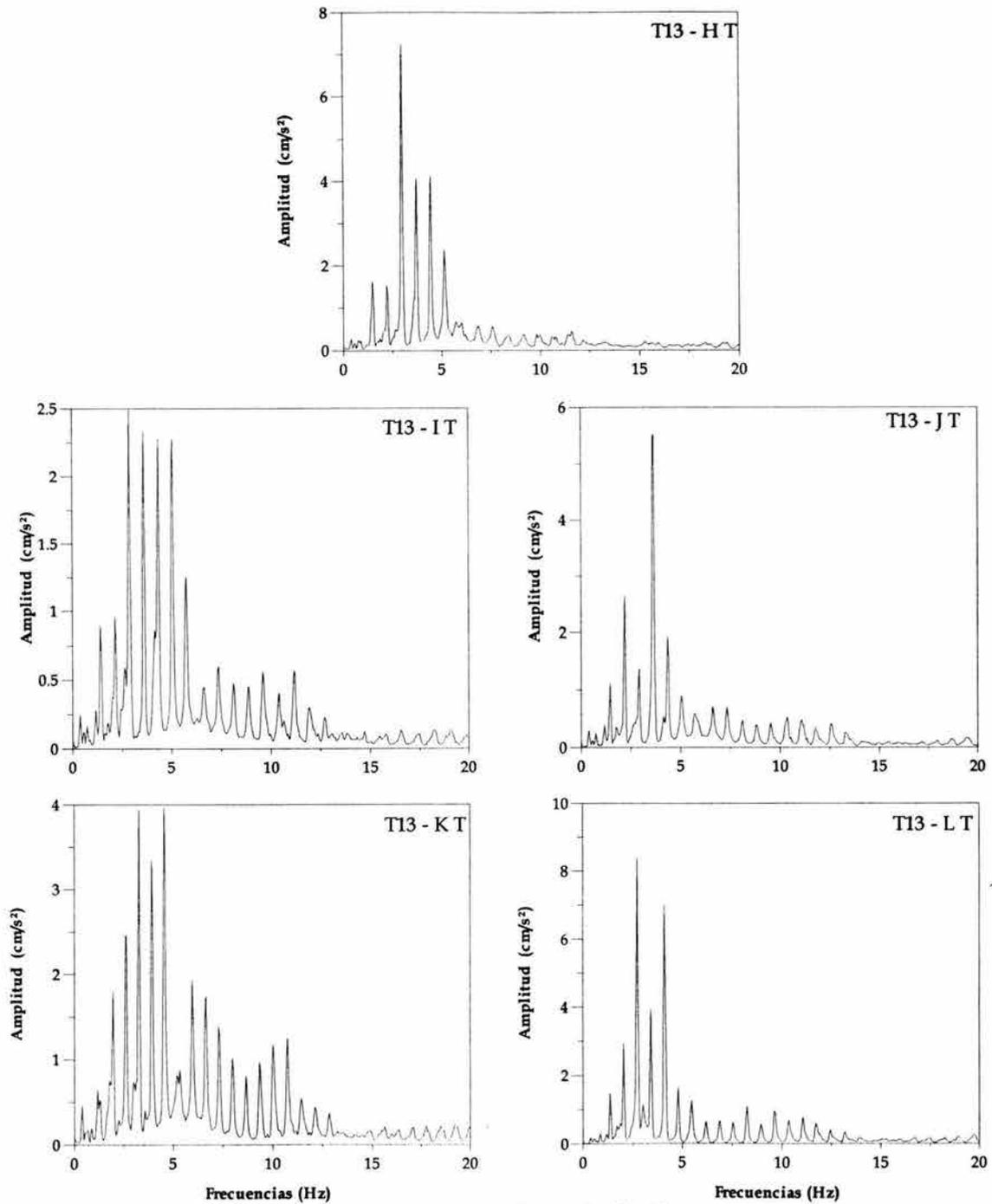


Fig N.16 Espectros de vibración ambiental pila 13, puente Tampico

