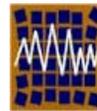




Universidad de Concepción
Departamento de Ingeniería Civil



Asociación Chilena de Sismología e
Ingeniería Antisísmica

N° A13-08 CONTROL DE ESTRUCTURAS CON ACOPLAMIENTO LATERAL-TORSIONAL USANDO DISIPADORES FRICCIONALES Y VISCOELÁSTICOS

J.C. de la Llera¹, J.L. Almazán², I.J. Vial³ y M. García⁴

1.- Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica Pontificia Universidad Católica de Chile
Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

e-mail: jcllera@ing.puc.cl

2.- Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica Pontificia Universidad Católica de Chile
Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

e-mail: jlalmaz@ing.puc.cl

3.- Facultad de Ingeniería Universidad de los Andes
Av. San Carlos de Apoquindo 2200, Santiago, Chile

e-mail: ivial@uandes.cl

4.- Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica Pontificia Universidad Católica de Chile
Vicuña Mackenna 4860, Santiago, Chile

e-mail: mpgarcia@ing.puc.cl

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados analíticos y experimentales de estructuras asimétricas lineales considerando el uso de disipadores friccionales y viscoelásticos. Estos dispositivos de disipación de energía han demostrado ser elementos efectivos para controlar la desigual demanda de deformaciones de los elementos en estructuras no balanceadas torsionalmente. El balance torsional débil se define como una propiedad de una estructura asimétrica que logra igualar la demanda de deformaciones de puntos equidistantes con respecto al centro geométrico de la planta, pero no necesariamente elimina la torsión de esta. Si en cambio se minimiza además el giro de la planta, se alcanza la denominada forma fuerte de balance torsional. El balance débil se puede alcanzar mediante el uso de sistemas de disipación de energía, haciendo que el llamado Centro Empírico de Balance se ubique en el Centro geométrico de la planta. Estudios experimentales dinámicos efectuados sobre modelos a escala, con asimetría en masa y

rigidez, validan los resultados analíticos y el concepto de Balance Torsional Débil. Resultados similares pueden extenderse para estructuras no-lineales.

Palabras Clave: Disipación de energía, Balance Torsional, Centro Empírico de Balance, Resultados experimentales.

1 INTRODUCCIÓN

La respuesta de estructuras asimétricas durante terremotos pasados, han demostrado que la demanda de deformaciones puede concentrarse en algunos planos resistentes. Debido a esto, los códigos de diseño han incorporado ciertas restricciones que pretenden aminorar una demanda irregular de desplazamientos. La pregunta es, si en vez de considerar estas restricciones, es posible balancear de otra forma la respuesta de una estructura asimétrica. La respuesta es afirmativa, y existen múltiples alternativas para lograrlo. En este trabajo, se considera el uso de disipadores friccionales y viscoelásticos para balancear dicha respuesta. Una vez que el acoplamiento lateral-torsional está controlado, el problema puede ser tratado como si el sistema fuese nominalmente simétrico, implicando procedimientos de diseño más simples, uso más eficiente de los elementos estructurales y estructuras más seguras y confiables.

En el estudio del balance torsional usando disipadores de energía (DE), se destacan tres aspectos fundamentales: (i) la capacidad de disipación óptima necesaria para el diseño de la estructura; (ii) la posición en planta óptima de estos disipadores, y (iii) los factores de reducción de respuesta alcanzados por el uso de estos disipadores. De los tres aspectos mencionados, este artículo enfatizará el segundo. Por simplicidad en la presentación, el análisis realizado considera la respuesta dinámica de sistemas elásticos de un piso y dos modelos experimentales a escala con excentricidad en masa y rigidez.

El efecto de agregar amortiguamiento suplementario en el control de la respuesta torsional ha sido estudiado en investigaciones recientes, por ejemplo Lin *et al* (2001). Se ha demostrado que en el caso de disipadores viscosos, la reducción de respuesta es altamente dependiente de la posición de los disipadores, destacando que tales reducciones dependen no sólo de la excentricidad e_d del disipador sino que también del radio de giro ρ_D de estos. Mediante un apropiado uso de los disipadores viscosos, la demanda de deformaciones en sistemas elásticos e inelásticos puede ser reducida hasta 3 veces, Goel (1997). Además, el problema de distribución en planta de los disipadores también ha sido estudiado anteriormente a través de minimizar diferentes tipos de respuestas.

2 BALANCE TORSIONAL

El balance torsional se define como una propiedad de una estructura asimétrica que conlleva a igualar la demanda de deformaciones de los elementos estructurales equidistantes con respecto al centro geométrico (CG) de la planta. Este balance puede definirse en su forma débil o fuerte. El primero de estos, implica un comportamiento desacoplado entre los movimientos laterales y torsionales, permitiendo la rotación de la planta pero asegura igualar la media cuadrática de la demanda de deformaciones en elementos ubicados simétricamente con respecto al CG. Es esta forma de balanceo débil la que se considerada en esta investigación.

Por simplicidad en el planteamiento teórico, se introduce el concepto con un modelo de 1 piso. El movimiento del Centro de Masa (CM) está definido por los dos desplazamientos horizontales u_x y u_y en las direcciones X e Y respectivamente, y una rotación normalizada $l_x u_\theta$ en torno a un eje vertical Z (Figura 1a). Se coloca un solo disipador friccional a lo largo del eje Y , a una distancia e_d del CM; el efecto del radio de giro ρ_d se hará explícito más adelante. El origen del sistema de coordenadas coincide con el CM; las dimensiones de la planta son l_x y l_y en las direcciones X e Y , respectivamente. Además, el sistema considerado es mono simétrico, esto es $e_{sy} = 0$.

Asumamos que los grados de libertad $u(t)^T = [u_y(t, e_d) \quad l_x u_\theta(t, e_d)]$ de la estructura han sido medidos para una posición e_d conocida del DE, para efectos del análisis esto es equivalente a si el movimiento del CM hubiese sido medido instrumentalmente. El punto relevante es observar la correlación entre la traslación y rotación de la estructura a medida que el DE se mueve de una posición en la planta a otra. El desplazamiento (velocidad y aceleración) a una distancia p del CM será de la forma $u_y^{(p)} = u_y(t, e_d) + p u_\theta(t, e_d)$ y entonces, la media cuadrática (MC) del desplazamiento omitiendo los argumentos t y e_d es

$$E[u_y^{(p)^2}] = E[u_y^2] + 2pE[u_y u_\theta] + p^2 E[u_\theta^2] \quad (2.1)$$

Esta ecuación es cuadrática en p (es una parábola), y para un perfil de desplazamiento dado de la planta, el mínimo valor para $E[(u_y^{(p)})^2]$ se obtiene en un punto a una distancia p^* del CM (Figura 1b), esto es,

$$p^* = -E[u_y u_\theta] / E[u_\theta^2] \quad (2.2)$$

Se puede demostrar fácilmente que p^* también coincide con el punto de la planta en el cual la correlación entre el desplazamiento $u_y^{(p)}$ y la rotación u_θ es cero, De la Llera *et al* (2005). Entonces, el punto en la planta de la estructura en el cual el desplazamiento y la rotación no están correlacionados coincide con aquel en el cual la MC del desplazamiento es mínima.

