

**SÉPTIMAS JORNADAS CHILENAS DE SISMOLOGÍA E INGENIERÍA
ANTISÍSMICA Y PRIMER CONGRESO IBEROAMERICANO DE SISMOLOGÍA,
NOVIEMBRE, LA SERENA, CHILE. 1997, PP. 565 -574.**

**DETERMINACION DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS
DEL PUENTE AISLADO MARGA-MARGA**

Rubén Boroschek, María Moroni, Mauricio Sarrazin, Eugenia Segovia, Pedro Soto.

Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile
Casilla 228/3, Santiago, Chile

RESUMEN

La zona central de Chile se ubica en una área de alto peligro sísmico que se ha visto afectada por temblores magnitud 7 cada diez años y magnitud 8 cada noventa años. El siguiente trabajo presenta las características constructivas, mecánicas y dinámicas de un puente continuo aislado de 383 metros de largo que se ubica en esta zona de alta sismicidad. Se indican los ensayos realizados a la goma, aisladores y puente terminado. Adicionalmente se comprueba suposiciones analíticas mediante resultados experimentales realizado en el sistema aislado existente.

SUMMARY

The central zone of Chile is located in a high seismic risk area with occurrence of magnitude 7 earthquake every 10 years and magnitude 8 every ninety years. This paper presents the mechanical and dynamic characteristics, and construction details of 383 meters long superstructure isolated bridge located in this seismic area. The test on rubber components, isolators and the bridge structure are presented and discussed. Some simplify structural models that correlate well with measured response are also presented.

DESCRIPCIÓN DEL PUENTE MARGA-MARGA.

El puente Marga-Marga posee una longitud de 383 mtrs y un sistema estructural consistente en un único tablero continuo apoyado sobre 36 aisladores sísmicos, dos estribos y siete cepas. La figura 1 muestra una elevación general del puente y de una cepa típica.

El tablero está constituido por una losa continua de hormigón armado de 0.27 x 18 mtrs de sección transversal la que está apoyada sobre cuatro vigas continuas de acero. Las vigas de acero están apoyadas sobre siete cepas de hormigón armado equiespaciadas cada 50 mtrs y dos estribos; el estribo norte se encuentra a 50 mtrs de la cepa C7 y el estribo sur a 33 mtrs de la cepa C1. La altura de las cepas varía de 22 a 32 mtrs, situándose las de mayor altura hacia el estribo norte. Las cepas son de tipo doble cajón de 2 x 10 metros de perímetro exterior.

Las dimensiones (espesor y ancho) de las alas de las vigas de acero varían a lo largo del puente; el ala superior tiene dimensiones entre 16 mm hasta 38 mm y el ancho varía de 300 mm a 700 mm; el ala inferior tiene un espesor de 32 mm y un ancho variable de 350 mm a 700 mm. El alma de las vigas tiene un espesor constante de 12 mm y una altura de 2800 mm.

El hormigón armado utilizado en la losa del tablero, estribos y cepas posee una resistencia cilíndrica de $f'_c = 240 \text{ Kg/cm}^2$ y el acero para la armadura de refuerzo tiene una calidad A63-42H. Las vigas continuas son de acero estructural de alta resistencia a la corrosión atmosférica ASTM A-242-81.

La conexión entre cada una de las vigas de acero y las cepas y estribos se realiza a través de un aislador sísmico con goma de alto amortiguamiento. La sección de los aisladores varía de acuerdo al nivel de carga axial, así los aisladores en las cepas tienen dimensiones de $0.85 \times 0.55 \text{ m}$ y los ubicados entre las vigas y los estribos norte y sur son: $0.50 \times 0.70 \text{ m}$ y $0.50 \times 0.50 \text{ m}$, respectivamente. Todos los aisladores tienen una altura de 30 cm, con 20.4 cm de altura efectiva de goma, 16 placas de acero de 3.0 mm de espesor espaciadas a 12 mm. Las placas de borde de los aisladores son de 25 mm de espesor, figura 2.

