

## EL CONCEPTO “RIGIDO-FLEXIBLE-DUCTIL” Y LAS CONEXIONES SLB

Luis M. Bozzo<sup>(1)</sup>, Gustavo Gaxiola<sup>(2)</sup>

<sup>1</sup>Luis Bozzo Estructuras y Proyectos S.L. Calle Bailen 71 bis, 4to-1ra, Barcelona, 08009, info@luisbozzo.com

<sup>2</sup>Luis Bozzo Estructuras y Proyectos. S.L. Av. Vallarta 6503 L6, Zapopan, Jalisco, 45010, mexico@luisbozzo.com

### RESUMEN

Se busca unificar los campos de control moderno y diseño clásico de estructuras mediante los conceptos de rigidez, flexibilidad y ductilidad incorporando conexiones tipo “Shear Link Bozzo (SLB)”. Una estructura se divide en un sistema flexible (sin conexiones SLB) y un sistema rígido (incorporando estos dispositivos). La ductilidad de las conexiones SLB, las cuales funcionan como rótulas plásticas, permiten el ideal sismo resistente, es decir, un sistema con el nivel de fuerzas del sistema flexible pero con el nivel de desplazamientos del sistema rígido, concentrando las demandas de ductilidad en conexiones fabricadas industrialmente y con propiedades mecánicas definidas.

### ABSTRACT

The article attempts to unify the fields of modern control and classical seismic design through the concepts of stiffness, flexibility and ductility incorporating "Shear Link Bozzo (SLB)" connections. A structure is divided into a flexible system (without SLB connections) and a rigid system (incorporating these devices). The ductility of the SLB connections, which act as plastic hinges, allow the ideal earthquake resistant, ie, a system level forces corresponding to the flexible system, but with the level of displacement of the rigid system, concentrating the ductility demands in connection industrially manufactured with defined mechanical properties.

### INTRODUCCIÓN

El inicio de las conexiones SLB se puede fijar en el año de 1989 en una conversación personal con el distinguido profesor Popov en la U.C. Berkeley quien me manifestó, en referencia al popular sistema estructural de los pórticos excéntricos metálicos, que “el acero era un excelente disipador de energía por fuerza cortante”. Dado que normalmente se asocia en concreto armado el fallo a cortante como un fallo frágil la observación o comentario referente al acero llamó mi atención. Por otra parte esta observación se refiere a la capacidad disipativa por corte de los brazos excéntricos metálicos por lo que es y era natural pensar en unificar los campos de control pasivo de estructural con el diseño clásico mediante zonas disipativas controladas (una clara deficiencia del sistema de los pórticos excéntricos es su difícil reparación en el caso de un sismo severo que los active). Ver Figura 1.

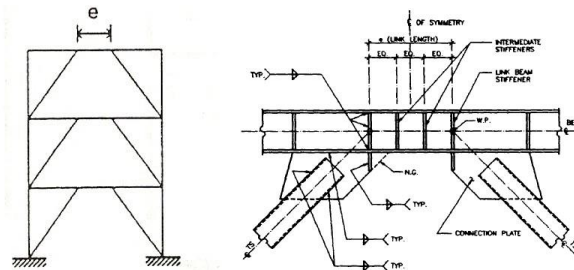


Figura 1 Sistema de pórticos excéntricos y brazo disipativo o “shear link” clásico.

La primera investigación en esta línea fue numérica y queda reflejada en el artículo (Foti et. al. 1998). En este primer trabajo se compara numéricamente la respuesta de estructuras incorporando disipadores genéricos de energía determinándose el potencial de reducción de fuerzas entre el sistema flexible (sin disipadores) y el sistema rígido (incorporando disipadores). Posteriormente en el trabajo (Cahis et. al 1998) se propone un disipador tipo Shear Link para la protección de muros de mampostería. La contribución significativa de este trabajo fue el empleo del frezado o mecanizado para obtener los brazos excéntricos del sistema clásico mencionado previamente de manera automatizada sin soldadura. Se realizaron ensayos experimentales de modelos a escala reducida en la mesa vibrante del laboratorio de ISMES con mucho éxito y que mostraron experimentalmente que era posible diseñar estructuras con el nivel de fuerzas del sistema flexible pero con el nivel de desplazamientos del sistema rígido (Franchioni 2001), tal como se muestra en las curvas experimentales de las figuras siguientes para un modelo a escala de un pórtico metálico incorporando muros de concreto obtenidas en la mesa vibrante de ISMES:

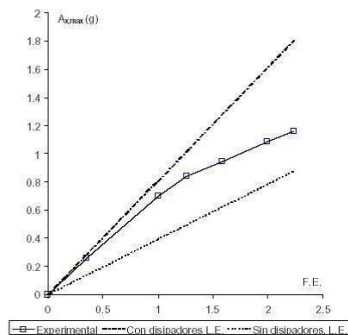


Figura 5.178 Respuesta máxima en aceleración observada en los distintos test, comparada con las respuestas lineales y elásticas de la estructura con disipadores y sin disipadores

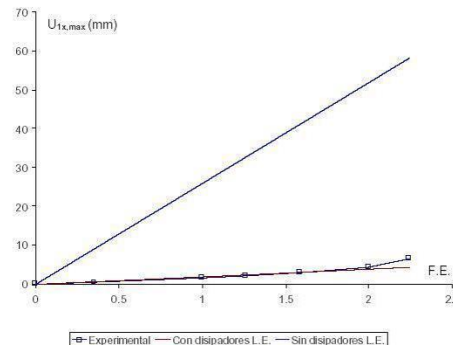


Figura 5.179 Desplazamientos máximos observados en los distintos test, comparados con los de la estructura con y sin disipadores en comportamiento lineal y elástico

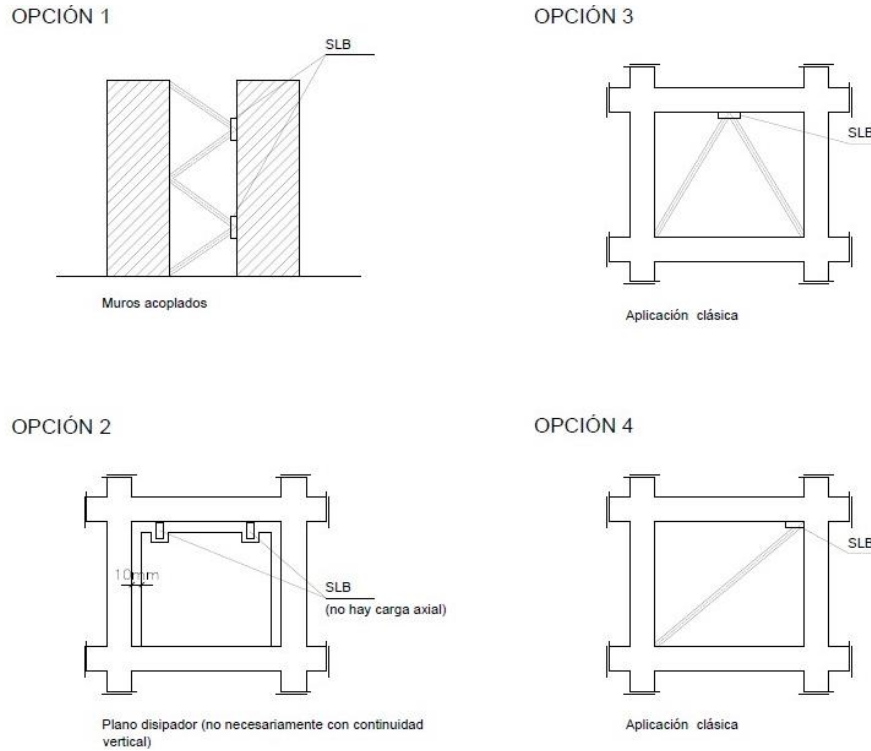
**Figura 2 (a) Cortante en la base para diversos factores de escala (FE) del terremoto de Loma Prieta. (b) Desplazamiento en la cubierta también para diversos factores de escala del mismo terremoto. Las dos líneas en cada figura representan al sistema flexible y al sistema rígido bajo respuesta lineal.**

Observado la figura anterior se concluye que a medida que el factor de escala (F.E. eje de abscisas) aumenta se logra un sistema con el nivel de fuerzas del sistema flexible (línea recta inferior de la figura izquierda) pero por otra parte el nivel de desplazamientos se mantiene próximo al sistema rígido (línea recta inferior de la figura derecha). De estos resultados experimentales en mesa vibrante se puede concluir que es posible lograr el ideal sismo resistente de tener el nivel de fuerzas del sistema flexible pero con el nivel de desplazamientos del sistema rígido. Por otra parte es claro que el nivel de fuerzas para el inicio de la plastificación de las conexiones tiene un papel importante para alcanzar este resultado para un determinado F.E del sismo.

Posteriormente el disipador se generalizó en el trabajo (Hurtado et. al 2008) variando sus dimensiones en planta y en altura realizando una optimización cualitativa de su geometría. En base a estos estudios numéricos y cualitativos se fijó una altura de 300mm variando el ancho para distintos niveles de fuerza cortante bajo el mismo patrón de comportamiento. Se realizó un análisis numérico con el programa ANSYS calibrándose los resultados con ensayos experimentales también en el laboratorio de ISMES en Italia. En este trabajo se aportaron tablas de diseño directamente utilizables en programas informáticos tipo ETABS o SAP.

El planteamiento formal de la propuesta “rígido-flexible-dúctil” para unificar los campos de control pasivo y diseño sismo resistente clásico se puede fijar con la publicación (Bozzo et. al 2000). En ella se presentan los disipadores de energía como el paso natural al diseño clásico buscando concentrar las demandas de ductilidad en elementos fabricados industrialmente. Muchos sistemas clásicos de diseño sismo resistente como los muros acoplados en concreto armado, los pórticos excéntricos e incluso el sistema dual se pueden re-estudiar o re-definir empleando conexiones no lineales rígidas como las propuestas conexiones SLB. Por tanto, los alcances de esta investigación son muy grandes dado que afecta al propio planteamiento del diseño sismo resistente pudiéndose plantear una diversidad de sistemas estructurales más eficientes y seguros a los empleados en la actualidad. A continuación se muestran

algunas alternativas de colocación o acoplamiento entre el sistema rígido y el flexible siendo todas alternativas que hemos ejecutado en edificios construidos.



