

DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA PRINCIPIOS Y APLICACIONES

ARTURO TENA-COLUNGA

Universidad Autónoma Metropolitana



Principio Fundamental

- Para ilustrar el concepto de porqué es conveniente y eficiente utilizar dispositivos disipadores de energía para controlar la respuesta sísmica de estructuras, se recurrirá al planteamiento energético general presentado por Uang y Bertero.
- Para una estructura sujeta a una excitación por sismo, la ecuación de conservación de energía en la estructura está dada por:

$$E = E_c + E_e + E_h + E_d$$

- E es la energía absoluta de entrada que el sismo le induce a la estructura
- E_c es la energía cinética absoluta generada en la estructura
- E_e es la energía de deformación elástica (recuperable)
- E_h es la energía disipada por deformación de la estructura, que no es recuperable y está ligada al daño estructural.
- E_d es la energía disipada por amortiguamiento adicional.


$$E = E_c + E_e + E_h + E_d$$

- Como se ha mencionado antes, no es económico resistir sismos intensos dependiendo exclusivamente de las energías "limpias" que no provocan daño a la estructura (E_c y E_e).

$$E_e = \int_0^u ku(t)du; \quad E_c = \int_0^u m\dot{u}(t)du$$

- Por ello en el diseño sismo-resistente tradicional se ha echado mano de E_h , pero esto invariablemente está asociado a daño estructural.
- Mientras más se disipe energía por histéresis de los elementos estructurales originales, mayor será el daño que se espera (o tolera).


$$E = E_c + E_e + E_h + E_d$$

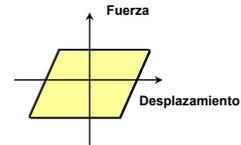
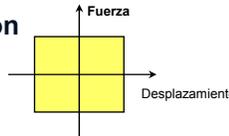
- La idea detrás de los dispositivos disipadores de energía es hacer el trabajo "sucio" por la estructura original, maximizando E_d con elementos especialmente diseñados para este fin ubicados en zonas estratégicas, y así poder minimizar E_h y, por tanto, el daño en los elementos estructurales convencionales. Es una técnica más inteligente y (semi) limpia.
- Los dispositivos disipadores de energía entonces son los responsables de proporcionar E_d y/o concentrar E_h , y esto se puede hacer de distintas maneras.

Clasificación

■ A grandes rasgos, los dispositivos disipadores de energía se pueden clasificar como:

■ Disipadores por histéresis (deformación plástica) del material.

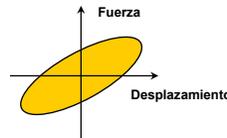
■ Disipadores por extrusión



■ Disipadores por fricción

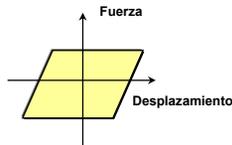
■ Disipadores viscoelásticos

■ Disipadores viscosos

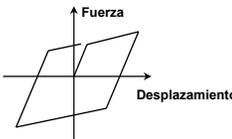


■ DISPOSITIVOS DISIPADORES DE ENERGÍA

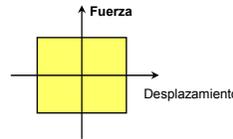
■ Dependientes del desplazamiento



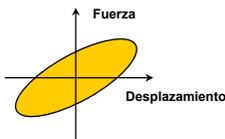
Disipador por histéresis del material



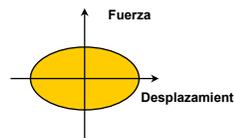
Disipador por fricción o extrusión



■ Dependientes de la velocidad



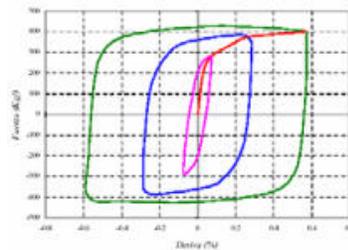
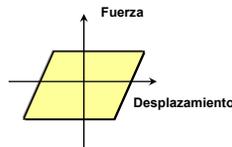
Disipador viscoelástico



Amortiguador viscoso

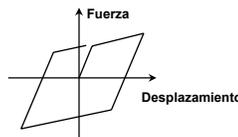
Disipadores por Histéresis

- Fueron de los primeros en desarrollarse, basándose en el concepto de emplear materiales capaces de disipar energía por deformación inelástica cíclica, y que fueran capaces de mantener esta gran capacidad de deformación cíclica para un número importante de incursiones inelásticas, antes de fallar por fatiga o fracturarse.
- Obviamente, la primera opción (natural) era utilizar elementos metálicos.



Disipadores por Histéresis

- En particular, se inició con aleaciones de acero (convencional y dulces), por su disponibilidad y costo. Actualmente se están estudiando otros metales (cobre, por ejemplo) y otras aleaciones especiales ("shape memory alloys").
- Los primeros trabajos sobre el tema se desarrollaron en Nueva Zelanda y datan de 1972, iniciados por los profesores James Kelly (actualmente profesor emérito de UC Berkeley) e Iván Skinner y colaboradores en la Universidad de Canterbury. Skinner y colaboradores estudiaron los disipadores metálicos inicialmente para proporcionar amortiguamiento adicional a estructuras con aislamiento sísmico.



Disipadores Estudiados en NZ

Disipador en U (Kelly) **Viga a Flexión en Voladizo (Robinson)**

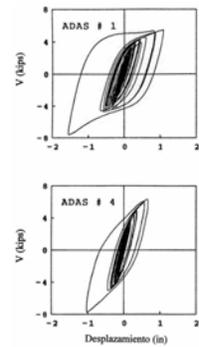
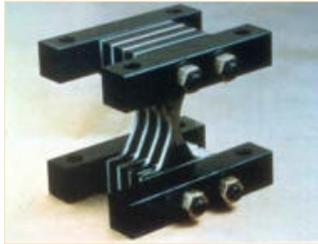
Disipadores estudiados en NZ

Viga a Flexión en U (Skinner y colaboradores)

Viga en Torsión (Robinson)

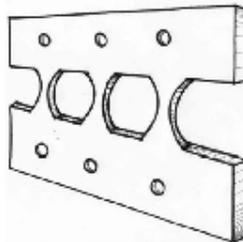
Dispositivos ADAS

- Posteriormente, en 1986-87 se iniciaron los trabajos en Estados Unidos (Universidad de California en Berkeley y Universidad de Michigan, patrocinador por CounterQuake) a partir de los cuales nació uno de los dispositivos más conocidos en el mundo, los Dispositivos ADAS (Added Damping and Stiffness), cuyos principios fundamentales tienen sus antecedentes en los trabajos de Kelly y de Skinner.



