AA P0144

TRAB
IC2000
P47

UNIVERSIDAD CATOLICA "ANDRES BELLO"
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL

DISIPACION SISMICA EN VIADUCTOS FERROVIARIOS

Trabajo de Ascenso a Profesor Asistente
presentado ante la Universidad Católica "Andrés Bello"
por el Ing. Robert J. Pérez Hernández.

Caracas, 01 de Septiembre del 2000

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

RESUMEN

En este Trabajo de Ascenso al escalafón universitario se presentan los aspectos teóricos relativos a los criterios de diseño para la disipación sísmica en viaductos ferroviarios, y se incluye parte de los resultados de la investigación experimental y numérica realizada para las estructuras de los viaductos del Sistema Caracas Tuy Medio.

El objetivo del Trabajo es dar a conocer nuevas tecnologías disponibles, de cuya aplicación en el diseño estructural se alcanza un medio eficiente de mitigar las severas consecuencias que ocasionan los terremotos.

AGRADECIMIENTO

Un agradecimiento muy especial a la Empresa ASTALDI S.p.A, por el respaldo y soporte a los estudios e investigaciones realizadas para llevar a feliz término el proyecto de los viaductos de este Sistema.

Por su colaboración en todo momento a la empresa FIP Industriale S.p.A y el reconocimiento a su personal por el entusiasmo mostrado durante la realización de las pruebas.

Al ISMES de Bergamo, institución en la cual se realizaron las pruebas sobre la mesa vibratoria.

Al profesor Andrew Wittaker de la Universidad de California (Berkeley) por sus consejos, aporte de ideas y minuciosa revisión de las Especificaciones Técnicas de las Pruebas de Caracterización de los Aparatos de Apoyo.

Al profesor Celso Fortoul Padrón por su desinteresado aporte de ideas.

A los ingenieros José J. Nieto F. y Emilio Solorzano, mis compañeros de lucha diaria en PSN Ingenieria S.C.

INDICE

CAPÍTULO 1 INTRODUCCION

CAPÍTULO 2 LA EXCITACION SISMICA

2.1 Movimientos de Diseño
2.2 Espectros de Respuesta Elásticos
2.3 Registros Acelerográficos
2.4 Grado de Severidad de la Excitación

CAPÍTULO 3 ELEMENTOS BASICOS EN LA SELECCIÓN DE LOS APARATOS DE APOYO

3.1 Generalidades
3.2 Fuerzas Horizontales debidas a la Operación de los trenes
3.3 Disipación de la Energía mediante el Daño Estructural
3.4 Factor de Reducción de la Respuesta
3.5 Disipación de la Energía mediante un Sistema Pasivo

CAPÍTULO 4 INVESTIGACIONES EXPERIMENTALES

4.1 Modelo de un grado de libertad dinámico
4.2 Propiedades del Elemento Disipativo
4.3 Propiedades del Elemento de Sacrificio

CAPÍTULO 5 MODELO CONSTITUTIVO

5.1 Comportamiento bilineal
5.2 Modelo propuesto por Ozdemir
5.3 Falla por Fatiga
5.4 Falla por Acumulación de Daño
5.5 Otras medidas de la eficiencia

CAPÍTULO 6 METODOS DE ANALISIS DINAMICO

6.1 Generalidades
6.2 Sistemas Lineales
6.3 Sistemas No Lineales
6.4 Balance de la Energía

CAPÍTULO 7 RESULTADOS NUMERICOS

7.1 Generalidades
7.2 Modelo Matemático
7.3 Respuesta Dinámica

CAPÍTULO 8 CONSIDERACIONES FINALES

REFERENCIAS

ANEXO: COMPONENTES DE UN APARATO MOVIL UNIDIRECCIONAL CON DISIPACION UNIDIRECCIONAL

CAPITULO 1. INTRODUCCION

Durante años se han venido tratando muchos de los problemas de la evaluación de la respuesta de las estructuras bajo la acción sísmica idealizando la excitación como un conjunto de cargas laterales estáticas, en el mejor de los casos, determinadas mediante un análisis seudo-dinámico.

Los limitados recursos económicos de los cuales dispone la sociedad en unos casos y las dimensiones inaceptables que pueden resultar en otros, han sido el principal motivo que ha conducido a aceptar diferentes niveles de daños en la estructura según sea la intensidad de los eventos (baja, moderada o severa). Actualmente la mayoría de las normas admite la reducción de la respuesta mediante factores que dependen esencialmente del tipo de estructura y del material. Es decir, se acepta que la estructura pueda incursionar en el rango post-elástico con el fin de disipar la energía sísmica mediante daños que pueden llegar a ser importantes e incluso producir la ruina. Es común realizar el análisis suponiendo un comportamiento lineal del sistema y diseñar para los valores que resulten de la apropiada aplicación del factor de reducción de la respuesta contemplado en la norma, de esa manera se intenta reconocer y simular el comportamiento dentro de ese rango.

Muchos han sido los eventos severos que han ocurrido durante los últimos 40 años, algunos de ellos han evidenciado problemas particulares que permitieron identificar ciertos fenómenos y comprender mejor su complejidad. La capacidad devastadora de los terremotos se ha podido constatar durante los recientes eventos de Kocaeli (Turquía), Duzce (Turquía) y Chi-Chi (Taiwan). La filosofía, estrategias y criterios de diseño han evolucionado y sufrido cambios en algunos casos drásticos, la búsqueda de medios eficientes para mitigar sus consecuencias han conducido a novedosas técnicas que cada día son más utilizadas.

Algunos de los avances en la industria militar durante la segunda guerra mundial introdujeron elementos que posteriormente han sido aplicados en el control de las vibraciones de maquinarias. En nuestro país, en la década de los años 80, se aplicaron estos sistemas en la planta de generación termoeléctrica "Planta Centro". La losa de fundación de las turbinas (450 Mw), se apoya sobre resortes helicoidales de acero con propiedades restitutivas verticales y horizontales, y amortiguadores viscosos, capaces de controlar la transmisión de las vibraciones a la estructura.

Los sistemas de protección sísmica para las estructuras han tenido avances notables en los últimos años y cada vez se incrementa su aplicación tanto en nuevas edificaciones, como en la rehabilitación de estructuras, muy especialmente en aquellas consideradas patrimonios históricos. La aplicación de nuevos materiales, aleaciones cuyas propiedades exhiben una memoria de forma (shape memory, smart materials), se conocen desde el año 1932 como el oro-cadmium (AuCd, Olander). Recientemente se utilizaron cables, aleación de Niquel-Titanio (Ni-Ti), para

diagonalizar paredes de ladrillos, en la rehabilitación de la Basílica de San Francisco de Asís.

En la actualidad se dispone de sistemas de protección estructural que pueden agruparse esencialmente en cuatro tipos de Control: Transitorios, Pasivos, Semi-Activos y Activos.

Los Sistemas de Control Transitorios, capaces de reaccionar cuando se produce una excitación impulsiva, introduciendo condiciones de vínculo adicionales en la estructura, como los llamados "Shock Transmitters".

Sistemas de Control Pasivos cuya estrategia se dirige al incremento del período de vibración de la estructura, tales como, los apoyos Elastoméricos, de Goma con núcleo de plomo y Péndulo de Fricción.

Sistemas de Control Pasivos cuya estrategia se dirige a la disipación histerética de la energía, como el caso de los amortiguadores metálicos, amortiguadores de fricción, amortiguadores viscoelásticos y amortiguadores fluidoviscosos.

En este trabajo se hará énfasis en los Sistemas de Disipación de Energía Pasivos y, en particular, en los llamados Amortiguadores Metálicos.

Se presenta un sistema de vínculos de apoyo entre los tableros y la infraestructura (pilas y/o estribos) de los viaductos, diseñado con el fin de restringir los movimientos de cuerpo rígido durante la operación de los trenes, tanto en condiciones normales como excepcionales. En el sistema de vínculos se han incorporado elementos de sacrificio (fusibles) mediante los cuales se introduce un umbral de fuerzas horizontales a partir del cual se eliminan dichas restricciones y se permite que los amortiguadores metálicos inicien la disipación histerética de la energía sísmica, de esa manera se evita que la misma sea disipada mediante el daño de los componentes estructurales.

Los amortiguadores metálicos son elementos tipo viga, de cuerpo tronco cónico y extremo superior esférico, de acero inoxidable y austenítico, cuyas propiedades mecánicas no se alteran con el calor e incrementos de temperatura alcanzados durante el proceso disipativo. El mecanismo requiere sean combinadas superficies de contacto entre PTF y acero inoxidable, para permitir su funcionamiento. Entre dichas superficies se producirán restricciones por fricción, las cuales intervienen en el equilibrio dinámico.

El tipo de amortiguador metálico seleccionado fue estudiado mediante modelos matemáticos y experimentales, se presentan en este trabajo los resultados de las pruebas de comportamiento cuando es sometido a amplitudes de desplazamiento constante cíclicos y las realizadas sobre una mesa vibratoria en el ISMES (Bergamo, Italia) a un modelo físico a escala natural de un grado de libertad dinámico cuya excitación corresponde a temblores simulados.

En el capítulo 2 se presenta la definición de la excitación sísmica y la forma mediante la cual se evalúo su grado de severidad.

En el capítulo 3 se presentan los criterios generales de diseño, las limitaciones para alcanzar la reducción de la respuesta mediante el daño estructural criterio usualmente aceptado por las normas mundialmente y mediante los dispositivos seleccionados.

En el capítulo 4 se resumen los resultados de la investigación experimental llevada a cabo especialmente para el sistema propuesto.

En el capítulo 5 se presenta el modelo constitutivo utilizado en los análisis numéricos, y se analiza los aspectos inherentes al modo de falla por fatiga del tipo de disipador seleccionado.

En el capítulo 6 se presenta la formulación general relativa a los métodos de análisis dinámico en sistemas lineales y no lineales.

En el capítulo 7 se presentan los resultados numéricos para el caso de un viaducto ferroviario en particular y se discuten los mismos.

Finalmente, en el capítulo 8, se presentan las conclusiones más relevantes y aquellas investigaciones que pueden desarrollarse en esta área.

CAPITULO 2. LA EXCITACION SISMICA

2.1 Movimientos de Diseño

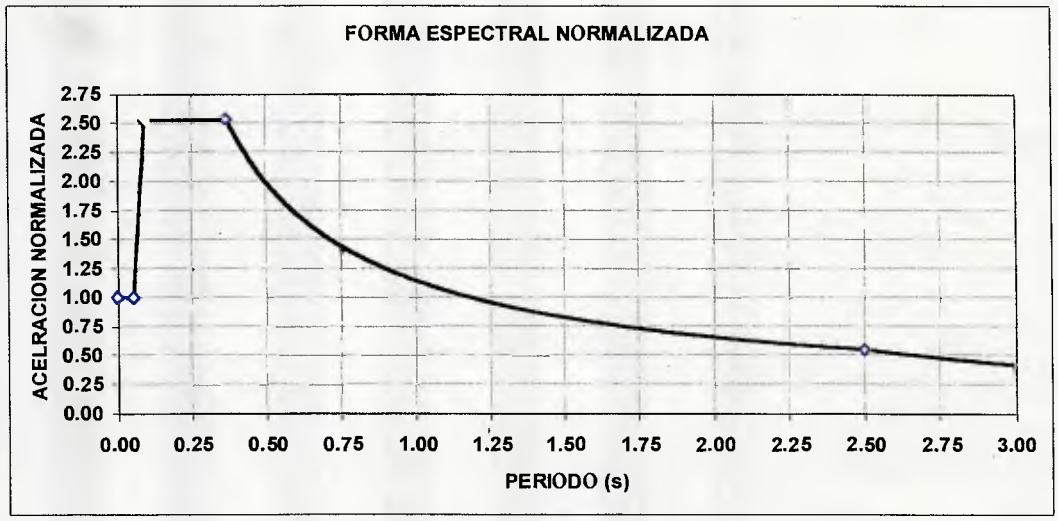
Las Normas y/o Estudios de Amenaza fundamentan la definición de los movimientos de diseño en la aceptación de una pequeña probabilidad de excedencia (entre 5 y 10%) durante la vida útil del Sistema, en general, equivalentes a períodos medios de retorno de 450 a 2000 años, según sean las consecuencias de la falla de la Obra.

En ciertos casos especiales, también se seleccionan movimientos asociados a eventos que puedan ocurrir más de una vez durante la vida útil de la Obra, es decir, con una alta probabilidad de ser excedidos, generalmente equivalentes a períodos medios de retorno iguales a la vida útil, con el fin de establecer límites a los daños estructurales que serán aceptados.

Los movimientos se expresan en términos de ciertos parámetros característicos, usualmente la máxima aceleración horizontal (**A_{ho}**), la máxima velocidad horizontal del terreno y el período de esquina.

2.2 Espectros de Respuesta Elásticos

Las Normas y Estudios de Amenaza incluyen las formas espectrales a partir de las cuales se construyen los espectros de respuesta elástica de cada componente (horizontal y vertical), como por ejemplo la indicada seguidamente:



$$0.0s \geq T \leq 0.05s \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots A_d = A_{ho}$$

Rama ascendente del espectro de respuesta:

$$0.05s \geq T \leq 0.9s \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots A_d = [1 + (T - 0.05)\frac{(\beta - 1)}{0.04}]A_{ho}$$

Rama de aceleración constante:

$$0.9s \geq T \leq 0.37s \ldots\ldots\ldots \quad A_d = \beta A_{ho}$$

Rama descendente, velocidad constante:

$$0.37s \geq T \leq 2.5s \ldots\ldots\ldots A_d = \beta A_{ho}\left(\frac{0.37}{T}\right)^{0.8}$$

Rama descendente, desplazamiento constante:

$$T \geq 2.5s \ldots\ldots\ldots A_d = \beta A_{ho}\left(\frac{0.37}{2.5}\right)^{0.8}\left(\frac{2.5}{T}\right)^{1.5}$$

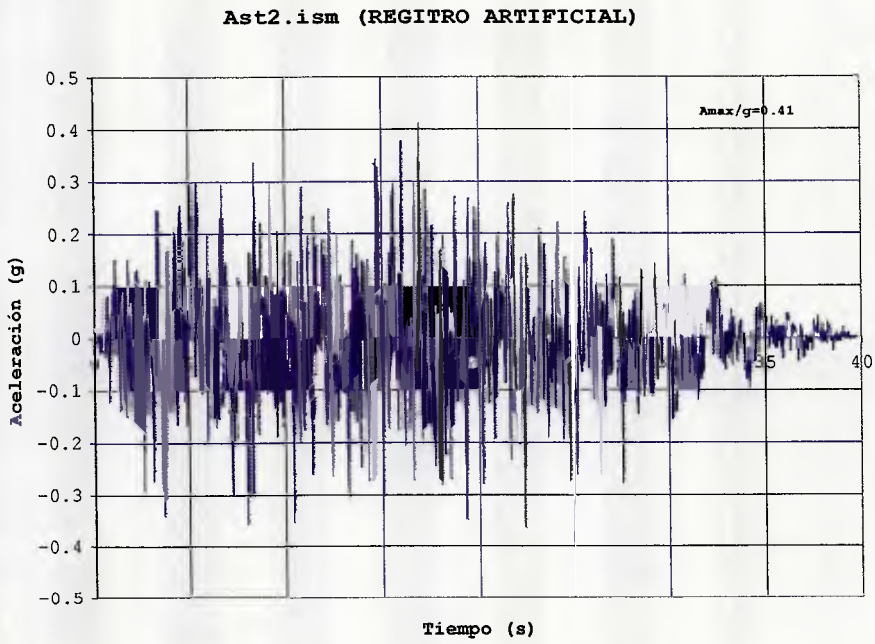
El Factor de amplificación espectral, en función de la fracción de amortiguamiento crítico ς:

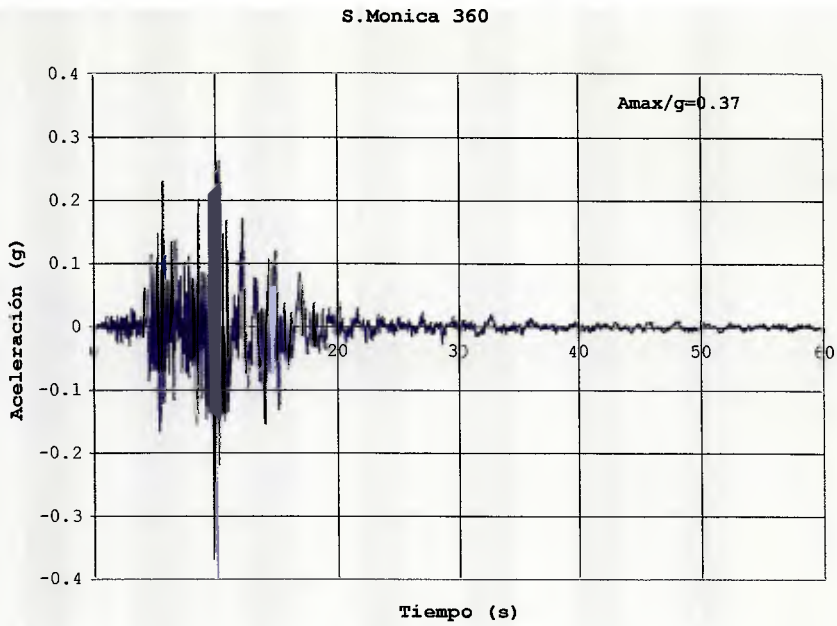
$$\beta = 0.09383 - 0.8129 Ln\left(\frac{\varsigma}{100}\right)$$

2.3 Registros Acelerográficos

A partir del Espectro de Respuesta de las Aceleraciones Horizontales de Diseño es posible generar registros artificiales consistentes con dicho Espectro, utilizando programas como el SIMQKE (MIT, Massachusetts, Gasparini-Vanmarcke).

Los registros sísmicos reales que sean seleccionados para el análisis deben ser representativos del área de interés, la cual puede estar afectada por eventos tanto de fuentes cercanas como lejanas.





2.4 Grado de Severidad de la Excitación

El grado de severidad de los registros acelerograficos (artificiales o reales) puede medirse utilizando la Intensidad Instrumental propuesta por A. Arias, integrando el registro:

$$(2-1) \qquad Ia = \left(\frac{\pi}{2g}\right)\int_0^{to} \ddot{u}_g^2(t)dt$$

La Potencialidad Destructora puede determinarse en forma directamente proporcional a la intensidad de Arias (***Ia***) e inversamente a la intensidad del número de cruces por cero del registro (***Vo***), según la propuesta de R. Araya y R. Saragoni.

$$(2-2) \qquad PD = \frac{I_a}{V_o}$$

Los valores de la Intensidad y Potencialidad Destructora así obtenidos se podrán comparar con los reportados para terremotos cuya destructividad es conocida.

En la Tabla N° 2-1 se muestran los resultados de la aplicación realizada utilizando los registros simulados y reales seleccionados en el proyecto ferroviario del Sistema Caracas – Tuy Medio.

TABLA N° 2-1

EVENTO	ESTACION	Amax/g	DURACION (s)	IA (m/s)	Nuo (cruces/s)	PD (g*E-4)
AST2	SIMULADO	0.41	40	6.58	11.45	51.16
AST3	SIMULADO	0.41	40	6.60	10.35	62.76
AST4	SIMULADO	0.41	40	6.86	10.65	61.63
AST5	SIMULADO	0.41	40	6.95	11.25	55.97
WHITTIER	OBREGON PARK 270	0.407	40	1.05	11.35	8.29
WHITTIER	OBREGON PARK 360	0.428	40	1.26	11.68	9.44
NORTHRIDGE	Sta. MONICA (CH) 90	0.883	60	2.85	5.87	84.34
NORTHRIDGE	Sta. MONICA (CH) 360	0.37	60	1.19	7.17	23.53

REPORTADOS (Araya - Saragoni, 1980)

Pacoima Dam	R	1.27		10.85	11.63	81.74
(1971)	T	1.01		6.52	13.57	36.09
El Centro	NS	0.36		1.97	6.44	48.32
(1940)	EW	0.224		1.40	6.19	37.28

IA: Intensidad de Arias

PD: Pontencialidad Destructora (Araya-Saragoni)

CAPITULO 3. ELEMENTOS BASICOS EN LA SELECCION DE LOS APARATOS DE APOYO

3.1 Generalidades

La selección de los aparatos de apoyo y tipo de elemento de disipación pasiva para los tableros de viaductos ferroviarios se fundamenta en las funciones que deben cumplirse para garantizar la adecuada operación del sistema en condiciones normales y de emergencia, así como bajo situaciones excepcionales a las que pueda dar origen un terremoto severo.

Esencialmente por razones directamente relacionadas con el soporte de la vía férrea no se emplean apoyos que permitan una condición de "flotación" del tablero (norma UIC Code 772-1R).

Aspectos no menos relevantes que deben considerarse en la selección, regulados por las normas, lo constituyen la durabilidad ante el ataque de agentes externos como los biológicos (insectos, hongos u otros), la alteración de las propiedades mecánicas debida a los efectos de envejecimiento del material y los cambios en las propiedades de los materiales originados por el calor e incrementos de temperatura durante el proceso de disipación histerética de la energía.

La estrategia general de diseño considera la protección a los tableros de los viaductos evitando la formación de articulaciones plásticas o falla de algunos de sus componentes, así como de la pérdida de apoyo cuando ocurran los desplazamientos sísmicos extremos.

3.2 Fuerzas Horizontales debidas a la Operación de los Trenes

Las fuerzas horizontales nominales longitudinales y transversales debidas a la operación de los trenes en cada vía, determinadas de acuerdo con las normas (UIC Code 776-1R o el Eurocode 1 Parte 3), normalizadas por el peso permanente mas el removible y el de un tren, alcanzan una magnitud aproximadamente igual a 0.12 y 0.10 respectivamente, mientras que para el Estado Límite de Agotamiento Resistente iguales a 0.16 y 0.13 respectivamente.

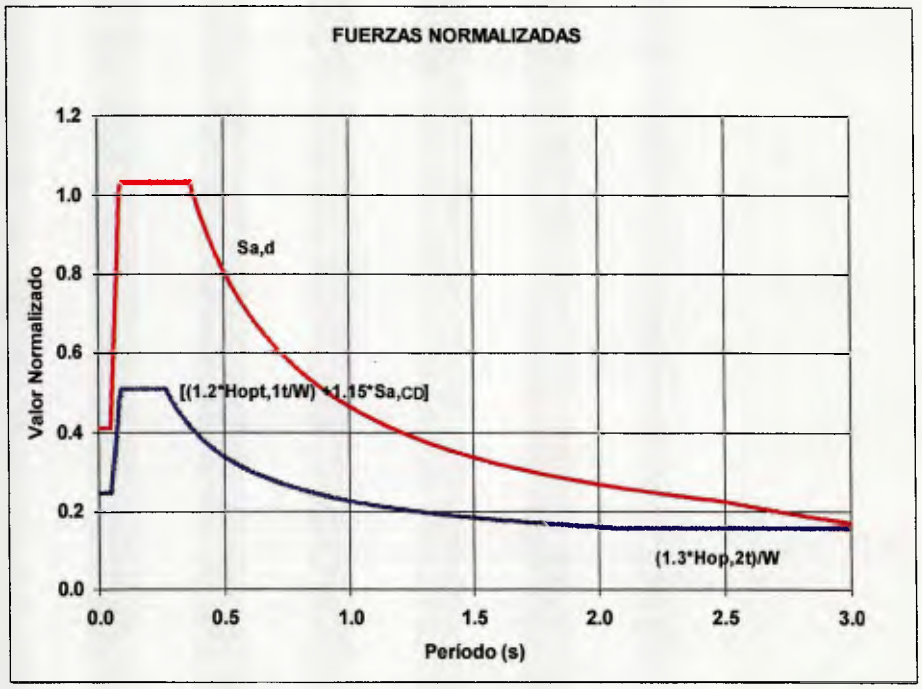
3.3 Disipación de la Energía mediante el Daño Estructural

Si la estrategia de diseño contempla la disipación de la energía mediante el daño estructural, es decir, mediante la formación de articulaciones plásticas en la estructura, la disipación estará limitada por la resistencia demandada para las combinaciones de las acciones (3-1) y (3-2), tal que se garantice la no ocurrencia de daños estructurales durante las condiciones de operación del sistema o la impuesta por un evento con una alta probabilidad de ocurrencia (Sismo de Control de Daños):

(3-1) $Hu = 1.3*(Hop,2t)$

(3-2) $Hu = 1.2*(Hopt,1t) + 1.15*S_{CD}$

Siendo:
Hop,2t: Efectos debidos a las Fuerzas horizontales operativas de dos trenes
Hopt,1t: Efectos debidos a las Fuerza horizontal transversal operativa de un tren
S_{CD}: Efectos debidos al Sismo de Control de Daños
Sd: Efectos debidos al Sismo de Diseño
R: Factor de Reducción de la Respuesta Sísmica



Las condiciones derivadas de los efectos debidos al Sismo de Diseño, representada por la combinación (3-3), quedará en todo caso acotada por la resistencia demandada en las combinaciones (3-1) y (3-2).

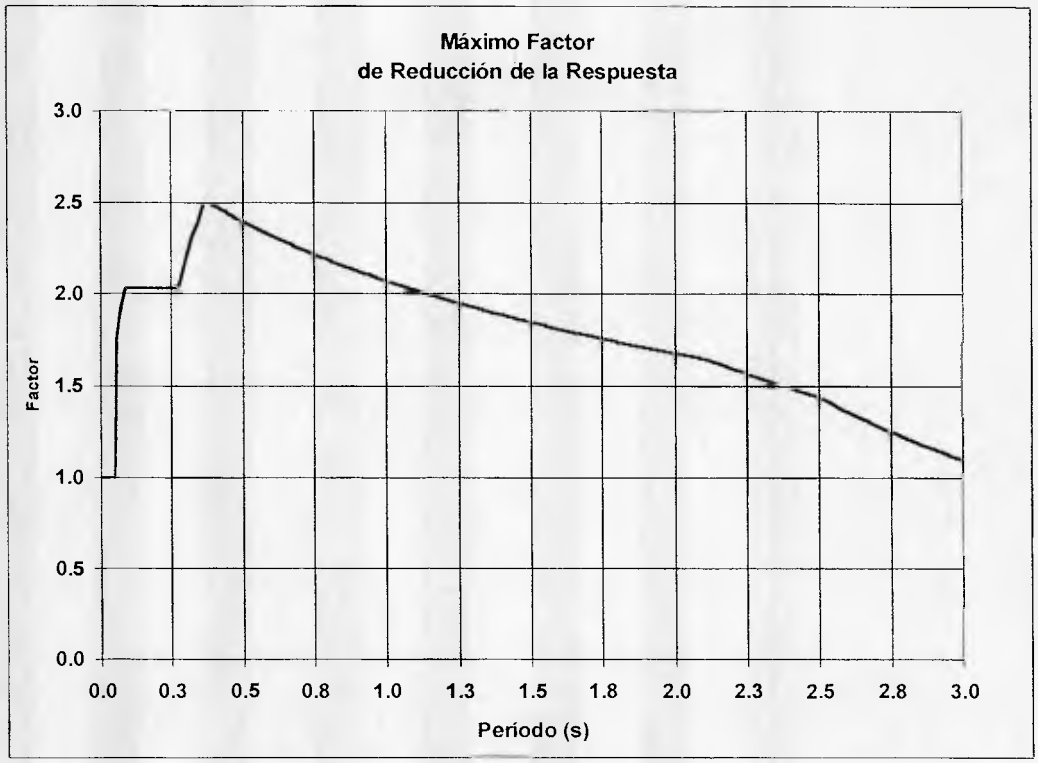
(3-3) $Hu = Hopt,1t + (Sd/R)$

3.4 Factor de Reducción de la Respuesta

Seleccionar un valor global representativo a priori del Factor de Reducción de la Respuesta (R) para cada dirección puede constituir una aproximación inconveniente, especialmente cuando se trata de viaductos irregulares como los que comúnmente se presentan en zonas de montaña; entendiéndose por irregularidad estructural aquella introducida por variaciones importantes en la altura de las pilas.

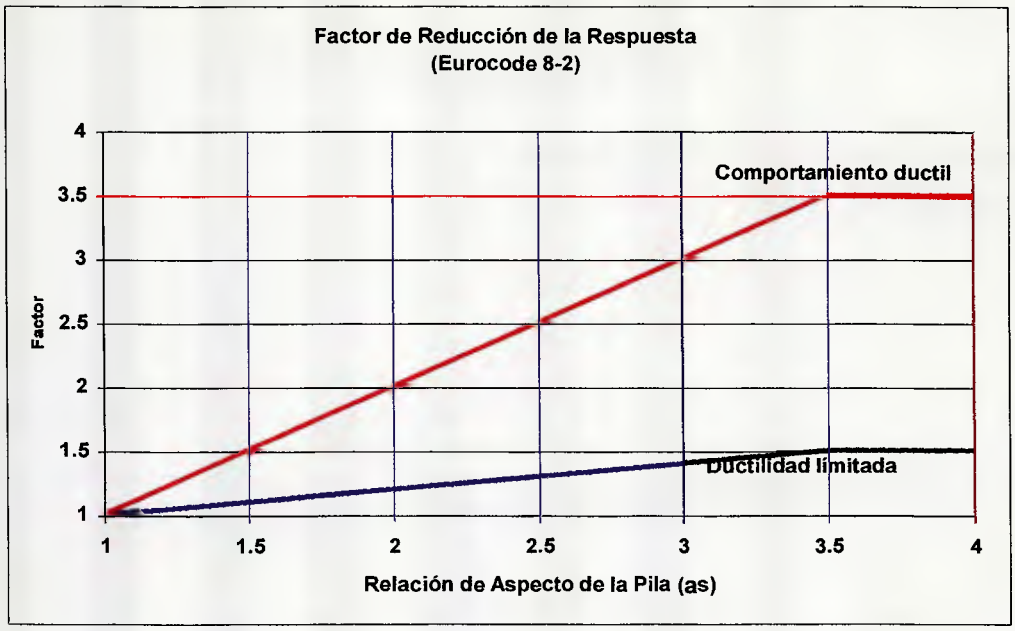
El máximo factor R que podría ser aplicado en el diseño, cuando la disipación de la energía sísmica es mediante el daño estructural, está implícitamente acotado por la relación entre las ordenadas espectrales del Sismo de Diseño y el Valor Normalizado

de las Fuerzas Horizontales, límite a partir del cual se acepta el daño, combinaciones (3-1) y (3-2).