Debido a las características físicas del apoyo en los extremos del puente solo se consideró en estos puntos aislación en la dirección longitudinal, mientras que se impedía el movimiento transversal. Para esto se dispusieron de apoyos rígidos deslizantes en los extremos en la dirección longitudinal mediante placas de acero paralelas situadas a ambos lados del tablero, permitiendo la libre movilidad proporcionada por los aisladores en dicha dirección e impidiendo desplazamientos en la dirección transversal. Fuera de los extremos, los desplazamientos tanto longitudinales como transversales del tablero, dependen de la flexibilidad del tablero, la capacidad de deformación de los aisladores y la flexibilidad de las cepas. En cada estribo se colocó una junta de dilatación tipo "finger joint" con 22.5 cm de capacidad de desplazamiento total.

El suelo de cimentación corresponden a depósitos de tipo sedimentario del Estero Marga-Marga y material de los cerros colindantes. Por este motivo las cepas de la 2 a la 7 se encuentran sobre pilotes de longitud variable (14 a 31 metros) y 1 metro de diámetro hormigonados en sitio.

Algunos aspectos constructivos. Las cepas se construyeron en sitio utilizando un moldaje autodeslizante. Con este sistema se logró un promedio de construcción de 18 cm/hora de cepa. Una vez terminado el cabezal de las cepas los aisladores eran llevados a posición utilizando un ascensor. Posteriormente eran nivelados utilizando un mortero especial y anclados a la cepa.

Las vigas fueron construidas en sitio mediante soldadura en terreno de segmentos de viga de entre 18 y 26 metros de largo hasta su longitud final de 383 metros. Todas las soldaduras se verificaron mediante radiografía. Las vigas eran posteriormente lanzadas con un sistema deslizante y eran descendidas sobre los aisladores. La conexión final entre aisladores y vigas de acero fue soldada motivo por el cual se estableció un procedimiento de trabajo que consideraba los cambios térmicos ambientales de tal manera de limitar la distorsión máxima, de 6 cm, que ocurría en el ala inferior de las vigas. Para esto inicialmente se realizó la soldadura del aislador en la cepa 4 y posteriormente las cepas 5 y 3 al mismo tiempo y así sucesivamente.

CARACTERISTICAS DE LOS AISLADORES

Los aisladores fueron diseñados por la empresa G+V siguiendo especificación dadas por la AASHTO (1991) y posteriormente ensayados en la Universidad de Chile. El diseño consideró un desplazamiento máximo de 15.6 cm, y una rigidez de 1700, 1270 y 920 kg/cm para los aisladores de 85 x 55, 70 x 50 y 50 x 50 cm, respectivamente.

La elaboración de la goma la realizó la empresa VULCO a partir de especificaciones dadas por la Universidad de Chile. Las especificaciones mecánicas para la goma fueron: G al 50% de deformación 7.5 kg/cm² +/- 0.5 kg/cm², al 20 % de deformación 11 kg/cm² +/- 0.5 kg/cm²; Dureza 60 (shore) ; capacidad de elongación > 600%; amortiguamiento: 8-10 %; y tracción máxima: 170-190 kg/cm². Adicionalmente se realizaron ensayos de ozono, calor, adherencia y compresión residual. Estos ensayos se realizaron para cada mezcla de goma a utilizar en la elaboración de los aisladores. Los resultados de una mezcla característica para las propiedades de amortiguamiento y rigidez se presentan en la figura 3 para probetas de 6 mm de espesor y 3 x 3 cm de sección, sometidas a distorsiones del 5 al 200 %. Los ensayos de la goma se realizaron a desplazamiento controlado, con acción triangular y sinusoidal y a una frecuencia de 0.5 Hz. Para la verificación de los resultados sobre los aisladores también se realizaron los ensayos sobre goma a frecuencias de 0.011 y 0.033 Hz.