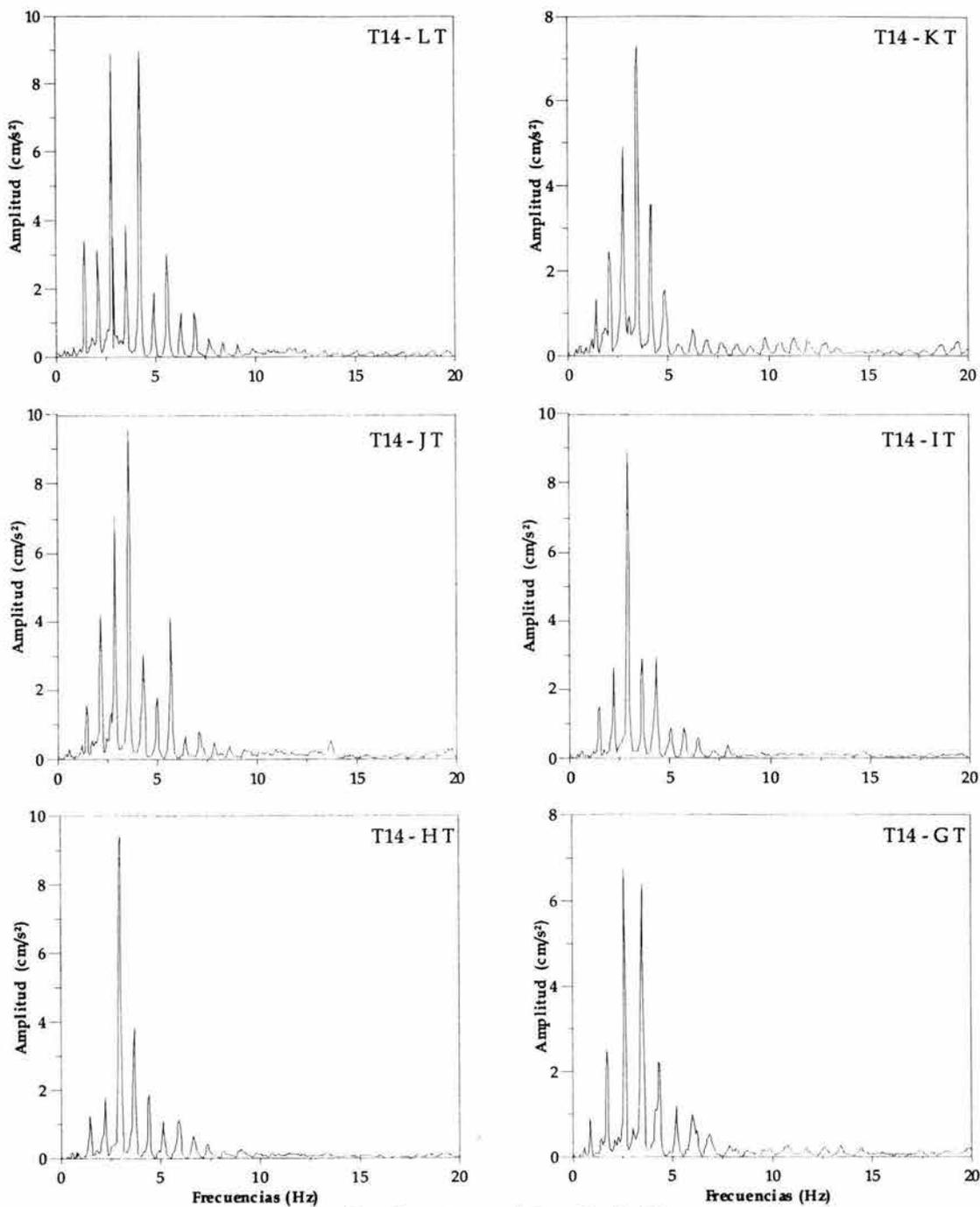


Fig N.17 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Tampico