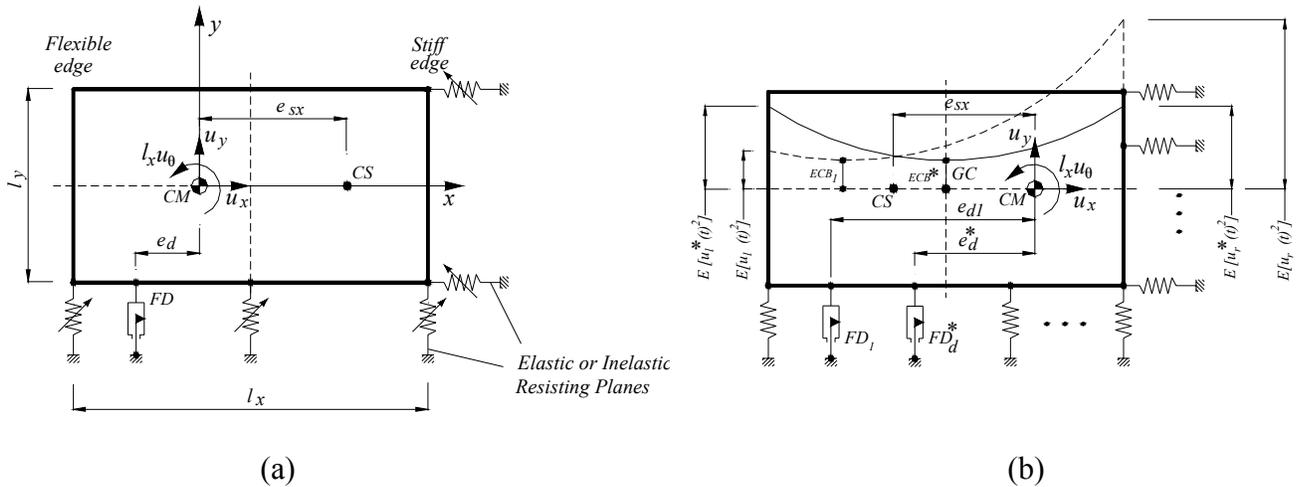


Figura 1 (a) Modelo asimétrico considerado en el análisis; (b) representación gráfica del concepto de forma débil de balance torsional.

El punto de la planta dado por la posición p^* se define, en el sentido de la MC, como el Centro Empírico de Balance (CEB). En el CEB, las traslaciones y rotaciones están no-correlacionadas (son ortogonales en el sentido de la media cuadrática) y además, si el CEB y el CM coinciden, la estructura se comporta, en el sentido de la media cuadrática, como un sistema desacoplado. Se observa que si $p^* > 0$, el CEB está ubicado a la derecha del CM y la correlación $E[u_y u_\theta] < 0$; lo contrario ocurre si $p^* < 0$. Así, la correlación entre el desplazamiento y la rotación de la planta cambia de signo a medida que el CEB se mueve de un lado para otro con respecto al CM.

Más aún, la condición para el balance torsional es que el CEB esté ubicado a igual distancia con respecto a los bordes de la planta de la estructura, De la Llera *et al* (2005). Este resultado es general y será usado a lo largo de este artículo para estimar las posiciones óptimas de los disipadores. Estos resultados también serán comparados con otras reglas heurísticas investigadas, Goel (1997). Al considerar la ecuación (2.1) y reemplazando los valores u_y^* y u_θ^* definidos en el CEB, la MC de los desplazamientos en ambos bordes de la planta es

$$E[\tilde{u}_y^{(d)2}] = E[\tilde{u}_y^{*2}] + d^2 E[\tilde{u}_\theta^{*2}] \quad (2.3)$$

Una interpretación física de la ecuación (2.3) es que debido a que en el CEB los desplazamientos y rotaciones están desacopladas en el sentido de la MC, la MC de los desplazamientos en los bordes corresponde a la suma directa de la MC del desplazamiento en el CEB y la MC de las rotaciones de la planta multiplicadas por la distancia al cuadrado desde el CEB al borde de la planta. Además, los valores de la MC de los desplazamientos serán iguales si y sólo si la distancia d desde el CEB a ambos bordes es la misma. Al examinar la ecuación (2.2), si el CM coincide con el CG, $p^* = 0$; en caso contrario, p^* será necesariamente distinto de cero ya que se ubicará equidistante de ambos bordes de la planta.

Entonces, la condición de balance torsional con el CM y el CG coincidentes, esto es, $p^*=0$, representa una ecuación para encontrar la excentricidad e_d del DE tal que contrarreste los efectos de la excentricidad de rigidez e_{sx} obligando al CEB a ubicarse sobre el CM y el CG. Así, la regla del “espejo” propuesta por Goel (1997) tiene una justificación conceptual en términos de la ubicación del CEB. Aunque, para estructuras en donde la rotación de la planta es más significativa, por ejemplo $\Omega_\theta < 1$, las posiciones óptimas de los disipadores difieren de aquellas propuestas por la regla del “espejo”. Lo que es más interesante de recalcar con respecto a la condición de $p^*=0$ es que sólo define la posición del vértice de la parábola de la Ec.(2.1), que coincide con el CEB, conduciendo a iguales valores de la MC de los desplazamientos en puntos equidistantes del CG, y por ende a la forma débil de balance torsional (Fig. 1b). La curvatura de la parábola de desplazamientos puede ser controlada colocando disipadores en los bordes de la planta en forma simétrica con respecto al e_d . Esto llevaría a aumentar el radio de giro de la disipación y movería el diseño de la estructura en dirección de la forma fuerte del balance torsional.

El CEB no es en general un centro de rigidez, de amortiguamiento o de resistencia. Su posición depende de los mismos parámetros que la respuesta de la estructura, y $p^*=0$ establece una condición general que se necesita satisfacer para lograr una forma débil de balance torsional en la estructura pero no dice explícitamente cómo obtenerla. Lo último, depende principalmente de las propiedades de rigidez, amortiguamiento, y ubicación del DE así como también de las propiedades dinámicas de la estructura. Debido a la no-linealidad del problema, la posición óptima e_d del disipador debe ser calculada mediante cualquier algoritmo que permita encontrar raíces de ecuaciones no lineales.

En las deducción previa no se han planteado ningún tipo de suposiciones con respecto a la respuesta del sistema y $u_y(t)$ y $u_\theta(t)$ son señales que pueden provenir de estructuras elásticas o inelásticas, de uno o más pisos, con o sin disipadores. Luego, el concepto del CEB es completamente general, e incluye por ejemplo, el comportamiento de cualquier estructura inelástica con cualquier tipo de DE solicitado con cualquier tipo de excitación.