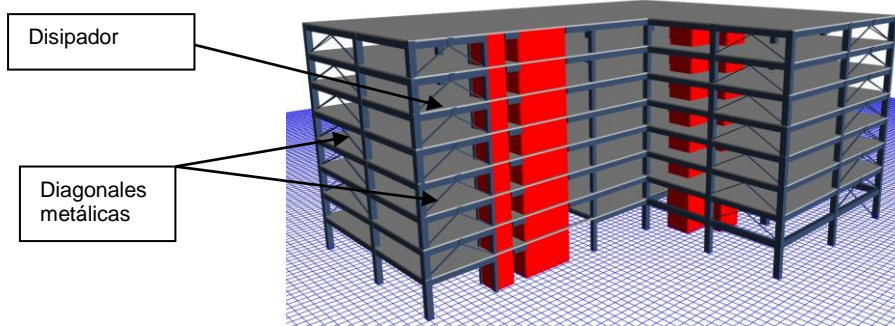
**Figura 3 Posición de las conexiones SLB. Opción 1: muros acoplados. Opción 2: Paneles disipativos liberando fuerza axial en las conexiones SLB. Opciones 3 y 4: Marcos rigidizados clásicos**

La metodología para este artículo consiste en diversos casos prácticos estudiados que muestran las ventajas de la incorporación de estas conexiones. Para ello se presenta paso a paso como se seleccionan estos dispositivos investigándose la diferencia de rigidez entre el sistema rígido y el sistema flexible. En particular se estudia la nave industrial Nettalco construida en el Perú con este sistema. El edificio es de 8 niveles empleando postensado con luces de, aproximadamente, 14mx14m con muros estructurales en la zona de comunicaciones y con muros desacoplados incorporando conexiones SLB en las fachadas de diversas plantas. El segundo proyecto estudiado permite de forma más segura al diseño clásico emplear muros discontinuos dotando de rigidez y ductilidad al sistema. El proyecto se denomina Urbana y está en construcción actualmente en la ciudad de Guadalajara. El tercer proyecto representa la forma más óptima de emplear este planteamiento pues el sistema flexible es un sistema prefabricado de muy baja rigidez lateral obteniéndose fuerzas sísmicas muy bajas, comparables a las obtenidas con aislamiento de base pero sin sus limitaciones en cuanto al mantenimiento de una junta deslizante o flexible durante toda su vida útil, con todas las dificultades que esto origina en cuanto a mantenimiento o incluso funcionamiento de instalaciones o elevadores después de un sismo severo.

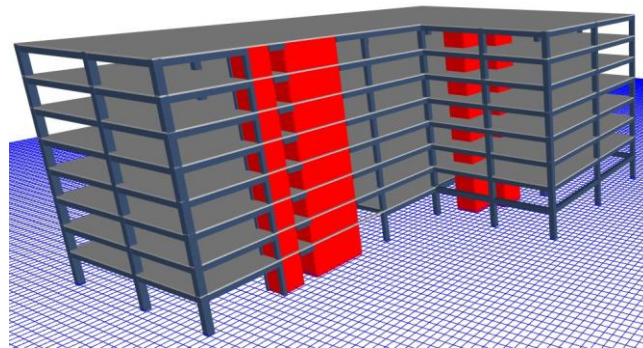
### CASO: EDIFICIO INDUSTRIAL NETTALCO (PERÚ)

El edificio industrial Nettalco es un edificio de 8 niveles con intereje aproximado de 14mx14m resuelto con losas postensadas aligeradas de 40cm de espesor sobre un marco tridimensional de travesaños y muros. En este caso las conexiones SLB se emplearon para darle una mayor seguridad a la estructura frente a sollicitaciones sísmicas severas. Para ello se dispusieron diagonales metálicas sobre distintos vanos, algunos NO continuos hasta la planta baja, tal

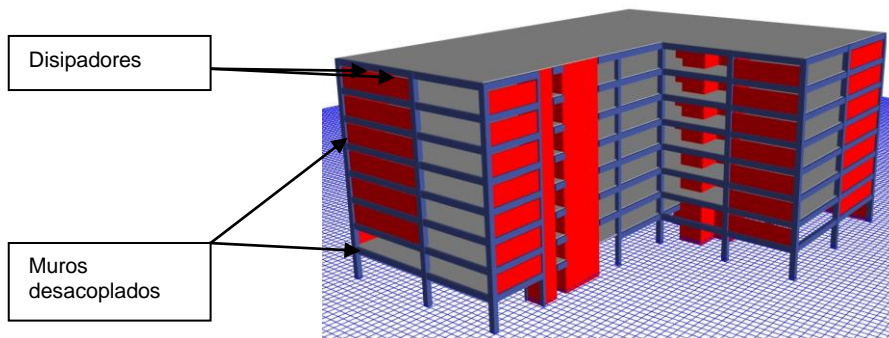
como se aprecia en la figura 4. Con respecto al tipo de suelo es rígido con antiguos lechos de río aluvial como suele darse en gran parte de Lima.



(a) Estructura con diagonales (denominada "rígida" en este caso)



(b) Estructura convencional (denominada "flexible" en este caso)



(c) Propuesta con muros disipativos (también denominada "rígida")

Figura 4 (a) Modelo de estructura ejecutada con diagonales y conexiones SLB. (b) Estructura convencional sin disipadores. (c) Propuesta alternativa con paneles incorporando SLB sin transmisión de fuerza axial.

### Estructura flexible. Análisis modal lineal

La estructura flexible en este caso es el sistema para cargas verticales junto con los muros necesarios para la comunicación vertical y cerramientos anti incendios. Es decir la estructura flexible es el sistema total SIN las diagonales que incorporan conexiones SLB. Se realizó un análisis modal indicando en la siguiente figura los periodos obtenidos:

| BARED STRUCTURE |      |        |       |       |       |        |        |        |       |       |
|-----------------|------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Case            | Mode | Period | UX    | UY    | RZ    | Sum UX | Sum UY | Sum RZ | Tx,eq | Ty,eq |
|                 |      | sec    |       |       |       |        |        |        | sec   | sec   |
| Modal           | 1    | 1,072  | 0,7%  | 11,6% | 68,0% | 1%     | 12%    | 68%    | 0,688 | 0,637 |
| Modal           | 2    | 0,845  | 75,4% | 1,4%  | 0,4%  | 76%    | 13%    | 68%    |       |       |
| Modal           | 3    | 0,701  | 0,9%  | 66,7% | 12,7% | 77%    | 80%    | 81%    |       |       |
| Modal           | 4    | 0,317  | 0,1%  | 2,2%  | 10,6% | 77%    | 82%    | 92%    |       |       |
| Modal           | 5    | 0,223  | 16,4% | 0,1%  | 0,0%  | 94%    | 82%    | 92%    |       |       |
| Modal           | 6    | 0,200  | 0,0%  | 12,8% | 1,9%  | 94%    | 95%    | 94%    |       |       |

Figura 5 Periodos obtenidos para la estructura flexible realizando un análisis modal

Observándose que el primer modo es torsional con periodo de 1,07s junto con periodos en X y Y de 0,845s y 0,701s, respectivamente. Los periodos Tx,eq y Ty,eq indicados en la parte superior derecha son los valores ponderados de cada periodo y su participación, los cuales denominamos periodos equivalentes.

### Estructura rígida. Análisis modal lineal

La estructura rígida en este caso corresponde a tres alternativas. La primera alternativa (que fue la construida) es con diagonales metálicas mediante tubulares ubicadas en el perímetro exterior. La segunda alternativa de disipación es mediante paneles disipativos ubicados en la misma posición que las diagonales pero con espesor de 10cm y de 15cm.

Un primer aspecto a determinar son las características de cada conexión SLB que pueden variar en planta y en altura para lo cual se requiere de un primer pre-cálculo. Dado que los anchos de estas conexiones varían entre 30 y 50cm se considera como primera aproximación un rectángulo macizo de 50cm de ancho y 2cm de espesor en la posición de cada dispositivo y tal como muestra la figura siguiente:

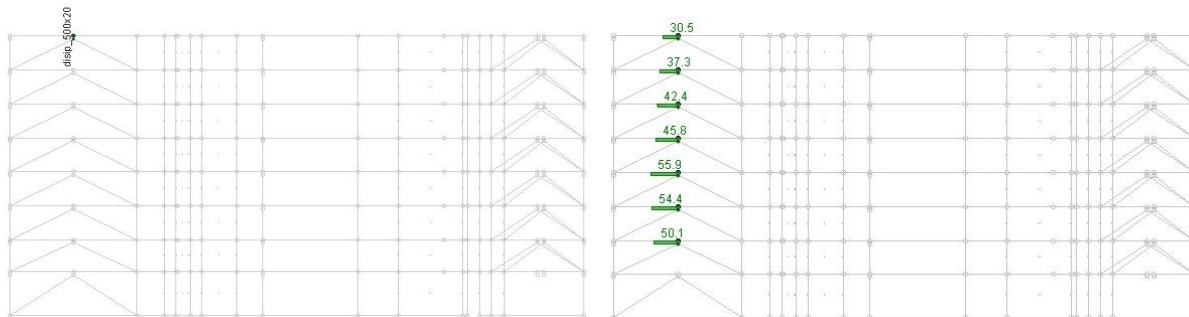


Figura 6 (a) Barra rectangular de 500x20mm representando el disipador para realizar un análisis modal clásico. (b) Cortante en cada conexión para fuerzas de diseño reducidas por factor Q (o R, según normativa).

En base a los cortantes determinados se procede a emplear la tabla preparada en Hurtado et. al 2008 que permite una identificación directa de cada dispositivo en función de la fuerza cortante fy o Fy. La primera (fy) representa el inicio de la plastificación y la segunda (Fy) la definición equivalente de la fuerza de plastificación. En este caso la columna correcta corresponde a Fy dado que las fuerzas cortantes determinadas son las reducidas (en el ejemplo anterior se redujeron por un factor de R = 6). Es criterio de cada calculista agrupar los dispositivos con fuerzas cortante

similares, tal como se procedería en un diseño convencional. Una vez seleccionado cada dispositivo se puede volver a determinar la fuerza cortante en cada conexión aunque la variación suele ser poco significativa.

