



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

UNA NUEVA GENERACIÓN DE DISIPADORES SLB “SHEAR LINK” PARA EL DISEÑO SISMORRESISTENTE

Trabajo realizado por:

Guillermo Bozzo Fernández

Dirigido por:

Ph.D. Enrique Mirambell Arrizabalaga

Ph.D. Luis Miguel Bozzo Rotondo

Máster en:

**Màster Universitari en Enginyeria de
Camins, Canals i Ports**

Barcelona, **Enero 2021**

Departament d'Enginyeria Civil i Ambiental
Universitat Politècnica de Catalunya

TRABAJO FINAL DE MÁSTER

Dedicatoria

Quiero dedicar la presente tesis a todas aquellas personas que me han ayudado de una u otra forma a lo largo del desarrollo de la tesis. Destacar a mis padres, Luis Miguel Bozzo y Paloma Fernández, que han sido claves dándome constante apoyo y consejos. A Eduardo Miranda por facilitarme toda la información que pudiese necesitar y más. A Andrés Quintana, Gilberto Herrera, Leonardo Pérez y, en general a todo el despacho de Luis Bozzo Estructuras y Proyectos ya que siempre han estado dispuestos a ayudarme con las dudas que me surgían. Finalmente, agradecer a mi tutor Enrique Mirambell que me ha orientado a poder concentrar muchas ideas en este trabajo.

Contenido

1.	Introducción	4
1.1.	Motivación	4
1.2.	Objetivos	5
1.3.	Metodología	5
1.4.	Contenido del documento	5
2.	Estado del arte	6
2.1.	Comportamiento estructural frente a sismo	6
2.1.1.	Terremotos.....	6
2.1.2.	Fallo frágil o dúctil	7
2.2.	Dispositivos de protección sísmica.....	11
2.2.1.	Diferencia entre dispositivo activo y pasivo.....	11
2.2.2.	Historia de los disipadores	12
2.3.	Modelización de estructuras sismoresistentes	21
2.3.1.	Modelización con SLB.....	21
2.3.2.	Modelización con BRB	25
3.	Diseño de dispositivo SLB4.....	28
3.1.	Modelo numérico.....	28
3.1.1.	Descripción y características	28
3.1.2.	Modelo numérico	31
3.2.	Ensayo	38
3.2.1.	Descripción espécimen.....	38
3.2.2.	Normativa Buckling Restrained Braces (AISC).....	41
3.2.3.	Modelos ensayados.....	43
3.2.4.	Digital ImageCorrelation (DIC)	44
3.2.5.	Resultados laboratorio	49
3.3.	Correlación numérico-experimental	54
	Ensayo 1	54
	Ensayo 3	59
4.	Comparativa SLB y BRB	61
4.1.	Edificio a estudiar	61
4.1.1.	Características	61
4.1.2.	Normativa.....	63
4.1.3.	Análisis.....	66

4.2. Comparativa técnica.....	68
4.2.1. Cortante basal	68
4.2.2. Desplazamiento de entrepiso	68
4.2.3. Amortiguamiento equivalente	70
5. Conclusiones	73
5.1. Ensayos y su configuración.....	73
5.2. Generales	73
5.3. Correlación numérico experimental	74
5.4. Comparativa BRBs vs SLBs en un proyecto real	75
Referencias.....	76
Anexo 1. Ensayos de platina de 16mm y 25mm	78
Anexo 2. Informe del laboratorio.....	88
Anexo 3. Disposición del ensayo	104
Anexo 4. Digital ImageCorrelation del Ensayo 1	106

1.Introducción

1.1. Motivación

Los sistemas de protección sísmica son una tecnología en constante desarrollo. Estos sistemas evolucionan para mejorar la respuesta de las estructuras frente a los sismos o para reducir su coste de diseño. La forma convencional de diseñar estructuras sismorresistentes es mediante la redundancia estructural y asegurando que fallen de forma dúctil una vez sometidas a un sismo. Durante la década de los años 1980 empezaron a surgir sistemas de protección pasivos como los disipadores de energía. Estos dispositivos cambian la jerarquía de estados límite en la estructura siendo ellos las partes débiles en las que se concentran las fuerzas del sismo, permitiendo que mediante su plastificación disipen dicha energía, y protegiendo al resto de elementos estructurales y no estructurales.

El inicio de los disipadores SLB se puede situar en el año 1989 en una conversación informal entre Luis Bozzo y el profesor Popov en U.C. Berkeley. En dicha conversación el Profesor Popov comentó que el acero era un “excelente disipador por corte” en referencia a los brazos excéntricos en estructuras metálicas. Años más tarde, a principios del siglo XXI, los ingenieros Bozzo y Cahis propusieron un tipo de dispositivo de disipación pasivo por corte “Shear Link” pensado para proteger muros de mampostería, es por este motivo que sus dimensiones eran necesariamente muy pequeñas. A diferencia de otros “Shear Links” habituales, éste se fabricó mediante fresado ya que la fuerza de plastificación requerida era muy baja. Posteriormente, los ingenieros Bozzo y Hurtado generalizaron este dispositivo para rangos mayores de fuerzas con uniones atornilladas. Desde entonces estos dispositivos han ido evolucionando a lo largo de los últimos años hasta la generación actual con unas conexiones especiales denominadas “Almenadas” situadas en un extremo de los disipadores que no transmiten carga axial y con las que se logran unas deformaciones en el dispositivo de hasta 30mm. Estas deformaciones verifican la normativa de países como Perú, que requiere de un desplazamiento de entrepiso, o drift, máximo de 0.07 para una altura tipo de 320cm. Para que los dispositivos puedan cumplir normativas que exijan drifts mayores de hasta 0.1 o 0.2, la capacidad de deformación de los dispositivos debe aumentar.

Dado que uno de los dispositivos pasivos más populares en la actualidad son los brazos de pandeo restringido, la motivación de esta tesis será diseñar una nueva generación de dispositivos SLB (“Shear Link Bozzo”) que no únicamente tengan mayor capacidad de deformación sino que también cumplan con las especificaciones requeridas en los brazos de pandeo restringido y, de esta forma, ampliar el campo de aplicación de estos disipadores. Además, para poder contrastar los beneficios de esta nueva generación de SLB se realizará una comparación técnica en un edificio real de 33 niveles con ambos sistemas de protección sísmica, los brazos de pandeo restringido y los SLB diseñados en esta tesis.

1.2. Objetivos

- Aumentar la capacidad de deformación de los dispositivos SLB de tercera generación.
- Desarrollo de un modelo numérico para análisis cíclico de dispositivos SLB de cuarta generación.
- Calibración de los resultados entre el modelo numérico y el físico.
- Comparar la eficacia de los dispositivos SLB4 frente a los brazos de pandeo restringido.

1.3. Metodología

Se han realizado cuatro ensayos en la Universidad de Cantabria para poder calibrar los modelos numéricos de la cuarta generación de dispositivos SLB. Para dichos ensayos se dispuso de muros de hormigón armado equipados con dispositivos SLB4 y una prensa hidráulica que los sometió a las cargas cíclicas correspondientes. Una vez conocidos los resultados de los ensayos se ha realizado una correlación numérica para poder conocer los parámetros que definen correctamente el comportamiento de los dispositivos. Además, se ha realizado una comparativa técnica del rendimiento de los dispositivos SLB4 respecto a los brazos de pandeo restringido (BRB) para poder contrastar si es una alternativa viable o no.

1.4. Contenido del documento

Capítulo 1. Introducción

Capítulo 2. En este capítulo se presentan algunos de los dispositivos pasivos de diseño sísmico y se explica brevemente cómo diseñar estructuras con SLBs y BRBs.

Capítulo 3. En este capítulo se describe la modelización numérica de los dispositivos SLB4, cómo se han realizado los ensayos y sus resultados y, finalmente, se expone la correlación numérica entre el ensayo y el modelo.

Capítulo 4. En este capítulo se realiza una comparación técnica entre los dispositivos SLB4 y los BRBs para un proyecto real de un edificio de 33 niveles.

Capítulo 5. En este capítulo se valoran los resultados de los ensayos y de los modelos numéricos y se proponen alternativas futuras para mejorarlos. Además, se resume la comparativa técnica entre los BRBs y los SLB4.

2.Estado del arte

2.1. Comportamiento estructural frente a sismo

2.1.1. Terremotos

Los terremotos se originan en roturas bruscas de la corteza terrestre seguidas de la liberación de energía almacenada en forma de ondas sísmicas. Dichas ondas se propagan hasta la superficie produciendo vibraciones en las estructuras. Los sismos se pueden clasificar de muchos modos, con el fin de conocer la severidad de éstos aparecen los conceptos de intensidad y magnitud. Por un lado, la intensidad es un parámetro cualitativo que describe los daños materiales y económicos originados por el sismo. Y, por otro lado, la magnitud es un parámetro cuantitativo que caracteriza la energía total liberada por el terremoto.

La reacción de una estructura ante la vibración del suelo se mide con los espectros. Hay diferentes tipos de espectro en función de la reacción que se quiera comparar aunque el más habitual es el espectro de aceleración ya que se relaciona con el cortante en la base de la estructura originado por el sismo. En general, los espectros se generan para estructuras de un grado de libertad, pudiendo ser lineales elásticos o no lineales. La ecuación clásica de movimiento para un sistema de un grado de libertad lineal elástico se expresa:

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = -M\ddot{u}_g(t) \quad (1.1)$$

Donde M es la masa, C el amortiguamiento, K la rigidez, $u(t)$ el desplazamiento relativo al suelo con $\ddot{u}(t)$ y $\dot{u}(t)$ sus derivadas representando velocidad y aceleración y, por último, $\ddot{u}_g(t)$ la señal sísmica.

Si operamos con la ecuación y la dividimos por la masa:

$$\ddot{u}(t) + \frac{C}{M}\dot{u}(t) + \frac{K}{M}u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (1.2)$$

Siendo $\frac{C}{M} = 2\rho\omega$ y $\frac{K}{M} = \omega^2$ donde ω es la frecuencia circular y ρ el porcentaje de amortiguamiento crítico. De esta manera obtenemos que la respuesta de un sistema de un grado de libertad lineal elástico, para una determinada señal sísmica, únicamente depende de dos parámetros, la frecuencia circular y el porcentaje de amortiguamiento crítico.

La Figura 2.1 muestra un espectro de aceleraciones para cuatro señales sísmicas. En ella se puede ver la influencia del tipo de suelo en relación a la respuesta de la estructura. De la figura se puede apreciar que el pico de resonancia se da para las señales de Concepción en el orden

de 2 segundos mientras que para Ica está cercano a 0.75 segundos. Esto se debe a que el suelo que soportaba las estructuras de Ica es un suelo rígido y, en cambio, en Concepción es un suelo blando o intermedio. De esta manera podemos ver que el diseño sísmico está intrínsecamente condicionado por el tipo de suelo en el que se emplace la estructura, entre otros factores. Es habitual que cada terremoto severo, incluso a día de hoy, expanda el conocimiento en factores de riesgo. También se puede observar que el registro de ICA NS presenta un segundo pico resonante alrededor de los 3s, probablemente por efecto de la proximidad del epicentro y su mecanismo de fallo.

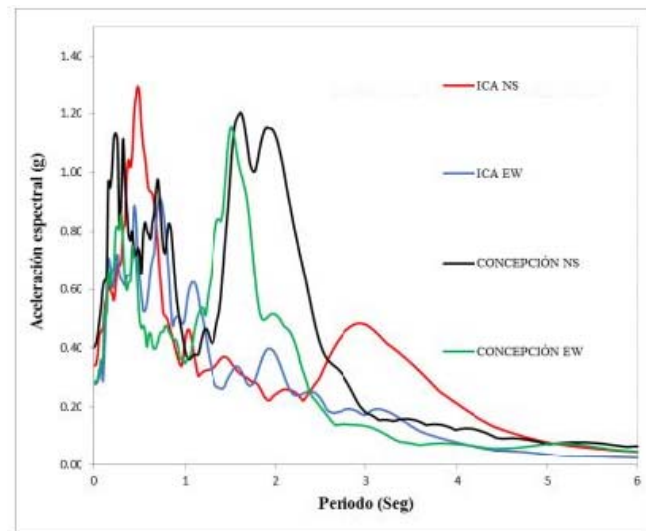


Figura 2.1. Espectros de respuesta para cuatro señales sísmicas en Perú

2.1.2. Fallo frágil o dúctil

La ductilidad se define como la capacidad de los materiales de deformarse sin llegar a romperse. En la Figura 2.2 podemos ver que para una estructura de un grado de libertad, en el punto A se alcanza su máxima deformación elástica o punto de fluencia, una vez allí el incremento en la resistencia es muy bajo pero la deformación aumenta mucho hasta llegar al punto B que es la rotura del material. En un material frágil, el punto B se hallaría cercano al A y resultaría en que justo después de llegar al punto de fluencia se daría una pérdida súbita de resistencia.

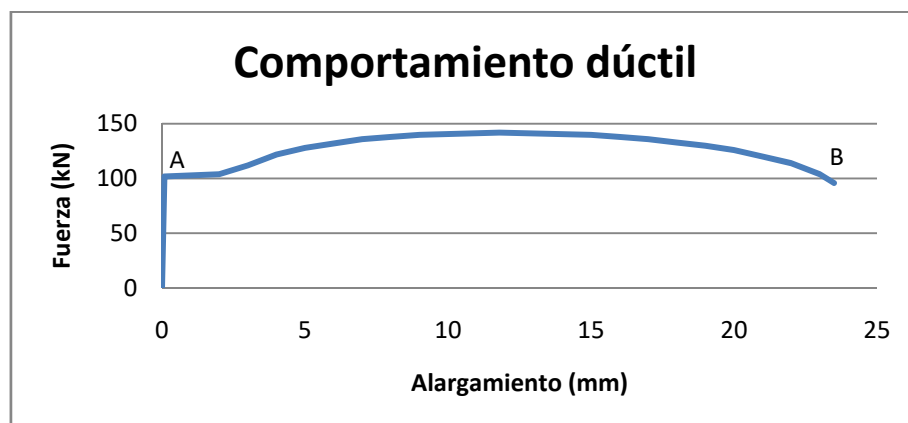


Figura 2.2. Comportamiento dúctil para una estructura de un grado de libertad

Uno de los principales objetivos del diseño de estructuras sismoresistentes es evitar un fallo frágil que provoque la pérdida súbita de capacidad portante. En general, cuanto mayor sea la ductilidad de la estructura más se podrán reducir las cargas sísmicas y más se podrá ahorrar en el diseño de esta. Aún así, como ya se ha comentado anteriormente, la interacción con el suelo también es muy importante ya que se puede observar mayores daños en estructuras flexibles cuando el suelo que las soporta corresponde a un suelo blando y, de igual manera, cuando el suelo es firme son las estructuras rígidas las que sufren mayor concentración de daño.

El fallo frágil más común dentro de las estructuras de hormigón armado es el fallo por cortante siendo un claro ejemplo el de vigas o columnas de poca longitud. En estos elementos se presenta mucha más rigidez que en otros de características similares pero de mayor longitud y, por lo tanto, el cortante es mayor. Una de las soluciones a este problema es reducir el armado longitudinal de tal manera que el fallo se dé antes por flexión y que sea forma dúctil.



Figura 2.3. Fallo de una columna por cortante

En el diseño convencional de estructuras y, para evitar el fallo frágil, se han establecido una serie de restricciones en el cálculo y en los detalles constructivos. A nivel de cálculo, por ejemplo, el cortante en una viga o en una columna no se establece con el análisis estructural sino por la capacidad a momento flector de sus extremos. La Figura 2.4 muestra los detalles dúctiles establecidos por la normativa del ACI que deben de cumplirse en todos los elementos que puedan transferir carga sísmica (Bozzo & Barbat, 1999). Estos detalles aplicados en todos los elementos estructurales no sólo complican en muchas ocasiones la disposición global del armado sino que aumentan considerablemente el costo de la estructura.

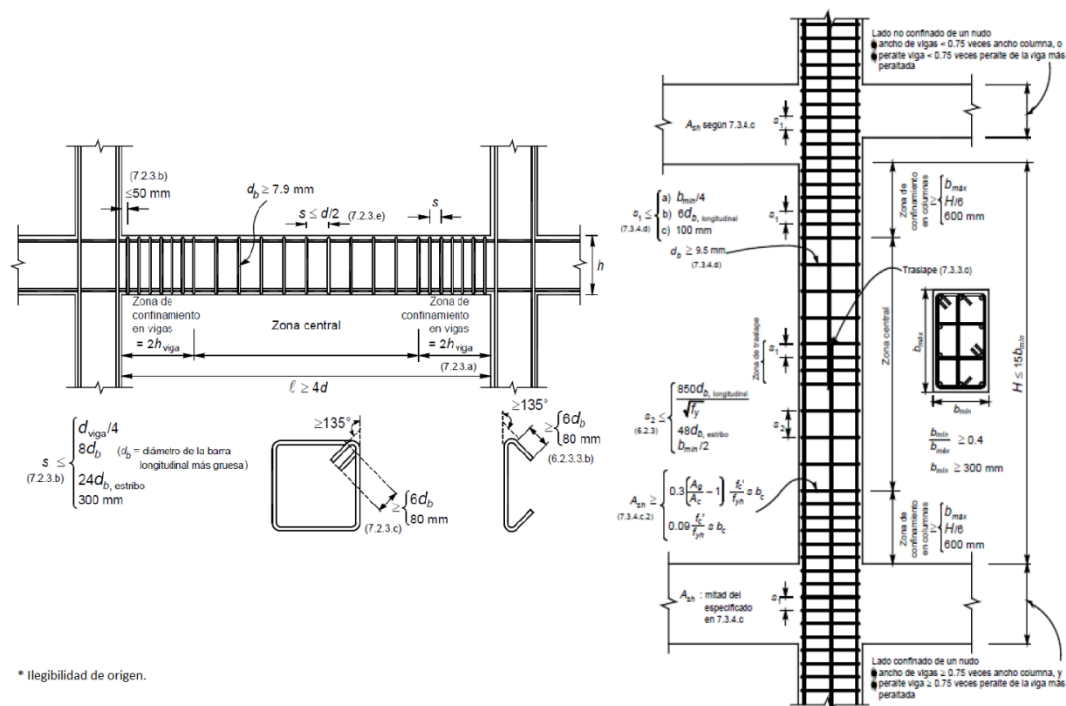


Figura 2.4. Detalles dúctiles para elementos que puedan transferir carga sísmica establecidos por la ACI

En estructuras metálicas el fallo frágil más común puede deberse al pandeo o a fallos locales por soldadura en uniones. El profesor Popov observó después de varios sismos en los Estados Unidos que los edificios construidos con diagonales metálicas excéntricas se comportaban mejor que los de diagonales concéntricas por el posible pandeo de las últimas. Este hecho motivó una extensa investigación experimental acerca de este sistema que condujo a una extensa reglamentación en diversas normativas del mundo marcando un coeficiente de reducción sísmica alto con el uso de diagonales excéntricas (Popov et al., 1987). Cabe destacar que, a diferencia del hormigón que falla por cortante, el acero es un excelente disipador por corte siempre que se prevenga de abolladura local.

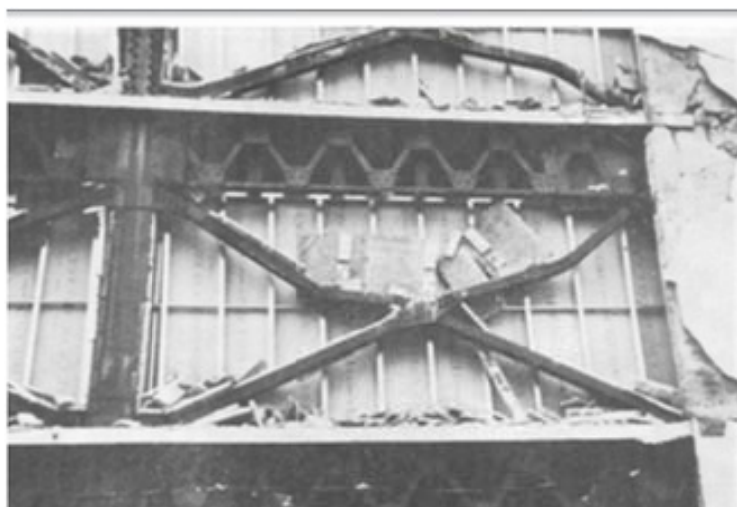


Figura 2.5. Fallo por pandeo en diagonales concéntricas

La Figura 2.6 muestra tanto el comportamiento estructural de las diagonales excéntricas sometidas a corte como las curvas histeréticas de las mismas. De ello podemos observar que estos dispositivos tienen un muy buen comportamiento ofreciendo una respuesta estable frente a cargas cíclicas, con curvas amplias y convexas.

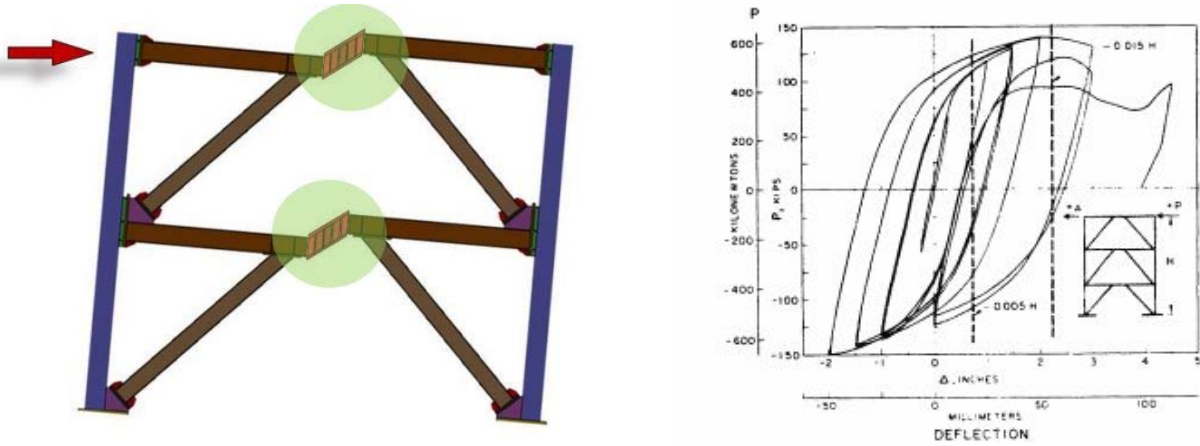


Figura 2.6. Comportamiento estructural (izquierda) y curvas histeréticas (derecha) de las diagonales excéntricas

A diferencia de las diagonales excéntricas o, “Eccentrically Braced Frames, *EBF*”, las diagonales concéntricas presentan unas curvas histeréticas con cuello de botella (Figura 2.7) lo que comporta que el sistema no disipe bien energía y pueda tener una caída rápida de resistencia. Además, como la energía disipada es el área encerrada dentro de la curva, podemos comparar entre las Figura 2.6 y Figura 2.7 que, tal y como se ha comentado anteriormente, las diagonales excéntricas son mejores disipadores de energía. Otro aspecto relevante es que las cargas ejercidas por un sismo severo en el rango lineal son de un orden de magnitud superior a las de diseño, por lo que las diagonales concéntricas estarían sometidas a niveles de esfuerzos muy altos. En contrapartida, al plastificar los brazos excéntricos, las diagonales metálicas reducen su sobreesfuerzo en el caso de sismos severos. Por tanto, como se indicó al inicio de este trabajo los brazos excéntricos cambian la “jerarquía” de los elementos estructurales protegiendo las diagonales.