3 RESULTADOS ANALÍTICOS

En esta investigación, se consideraron 3 registros artificiales compatibles con la norma chilena de diseño para edificios con aislamiento sísmico y 5 registros impulsivos. Los registros artificiales son compatibles a un espectro de diseño con un 10% de probabilidad de excedencia en 50 años y suelo firme (velocidad de ondas de corte: $400 \text{ m/s} < V_s < 900 \text{ m/s}$); los registros impulsivos corresponden a Arleta, Sylmar, Newhall (1994), Corralitos (1989) y Kobe (1995).

Consideremos la respuesta sísmica de estructuras con DF sometidos a registros artificiales compatibles con la norma de aislamiento sísmico NCh 2745. En la Fig. 2, se presenta el promedio de las posiciones óptimas para los tres registros artificiales considerados, como función de la excentricidad normalizada e_{sx} , se consideran tres valores de $\Omega_\theta = 0.8, 1$ y 1.2 , tres períodos desacoplados $T_y = 0.5, 1$ y 2s . y tres

capacidades de los disipadores friccionales $\beta = 2.5\%$, 5% y 10% . Los valores óptimos presentados para e_d^* están asociados con el criterio de balance torsional óptimo ($p^* = 0$). Las excentricidades de rigidez varían desde 0 a 0.25. Las tendencias observadas para e_d^* son similares a aquellas obtenidas para registros impulsivos. En general, a medida que la excentricidad estática e_{sx} aumenta, la excentricidad óptima del disipador también aumenta, pero hacia el otro lado con respecto al CM. Esto es consistente con las tendencias inferidas del criterio del “espejo” propuestas por Goel (1997). Resulta evidente que para estructuras más rígidas $T_y < 1s$, torsionalmente flexibles $\Omega_\theta = 0.8$, y pequeña excentricidad estática, por ejemplo, $e_{sx} < 0.05$, la posición óptima del disipador se ubica en el mismo lado que la excentricidad estática del sistema. En esos casos, el criterio del “espejo” fallaría en predecir la correcta ubicación del disipador.

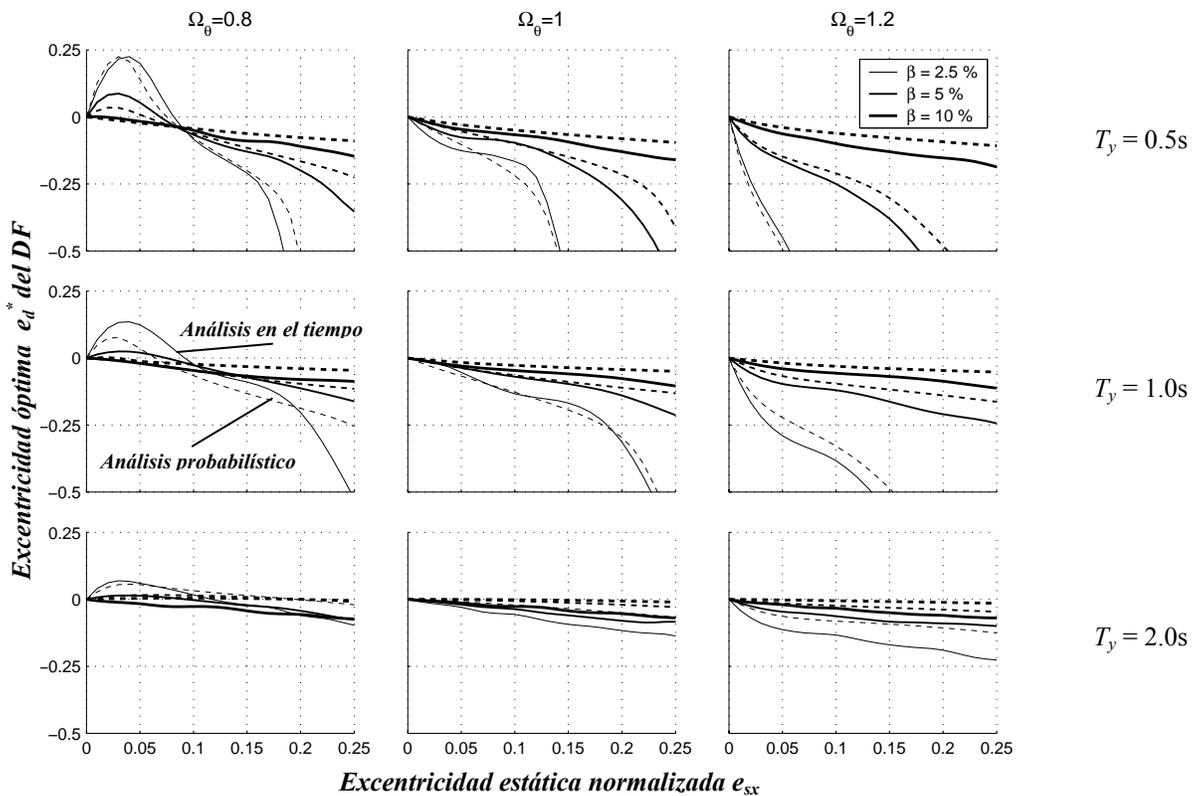


Figura 2 Ubicaciones óptimas (promedio) de los DF en función de la excentricidad estática normalizada para $\Omega_\theta = 0.8, 1.0, 1.2$ y períodos laterales desacoplados, $T_y = 0.5, 1.0$ y 2.0 s; sometidos a 3 registros artificiales.

También se observa que, a medida que la estructura se vuelve más flexible, una regla muy simple sería colocar los disipadores cercanos al CM de la estructura. Además, a medida que la capacidad de los disipadores aumenta, las pendientes de las excentricidades óptimas disminuyen. De esta manera, un criterio heurístico para determinar la posición de los disipadores debiera incluir la capacidad de estos como parámetro. Esto es consistente con la intuición física que muestra que para mayores capacidades pequeñas variaciones en la posición del disipador nos permiten balancear torsionalmente, al menos en la forma débil, los movimientos en planta de la estructura. Por otro lado, estructuras torsionalmente más

rígidas, requieren mayores capacidades de los DF para balancear la planta y, por ende, las excentricidades óptimas también son función del período de la estructura y de la razón de frecuencias torsionales y laterales Ω_θ . Los resultados para registros impulsivos, pueden encontrarse en De la Llera *et al* (2005).

Extendamos ahora el análisis al caso de una estructura asimétrica con disipadores viscoelásticos (VE) modelados como un elemento tipo Zener. Las propiedades constitutivas del disipador son calibradas experimentalmente con un compuesto basado en butilo. Los módulos de almacenamiento y pérdida para los disipadores están representados por las expresiones $S(\omega) = \alpha_g G'(\omega)$ y $L(\omega) = \alpha_g G''(\omega)$, donde $\alpha_g = A_c n_c / t_r$ representa el factor geométrico del disipador que relaciona el área de corte, $A_c n_c$, con el espesor de la capa, t_r . Estos parámetros de diseño del disipador se reflejan en dos parámetros globales de la estructura, la razón entre el amortiguamiento y rigidez de la estructura $\Omega_x(\omega)$ y el amortiguamiento adicional $\xi_s(\omega)$. Asumiendo que el factor de pérdida $\eta(\omega) = L(\omega)/S(\omega)$ es conocido para un DVE dado, existe entonces una relación entre $\Omega_x(\omega)$ y $\xi_s(\omega)$. Luego, los resultados se presentan para diferentes combinaciones de estos dos parámetros, cuyos valores se definen en base a la frecuencia lateral desacoplada ω_y de la estructura.