Después de realizar un nuevo análisis modal para las alternativas con diagonales y con muros disipativos de 15cm, se muestra la siguiente figura indicando los periodos obtenidos:

| DIAGONAL BRACES |      |        |       |       |       |        |        |        |       |       |
|-----------------|------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Case            | Mode | Period | UX    | UY    | RZ    | Sum UX | Sum UY | Sum RZ | Tx,eq | Ty,eq |
|                 |      | sec    |       |       |       |        |        |        | sec   | sec   |
| Modal           | 1    | 1,021  | 0,6%  | 9,3%  | 71,4% | 1%     | 9%     | 71%    | 0,672 | 0,616 |
| Modal           | 2    | 0,818  | 76,5% | 1,1%  | 0,4%  | 77%    | 10%    | 72%    |       |       |
| Modal           | 3    | 0,687  | 0,7%  | 70,0% | 10,1% | 78%    | 80%    | 82%    |       |       |
| Modal           | 4    | 0,311  | 0,1%  | 1,8%  | 10,4% | 78%    | 82%    | 92%    |       |       |
| Modal           | 5    | 0,222  | 15,8% | 0,0%  | 0,0%  | 94%    | 82%    | 92%    |       |       |
| Modal           | 6    | 0,200  | 0,0%  | 12,8% | 1,7%  | 94%    | 95%    | 94%    |       |       |
| CONCRETE PANELS |      |        |       |       |       |        |        |        |       |       |
| Case            | Mode | Period | UX    | UY    | RZ    | Sum UX | Sum UY | Sum RZ | Tx,eq | Ty,eq |
|                 |      | sec    |       |       |       |        |        |        | sec   | sec   |
| Modal           | 1    | 0,817  | 9,8%  | 13,5% | 59,5% | 10%    | 13%    | 59%    | 0,620 | 0,576 |
| Modal           | 2    | 0,741  | 66,3% | 8,5%  | 5,0%  | 76%    | 22%    | 64%    |       |       |
| Modal           | 3    | 0,632  | 2,7%  | 59,5% | 20,3% | 79%    | 81%    | 85%    |       |       |
| Modal           | 4    | 0,251  | 0,4%  | 2,6%  | 7,9%  | 79%    | 84%    | 93%    |       |       |
| Modal           | 5    | 0,206  | 14,7% | 0,5%  | 0,0%  | 94%    | 85%    | 93%    |       |       |
| Modal           | 6    | 0,187  | 0,2%  | 10,7% | 2,5%  | 94%    | 95%    | 95%    |       |       |

Figura 7 Periodos obtenidos para las alternativas con diagonales y muros disipativos (15cm)

Observándose para el periodo equivalente una rigidización del 2% y del 3% para las diagonales y del 10% para los muros. Una observación más detenida permite apreciar que al emplear los paneles disipativos el modo de torsión deja de ser el principal por lo que se aprecia una aparente mayor rigidización.

### Modelos analíticos para cálculo no-lineal paso a paso en el tiempo

Se consideran 4 modelos empleando el programa ETABS 2015. El primero es la estructura “flexible” que correspondería a la estructura inicial sin diagonales o muros incorporando disipadores. Hay que observar que esta estructura es en sí rígida por los requerimientos arquitectónicos de núcleos de comunicación y compartimientos ignífugos. Por tanto este ejemplo práctico aun no siendo el ideal en cuanto a disponer de un sistema flexible sirve para demostrar, en un caso real, una disminución del 50% en los desplazamientos de entrepiso, pudiendo repercutir en ahorro y/o seguridad estructural. La segunda estructura es la “rígida” mediante diagonales metálicas y disipadores SLB, que es la estructura construida. La tercera estructura “rígida” y la cuarta re-emplazan las diagonales por muros desacoplados de 10cm y 15cm de espesor, respectivamente. En el caso de las diagonales metálicas los disipadores se ubican al centro debajo de la trabe en la unión de las diagonales. En el caso de los muros se disponen de dos dispositivos por panel por debajo de las trabes, cerca de las columnas.

La respuesta no-lineal de las conexiones SLB se representa mediante el modelo plástico de Wen (1976) con elementos no-lineales tipo “link”. La rigidez de estos dispositivos se obtiene del artículo (Hurtado et. al 2008) con la importante consideración de que se libera la fuerza axial en los dispositivos. Esta consideración de liberar la fuerza axial da una gran libertad de disponer de paneles disipativos en distintas plantas sin afectar o cargar verticalmente de forma acumulativa en trabes o elementos inferiores.

El modelo con diagonales metálicas considera en su unión superior una zona panel (“panel zone”) donde se concentra la no linealidad de las conexiones. Entre este nodo y el eje de la trabe se dispone de una barra corta sin transferencia de carga axial a las diagonales. Para los paneles disipativos se considera un elemento “link” de dos nudos, un nodo en el muro y el otro en la trabe, cerca de las columnas. Su longitud corresponde a la mitad del peralte de la trabe y se libera igualmente la fuerza axial en el elemento.

### Registros sísmicos

A continuación se muestra una figura con las señales sísmicas de terremotos Peruanos (7035-7039-7050) escalados todos 0,4g de aceleración máxima empleados para este artículo.

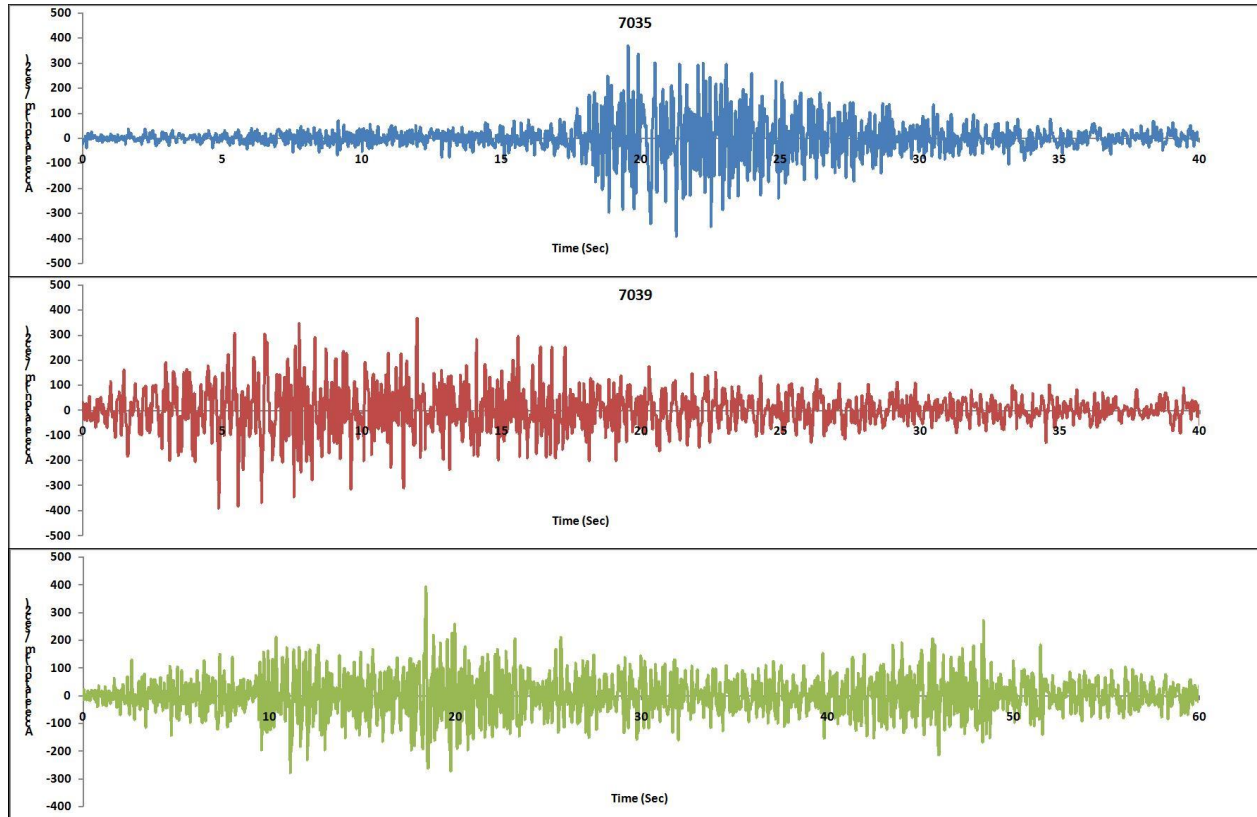


Figura 8 Registros sísmicos (7039-7035-7050) escalados a una aceleración pico de 0,4g.

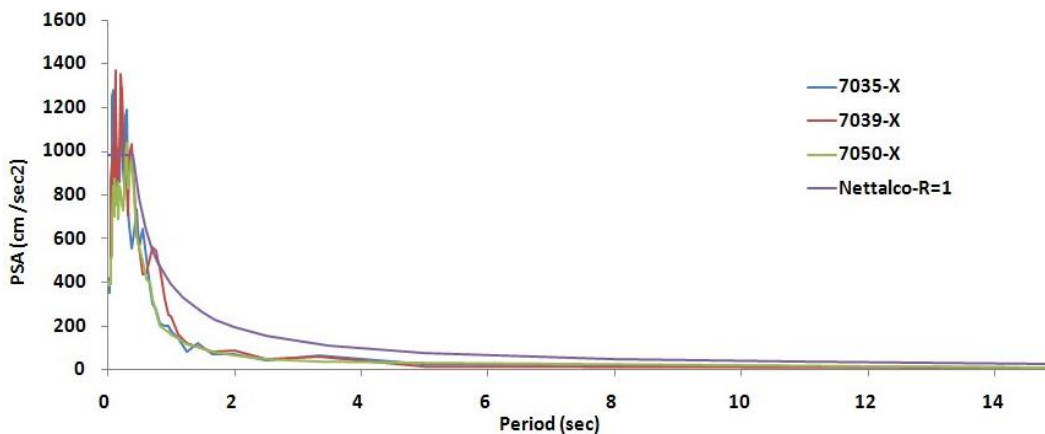
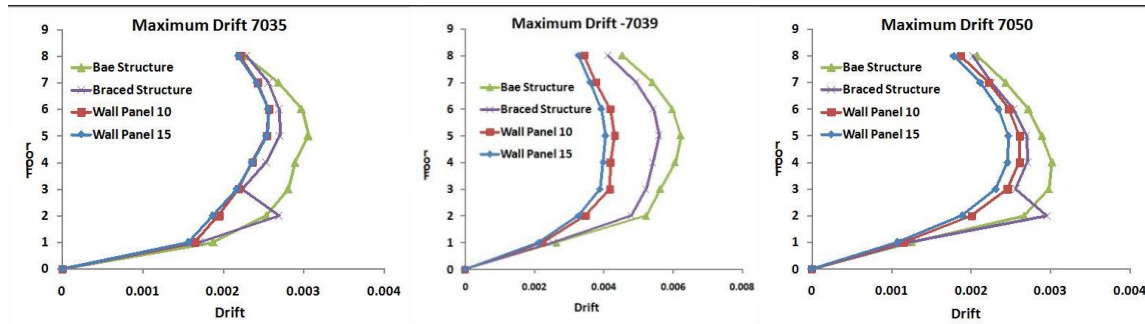


Figura 9 Espectro de la normativa Peruana para R=1 (sin reducción ductilidad).