Se desarrollaron dos aisladores prototipo para cada tamaño ha utilizar en el puente. Para los ensayos se empleó el banco de prueba mostrado en la figura 4 y se realizaron las siguientes pruebas:

- a- Los aisladores de 55 x 85 cm se sometieron a 3 ciclos de 0.25 (4 cm), 0.5 (8 cm), 0.75 (10.5), 0.77 (12 cm) y 1.02 (16) veces el desplazamiento total de diseño (TDD) a 30 y 90 segundos de período bajo la carga asociada al 100% del peso muerto (DL= 237 ton) de carga vertical. Para los aisladores de 50 x 70 cm se repiten estos ciclos para 77 ton de carga vertical (1.0 DL). Para los aisladores de 50 x 50 cm se repiten estos ciclos para 41 ton de carga vertical (1.0 DL).
- b- Seis ciclos a 83% (17 cm, 1.1 TDD) de distorsión y con dos cargas verticales extremas (1.2 DL+E y 0.8 DL-E), de acuerdo al tipo de aislador: 304 y 140 ton para los aisladores de 55 x 85 cm; 102 y 52 ton para los de 50 x 70 cm; y 60 y 23 ton para los de 50 x 50 cm de sección.
- c- Diez y nueve ciclos al desplazamiento total de diseño (TDD=15.6 cm) para una carga vertical similar a la del punto a.

Posteriormente se sometieron a la siguiente serie de ensayos mecánicos todos los aisladores que se utilizarían en el puente:

- a- Carga sostenida por 12 horas de 1.5 veces la carga muerta más carga viva; Esta prueba permitió verificar entre otras aspectos la adherencia y alineación de las placas de acero de refuerzo y desperfectos de fabricación.
- b- Seis ciclos a 54% (11 cm, 0.71 TDD) de distorsión bajo la carga vertical mínima de diseño (0.8 DL - E) que, para los aisladores de 55 x 85 cm es de 140 ton, 52 ton para los

aisladores de 50 x 70 cm y 23 ton para los aisladores de 50 x 50 cm. Esta prueba garantizaba la adherencia inicial del aislador y se realiza a una velocidad asociada a un período de 30 seg.

- c- Cinco ciclos a 69% (14 cm, 0.90 TDD) de distorsión bajo las mismas condiciones de carga vertical del paso b.
- d- Veinte ciclos a 88% (18 cm, 1.15 TDD) de distorsión bajo las mismas condiciones de carga vertical del paso b.
- e- Cinco ciclos a 54% (11 cm 0.71 TDD) de distorsión bajo las mismas condiciones de carga vertical del paso b y con períodos de 30 y 90 segundos. Para determinar las variaciones de rigidez y amortiguamiento en función de la velocidad de carga.

Las figuras 5 y 6 presentan los resultados de rigidez y amortiguamiento en función de la distorsión para los diferentes tipos de aisladores.

Para ser aprobado un aislador no debe mostrar señales de deterioro y tener las propiedades mecánicas establecidas en el diseño.

MEDICIÓN DE MICROVIBRACIÓN AMBIENTAL DEL PUENTE TERMINADO.

Una vez finalizada la construcción del puente se realizaron mediciones de microvibración en dos oportunidades. En la primera ocasión el puente aún no estaba habilitado para tráfico vehicular, existiendo sólo excitaciones ambientales, mientras que en la segunda ocasión existía además tráfico vehicular. Descripción detallada de las mediciones se presenta en la referencia 1.

Para la medición de las microvibraciones se utilizaron 4 sensores de velocidad, marca Kinemetrics, Modelo Ranger SS-1. Estos sensores tienen una respuesta plana entre 1 y 100 Hz al tener un amortiguamiento del 70% del crítico. El sistema de adquisición de datos utilizado es de marca IOTEC, Modelo Daqbook 100, con 12 bits de resolución. Adicionalmente se utilizó un sistema de amplificación y filtrado. En las mediciones se utilizó un filtro antialias tipo Butterworth con frecuencia de corte de 100 Hz. En las mediciones del sector de estribo fue necesario utilizar amplificaciones de hasta 500 veces. El sistema de adquisición utilizado permite registrar la historia de velocidad de cada sensor en forma paralela (tiempo común) y las almacena, en forma digital, para su posterior procesamiento.