La capacidad para desarrollar esta ductilidad por desplazamiento también dependerá de la relación de aspecto de la pila (Priestley y Park), definida como el cociente de la altura entre la dimensión de la sección transversal en la dirección considerada.

Para pilas de concreto armado, el Eurocode 8-2 indica los valores máximos admitidos para el factor R en función del tipo de elemento estructural, su comportamiento sísmico y la relación de aspecto. Entre las condiciones que deben cumplirse para asegurar la disipación histerética de la energía mediante la formación de articulaciones plásticas está el número de ciclos de amplitud máxima (no inferior a cineo) y la pérdida de resistencia (igual o menor a 0.2 veces la fuerza resistente de diseño).

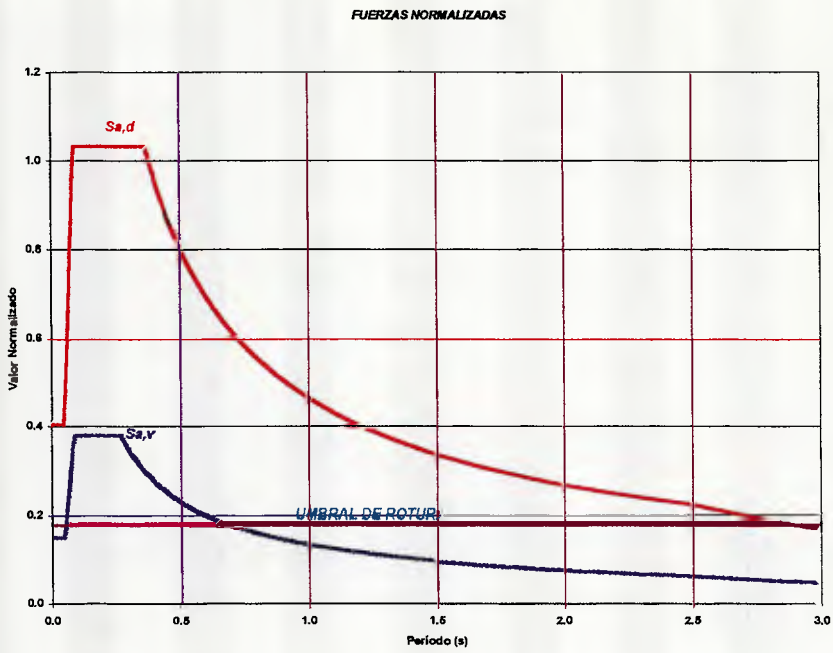


No aceptar la formación de articulaciones plásticas en los tableros de los viaductos implica un comportamiento estructural del viaducto tal que, la disipación de la energía sea mediante su formación en la base de las pilas, mecanismo que usualmente se postula y no se comprueba mediante procedimientos de análisis.

3.5 Disipación de la Energía mediante un Sistema Pasivo

Si el Criterio de Diseño seleccionado contempla introducir un Sistema Disipativo Pasivo (SDP) entre el tablero y la infraestructura (pilas y/o estribos), como el estudiado en este caso, es necesario, por una parte, seleccionar un Umbral de Fuerzas Horizontales (U) que garantice al menos la operatividad de los trenes en ambas vías (3-4), y por otra parte, proveer la capacidad de resistencia demandada por las fuerzas inerciales correspondientes al Sismo de Control de Daños mayoradas por 1.15. El factor de mayoración seleccionado (1.15) corresponde aproximadamente a la relación momento ultimo a momento cedente (Mu/My).

(3-4) $U = 1.5 * H_{op,2t}$



Las características de los aparatos de apoyo para los tableros de los viaductos deben tomar en consideración el funcionamiento en todo momento bajo las condiciones impuestas por las cargas originadas durante la operación de los trenes, las asociadas a la ocurrencia de un evento de intensidad igual al Sismo de Control de Daños, así como la disipativa entre dicho estado y el producido por un evento asociado al Sismo de Diseño. Estas funciones pueden cumplirse mediante la incorporación de elementos de sacrificio calibrados (fusibles), capaces de restringir los movimientos hasta alcanzarse el umbral de rotura de los mismos, a partir del cual se iniciará la disipación de la energía.

La disipación de la energía será realizada mediante elementos tipo viga, como el mostrado en la fotografía N° 3-1, de cuerpo tronco cónico y extremo esférico, de acero inoxidable y austenítico, de la empresa FIP Industriale S.p.A.(Italia). El mecanismo requiere sean combinadas superficies de PTF y acero inoxidable, entre las cuales se produciría fricción.

(3-5) $Hu = Hop,1t + Sd$

Superado el Umbral de Fuerzas Horizontales, debido a la ocurrencia de un evento sísmico, la falla del fusible permitirá a los aparatos iniciar su función disipadora de energía, limitando la magnitud de las fuerzas inerciales en el tablero y las transmitidas a la subestructura.

Foto N° 3.-1

CAPITULO 4. INVESTIGACION EXPERIMENTAL

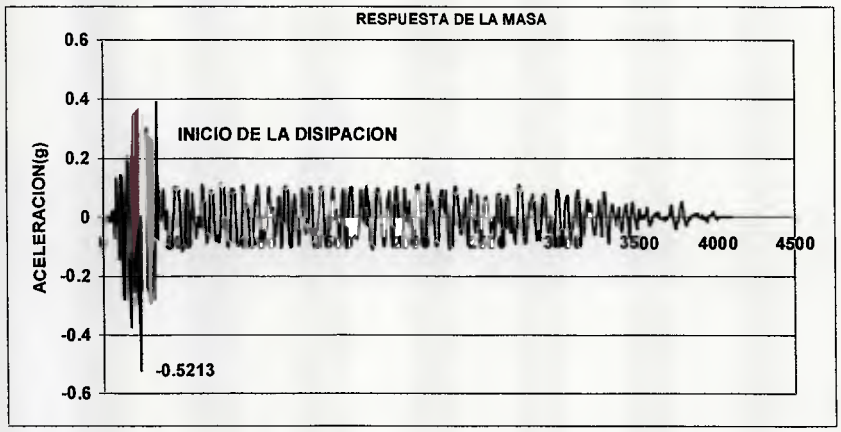
4.1 Modelo de un grado de libertad dinámico

Dentro de programa de investigaciones del sistema disipativo seleccionado se realizaron pruebas sobre una mesa vibratoria de un modelo físico de un grado de libertad dinámico, que incluyó un elemento de sacrificio.

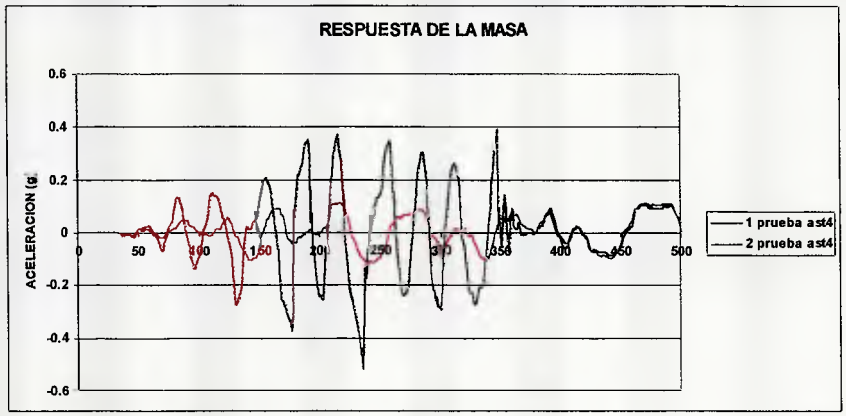
Las pruebas se llevaron a cabo en el ISMES (Bergamo, Italia), el modelo de masa 38765 kg, el elemento disipativo tipo a escala natural caracterizado por una fuerza cedente (Fy) igual a 43 kN, desplazamiento cedente (dy) igual a 5 mm, desplazamiento máximo de diseño (dmax) igual a 65 mm y relación rigidez post-elástica a elástica igual a 0.027.

La Foto N°1 muestra el elemento disipativo y la N°2 una vista general del modelo sobre la mesa vibratoria.

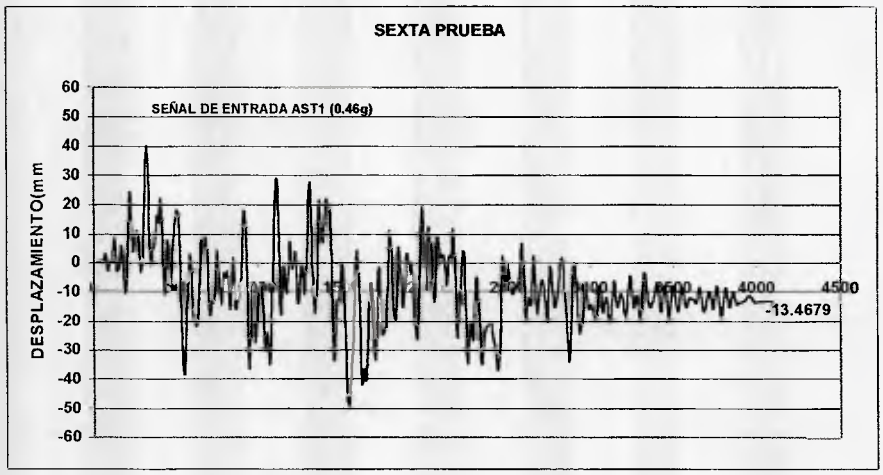
El registro de las aceleraciones de la masa obtenido durante la primera prueba, en la cual se incluyó un elemento de sacrificio, refleja la disipación después de producirse la falla del mismo.

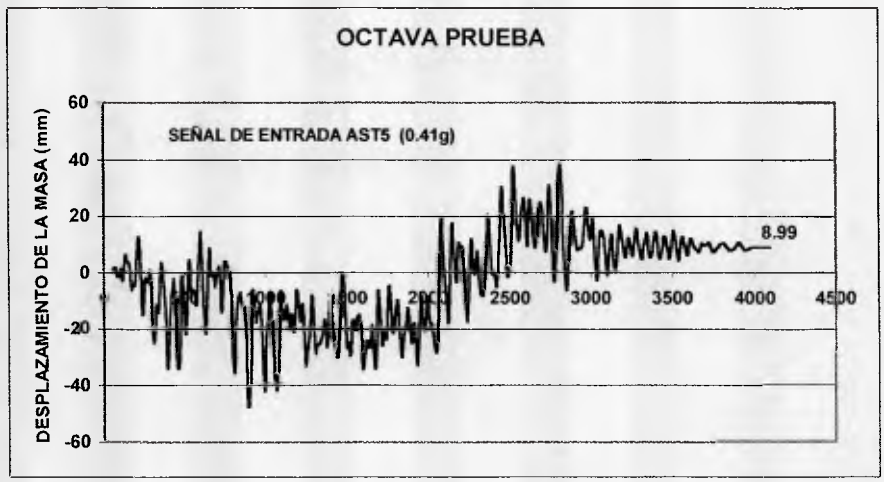


La comparación de la respuesta de los primeros cinco segundos registrados durante la primera y segunda prueba, esta última sin fusible, permite destacar que las respuestas

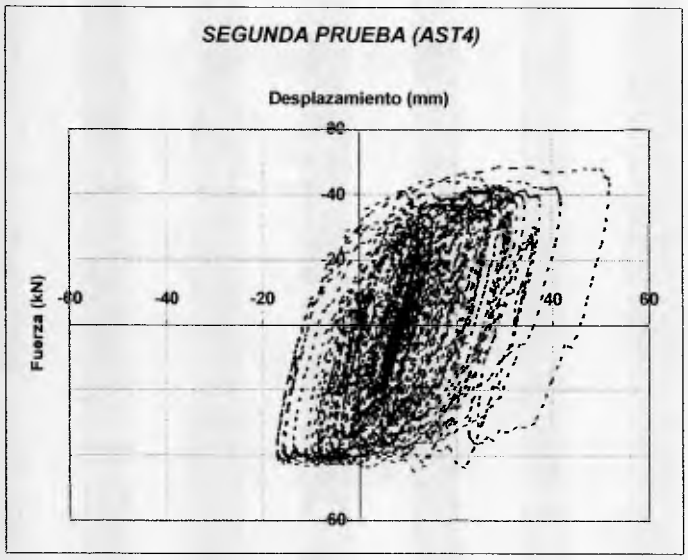


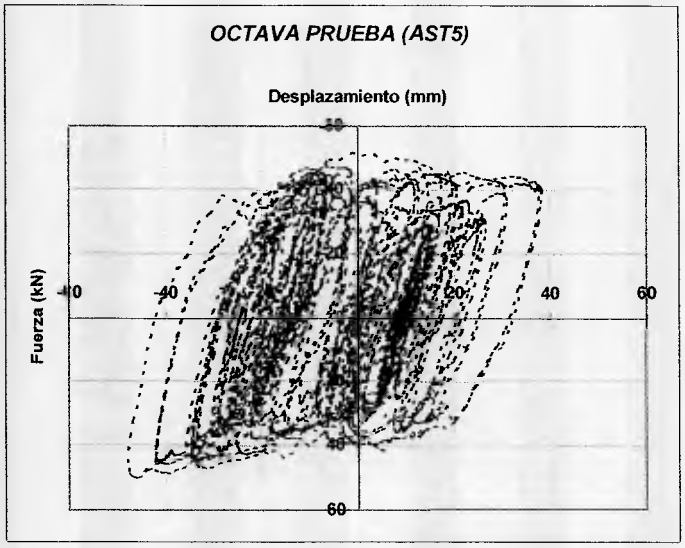
coinciden después de ocurrir la falla del elemento de sacrificio.





Las respuestas registradas durante la secuencia de pruebas realizadas, ocho en total, sobre el mismo elemento disipativo muestran un comportamiento estable. Los registros de la historia de los desplazamientos de la masa correspondientes a la quinta y sexta prueba indican que no se ha producido la degradación de las propiedades del elemento disipativo ensayado. Los diagramas fuerza-desplazamiento de la segunda y octava prueba confirman dicha estabilidad.