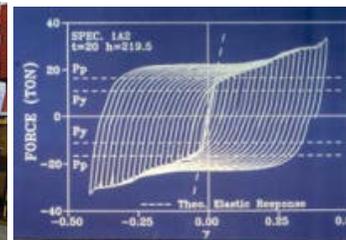
Dispositivos Quasi-ADAS

- Para intentar librar el problema del pago de patentes, comenzaron a estudiarse variantes del dispositivo ADAS en otras partes del mundo, unos decentes, y otros muy burdos.
- Juan Carlos de la Llera (Chile) estudió a inicios del siglo XXI unos ADAS hechos con cobre.
- Hay un dispositivo propuesto por unos italianos que son dos ADAS unidos por una barra soldada (¡una verdadera burla!).
- Uno de los más conocidos es uno que se denomina como Dispositivo Tipo Panal, cuyos estudios presentaron Kobori y colaboradores en 1992.



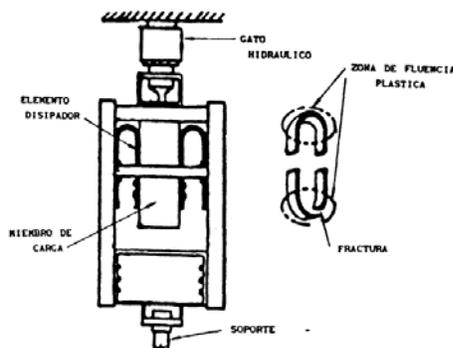
Dispositivos TADAS

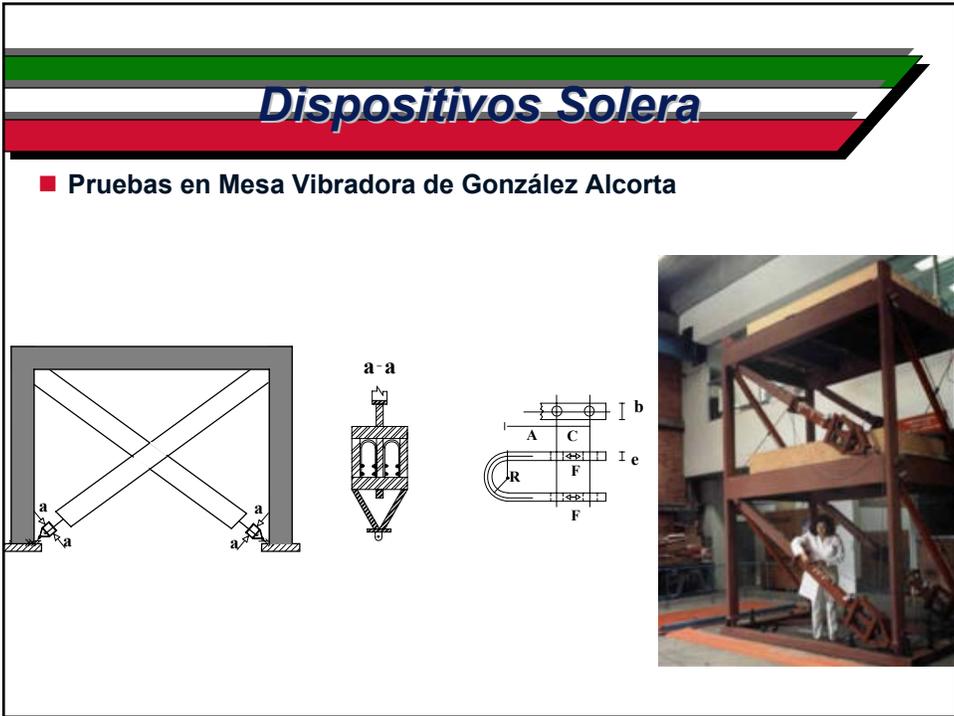
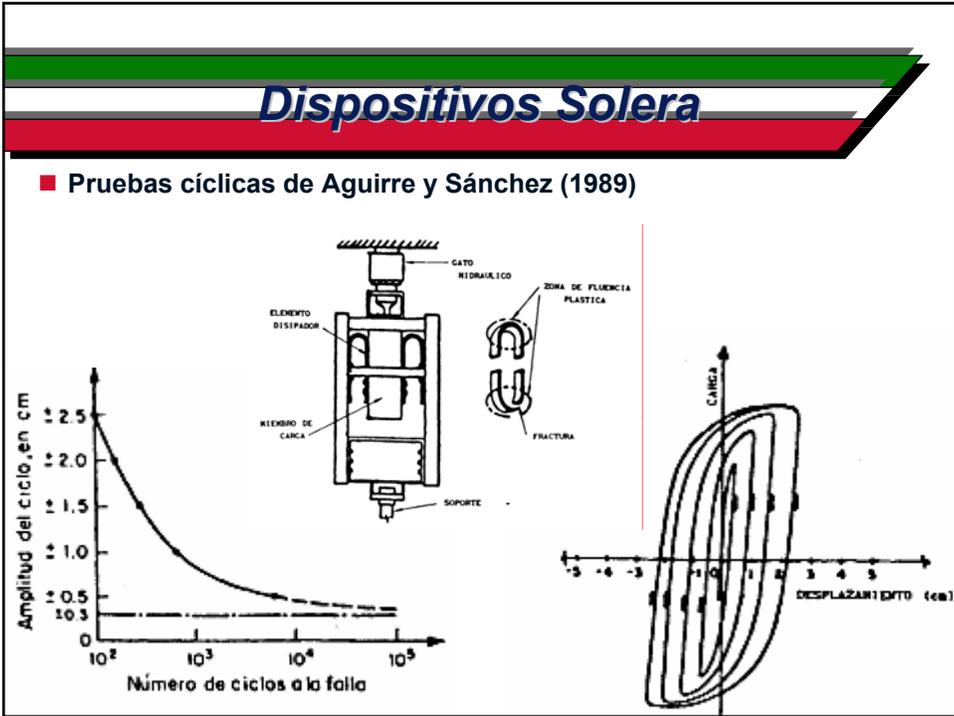
- La variante más conocida del dispositivo ADAS es la denominada como Dispositivo TADAS (Triangular Added Damping and Stiffness), desarrollado en Taiwan por Tsai y colaboradores y presentado a la comunidad internacional en 1993.