Se presentan a continuación los resultados del estudio de las vibraciones bajo condiciones de tráfico vehicular y otras ambientales. Se realizaron en total diez mediciones con una duración mínima de 5 min por registro.

Los puntos seleccionados sobre el tablero para realizar las mediciones se encuentran sobre el eje transversal de las cepas C2, C4 y C6 los cuales coinciden con la dirección del eje transversal del puente, eligiéndose la pista externa derecha según la dirección N-S. Se consideraron también los puntos ubicados en los extremos del puente: dentro del tablero y fuera de éste en los estribos tanto Norte como Sur.

ANÁLISIS DE SEÑALES Y RESULTADOS OBTENIDOS.

Se utilizó un sistema de identificación no paramétrica para determinar los períodos y formas modales predominantes del puente tanto en el espacio del tiempo como de frecuencia. Las funciones utilizadas en el dominio de la frecuencia fueron los espectros de amplitud, fase, coherencia y de densidad de potencia. Para el cálculo del espectro de potencia se utilizaron promedios de segmentos de registros para reducir la varianza de las ordenadas del espectro. Adicionalmente los segmentos utilizados en el cálculo del espectro fueron seleccionadas a través de una envolvente tipo Hanning. A pesar de lo anterior y del cálculo de un gran número de promedios los espectros de potencia muestran bastante irregularidades sin embargo esto no impide la identificación de los parámetros dinámicos básicos.

En la figura 7 se presentan las formas modales experimentales y los períodos identificados. En la dirección transversal se observan formas modales que indican el nivel de fijación en los estribos y niveles de libertad de movimiento a nivel de las cepas. En la dirección longitudinal por el contrario no se aprecia una perfecta aislación especialmente en el sector del estribo Sur y parcialmente en el estribo Norte. Esta situación se presume asociada a un roce excesivo entre las placas de acero utilizadas para restringir el movimiento del tablero en forma longitudinal el cual no se rompe para el nivel de excitación al momento del registro de las vibraciones. Esta situación debería mejorar para vibraciones de mayor amplitud.

ELABORACIÓN DE UN MODELO TEÓRICO SIMPLIFICADO.

Considerando el nivel de la excitación se prepararon dos modelos simplificados lineales bidimensionales para representar el comportamiento dinámico del puente en forma aproximada en las direcciones longitudinal y transversal.

El tablero (vigas de acero y la losa) se modeló con elementos tipo viga con propiedades correspondientes a la sección transformada de hormigón armado; las cepas se representaron como elementos tipo columna; los aisladores se consideraron como resortes con rigidez unidireccional transversal y longitudinal según la dirección de análisis y las masas se discretizaron a lo largo del tablero y en los extremos superiores de cada cepa.

Las condiciones de apoyo supuestas en los extremos son las siguientes: para el modelo transversal, extremos rotulados que impiden los desplazamientos en todas las direcciones pero permiten los giros; para el modelo longitudinal, el extremo correspondiente al estribo sur se modeló como una rótula de las mismas características que el modelo transversal, el estribo norte se consideró como un apoyo deslizante en la dirección longitudinal acoplado a un modelo de aislador con rigidez unidireccional, restringiéndose sólo los desplazamientos transversales y verticales.

Las propiedades geométricas y las características propias del hormigón y acero de los distintos elementos del puente utilizadas son las especificadas en planos.