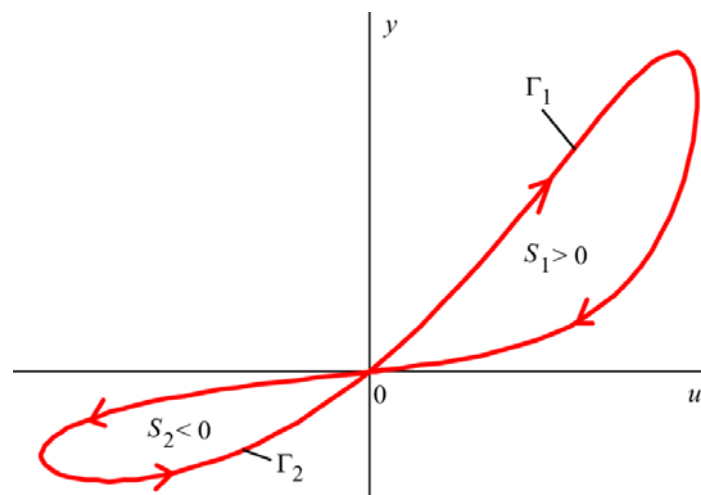


Figura 2.7. Representación de las curvas histeréticas de las diagonales concéntricas mostrando su “adelgazamiento” o “pinching”

2.2. Dispositivos de protección sísmica

2.2.1. Diferencia entre dispositivo activo y pasivo

Los sistemas de protección sísmica se pueden clasificar en dos categorías, los sistemas activos y los sistemas pasivos. Los sistemas activos son un método complejo de diseño sismoresistente en el que se incluyen sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, y actuadores dinámicos. En resumen, estos sistemas captan el movimiento de la estructura, mediante un software evalúan las fuerzas recibidas, las procesan con un modelo numérico y envían a los actuadores fuerzas equivalentes de valor contrario para contrarrestar dicho movimiento (Corporación de Desarrollo Tecnológico, 2012).

Aunque en un principio este método presente una muy buena respuesta estructural ante el sismo, al estar basada en un modelo matemático de las propiedades del edificio, éste puede no ser exactamente preciso ya que la rigidez del edificio es variable a lo largo del terremoto y, por lo tanto, se pueden enviar señales hasta perjudiciales para la estructura. Además, otro punto clave de este sistema es que requiere de una fuente de alimentación externa continua para su funcionamiento durante el sismo.

Por estos motivos, los sistemas activos de protección sísmica no son muy comunes en la actualidad y, principalmente se usan los sistemas pasivos. Los sistemas pasivos se pueden distinguir en dos categorías, aisladores y disipadores. La aislación sísmica de base es un sistema en el que se evita que las fuerzas del sismo se transmitan del suelo a la estructura. En cambio, los disipadores se instalan dentro de la estructura para absorber las sollicitaciones de origen dinámico, protegiendo y reduciendo los daños.

Dentro de los disipadores se diferencian los dispositivos dependientes de los desplazamientos y los dependientes de la velocidad. Comúnmente se conocen los dispositivos dependientes de los desplazamientos como disipadores y los dependientes de la velocidad como amortiguadores. Considerando de nuevo la *ecuación 1.1*, podemos ver que los disipadores involucran o actúan sobre el tercer término $K_u(t)$, mientras que los amortiguadores con el segundo término, el $C_u(t)$. De esta forma podemos ver que los amortiguadores no cambian el periodo de la estructura mientras que los disipadores, al afectar al término de la rigidez, sí lo hacen. Cabe destacar que los amortiguadores requieren un amortiguamiento global muy alto o una velocidad de la estructura alta, en cambio, los disipadores pueden empezar a disipar energía desde valores muy bajos de desplazamientos y, por lo tanto, modificar el periodo estructural debido a su plastificación.

Ambos dispositivos, dependientes del desplazamiento y de la velocidad, pueden relacionarse con una mejora o avance del diseño sismorresistente clásico de estructuras basado en la ductilidad y redundancia estructural, ya que permiten reducir de forma significativa las fuerzas

inducidas por un sismo severo (Bozzo & Barbat, 1999). Por un lado, los dispositivos dependientes de la velocidad, al aumentar el amortiguamiento de la estructura, reducen el espectro del sismo. Por otro lado, los dispositivos dependientes del desplazamiento, al plastificar absorben energía del sismo, y cambian el periodo de la estructura, desplazándolo a zonas de menor ordenada espectral. Es por eso que el uso de este sistema permite aumentar el factor R, Q u otro en distintas normativas.

La Figura 2.8 ejemplifica los beneficios en el diseño estructural tanto del uso de disipadores como con el uso de amortiguadores. Tal y como se puede ver, el uso de amortiguadores reduce la ordenada de respuesta de la estructura y, en cambio, el uso de disipadores desplaza el periodo (abscisa) a rangos no resonantes.

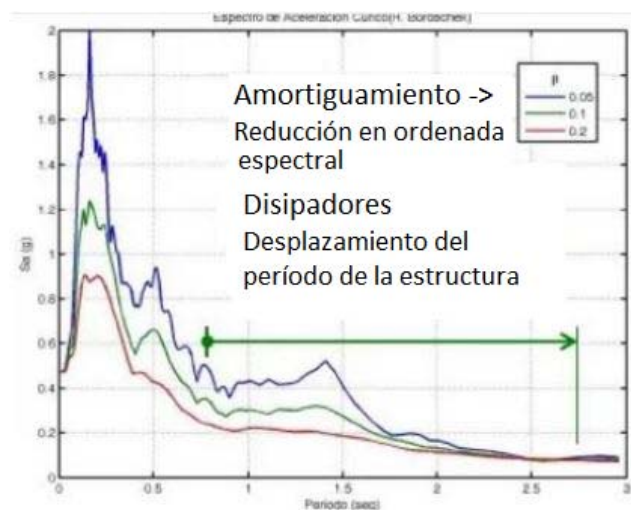


Figura 2.8. Consecuencias del uso de amortiguadores vs disipadores

2.2.2. Historia de los disipadores

Teóricamente cada esfuerzo seccional, sea torsión, flexión, cortante o fuerza axial, puede emplearse para disipar energía. A continuación se muestran unos de los disipadores dependientes del desplazamiento más comunes en el mundo.

Disipadores TADAS

El sistema TADAS son dispositivos formados por un conjunto de placas metálicas de espesor constante y sección trapezoidal, paralelas entre sí, que se sueldan a una placa base común. Las condiciones de apoyo, empotrado-articulado, permiten que las placas se deformen por flexión en curvatura simple. Dicha curvatura se distribuye uniformemente y, por lo tanto, la plastificación se puede dar simultáneamente a lo largo de toda la altura de las placas sin concentración de la curvatura (Tsai et al., 1993).

Las siguientes figuras muestran tanto la geometría como los ciclos histeréticos. Cabe destacar la forma de dichas curvas ya que, tal y como se puede ver, resultan aproximadamente rectangulares y, como la energía disipada es el área encerrada dentro de estas y ésta será máxima si es rectangular, estos dispositivos son muy eficientes.

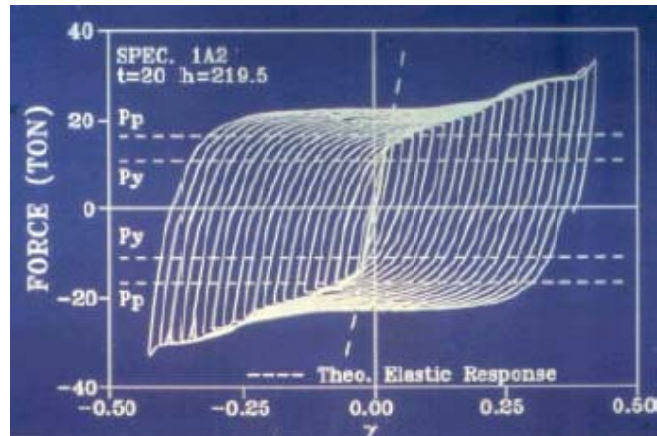


Figura 2.9. Disipadores TADAS y su comportamiento histerético

Disipadores ADAS

El sistema ADAS (Adding Damping And Stiffness) se empezó a desarrollar en la década de los años 1980 y se asemeja al TADAS. En este dispositivo las planchas también se ubican en paralelo pero en forma de X y, a diferencia del TADAS, las planchas están empotradas en ambos extremos. Un aspecto importante es que tanto el sistema TADAS como el ADAS se colocan en perpendicular a su plano, es decir, son relativamente flexibles y, así, no dan excesiva rigidez a la estructura principal. Cada chapa tiene las dimensiones mostradas en las siguientes figuras, pero su número puede variar en cada conexión. La plastificación se produce al mismo tiempo en todas las chapas y la variación en altura del número de chapas utilizadas permite optimizar la respuesta estructural (Whittaker et al., 1998).

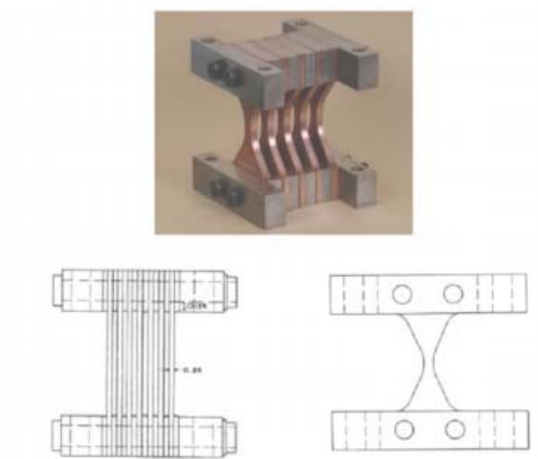


Figura 2.10. Disipadores ADAS

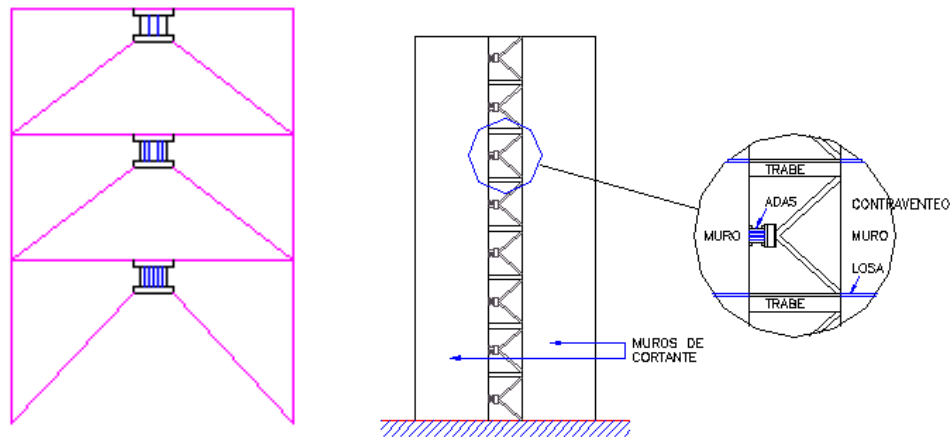


Figura 2.11. Ubicación de las conexiones ADAS en un pórtico

Tal y como se ve en la Figura 2.11 estas conexiones pueden estar ubicadas tanto en diagonales como en muros de hormigón armado acoplados. La respuesta histerética típica de estas conexiones es estable sin degradación significativa después de muchos ciclos de carga tal y como muestran las siguientes imágenes comparando la respuesta ante un ciclo y la respuesta después de 100 ciclos.

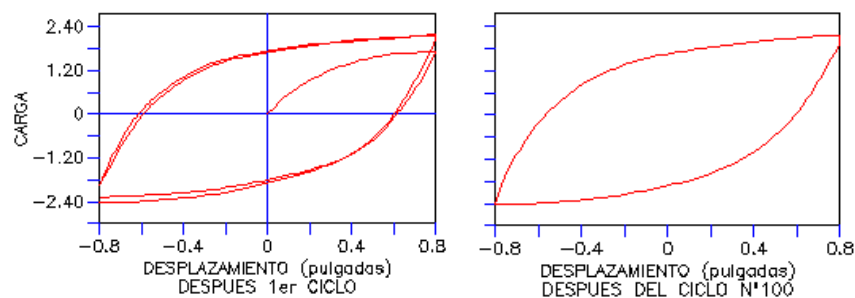


Figura 2.12. Primer ciclo vs ciclo número 100

Buckling Restrained Braces

Las barras de pandeo restringido o buckling restrained braces (BRB) se empezaron a desarrollar en la década de los años 1980 en Japón (Watanabe, et al., 1988). Estos sistemas están formados por tres elementos básicos, un núcleo de acero, un tubo de acero que lo confina y una interface entre ambos que puede ser de hormigón o mortero.

El núcleo de acero está diseñado para resistir toda la fuerza axial desarrollada en el arriostramiento. Ya que no está limitada por el pandeo, el área de la sección transversal puede ser significativamente menor que la de los tirantes regulares. Con respecto a la geometría, la parte central del núcleo está diseñada para plastificar en evento de sismo, en cambio los extremos se diseñan rígidos y para que mantengan su rango elástico durante el sismo. Para ello se le puede aumentar el área del núcleo en los extremos y así concentrar la plastificación en el centro del núcleo.

El tubo de acero que confina el núcleo, a través de su rigidez a flexión, es la que proporciona el soporte lateral contra el pandeo por flexión del núcleo. El criterio de diseño para estas carcasas es proporcionar una restricción adecuada (rigidez) contra el pandeo del núcleo. Por

último, la interface desacopla ambos elementos, núcleo y carcasa, permitiendo que el núcleo de acero resista toda la fuerza axial desarrollada en el arriostramiento.

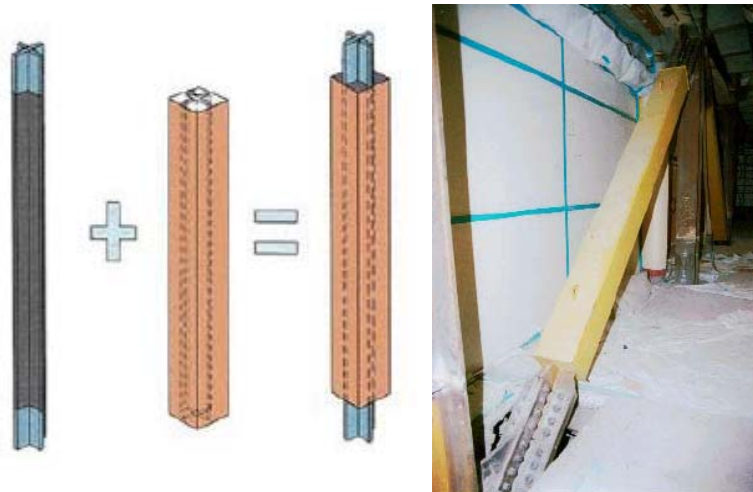


Figura 2.13. Configuración de las barras de pandeo restringido (BRB)

Gracias al alto nivel de ductilidad de los BRB, y que presentan mucha estabilidad en ciclos histeréticos, estos dispositivos pueden absorber una gran cantidad de energía durante cargas cíclicas como las de un terremoto. Además, dependiendo de su configuración, el código de construcción de Estados Unidos (AISC) permite el uso de un factor de reducción (R) de hasta 8 lo cual es una gran reducción en las fuerzas sísmicas de diseño. De este modo se podrá ahorrar reduciendo las secciones transversales y el armado de las vigas y columnas de los pórticos arriostrados

Ya que el objetivo de los BRB es disipar las fuerzas laterales de las columnas y las vigas, la conexión entre los dispositivos y las columnas puede afectar en gran medida a su rendimiento durante un sismo. Normalmente el BRB se une a una cartela, que a su vez se suelda a la viga y /o columna. Para los BRB típicamente se usan estos tres tipos de conexiones:

- Conexión soldada: El BRB se suelda a la cartela en obra. Aunque este procedimiento implique horas adicionales en obra puede mejorar el mecanismo de transferencia de energía y, potencialmente, requerir BRB más pequeños.
- Conexión atornillada: El BRB se atornilla directamente en obra. No requiere mucho tiempo ni personal cualificado para ello lo que simplifica mucho la conexión.
- Conexión con pasador: Tanto el brazo como la cartela están diseñados para aceptar un pasador. Dicho pasador las conecta entre ellas y permite una rotación libre en la conexión.

La Figura 2.14 muestra la mejora en el comportamiento histerético de una diagonal al proporcionarle el sistema de BRB evitando así el pandeo y permitiendo así una respuesta uniforme y estable frente a cargas cíclicas axiales en la diagonal:

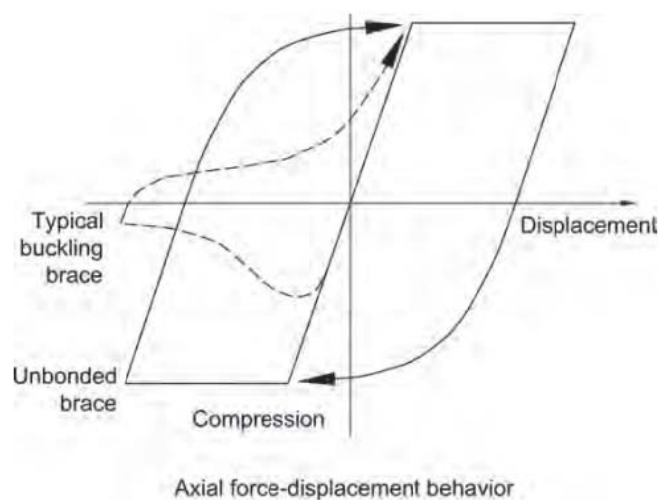


Figura 2.14. Comportamiento de una diagonal con y sin el sistema de BRB (AISC)

Disipadores Shear-Link

En el año 2000, Bozzo y Cahis desarrollaron un disipador tipo Shear Link para la protección de muros de mampostería. Aunque previamente ya habían surgido los dispositivos Shear Link de aluminio y hubiesen dado buenos resultados por su baja tensión de plastificación, la mala soldabilidad de estos y su difícil conexión, sugirió hacer estos nuevos shear link de acero. Estos dispositivos tienen la forma de un perfil metálico vertical con rigidizadores horizontales que evitan problemas de abolladura. Además, la parte disipativa del dispositivo se crea mediante fresado, permitiendo así que los rigidizadores puedan ser de pequeñas dimensiones y evitando que se tenga que soldar ningún elemento en la zona de plastificación lo que generaría tensiones residuales y reduciría el rendimiento del dispositivo (Franchioni G., 2001). Los estudios experimentales realizados del dispositivo demostraron que presenta una elevada rigidez elástica en el plano en que se produce la disipación de energía y que en el plano normal es muy flexible. De esta manera este dispositivo tiene muy buenas características para ser utilizado como conector en sistemas basados en muros de mampostería y pórticos flexibles.

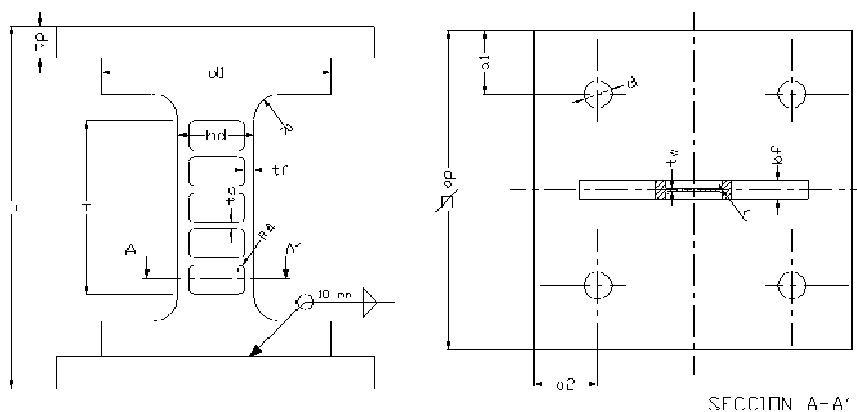


Figura 2.15. Dispositivo shear link propuesto por Bozzo y Cahis

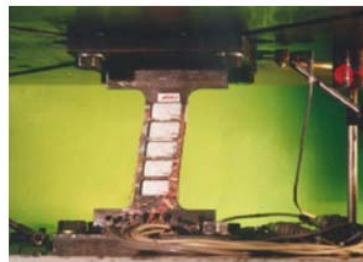
Poco después, con la tesis doctoral de Francisco Hurtado en 2006, surgió la posibilidad de generalizar el dispositivo y toda una gama de dispositivos de distintas dimensiones y fuerzas de plastificación que pudiesen disipar energía a partir de pequeños desplazamientos. En el laboratorio de ISMES, en Bergamo, Italia, se llevaron a cabo seis ensayos con el fin de validar y calibrar los modelos de cálculo de los dispositivos sometiéndolos a una carga monotónica creciente. Con esos ensayos se fijó la altura disipativa en 110mm y se crearon tablas de diseño para distintos anchos del dispositivo. Estos dispositivos fueron denominados disipadores SL de segunda generación y tienen unas fuerzas de inicio de plastificación de entre 13 y 435kN (Hurtado & Bozzo, 2008). Una de las características importantes de estos dispositivos es que sus conexiones son atornilladas en ambos extremos con un par de aprietes para impedir su deslizamiento tanto vertical como horizontal. Por lo tanto, aunque dispongan de un agujero elíptico que permite el movimiento vertical y disminuye la fuerza axial, al tener el apriete los dispositivos transfieren fuerza axial.

Posteriormente, en 2017, se realizaron ensayos (Nuzzo, et al., 2017) que verificaron una respuesta estable y amplia de los dispositivos. Estos estudios experimentales corresponden a los últimos realizados con conexiones atornilladas ya que en 2018 se desarrolló la conexión almenada o dentada que evitaba que los dispositivos transfieran carga axial. A partir de entonces los shear link o SL de segunda generación incorporando esta conexión se denominaron Shear Link Bozzo o SLB de tercera generación.