Dispositivos Solera

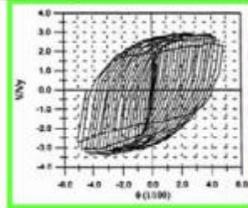
- Los Dispositivos Solera que se estudiaron en México a partir de 1989 en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Aguirre, Sánchez y González Alcorta) son una variante del dispositivo en U propuesto inicialmente por Kelly. Disipan energía por el efecto de rolo por flexión, similar al movimiento de las cadenas de la oruga de un tractor.





Dispositivos Tipo Panel de Cortante

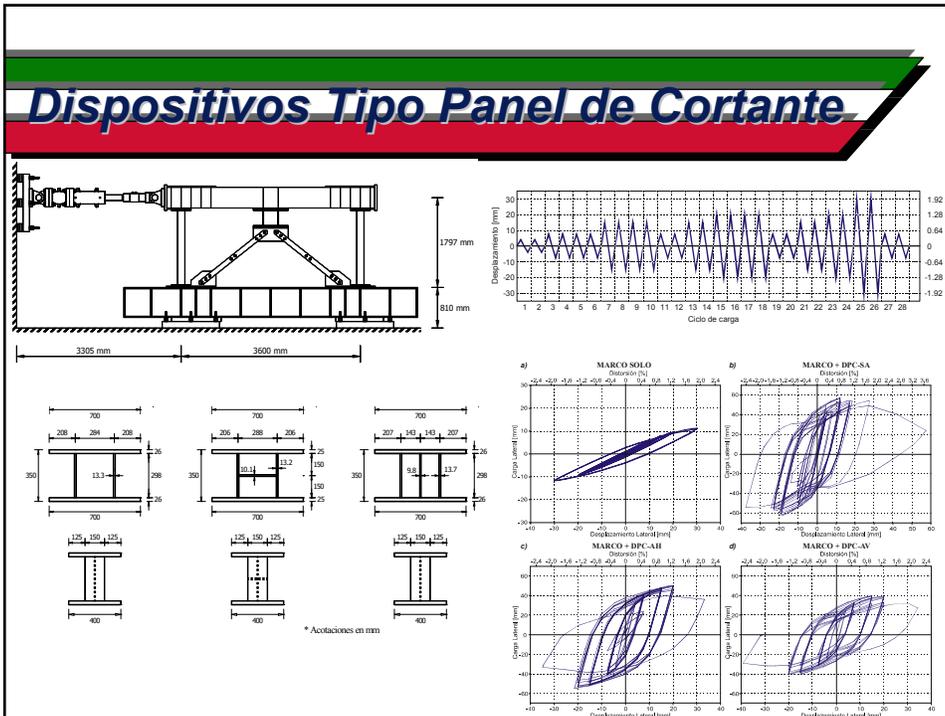
- Se desarrollaron originalmente en Taiwán a mediados de los años 90 y se conocen como LYSSP (low yield steel shear panel). Ya cuentan con una aplicación, el Hotel Hsin-Chu Ambassador de Taipei (Chang y Hwang 2005).



Dispositivos Tipo Panel de Cortante

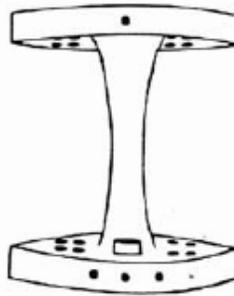
- En el Cenapred el Dr. Óscar López Bátiz y Fernando Aparicio ensayaron, iniciando el presente milenio, una serie de dispositivos que se basan en placas de acero a las que nombró panel de cortante, que se pueden considerar variantes de los ensayados en Taiwán.





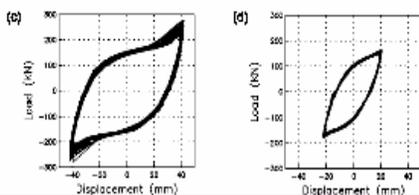
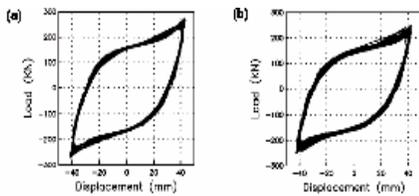
Disipadores por Flexión

- Inspirados en los trabajos del Prof. Skinner, existen otras propuestas de disipadores que trabajan por flexión.
- Uno de los más conocidos es una barra de sección variable empotrada en placa rígidas circulares de acero, que fue estudiado por Kobori y colaboradores, presentado en 1992.



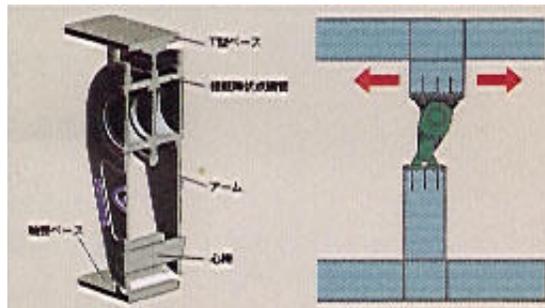
Disipadores por Flexión

- En México, el Ing. Jorge Ortega Beltrán propuso un disipador tipo viga simplemente apoyada que se estudió en el Instituto de Ingeniería de la UNAM (Ayala, Escobar, etc). Como se verá más adelante, ya tiene aplicaciones.