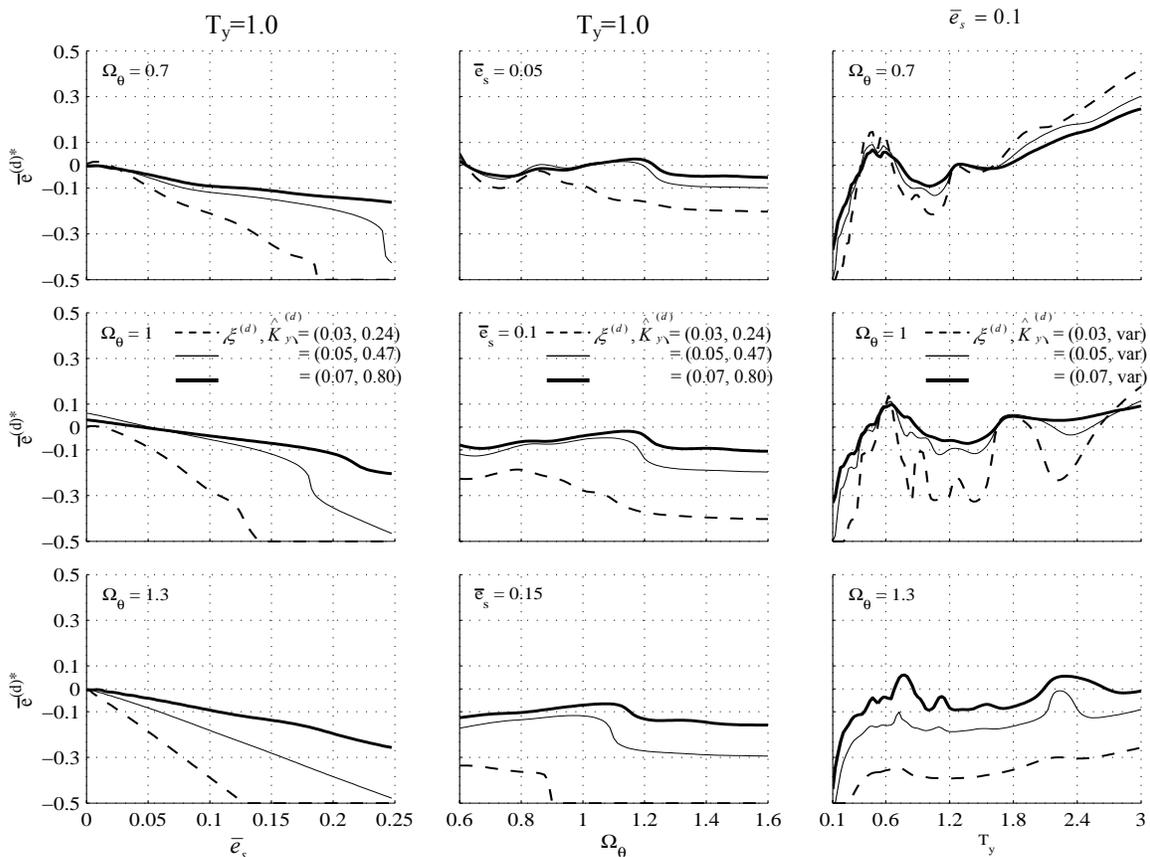


Figura 3 Valores de la excentricidad óptima normalizada de los disipadores (e_d^*), relativos al GC, como función de los parámetros de la estructura y sometido al registro de Sylmar.

En la Fig. 3, se muestran resultados analíticos similares a aquellos presentados anteriormente en la Fig. 2, pero considerando disipadores VE. Se considera $T_y = 1$ s y tres valores de $\Omega_\theta = 0.7, 1$ y 1.3 . Además, se consideró también un amplio rango de excentricidades estáticas normalizadas e_{sx} entre 0 y 0.25. A pesar que los detalles de estas curvas y aquellos presentados en la Fig. 2 pueden ser diferentes, los resultados siguen tendencias generales similares. Por ejemplo, para estructuras torsionalmente flexibles ($\Omega_\theta < 1$) y excentricidades estáticas $e_{sx} < 0.05$, el disipador debe ser colocado al mismo lado de la excentricidad de rigidez. A medida que la rigidez torsional de la estructura aumenta ($\Omega_\theta > 1$), la relación entre la excentricidad óptima e_d y la excentricidad estática e_{sx} se vuelve más lineal y la regla del “espejo” se justifica conceptualmente. Otro aspecto interesante es que el control de torsión no se puede alcanzar con capacidades bajas de los disipadores VE.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

(a) Modelo con DF

Se utilizó un edificio de marcos de 6 pisos con una planta cuadrada de 860 mm (Fig. 4), altura de piso constante $h = 500$ mm, y una altura total $H = 3000$ mm. El modelo está construido en Duraluminio en escala geométrica $E_L = 1/7$. Para mantener una escala de aceleración E_A igual a 1, el tiempo debió ser escalado por un factor igual a la raíz cuadrada de 7. En el modelo se usaron vigas y columnas cuadradas huecas de lados 30 mm y 40 mm, respectivamente, y 1.5 mm de espesor. Para aumentar la rigidez de las conexiones entre vigas y columnas, se introdujeron elementos de acero perforados en las vigas y columnas que se aperraban a unos atiesadores en forma de L ubicados en las caras inferior y superior de las vigas. Además se usaron cables de aceros pretensados de diámetros variables ($\phi = 1.5, 2$, y 3 mm) para arriostrar lateralmente la estructura flexible. El diafragma de piso es una placa cuadrada de lado 820 mm con un orificio central cuadrado de 410 mm, y espesor $t = 10$ mm. El peso total del modelo estructural es $W_T = 8135$ N. Para lograr diferentes valores de Ω_θ , se fijaron brazos horizontales de longitud $l_a = 2800$ mm. en cada piso de la estructura (Fig. 4) en los cuales se adosaron pesos adicionales $w_m = 250$ N a diferentes distancias del CM.