Disipadores SLB3ª Generación

Tal y como se ha comentado anteriormente, los dispositivos SLB3 son disipadores shear link hechos de acero con ventanas fresadas que son las que disipan energía. Estos disipadores tienen la peculiaridad de instalarse mediante conexiones almenadas que evitan la transferencia de carga axial al disipador, lo que permite que los dispositivos se incorporen libremente en la estructura tanto en planta como en altura. Además, esta conexión permite que se puedan diseñar los muros o las barras diagonales auxiliares necesarios para instalar los dispositivos de forma desacoplada de la estructura global y evitando su fallo por corte o pandeo al limitar la fuerza máxima. Aun así, el hecho de articular el dispositivo en un extremo, aunque aporte una gran variedad de ventajas, reduce el total de energía disipada del disipador si lo comparamos con un sistema bi-empotrado. En el año 2017 se realizó un ensayo en la Universidad Autónoma de México (UNAM) para un pórtico prefabricado equipado con dispositivos SLB incluyendo la conexión almenada, para dicho ensayo se observó un comportamiento estable en la respuesta de los dispositivos disipando energía a partir de décimas de milímetro (Pantoja et al., 2020).

La Figura 2.16 muestra la evolución de los dispositivos SLB desde la primera generación atornillada en 2002 hasta los dispositivos actuales con la conexión tipo peine o almenada que permite la transferencia de esfuerzo cortante pero evita la transferencia axial o de flexión.



Prototipo
Shear Link Bozzo , 1998



Primera Generación
Shear Link Bozzo , 2002



Segunda Generación
Shear Link Bozzo , 2016



Disipador Actual
Shear Link Bozzo, 2019.

Figura 2.16. Evolución de los dispositivos SLB

La Figura 2.17 muestra una de las ventajas comentadas en el párrafo anterior. Al no transferir carga axial el sistema se puede colocar y diseñar de forma independiente (desacoplada) del pórtico global simplemente empleando la fuerza máxima (F_{max}) que el dispositivo empleado pueda transferir. En otras palabras, al no incluir ni flexión ni carga axial, el muro desacoplado en el que van los disipadores es isostático y se puede ubicar libremente en la estructura permitiendo, por ejemplo, grandes luces en sótanos y, resolviendo así uno de los problemas que presentan los muros discontinuos (apeados).

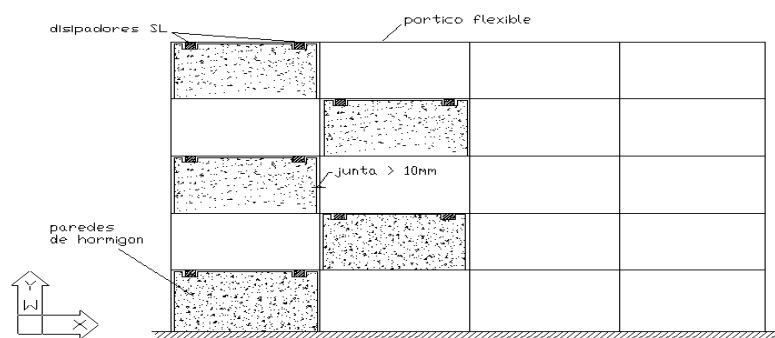


Figura 2.17. Muros desacoplados no alineados verticalmente equipados con SLBs

Además de solucionar el problema de los muros discontinuos en sótanos, estos dispositivos pueden ser muy convenientes en el diseño sísmico por muchas razones. Por ejemplo, en estructuras con mucha torsión en planta se pueden colocar estos dispositivos opuestos a los elementos que generan la torsión pero sin la necesidad de ponerlos en toda la altura. Del mismo modo, en estructuras que su primer periodo ya es torsional, con la ayuda de estos dispositivos se rigidizaría la estructura y se puede lograr que sea traslacional.

Otro ejemplo de su utilidad se da teniendo en cuenta el drift. Las normas actuales en el diseño sismorresistente distinguen el denominado “drift de rotura” del “drift en servicio”, limitando el primero en función de si el sistema estructural es en base a pórticos (límite del orden de 0.025) o muros (límite del orden de 0.015). De esta manera, un sistema de pórticos pero que incorpore los muros desacoplados, en función de la rigidez adicional requerida, se podría diseñar con un drift en rotura muy superior al de los muros.

Aunque estos dispositivos tienen varias posibles opciones de instalación a la estructura, las dos principales soluciones que se usan hoy en día son los muros desacoplados o las diagonales metálicas. La primera se ha mostrado en el ejemplo anterior y a continuación se muestran dos ejemplos de la instalación de dispositivos SLB3 mediante diagonales metálicas. Igual que con los muros desacoplados, esta solución permite la colocación de los dispositivos a voluntad del diseñador o de las necesidades del diseño arquitectónico. Con esta solución, a diferencia de con los muros, no se cierra el pórtico y permite dejar a la vista exterior lo que arquitectónicamente suele ser de mucha importancia.



Figura 2.18. Instalación del sistema de SLB mediante diagonales metálicas

Disipadores Mariposa “Butterfly” Shear Link

Otro ejemplo de disipador por corte son los disipadores “butterfly shear link”. De una forma muy parecida al sistema ADAS estos dispositivos tienen una forma de X para mejorar su comportamiento asemejándolo a la distribución de momentos. A diferencia del sistema ADAS, estos dispositivos se colocan en su plano por lo que es un sistema más rígido. Por otra parte, aunque los dispositivos están en paralelo, la distribución de cortante y fuerza axial, esta última, originada por el momento flector, no es uniforme entre los fustes del dispositivo, tendiendo a cargar más en los extremos.

La Figura 2.19 a) muestra un dispositivo mariposa shear link ensayado en la Universidad de Stanford. Tal y como se puede ver, este sistema se empotra en ambos lados mediante uniones atornilladas relativamente complejas en comparación a la conexión almenada de los SLB3. Las curvas histeréticas (Figura 2.19 b)) no presentan un comportamiento convexo y, más bien, se puede apreciar un claro adelgazamiento o “pinching”. La energía disipada por los dispositivos es el área encerrada dentro de las curvas histeréticas por lo que al comparar ambos sistemas de shear link, es decir, los SLB con los “Butterfly”, podemos concluir que los SLB presentan mejores ciclos histeréticos y, por lo tanto, mejor disipación.

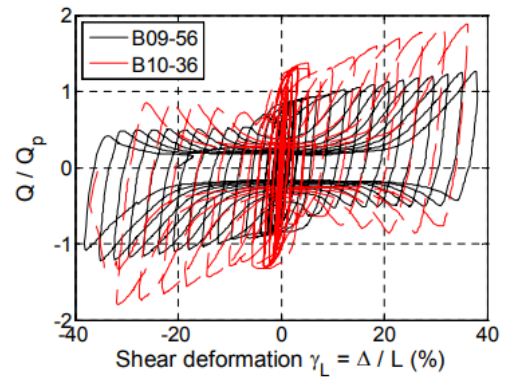
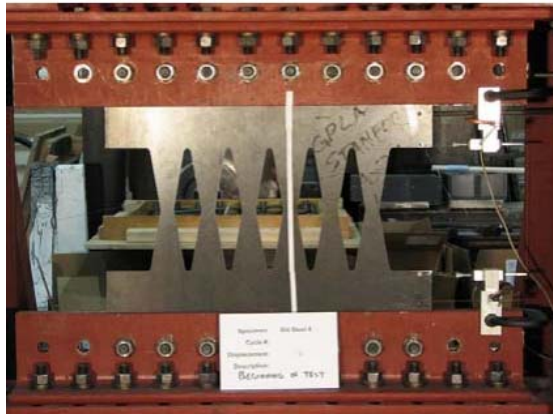


Figura 2.19. a) Sistema “butterflyshear link” b) Respuesta histerética de dos dispositivos “butterflyshear link”(Ma, X. et al, 2010)

2.3. Modelización de estructuras sismoresistentes

2.3.1. Modelización con SLB

Definición de características

Para modelar estos dispositivos en una estructura se puede usar una amplia gama de softwares. En general, y para el diseño de grandes estructuras se usan tanto el software ETABS o SAP2000. En este apartado de la tesis de maestría se explicará cómo se modelan estos dispositivos usando dichos programas. Para ello los dispositivos se trataran como elementos link y se definen mediante su rigidez elástica (K_1), el ratio de rigideces plástica y elástica (K_1/K_2), el límite elástico y el exponente de plastificación. Este último parámetro surge del modelo de Wen que es el que se usa para definir el comportamiento histerético del dispositivo.

El modelo de Wen permite simular variadas respuestas elastoplásticas, bilineales o lineales pero no todos sus parámetros tienen una interpretación clara en el campo de la ingeniería, es por eso que algunos autores han adaptado algunos términos de su modelo original (Bozzo et al., 1996) obteniendo así que para definir el comportamiento histerético del disipador únicamente hay un parámetro arbitrario en el modelo denominado n . Dicho parámetro ha de cumplir $n \in [1, +\infty)$ y define la suavidad entre la transición de elástico plástica del material, siendo más dura la curva cuanto mayor es " n ", tal y como se ve en la siguiente imagen. Los valores típicos usados para este parámetro son de $n=1$ o $n=2$ con lo que se da máxima suavidad a la curva.

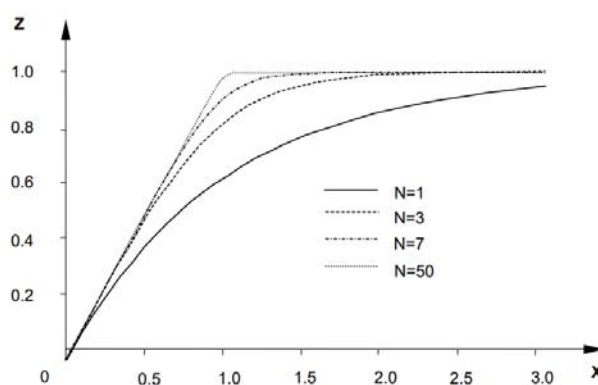


Figura 2.20. Modelo de Wen adaptado para definir comportamientos histeréticos

Para la asignación de dichos parámetros el Ing. Edinson Muñoz generó un plugin para el software ETABS con el que se cargan automáticamente al programa. De esta manera las propiedades de todos los dispositivos se disponen directamente en los tipos de link dentro del ETABS.

Tabla 2-1. Propiedades de diseño de todos los disipadores SLB

PARÁMETROS DE DISEÑO PARA LOS DISIPADORES SHEAR LINK BOZZO										
DISPOSITIVO	PROPIEDADES GEOMÉTRICAS				PROPIEDADES MECÁNICAS					
	ed (mm)	er1 (mm)	er2 (mm)	ev (mm)	Rigidez inicial K_i (KN/cm)	Rigidez post- plastificación K_p (KN/cm)	Desplaz. de plastificación D_p (mm)	Fuerza de plastificación F_y (KN)	Fuerza máxima F_{MAX} (KN)	Energía disipada E_D (KN.cm)
SLB2 6_2	19.00	13.00	-	2.00	363.33	9.75	0.98	35.60	69.01	87.08
SLB2 6_3 *	19.00	13.00	-	3.00	397.80	10.75	1.03	41.00	79.21	99.25
SLB2 6_4 *	19.00	13.00	-	4.00	421.73	11.65	1.06	44.90	88.58	108.31
SLB2 6_5 *	19.00	13.00	-	5.00	439.60	12.78	1.08	47.40	96.67	115.18
SLB2 8_2	19.00	15.00	-	2.00	592.87	13.86	0.81	48.10	92.76	119.78
SLB2 8_3 *	19.00	15.00	-	3.00	676.27	15.38	0.86	58.00	107.57	141.77
SLB2 8_4 *	19.00	15.00	-	4.00	737.00	16.28	0.90	66.30	120.87	159.39
SLB2 8_5 *	19.00	15.00	-	5.00	784.27	17.43	0.93	72.70	133.29	173.71
SLB2 10_2	19.00	20.00	-	2.00	893.40	19.15	0.76	68.00	128.71	168.89
SLB2 10_3	19.00	20.00	-	3.00	1039.13	21.57	0.78	81.10	148.63	198.84
SLB2 10_4 *	19.00	20.00	-	4.00	1149.53	22.96	0.81	93.00	166.26	224.54
SLB2 10_5 *	19.00	20.00	-	5.00	1237.80	14.93	0.91	112.20	182.26	246.55
SLB2 15_2	19.00	20.00	-	2.00	1571.47	31.17	0.65	101.80	199.61	258.66
SLB2 15_3	19.00	20.00	-	3.00	1961.47	37.36	0.64	126.10	240.45	318.16
SLB2 15_4	19.00	20.00	-	4.00	2290.27	42.03	0.65	149.70	276.57	373.16
SLB2 15_5	19.00	20.00	-	5.00	2575.60	45.69	0.67	172.50	310.13	424.52
SLB2 20_2	19.00	25.00	5.00	2.00	2073.33	37.83	0.60	124.60	243.14	316.64
SLB2 20_3	19.00	25.00	5.00	3.00	2630.13	46.27	0.60	156.90	298.30	396.26
SLB2 20_4	19.00	25.00	5.00	4.00	3105.53	53.03	0.61	188.30	348.53	470.63
SLB2 20_5	19.00	25.00	5.00	5.00	3520.20	58.63	0.62	218.40	395.71	540.18
SLB3 25_2	25.00	30.00	5.00	2.00	3214.07	58.98	0.61	194.80	383.50	494.69
SLB3 25_3	25.00	30.00	5.00	3.00	4046.67	70.69	0.59	238.20	457.15	602.54
SLB3 25_4	25.00	30.00	5.00	4.00	4783.20	81.04	0.58	279.60	526.49	703.70
SLB3 25_5	25.00	30.00	5.00	5.00	5447.47	90.85	0.59	319.00	592.39	799.88
SLB3 25_6	25.00	30.00	5.00	6.00	6064.13	99.65	0.59	357.10	655.63	891.48
SLB3 25_7	25.00	30.00	5.00	7.00	6644.13	107.41	0.59	394.50	716.83	979.51
SLB3 25_8	25.00	30.00	5.00	8.00	7191.47	114.57	0.60	430.70	776.40	1064.12
SLB3 25_9	25.00	30.00	5.00	9.00	7711.07	120.73	0.60	466.40	834.90	1145.71
SLB3 30_2	25.00	30.00	5.00	2.00	3666.73	64.22	0.58	212.10	415.33	539.19
SLB3 30_3	25.00	30.00	5.00	3.00	4717.00	78.76	0.56	265.70	507.23	672.79
SLB3 30_4	25.00	30.00	5.00	4.00	5661.33	92.21	0.56	316.90	594.62	799.16
SLB3 30_5	25.00	30.00	5.00	5.00	6525.67	104.99	0.56	366.10	678.62	920.34
SLB3 30_6	25.00	30.00	5.00	6.00	7336.60	116.45	0.56	414.20	759.77	1036.63
SLB3 30_7	25.00	30.00	5.00	7.00	8106.07	126.92	0.57	461.30	838.79	1149.06
SLB3 30_8	25.00	30.00	5.00	8.00	8840.00	135.98	0.57	508.00	915.50	1257.99
SLB3 30_9	25.00	30.00	5.00	9.00	9542.20	145.74	0.58	552.50	992.12	1363.85
SLB3 40_2	25.00	30.00	5.00	2.00	4571.07	76.44	0.54	248.30	482.60	634.54
SLB3 40_3	25.00	30.00	5.00	3.00	6043.67	97.23	0.53	321.00	609.64	817.79
SLB3 40_4	25.00	30.00	5.00	4.00	7393.67	116.17	0.53	391.60	732.20	993.03
SLB3 40_5	25.00	30.00	5.00	5.00	8650.00	133.79	0.53	460.80	851.48	1162.82
SLB3 40_6	25.00	30.00	5.00	6.00	9843.00	149.92	0.54	528.70	967.95	1327.13
SLB3 40_7	25.00	30.00	5.00	7.00	10988.00	165.19	0.54	595.40	1082.30	1487.36
SLB3 40_8	25.00	30.00	5.00	8.00	12091.27	179.81	0.55	660.90	1195.00	1643.93
SLB3 40_9	25.00	30.00	5.00	9.00	13156.07	194.00	0.55	725.10	1306.30	1797.11
SLB3 50_2	25.00	30.00	5.00	2.00	5479.60	88.67	0.52	284.90	551.27	730.67
SLB3 50_3	25.00	30.00	5.00	3.00	7367.13	114.64	0.51	377.50	713.65	963.00
SLB3 50_4	25.00	30.00	5.00	4.00	9116.00	138.30	0.51	468.10	871.40	1186.77
SLB3 50_5	25.00	30.00	5.00	5.00	10759.13	160.81	0.52	557.00	1025.70	1404.77
SLB3 50_6	25.00	30.00	5.00	6.00	12328.87	181.80	0.52	644.40	1177.30	1616.83
SLB3 50_7	25.00	30.00	5.00	7.00	13844.20	202.03	0.53	730.30	1326.80	1824.36
SLB3 50_8	25.00	30.00	5.00	8.00	15312.67	221.80	0.53	814.70	1474.50	2028.05
SLB3 50_9	25.00	30.00	5.00	9.00	16737.00	241.37	0.54	897.70	1621.20	2228.51

* Estos dispositivos plastifican primero por flexión antes que por corte

Un parámetro a tener en cuenta es el punto de deformación por corte o punto de momento nulo. Este punto corresponde a la conexión almenada donde el momento es nulo y, por lo tanto esta distancia será 0 o la longitud del disipador en función de cómo se coloquen en el modelo. Cabe destacar que en el plugin se define esta distancia automáticamente en 0 y, por lo tanto, en función de si la conexión es en diagonales chevron o con muros desacoplados los links se deberán colocar en uno u otro sentido. Esto se debe a que las diagonales son normalmente biarticuladas con lo que la conexión almenada se dispone en esta unión y, en cambio, en los muros se dispone en la base de la viga. De este modo, en conexiones con diagonales se insertan los links desde la base de la viga hasta la unión con las diagonales y en cambio, se insertará desde la cara superior del muro hasta la base de la viga para uniones con muros desacoplados tal y como se puede ver en la siguiente imagen.

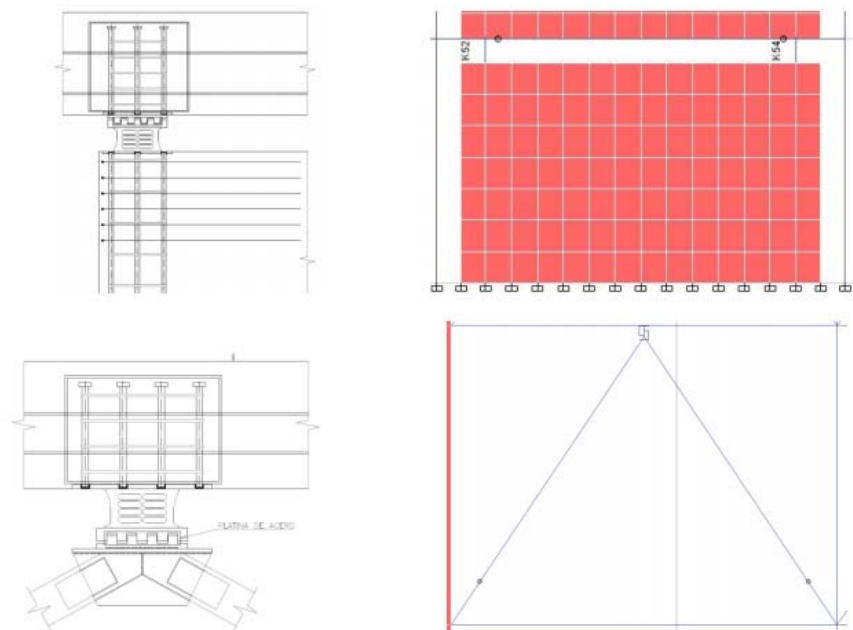


Figura 2.21. Disposición de los SLB según sea la conexión en muros desacoplados o en diagonales

Tanto si la unión de los disipadores es con diagonales chevron o con muros desacoplados, un aspecto a tener en cuenta es la altura con la que se modelan los dispositivos. En general, dicha longitud se toma como la altura del dispositivo la cual, para los SLB3 es de 155mm, tal como se muestra en el manual de usuario (Bozzo, 2020).

En el análisis de una estructura equipada con disipadores SLB se requiere de un cálculo no lineal ya que estos dispositivos trabajan en el rango plástico. Por otra parte, según la Tabla 2-1 se disponen de 52 tipos de dispositivos, que incluso se pueden combinar en paralelo formando una gran combinación de alternativas. Para pre-seleccionar los dispositivos de forma eficiente se han desarrollado dos procedimientos iterativos en el rango lineal elástico, el método directo y el método inverso. En el siguiente diagrama de flujo se muestran todas las etapas en el diseño de los dispositivos SLB siguiendo ambos métodos directo e indirecto.

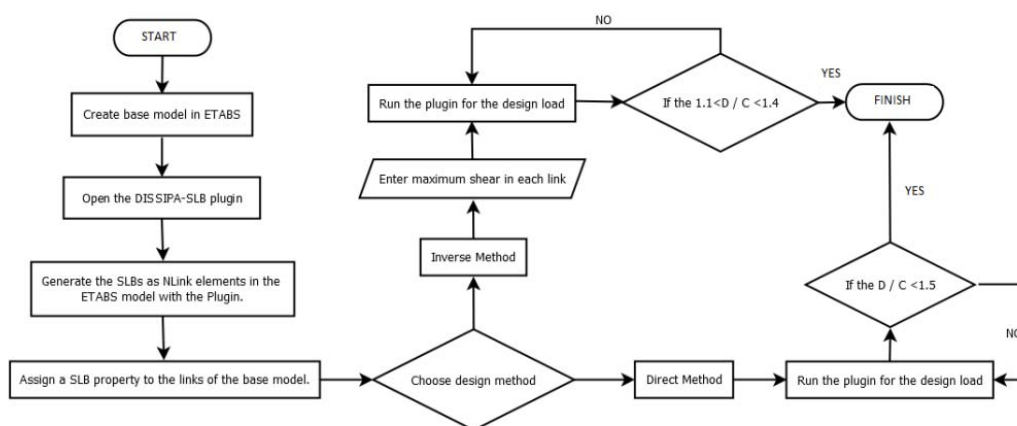


Figura 2.22. Diagrama de flujo de funcionalidad del plugin DISSIPASLB (Bozzo et al., 2020)

Método directo

El método directo es un proceso iterativo en el rango lineal elástico para el diseño de los dispositivos. Mediante el análisis modal y, partiendo de una selección inicial de los dispositivos se establece una relación entre el cortante actuante en los links y su fuerza de inicio de plastificación. Este cociente se llama demanda capacidad (d/c). En cada iteración se aumenta la dimensión del dispositivo hasta alcanzar un d/c inferior a un factor objetivo típicamente de máximo 1.5.