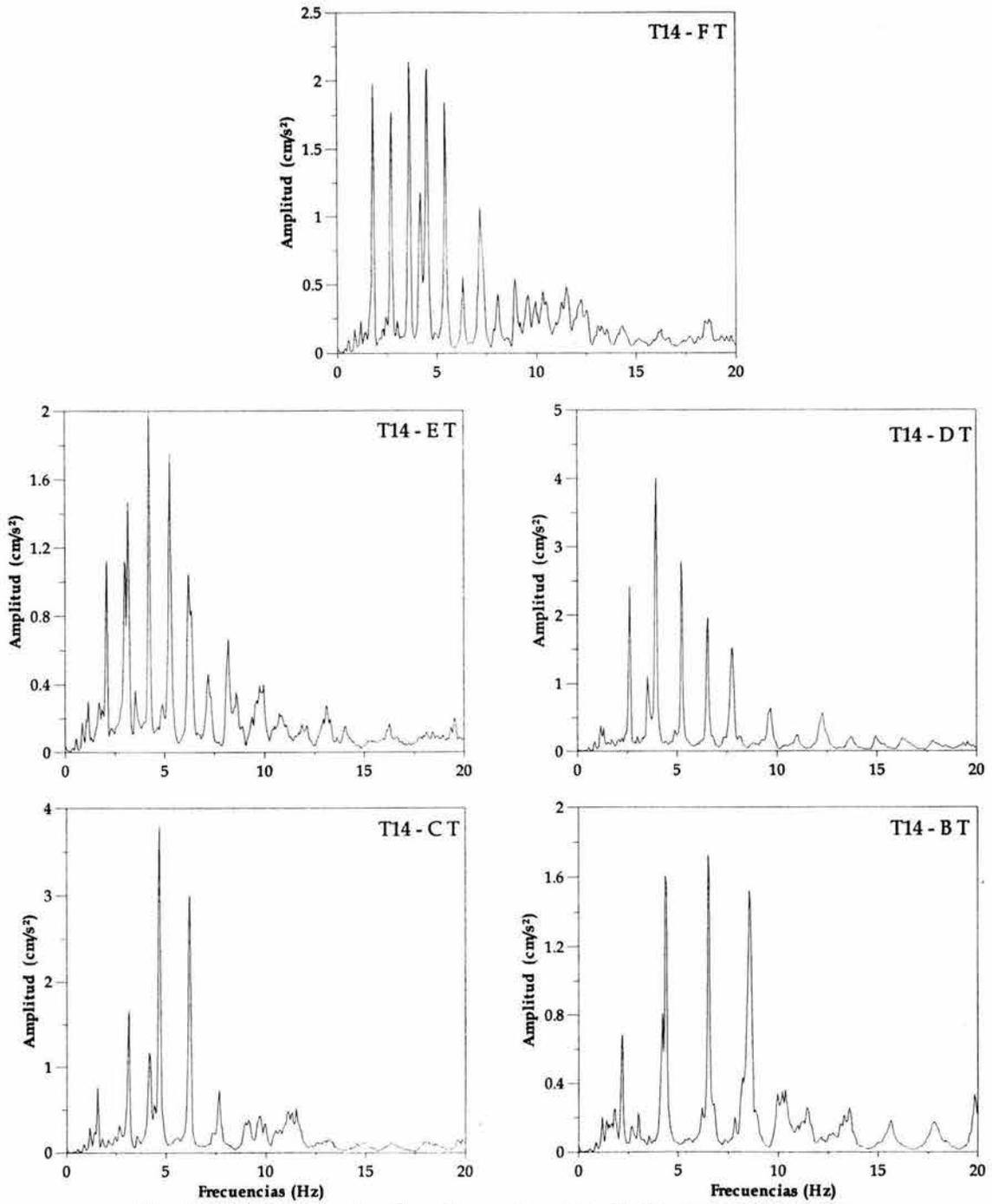


Fig N.18 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Tampico