Para obtener las propiedades del aislador se utilizó la información de los ensayos de los elementos de goma y aisladores. Considerando el bajo nivel de distorsión al que se estaba sometido los aisladores al momento de realizar las mediciones de vibración ambiental y que el sistema de

aislación es no lineal y que presenta variaciones importantes de rigidez especialmente para bajos niveles de deformación se decidió realizar dos modelos límites dependiente de valores del módulo de corte G ; uno correspondiente a una deformación del 5% ($G = 184 \text{ T/m}^2$), y otro utilizando un valor de G que representa una condición de rigidez horizontal infinita para los aisladores. De los gráficos se aprecia que al extrapolar la rigidez para una deformación de un 5% se llega a valores cercanos a los calculados utilizando las propiedades geométricas y constitutivas de la goma.

COMPARACIÓN ENTRE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS.

En la figura 7 se presentan los resultados de los distintos modelos. Se observa que los períodos naturales experimentales están acotados por los modelos extremos, siendo mas cercanos al modelo dado por la rigidez de los aisladores con un 5% de distorsión. La concordancia a nivel de formas modales es bastante buena, figura 7. Para el caso longitudinal se presenta un caso adicional que considera parcialmente la restricción observada en terreno del estribo Sur y Norte y que se representa aumentando la rigidez de los elementos de aislación de los extremos. No fue posible utilizar valores reales del modulo de corte o rigidez menores al de 5% de distorsión debido a limitaciones experimentales.

Considerando las diferencias en períodos analíticos y experimentales se hace necesario mejora los parámetros de modelación en especial en lo que respecta a las propiedades de la goma y aislador para distorsiones menores al 5%. Esto se realizará en una segunda etapa que contempla además la instrumentación del puente con 21 acelerómetros uniaxiales de fuerza balanceada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Chile, a Fondecyt (Proyecto N° 1940466 y N° 1970732) y al Ministerio de Obras Públicas por el apoyo brindado a la ejecución y divulgación de este trabajo.

REFERENCIAS:

1. Segovia, E "Instrumentación del puente Marga-Marga", Memoria de título de Ingeniero Civil, Depto de Ingeniería Civil, Universidad de Chile, 1997.

DESCRIPCION GENERAL, PUENTE MARGA-MARGA

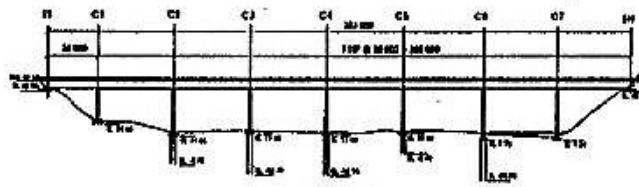


FIG 4.2a.

VISTA TRANSVERSAL, PUENTE MARGA-MARGA

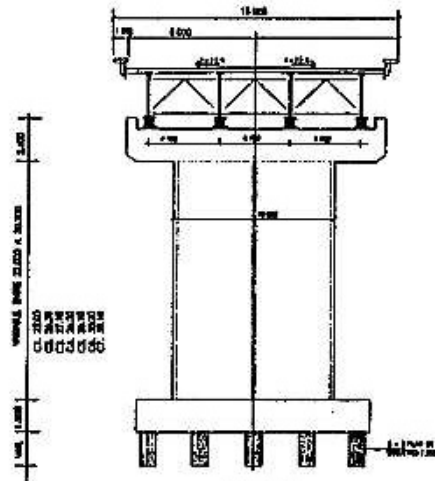


FIG 4.2b.

Figura 1. Descripción General del Puente Marga-Marga.