Esta etapa experimental asumió seis diferentes configuraciones estructurales. Las tres primeras consideraron el comportamiento sísmico de: (i) una estructura nominalmente simétrica (M_1); y (ii) configuraciones con excentricidad de masa (M_2, M_3), ambos considerando DF en los ejes 1 y 2 (Fig. 4). Todas las configuraciones con excentricidad de masa incluían dos cables diagonales pretensados de diámetros $\phi = 2$ mm en los ejes 1 y 2, y un solo cable diagonal pretensado de diámetro $\phi = 1.5$ mm a lo largo de los ejes A y B. Los pesos extras fueron seleccionados para obtener frecuencias nominales Ω_θ entre 0.8 y 1.3. Debido al escalamiento del tiempo, el modelo estructural representa edificios reales con períodos que varían entre 0.8s hasta 1.2s, aproximadamente. La segunda etapa consideró tres diferentes configuraciones con excentricidad de rigidez. Todas las configuraciones excéntricas en rigidez son simétricas en masa e incluyen cables pretensados de diámetros $\phi = 1.5$ ó 3 mm en los ejes A y B. Los DF considerados son elementos deslizantes de teflón y acero con resortes calibrados experimentalmente

para controlar la capacidad de deslizamiento requerida; los coeficientes de roce mínimos y máximos varían desde 5.9% hasta 15.5% respectivamente.

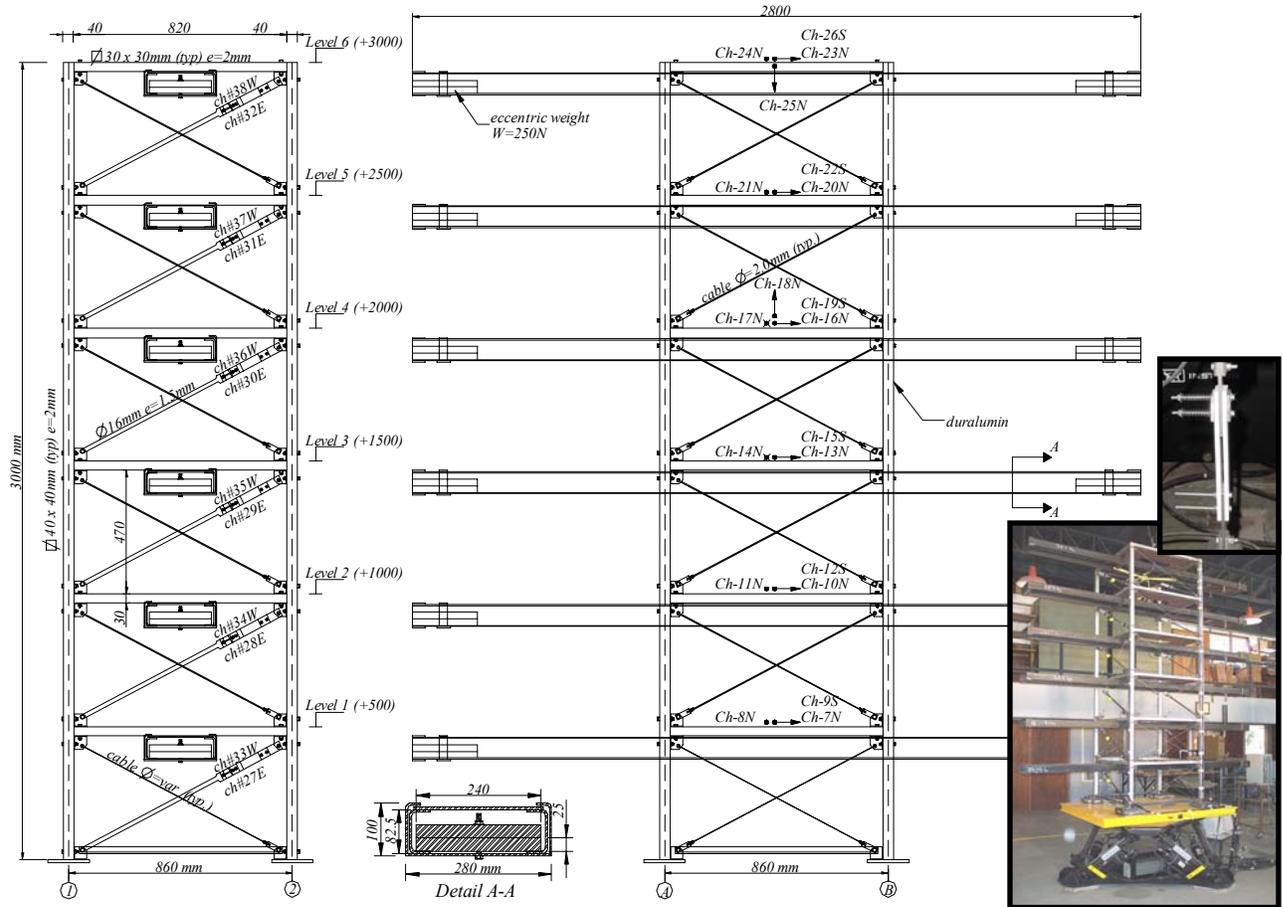


Figura 4: Modelo experimental de 6 pisos considerado en el análisis dinámico con disipadores friccionales.

En el estudio de este modelo se consideraron excitaciones sísmicas que incluían tanto registros impulsivos como no-impulsivos: 20% de Newhall (Northridge, 1994; PGA=0.59g), 30% de El Centro (Imperial Valley, 1940; PGA=0.31g) y 30% de Melipilla (Chile 1985; PGA=0.69g). Las respuestas mostradas corresponden a las desviaciones estándar de las rotaciones y desplazamientos medidos en los bordes y el CM.

(b) Modelo con disipadores VE.

Se utilizó un modelo de un piso con igual escala geométrica que el modelo anterior. Como se muestra en la Fig. 5, la estructura es de acero y tiene una planta rectangular de 1500 mm por 750 mm, y altura de piso igual a 660 mm. Las columnas son tubos de 25 x 25 x 2 mm, y las vigas de 20 x 20 x 2 mm. El diafragma rígido se construyó utilizando una placa de acero de 1.5 mm espesor, la cual estaba soldada a

las vigas horizontales. Para agregar rigidez al sistema en las uniones de vigas y columnas se colocaron elementos horizontales en forma de *L* de dimensiones 25 x 25 x 2 mm. Además se colocó sobre el diafragma una viga horizontal de largo 2800 mm, que permitía agregar pesos extras a diferentes distancias con respecto al CG de la planta, con el propósito de variar la excentricidad del sistema. El peso total de la estructura es aproximadamente 590 N.

En esta etapa se consideraron 8 diferentes configuraciones con corrimiento en masa. La excentricidad en masa normalizada con respecto al lado mayor de la planta es: $d_m=0, 0.05, 0.10$ y 0.15 . Las configuraciones torsionalmente flexibles se definieron como TF-0, TF-1, TF-2 y TF-3, y las torsionalmente rígidas como TS-0, TS-1, TS-2 y TS-3. Además, se colocaron 8 placas adicionales en el brazo horizontal cuyos pesos sumaban 1960 N, y por lo tanto, el peso total del sistema es de 2550 N. El período desacoplado del modelo base es $T_y = 0.1s$ y el valor de Ω_θ varía entre 0.77 y 1.18, para las configuraciones TF-0 y TS-0, respectivamente. El disipador VE utilizado en el estudio tiene dos capas de material viscoelástico de espesor 8 mm y sección 25 x 50 mm.. El VE fue colocado en 10 posiciones discretas de la planta $x_{DVE} = [-0.46, -0.36, 0.26, -0.165, -0.07, 0.063, 0.16, 0.26, 0.36, 0.46]$, y además se consideró la colocación de dos DVE ubicados en cada borde de la estructura. Finalmente, los registros considerados en esta etapa son: 70% de Newhall y 100% Melipilla.