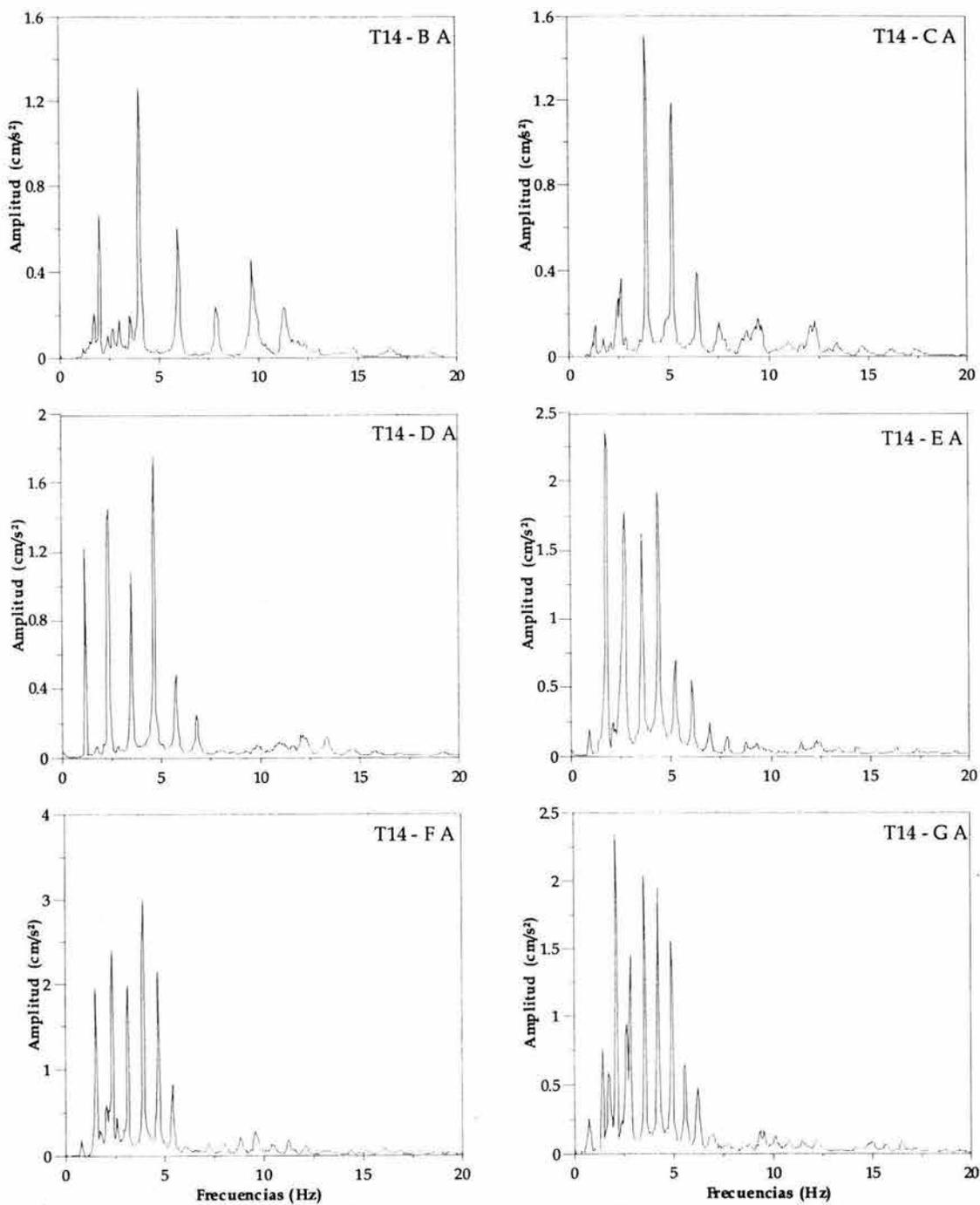


Fig N.19 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Tampico