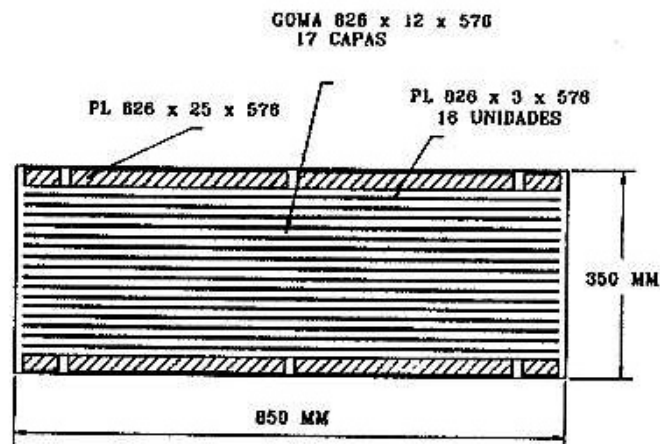


Figura 2. Aislador sísmico

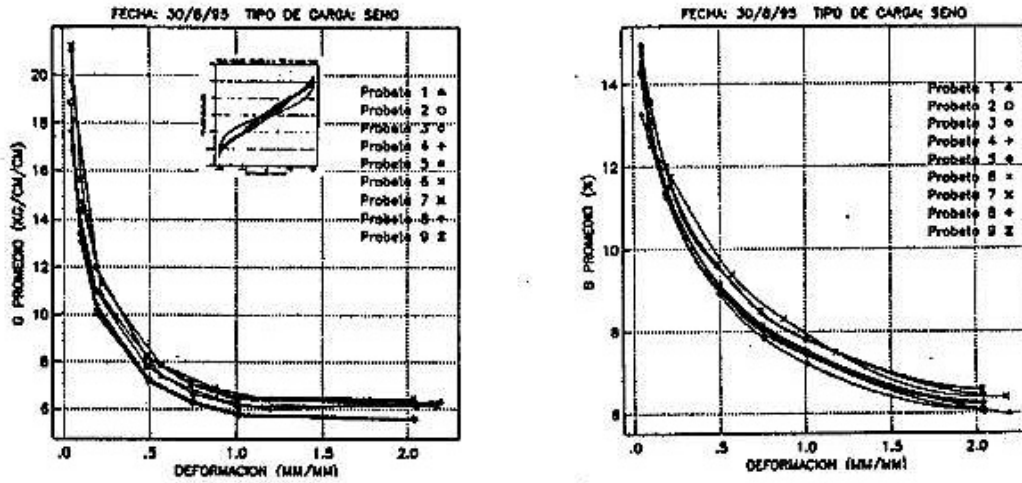


Figura 3. Curva de variación del módulo de corte y amortiguamiento de la goma en función de la distorsión.

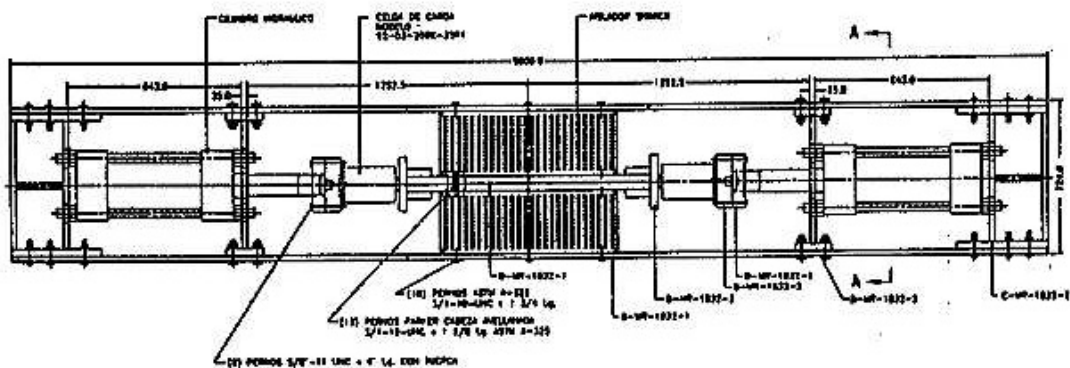


Figura 4. Banco de prueba de los aisladores.