### Análisis dinámico no lineal paso a paso

Para la verificación final del sistema se emplea un análisis no lineal paso a paso en el tiempo con registros sísmicos históricos escalados al nivel de aceleración de la normativa. El análisis no lineal corresponde al análisis con “no linealidades concentradas” o “fast nonlinear analysis” que permite de forma muy rápida obtener el análisis no lineal tiempo historia con un intervalo de análisis  $\Delta t = 0.02$  sec. Claramente es teóricamente factible hacer un análisis no lineal completo pero esto origina un tiempo de cómputo, en nuestra opinión, excesivo en términos prácticos, no siendo necesario para una verificación.

### Resultados más significativos



**Figura 10** Desplazamientos relativos de entrepiso (“derivadas”) para cada registro sísmico y para cada una de las cuatro tipologías estructurales consideradas.

De los resultados anteriores se observa una muy significativa reducción en el desplazamiento de entrepiso o deriva máxima en cada nivel. En particular para el registro 7039 se observa una reducción cercana al 50% lo cual indica que la reducción en el daño estructural (directamente relacionado al “drift”) se reduciría significativamente. Hay que tener en cuenta que la estructura denominada “flexible” en este caso era en realidad rígida pues sus desplazamientos de entrepiso ya cumplían con lo especificado en la normativa (valores inferiores a 0,007). Por tanto la situación de partida NO era favorable para el empleo de estas conexiones y sin embargo se obtuvieron mejoras muy significativas. El costo final del sistema de disipación de energía instalado no representó más de 2,3% del costo de la estructura o el 1,39% del costo total incluyendo acabados. Teniendo en cuenta que es un edificio industrial donde el costo de acabados es bajo se puede concluir que para proyecto de viviendas u oficinas, donde el costo de acabados es mayor, la partida total de las conexiones SLB no superaran el 1% del monto de la obra. Dado que el daño no estructural está directamente relacionado a la deriva de entrepiso se puede concluir que para este proyecto (que como se ha indicado NO es el caso ideal de aplicación del concepto “rígido-flexible-dúctil”) con un 1% de costo adicional se ha logrado reducir un 50% el daño no estructural.

A continuación se muestra una figura con las curvas histeréticas presentadas en los disipadores sísmicos, demostrando un comportamiento muy estable, sin sufrir una degradación de rigidez.

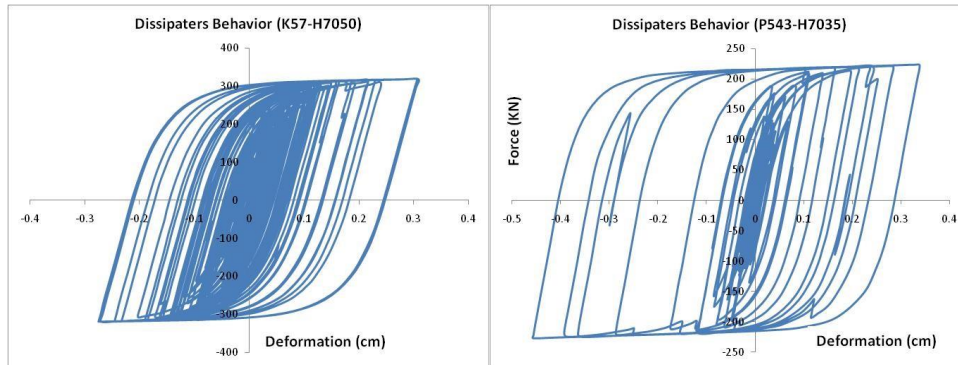


Figura 11 (a) Conexión K57 para muro de 10cm y registro 7050. (b) Conexión P543 para modelo con diagonales metálicas y registro 7035

De las figura 11 se observa el desplazamiento máximo de cada dispositivo (para estas figuras del orden de solo 3,5mm). Este valor se emplea, junto con la energía total disipada para determinar el nivel de agotamiento del dispositivo, comparando sus valores con tablas de diseño. Es también importante tener presente que un dispositivo puede emplearse bajo varios eventos sísmicos y NO tienen porque ser re-emplazados. Esta observación es exactamente análoga al diseño clásico en el cual sabemos que una estructura bajo un sismo severo ha tenido daño y, sin embargo, luego de este evento se inspecciona pero NO necesariamente se demuele. Finalmente se observa que al ser una conexión no lineal el incrementar la sollicitación sísmica a, por ejemplo, 0,8g no implica necesariamente un aumento del desplazamiento de entrepiso al doble, lo cual ocurre en sistemas lineales.

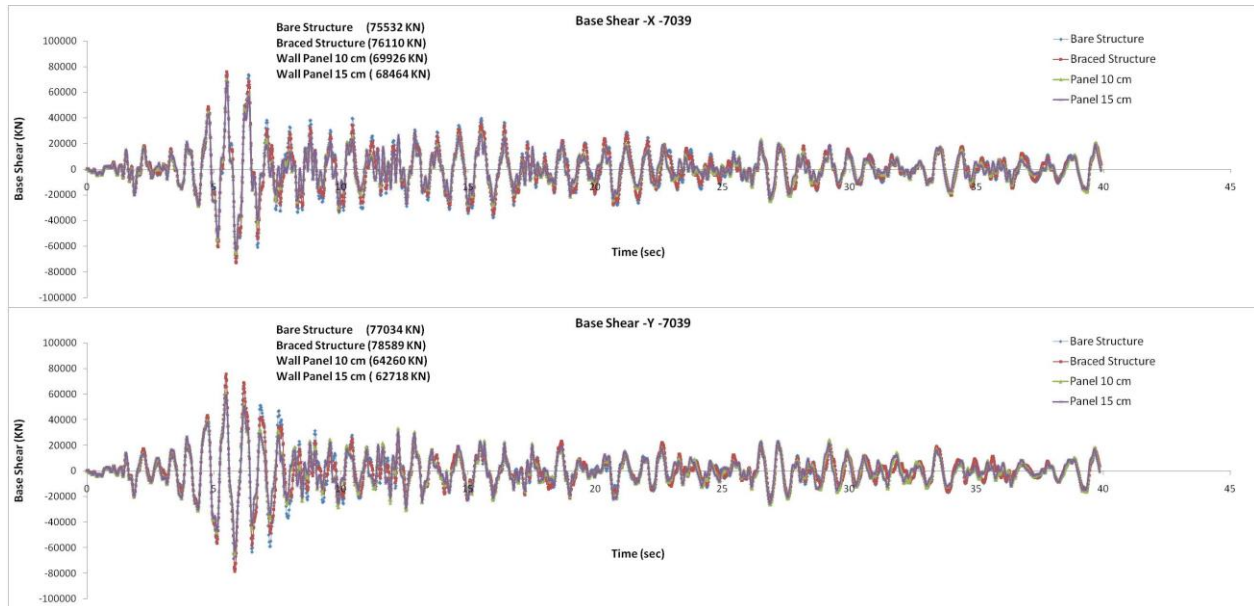


Figura 12 Historia en el tiempo para el cortante basal. En el texto de cada figura se aprecia el cortante basal y como el sistema de paneles lo reduce significativamente. En particular para los muros acoplados de 15cm la reducción del cortante basal es del 9% y del 18% para cada registro en comparación a la estructura sin estos muros.

### CASO: EDIFICIO URBANIA (MÉXICO)

El edificio Urbania es un proyecto en Guadalajara; Jalisco con 80m de altura y planta rectangular. En los sótanos con uso de estacionamiento se tiene una distribución arquitectónica muy distinta a las plantas superiores con uso de vivienda, lo cual dificulta el uso de muros en toda la altura. Los únicos muros en toda la altura que encajan con la arquitectura son los muros de comunicación ubicados en un extremos de la planta y originando fuerte torsión. Un primer cálculo sin muros adicionales mostró que los desplazamientos de entrepiso eran excesivos y se necesitaba de muros. Por otra parte en las plantas superiores y dividiendo departamentos se podían añadir muros, por tanto la dificultad radicaba en que estos muros no podían estar hasta la cimentación. En este punto se tenían dos opciones: (a) muros discontinuos convencionales con trabes de transferencia en planta baja o (b) muros acoplados conectados mediante conexiones SLB, que fue la opción seleccionada, ver figura 13. Con respecto al tipo de suelo este es intermedio, como se da en muchas áreas de Guadalajara.

Ciertamente hay mecanismos clásicos que permiten abordar la problemática de muros discontinuos añadiendo refuerzos significativos en la trabe de transferencia y reforzando las columnas cercanas al muro discontinuo tal como, por ejemplo, describe Thomas Amneus (1994) con su experiencia profesional en el severo sismo de Northridge. El problema principal es la sobre-resistencia del muro que puede originar un fallo frágil por pandeo de las columnas donde se realiza la transferencia. Por tanto aunque posible nunca es una solución recomendable. Las fotografías siguientes muestran fotos de la obra en construcción:



**Fotografía 1 Estado de la obra a finales de julio del 2015 mostrando la planta sin muros excepto en el extremo donde están trabajando las máquinas de pilotes donde se ubican los muros de comunicación y cerramiento.**

Ciertamente hay mecanismos clásicos que permiten abordar la problemática de muros discontinuos añadiendo refuerzos significativos en la trabe de transferencia y reforzando las columnas cercanas al muro discontinuo tal como, por ejemplo, describe Thomas Amneus (1994) con su experiencia profesional en el severo sismo de Northridge. El problema principal es la sobre-resistencia del muro que puede originar un fallo frágil por pandeo de las columnas donde se realiza la transferencia. Por tanto aunque posible nunca es una solución recomendable.

La alternativa propuesta consiste en muros de 15cm de espesor desacoplados del marco donde se ubican pero conectados en su extremo superior mediante 2 conexiones tipo SLB en sus extremos cercanos a las columnas(ver Figura 3, opción 2). Estas conexiones están diseñadas para NO transferir fuerza axial por lo que solo están solicitadas a cortante (elemento importante para evitar transferir carga axial acumulativa entre plantas). Para diseñar preliminarmente el tipo de conexión SLB se realiza un cálculo espectral convencional especificando los dispositivos como barras rectangulares metálicas. De esta forma como para cualquier elemento estructural clásico se determina su cortante y en base a dicho valor y mediante la tabla de diseño de Hurtado et. al (2008) se predimensiona cada dispositivo. Un posterior análisis convencional espectral permitiría verificar los disipadores propuestos aunque normalmente las diferencias son poco significativas.