Este factor objetivo de 1.5 toma en cuenta diversos factores desde la sobrerresistencia del material, el endurecimiento cinemático del acero e incluso que este pre-diseño se realiza con un cálculo modal elástico y no con análisis tiempo historia no lineal. Hay que tener en cuenta que cualquier dispositivo es válido siempre que no exceda su deformación de rotura. Por otra parte, también hay que tener en cuenta que el análisis modal es el método de diseño para la estructura global por lo que este coeficiente de demanda capacidad siempre se debe verificar.

Teniendo en cuenta que el desplazamiento de rotura de todos los dispositivos SLB3 es como máximo de 35mm y, asumiendo una altura entre pisos de 320cm se puede estimar un drift máximo de entre 0.01 y 0.012. Una vez realizado el análisis modal de los dispositivos siempre se deberá realizar un análisis no lineal tiempo historia para verificar que los desplazamientos tanto de entre piso como de los links o disipadores no superen los valores anteriores.

Este método origina, en general, dispositivos grandes que pueden llegar a reducir mucho el drift pero que implican unos elementos de soporte, ya sean muros desacoplados o diagonales chevron, grandes ya que el cortante transferido por los dispositivos es mayor. Es por este motivo, y para fijar un tamaño en las diagonales o en los muros desacoplados, que surge el siguiente método de selección de dispositivos.

Método inverso

La iteración inversa es un proceso de diseño de los dispositivos alternativo a la iteración directa en la que se fija la fuerza máxima que los disipadores pueden transferir a sus uniones, ya sea de muros desacoplados o diagonales chevron. Por ejemplo, este valor se puede fijar calculando la capacidad de corte del muro y, a diferencia del método directo en el que se incrementa el tamaño del disipador, se fija un dispositivo grande y se va reduciendo con el fin de llegar a cumplir con la fuerza de corte transferida. Es decir, los dispositivos se seleccionan a priori, ya que se conoce el esfuerzo a corte que pueden transferir, pero en el modelo de diseño global (lineal) se itera para que el cortante en los mismos no exceda en más de un cierto coeficiente de d/c a la capacidad de los dispositivos seleccionados.

La fuerza de cortante transferida por los disipadores se puede calcular mediante la ecuación 2.1. Además, también se debe calcular el cortante máximo soportado por los muros o las diagonales. La ecuación 2.2 muestra el valor del cortante máximo para un muro según la normativa ACI, esta limitación en el cortante tiene como objetivo evitar un fallo frágil en el

muro. Para diagonales metálicas, la expresión se puede desarrollar por equilibrio una fórmula similar pero en base a la fuerza de pandeo y a la inclinación de las diagonales.

$$Vd = (d/c) \cdot F_y \cdot n_{SLB} \quad (2.1)$$

$$\frac{Vd}{L \cdot t} \leq 0.75 \cdot 0.83 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (2.2)$$

Siendo:

- F_y : Fuerza de fluencia del dissipador
- n_{SLB} : número de dispositivos
- d/c : Ratio demanda capacidad, típicamente 1.5
- L : Longitud del muro
- T : Espesor del muro
- f_{ck} : Resistencia característica del hormigón

En base a las ecuaciones 2.1 y 2.2 se establece la ecuación 2.3 en la que se haya la máxima fuerza transferida por los dispositivos en función de la capacidad del muro al que se conecten.

$$F_{max,SLB} = \frac{(0.75 \cdot 0.83 \cdot \sqrt{f_{ck}}) \cdot (L \cdot t)_{wall}}{1.5 \cdot n_{SLB}} \quad (2.3)$$

Por lo tanto, mediante esta simple expresión podemos escoger el dispositivo que cumpla con las especificaciones del muro directamente de las tablas de especificaciones de los dispositivos.

2.3.2. Modelización con BRB

Para generar un modelo con sistemas de protección como son los BRB, el software ETABS o SAP2000 permite hacerlo de forma muy intuitiva. Los pasos a seguir para generar un modelo con este sistema de protección sísmica son los siguientes.

En primer lugar, se debe definir el material de la sección que plastificará del dispositivo. En ese apartado se definen todas las características elásticas típicas del acero y, además, permite añadir las propiedades no lineales o plásticas. Ahí se asigna el tipo de histéresis del material a la de un BRB con endurecimiento y los parámetros de fuerza-deformación para definir su rotura (fuerza máxima, desplazamiento máximo, desplazamiento elástico, etc.). Una vez acabado se puede ver la curva de fuerza deformación del acero que se ha definido:

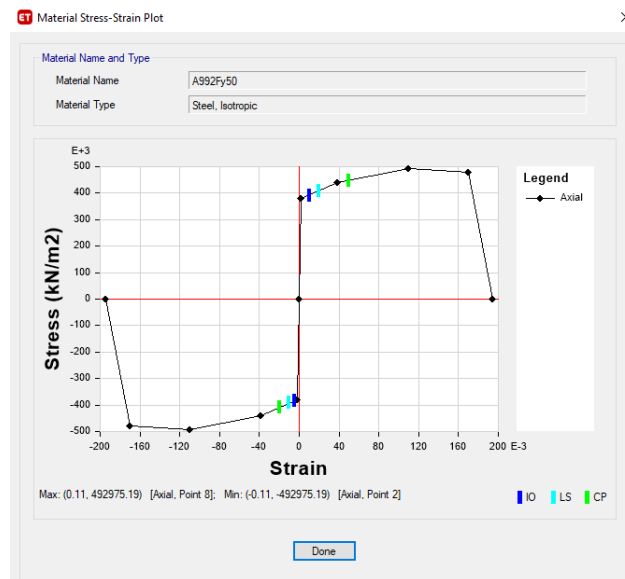


Figura 2.23. Curva fuerza deformación para la definición del BRB

Siendo IO, LS y CP los umbrales de daño (deformación) definidos previamente y según la normativa FEMA 356 se definen como IO inmediata ocupación, LS seguridad para la vida humana (*life safety*), CP prevención de colapso (FEMA 356, 2000)

En segundo lugar, aunque hay varias formas de modelar estos dispositivos, en general, se modelan con elementos tipo frame dado que el software permite insertarles las propiedades de forma muy intuitiva y simplifica mucho el diseño de estos dispositivos. Para ello, una vez definido el material hay que definir la sección BRB. Se escoge dentro del tipo de sección qué es un BRB o Buckling Restrained Brace y se requieren los siguientes campos:

- Propiedades del material que plastifica en el dispositivo
- Peso total del BRB, es decir, incluyendo la interface entre la carcasa y el núcleo
- Longitud de la zona de plastificación y su área
- Dimensiones de la sección de la carcasa
- Longitud de las zonas rígidas elásticas del BRB y su rigidez.

Por último, una vez generada la sección ya se pueden dibujar. Para ello se da el uso la herramienta para dibujar frames pero, además, en esta se puede asignar el tipo de forma que tienen los BRB por ejemplo, disposición en X o V. Una vez ahí es cuando a dichas barras se les asignan rótulas plásticas que simulan la plastificación de la sección y los dispositivos ya están listos para verificarse.

Antes de realizar el autodiseño del programa, en éste se le debe modificar el factor R ya que el uso de dichos dispositivos, tal y como se ha comentado anteriormente, incrementa el valor de

éste, normalmente hasta un R de 7 o 8. Además, también se debe marcar que en la estructura hay BRBs para que el programa los tenga en cuenta para diseñar.

Tal y como se puede ver entre ambas metodologías se puede ver una gran diferencia y es que los BRB aunque sean más nuevos que los disipadores pasivos por corte, son una alternativa muy popular en los Estados Unidos y, por lo tanto, los programas incorporan todo tipo de facilidades para usarlos.

3. Diseño de dispositivo SLB4

3.1. Modelo numérico

3.1.1. Descripción y características

La segunda generación de dispositivos SLB desarrollada con Hurtado presentaban una altura disipativa de 110mm y uniones atornilladas (ver Figura 3.1). Esos dispositivos se ensayaron en ISMES y presentaron curvas de disipación estable pero los dispositivos de 2mm abollaron en el alma. La relación mínima espesor/altura de ventana para esta generación era, por lo tanto, de $\frac{2}{50} = 0.04$. Por otra parte, las uniones atornilladas pretensadas deslizaron originando los saltos en las curvas histeréticas de la Figura 3.2 a) y b) (Hurtado, 2006).

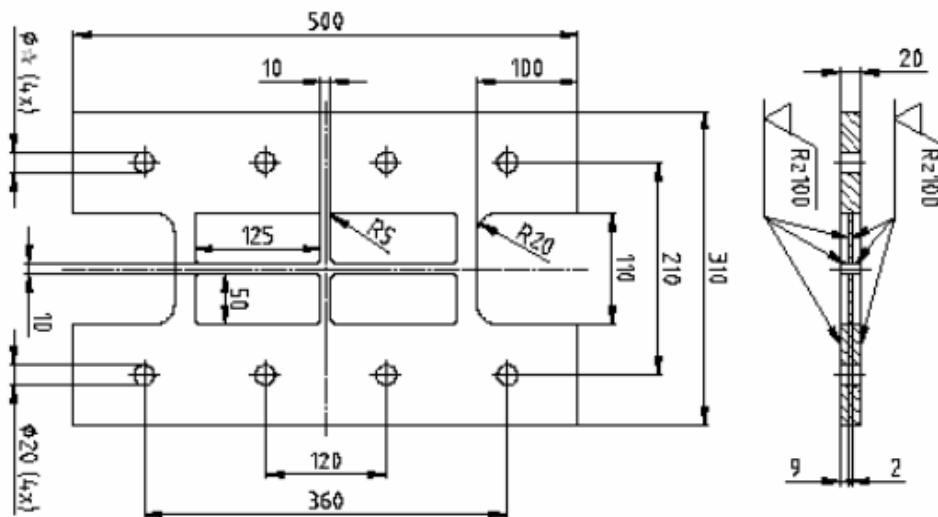


Figura 3.1. Segunda generación de dispositivos SLB (SLB2)

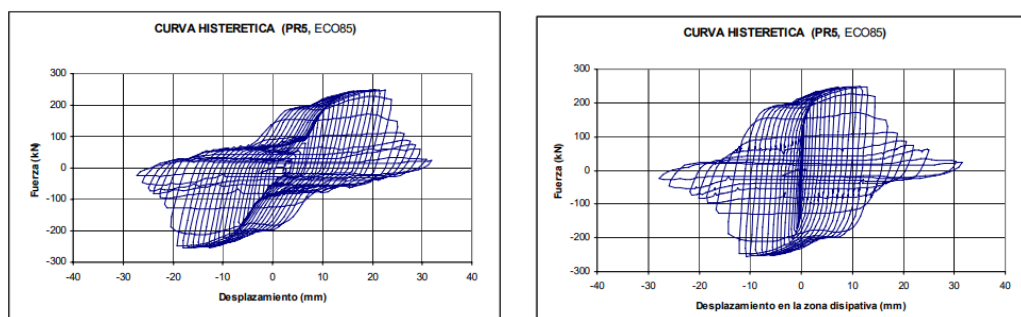


Figura 3.2. a y b. Curvas histeréticas para la segunda generación SLB

Continuando con la segunda generación pero para evitar la abolladura del alma se redujo la altura de las zonas fresadas a 23mm y se procedió a realizar un importante grupo de ensayos en el Laboratorio de la Universidad Federico II en Nápoles. Para esos dispositivos la relación espesor-altura del alma era superior a 0.13. Las uniones eran atornilladas dejando en uno de los extremos agujeros en ojiva para permitir desplazamiento vertical. Es decir, ambos extremos eran atornillados pero uno de ellos era alargado para permitir movimientos verticales. Es importante tener en cuenta que al apretar ambas uniones se transmite carga axial y uno de los objetivos en los dispositivos SLB es que no transmitan carga axial. Por ello se realizó una campaña extensa de ensayos con tornillos apretados en el extremo en ojiva y sin apretar para determinar el efecto en la curva histerética. El resultado fue curvas con fuertes irregularidades similares a las mostradas en la Figura 3.2 originadas por el deslizamiento y fallo por corte/impacto en los tornillos.

La generación actual de los SLB (tercera generación) tiene una altura disipativa de 155mm y uniones almenadas o tipo peine que evitan la transmisión de carga axial (ver Figura 3.3). Esta generación permite llegar hasta unos desplazamientos máximos de 30mm correspondientes a un desplazamiento de entrepiso de 0.01 con una altura tipo de 320cm. Este desplazamiento está directamente relacionado con la capacidad de disipación de energía que tienen los dispositivos y, por lo tanto, a la geometría del dispositivo y, en particular, a la de las ventanas. El cambio significativo entre esta generación y la anterior es el reemplazo de las uniones atornilladas por la conexión Almenada en uno de sus extremos y soldadura a tope en el otro. Si bien en esta solución el reemplazo de un dispositivo no es tan directo y se requiere soldadura en sus extremos, tiene varias ventajas como son: (1) se evita la transferencia de carga axial de una manera más tecnológica y segura (2) se incorpora una holgura vertical que facilita la instalación y movimientos futuros en la conexión (3) el dispositivo es más flexible por lo que se permite alcanzar mayores desplazamientos de entrepiso (4) el dispositivo globalmente es menos alto por lo que requiere menos material para su fabricación aunque el costo de la conexión Almenada es significativo y globalmente el costo aumenta (5) se evita el uso de tornillos y sus potenciales fallos por impacto incluso bajo condiciones cíclicas con cargas frecuentes de viento.

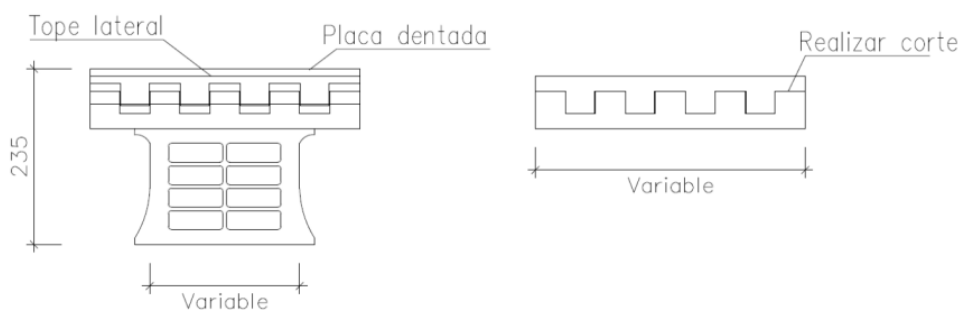


Figura 3.3. Tercera generación de dispositivos SLB (SLB3)

Tal y como se ha comentado anteriormente, el objetivo de esta tesis es crear una nueva generación de dispositivos SLB compatibles con normativas que requieran de un desplazamiento de entrepiso superior a 0.01.

Para aumentar la capacidad de deformación de los dispositivos una primera opción es aumentar su altura lo cual tiene el inconveniente de tener una mayor esbeltez y, en consecuencia, de tener inestabilidades globales. Otra opción es aumentar la altura de las ventanas o, en otras palabras, reducir los rigidizadores horizontales de los dispositivos lo cual también tiene el potencial inconveniente de generar abolladura en el alma para ventanas fresadas delgadas.

La altura de los dispositivos SLB3 es de 155mm por lo que para ampliar la capacidad de deformación sin perjudicar a la estabilidad global se fijó una altura de 270mm y se ampliaron las ventanas de 25 mm a 50mm. Para ello se han sugerido dos alternativas.

Alternativa 1

En los ensayos de ISMES (dispositivo Figura 3.1.) se pudo observar que si el espesor de las zonas fresadas era de 2mm y las alturas de las ventanas eran de 50mm (relación de 0,04), se producían fallos locales por abolladura y a los pocos ciclos se rompía el material. En los ensayos posteriores de Nápoles se vio que con un espesor de 3mm y una altura de 25mm el alma no abollaba y la rotura era por agotamiento del material (relación 0,12). Sin embargo la altura de ventanas reducida rigidiza al dispositivo y aumenta su costo unitario de manufactura pues el fresado debe de repetirse en distintas posiciones. Adicionalmente se producen mayores concentraciones de esfuerzos en las esquinas, observándose fallos en ellas en desplazamientos cíclicos del orden de 30mm. De esta forma, y para el desarrollo de esta tesis, se ha fijado un factor que relaciona la altura de las ventanas con su espesor con el que, si se verifica, se evita la abolladura del alma fresada aumentándose la altura de estas a 50mm. Proponiendo, así, el siguiente dispositivo en el que podemos apreciar unas ventanas mayores a las de la generación antigua dándoles mayor espesor.

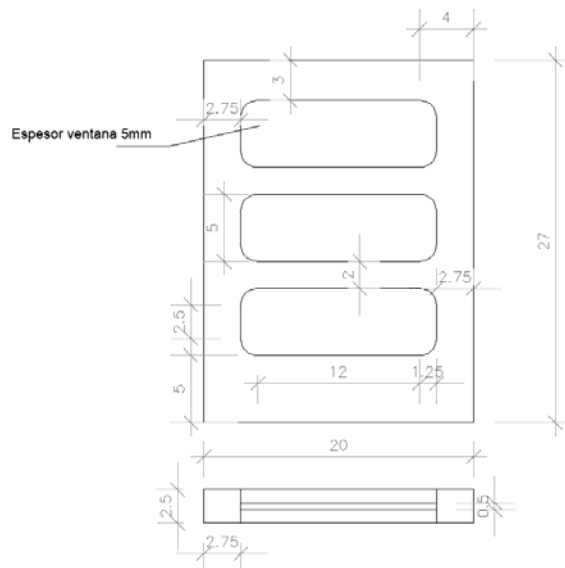


Figura 3.4. Alternativa 1 para la cuarta generación de SLB (SLB4)

Alternativa 2

Manteniendo el mismo criterio que en la alternativa 1, y teniendo en cuenta que la altura global del dispositivo es significativamente mayor a la de las generaciones anteriores, se ha propuesto esta segunda alternativa en la que se sueldan al dispositivo dos alas laterales. Estas alas aumentan considerablemente la capacidad lateral torsional en el dispositivo y evitan que se pueda producir fallo por pandeo en el dispositivo. Además, para comprobar la relación espesor/altura de ventana se ensayará, para esta alternativa, dos tipos de dispositivos uno con 5mm de espesor (relación 0.1) y otro con espesor de 4mm (0.08).

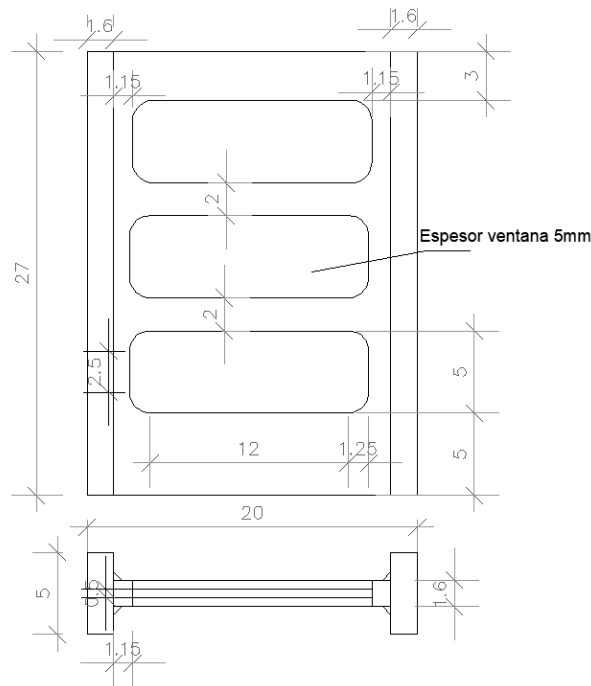


Figura 3.5. Alternativa 2 para la cuarta generación de SLB (SLB4)

3.1.2. Modelo numérico

Para simular el comportamiento de los dispositivos en los ensayos se han modelado ambas alternativas con el software de elementos finitos Diana FEA. El proceso para obtener dichos resultados es muy parecido al que se sigue en otros programas de elementos finitos y consta de las siguientes fases: 1) Geometría del elemento 2) Definición del material 3) Condiciones de contorno (apoyos y cargas) 4) Discretización del modelo (mallado) 5) Tipo de análisis (Diana User's Manual, 2020). Tal y como se ha comentado anteriormente, posterior al ensayo se realizará un análisis paramétrico para ajustar los valores empíricos con los modelos y, así, poder obtener los parámetros con que modelar los dispositivos de distintos tamaños sin necesitar ensayarlos.

Geometría del dispositivo

La geometría de ambas alternativas se ha introducido al software mediante el uso de elementos sólidos. Estos elementos pueden considerarse los más generales porque tanto las propiedades del material, la forma o las condiciones de contorno son totalmente arbitrarias. Es decir no es necesaria una simplificación en la distribución de esfuerzos o en las propiedades

de la sección tal y como se da en los elementos shell. La Figura 3.6 muestra la Alternativa 1 una vez modelada la geometría.

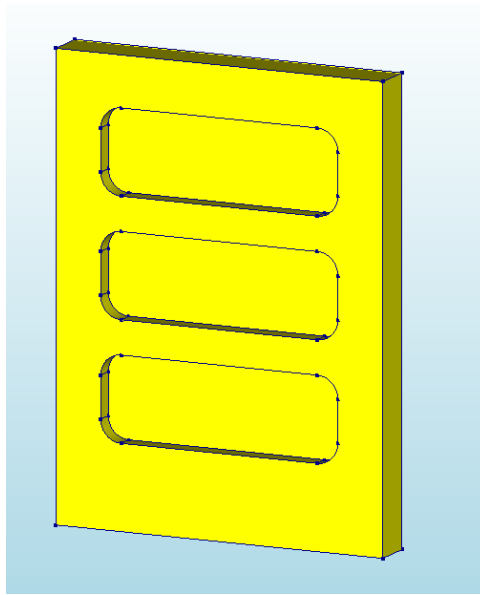


Figura 3.6. Geometría Alternativa 1 modelada en Diana

Definición del material

Dado que los ensayos se darán a rotura, en la definición del material hay que definir dos partes. Primero, las propiedades lineales del acero; segundo las no-lineales o, en otras palabras, a qué modelo de plasticidad se adaptará.

Las propiedades lineales del acero usado en el ensayo son las siguientes:

Tabla 3-1. Propiedades lineales del acero

Propiedades	Valor	Unidades
Módulo de elasticidad	200000	N/mm ²
Ratio de Poisson	0.3	-
Densidad	7.85e-9	T/mm ³

El modelo no lineal que se ha usado para el acero es un modelo de plasticidad de Von Mises en el que se permite introducir la relación de endurecimiento (en términos de deformación y tensión reales). Con respecto a la carga cíclica, el modelo de Von Mises es un modelo de plasticidad básicamente destinado a definir una condición de rendimiento para el material y no contiene efectos dinámicos / cíclicos. Sin embargo, cuando el modelo de Von Mises se usa junto con el endurecimiento cinemático, se puede capturar un nivel de efectos cíclicos / dinámicos.