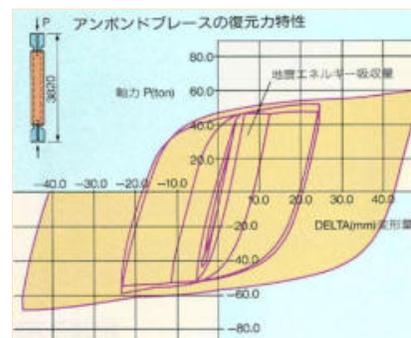
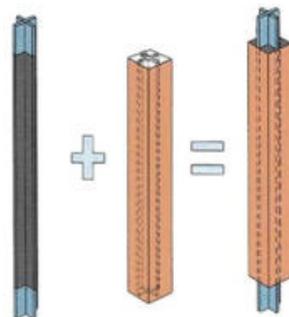
Disipadores a Torsión

- Inspirados por los trabajos de Robinson, se desarrolló el siguiente dispositivo en la década de los 90 por una empresa japonesa. Ya cuenta con aplicaciones, como se verá más adelante.
- En España, López Almanza está trabajando en el desarrollo de otro dispositivo por torsión para montarse en contravientos chevrón.

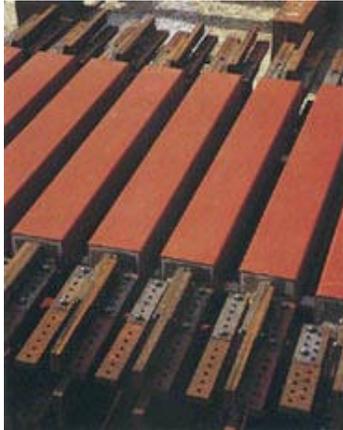


Tendones Desadheridos

- Este disipador fue desarrollado en Japón en los años 80s y cuenta con una patente de Nippon Steel.
- En México, Amador Terán está comenzando a estudiar en la UAM-A una variante, con la esperanza de que funcione y que se le pueda dar vuelta a la patente japonesa.

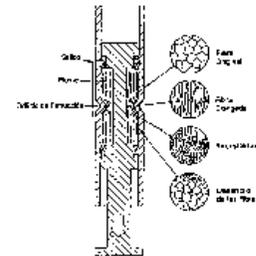
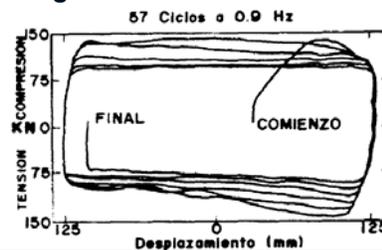


Tendones Desadheridos



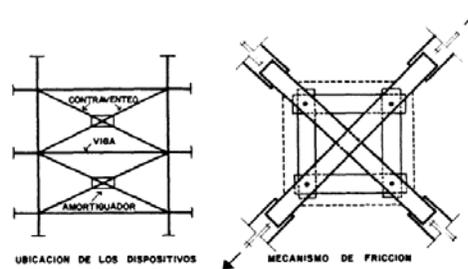
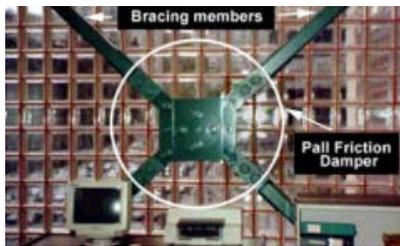
Disipadores por Extrusión

- Este sistema fue propuesto por Robinson y Greenbank entre 1975 y 1976, y fue utilizado en Nueva Zelanda en la construcción de dos puentes. Posteriormente se ha utilizado en edificios.
- El dispositivo está conformado por un tubo engrasado interiormente que contiene plomo, de forma que el plomo se puede desplazar en el interior del tubo. Cuando se presenta un sismo, el plomo cambia de sección debido al orificio de extrusión, una vez que sucede esto, se disipa parte de la energía de entrada. Al recuperar su sección original, el plomo se recristaliza y recupera sus propiedades originales.



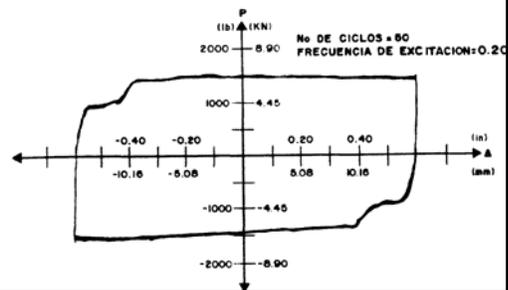
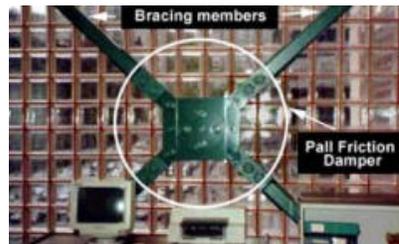
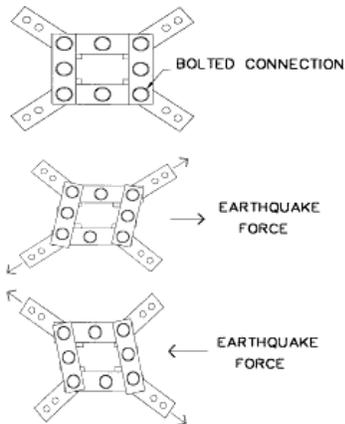
Disipadores por Fricción

- El estudio de dispositivos que disipan energía por la fricción que se produce entre dos cuerpos sólidos (solid friction) con fines de ingeniería sísmica inicia en 1980.
- Avtar Pall de Canadá fue el primero en estudiarlos, proponiendo un dispositivo cuyo mecanismo disipador se basa en el principio de las balatas de los frenos automotrices. Así nació lo que desde entonces se conoce como disipador Tipo Pall, que él mismo patentó.