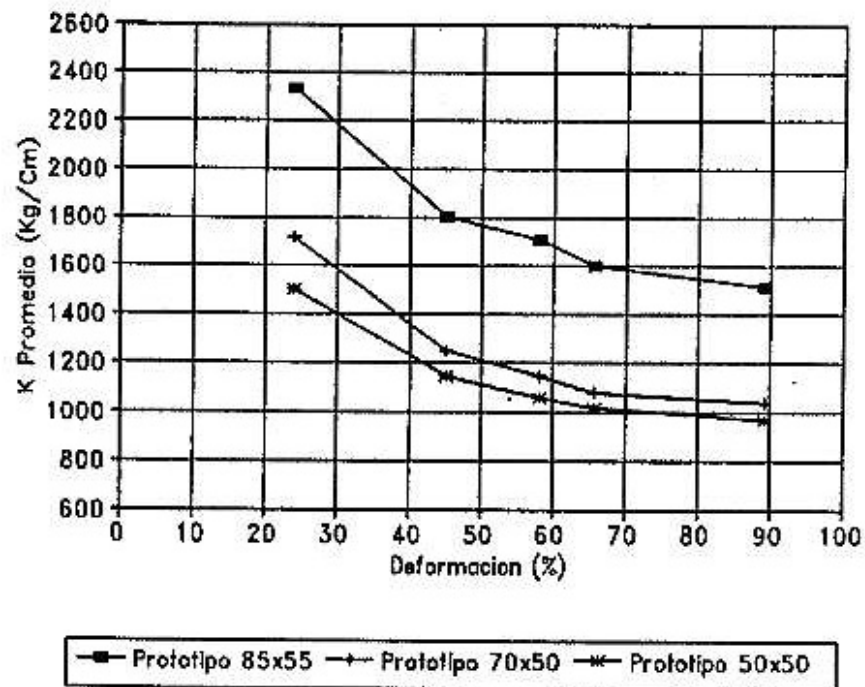


Figura 5. Curva de variación de la rigidez de los aisladores en función de la distorsión.

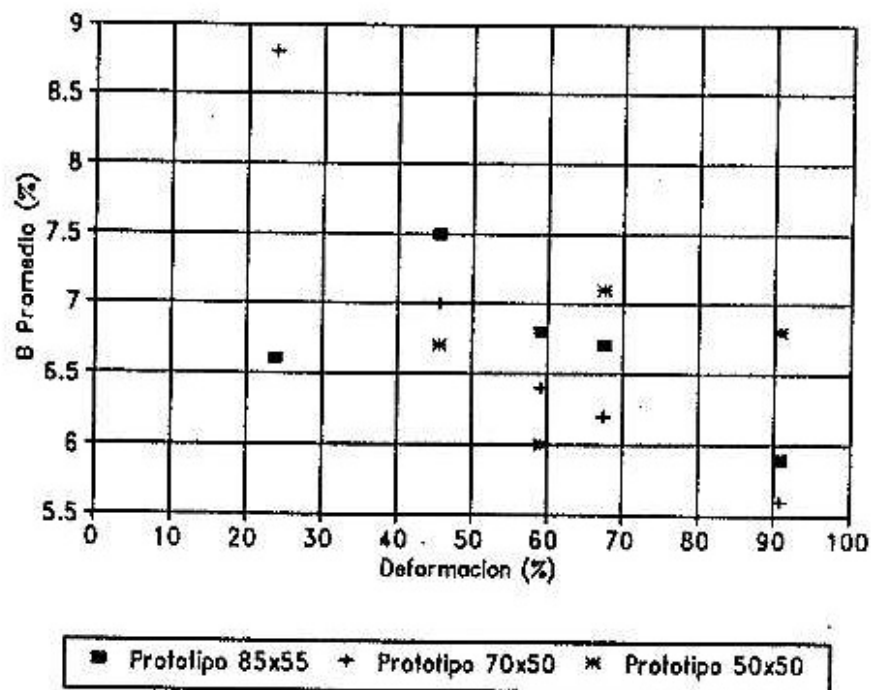


Figura 6. Curva de variación del amortiguamiento de los aisladores en función de la distorsión.