Por lo tanto, si se trata de un modelo con elementos 3D, se puede utilizar el modelo de plasticidad de Von Mises con endurecimiento isotrópico o cinemático que son modelos simples para analizar el comportamiento cíclico (Figura 3.7). Para el endurecimiento cinemático se define como una curva multilineal entre la deformación total y el ratio de rigidez (rigidez actual entre rigidez inicial o módulo de elasticidad). Para el endurecimiento isotrópico solamente se define la tensión deformación real del material en base al ensayo de platina. Por otra parte, usando el endurecimiento cinemático se puede especificar un parámetro para controlar la contribución de los efectos de endurecimiento isotrópico y / o cinemático. Este parámetro está comprendido entre 0 y 1 siendo 0 un modelo que únicamente tiene en cuenta los efectos cinemáticos y 1 sólo tomando los efectos isotrópicos.

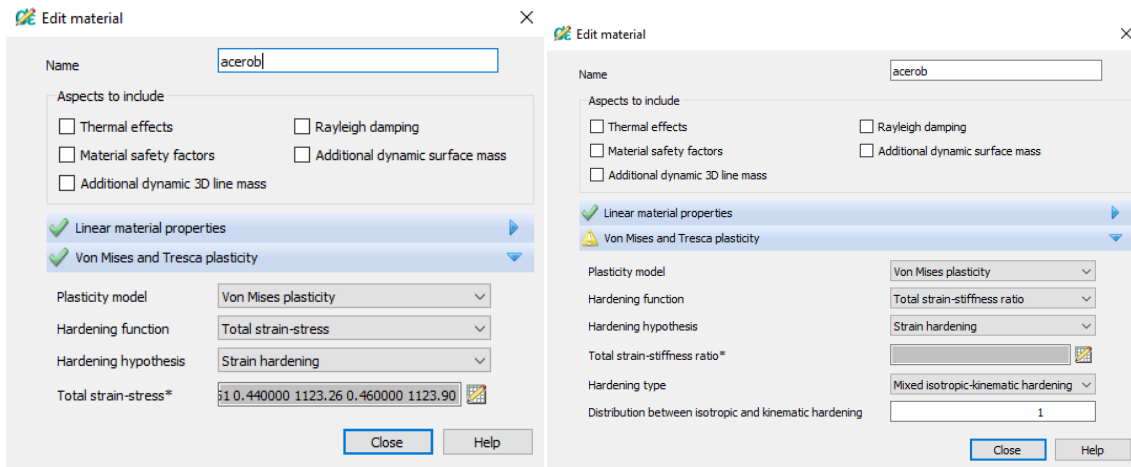


Figura 3.7. Modelo de plasticidad Von Mises. A) Tensión vs deformación (izquierda) B) Deformación total vs ratio rigidez

La tensión convencional o ingenieril corresponde a la fuerza aplicada dividida por el área inicial (A_0) (ecuación 3.1) y la deformación convencional se define como el incremento de longitud respecto la longitud inicial normalizada (L_0) (ecuación 3.2)

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad (3.1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (3.2)$$

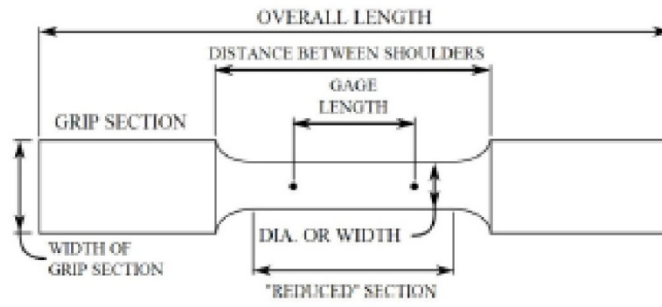


Figura 3.8. Ensayo de platina normalizado a tracción

Durante el ensayo a tracción la sección transversal no es constante y de este fenómeno de estricción surge la ecuación 3.3. en la que se define la tensión real que, a diferencia de la tensión ingenieril, depende del área. De forma similar la deformación real también varía a lo largo del espécimen ensayado siendo la más importante en el cuello de estricción. La ecuación 3.4 relaciona ambas deformaciones, ingenieril y real para el promedio de la deformación en la longitud de la probeta.

$$\sigma_r = \frac{F}{A} \quad (3.3)$$

$$\epsilon_r = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) = \ln(1 + \epsilon) \quad (3.4)$$

El procedimiento clásico para obtener la relación entre la tensión ingenieril y la real corresponde a Nadai. Este proceso parte de la hipótesis que al ser deformaciones muy pequeñas durante el flujo de deformaciones el volumen no varía y que la deformación de la probeta es recta (simplemente se alarga, no hay cuello de estricción). De esta forma, los volúmenes inicial y final se correlacionan en la ecuación 3.5.

$$AL = A_0L_0 \quad (3.5)$$

Si en la ecuación 3.2 consideramos la longitud final de la probeta como medida de la deformación real podemos obtener la formulación de Nadai de la siguiente forma:

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (3.6)$$

$$\frac{L}{L_0} = \frac{1}{(1 - \epsilon)} \quad (3.7)$$

$$A = A_0(1 - \epsilon) \quad (3.8)$$

$$\sigma_r = \frac{F}{A_0(1 - \epsilon)} = \frac{\sigma}{(1 - \epsilon)} \quad (3.9)$$

Alternativo a Nadai surge un planteamiento propuesto por Bozzo en el que se tiene en cuenta la estricción del espécimen y se supone que varía siguiendo una ecuación parabólica. La siguiente imagen muestra la hipótesis de Bozzo (Cocozza, 2016).

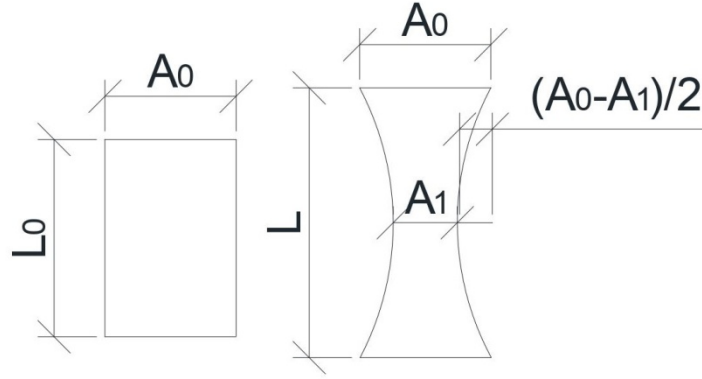


Figura 3.9. Hipótesis de deformación según Bozzo

Manteniendo la primera hipótesis de Nadai, en la que el volumen se mantiene, podemos operar con la variación que muestra la imagen superior y encontrar la formulación de Bozzo de la siguiente forma:

$$L_0 A_0 = L_0 A_0 - \frac{2}{3} L (A_0 - A) \quad (3.10)$$

$$\frac{A}{A_0} = 1 - \frac{3}{2} \epsilon \quad (3.11)$$

$$\sigma_r = \frac{\sigma}{1 - \frac{3}{2} \epsilon} \quad (3.12)$$

Se debe tener en cuenta que ambas expresiones (3.9 y 3.12) son aproximaciones de la ley de tensión vs deformación real y, para obtener el valor exacto de esta se deberían usar galgas extensométricas o realizar una fotogrametría durante el ensayo (DIC). Dado que en el ensayo de platina que se realizó para el acero de los dispositivos que se ensayará no nos facilitaron las curvas reales, para el desarrollo de esta tesis se considerarán ambas aproximaciones y se compararán en la correlación de resultados obtenidos en el ensayo.

Los resultados de los ensayos de platina se encuentran en el Anexo 1. Cabe destacar que los ensayos de platina habituales no tienen mucha precisión en medir el alargamiento lo cual resulta en errores en el módulo de elasticidad o la curva en general. Es decir, se obtiene con precisión la fuerza de fluencia pero de forma aproximada la deformación de fluencia.

Condiciones de contorno

Tal y como se ha comentado anteriormente la tercera generación de los SLB incorpora una conexión almenada que evita la transmisión de esfuerzo axial de los disipadores. De esta manera, al mantener dicha conexión en la cuarta generación, para modelar los dispositivos se supondrá que estarán empotrados en la base, restringiendo todos los movimientos y rotaciones y, en el otro extremo del dispositivo únicamente se impedirá el desplazamiento en el eje perpendicular al plano del dispositivo. De esta forma se permitirá el desplazamiento y la rotación en el plano del dispositivo.

Para la aplicación de las cargas se impondrá un desplazamiento unitario de 1mm en la cara superior del dispositivo que, una vez se definan los casos de análisis se podrá extrapolar a los ciclos de carga que se realicen durante el ensayo.

Discretización del modelo

La malla de un modelo de elementos finitos es muy importante ya que es clave en la obtención de buenos resultados. Los elementos finitos basados en energía potencial (como es el caso habitual) no presentan soluciones exactas en cuanto al equilibrio aunque si en las ecuaciones de compatibilidad (Bozzo & Bozzo, 2003). Dada la importancia del equilibrio, y para minimizar este error, es importante como mínimo realizar un estudio con distintos tamaños de malla hasta que el gradiente de error tienda a nulo. Cabe destacar que, si la malla es muy densa, aunque pueda lograr una gran precisión de resultados implicara un tiempo y coste computacional muy altos. Para los modelos de esta tesis se han estudiado distintas mallas y se ha llegado a la conclusión de que a partir de 5-8mm de tamaño de elemento los resultados son muy parecidos.

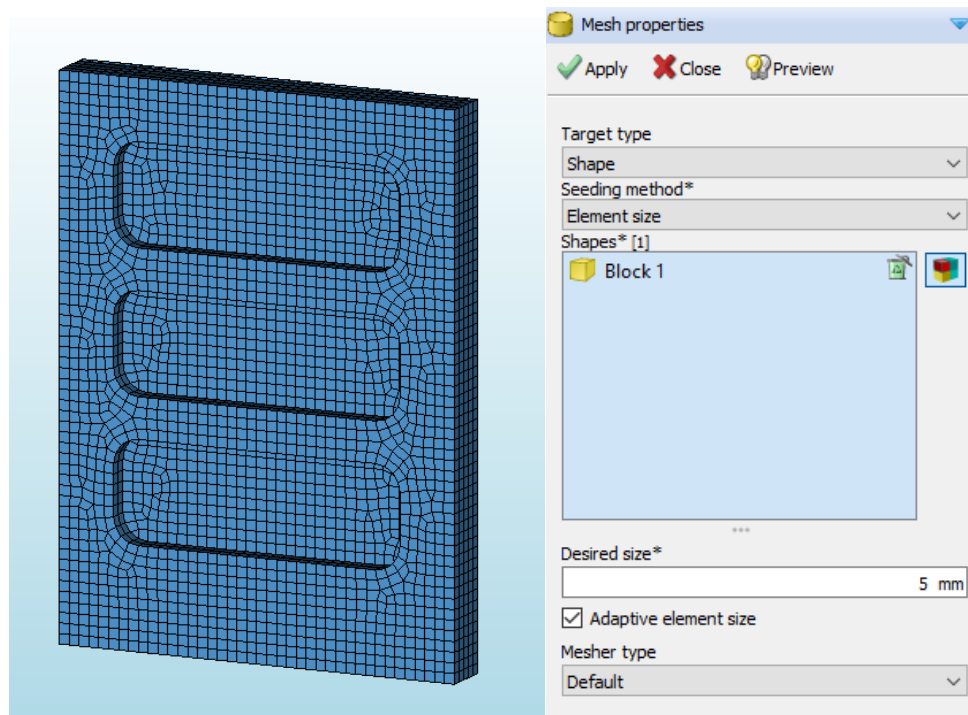


Figura 3.10. A) Mallado del modelo (Izquierda) B) Tipo de malla (derecha)

Análisis

Se han realizado dos análisis no lineales en cada modelo. El primero para obtener las curvas de tensión deformación a rotura de los dispositivos y, el segundo, un análisis no lineal de autovalores para obtener el desplazamiento en que se empieza a producir el pandeo lateral de los dispositivos.

Para definir ambos análisis el software Diana presenta el siguiente menú en el que se pueden definir los efectos no lineales que se quieren tener en cuenta, los ciclos de carga, las características de los métodos numéricos utilizados y los resultados que queremos obtener.

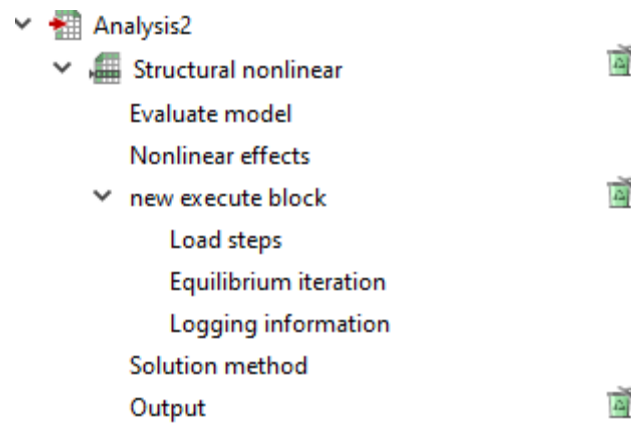


Figura 3.11. Desplegable para definir el tipo de análisis en Diana

En ambos análisis se ha introducido el protocolo de carga que se ha seguido en los ensayos pero se ha discretizado en pasos de 0.8mm que es aproximadamente el desplazamiento de fluencia de los dispositivos. En el análisis de la tensión deformación se han tenido en cuenta los efectos físicos no lineales y se ha usado el modelo numérico Secante (Quasi-Newton) y, en cambio, en el análisis del pandeo lateral se han tenido en cuenta los efectos geométricos no lineales y el modelo numérico de Newton-Raphson únicamente teniendo en cuenta la convergencia por energía. Ambos modelos numéricos pueden servir para modelar los dos análisis pero cada uno es el que se recomienda en el manual del software en cada caso (Diana Manual, 2020)

3.2. Ensayo

3.2.1. Descripción espécimen

Los ensayos realizados en la siguiente tesis tienen como objetivo verificar la capacidad plástica de los nuevos dispositivos SLB4 y obtener un modelo matemático que pueda predecir numéricamente los resultados experimentales. Así, generar numéricamente las características mecánicas de los disipadores para todos los tamaños de estos y, de esta manera, obtener los dispositivos SLB4 que verifiquen las regulaciones de la AISC para los BRB.

Habitualmente el comportamiento histerético de dispositivos de disipación de energía o aislamiento de base se estudia mediante máquinas especialmente diseñadas a las que se les atornilla estos dispositivos de forma aislada. Estas máquinas aunque sean muy avanzadas tecnológicamente y tengan gran versatilidad presentan limitaciones importantes en cuanto a la aplicación de fuerzas que no corresponden a la situación real de un disipador en una estructura. Por ejemplo, las máquinas utilizadas para el ensayo de ISMES (Hurtado, 2006) requerían que ambos extremos se mantuviesen planos a lo largo del ensayo lo que implica necesariamente grandes esfuerzos axiales a lo largo del dispositivo. En una estructura real las superficies no permanecen planas y, por lo tanto, estos axiles distorsionan los resultados.

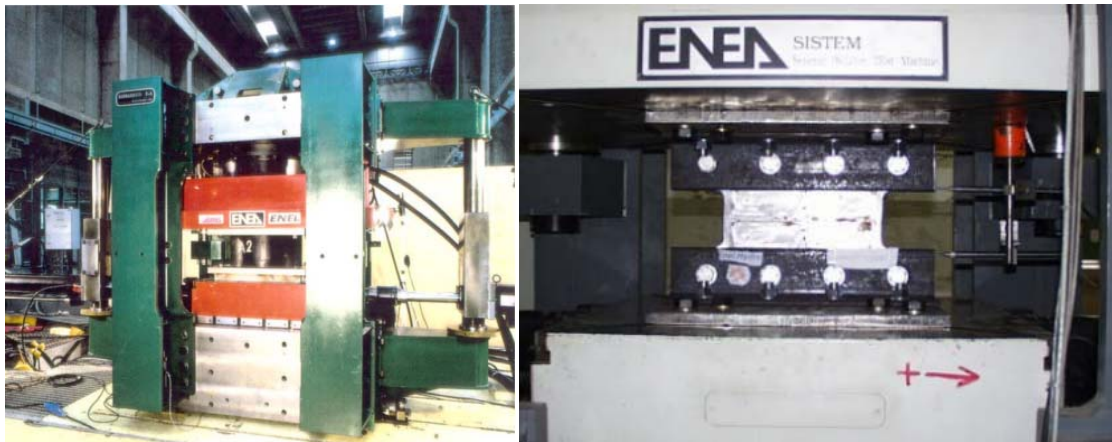


Figura 3.12. Máquina para ensayar dispositivos sísmicos bajo cargas cíclicas horizontales

Una contribución de esta tesis es proponer, en colaboración con el laboratorio LADICIM de la Universidad de Cantabria, un esquema de ensayo que por primera vez se utiliza. Este esquema consiste en estudiar el disipador anclado a un muro de hormigón tal cual se daría en la realidad. Este ensamblaje muro-disipador se someterá a cargas cíclicas en el extremo libre del dispositivo. El muro se ancla a una losa de carga mediante barras externas pretensadas tal y como se muestra en la siguiente imagen. De esta forma cada modelo corresponde a un muro con un disipador anclado a éste.



Figura 3.13. Disposición del ensayo

El laboratorio LADICIM dispone de una prensa hidráulica que puede ejercer carga cíclica hasta un máximo de 500kN. Dicha máquina se muestra en la siguiente imagen. Otra de las limitaciones que imponía la prensa es que no sujetaba lateralmente el extremo del dispositivo en donde la carga se aplicaba. Este último aspecto es muy relevante en dispositivos sometidos a grandes deformaciones plásticas donde se presentan inestabilidades globales, algunas reales y otras inducidas por el ensayo propuesto. En la realidad los dispositivos están sujetos lateralmente en sus extremos por lo que la inestabilidad debe producirse a lo largo de ellos pero no como un extremo libre. Por eso es importante sujetar perpendicularmente con un mecanismo adicional los dispositivos.



Figura 3.14. Viga de madera usada para restringir la rotación del dispositivo durante el ensayo

Se decidió fabricar cuatro modelos para ensayar. Los dispositivos y sus anclajes se fabricaron en Perú por la empresa POSTENSA y fueron exportados a Cantabria en avión. Tanto la ferralla

Los muros que se han ensayado tienen la misma geometría en todos los ensayos pero no el mismo armado ya que, tal y como se ha comentado anteriormente, en el cuarto ensayo se buscaba el fallo en los anclajes y, por lo tanto, el armado debía ser menor. La Figura 3.16 muestra un esquema global del ensayo en el que se puede apreciar la geometría de los elementos.



The technical drawing illustrates the reinforcement design for a rectangular reinforced concrete slab. The main view shows the top of the slab with overall dimensions of 1000 mm by 450 mm. The width is divided into five equal sections of 150 mm each. Vertical reinforcement consists of 6 bars (d16mm c/15) spaced at 150 mm, which are bent up at 90 degrees near the supports. Horizontal reinforcement consists of 6 bars (d12mm c/15) spaced at 150 mm. A side view shows the slab thickness of 120 mm and the vertical position of the reinforcement. A detail view of the corner shows the intersection of the bent-up bars and the horizontal bars, with a note indicating d12mm bars (1 per face) as solidable corrugated bars.

d16mm c/15 (1 en cada cara)
terminar con gancho a 90°
Barras corrugadas soldables
Fy4200

1000

450

360

60

120

150

150

150

150

150

1200

360

d12mm (1 en cada cara)
Barras corrugadas soldables

200

d12mm c/15 (1 en cada cara)
Barras corrugadas soldables
Fy4200

Figura 3.16. Detalle del refuerzo del muro y del anclaje del dissipador

Los materiales que se han considerado en el ensayo son los siguientes:

Tabla 3-2. Características del hormigón

Hormigón	
Peso específico	24kN/m ³
Resistencia Característica	HA35
Aditivos	XXXXX

Tabla 3-3. Nomenclatura del acero

Acero de refuerzo	
Corrugado	B 400 S*
Laminado	ASTM A36

*En la práctica se ejecutaron los armados con B500S ya que el laboratorio no disponía del B400S.

3.2.2. Normativa Buckling Restrained Braces (AISC)

Tal y como se ha comentado anteriormente el objetivo de esta tesis es diseñar un dispositivo de disipación por corte tipo SLB que sea capaz de verificar las regulaciones de los brazos de pandeo restringido o “Buckling Restrained Braces; BRB”. Para ello, la normativa americana AISC (American Institute of Steel Construction) impone los siguientes requisitos.

En primer lugar, los dispositivos deberán proporcionar una capacidad de deformación significativa a través de la fluencia del disipador en tensión y en compresión. Estas deformaciones deberán corresponder al máximo entre dos veces el desplazamiento de entrepiso (drift) de diseño o, como mínimo con un drift del 2% (AISC, 2016)

En segundo lugar, dado que estos dispositivos serán sometidos a cargas cíclicas, no sólo deberán cumplir la especificación anterior sino que la deberán verificar en un ensayo cíclico. La secuencia de carga de dicho ensayo requiere que cada dispositivo alcance ductilidades correspondientes a dos veces el drift de diseño y una capacidad de ductilidad axial plástica acumulada de 200 veces el desplazamiento de fluencia. Ambos requisitos están basados en un estudio en el que se realizó análisis dinámicos no lineales en edificios para investigar su respuesta. El requisito de capacidad de ductilidad representa una media de los valores de respuesta (Sabelli et al, 2003). Cabe destacar que el requerimiento de ductilidad acumulativa es mayor a lo esperado para un dispositivo de protección sísmica pero en los ensayos de los BRB se ha cumplido fácilmente. Aún así, dado que estos sistemas son relativamente nuevos, con mayor investigación y ensayos se espera que estos requerimientos puedan cambiar (AISC, 2016).

De esta manera la secuencia de carga que se deberá aplicar en los BRB y, en este caso los SLB4, para que cumplan con la normativa AISC será la que les haga verificar las siguientes deformaciones:

- 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a $\Delta_b = \Delta_{by}$
- 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a $\Delta_b = 0.5\Delta_{bm}$
- 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a $\Delta_b = 1.0\Delta_{bm}$
- 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a $\Delta_b = 1.5\Delta_{bm}$
- 2 ciclos de carga a la deformación correspondiente a $\Delta_b = 2.0\Delta_{bm}$
- Ciclos completos adicionales de carga en la deformación correspondiente a $\Delta_b = 1.5\Delta_{bm}$ según se requiera para que la muestra logre las deformaciones axiales inelásticas acumuladas de al menos 200 veces la deformación elástica (no requerido para la muestra de ensayo de subconjunto)

Siendo,

Δ_{bm} = valor de la cantidad de deformación, Δ_b , al menos igual al correspondiente al drift de diseño en milímetros.