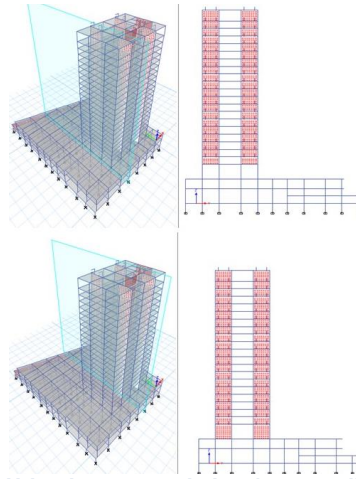


Figura 13 Modelo ETABS de edificio Urbania mostrando los 4 muros discontinuos necesarios para reducir el desplazamiento de entrepiso, todos en la direcci3n Y.

Estructura flexible. An3lisis modal

El sistema flexible en este caso corresponde al edificio sin muros discontinuos. En la siguiente figura se presentan sus caracteristicas modales junto con su "periodo equivalente" en X y en Y:

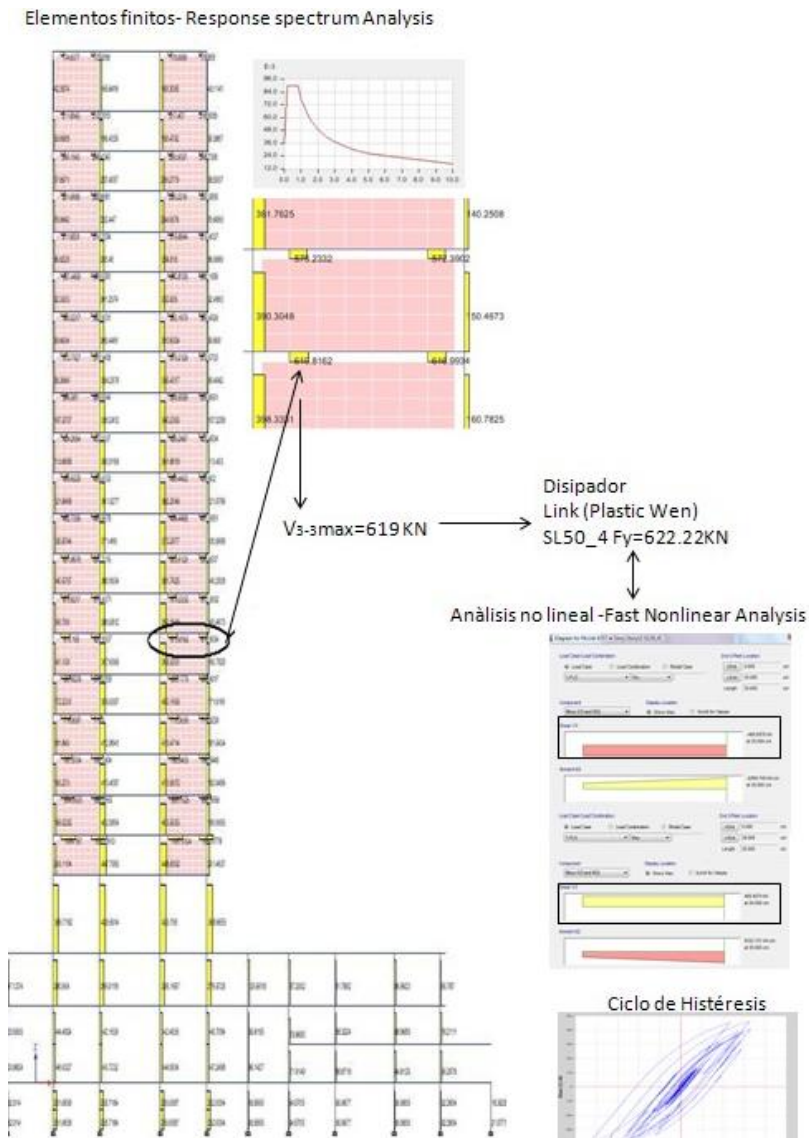
| BARED STRUCTURE |      |            |       |       |        |        |       |       |       |        |        |        | Tx,eq | Ty,eq |
|-----------------|------|------------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Case            | Mode | Period sec | UX    | UY    | Sum UX | Sum UY | RX    | RY    | RZ    | Sum RX | Sum RY | Sum RZ | sec   | sec   |
| Modal 1         | 1    | 3,851      | 0,8%  | 26,6% | 0,8%   | 26,6%  | 25,5% | 0,8%  | 5,3%  | 25,5%  | 0,8%   | 5,3%   | 1,990 | 1,885 |
| Modal 2         | 2    | 3,397      | 50,8% | 1,2%  | 51,6%  | 27,8%  | 0,9%  | 47,4% | 3,4%  | 26,4%  | 48,1%  | 8,6%   |       |       |
| Modal 3         | 3    | 2,427      | 0,4%  | 24,6% | 52,0%  | 52,4%  | 21,2% | 0,2%  | 13,8% | 47,6%  | 48,4%  | 22,4%  |       |       |
| Modal 4         | 4    | 1,197      | 0,2%  | 4,7%  | 52,2%  | 57,2%  | 8,3%  | 0,2%  | 2,9%  | 55,9%  | 48,5%  | 25,3%  |       |       |
| Modal 5         | 5    | 0,976      | 12,3% | 0,8%  | 64,4%  | 57,9%  | 0,6%  | 13,3% | 1,1%  | 56,5%  | 61,8%  | 26,4%  |       |       |
| Modal 6         | 6    | 0,679      | 1,1%  | 9,8%  | 65,5%  | 67,8%  | 7,0%  | 0,6%  | 4,0%  | 63,5%  | 62,4%  | 30,4%  |       |       |
| Modal 7         | 7    | 0,568      | 0,0%  | 5,0%  | 65,5%  | 72,8%  | 3,6%  | 0,0%  | 9,0%  | 67,1%  | 62,5%  | 39,3%  |       |       |
| Modal 8         | 8    | 0,513      | 0,2%  | 4,3%  | 65,7%  | 77,0%  | 4,9%  | 0,2%  | 12,5% | 71,9%  | 62,7%  | 51,8%  |       |       |
| Modal 9         | 9    | 0,481      | 11,6% | 0,1%  | 77,3%  | 77,1%  | 0,1%  | 9,0%  | 2,3%  | 72,1%  | 71,7%  | 54,1%  |       |       |
| Modal 10        | 10   | 0,365      | 0,3%  | 0,4%  | 77,6%  | 77,5%  | 0,4%  | 0,2%  | 3,3%  | 72,4%  | 71,8%  | 57,4%  |       |       |
| Modal 11        | 11   | 0,318      | 6,8%  | 0,9%  | 84,4%  | 78,3%  | 1,0%  | 7,7%  | 0,0%  | 73,4%  | 79,5%  | 57,4%  |       |       |
| Modal 12        | 12   | 0,277      | 0,1%  | 7,4%  | 84,5%  | 85,7%  | 7,0%  | 0,2%  | 5,9%  | 80,4%  | 79,7%  | 63,2%  |       |       |
| Modal 13        | 13   | 0,254      | 0,2%  | 1,3%  | 84,7%  | 87,0%  | 1,6%  | 0,2%  | 0,3%  | 82,0%  | 79,9%  | 63,6%  |       |       |
| Modal 14        | 14   | 0,22       | 2,1%  | 0,2%  | 86,8%  | 87,3%  | 0,3%  | 2,4%  | 0,2%  | 82,3%  | 82,4%  | 63,8%  |       |       |
| Modal 15        | 15   | 0,213      | 0,0%  | 0,0%  | 86,8%  | 87,3%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,1%  | 82,3%  | 82,4%  | 63,9%  |       |       |
| Modal 16        | 16   | 0,202      | 0,0%  | 0,0%  | 86,8%  | 87,3%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 82,4%  | 82,4%  | 63,9%  |       |       |
| Modal 17        | 17   | 0,197      | 0,0%  | 0,0%  | 86,8%  | 87,3%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 82,4%  | 82,4%  | 63,9%  |       |       |
| Modal 18        | 18   | 0,191      | 0,7%  | 1,3%  | 87,4%  | 88,6%  | 1,8%  | 0,8%  | 2,4%  | 84,1%  | 83,1%  | 66,2%  |       |       |
| Modal 19        | 19   | 0,189      | 0,0%  | 0,0%  | 87,4%  | 88,6%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 84,1%  | 83,1%  | 66,2%  |       |       |
| Modal 20        | 20   | 0,181      | 0,3%  | 3,6%  | 87,7%  | 92,2%  | 4,7%  | 0,4%  | 0,2%  | 88,9%  | 83,5%  | 66,4%  |       |       |
| Modal 21        | 21   | 0,162      | 0,1%  | 0,0%  | 87,8%  | 92,2%  | 0,0%  | 0,0%  | 7,4%  | 88,9%  | 83,6%  | 73,7%  |       |       |
| Modal 22        | 22   | 0,159      | 1,8%  | 0,0%  | 89,6%  | 92,2%  | 0,0%  | 2,4%  | 0,6%  | 88,9%  | 85,9%  | 74,4%  |       |       |
| Modal 23        | 23   | 0,137      | 0,0%  | 0,0%  | 89,6%  | 92,2%  | 0,1%  | 1,0%  | 0,1%  | 89,0%  | 86,0%  | 75,4%  |       |       |
| Modal 24        | 24   | 0,134      | 0,6%  | 0,2%  | 90,2%  | 92,4%  | 0,3%  | 0,8%  | 0,1%  | 89,3%  | 86,8%  | 75,5%  |       |       |
| Modal 25        | 25   | 0,121      | 0,0%  | 0,7%  | 90,2%  | 93,1%  | 0,9%  | 0,0%  | 0,6%  | 90,1%  | 86,8%  | 76,1%  |       |       |
| Modal 26        | 26   | 0,12       | 0,5%  | 0,0%  | 90,7%  | 93,1%  | 0,0%  | 0,6%  | 0,0%  | 90,1%  | 87,4%  | 76,2%  |       |       |
| Modal 27        | 27   | 0,114      | 0,0%  | 0,4%  | 90,7%  | 93,5%  | 0,5%  | 0,0%  | 0,9%  | 90,6%  | 87,5%  | 77,1%  |       |       |
| Modal 28        | 28   | 0,107      | 0,2%  | 0,0%  | 90,9%  | 93,5%  | 0,0%  | 0,3%  | 1,9%  | 90,6%  | 87,7%  | 79,0%  |       |       |
| Modal 29        | 29   | 0,104      | 0,1%  | 0,9%  | 91,0%  | 94,4%  | 1,4%  | 0,0%  | 8,9%  | 92,0%  | 87,8%  | 87,8%  |       |       |
| Modal 30        | 30   | 0,1        | 4,9%  | 0,0%  | 95,9%  | 94,4%  | 0,0%  | 6,5%  | 6,7%  | 92,0%  | 94,2%  | 94,5%  |       |       |

Figura 14 Periodos obtenidos para la estructura flexible realizando un an3lisis modal

Estructura r3gida. An3lisis modal

El sistema r3gido en este caso corresponde al edificio con muros discontinuos acoplados al marco correspondiente mediante conexiones SLB. Para determinar cada dispositivo se procede, tal como se indic3 para el edificio Nettelco, a realizar un an3lisis modal cl3sico definiendo los disipadores como elementos rectangulares de 30cm de ancho y

2cm de espesor. En el diseño final estos dispositivos tendrán una sección menor y por tanto menor rigidez, pero con este procedimiento se obtiene un cortante superior al final conveniente para iniciar el proceso de dimensionamiento.