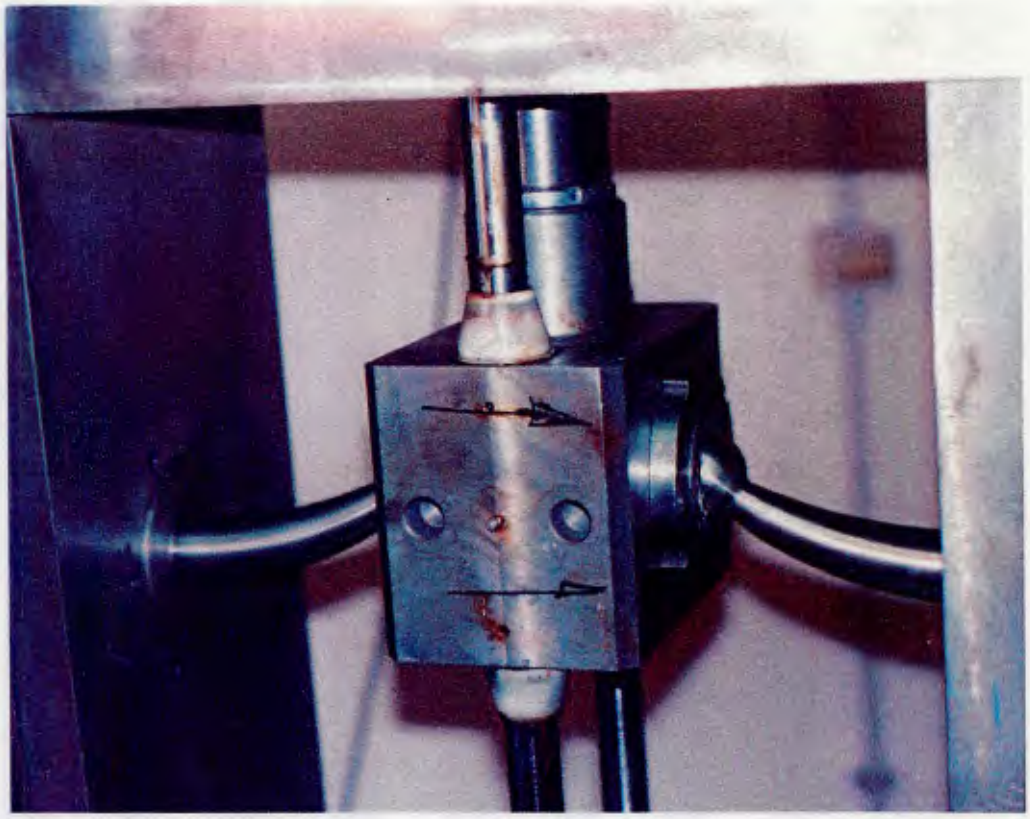


En la Foto N°3 se muestra el elemento disipativo después de haberse realizado el conjunto de pruebas y en la N°4 se puede ver el elemento de sacrificio.

4.2 Propiedades del Elemento Disipativo

Las propiedades de los elementos disipativos utilizados en el diseño se determinan mediante pruebas individuales de aplicación de ciclos de desplazamiento reversibles de amplitud constante. Al espécimen tipo se le imponen tres (3) ciclos de amplitud igual al 25%, tres (3) al 50% y tres (3) al 75% del desplazamiento máximo de diseño. La amplitud igual al 100% del desplazamiento máximo de diseño se aplica hasta alcanzarse la falla. La prueba realizada sobre uno de los especímenes se incluye con el fin de ilustrar las características del comportamiento.

Estas pruebas son requeridas por las normas que actualmente incluyen sistemas disipativos, tal es el caso del Eurocode 8-2 y el NEHRP Guidelines.

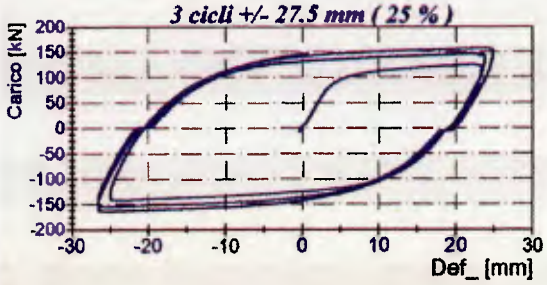


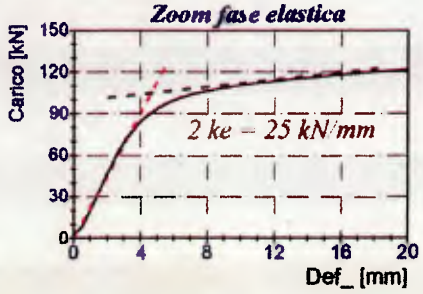
4.3 Propiedades del Elemento de Sacrificio

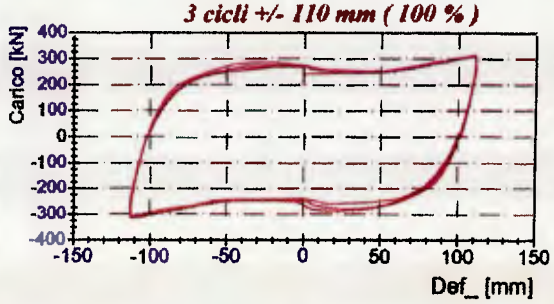
Las propiedades de los elementos de sacrificio (fusibles), cuyo comportamiento debe tender a ser elástico-frágil, son determinadas mediante pruebas de carga monotónicas creciente.

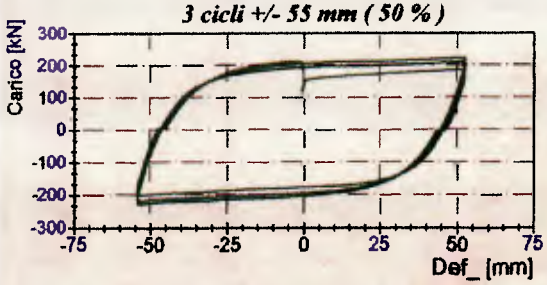
FIP INDUSTRIALE	Consorcio Contuy - Caracas (Ven)	Data: 30/06/2000 Esecutore: Ruggero D. Data ref.: OIUT0050 Graph. ref.: Pioli08

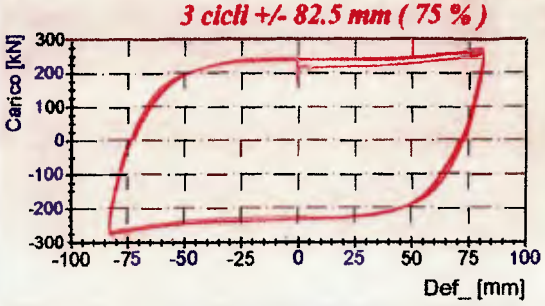
Determinazione della capacità dissipativa su coppia di pioli "2+" rif. OI UT 00050











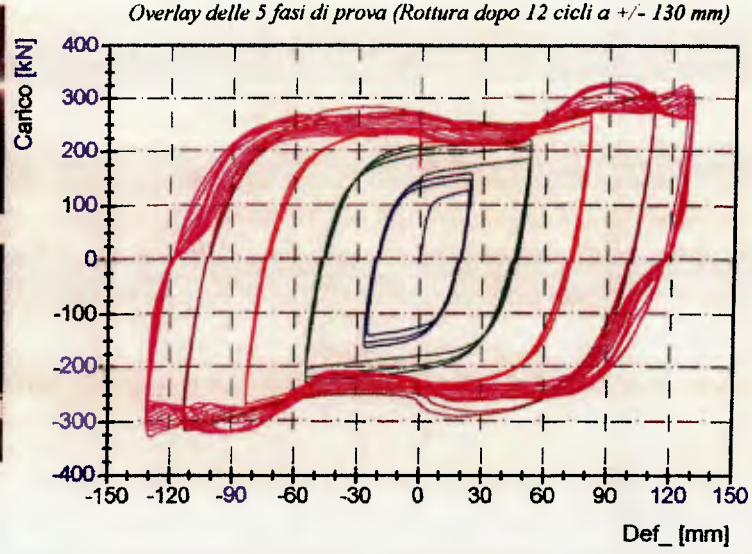


FOTO N°1. Elemento Disipativo.

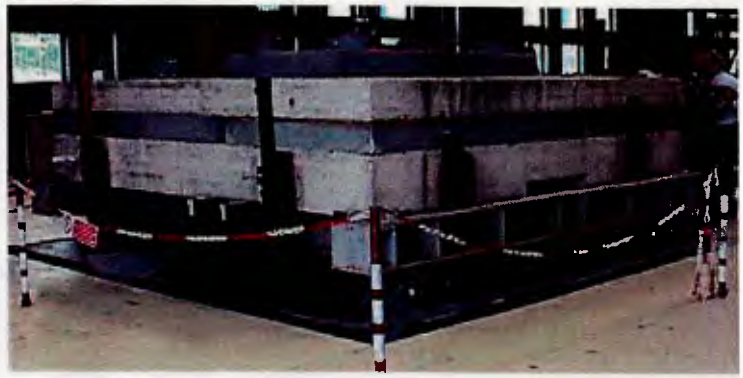


FOTO N°2. Modelo sobre Mesa Vibratoria

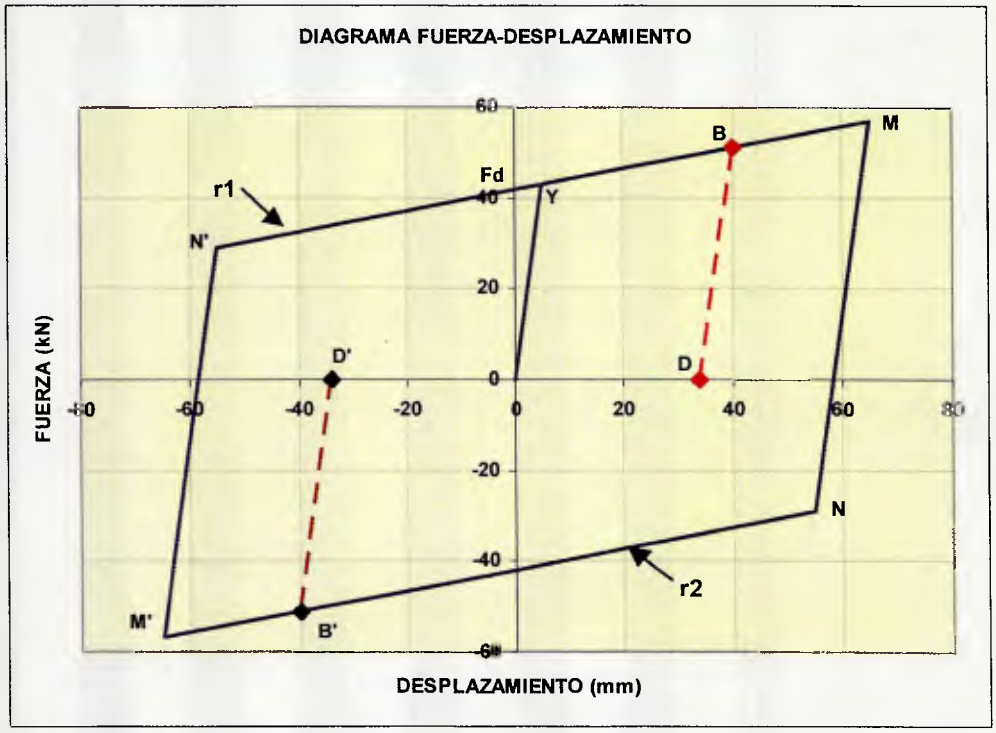
FOTO N°3. Elemento Disipativo
despues de finalizadas las Pruebas

FOTO N°4. Elemento de Sacrificio

CAPITULO 5. MODELO CONSTITUTIVO

5.1 Comportamiento bilineal

El modelo constitutivo del elemento de disipación pasiva se ha representado por la curva fuerza–desplazamiento transversal, su comportamiento es idealizado en forma bilineal. Los puntos donde se inicia la descarga, como el **B** o el **M**, así como aquellos donde se inicia la recarga (**B'**o **M'**) están asociados a los valores máximos y mínimos de la función desplazamiento ***X(t)***, que ocurren cuando la velocidad de la respuesta es cero. De tal manera que, el paso de un proceso de carga a descarga o viceversa,



dependerá muy especialmente de la excitación, como se desprende de la ecuación del equilibrio dinámico.

$$(5-1) \qquad F = -m[\ddot{X}_g(t) + \ddot{X}(t)]$$

La figura muestra el lazo histerético asociado al máximo desplazamiento de diseño, representado por las coordenadas del punto M (*Xmax* , *Fmax*). El punto de corte de la recta r1 con el eje de las ordenadas corresponde al llamado Valor Característico de la Fuerza (***Fd***).

$$(5-2) \qquad F_d = F_y + \gamma K_o X_y$$

El punto Y corresponde a la cedencia del material (*Xy* , *Fy*).

Ko: Rigidez Elástica (*Fy/Xy*)

γKo: Rigidez Post-elástica

Ecuación de la Recta r1:

$$(5-3) \qquad F - F_y = \gamma K_o (X - X_y)$$

Ecuación de la Recta r2:

$$(5-4) \qquad F + F_y = -\gamma K_o (X - X_y)$$

5.2 Modelo propuesto por Ozdemir

Las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas experimentalmente, como se ilustró en el capítulo 4, no son exactamente reproducidas por el modelo constitutivo bilineal, Ozdemir propone un modelo general capaz de ajustarse más fielmente a los resultados experimentales.

$$(5-5) \qquad \frac{\dot{F}}{F_y} = \frac{\dot{X}}{X_y} - \left|\frac{\dot{X}}{X_y}\right| \cdot \left(\frac{F-S}{F^*}\right)$$

$$(5-6) \qquad \frac{\dot{F}^*}{F_y} = \beta \cdot \left|\frac{\dot{X}}{X_y}\right| \cdot \left(\frac{F-S}{F^*}\right)$$

$$(5-7) \qquad S = \alpha_1 \cdot \left(\frac{\dot{X}}{X_y} - \frac{\dot{F}}{F_y}\right) + \alpha_2 \cdot \left(\frac{\dot{X}}{X_y} - \frac{\dot{F}}{F_y}\right)^n$$

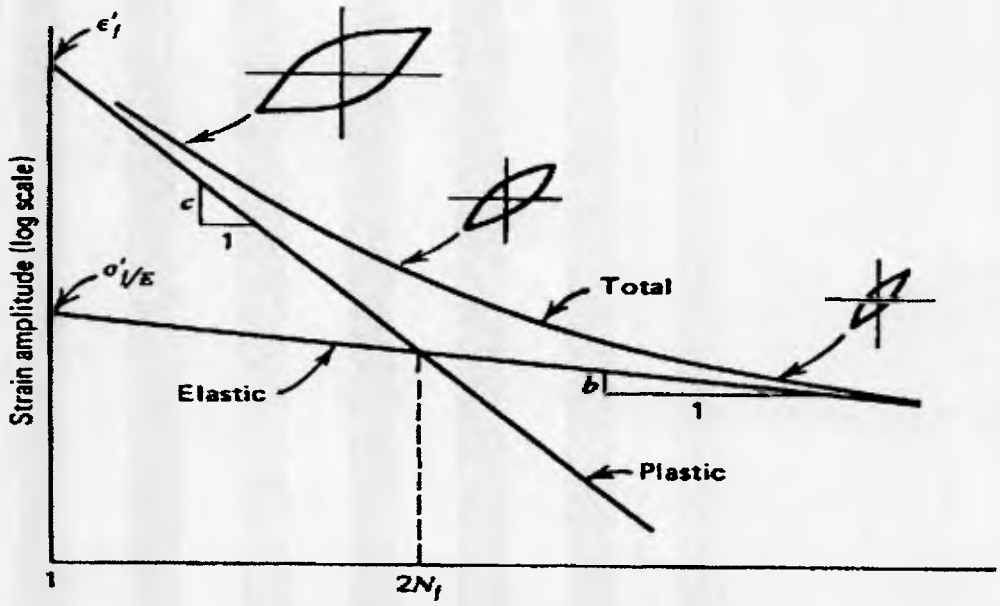
Donde n, β, α_1 y α_2 se determinan a partir de los ensayos de especímenes sometidos a ciclos reversibles de amplitud igual al máximo desplazamiento de diseño, y las constantes asociadas a la cedencia del material F_y, X_y del primero de los ciclos.