Dispositivo Pall

- Dispositivo Pall Original



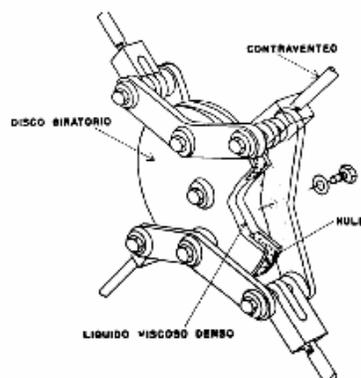
Dispositivo Pall

- Dispositivo Pall más reciente (para contravientos esbeltos)



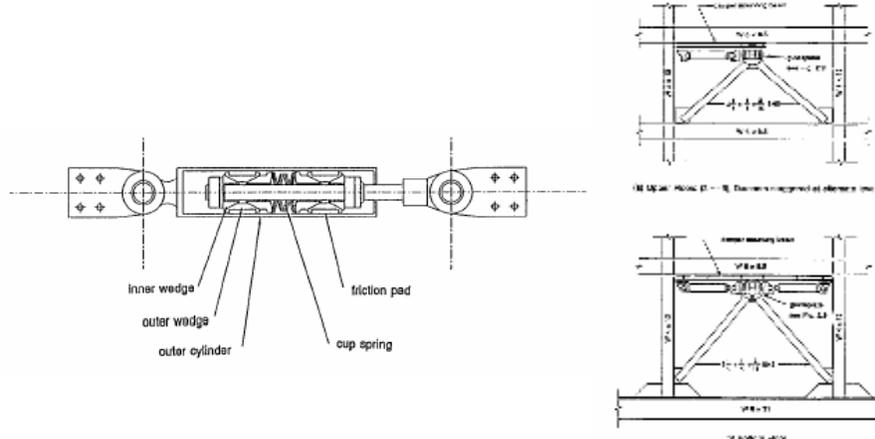
Dispositivo Friccionante Japonés

- Desarrollado en Japón en los años 80s por Oiles Company, con un principio muy similar al desarrollado por Pall, pero en este caso se utilizan placas de acero y de hule para proporcionar el amortiguamiento extra por fricción. Su gran desventaja era el costo.



Dispositivo Sumitomo

- Desarrollado en Japón en los años 80s. Consta de una placas de aleación de cobre que disipan energía por fricción al deslizarse en la superficie perimetral del tubo de acero que las protege.

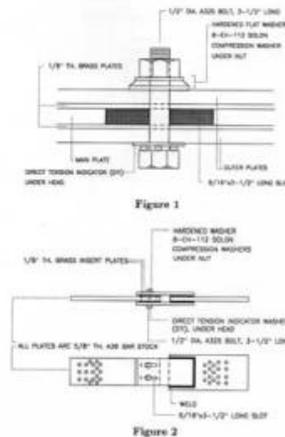


Conexiones Atornilladas Friccionantes

- También conocida como "Slotted-Bolted-Connection" (SBC), se desarrolló a partir de 1989 por Fitzgerald y colaboradores, y después la estudiaron Popov y Grigorian en UC Berkeley.



Profesor Popov (qepd)



Conexiones Atornilladas Friccionantes

- El concepto es muy simple: disipar energía en conexiones atornilladas de marcos contraventados concéntricos dejándole juego a agujeros de sección oblonga, para que así los tornillos se puedan deslizar sobre la placa de conexión y, por fricción, disipen energía. Se ha probado con placas de conexión de acero y de latón, teniendo en ambos casos buenos resultados.

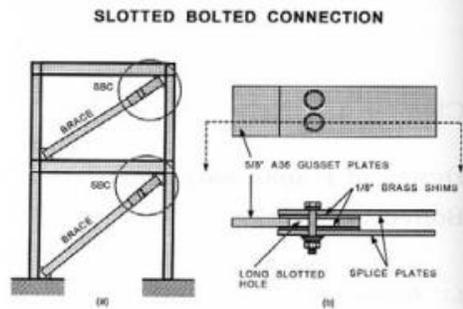


Fig. 4.1: (a) A Concentrically braced frame with SBCs, (b) the top view and side view of an SBC.

Conexiones Atornilladas Friccionantes

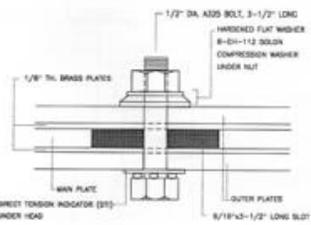


Figure 1

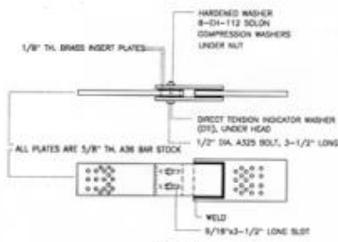
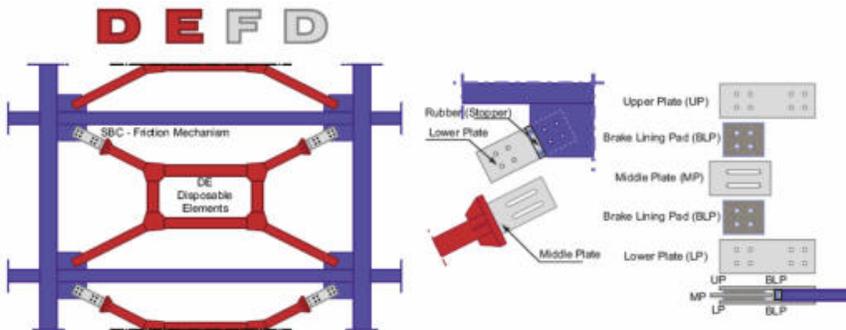


Figure 2



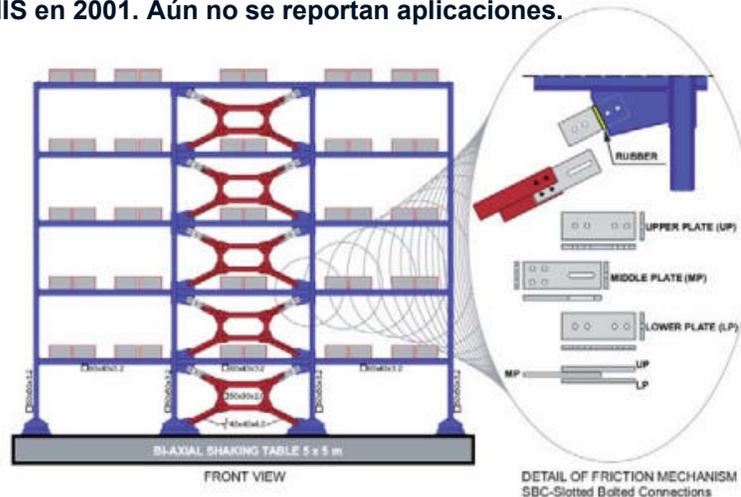
Dispositivo DEFD

- Desarrollado en el centro de investigación IZIS de Macedonia en 2001 por Rakicevic. La siglas significan Disposable Elements Friction Damping. Mezcla el concepto de tener elementos que puedan ser desechables y disipar energía por fricción a través de conexiones atornilladas.