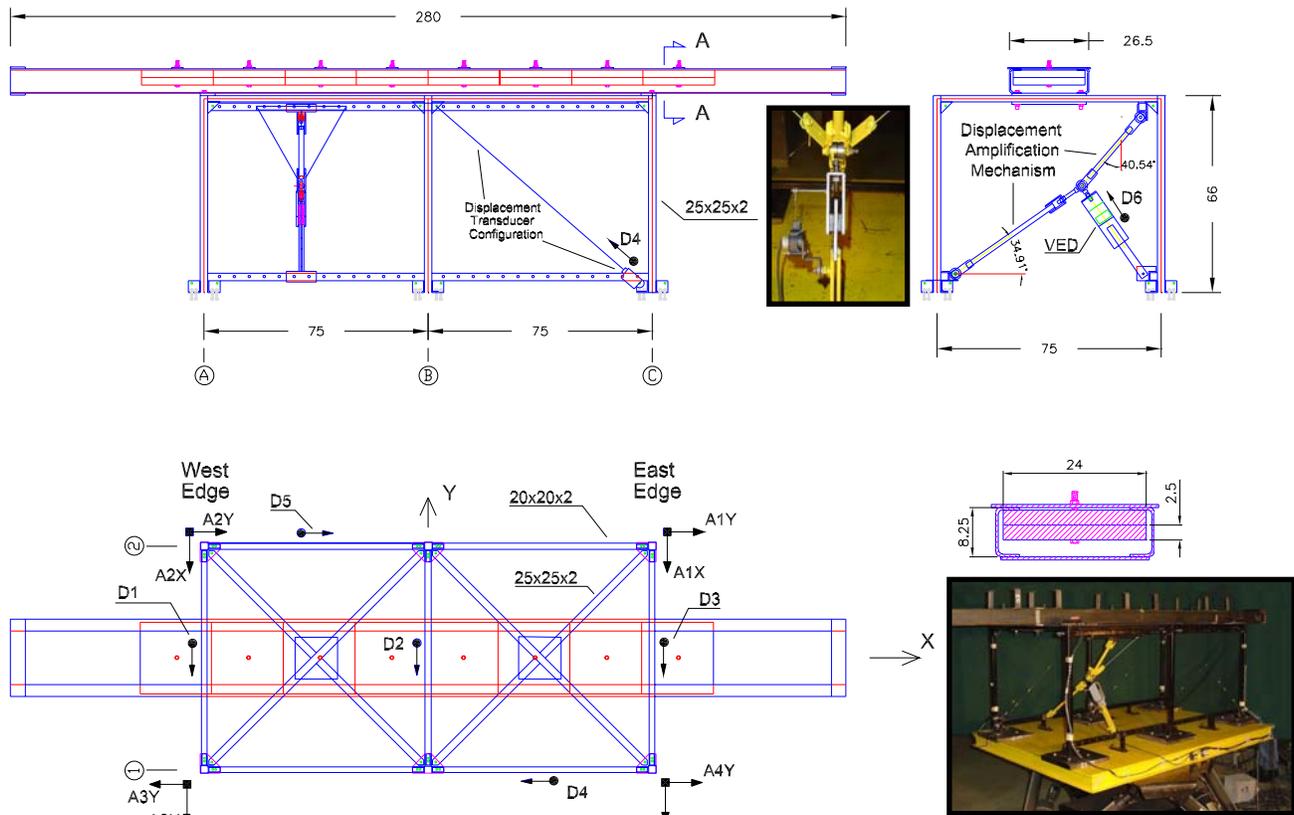


Figura 5 Modelo experimental de 1 piso considerado en el análisis dinámico con disipadores viscoelásticos.

En la Figura 6, se presenta información relevante acerca de la ubicación óptima del CEB considerando DF. Se muestran las seis configuraciones asimétricas sometidas al registro escalado de Newhall, y en cada gráfico se observa en las ordenadas la MC de los desplazamientos para cada punto del cuarto piso del modelo y en las abscisas la ubicación en planta en la dirección W(negativo)-E(positivo). Las tendencias son muy claras para los sistemas con excentricidad de rigidez. Por ejemplo, para el sistema S_1 , la posición óptima del disipador es muy cercana a $0.25L_x$; para la configuración S_3 en cambio, la posición óptima del dispositivo para lograr el balance torsional se acerca a $0.5L_x$. Por otro lado, en el caso de los modelos con excentricidad en masa, ninguna de las configuraciones está cerca de satisfacer la condición de balance torsional $p^* = 0$.