5.3 Falla por Fatiga

Los modelos constitutivos representados por la clásica relación tensión-deformación que caracteriza el comportamiento de los metales en el rango inelástico cuando las cargas son aplicadas cíclicamente, no incluyen el concepto de falla. Sin embargo, los resultados experimentales indican que el material sujeto a la aplicación de ciclos reversibles de carga frecuentemente falla por fatiga, después de haber transcurrido un cierto número de ciclos (*Nf*). El mecanismo envuelve la formación e interconexión de microgrietas o fracturas que eventualmente conducirán a la falla. Cuando la falla ocurre para un número limitado de excursiones en el rango inelástico, el fenómeno se conoce como "fatiga de bajo ciclaje".

La relación entre la componente plástica de las deformaciones ($\Delta\varepsilon_p/2$) y el número de ciclos que conduce a la falla ($2N_f$) puede describirse mediante una ley de potencia como la propuesta por Mason-Coffin.

$$\frac{\Delta\varepsilon p}{2} = \varepsilon'_f (2Nf)^c \qquad (5-8)$$



(a)

(R. W. Hertzverg)

5.4 Falla por Acumulación de Daño

El modelo de falla por acumulación de daño postula que en cada excursión al rango inelástico o ciclo de respuesta se impone un incremento del daño, el cual dependerá de la amplitud pico de la excursión. Cada ciclo sucedido impondrá un daño adicional, y la falla ocurrirá cuando sea alcanzado el 100% del daño. Cuando la amplitud de los ciclos es constante, se observa que cuanto mayor sea la amplitud el número de ciclos necesarios para producir la falla será menor.

Cuando la amplitud de los ciclos no es constante, como en el caso de la acción sísmica, se debe realizar alguna hipótesis adicional, como puede ser postular una acumulación de daño por fatiga del tipo lineal, regla de Palmgren-Miner, donde se dice que la falla ocurrirá cuando el daño $D \geq 1$.

$$(5-9) \qquad D=\sum_i \frac{ni}{N_{fi}}$$

ni es el número de ciclos de la respuesta cuya amplitud es igual a ***Ai***, y ***Nfi*** el número de ciclos de dicha amplitud que conducirían a la falla por fatiga.

La vida útil del elemento disipativo dependerá muy especialmente de la máxima deformación de diseño seleccionada. Durante la ocurrencia de un terremoto severo, como el de diseño, no debe agotarse la vida útil del elemento disipativo, ya que las réplicas que comúnmente suceden después del evento impondrá un daño adicional.

Por esta razón, códigos como el Eurocode 8-2 y NEHRP Guidelines plantean la realización de ensayos de caracterización, y hacen un énfasis muy especial en el mínimo número de ciclos y amplitud que al menos deben cumplirse.

5.5 Otras medidas de la eficiencia.

La eficiencia del elemento de disipación puede medirse en las curvas fuerza-desplazamiento de diferentes maneras, algunas de ellas se expresan seguidamente.

MAXIMA DUCTILIDAD DISPONIBLE:

$$(5-10) \qquad \mu=\frac{X_{max}}{X_y}$$

RENDIMIENTO:

$$(5-11) \qquad \eta=\frac{AREA-EFECTIVA}{4\,X_{max}\,F_{max}}$$

AMORTIGUAMIENTO EFECTIVO:

$$(5-12) \qquad \beta=\frac{2}{\pi}\eta$$

CAPITULO 6. METODOS DE ANALISIS DINAMICO

6.1 Generalidades

La estructura se modela en forma discreta mediante elementos finitos, usualmente unidimensionales y por un número de masas apropiado que definen las coordenadas asociadas a los grados de libertad dinámicos. El proceso de síntesis estructural conducirá al sistema de ecuaciones diferenciales del movimiento, cuya forma es bien conocida.

$$(6-1) \qquad M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\{1\}\,\ddot{x}_g(t)$$

Donde M, C y K representan la matriz de masa, amortiguamiento y rigidez de la estructura.

6.2 Sistemas Lineales

En estructuras cuyo comportamiento es lineal, mediante el método de superposición modal, el problema puede reducirse a la determinación de los autovalores (ωi) y autovectores (ϕi) del sistema de ecuaciones, de manera que:

$$(6-2) \qquad K\phi = \omega^2 M\phi$$

$$(6-3) \qquad \Phi = [\phi_1 \phi_2 \ldots\ldots \phi_n]$$

Mediante una transformación de coordenadas se desacopla dicho sistema de ecuaciones, tal que se disponga de una ecuación para cada modo de vibración, cuya forma corresponda a la de un oscilador de un grado de libertad.

$$(6-4) \qquad x(t) = \Phi y(t)$$

$$(6-5) \qquad \ddot{y}_i(t) + 2\zeta_i \omega_i \dot{y}_i(t) + \omega_i^2 y_i(t) = -\Gamma_i \ddot{x}_g(t) = \ddot{y}_{gi}(t)$$

El factor de participación modal viene expresado por:

$$(6-6) \qquad \Gamma_i = \frac{\phi_i^T M\{1\}}{\phi_i^T M \phi_i}$$

La respuesta yi(t) puede ser calculada mediante la integración de cada una de las ecuaciones correspondientes al modo ***i***, evaluando la integral de Duhamel tal que:

$$(6\text{–}7) \qquad y_i(t) = \frac{1}{\varpi_i}\int_0^t \ddot{y}_{gi}(\tau) e^{-\zeta_i \omega_i (t-\tau)} sin\,\varpi_i (t-\tau) d\tau + e^{-\zeta_i \omega_i t}(\alpha_i sin\,\varpi_i t + \beta_i \cos \varpi_i t)$$

Donde la frecuencia de vibración amortiguada de cada modo se define por:

$$(6-8) \qquad \varpi_i = \omega_i \sqrt{1-\zeta_i^2}$$

La respuesta ***x(t)*** se determina mediante la superposición de las correspondientes a cada modo de vibración:

$$(6-9) \qquad x_j(t) = \sum_{i=1}^{n} \phi_i y_i(t)$$

Otro procedimiento para determinar la respuesta sería el de emplear el espectro de pseudo-aceleraciones, cuyas ordenas ***S(Ti, ζi)*** corresponden al período natural ***Ti*** y a la relación de amortiguamiento ***ζi***, que puede designarse por ***Si***; tal que la máxima respuesta para cada modo ***i*** es expresada por:

$$(6-10) \qquad x_i = \left(\frac{\Gamma_i}{\omega_i^2}\right) \phi_i S_i$$

La respuesta más probable de la estructura viene dada por la combinación de las máximas respuestas de cada modo (***ri***) de vibración, la cual puede realizarse mediante la regla de combinación cuadrática completa conocida comúnmente por las siglas CQC:

$$(6-11) \qquad r^2 \cong \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} \rho_{ij} r_i r_j$$

$$(6-12) \qquad \rho_{ij} = \frac{8\zeta_i^2 (1 + a_{ij}) a_{ij}^{3/2}}{(1 - a_{ij}^2) + 4\zeta^2 a_{ij} (1 + a_{ij})^2}$$

$$(6-13) \qquad a_{ij} = \frac{\omega_i}{\omega_j}$$

6.3 Sistemas No Lineales

La respuesta dinámica de estructuras no lineales debe preferentemente determinarse en el dominio del tiempo, mediante la integración directa del sistema de ecuaciones diferenciales del movimiento, utilizando algoritmos numéricos como el método β de Newmark o θ de Wilson. Este procedimiento también puede aplicarse a sistemas lineales, aun cuando ciertamente demandaría un mayor esfuerzo de cálculo.

De una manera general, los elementos de disipación pasiva pueden representarse por una función lineal del vector de aceleraciones, velocidades y desplazamiento.

$$(6-14) \qquad R_{dp} x(t) = M_{dp} \ddot{x}(t) + C_{dp} \dot{x}(t) + K_{dp} x(t)$$

En ese caso las matrices de masa (M), amortiguamiento (C) y rigidez (K) serán iguales a la suma de las correspondientes a la estructura y al sistema de disipación pasivo.

$$M = M_{est} + M_{dp} \tag{6-15}$$

$$K = K_{est} + K_{dp} \tag{6-16}$$

$$C = C_{est} + C_{dp} \tag{6-17}$$

La forma de la ecuación del movimiento no se altera.

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = -M\{1\}\ddot{x}_g(t) \tag{6-19}$$

En particular, el sistema de disipación pasivo presentado puede ser representado como una función lineal del vector desplazamiento, ya que la masa y el amortiguamiento propio no es significativo.

Programas de computación como el DAIN-2DX (Kanaan y Powell, 1993), IDARC (Nagarajaiah, Reinhorn y Constantinou, 1991) y SAP2000 están orientados para aplicaciones en ingeniería estructural, mientras que para propósitos más generales se dispone de programas como ABAQUS, ADINA y NASTRAN.

En general se fundamentan en el método de la aceleración constante:

$$\ddot{x} = \frac{1}{2}(\ddot{x}_0 + \ddot{x}_1) \tag{6-20}$$

$$x = x_0 + \int_0^t \dot{x}dt \tag{6-21}$$

$$\dot{x} = \dot{x}_0 + \int_0^t \ddot{x}dt \tag{6-22}$$

$$\dot{x}_1 = \dot{x}_0 + \ddot{x}_0\frac{\Delta t}{2} + \ddot{x}_1\frac{\Delta t}{2} \tag{6-23}$$

$$x_1 = x_0 + \dot{x}_0\Delta t + \ddot{x}_0\frac{\Delta t^2}{4} + \ddot{x}_1\frac{\Delta t^2}{4} \tag{6-24}$$

$$\Delta x = x_1 - x_0 \tag{6-25}$$

$$\Delta\dot{x} = \dot{x}_1 - \dot{x}_0 \tag{6-26}$$

$$\Delta\ddot{x} = \ddot{x}_1 - \ddot{x}_0 \tag{6-27}$$

(6 – 28) $$\Delta\dot{x} = -2\,\dot{x}_0 + \Delta x\,\frac{2}{\Delta t}$$

(6 – 29) $$\Delta\ddot{x} = -2\,\ddot{x}_0 - \dot{x}_0\frac{4}{\Delta t} + \Delta x\,\frac{4}{\Delta t^2}$$

Del equilibrio dinámico se desprende:

(6 – 30) $$[M]\{\Delta\ddot{x}\} + [C]\{\Delta\dot{x}\} + [K]\{\Delta x\} = \{\Delta P\}$$

(6 – 31) $$(\frac{4}{\Delta t^2}[M] + \frac{2}{\Delta t}[C] + [K])\{\Delta x\} = \{\Delta P\} + [M]\{2\,\ddot{x}_0 + \dot{x}_0\frac{4}{\Delta t}\} + [C]\{2\,\dot{x}_0\}$$

(6 – 32) $$[K^*] = [K] + \frac{2}{\Delta t}[C] + \frac{4}{\Delta t^2}[M]$$

(6 – 33) $$[K^*]\{\Delta x\} = \{f^*(t_1)\}$$

(6 – 34) $$g(\Delta x) = [M]\{\Delta\ddot{x}\} + [C]\{\Delta\dot{x}\} + [K]\{\Delta x\} - \Delta P = 0$$

(6 – 35) $$[K^*]_{(n)} = (\frac{\partial g}{\partial x})_{(n)}$$

La solución de este sistema de ecuaciones no lineal se obtiene aplicando el método de Newton-Raphson.

6.4 Balance de Energía

Los diferentes términos de energía pueden ser definidos integrando la ecuación del movimiento. El balance de la energía impuesta a la estructura por la excitación sísmica (***Eug***) viene dado por la suma de la contribución individual de la energía cinética relativa de la masa (***Ek***), la energía disipada por el amortiguamiento inherente a la estructura usualmente supuesto viscoso (***ED***), la energía de deformación (***Es***) y la energía del sistema de disipación pasivo (***Edp***).

(6-36) $$\boldsymbol{Eug = Ek + ED + Es + Edp}$$

Energía impuesta por la excitación sísmica:

(6 – 37) $$E_{ug} = \int \dot{x}_g^T M dx$$

Energía cinética:

(6–38) $$E_K = \frac{1}{2}\dot{x}^T M\dot{x}$$

Energía disipada por el amortiguamiento inherente a la estructura:

(6 – 39) $E_D = \int \dot{x}^T C \dot{x} dt$

Energía de deformación acumulada en el sistema:

(6 – 40) $E_s = \int x^T K dx$

Energía disipada por el elemento pasivo:

(6–41) $E_{dp} = \int (K_{dp} x)^T dx$

CAPITULO 7. RESULTADOS NUMERICOS

7.1 Generalidades.

En este capítulo se presentan los resultados del análisis realizado para el viaducto mostrado en la Figura 7-1, conformado por cinco (5) luces de 50 m, tablero de acero (dos vigas doble T) de sección compuesta para dos (2) vías, pilas de concreto armado de sección rectangular hueca cuya altura varía entre 20 y 35 m fundadas mediante pozos de 15 m de profundidad.

En la Figura 7-2 se indica la configuración de los vínculos de apoyo de los tableros para la etapa operativa y la correspondiente a la etapa donde se realiza la disipación de la energía iniciada después de ocurrir la falla de los elementos de sacrificio (fusibles).

7.2 Modelo Matemático.

El tablero, las pilas y los pozos de fundación de los viaductos se modelaron mediante elementos finitos unidimensionales y masas discretas de comportamiento elástico lineal, mientras que los componentes de disipación pasiva (huso, spindle) fueron simulados por elementos de comportamiento elasto-plástico bilineal y las superficies de deslizamiento (PTFE) de los aparatos mediante elementos de comportamiento rígido-plástico perfecto. El medio circundante al pozo de fundación se incorporó en el modelo empleando para ello elementos de conexión simple (resortes) con comportamiento elasto-plástico perfecto.

El análisis dinámico no lineal en el dominio del tiempo, para la excitación sísmica representada por un registro acelerografico simulado, se realizó utilizando el programa DRAIN-2DX (Kanaan y Powell, 1993). Estos análisis permitieron establecer las demandas de resistencia y las máximas deformaciones.

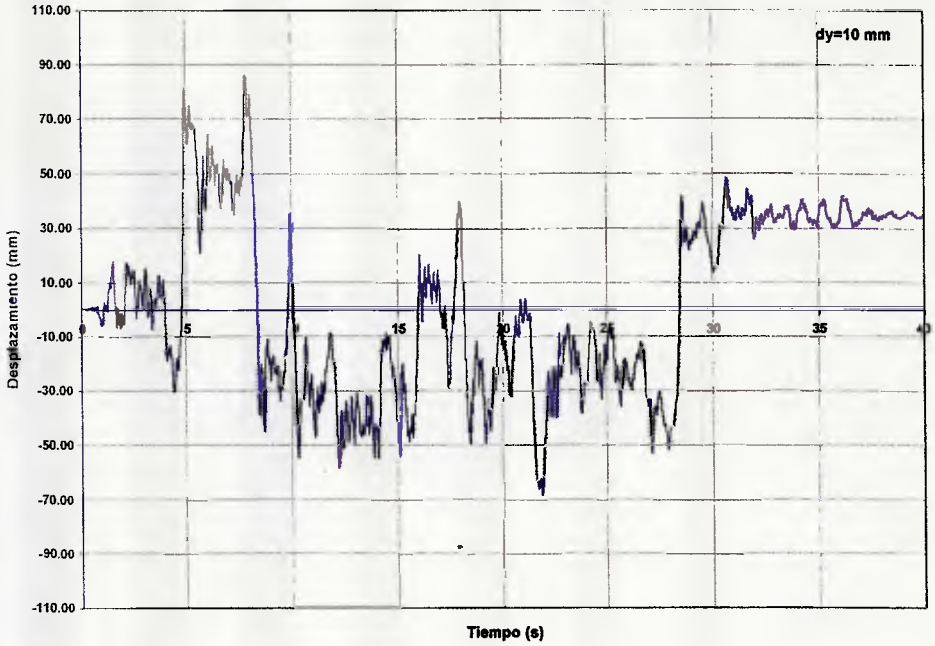
7.3 Respuesta Dinámica.