**Figura 15** Proceso de selección de cada dispositivo. Primero se realiza un análisis modal clásico definiendo los dispositivos como barras rectangulares metálicas y se procede en base a su cortante a definir cada conexión. Posteriormente un análisis no lineal rápido (“fast nonlinear analysis”) permite su verificación de forma eficiente.

A continuación se presentan sus características modales junto con su “periodo equivalente” en X y en Y. Se observa que los muros están orientados en la dirección Y (donde se produce el mayor desplazamiento) por lo que el periodo equivalente en X se mantiene e incluso aumenta ligeramente aunque el periodo equivalente en Y se reduce en un 14%:

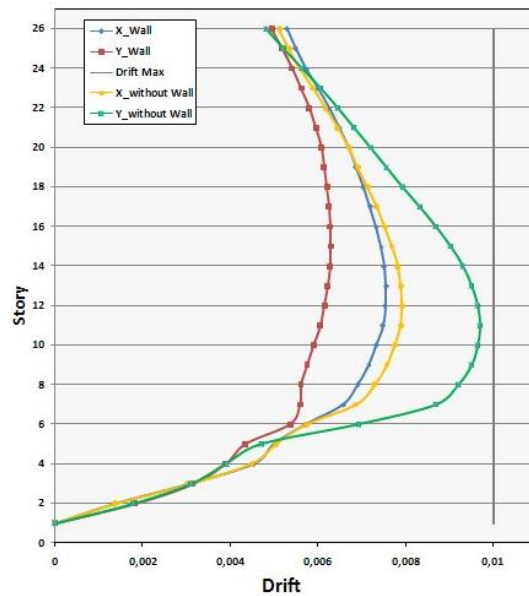
| WALLS AND DISSIPATORS |      |        |       |       |        |        |       |       |       |        |        |        | Tx,eq | Ty,eq |
|-----------------------|------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Case                  | Mode | Period | UX    | UY    | Sum UX | Sum UY | RX    | RY    | RZ    | Sum RX | Sum RY | Sum RZ |       |       |
| sec                   |      |        |       |       |        |        |       |       |       |        |        |        |       |       |
| Modal                 | 1    | 3,44   | 51,1% | 0,1%  | 51,1%  | 0,1%   | 0,2%  | 46,9% | 1,4%  | 0,2%   | 46,9%  | 1,4%   | 2,023 | 1,618 |
| Modal                 | 2    | 3,189  | 1,2%  | 21,9% | 52,2%  | 22,0%  | 20,3% | 0,9%  | 10,1% | 20,5%  | 47,8%  | 11,5%  |       |       |
| Modal                 | 3    | 2,246  | 0,2%  | 31,5% | 52,4%  | 53,5%  | 26,4% | 0,1%  | 11,2% | 46,9%  | 47,9%  | 22,7%  |       |       |
| Modal                 | 4    | 0,988  | 12,4% | 0,0%  | 64,8%  | 53,5%  | 0,1%  | 13,3% | 0,1%  | 46,9%  | 61,3%  | 22,8%  |       |       |
| Modal                 | 5    | 0,941  | 0,3%  | 8,6%  | 65,1%  | 62,1%  | 10,8% | 0,5%  | 7,6%  | 57,7%  | 61,7%  | 30,3%  |       |       |
| Modal                 | 6    | 0,58   | 1,3%  | 14,6% | 66,4%  | 76,7%  | 12,9% | 0,9%  | 0,8%  | 70,6%  | 62,6%  | 31,1%  |       |       |
| Modal                 | 7    | 0,513  | 1,2%  | 0,3%  | 67,5%  | 77,0%  | 0,0%  | 0,7%  | 21,4% | 70,7%  | 63,3%  | 52,5%  |       |       |
| Modal                 | 8    | 0,493  | 8,4%  | 0,7%  | 76,0%  | 77,6%  | 0,7%  | 6,8%  | 1,2%  | 71,4%  | 70,1%  | 53,7%  |       |       |
| Modal                 | 9    | 0,387  | 2,8%  | 0,7%  | 78,8%  | 78,3%  | 1,1%  | 2,6%  | 4,0%  | 72,5%  | 72,7%  | 57,7%  |       |       |
| Modal                 | 10   | 0,318  | 5,3%  | 1,0%  | 84,0%  | 79,4%  | 1,3%  | 6,2%  | 0,4%  | 73,8%  | 78,9%  | 58,0%  |       |       |
| Modal                 | 11   | 0,273  | 0,3%  | 3,5%  | 84,3%  | 82,8%  | 3,6%  | 0,2%  | 5,2%  | 77,4%  | 79,1%  | 63,2%  |       |       |
| Modal                 | 12   | 0,259  | 1,0%  | 4,9%  | 85,3%  | 87,7%  | 5,1%  | 1,2%  | 0,7%  | 82,5%  | 80,3%  | 63,8%  |       |       |
| Modal                 | 13   | 0,22   | 1,3%  | 0,5%  | 86,6%  | 88,2%  | 0,6%  | 1,6%  | 0,8%  | 83,1%  | 81,9%  | 64,6%  |       |       |
| Modal                 | 14   | 0,213  | 0,0%  | 0,0%  | 86,6%  | 88,2%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,1%  | 83,1%  | 81,9%  | 64,7%  |       |       |
| Modal                 | 15   | 0,202  | 0,0%  | 0,0%  | 86,6%  | 88,2%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 83,2%  | 81,9%  | 64,7%  |       |       |
| Modal                 | 16   | 0,197  | 0,0%  | 0,0%  | 86,6%  | 88,2%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 83,2%  | 81,9%  | 64,7%  |       |       |
| Modal                 | 17   | 0,194  | 1,1%  | 0,4%  | 87,7%  | 88,6%  | 0,6%  | 1,4%  | 1,3%  | 83,8%  | 83,3%  | 66,1%  |       |       |
| Modal                 | 18   | 0,189  | 0,0%  | 0,0%  | 87,7%  | 88,6%  | 0,0%  | 0,0%  | 0,0%  | 83,8%  | 83,3%  | 66,1%  |       |       |
| Modal                 | 19   | 0,177  | 0,4%  | 3,5%  | 88,1%  | 92,1%  | 4,9%  | 0,5%  | 0,7%  | 88,7%  | 83,7%  | 66,7%  |       |       |
| Modal                 | 20   | 0,162  | 0,0%  | 0,3%  | 88,1%  | 92,3%  | 0,3%  | 0,1%  | 5,5%  | 88,9%  | 83,8%  | 72,2%  |       |       |
| Modal                 | 21   | 0,156  | 1,7%  | 0,1%  | 89,8%  | 92,4%  | 0,1%  | 2,3%  | 1,8%  | 89,0%  | 86,1%  | 74,0%  |       |       |
| Modal                 | 22   | 0,142  | 0,0%  | 0,0%  | 89,8%  | 92,4%  | 0,1%  | 0,0%  | 1,7%  | 89,1%  | 86,1%  | 75,7%  |       |       |
| Modal                 | 23   | 0,134  | 0,5%  | 0,2%  | 90,3%  | 92,6%  | 0,3%  | 0,7%  | 0,1%  | 89,3%  | 86,8%  | 75,8%  |       |       |
| Modal                 | 24   | 0,122  | 0,0%  | 0,4%  | 90,3%  | 93,0%  | 0,5%  | 0,0%  | 0,1%  | 89,9%  | 86,8%  | 75,9%  |       |       |
| Modal                 | 25   | 0,119  | 0,6%  | 0,1%  | 90,9%  | 93,1%  | 0,1%  | 0,8%  | 0,2%  | 90,0%  | 87,5%  | 76,1%  |       |       |
| Modal                 | 26   | 0,112  | 0,0%  | 0,1%  | 90,9%  | 93,2%  | 0,1%  | 0,0%  | 1,3%  | 90,1%  | 87,5%  | 77,4%  |       |       |
| Modal                 | 27   | 0,11   | 0,0%  | 0,5%  | 90,9%  | 93,7%  | 0,7%  | 0,0%  | 0,6%  | 90,8%  | 87,6%  | 77,9%  |       |       |
| Modal                 | 28   | 0,104  | 0,2%  | 0,9%  | 91,1%  | 94,6%  | 1,3%  | 0,2%  | 11,0% | 92,1%  | 87,8%  | 88,9%  |       |       |
| Modal                 | 29   | 0,1    | 4,9%  | 0,9%  | 96,0%  | 94,6%  | 0,0%  | 6,6%  | 5,8%  | 92,1%  | 94,3%  | 94,7%  |       |       |
| Modal                 | 30   | 0,092  | 0,4%  | 0,0%  | 96,4%  | 94,6%  | 0,0%  | 0,5%  | 0,1%  | 92,1%  | 94,9%  | 94,8%  |       |       |

Figura 16 Periodos obtenidos para la estructura rígida (muros acoplados eje Y) realizando un análisis modal

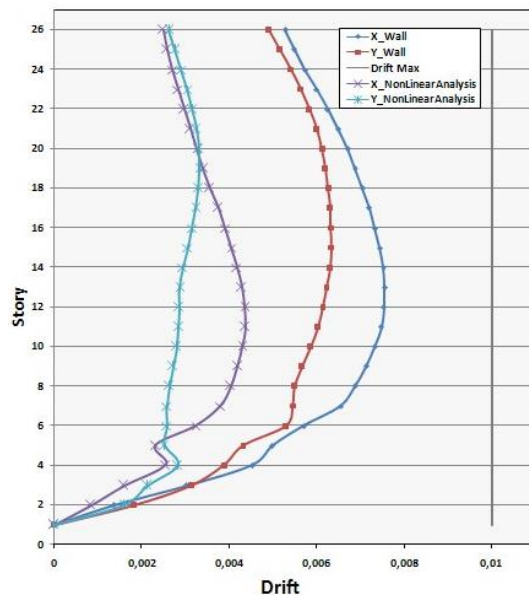
**Resultados del análisis modal lineal y del análisis no lineal paso a paso.**

La figura 17 muestra la comparativa de la estructura sin muros y con muros desacoplados con conexiones SLB. Se observa que la problemática del desplazamiento de entrepiso excesivo (superior a 0,007) se da en el eje Y con valores cercanos a 0,01. Por tanto se dispone de muros en la dirección Y, los cuales se adaptan perfectamente a la arquitectura de la planta y las divisiones entre departamentos. Con este sistema la deriva máxima se redujo de 0,0097 a 0,006, es decir se logró una reducción del 40%.