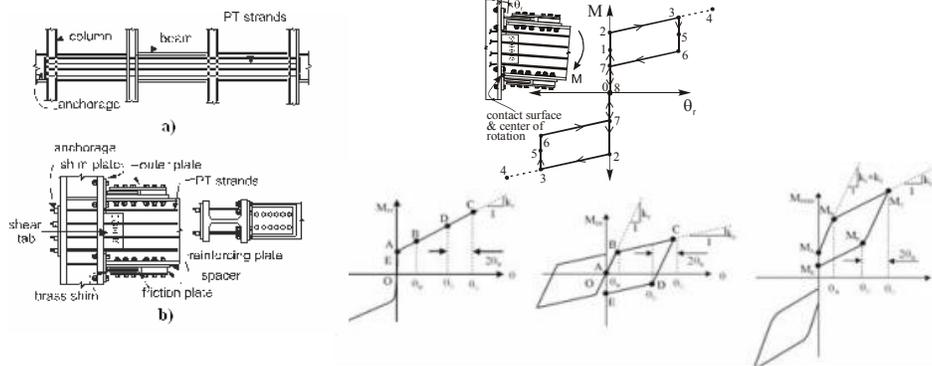
Dispositivo DEFD

- Según reporta Garevski, se probó con éxito en la mesa vibradora de IZIS en 2001. Aún no se reportan aplicaciones.



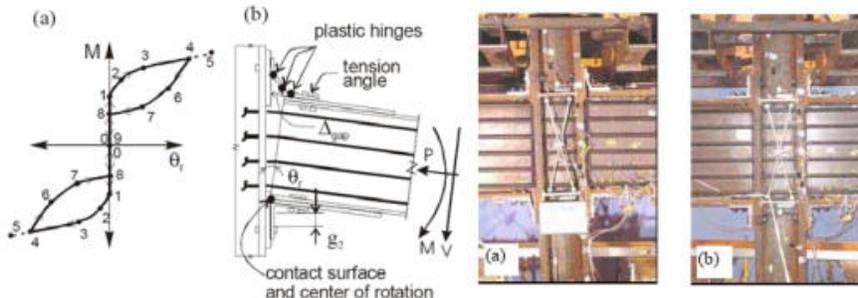
Conexiones Postensadas Friccionantes

- También conocidas como "Post-tensioned friction damped connection (PFDC)" y se desarrollaron a partir del nuevo milenio, donde se han empezado a estudiar en acero en Lehigh por Ricles, Garlock y Rojas.
- Es una combinación de SBC con un sistema autocentrante desarrollado inicialmente para marcos de concreto presfuerzo.



Conexiones Postensadas Friccionantes

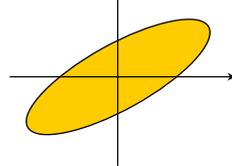
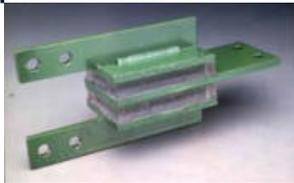
- Se conocen también como sistemas autocentrantes dado que los cables de presfuerzo tienen la misión de regresar a la viga a su posición original después de la excitación.
- La fricción se obtiene por medio del deslizamiento que existe entre los tornillos y placas oblongas de latón. De hecho, esta conexión es una mejora técnica a la SBC de Popov (aún sin aplicaciones).



Experimentos de Garlock y col. en Lehigh

Disipadores Viscoelásticos

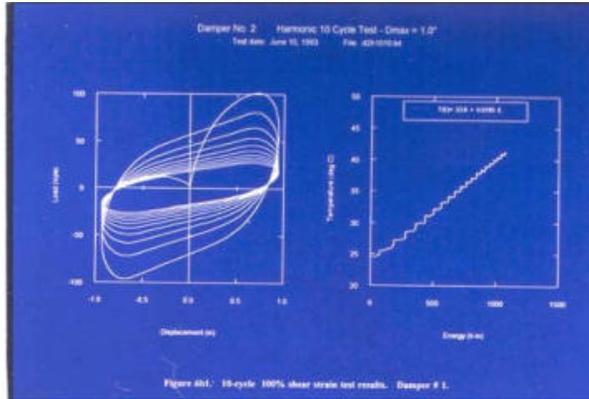
- El estudio de dispositivos que disipan energía utilizando materiales viscoelásticos sólidos inicia en los años cincuenta en la industria aeronáutica y en los años sesenta para reducir los desplazamientos por la acción de los vientos.
- Una de sus aplicaciones más famosas fue su colocación en la cuerda inferior de las travesas de alma abierta de las hoy célebremente extintas Torres Gemelas de Nueva York (1969).
- El Prof. James Kelly de la Universidad de California en Berkeley extendió su uso para aplicaciones de ingeniería sísmica, apoyado en desarrollos de la empresa multinacional 3M.
- En México existe una aplicación de este dispositivo en Santa Fé, precisamente el edificio de oficinas de la multinacional 3M.