Para ilustrar la respuesta dinámica de los diferentes componentes estructurales se ha seleccionado un conjunto de resultados que permiten tal objetivo.

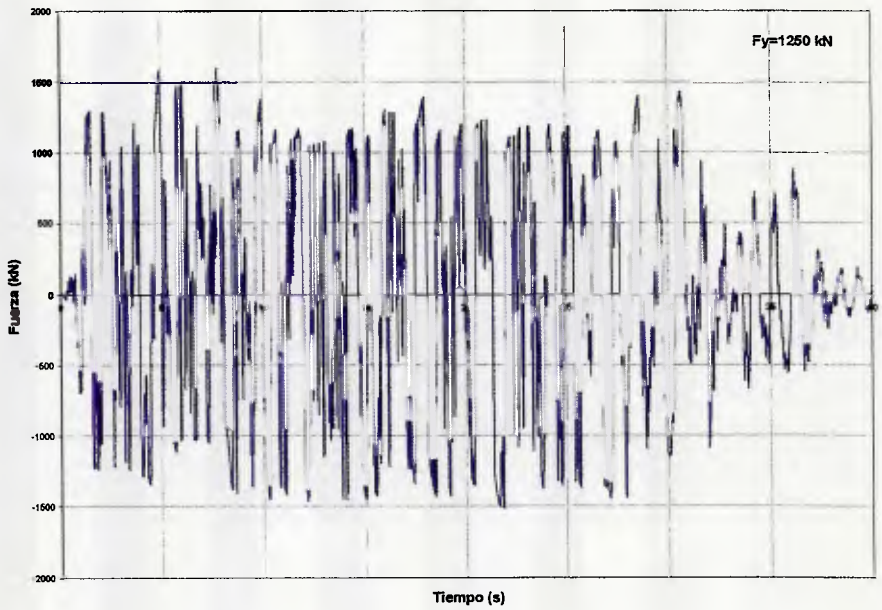
7.3.1 Respuesta del Disipador Pasivo.

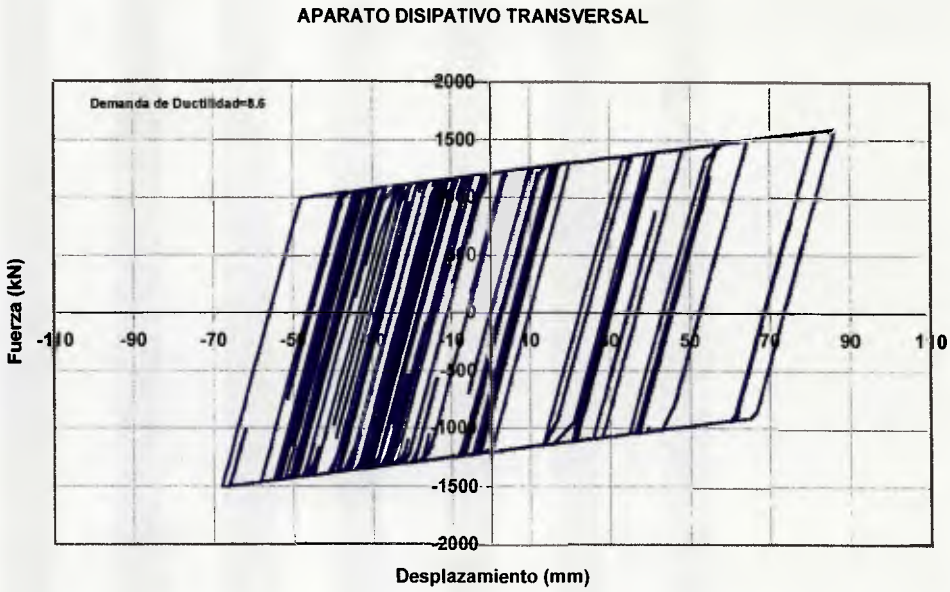
La respuesta de los elementos de disipación pasiva, en cualquiera de las direcciones (longitudinal o transversal), puede representarse mediante la historia de los desplazamientos o de las fuerzas, así como por el diagrama fuerza-desplazamiento. En la historia de las fuerzas se puede observar como la respuesta del sistema disipativo permite uniformar la magnitud de la misma. Seguidamente se muestran las figuras que ilustran estas formas de representación.

APARATO DISIPATIVO TRANSVERSAL



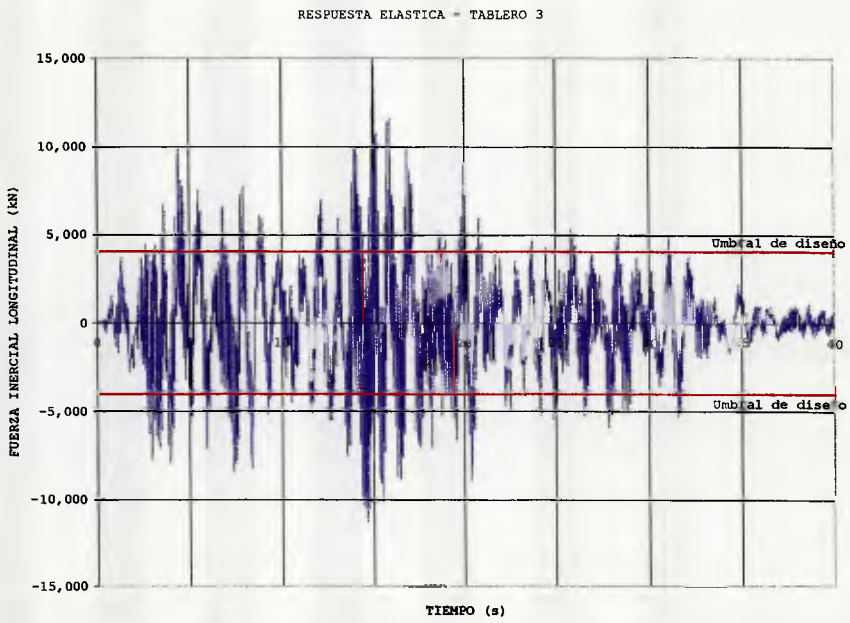
APARATO DISIPATIVO TRANSVERSAL



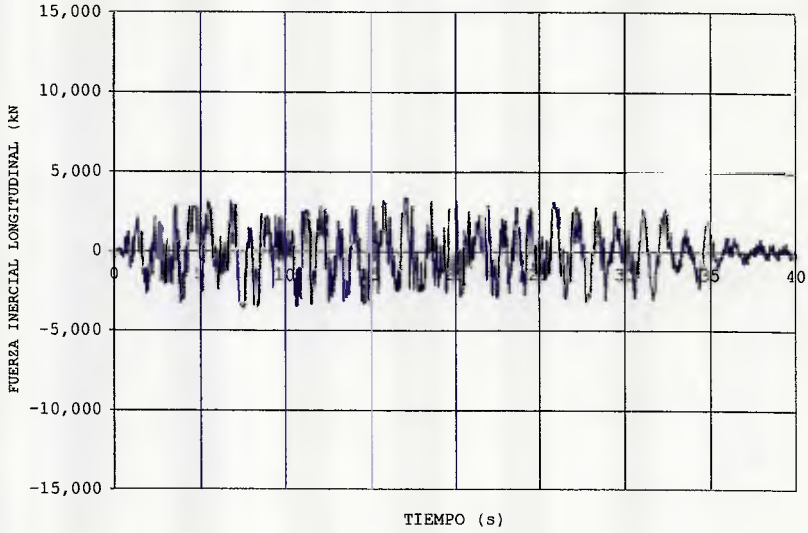


7.3.2 Fuerza Inercial del Tablero.

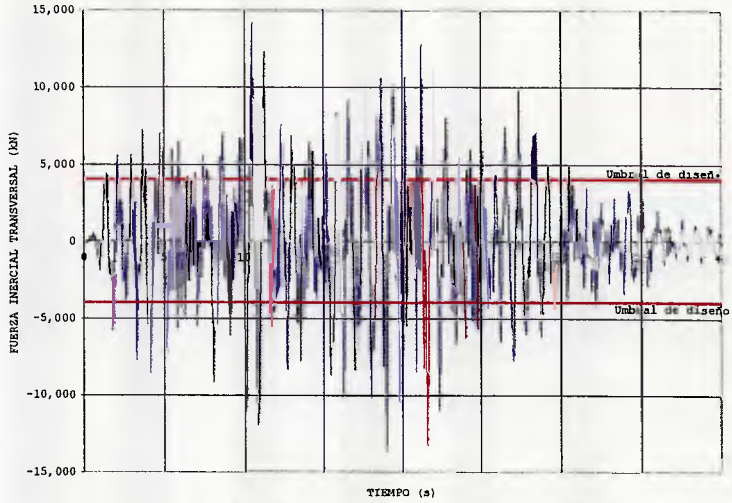
En las siguientes figuras se muestra la historia de la fuerza inercial total del tercer tablero, longitudinal y transversal, y se puede observar cómo mediante el medio de disipación pasiva se puede controlar la máxima magnitud de la misma. La respuesta elástica supera ampliamente el umbral establecido para el diseño.