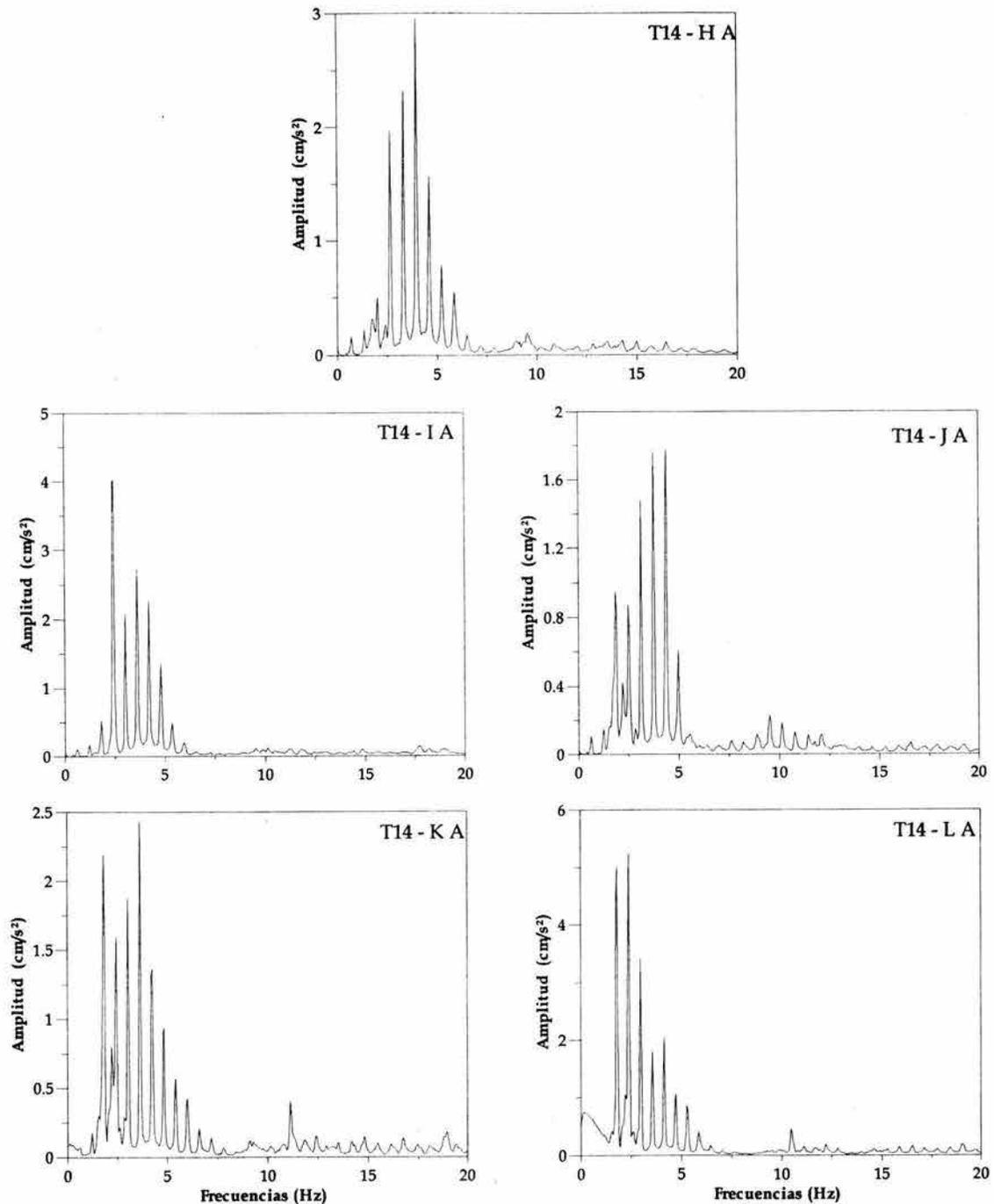


Fig N.20 Espectros de vibración ambiental pila 14, puente Tampico