Cualitativamente lo más importante, sin embargo y en nuestra opinión, es que se transformó un sistema potencialmente frágil a un sistema claramente dúctil, con todos sus beneficios de disipación de energía y de no aumento proporcional de la respuesta dado que la estructura responderá no linealmente con conexiones estables fabricadas industrialmente y de muy bajo costo.



*Figura 17 Desplazamientos relativos de entrepiso (“derivas”) para el análisis espectral lineal comparando la estructura original sin muros con la propuesta adoptada de muros acoplados con conexiones SLB*

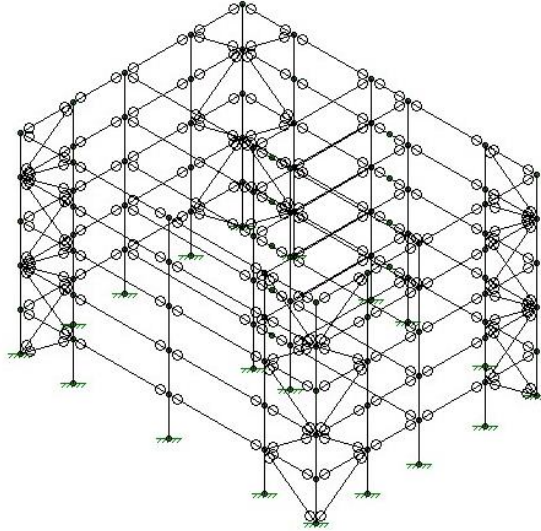


*Figura 18 Grafica comparativa de desplazamientos de entrepiso de la estructura con muros acoplados realizando un análisis no lineal paso a paso en el tiempo con registros sísmicos y un análisis modal*

### CASO: EDIFICIO PREFABRICADO

El concepto “rígido-flexible-dúctil” muestra su máximo potencial mientras más flexible sea el sistema gravitatorio. Por ello no es casualidad el buscar un sistema prefabricado para cargas verticales el cual tiene múltiples aplicaciones prácticas tales como la construcción industrializada masiva de viviendas sociales de bajo costo. Por ello se planteó un edificio de 5 niveles con cuatro departamentos de 70m<sup>2</sup> por planta siendo las uniones del sistema gravitatorio

articuladas. Las dimensiones de todas las columnas eran de máximo solo 30x30cm con altura de 2,4m. Las traveses se diseñaron de 30x65cm, todas estas con uniones articuladas. El sistema de piso también es prefabricado en base a prelosas pretensadas autoportantes. El sistema rígido se ubica en sus cuatro esquinas, tal como muestra la figura siguiente:



*Figura 19 Vista general del módulo para vivienda social prefabricada propuesto*

### Estructura flexible. Análisis modal

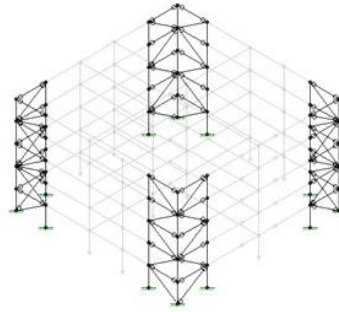
El sistema gravitacional es en este caso muy flexible, tal como se muestra a continuación. Se requieren 3 modos en cada dirección pero el dominante tiene un período de 5,3s por lo que se podría, según mostraron los resultados experimentales lograr un sistema con fuerzas proporcionales a 5,3s, es decir inferiores a las habituales en aislamiento de base pero, como veremos a continuación, reduciendo desplazamientos en todas las plantas.

| Mode    | Freque... | Period ... | SX Par... | SY P... | SZ Par... |
|---------|-----------|------------|-----------|---------|-----------|
| 1       | .188      | 5.332      |           |         | 67.332    |
| 2       | .188      | 5.329      | 67.328    |         |           |
| 3       | .356      | 2.806      |           |         |           |
| 4       | 1.186     | .843       | 20.328    |         | .351      |
| 5       | 1.186     | .843       | .351      |         | 20.343    |
| 6       | 1.554     | .644       | .014      |         |           |
| 7       | 3.345     | .299       | 6.853     |         | .167      |
| 8       | 3.346     | .299       | .168      |         | 6.87      |
| Totals: |           |            | 95.049    |         | 95.065    |

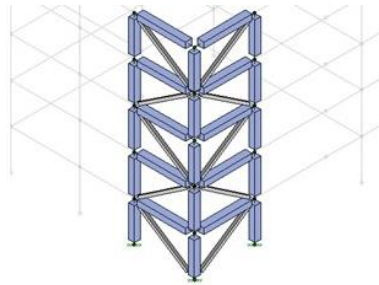
*Figura 20 Periodos obtenidos para la estructura flexible realizando un análisis modal*

### Estructura rígida. Análisis modal

El sistema rígido está formado por diagonales metálicas en las esquinas, tal como se muestra a continuación:



**Figura 21** Vista general con las diagonales en esquinas incorporando conexiones SLB.



**Figura 22**Detalle de las columnas y vigas de concreto (gris claro) y las diagonales metálicas con disipadores histeréticos SLB (gris oscuro).

Para este modelo se requieren solo 2 modos en cada dirección pero el dominante tiene un período de solo 0,569s por lo que difiere substancialmente del periodo de la estructura flexible. Por otra parte la participación del primer modo aumenta del 67% al 78% por lo que junto con solo necesitar 2 modos de análisis este se vuelve más simple. Ver figura 23.

| Mode    | Freque... | Period ... | SX Par... | SY P... | SZ Par... |
|---------|-----------|------------|-----------|---------|-----------|
| 1       | 1.758     | .569       | 77.977    |         | .069      |
| 2       | 1.758     | .569       | .069      |         | 77.989    |
| 3       | 2.845     | .352       |           |         |           |
| 4       | 5.797     | .173       | 16.142    |         |           |
| 5       | 5.798     | .172       |           |         | 16.133    |
| Totals: |           |            | 94.19     |         | 94.194    |

**Figura 23** Periodos obtenidos para la estructura rígida realizando un análisis modal

#### **Resultados del análisis modal lineal y del análisis no lineal paso a paso.**

Como primera aproximación se realizó un análisis modal espectral con las cargas definidas en la normativa Peruana. A continuación se muestra el espectro elástico y el inelástico:

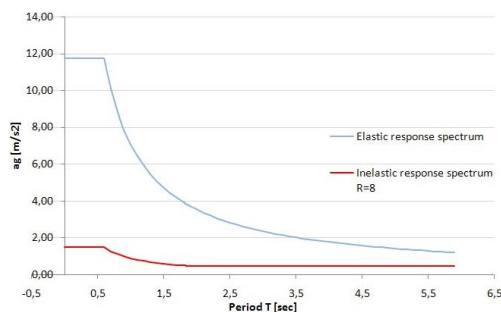


Figura 24 Espectros de análisis de la normativa y parámetros de diseño

| INELASTIC RESPONSE SPECTRUM |       |
|-----------------------------|-------|
| $C=2,5*(T_p/T) \leq 2,5$    |       |
| Z (zone 3)                  | 0,4 g |
| S (factore de suelo)        | 1,2   |
| $T_p$ (intermediate soil)   | 0,6   |
| U (coef. De uso)            | 1     |
| R (factore de reduccion)    | 8     |

Figura 25 Espectro de respuesta inelástico para diseño sísmico (Normativa Peruana)

Se procedió a un análisis espectral obteniéndose en todas las plantas desplazamientos de entrepiso inferiores a los requeridos por la normativa. También se realizó un análisis no lineal paso a paso en el tiempo mediante 8 registros sísmicos detallados en la publicación Nuzzo et al (2015). En todos los supuestos se obtuvieron desplazamientos de entrepiso inferiores a 0,007 para el análisis modal y para el análisis no lineal tiempo historia (con registros escalados a 0,4g) valores inferiores a 0,0057. El valor absoluto total de desplazamiento en la cubierta fue de solo 5,9cm y hay que tener presente que la estructura permanecerá en el rango lineal, sin daño estructural, concentrándose la no linealidad únicamente en las conexiones SLB. Finalmente, dado que la respuesta está gobernada por las conexiones SLB un aumento del nivel de aceleraciones  $a$ , por ejemplo, 0,8g NO implica necesariamente una repuesta del doble de desplazamientos. Más aún si se requiere reducir más los desplazamientos de entrepiso para minimizar el daño no estructural se podrían re-emplazar las diagonales metálicas por paneles disipativos, como los empleados en el proyecto Urbana, que sirven a su vez de cerramiento.

Finalmente, una solución alternativa de esta misma estructura con aislamiento de base no solo resultaría en un costo 30% superior en el global sino que requeriría el mantenimiento de una junta flexible o deslizante en la base a proteger durante toda la vida útil del edificio con instalaciones flexibles.