Δ_{by} = valor de la cantidad de deformación, Δ_b , para la primera plastificación del espécimen ensayado en milímetros.

El drift de diseño debe tomarse de al menos 0.01 veces la altura de entrepiso para calcular Δ_{bm} . Además, otros protocolos de carga podrán ser permitidos para verificar los dispositivos siempre que se demuestre que son de igual o mayor severidad en términos de deformación inelástica máxima y acumulativa.

La Tabla 3-4 obtenida de la AISC muestra una secuencia de ensayo tipo para los BRB verificando tanto la deformación en cada fase como la deformación acumulada (AISC, 2016).

Tabla 3-4. Protocolo de carga para BRBs propuesto por la AISC

TABLE C-K3.1 Example Brace Testing Protocol			
Cycle	Deformation	Inelastic Deformation	Cumulative Inelastic Deformation
2 @ Δ_{by}		$= 2 \cdot 4 \cdot (\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 0\Delta_{by}$	$0\Delta_{by} = 0\Delta_{by}$
2 @ $\frac{1}{2}\Delta_{bm}$	$= 4 @ 2.0\Delta_{by}$	$= 2 \cdot 4 \cdot (2.0\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 8\Delta_{by}$	$0\Delta_{by} + 8\Delta_{by} = 8\Delta_{by}$
2 @ Δ_{bm}	$= 4 @ 4.0\Delta_{by}$	$= 2 \cdot 4 \cdot (4.0\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 24\Delta_{by}$	$8\Delta_{by} + 24\Delta_{by} = 32\Delta_{by}$
2 @ $1\frac{1}{2}\Delta_{bm}$	$= 2 @ 6.0\Delta_{by}$	$= 2 \cdot 4 \cdot (6.0\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 40\Delta_{by}$	$32\Delta_{by} + 40\Delta_{by} = 72\Delta_{by}$
2 @ $2\Delta_{bm}$	$= 2 @ 8.0\Delta_{by}$	$= 2 \cdot 4 \cdot (8.0\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 56\Delta_{by}$	$72\Delta_{by} + 56\Delta_{by} = 128\Delta_{by}$
4 @ $1\frac{1}{2}\Delta_{bm}$	$= 2 @ 6.0\Delta_{by}$	$= 4 \cdot 4 \cdot (6.0\Delta_{by} - \Delta_{by}) = 80\Delta_{by}$	$128\Delta_{by} + 80\Delta_{by} = 208\Delta_{by}$
Cumulative inelastic deformation at end of protocol = $208\Delta_{by}$			

Para los ensayos que se realizarán en los dispositivos SLB se han escogido dos criterios de carga. Uno que es el que sigue estrictamente los criterios comentados anteriormente dictados por la AISC y, otro en el que se modifica esta secuencia añadiendo cinco ciclos más de carga pero con menores deformaciones.

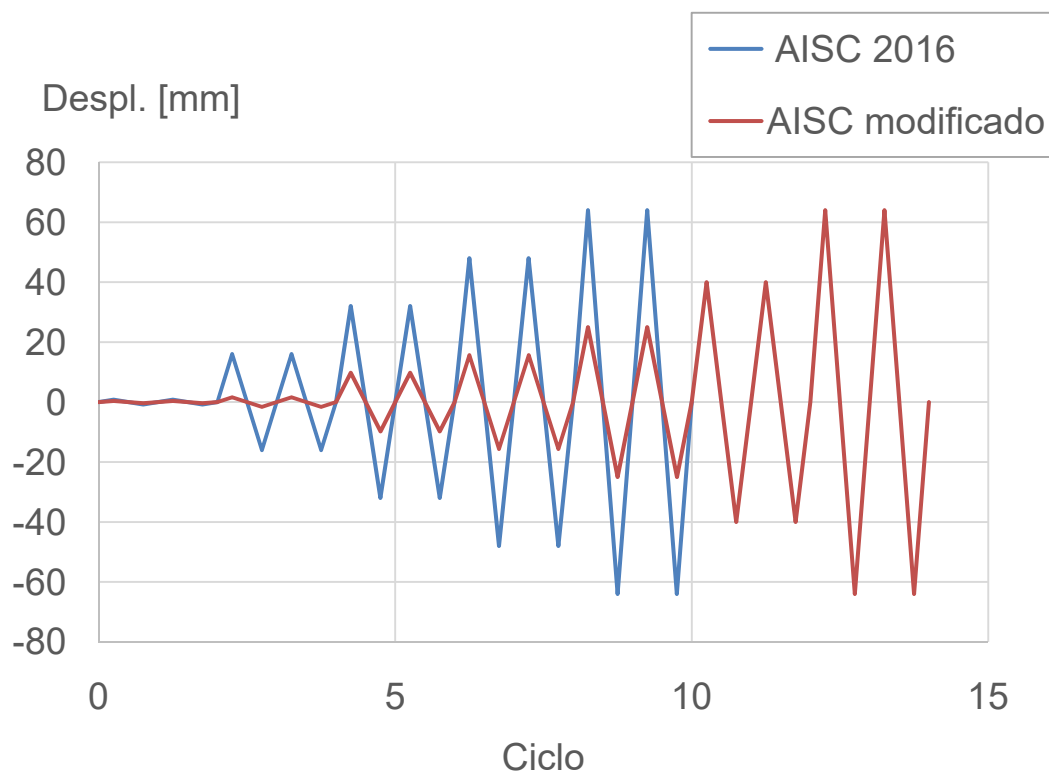


Figura 3.17. Ciclos de carga usados en el ensayo

Al comparar ambos protocolos, primero podemos ver que aunque desplazado a la derecha, en el protocolo de carga tipo AISC modificado, las deformaciones máximas en los últimos 8 ciclos son muy parecidas a las de la AISC. Ambas secuencias de carga se diferencian en que el protocolo de la AISC modificado presenta cuatro ciclos de pequeña deformación en vez de dos y, además, presenta 2 ciclos adicionales para llegar hasta las deformaciones máximas. De esta manera, aunque con ciclos intermedios de menor deformación, la deformación acumulada se sigue verificando y la deformación máxima también.

Inicialmente se planteó que uno de los cuatro ensayos fuese monotónico, sin embargo, se llegó a la conclusión que era de mayor importancia comparar el comportamiento de los dispositivos frente a dos ciclos de carga relativos a la norma de los BRB para ver cómo afectan las deformaciones máximas por ciclo y las deformaciones acumuladas.

3.2.3. Modelos ensayados

Se han realizado cuatro ensayos en esta tesis, dos de ellos para la Alternativa 1 y otro para la Alternativa 2 y un cuarto ensayo para estudiar la abolladura y los anclajes. A estos dispositivos se les ha aplicado el protocolo de carga de los BRB según la AISC para obtener su comportamiento de la siguiente manera:

- Ensayo 1: Dispositivo SLB4 20_5 sin alas, *Alternativa 1*, sometido a protocolo de carga AISC 2016.
- Ensayo 2: Dispositivo SLB4 20_5 sin alas, *Alternativa 1*, sometido a protocolo de carga AISC 2016 modificado.

- Ensayo 3: Dispositivo SLB4 20_5 con alas soldadas en ambos extremos, *Alternativa 2*, sometido a protocolo de carga AISC 2016.
- Ensayo 4: Dispositivo SLB4 20_4 con alas soldadas en ambos extremos sometido a protocolo de carga AISC 2016.

De esta forma los ensayos 1 y 3 servirán para comprobar la eficacia de los SLB4 frente a los requerimientos impuestos por la normativa Americana en los BRB para ambas alternativas que se han sugerido de SLB4. Y el ensayo 2, en el que se mantienen las deformaciones acumuladas del protocolo AISC pero con menores deformaciones por ciclo, verificará si esta modificación en el protocolo afecta en el comportamiento de los dispositivos.

El ensayo 4 tiene dos objetivos. En primer lugar estudiar los anclajes diseñados según el ACI-19 que no se tratará en esta tesis y, en segundo lugar, comprobar el espesor mínimo que deben llevar los nuevos dispositivos SLB4 para evitar la abolladura. De esta forma se podrá comprobar la diferencia entre el ratio 5/50 (espesor/altura ventana) para los ensayos 1,2 y 3 con el ratio 4/50 para el ensayo 4.

3.2.4. Digital Image Correlation (DIC)

La Correlación de Imágenes Digitales o DIC es una técnica óptica muy novedosa que permite comparar múltiples imágenes de la superficie de una muestra ensayada y obtener deformaciones, vibraciones y tensiones en casi cualquier material. Esta técnica se puede utilizar en una gran variedad de ensayos incluyendo tracción, torsión, flexión y carga combinada para aplicaciones estáticas y dinámicas. Mediante estas imágenes la técnica DIC permite obtener resultados sin requerir contacto físico con la muestra, obtener datos de toda la muestra (como tener miles de extensómetros diminutos en ella) y, además, no necesita saber dónde colocar los extensómetros antes de que comience el ensayo. Además, cabe destacar que en muchas ocasiones los ensayos son a rotura y, por lo tanto, con esta técnica se ahorra el desperdicio de extensómetros. La Figura 3.18 muestra el funcionamiento de esta técnica:

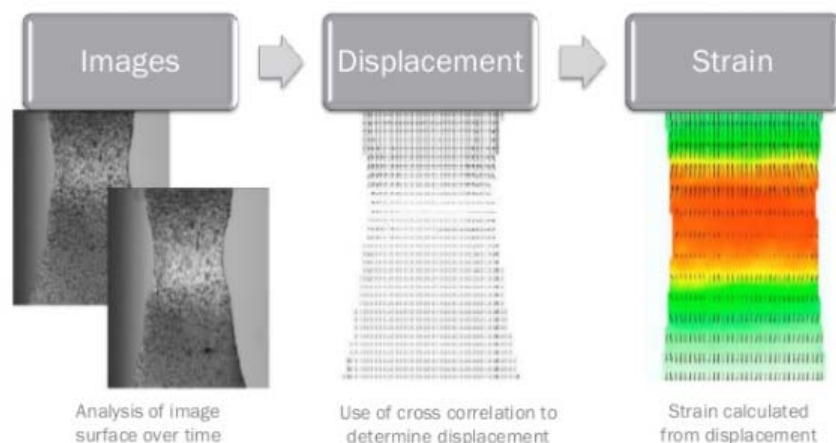


Figura 3.18. Flujo de trabajo para obtener tensiones mediante DIC

Para llevar a cabo esta técnica primero hay que preparar la muestra. Para ello, las imágenes deben tener un color base homogéneo, tanto en la muestra como detrás de esta aunque no tienen que ser del mismo color. Además, una vez pintada la muestra de un color homogéneo después se le deberá pintar una capa de puntos tal y como se ve en la imagen anterior. Esto se debe a que el software que se utilizará en el post proceso generará un mallado a partir de estos puntos, y por lo tanto la preparación de la muestra será muy importante para que se puedan obtener correctamente los resultados. En los ensayos que se han realizado en esta tesis se pintó la muestra de blanco y posteriormente se le hizo el mallado de puntos tal y como muestra la Figura 3.19.



Figura 3.19. Dispositivo con mallado de puntos

Una vez se ha realizado el mallado en la muestra ya se podrá ensayar. Cabe destacar que el formato de las imágenes tomadas durante el ensayo debe de ser RAW o, lo que es lo mismo, sin procesar. Cuando se toma una imagen en el formato habitual JPG la cámara graba la imagen en la tarjeta de memoria en cambio, al disparar la imagen en formato RAW se conserva la escena completa en la tarjeta de memoria y, posteriormente se podrá tomar la foto en el ordenador. De esta forma las imágenes en formato RAW no únicamente graban los datos de la imagen sino que también incluyen todos los posibles valores de ésta, dejándola abierta a cualquier cambio posterior. En otras palabras, las imágenes RAW son una especie de negativo de la fotografía en las que se capta toda la calidad e información posible sin ser comprimida. Para la obtención de las imágenes RAW en el ensayo se usó un teléfono móvil ya que hoy en día muchos smartphones permiten obtener este formato.



Figura 3.20. Disposición de la cámara para captar imágenes RAW durante el ensayo

Hay muchos software que permiten el post proceso del DIC, para obtener los resultados en esta tesis se ha usado MATLAB y, en particular, la librería NCORR. NCORR es una librería de código abierto de MATLAB que contiene herramientas de trazado para la creación de figuras y permite a los usuarios la obtención de resultados DIC de forma muy flexible y a la vez fácil de usar (Bryan Riggs, 2017). El procedimiento para usar este código es el siguiente:

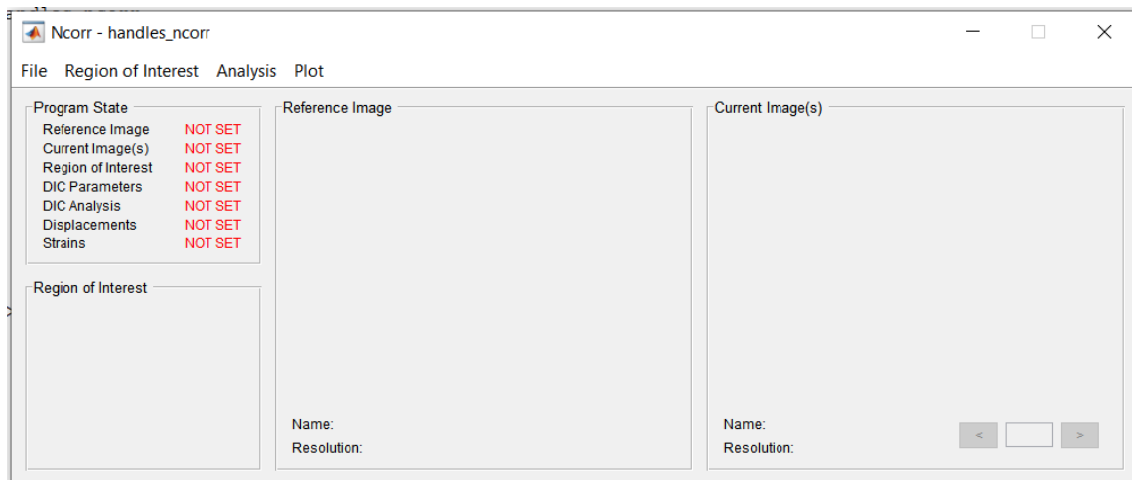


Figura 3.21. Menú NCORR para obtener deformaciones

1. Set Reference Image: Marcar la imagen de referencia de la muestra es decir la primera imagen que se le toma a la muestra antes de ser ensayada y sin ningún tipo de deformación.
2. Set CurrentImage(s): Seleccionar todas las imágenes que se quieren evaluar ordenándolas de la siguiente forma:

“name_#.ext”

Siendo name el nombre de la imagen, # el número asociado a esa imagen y ext la extensión de la imagen (.tif, .png...)

3. Set Region of Interest(ROI): Dibujar la superficie de la que queremos obtener resultados, en este caso la superficie del dispositivo SLB4, en la imagen de referencia.

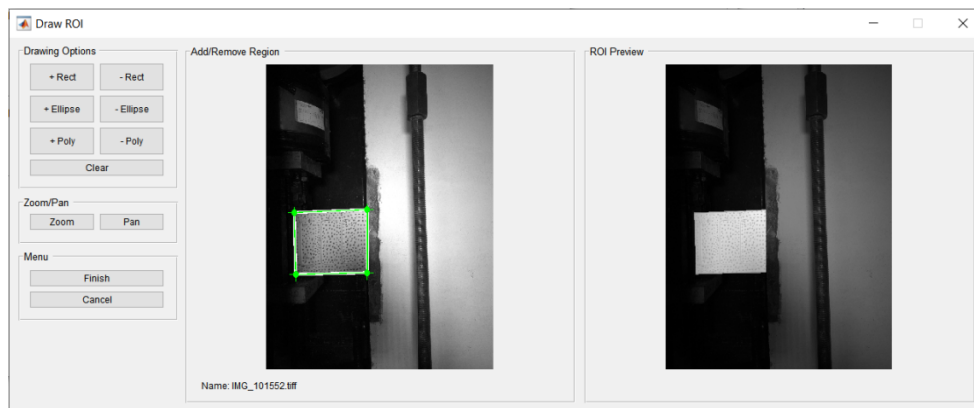


Figura 3.22. Definición del dispositivo dentro de la imagen

4. Set DIC Parameters: En este apartado se discretizan las imágenes en subconjuntos, por lo general, aunque permita al usuario variar el tamaño, es recomendable el uso del menor tamaño posible de estos para mayor precisión en los resultados.
5. DIC Analysis
 - a. Select Region: Seleccionar las zonas continuas que se van a procesar. En este caso el disipador presenta una única zona y sólo hay que marcar un punto dentro de la superficie del ROI pero podría darse el caso de que hubiesen más.
 - b. Seed definition: Las “seeds” o semillas son una forma de dividir la imagen ROI para poder optimizar el cálculo ya que permiten el análisis en paralelo de estas. Es por eso que deben colocarse de tal manera que tengan un tamaño equivalente entre ellas.

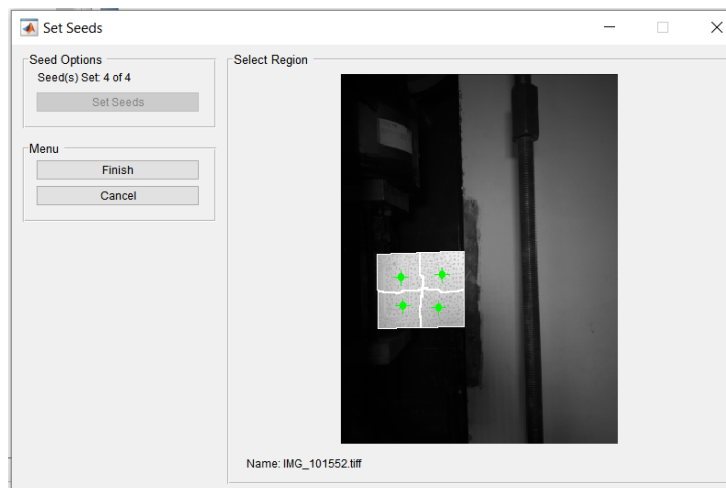


Figura 3.23. División del dispositivo en “seeds” (semillas)

6. Formatdisplacements: Definir la relación entre los píxeles de la imagen con las unidades reales de la muestra.

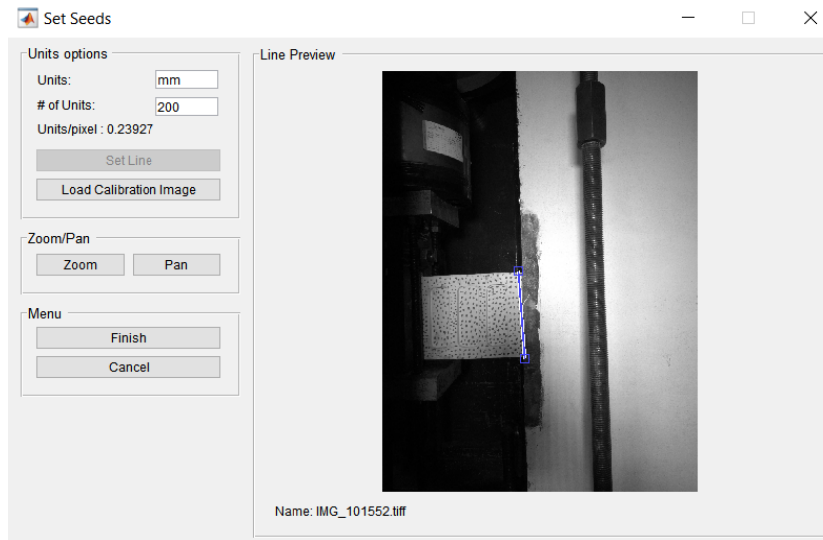


Figura 3.24. Definición del ratio píxeles-longitud(mm)

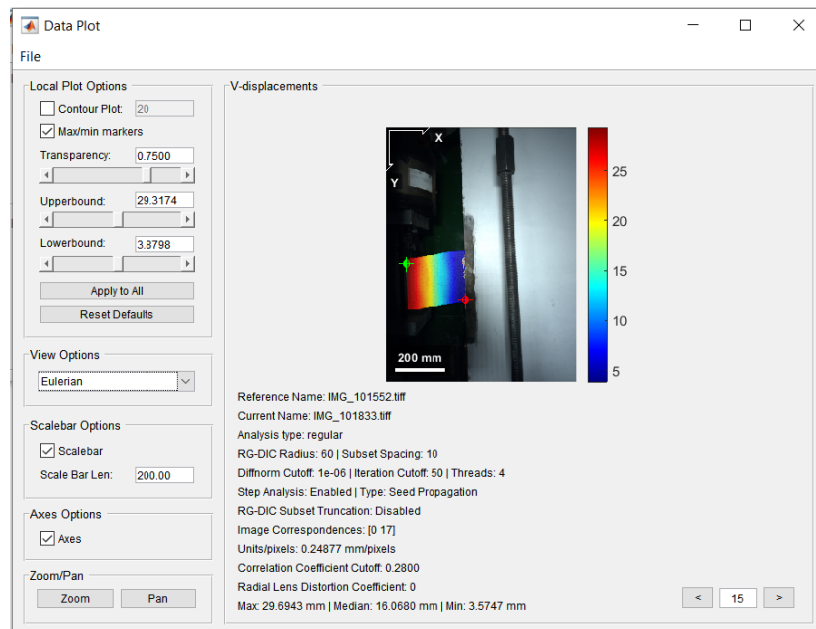


Figura 3.25. Desplazamientos del dispositivo en el ciclo de carga de 32mm

7. Calculate Strains: Las deformaciones se calculan a través de los desplazamientos utilizando un plano de mínimos cuadrados y, con los gradientes de desplazamiento se obtienen las deformaciones de Green-Lagrange o Eulerian-Almansi.