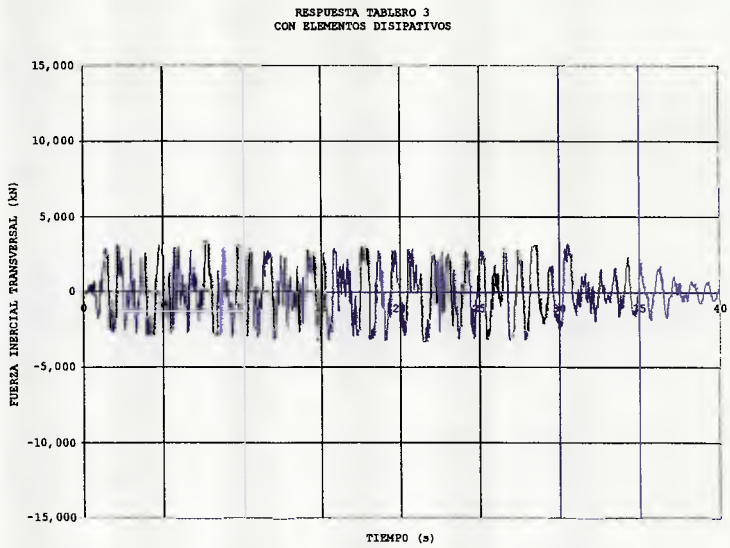


RESPUESTA TABLERO 3
CON ELEMENTOS DISIPATIVOS



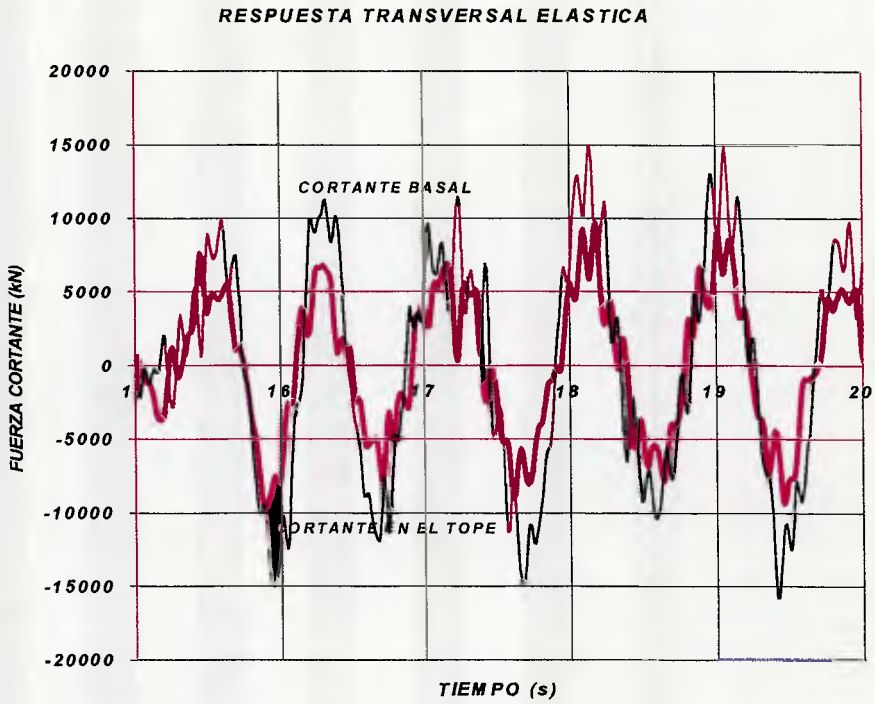
RESPUESTA ELASTICA - TABLERO 3

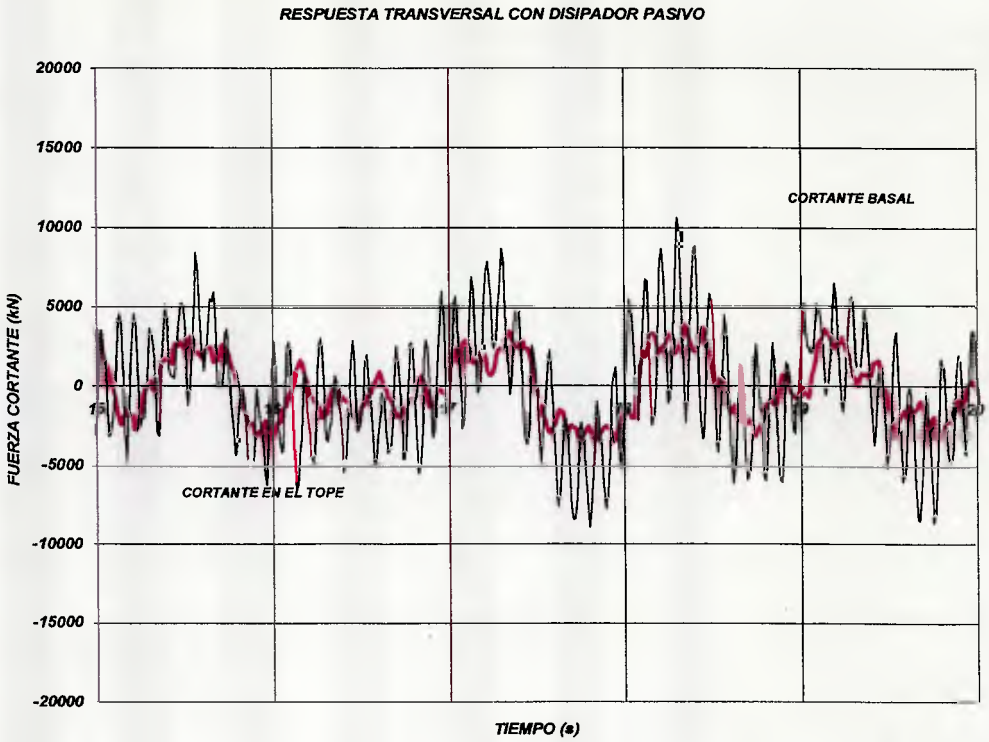




7.3.3 Fuerza Cortante en el Tope y Base de las Pilas.

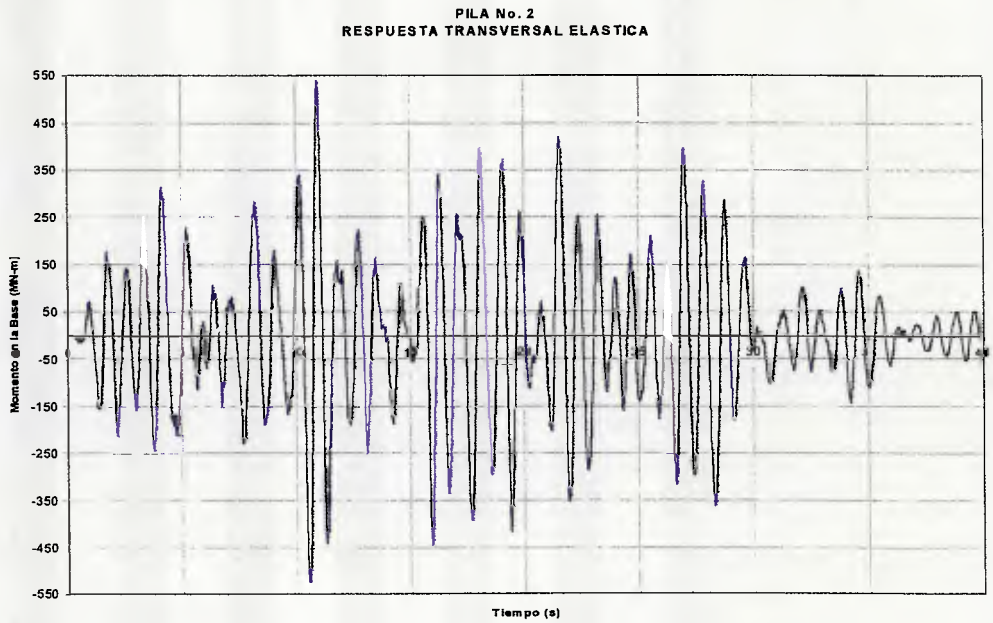
Las siguientes figuras muestran la historia de la fuerza corte en el tope y base de las pilas, transversales, entre 15 y 20 segundos. Se puede observar cómo la interacción entre los componentes estructurales y el medio de disipación pasiva permite controlar la máxima magnitud de la respuesta cuando se compara con la respuesta elástica.



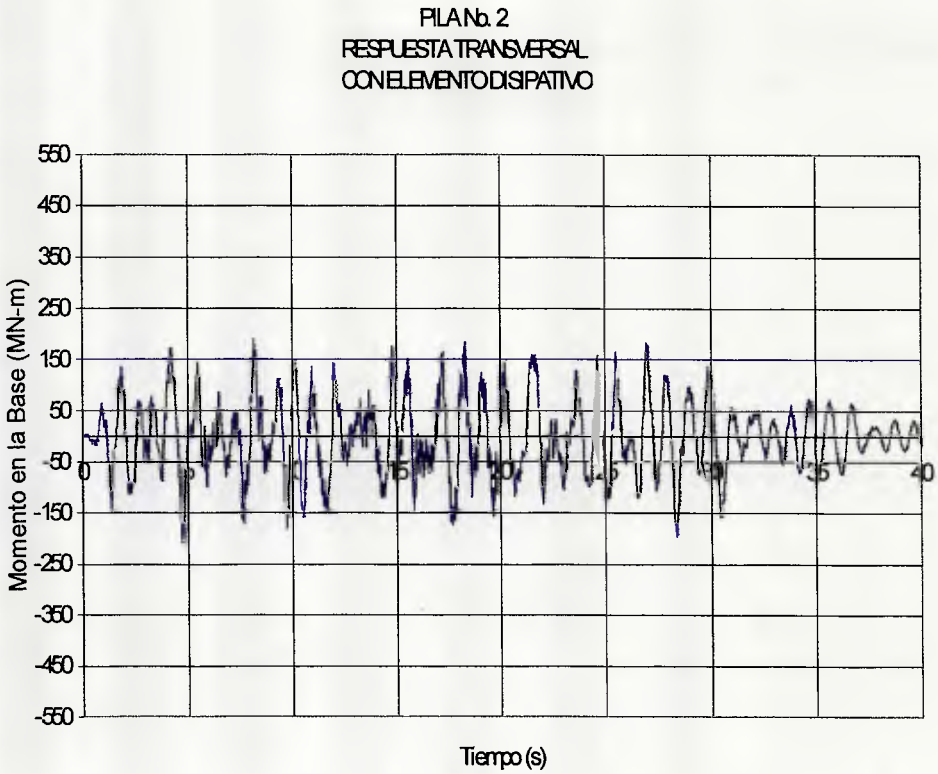


7.3.4 Momentos Flectores en la Base de las Pilas.

Las siguientes figuras muestran la historia del momento flector en base de las pilas, en dirección transversal. Se puede observar cómo la interacción entre los componentes estructurales y el medio de disipación pasiva permite controlar la

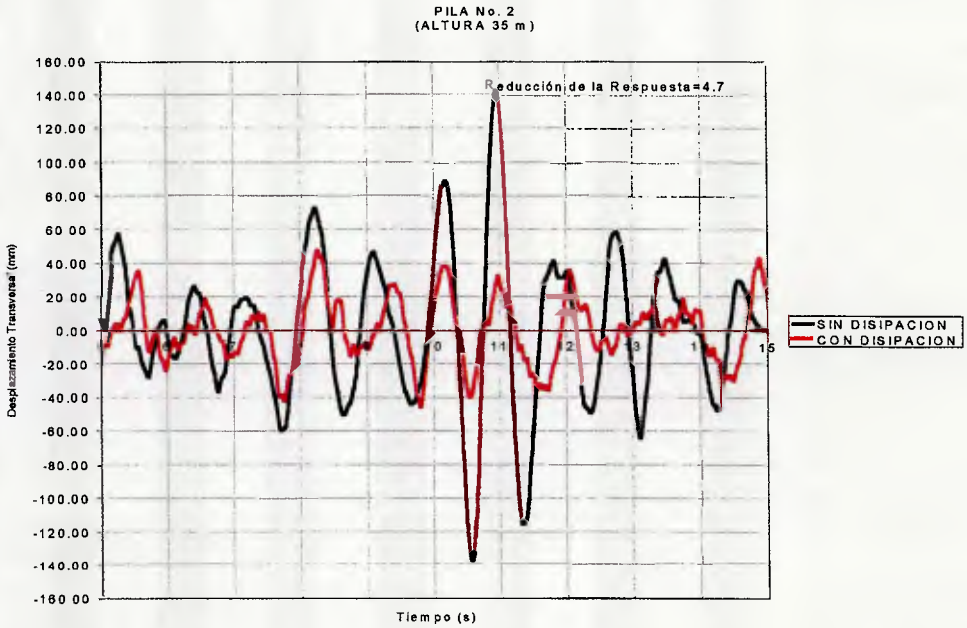


máxima magnitud de la respuesta cuando se compara con la respuesta elástica.



7.3.5 Desplazamiento transversal del tope de las Pilas.

La siguiente figura muestra la historia del desplazamiento horizontal transversal en el tope de la pila N° 2, entre 5 y 15 segundos. Se puede observar cómo el sistema disipativo permite controlar los desplazamientos en relación a la respuesta elástica.



7.3.6 Resumen de la Máxima Respuesta en las Pilas. Reducción de la Respuesta.

En la Tabla N° 7-1 se comparan los valores de la fuerza cortante y el momento flector en la base de las pilas que resultan del análisis dinámico correspondiente al viaducto con disipación pasiva, con los del análisis supuesto el comportamiento elástico y lineal.

TABLA N° 7-1

RESUMEN PARA UN VIADUCTO								
	RESPUESTA ELASTICA				RESPUESTA CON DISIPACION PASIVA			
	LONGITUDINAL		TRANSVERSAL		LONGITUDINAL		TRANSVERSAL	
	F. CORTANTE (kN)	MOMENTO (MN-m)	F. CORTANTE (kN)	MOMENTO (MN-m)	F. CORTANTE (kN)	MOMENTO (MN-m)	F. CORTANTE (kN)	MOMENTO (MN-m)
PILA No. 1	17076	319	21614	434	8177	169	8841	192
PILA No. 2	16114	281	18839	537	9161	209	10582	210
PILA No. 3	19432	307	15637	406	9976	193	8248	200
PILA No. 4	17481	318	19596	373	7660	129	7407	147

En la Tabla N° 7-2 se resume la reducción de la respuesta mediante la relación entre el cortante basal correspondiente a la respuesta elástica y el del modelo con disipadores pasivos.

TABLA N° 7-2

REDUCCION DE LA RESPUESTA (Vel/Vcd)		
	LONGITUDINAL	TRANSVERSAL
PILA No. 1	2.1	2.4
PILA No. 2	1.8	1.8
PILA No. 3	1.9	1.9
PILA No. 4	2.3	2.6

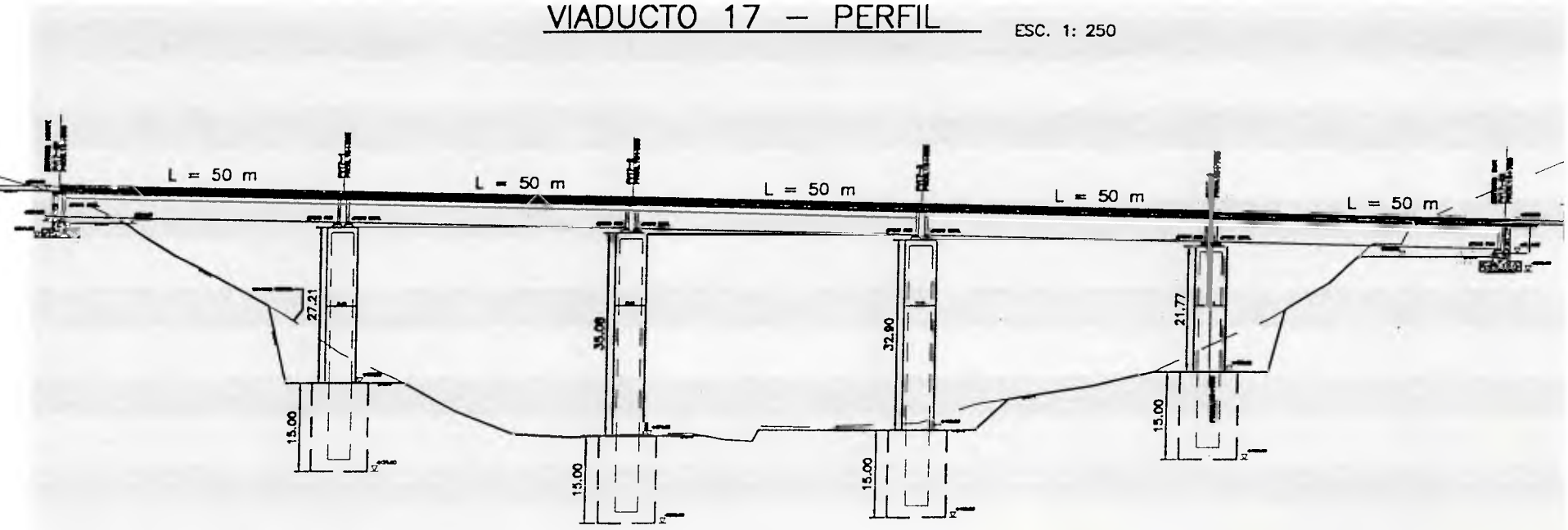
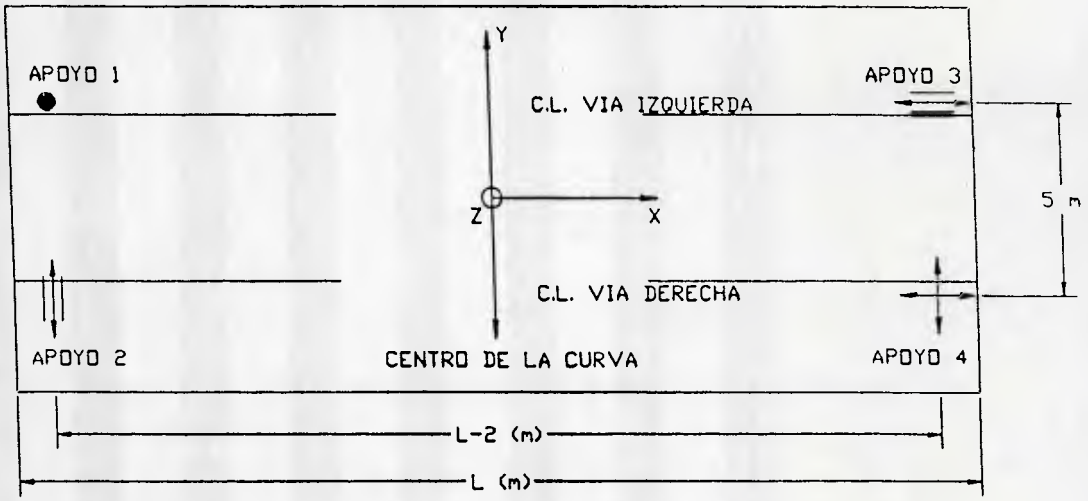

VIADUCTO 17 — PERFIL
ESC. 1: 250
L = 50 m
L = 50 m
L = 50 m
L = 50 m
L = 50 m
27.21
35.00
32.90
21.77
15.00
15.00
15.00
15.00

Figura 7-1

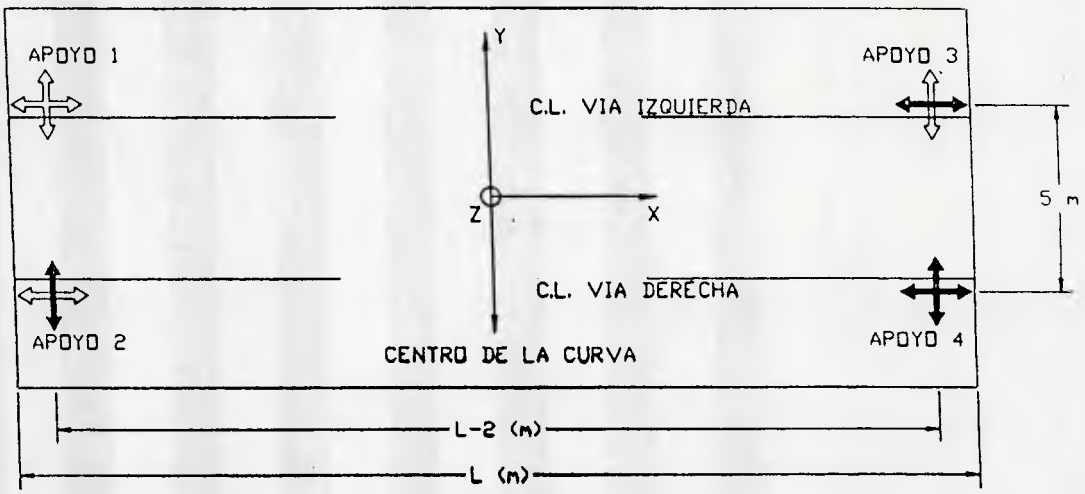
TABLERO - PLANTA

ESQUEMA DE VINCULO (SLS)



APOYO 1: FIJO
APOYO 2: FIJO LONGITUDINAL, MOVIL TRANSVERSAL
APOYO 3: FIJO TRANSVERSAL, MOVIL LONGITUDINAL
APOYO 4: MOVIL

ESQUEMA DE VINCULO (ULS)



⟺ PERMITE MOVIMIENTO CON DISIPACION DE ENERGIA

⟷ PERMITE MOVIMIENTO SIN DISIPACION DE ENERGIA

NOTA: LA DENOMINACION VIA IZQUIERDA Y VIA DERECHA ES ARBITRARIA Y NO ESTA REFERIDA A LA LINEA

Figura 7-2

Universidad Católica Andrés Bello
BIBLIOTECA
Caracas

CAPITULO 8. CONSIDERACIONES FINALES

Las investigaciones experimentales realizadas al elemento de disipación metálico muestran un comportamiento histerético estable. El número de ciclos para el cual ocurre la falla, cuando el espécimen es sometido a ciclos reversibles de amplitud constante iguales al máximo desplazamiento de diseño seleccionado, indica una vida útil superior a 20 ciclos.