Disipadores Viscoelásticos

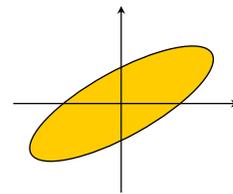
- Los disipadores viscoelásticos están hechos de capas de polímeros acrílicos firmemente adheridas.
- Las características cíclicas de estos dispositivos de la empresa 3M con fines de aplicaciones en ingeniería sísmica se estudiaron en mesa vibradora entre 1988 y 1993, principalmente en los grupos de trabajo de lo ahora nombrados PEER y MCEER (antes EERC y NCEER).
- El comportamiento viscoelástico depende del cortante de las capas del polímero utilizado.
- Su comportamiento viscoelástico y su rigidez dependen del nivel de deformación por cortante, de la frecuencia de oscilación y de la temperatura.
- Estos parámetros pueden variar entre 30% y 50% para cambios de temperatura de 10° centígrados para bajas frecuencias (periodos largos) y son mayores para altas frecuencias altas (periodos cortos).

Disipadores Viscoelásticos



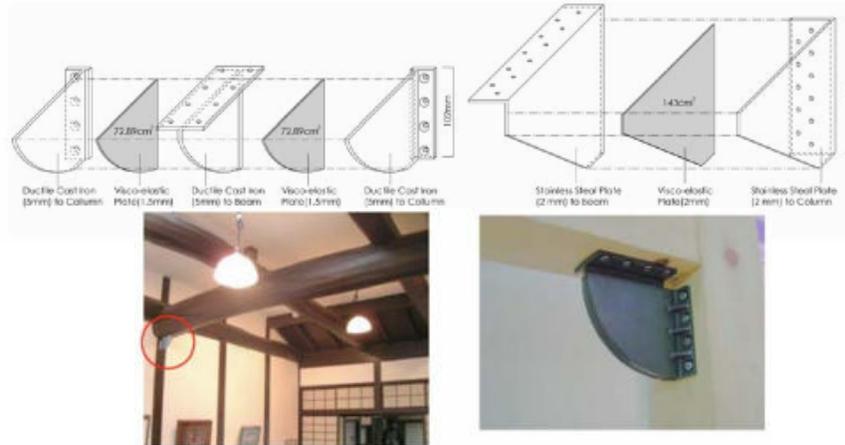
Disipadores Viscoelásticos

- Otras empresas como Lorant Group y Hazama Corporation han desarrollado dispositivos con materiales similares.
- En Chile, Juan Carlos de la Llera ha desarrollado una versión económica utilizando compuestos de caucho natural.
- En Japón, Shimizu Corporation desarrolló unos muros viscoelásticos, donde unas hojas compuestas de hule termoplástico se encuentran colocadas en capas entre placas de acero, a manera de sandwich.
- El profesor Robinson de Nueva Zelanda desarrolló el dispositivo PDV que se muestra en la figura.

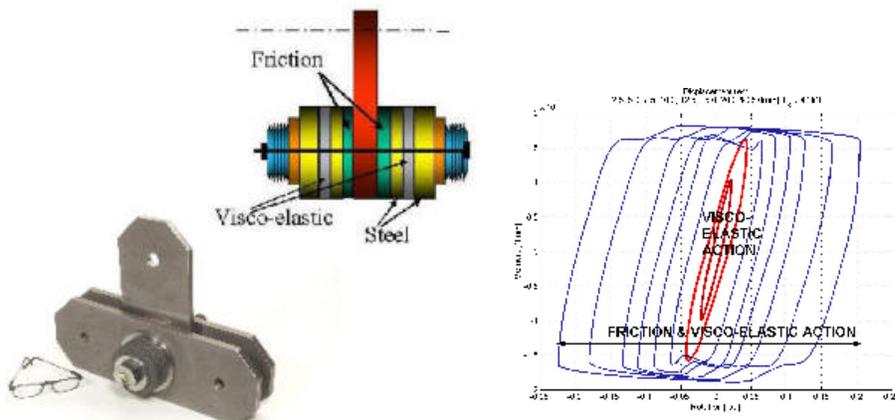


Disipadores Viscoelásticos

- En Japón también desarrollaron un disipador viscoelástico económico para usarse en conexiones de estructuras de madera (residencial), según reportar Katagihara y colaboradores.



Disipador Viscoelástico-Friccionante

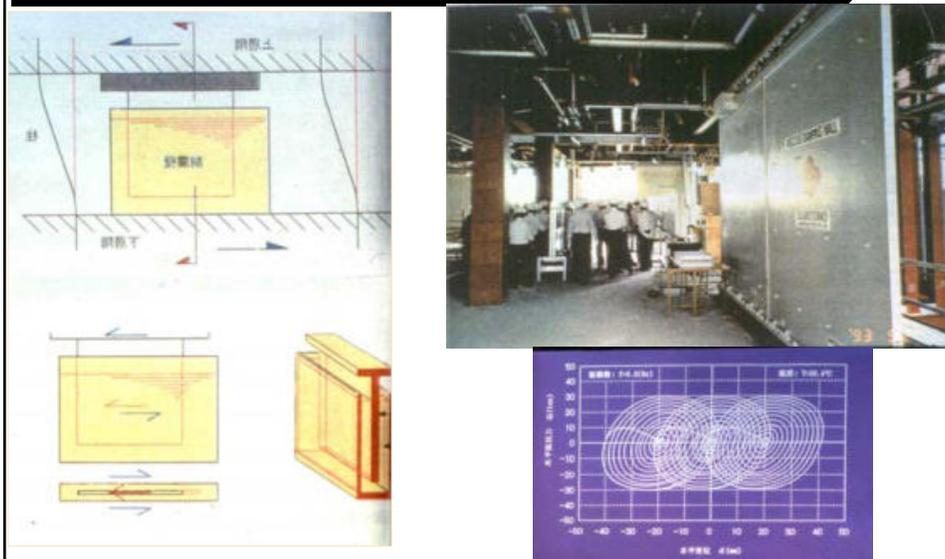


Dispositivo nombrado Friction-ViscoElastic Damper Device (F-VEDD) de la empresa DAMPTECH de Dinamarca

Muro con Amortiguamiento Viscoso

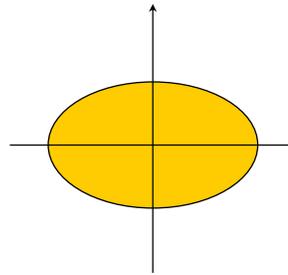
- También en Japón, Sumitomo Construction Company desarrolló a fines de los años 80s unos muros con comportamiento viscoelástico utilizando un fluido viscoso, y por eso se conocen como muros de amortiguamiento viscoso (viscous damping wall, VDW).
- Un muro con amortiguamiento viscoso se compone de un muro diafragma hueco especial. El muro es prefabricado, pero está relleno con un fluido viscoso. El muro está ligado en su base con el sistema marco-piso. El sistema contiene un muro-remo en forma de T que se sujeta en la parte superior del marco por los patines y cuya alma se introduce dentro del muro hueco para tener contacto directo con el fluido viscoso.
- La distorsión relativa entre el marco superior y el muro ocasiona que la acción de este remo efectivo estimule al fluido y así disipe energía.