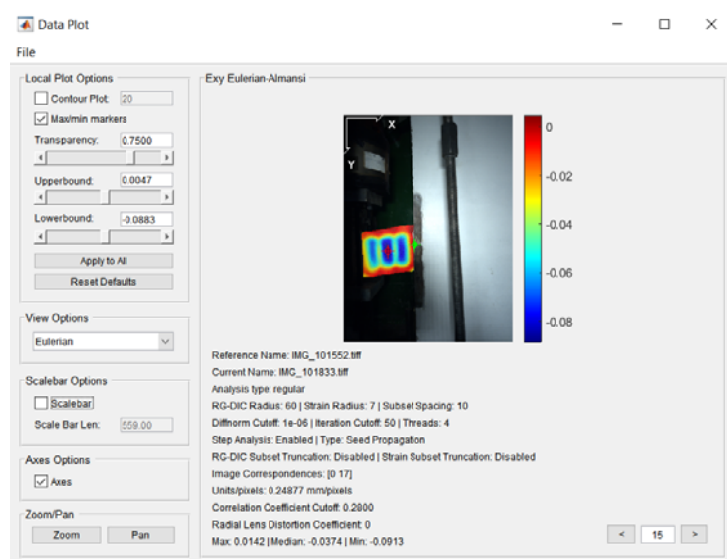


Figura 3.26. Deformaciones del dispositivo en el ciclo de carga de 32mm

En el Anexo 4 se halla un resumen de los resultados obtenidos mediante el DIC para el ensayo 1 ya que este fue el que llegó a máximas deformaciones, mostrando las deformaciones en cada eje X e Y, y las deformaciones en el plano XY. Dado que el bloque de hormigón no estaba bien fijado, y que el dispositivo tuvo rotaciones además de que la carga se aplicó puntualmente en un extremo en lugar de distribuida, los valores obtenidos con el DIC no se asemejan a los valores del DIANA FEA y, por lo tanto, no se ha llevado a cabo una correlación entre ambos resultados.

3.2.5. Resultados laboratorio

Para la realización de esta tesis y, el desarrollo de una nueva generación de dispositivos SLB4 se realizó cuatro ensayos en el laboratorio de Cantabria LADICIM. En el apartado 3.2.3 se explica resumidamente cada ensayo y el orden de realización que, posteriormente, se cambió ensayando primero el Ensayo 2. Todos los resultados del laboratorio se encuentran en el Anexo 2.

Ensayo 2.

Debido a que era la primera vez que se realizaba un ensayo de estas características en ese laboratorio, el Ensayo 2 fue el primero en realizarse ya que era el único con un protocolo aunque aceptado por la normativa, alternativo al original que propone la AISC. Al realizar el ensayo se pudieron constatar dos problemas: Primero, la sujeción del muro cedía y, al aplicar fuerza hacia arriba la prensa no sólo deformaba el dispositivo sino que también levantaba el muro resultando en curvas de tensión deformación no simétricas para tracción-compresión. Segundo, no se colocó ninguna estructura auxiliar perpendicular para impedir la rotación en el

extremo de aplicación de la carga con lo que no se simuló correctamente la conexión y, por lo tanto, este ensayo quedó invalidado.

Para todos los demás ensayos se solucionó el segundo problema usando una viga de madera que impedía la rotación del dispositivo Figura 3.14 y, aunque el primer problema siguió presente, los resultados se consideran válidos.

Ensayo 1.

El ensayo 1 fue el tercer ensayo que se realizó. En este ensayo se llegó a los 48mm de deformación tal y como se puede observar en la Figura 3.28. Se puede observar que no hubo caída de resistencia en ningún momento pero el laboratorio decidió parar el ensayo ya que la muestra presentaba visibles muestras de pandeo lateral (Figura 3.27). El desplazamiento de rotura corresponde al desplazamiento en el cual la fuerza cae hasta el 80% de la capacidad máxima de carga y, al no observar dicha caída en la Figura 3.28 podemos afirmar que aunque hubiese pandeo no se llegó al fallo del dispositivo. En otras palabras, el desplazamiento de rotura del dispositivo es superior a los 48mm alcanzados durante el ensayo.



Figura 3.27. Estado del disipador al acabar el ensayo 1

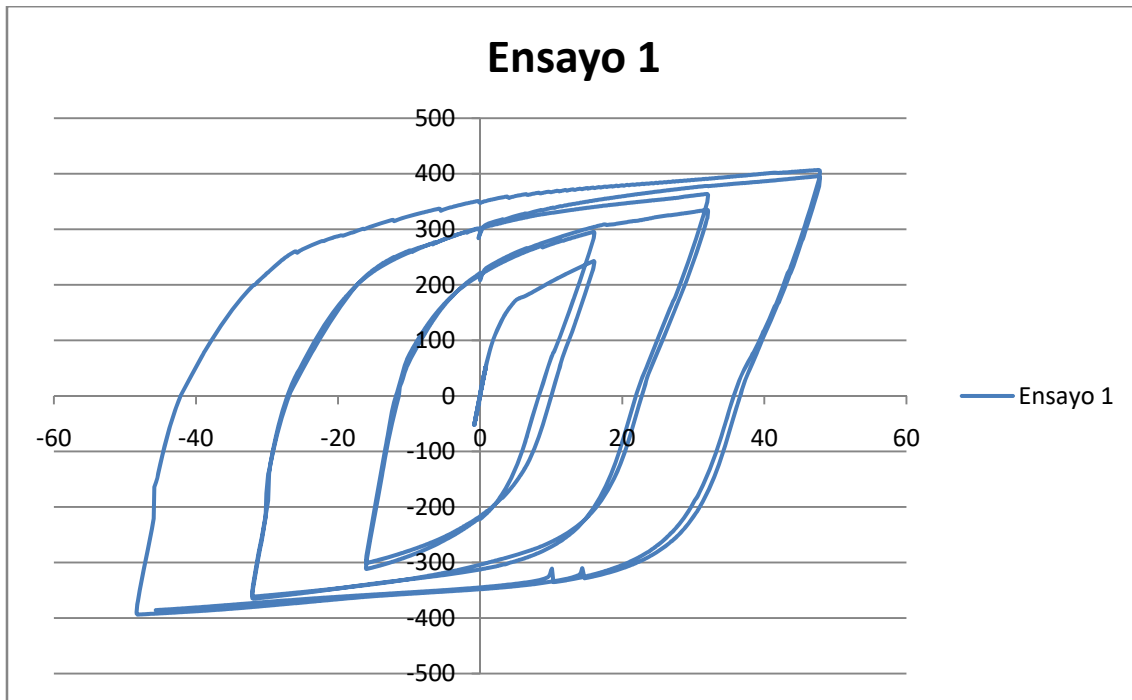


Figura 3.28. Curva histerética de fuerza desplazamiento del ensayo 1

Tal y como se ha comentado anteriormente, al ceder las fijaciones del muro durante la fuerza ascendente de la prensa, las pendientes de las ramas de ascendentes y descendentes son distintas e imprecisas. Es decir, tal y como se dispuso el ensayo no se puede considerar el dispositivo empotrado en el muro y para que los resultados numéricos correspondan a los de los ensayos se deberá cambiar el módulo de elasticidad.

Ensayos 3 y 4

El ensayo 3 se realizó sobre el dispositivo SLB4 con alas. Tal y como se ve en la Figura 3.31 el dispositivo llegó a 32mm y falló frágilmente. El fallo no se dio en las partes disipativas del dispositivo sino que como se puede observar en la Figura 3.29hubo un fallo en la soldadura. El dispositivo se despegó de la placa de anclaje por una de las alas y, en consecuencia, se propagó la rotura del dispositivo. Este mismo fallo frágil se pudo observar también en el sismo de Northridge1994, en el que hubo fallos en las uniones por mala soldadura y falta de penetración. En ambos ensayos 3 y 4 ocurre este mismo fallo en el que como se ve en la Figura 3.30el alma no penetra en la placa de anclaje y, por lo tanto, al separarse produce un efecto de entalla que propaga una fractura a través del dispositivo tal y como se ve en la Figura 3.29. Este fallo local se puede arreglar haciendo los biseles más grandes o levantando ligeramente el dispositivo para que la soldadura pueda penetrar por debajo.



Figura 3.29. Estado del disipador al acabar el ensayo 3



Figura 3.30. Detalle de la soldadura que falló durante el ensayo 3

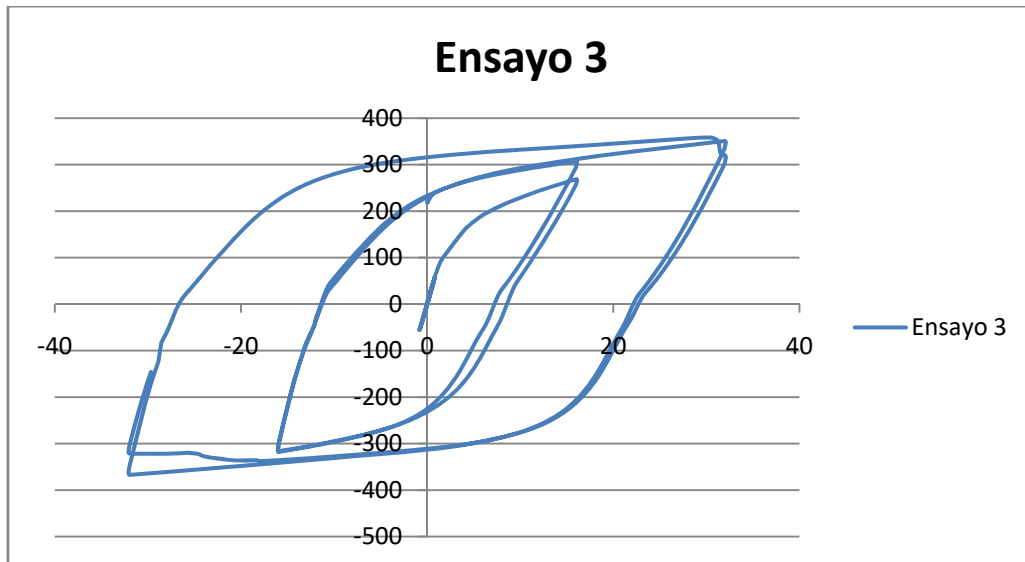


Figura 3.31. Curva histerética de fuerza desplazamiento del ensayo 3

Ambos ensayos 3 y 4 no únicamente estaban enfocados a estudiar el dispositivo SLB4 y los anclajes sino que en cada ensayo había distintos espesores en las zonas fresadas del dispositivo (4 y 5mm) para poder obtener la relación altura-espesor de ventana mínima necesaria para evitar abolladura. Aunque la abolladura sea un fenómeno que se permita en los dispositivos de disipación de energía, para grandes deformaciones es recomendable evitarla. La Figura 3.32 está tomada durante el cuarto ensayo y, tal y como se puede ver, las ventanas del dispositivo ya presentaban claros signos de inicio de abolladura mientras que para el tercer ensayo no hubo. Por lo tanto, se puede concluir que la relación altura-espesor de ventana mínima debe de ser de $\frac{5}{50} = 0.1$. Tal y como se indicó al inicio de este capítulo, para la tercera generación se fijó una relación de 0.13 con la que no se observó inicio de abolladura en ningún ensayo. Gracias a los ensayos 3 y 4 podemos ajustar este parámetro a 0.1 lo que permite reducir tiempo en la manufactura.



Figura 3.32. Inicio de abolladura en el dispositivo durante el ensayo 4

3.3. Correlación numérico-experimental

Aunque se hayan realizado cuatro ensayos para esta tesis, la correlación numérico-experimental se ha realizado únicamente para los Ensayos 1 y 3 ya que son los dos que presentan resultados representativos sobre ambas alternativas propuestas. Para llevar a cabo la correlación se pretende ajustar las curvas histeréticas de tensión deformación obtenidas analíticamente con el software Diana FEA a las experimentales obtenidas en el laboratorio. Además, para el ensayo 1 también se realizará un análisis no lineal de autovalores para comprobar el pandeo lateral que hubo durante el ensayo y intentar predecir el fallo del dispositivo (Nonlinear Buckling of a Cylinder, Diana tutorials)

Ensayo 1

Curvas Fuerza-Desplazamiento

Para correlacionar las curvas fuerza desplazamiento del ensayo 1, se han considerado las distintas alternativas comentadas anteriormente. En primer lugar, la Figura 3.33 muestra las aproximaciones del comportamiento del material según Nadai y Bozzo. Tal y como se puede observar no se incluye la caída de resistencia, esto se debe a que aunque la platina pierda resistencia llegado a su límite de fluencia, en el dispositivo, en cambio, se redistribuyen los esfuerzos.

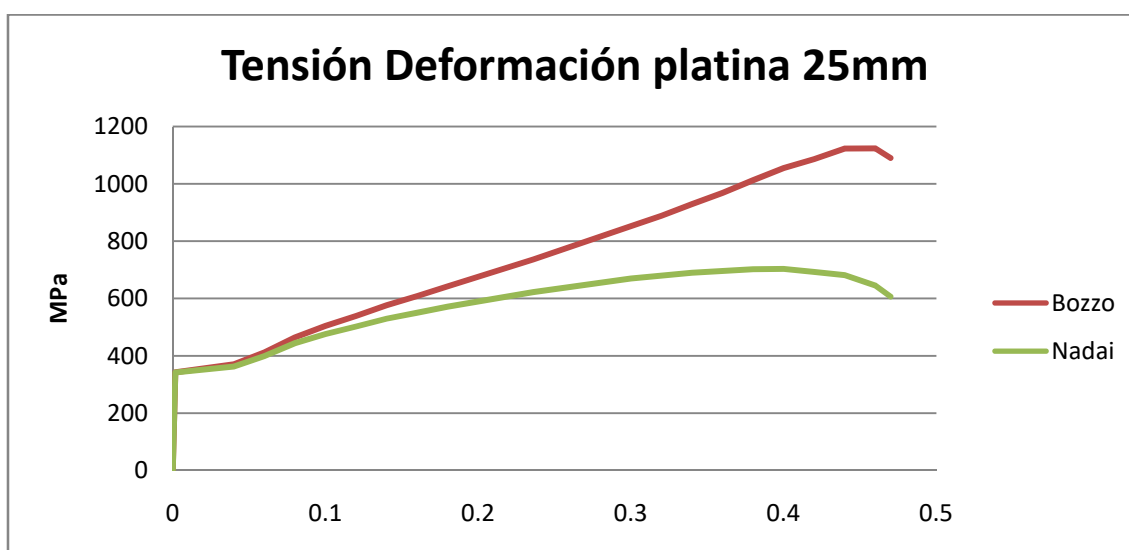


Figura 3.33. Aproximación de la curva de tensión deformación real según Bozzo (rojo) y Nadai (verde)

Se puede observar en la Figura 3.33 que la expresión de Bozzo al considerar la sección reducida en el cuello de rotura produce tensiones mayores en comparación a la de Nadai (en particular a partir de deformaciones mayores a 0.2). Además, según se puede observar en el Anexo 1, el informe del laboratorio para el ensayo de platina aporta un valor del módulo de elasticidad muy inferior al real. Esto se debe a que en estos ensayos no se usan extensómetros ni aparatos de precisión en las sujeciones ya que típicamente estos ensayos son para determinar la tensión de fluencia mínima, la tensión de rotura y el alargamiento de rotura para la probeta estándar. Aún así, dado que el módulo de elasticidad del acero es un valor conocido y estable se modificó el alargamiento de fluencia para que el material tuviera el módulo reportado en la

Tabla 3-1. Para futuras investigaciones se realizará la fotogrametría DIC para intentar obtener de forma precisa la curva de tensión deformación.

La Figura 3.34 muestra las curvas fuerza desplazamiento que se obtienen en el dispositivo con el modelo isotrópico usando las aproximaciones de Bozzo y Nadai para la definición del material. Tal como se puede observar, claramente la expresión de Nadai presenta menos endurecimiento y representa mejor el ensayo. En ambos casos la pendiente de carga y descarga es muy distinta a la que se obtuvo en el ensayo. Este efecto se comentó en el apartado 3.2.4 explicando que las fijaciones del bloque no fueron suficientes y permitieron giros en la base. Dada la gran rigidez de los dispositivos SLB, un pequeño giro en la base se magnifica en la curva fuerza desplazamiento.

En investigaciones previas (Cocozza, 2016) la expresión de Bozzo calibró mejor la curva experimental monotónica en los ensayos de Nápoles empleando el software ANSYS. Sin embargo, para los ensayos cíclicos se concluyó que la aproximación de Nadai era más precisa junto con un modelo de plasticidad de Chaboche. Por lo tanto, dado que esta investigación se ha realizado con ensayos y software distintos, se puede confirmar la observación referente al uso de la aproximación de Nadai para dispositivos tipo SLB y para ensayos cíclicos.

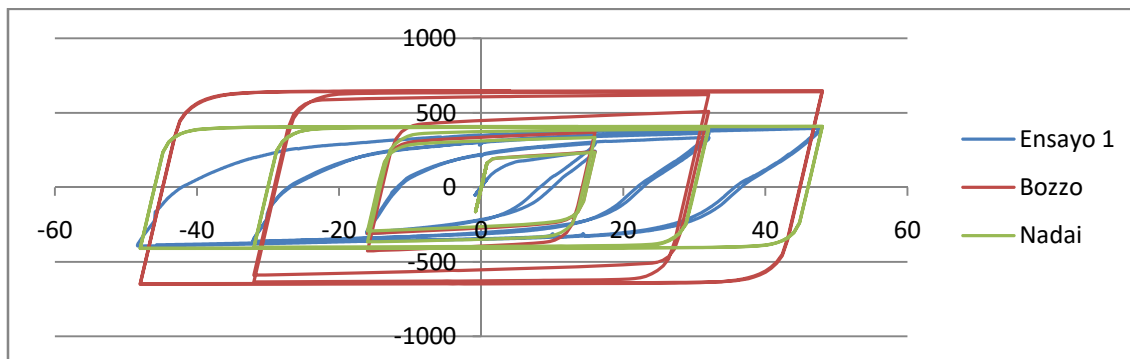


Figura 3.34. Curvas histeréticas del ensayo (azul) y numéricas usando la definición del material con Nadai(verde) y con Bozzo (rojo)

Tal y como se ha indicado anteriormente, se puede observar que la curva numérica de carga y descarga es más rígida o más vertical que la experimental. Para mejorar la aproximación numérico-experimental se modificó el módulo de elasticidad del material adaptando la pendiente de carga y descarga del modelo numérico a la pendiente de descarga del ensayo. Además, se puede observar que las mismas curvas de carga y descarga en el ensayo son distintas entre ellas. Este hecho se debe a que no solamente había giro en el bloque de hormigón sino que también se levantaba en un extremo.

La Figura 3.35 presenta la correlación numérico-experimental obtenida al reducir el módulo de elasticidad en un 85%. Es decir, es el mismo modelo isotrópico con la misma curva del material incluyendo su tensión de fluencia excepto modificando el módulo de elasticidad lineal. Al calibrar el modelo numérico con la pendiente de descarga se pueden observar diferencias significativas respecto la pendiente de las ramas de carga ya que el muro se levantaba durante las estas fases. Se puede observar en la Tabla 3-5 que los errores en las fuerzas máximas para todos los ciclos en el dispositivo son inferiores al 13%.

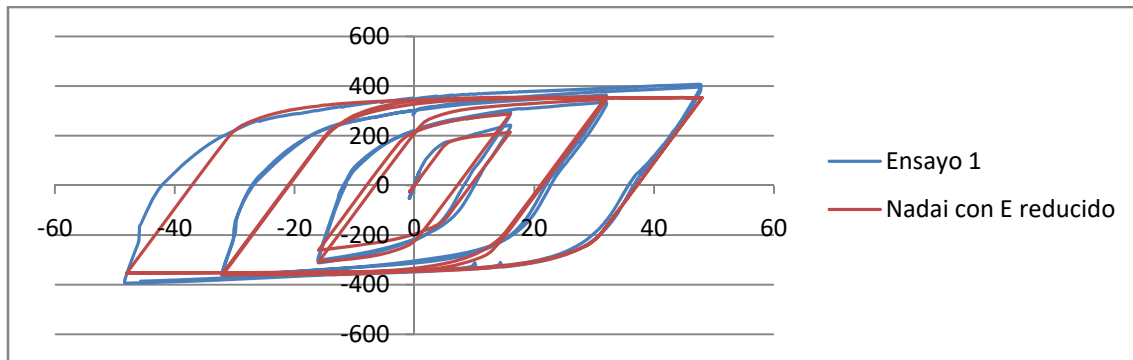


Figura 3.35. Curva histerética del ensayo (azul) vs modelo con el comportamiento no lineal del material definido con nadai y el módulo de elasticidad lineal reducido (rojo)

Tabla 3-5. Error entre el ensayo y el modelo numérico

Fases (mm)	Ensayo 1	Modelo Nadai	Error
16	242	214	12%
-16	-300	-260	13%
16	295	288	2%
-16	-311	-307	1%
32	318	345	-8%
-32	-360	-354	2%
32	363	356	2%
-32	-360	-361	0%
48	390	353	9%
-48	-393	-352	10%
48	406	353	13%
-48	-393	-352	10%

Cabe destacar que, durante el análisis numérico, si se alcanzan valores de deformación que están fuera del rango cubierto por el material definido, es decir, son más altos que la deformación de su último punto actual en el diagrama tensión deformación, Diana automáticamente extiende la curva manteniendo el mismo valor de tensión.

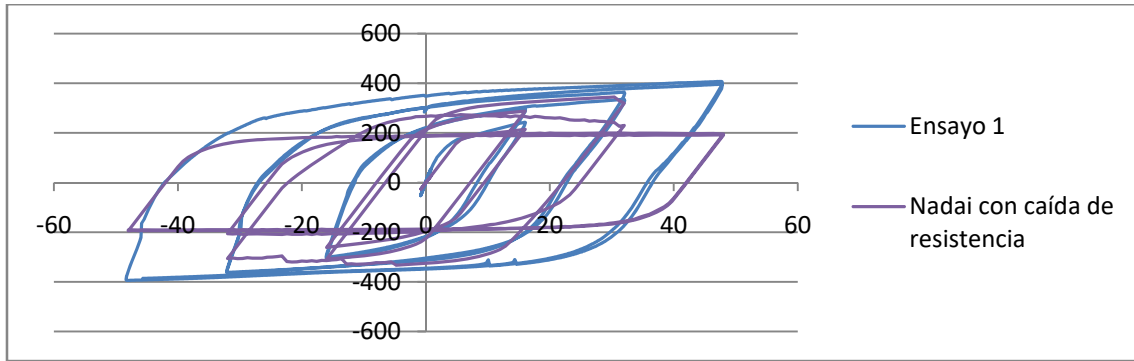


Figura 3.36. Curva histerética del ensayo (azul) vs el mismo modelo que en Figura 3.35 pero definiendo la caída de resistencia del ensayo de platina

La Figura 3.36 muestra la curva fuerza desplazamiento incluyendo caída de resistencia en el ensayo de platina. Se puede apreciar que la pérdida de resistencia que se capta en el ensayo de platina no es representativa del comportamiento del dispositivo ya que en éste se genera redistribución de esfuerzos llegado a este punto y que, por lo tanto, para modelar los SLB no se debe introducir. Además, cabe destacar que los modelos con endurecimiento cinemático tanto con la aproximación de Bozzo o Nadai no han representado bien el comportamiento del dispositivo y por lo tanto se concluye que el modelo isotrópico es el más adecuado.