En la actualidad se planifica ampliar dichas investigaciones experimentales con una secuencia de pruebas que permitan determinar el número de ciclos que conducen a la falla para diferentes amplitudes de desplazamiento. Mediante estos resultados se podrá establecer un modelo de falla por acumulación de daño más confiable para la respuesta dinámica de estos elementos.

Mediante la incorporación de este tipo de disipadores, entre la masa de los tableros y la infraestructura se puede controlar la magnitud de las fuerzas inerciales en las primeras y modificar la respuesta dinámica de las pilas, es decir, la historia en el tiempo del desplazamiento en el tope y de la fuerza cortante y el momento flector en la base. Su utilización para el control de la respuesta dinámica resulta más eficiente que disipar la energía sísmica mediante la formación de articulaciones plásticas en la base de las pilas. La reducción de la respuesta dinámica mediante la formación de las articulaciones plásticas puede conducir a daños considerables en la estructura e incluso su ruina. Económicamente no serán comparables los costos asociados a la reparación o reconstrucción de la estructura con los que pudieran derivarse de una sustitución de los elementos de sacrificio o incluso de los de disipación metálicos.

En el caso que ocurra un evento en el cual la amplitud de las aceleraciones del terreno sea mayor a la asociada al sismo de diseño, se producirán desplazamientos superiores al máximo de diseño, lo cual pordrá disminuir la vida útil del sistema disipativo medida en términos de falla por la acumulación de daños.

Un tratamiento probabilístico de la falla estructural que resulte de la respuesta dinámica de estos elementos podrá realizarse una vez que se disponga de mayor información experimental que pueda ser manejada en términos estadísticos.

REFERENCIAS

R-1. Loads to be considered in the design of railway bridges, UIC Code 776-1R, International Union of Railways.

R-2. Estudio de Amenaza Sísmica, J. Grases, A. Malaver y J. Manzanares Coral 83, 1993, Consorcio Contuy.

R-3. Medidas de la Intensidad de un Sismo, Prof. Arturo Arias, Notas Curso Universidad Autónoma de México, 1975.

R-4. Capacidad de los Movimientos Sísmicos de Producir Daño Estructural, R. Araya y R. Saragoni, Universidad de Chile, 1980.

R-5. Criterios y Normas de Diseño para los Viaductos de los Tramos 3 y 4, PSN Ingeniería S.C., 1996, Consorcio Contuy.

R-6. Eurocode 8 - Design provisions for earthquake resistance of structures – Part 2: Bridges, 1996.

R-7. Eurocode 1- Basis of design and actions on structures – Part 3: Traffic loads on bridges, 1995.

R-8. Pseudodynamic and saking table tests on R. C. Bridges, ECOEST PREC 8, 1996.

R-9. Guide Specifications for seismic Isolation Design, AASHTO, 1998.

R-10. Finite Element Procedures, K. Bathe,1996.

R-11. Probabilistic Theory of Structural Dynamics, Y. K. Lin, 1967.

R-12. Rondom Vibration in Mechanical Systems, S. Crandall and W. Mark, 1963.

R-13. Dynamic of Structures, A. Chopra, 1995.

R-14. Seismic Design and Retrofit of Bridges, M. Priestley – F. Seible – G. Calvi, 1996.

R-15. Passive Energy Dissipation Systems in Structural Engineering, T. Soong – G. Dargush, 1997.

R-16. Passive Energy Dissipation Systems for Structural Design and Retrofit, M. Constantinou - T. Soong – G. Dargush, 1998.

R-17. Manual DRAIN-2DX, Universidad de California, Berkeley.

R-18. Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials, R. Hertzberg, 1996.

R-19. Nonlinear Transient Dynamic Analysis of Yielding Structures, Ozdemir H.

R-20. Shape Memory Alloy Crossbracing of Brick Masonry Walls. Cyclic Test of Large Scale Model and Numerical Analyses, Bono F., Tirelli G., Verzeletti G., Molina J., Renda V.

R-21. Comunicaciones del Prof. Andrew Whittaker, Universidad de California, 1998.

R-22. Especificaciones Técnicas, Pruebas de Caracterización de los Aparatos de Apoyo, Viaductos Tramos 3 y 4 de la Línea Ferrea Caracas-Tuy Medio , PSN Ingeniería S.C., 1998, Consorcio Contuy.

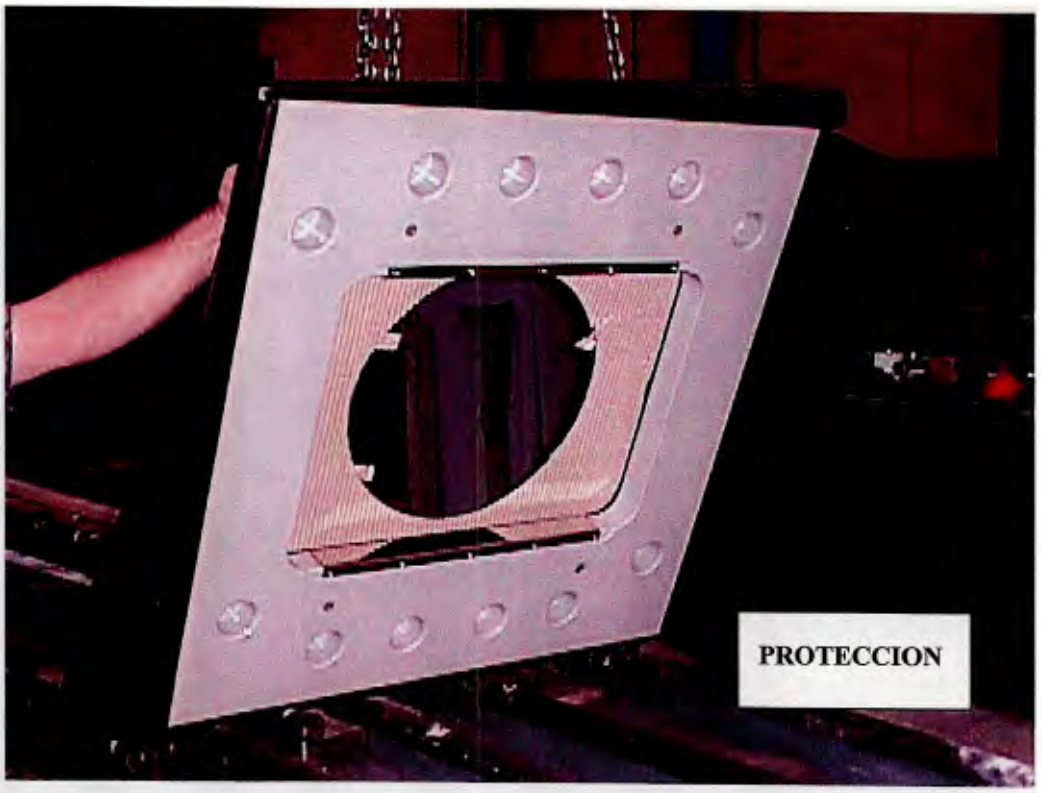
R-23. Análisis de los resultados de las pruebas de los aparatos sobre la Mesa Vibrante, PSN Ingeniería S.C., 1998, Consorcio Contuy.

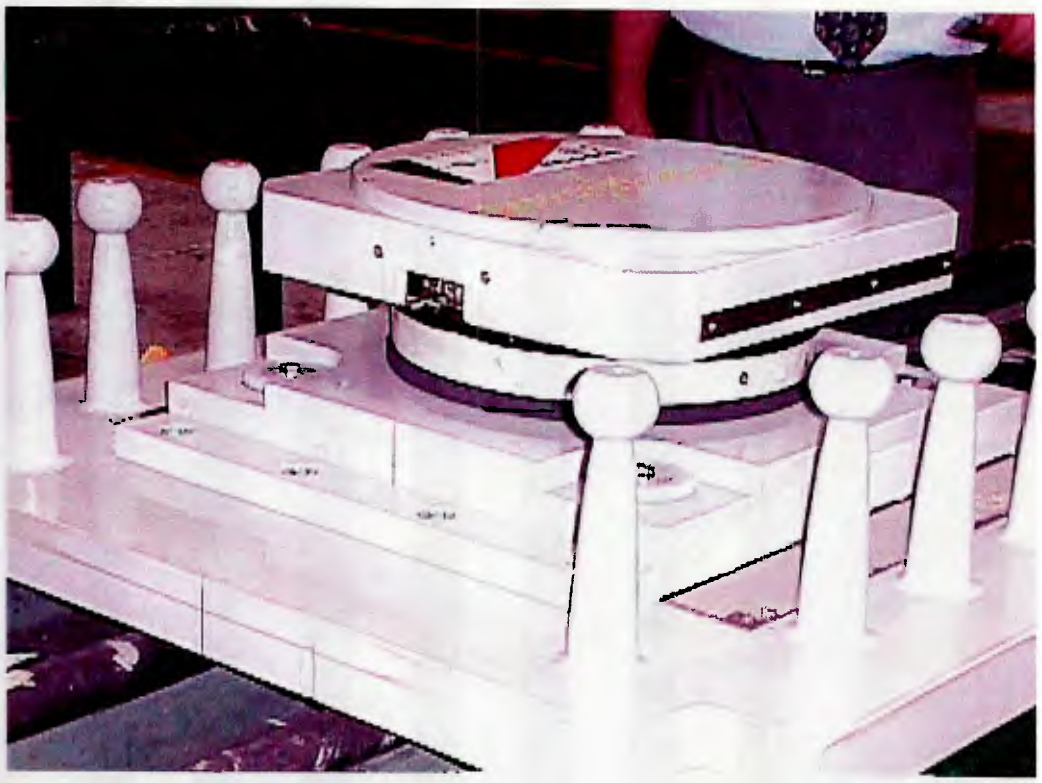
R-24. Proyecto del Viaducto N° 17, Línea Ferrea Caracas-Tuy Medio , PSN Ingeniería S.C., 1999, Consorcio Contuy.

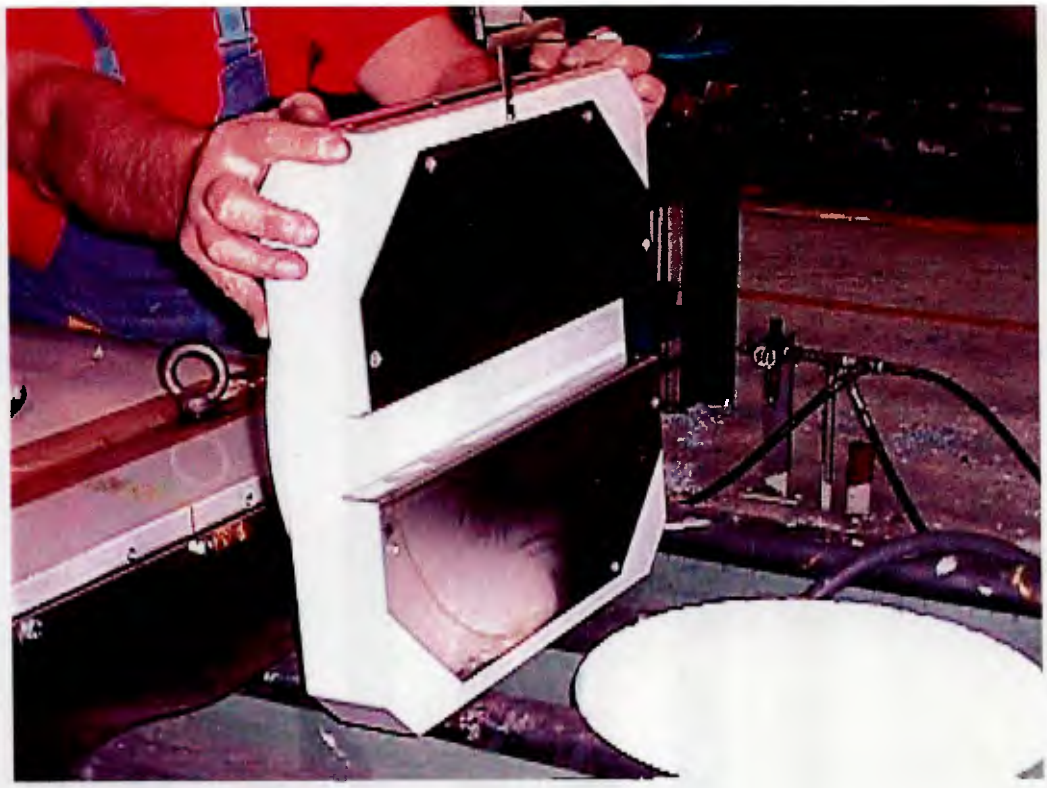
ANEXO
COMPONENTES DE UN APARATO MOVIL UNIDIRECCIONAL CON DISIPACION UNIDIRECCIONAL

Las siguientes fotografías corresponden a un aparato de apoyo móvil unidereccional, el cual para las condiciones excepcionales impuestas por un evento sísmico que supere el Umbral de Diseño disipara la energía en la dirección ortogonal del movimiento permitido en condiciones de servicio.

Las fotos ilustran los diferentes componentes de este aparato diseñado según los criterios presentados en este trabajo. En las mismas se puede observar las superficies que permiten el movimiento en condiciones de servicio, la guía, los elementos de disipativos, el fusible y sistema excéntrico que asegura su reinstalación.


PROTECCION





GUIA UNIDERECCIONAL

ELEMENTOS DISIPATIVOS

ELEMENTO DE SACRIFICIO

ELEMENTO DE SACRIFICIO