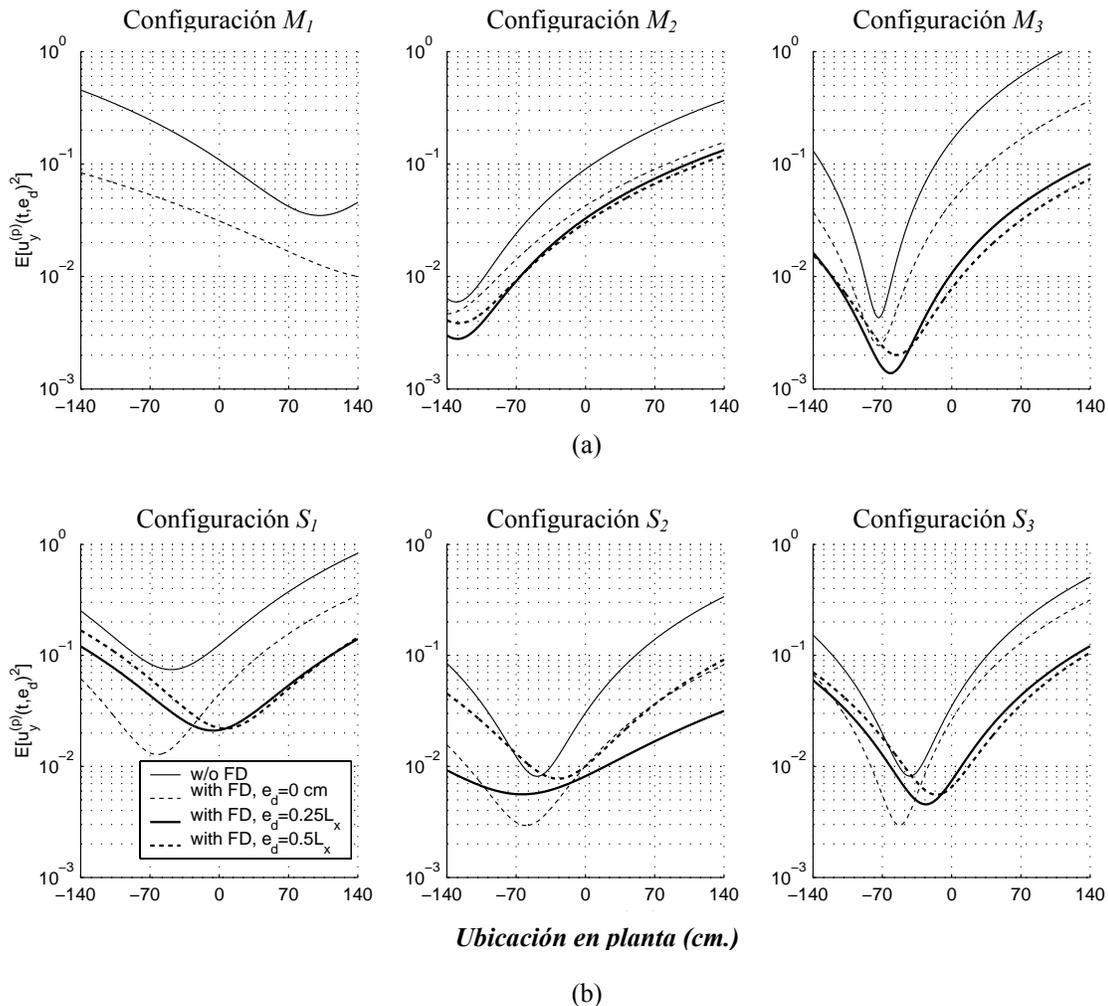


Figura 6 Estimación experimental del CEB del cuarto piso para las 6 configuraciones sometidas al registro de Newhall (20%): (a) excentricidad en masa; (b) excentricidad de rigidez.

En la Fig. 7 en cambio, se analiza el comportamiento dinámico considerando disipadores VE. Los gráficos muestran los valores obtenidos experimentalmente para el CEB y las desviaciones estándar en ambos bordes de la planta normalizados con respecto al modelo simétrico (TS-0 or TF-0). Se observa que los resultados de los diferentes gráficos muestran tendencias similares pero valores distintos. Por

ejemplo, la posición óptima de los disipadores para el sistema torsionalmente flexible, considerando el registro de Melipilla son $e_d = 0.07, 0.16, \text{ y } 0.20$. Se observa además que los DVE también son efectivos en controlar la torsión en estructuras torsionalmente rígidas, a pesar que las excentricidades deben ser mayores para estos casos. Las excentricidades óptimas en estos casos son $e_d = 0.07, 0.20, \text{ y } 0.29$. En general los resultados muestran que las excentricidades óptimas de los disipadores aumenta a medida que la excentricidad en masa crece ($TF-1 < TF-2 < TF-3$). Tal excentricidad tiende a ser del mismo signo que la excentricidad de masa en los sistemas torsionalmente rígidos, pero dependiendo de la excitación pueden tener signo contrario en estructuras torsionalmente flexibles.

Al examinar también los valores de las desviaciones estándar, los correspondientes valores para los bordes este y oeste coinciden en el punto de excentricidad óptima, y además se obtienen valores importantes de los factores de reducción de respuesta. Típicamente, la respuesta en el borde este disminuye a medida que el DVE se mueve desde $e_d = -0.5$ hacia 0.5 , y lo contrario ocurre para el borde oeste, cuya respuesta aumenta a medida que el disipador VE se desplaza en este rango. Ambas curvas se cruzan en la excentricidad óptima, y en ese punto la reducción de respuesta puede ser leída directamente del eje de las ordenadas. En todos los casos, los disipadores VE resultan ser eficientes y se logra una reducción considerable de la respuesta dinámica en ambos bordes de la planta, especialmente en el borde flexible. Valores de la excentricidad de los disipadores distintas al óptimo, producen mayores y menores factores de reducción en cada uno de los bordes de la planta; esta tendencia esperada, ha sido observada en todos los resultados experimentales.

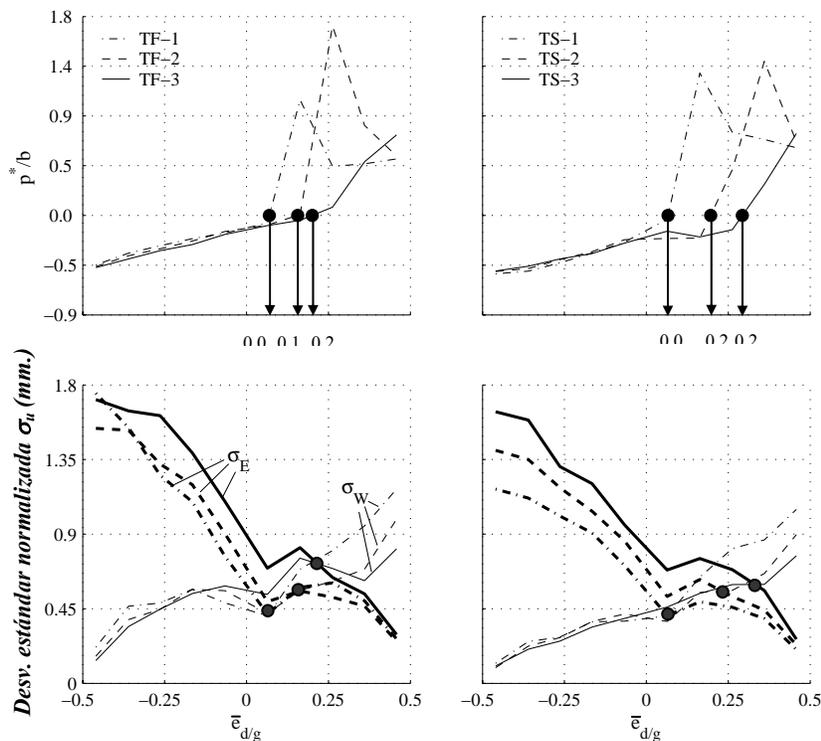


Figura 7 Respuesta de los sistemas TF y TS sometidos al registro de Newhall (70%).

Aunque, como era esperado, los valores de excentricidad óptima son dependientes de la capacidad del disipador; para una excentricidad estática dada, menores capacidades de los disipadores VE requieren mayores excentricidades para contrarrestar e_{sx} , especialmente para estructuras torsionalmente rígidas. También es aparente que para varios valores de e_{sx} no es posible lograr el balance torsional, dadas las capacidades consideradas para los DVE. Como regla general, para $e_{sx} > 0.05$, las excentricidades óptimas de los disipadores tienden a aumentar con un incremento de e_{sx} , pero con signo contrario. Este aumento depende de Ω_{θ} , e_{sx} , $\Omega_x(\omega)$ y de la capacidad de disipación $\xi_s(\omega)$.