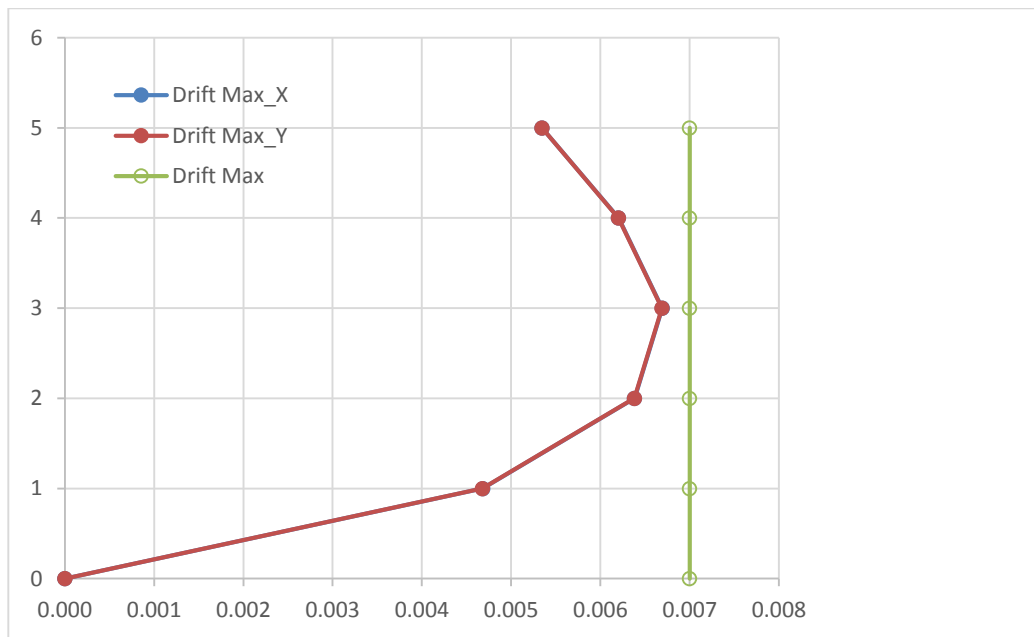
A continuación se muestran en una tabla los máximos desplazamiento de entrepiso con un análisis modal, por su geometría regular ambas direcciones muestran un comportamiento muy similar:

Tabla 1 Resultados de desplazamientos máximos de entrepiso dirección X – Análisis Modal

| Dirección X |             |                 |                |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|
| Piso        | max dx (mm) | $\Delta i$ (mm) | $\Delta i/hei$ |
| 5           | 70.336      | 12.832          | 0.00535        |
| 4           | 57.504      | 14.889          | 0.00620        |
| 3           | 42.615      | 16.067          | 0.00669        |
| 2           | 26.548      | 15.323          | 0.00638        |
| 1           | 11.237      | 11.237          | 0.00468        |

**Tabla 2 Resultados de desplazamientos máximos de entrepiso dirección Y – Análisis Modal**

| Dirección Y |             |                 |                |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|
| Piso        | max dy (mm) | $\Delta i$ (mm) | $\Delta i/hei$ |
| 5           | 70.294      | 12.83           | 0.00535        |
| 4           | 57.464      | 14.888          | 0.00620        |
| 3           | 42.576      | 16.056          | 0.00669        |
| 2           | 26.52       | 15.317          | 0.00638        |
| 1           | 11.23       | 11.23           | 0.00468        |

**Figura 26 Desplazamientos relativos de entrepiso ("derivadas") para el análisis modal**

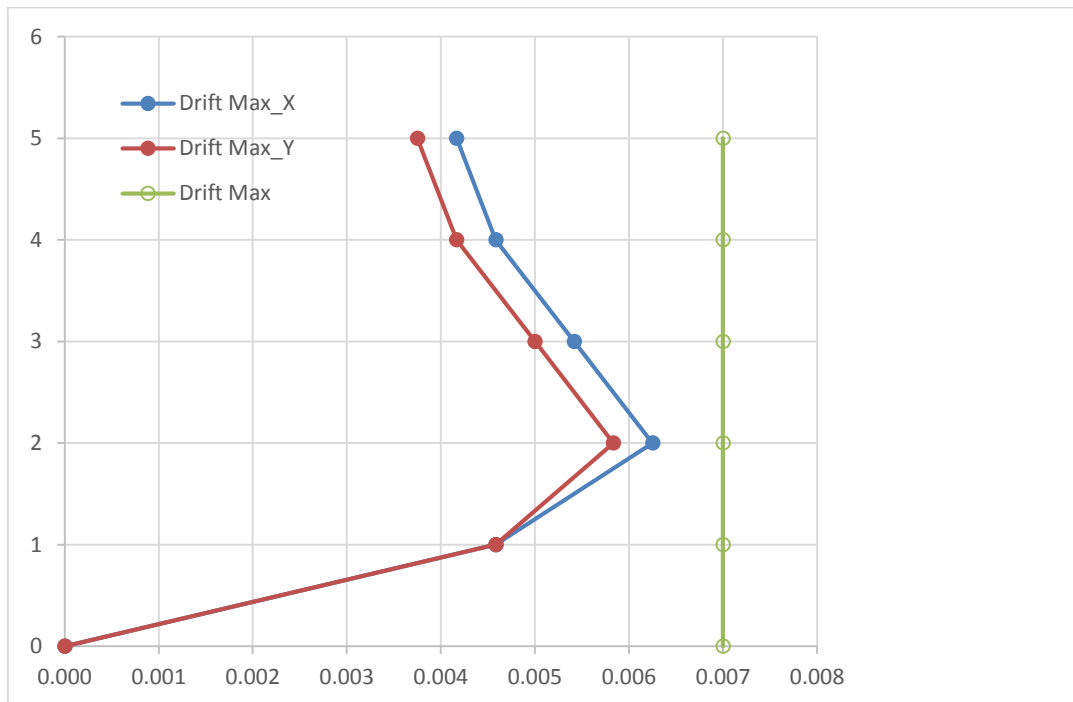
A continuación se muestran en una tabla los máximos desplazamiento de entrepiso con un análisis paso a paso no lineal en el tiempo y 8 registros escalados a 0.4g:

**Tabla 3 Resultados de desplazamientos máximos de entrepiso dirección X – Análisis no lineal en el tiempo**

| Dirección X |             |                 |                |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|
| Piso        | max dx (mm) | $\Delta i$ (mm) | $\Delta i/hei$ |
| 5           | 59          | 10              | 0.00417        |
| 4           | 49          | 11              | 0.00458        |
| 3           | 39          | 13              | 0.00542        |
| 2           | 26          | 15              | 0.00625        |
| 1           | 11          | 11              | 0.00458        |

**Tabla 4 Resultados de desplazamientos máximos de entrepiso dirección Y – Análisis no lineal en el tiempo**

| Dirección Y |             |                 |                |
|-------------|-------------|-----------------|----------------|
| Piso        | max dy (mm) | $\Delta_i$ (mm) | $\Delta_i/hei$ |
| 5           | 57          | 9               | 0.00375        |
| 4           | 47          | 10              | 0.00417        |
| 3           | 37          | 12              | 0.00500        |
| 2           | 25          | 14              | 0.00583        |
| 1           | 11          | 11              | 0.00458        |



**Figura 27 Desplazamientos relativos de entrepiso (“derivadas”) para el análisis paso a paso no lineal en el tiempo**

### CONCLUSIONES

El concepto “rígido-flexible-dúctil” y las conexiones Shear Link Bozzo (SLB) muestran que es posible diseñar estructuras más eficientes y seguras unificando los campos de control pasivo y diseño clásico. En particular se pueden destacar las siguientes conclusiones:

- Estudios experimentales en mesa vibrante mostraron bajo este concepto que es posible diseñar estructuras con el nivel de fuerzas del sistema flexible pero con el nivel de desplazamientos del sistema rígido, lográndose uno de los ideales sismo resistentes.
- Muchos sistemas estructurales clásicos en concreto armado o estructura metálica, tales como los muros acoplados o los propios pórticos excéntricos, pueden ser re-estudiados mediante conexiones SLB dado que se lograría su mejora cualitativa en particular por su fabricación industrial y por su fácil, aunque muy eventual re-emplazo.

- Se han presentado diversas disposiciones prácticas constructivas de cómo ubicar estos dispositivos de forma simple.
- Se han presentado tres ejemplos distintos de empleo. El primero, edificio Nettalco, permite reducir el daño no estructural a menos de la mitad con un incremento del costo total de solo 1,4%. El sistema disipativo es, por tanto, adicional aunque se podría haber planteado el diseño para reducir secciones y refuerzos en columnas y traveses obteniéndose finalmente una estructura más segura sin incremento de costo.
- La segunda aplicación, proyecto en construcción por la constructora Anteus en Guadalajara, aporta una nueva solución al problema clásico y muy habitual de muros discontinuos. Por diversas restricciones arquitectónicas es común tener que disponer de muros con cargas transferidas a columnas y traveses. Esta solución es potencialmente frágil y nunca es recomendable en una zona sísmica. La alternativa propuesta dispone de muros (que no tienen que estar alineados verticalmente) conectados con su respectivo marco circundante mediante su base y en su extremo superior 2 conexiones SLB. Estas conexiones están liberadas de carga axial lo cual evita acumular carga vertical entre plantas. Esta solución rigidiza y dota de ductilidad al sistema, siendo por tanto una propuesta cualitativamente muy superior a la clásica. Adicionalmente es más económica dado que los muros son solo de 15cm de espesor con menos refuerzo.
- El tercer ejemplo estudiado representa la aplicación óptima de este concepto en cuanto a disponer de una estructura muy flexible prefabricada industrialmente. Al incorporar el sistema rígido-dúctil se logra un sistema simple fácil de calcular con una respuesta comparable en términos de cortante basal a la obtenida con aislamiento de base pero a un costo 30% inferior y sin todas las complicaciones de disponer de una junta e instalaciones flexibles en la base durante toda la vida útil del edificio. Más aun al estar la respuesta controlada por las conexiones SLB y siendo el sistema de partida muy flexible se dispone de un sistema robusto adecuado a diversas condiciones de suelo o señales sísmicas.

## REFERENCIAS

Amneus, T. (1994), "After the quake: Why one building still stands", *Civil Engineering*, (2), 44-47.

Bozzo, L. and Barbat A. (2000), *Diseño Sismorresistente de edificios. Técnicas convencionales y avanzadas*, Reverte, Barcelona, España.

Cahis, X., Bozzo L y Torres LL. (1998), *Experimental studies of various innovative energy dissipation devices*, Proceedings of the Eleventh European Conference on Earthquake Engineering, Paris

Foti, D, Bozzo, L and Lopez-Almansa, F. (1998), *Numerical efficiency assessment of energy dissipaters for seismic protection of buildings*, *Earthquake engineering & structural dynamics*

Franchioni G., (2001), *Experimental investigations on semi-active and passive systems for seismic risk mitigation*, ISMES Report No. 7.

Hurtado, F. and Bozzo L. (2008) *Numerical and experimental analysis of a shear-link energy dissipater for seismic protection of buildings*, Proceedings of the 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, China

Nuzzo I., Losanno, D., Serino, G. and Bozzo L. (2015), *A Seismic-resistant Precast r.c. System equipped with Shear Link Dissipaters for Residential Buildings*, *International Journal of Civil and Structural Engineering, IJCSE Vol. 2:Issue 1*

Wen Y.K., (1976) .*Method for Random Vibration of Hysteretic Systems,*" *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 102, No. EM2.