Muro con Amortiguamiento Viscoso



Disipadores Viscosos

- Se puede obtener un comportamiento completamente viscoso cuando se fuerza a un fluido pasar por un orificio, que es el principio con el cual se desarrollaron los amortiguadores para las industrias militar, aeronáutica y automotriz.
- El comportamiento del fluido depende de la velocidad de aplicación de la carga, y su comportamiento con la velocidad puede ser lineal o no lineal.



Disipadores Viscosos

- Los estudios para su aplicación en ingeniería sísmica datan de principios de los años noventas. Los dispositivos más famosos de este tipo son los Taylor, desarrollados originalmente para la industria aeroespacial.
- Normalmente se instalan en diagonal, por medio de contravientos.
- Su popularidad ha crecido muy rápidamente y con ello sus aplicaciones en Estados Unidos, Japón y muchos otros países, entre ellos México.



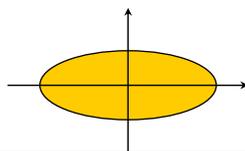
Disipadores Viscosos

- Los amortiguadores viscosos normalmente están hechos de un tubo de acero inoxidable rellenos con un fluido de silicón que se estimula con un pistón de acero inoxidable que contiene una placa de bronce con orificios.
- Las fuerzas se originan por el diferencial de presión generado alrededor del cabezal del pistón. Las fuerzas resistentes son proporcionales a la velocidad con que se mueve el pistón (comportamiento lineal) o a una potencia de tal velocidad (comportamiento no lineal), lo cual depende de la configuración de los orificios.



Disipadores Viscosos

- Como el fluido es compresible, una reducción del volumen del fluido desarrolla una fuerza restitutiva que depende del desplazamiento (rigidez). Este comportamiento se puede prevenir utilizando un acumulador.
- Los amortiguadores que se estudiaron en NCEER desarrollaron rigideces sólo en altas frecuencias (mayores a 4 Hertz), las cuales resultaron benéficas para inhibir la participación de modos superiores.
- Estos amortiguadores tienen un comportamiento estable en intervalos de frecuencias (0 a 25 Hertz) y de temperaturas (0 a 50°C) amplios. Las características viscosas varían un 40% en un gradiente de temperatura de 50°C, y son menores al 8% en un gradiente de temperatura de 10°C.



ALGUNAS APLICACIONES DE DISIPADORES DE ENERGÍA EN ESTRUCTURAS EXISTENTES

Arturo Tena Colunga



Dispositivos ADAS

- Reestructuración de las oficinas centrales del IMSS (3 edificios), México, DF



Dispositivos tipo Viga

- Reestructuración del Edificio SAGAR, México, DF



Dispositivos TADAS

- Taipei Living Mall, Taipei, Taiwan



Tendones Desadheridos

Osaka Convention Center, Japón



Edificios con Conexiones Friccionantes

- Reestructuración del Hospital 20 de Noviembre del ISSSTE, México, DF.



Disipadores por Extrusión



Wellington Central
Police Station, Nueva Zelanda



Hotel en Japón

Dispositivos Pall

Webster Library en Concordia University, Montréal, Canadá



Disipadores Viscoelásticos

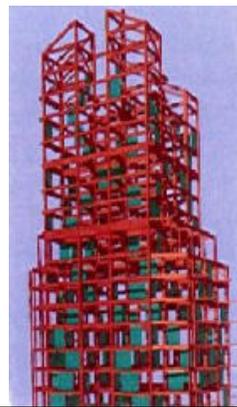
■ Edificio Corporativo 3M, México, DF



Viscous Damping Walls (VDW)

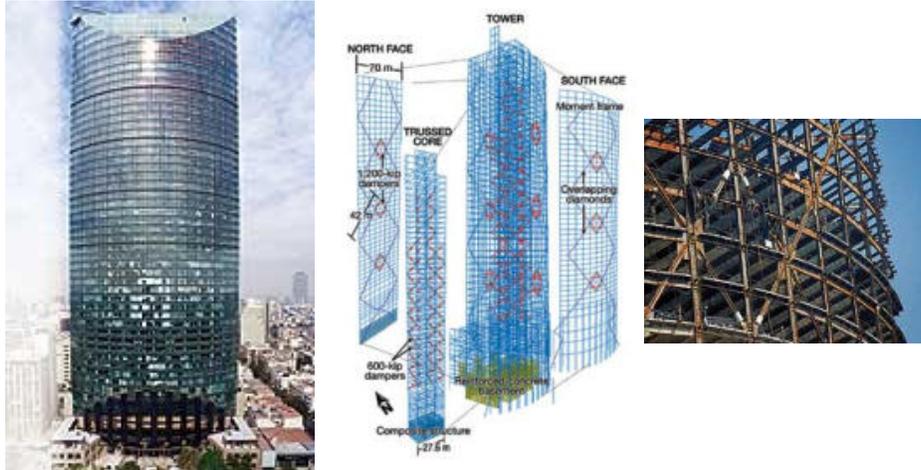
SUT Building, Shinzuoka, Japón (1993)

Tiene más de 180 VDW, para dar un amortiguamiento equivalente entre el 20 y 30% Del crítico.



Dispositivos Taylor

Torre Mayor, México, DF



Dispositivo F-VEED



Taishi-Do Building Yaguriji Temple, Japón