En la Fig. 8, se muestra el análisis dinámico de dos configuraciones (S_1 y M_2) usando DF, sometidas al registro de Newhall (20%). La idea es mostrar que el concepto de balance torsional es válido, como ya fue mencionado, tanto para sistemas de un piso como para estructuras de múltiples pisos. En la primera fila de la Fig. 8, se presenta la respuesta no-lineal del 6° piso con y sin DF para las configuraciones S_1 y M_2 , respectivamente. Si consideramos el gráfico correspondiente al sistema S_1 , se observa que se ha logrado el balance torsional usando las mismas capacidades de los DF que aquellas consideradas experimentalmente ubicándolos en el borde de la planta. Para el sistema M_2 en cambio, se muestra el balance torsional y reducción de respuestas considerando una capacidad total de los DF igual a un 29% del peso de la estructura, el que no fue logrado experimentalmente (Fig. 6). La distribución en planta y altura de este caso se presentan en la Tabla 1. Además, en la segunda fila de la figura, se muestran los coeficientes de correlación $\rho_{y\theta}$ entre los desplazamientos y giros de la planta para ambos sistemas. La correlación $\rho_{y\theta}$ se reduce en forma considerable al seleccionar las capacidades y excentricidades correctas de los DF. Por ejemplo, si observamos la configuración S_1 y $e_d = 0.5l_x$, $\rho_{y\theta}$ disminuye desde -0.836 para el sistema sin disipadores a -0.090 para el caso de ubicación óptima de los DF. Si observamos la configuración M_2 , considerando la posición y capacidades óptimas de los DF, la correlación disminuye desde -0.659 a 0.032.

Tabla 1: Resultados analíticos para el sistema M_2 sometido al registro de Newhall (20%)

Piso	Sin disipadores			Disipadores en ubicación óptima				
	$\rho_{x\theta}$	Borde A	Borde B	Fy (kg)	e_d (cm)	$\rho_{x\theta}$	Borde A	Borde B
1	-0.6537	0.764	1.422	60.68	28.921	-0.0235	0.509	0.520
2	-0.6551	0.776	1.361	18.73	25.544	0.0078	0.505	0.502
3	-0.6565	0.793	1.305	19.35	39.764	0.0051	0.480	0.485
4	-0.6573	0.780	1.335	91.37	25.691	0.0138	0.490	0.481
5	-0.6582	0.771	1.353	22.29	54.132	0.0230	0.465	0.457
6	-0.6591	0.840	1.203	21.65	45.062	0.0322	0.394	0.387
Media	-0.6566	0.787	1.330			0.0097	0.474	0.472
				Fy/W	28.77%			

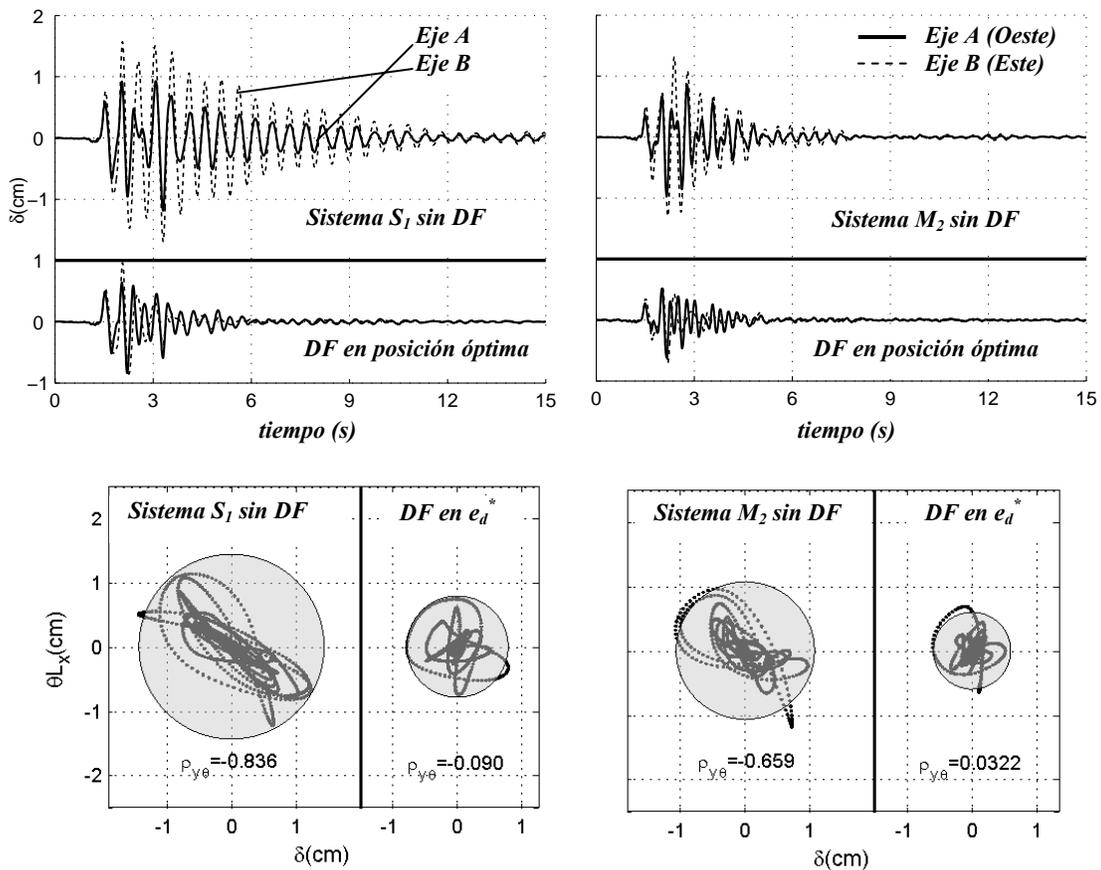


Figura 8 Validación del concepto de balance torsional y resultados analíticos considerando el registro de Newhall (20%) y las configuraciones S_1 y M_2 .

5 CONCLUSIONES

En este artículo, se ha evaluado analítica y experimentalmente el concepto de balance torsional considerando estructuras elásticas de un piso usando disipadores friccionales y viscoelásticos. Se estudió la ubicación óptima de los disipadores y se concluye que además de la reducción de respuesta obtenida con los disipadores, el diseñador puede controlar la respuesta torsional de la estructura colocando los disipadores de tal manera que el CEB se ubique a igual distancia de ambos bordes de la planta. La forma débil de balance torsional puede ser extendida para minimizar la rotación de la planta (forma fuerte de balance torsional), mediante la colocación de disipadores adicionales en los bordes de la planta manteniendo fija la posición del CEB mientras aumenta el radio de giro de dichos disipadores. Debido a que los datos experimentales confirman los resultados obtenidos analíticamente y el concepto del CEB es general, se prevé que tendencias similares se observarán al controlar estructuras asimétricas para otros tipos de disipadores.

REFERENCIAS

De la Llera, JC., Almazán, JL. and Vial, IJ. (2005). Torsional balance of plan asymmetric structures with frictional dampers: analytical results. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **34 (9)**, 1089-1108.

Lin, WH. and Chopra, AK. (2001). Understanding and predicting effects of supplemental viscous damping on seismic response of asymmetric one-storey systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **30**, 1475-1494.

Goel, RK. (1997). Effects of supplemental viscous damping on earthquake response of asymmetric-plan systems. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, **27**, 125-141.