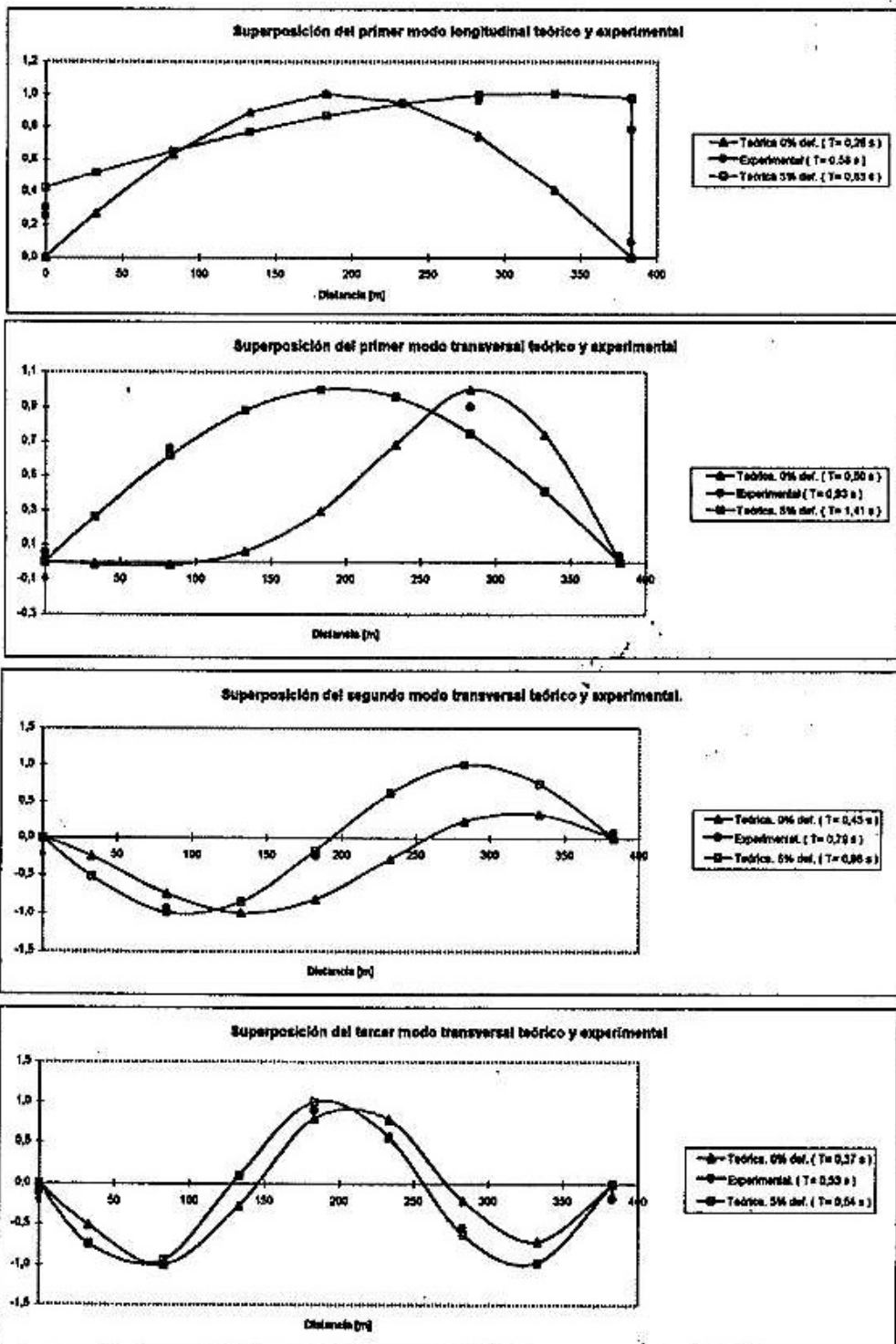


Figura 7. Períodos y formas de vibrar experimentales y analíticas.

FECHA: 30/8/95 TIPO DE CARGA: SENO