Por otra parte, considerando el dissipador SLB4 como un brazo excéntrico, se puede comparar, tal y como muestra la Figura 3.37, que la capacidad de rotación plástica es significativamente mayor a otros brazos excéntricos reportados (Xiaodong Ji, 2016). En dicho artículo se comparan diversos “shear links” cortos y, para el dispositivo ensayado, se han calculado los siguientes parámetros para poder incluirlo en la Figura 3.37.

- Momento plástico (M_p)=49kNm
- Cortante plástico (V_p)=200kN
- Excentricidad normalizada (e)=0.27m
- Rotación inelástica (Y_p)= $\frac{48}{270} = 0.18$

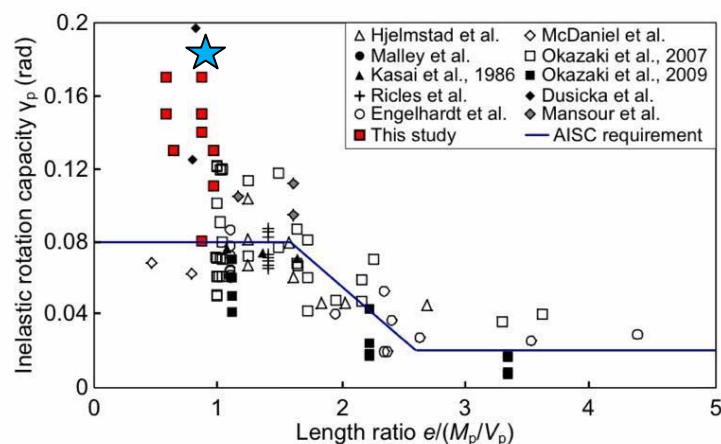


Figura 3.37. Capacidad de rotación inelástica vs excentricidad normalizada de shear links.(Xiaodong Ji, 2016)
Estrella en azul representa el resultado experimental del Ensayo 1

Se puede observar que la capacidad de rotación del dispositivo es significativamente alta respecto a los otros pero cabe destacar que esta es aún mayor dado que el dispositivo no llegó a fallar.

Curvas pandeo lateral

Mediante el software Diana se puede generar un análisis no lineal de autovalores para obtener el valor del desplazamiento en el que empieza el pandeo lateral. Las Figura 3.38 y Figura 3.39 muestran los ciclos de carga y el desplazamiento perpendicular normalizado respectivamente. Los ciclos de carga corresponden a los ciclos del ensayo correspondientes al criterio de la AISC para BRBs.

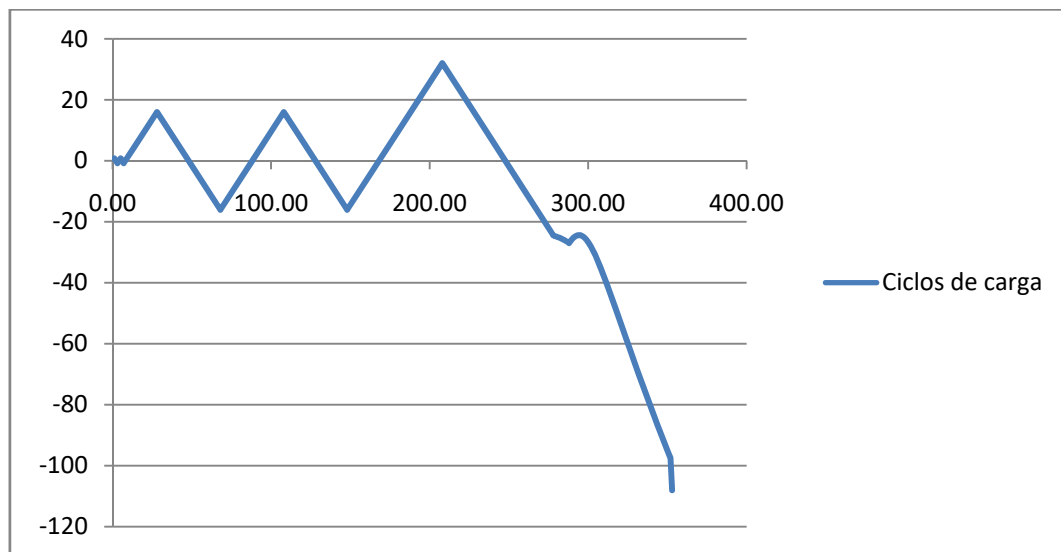


Figura 3.38. Ciclos de carga para el ensayo 1

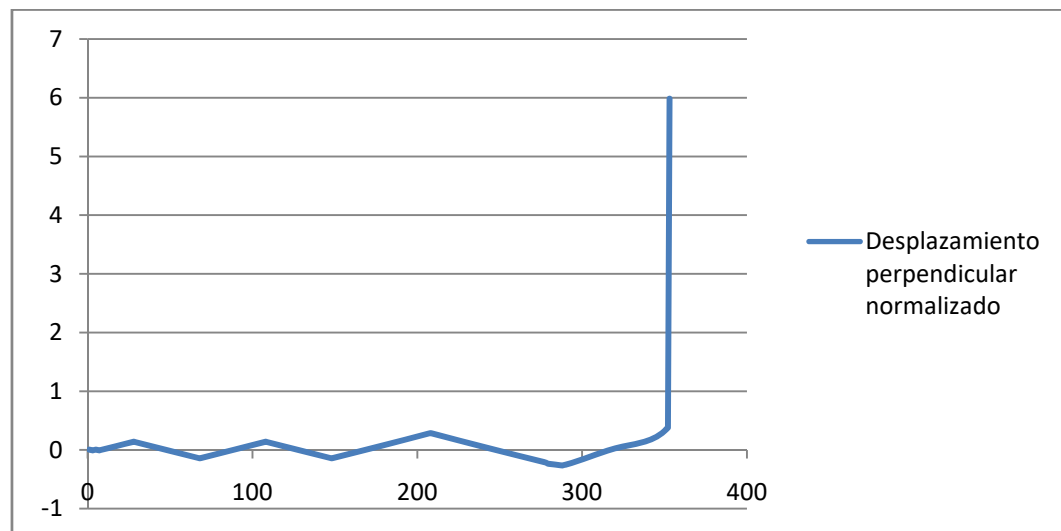


Figura 3.39. Desplazamiento perpendicular al plano del dispositivo durante los ciclos de carga

Tal y como se puede observar, el pandeo lateral empieza en el primer ciclo de 32mm en el que el desplazamiento perpendicular aumenta considerablemente. En el ensayo se pudo apreciar el inicio del pandeo lateral desde las fases de carga de 32mm. Sin embargo, a diferencia del

modelo numérico, el dispositivo mantuvo la carga tal y como se ve en la Figura 3.35 llegando a cumplir con las fases de 48mm.

Ensayo 3

Curvas Fuerza-Desplazamiento

La Figura 3.40 muestra la curva de tensión deformación para la platina de 16mm con la que se fabricó el dispositivo ensayado. Se puede observar una disminución del 5% en la fuerza de inicio de plastificación aunque un valor similar para el esfuerzo máximo. En todo caso, estas diferencias son muy pequeñas y similares entre probetas de mismo espesor.

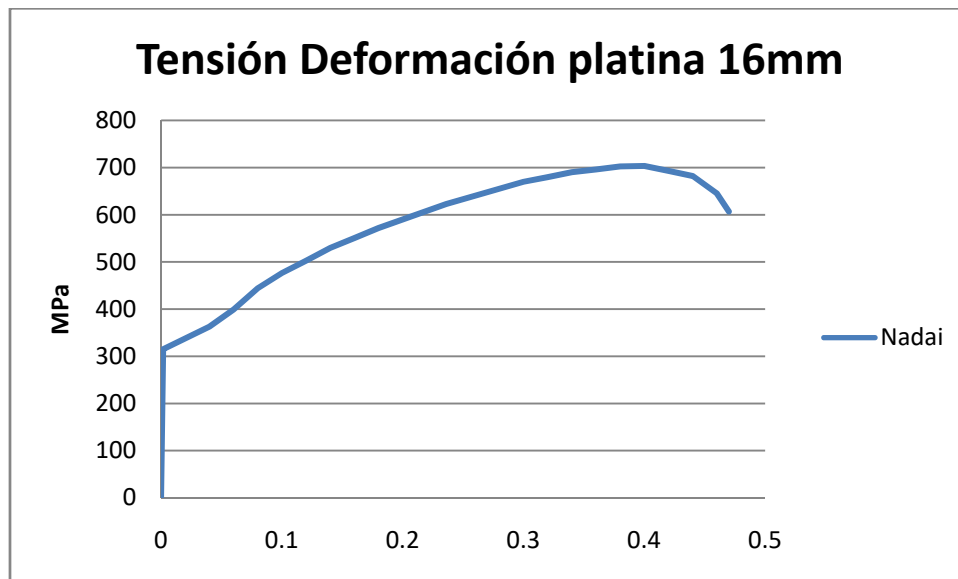


Figura 3.40. Aproximación de la curva tensión deformación real según Nadai

Tal y como se ha comentado anteriormente, el ensayo 3 falló frágilmente en la soldadura del ala con la placa base durante el primer ciclo de carga de 32mm. Es por este motivo que la correlación numérica se ha llevado a cabo sólo hasta 32mm. Se puede observar en la Figura 3.41 que para el ensayo 3 el modelo isotrópico con la aproximación de Nadai y el módulo de elasticidad lineal reducido permite correlacionar muy bien los resultados. La Tabla 3-6 muestra que el error máximo es de 16%. El error final de 21% no se considera ya que se puede apreciar que el dispositivo ya ha empezado a fallar notándose una pérdida de resistencia.

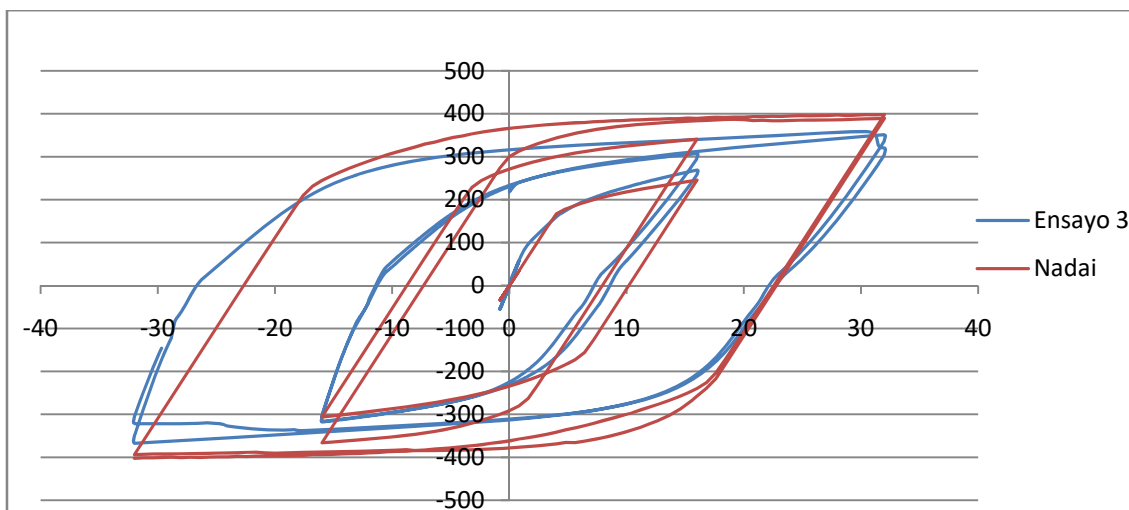


Figura 3.41. Curva histerética del ensayo (azul) vs modelo con el comportamiento no lineal del material definido con nadai y el módulo de elasticidad lineal reducido (rojo)

Tabla 3-6. Error entre el ensayo y el modelo numérico

	Ensayo 3	Modelo Nadai	Error
16	268	245	9%
-16	-310	-305	3%
16	306	340	-11%
-16	-310	-365	-16%
32	350	389	-11%
-32	-367	-390	-6%
32	360	398	-11%
-32	-321	-393	-21%

4.Comparativa SLB y BRB

En este apartado se llevará a cabo una comparativa técnica y económica de los dispositivos SLB4 diseñados anteriormente frente a los brazos de pandeo restringido (BRB). La comparación se realizará en un proyecto real de un edificio de 33 niveles con una estructura aporticada. Del proyecto original únicamente se mantendrá la estructura pero se localizará en Lima, Perú, para mantener la confidencialidad del proyecto. En el proyecto original se plantearon ambas alternativas una con dispositivos BRB y otra con dispositivos SLB4 y, dada esa localización y señal sísmica, la alternativa de los SLB4 era considerablemente mejor y fue la escogida para la construcción del edificio.

Para comparar ambas alternativas se realizará tanto un cálculo lineal como uno no lineal. El cálculo lineal servirá para obtener las fuerzas sísmicas en la base sin tener en cuenta la plasticidad de los dispositivos. De esta forma, comparando ambas respuestas, lineal y no, tendremos un parámetro para correlacionar la disminución en cortante basal y, por lo tanto, la disipación de energía en cada sistema.

Además, el cálculo no lineal nos permitirá obtener el desplazamiento de entrepiso en cada sistema. El desplazamiento de entrepiso, o drift, se relaciona directamente con el daño en los elementos no estructurales por lo que una disminución en su valor es claramente una ventaja representativa entre sistemas.

Por último, dado que se trata de un proyecto real se dispone de los presupuestos económicos ofertados para cada sistema. Tal y como se muestra en la Tabla 4-1 en este proyecto hubo tres empresas que ofrecieron sus sistema de disipación de energía con ofertas finales desde 1.6M€ a 500k€ (en las que se incluyen todos los gastos de instalación o de construcción de los muros desacoplados). Se puede observar que la solución con los dispositivos SLB4 oscila entre 2 y 3 veces más económica que la solución con BRB.

Tabla 4-1. Presupuestos con sistemas SLB4 y BRB

Empresa	Sistema	Precio final	Diferencia
A	BRB	1 616 404.45 €	320%
B	BRB	971 739.45 €	190%
C	SLB4	506 108.10 €	-

4.1. Edificio a estudiar

4.1.1. Características

El edificio de viviendas de 33 niveles está formado por pórticos en ambas direcciones y tiene una forma en V en planta. Para rigidizarlo, en el centro de la estructura se localizaron originalmente las diagonales de pandeo restringido a manera de núcleo central. La alternativa usando SLB4 se dispuso en las mismas ubicaciones pero usando muros desacoplados y dos dispositivos por muro. En la propuesta original había 92 BRBs por lo que la propuesta con disipadores SLB4 fue de 184 dispositivos.

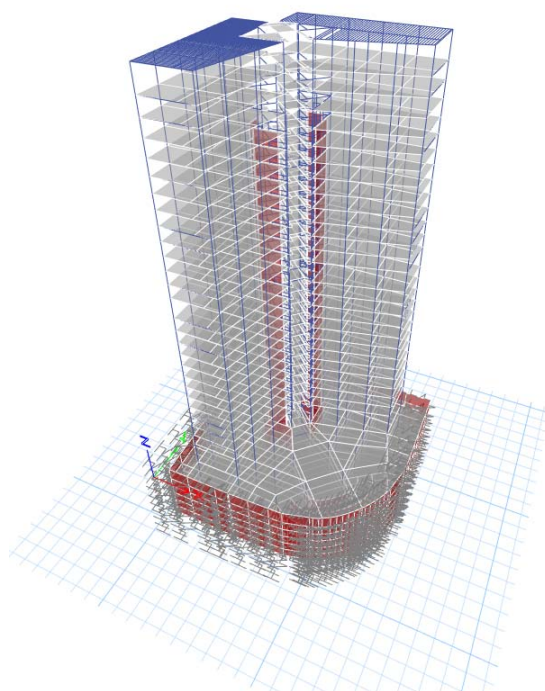


Figura 4.1. Edificio a estudiar con BRBs y SLB4

En la Figura 4.1 se muestra el modelo del edificio equipado con el sistema de SLB4. Tal y como se puede ver en la imagen los niveles de sótano también se modelaron de tal forma que se confinaron con muelles. Desde el nivel Lobby hasta el nivel 23 se pueden apreciar en rojo los muros desacoplados que conforman el sistema SLB4. Hay cuatro dispositivos en cada dirección y por planta, es decir, hay cuatro muros desacoplados por nivel.

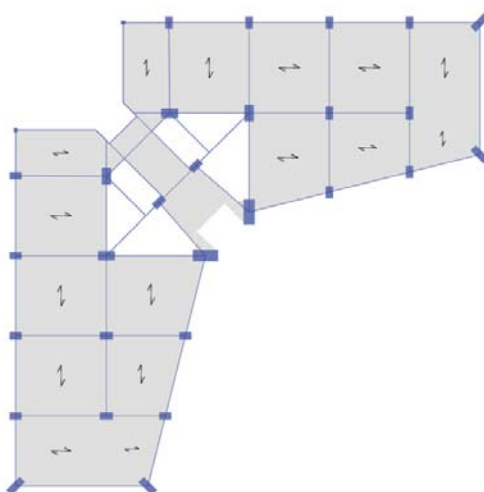


Figura 4.2. Vista en planta del edificio a estudiar

4.1.2. Normativa

Cargas

Para el análisis del edificio se han considerado las siguientes cargas:

- Peso propio
- Cargas permanentes 2.75kN/m^2
- Carga viva 1.9 kN/m^2

Espectro

La Norma E.030 especifica que Lima se halla en la zona de máxima intensidad sísmica en Perú, la zona 4, que se muestra en la Figura 4.3. La tipología de suelo en la localización del edificio se considerará rígida, es decir, tipo de suelo S1. (Norma Técnica de Edificación E.030 Diseño Sismorresistente, 2017)



Figura 4.3. Zonas sísmicas del Perú

Tal y como se ha comentado anteriormente, el edificio será de viviendas y, por lo tanto, usando la Tabla 4-2 hallamos que el factor U será de 1.0.

Tabla 4-2. Categoría de edificación

Tabla N° 5 CATEGORÍA DE LAS EDIFICACIONES Y FACTOR "U"		
CATEGORÍA	DESCRIPCIÓN	FACTOR U/
A Edificaciones Esenciales	A1: Establecimientos de salud del Sector Salud (públicos y privados) del segundo y tercer nivel, según lo normado por el Ministerio de Salud.	Ver nota 1
	A2: Edificaciones esenciales cuya función no debería interrumpirse inmediatamente después de que ocurra un sismo severo tales como: - Establecimientos de salud no comprendidos en la categoría A1. - Puertos, aeropuertos, estaciones ferroviarias, sistemas navíos de transporte , locales municipales, centrales de comunicaciones, Estaciones de bomberos, cuarteles de las fuerzas armadas y policía. - Instalaciones de generación y transformación de electricidad, reservorios y plantas de tratamiento de agua.	1,5
	Todas aquellas edificaciones que puedan servir de refugio después de un desastre, tales como instituciones educativas, institutos superiores tecnológicos y universidades. Se incluyen edificaciones cuyo colapso puede representar un riesgo adicional, tales como grandes hornos, fábricas y depósitos de materiales inflamables o tóxicos. Edificios que almacenen archivos e información esencial del Estado.	
	B Edificaciones Importantes Edificaciones donde se reúnen gran cantidad de personas tales como cines, teatros, estadios, coliseos, centros comerciales, terminales de buses de pasajeros, establecimientos penitenciarios, o que guardan patrimonios valiosos como museos y bibliotecas. También se considerarán depósitos de granos y otros almacenes importantes para el abastecimiento .	1,3
C Edificaciones Comunes	Edificaciones comunes tales como: viviendas, oficinas, hoteles, restaurantes, depósitos e instalaciones industriales cuya falla no acarree peligros adicionales de incendios o fugas de contaminantes.	1,0
D Edificaciones Temporales	Construcciones provisionales para depósitos, casetas y otras similares.	Ver nota 2

Además, al tratarse de un edificio formado por pórticos dúctiles, el factor de reducción sísmica será como máximo de valor 8. El amortiguamiento del hormigón armado se asume del 5%, sin embargo, al incorporar dispositivos de protección sísmica este se incrementa. En este trabajo se propone una alternativa simple para determinar la implementación de este incremento mediante el análisis tiempo historia no lineal. Comparando la respuesta no lineal versus lineal en promedio para las señales seleccionadas, se puede obtener, de forma general, el incremento de amortiguamiento sísmico.

La Figura 4.4 muestra el espectro generado mediante los parámetros descritos anteriormente.

Tabla 4-3. Coeficiente de reducción sísmica

Tabla N° 7 SISTEMAS ESTRUCTURALES	
Sistema Estructural	Coeficiente Básico de Reducción R_0 (*)
Acero:	
Pórticos Especiales Resistentes a Momentos (SMF)	8
Pórticos Intermedios Resistentes a Momentos (IMF)	7
Pórticos Ordinarios Resistentes a Momentos (OMF)	6
Pórticos Especiales Concéntricamente Arriostrados (SCBF)	8
Pórticos Ordinarios Concéntricamente Arriostrados (OCBF)	6
Pórticos Excéntricamente Arriostrados (EBF)	8
Concreto Armado:	
Pórticos	8
Dual	7
De muros estructurales	6
Muros de ductilidad limitada	4
Albañilería Armada o Confinada.	3
Madera (Por esfuerzos admisibles)	7

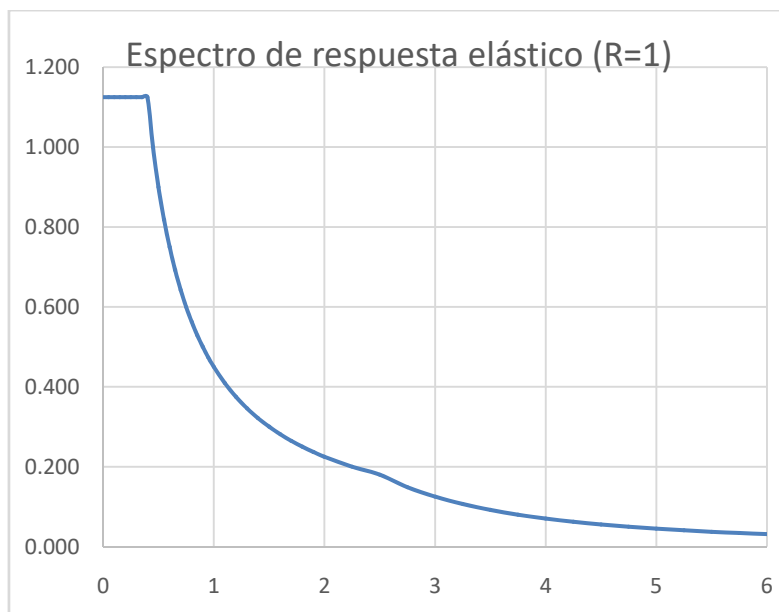
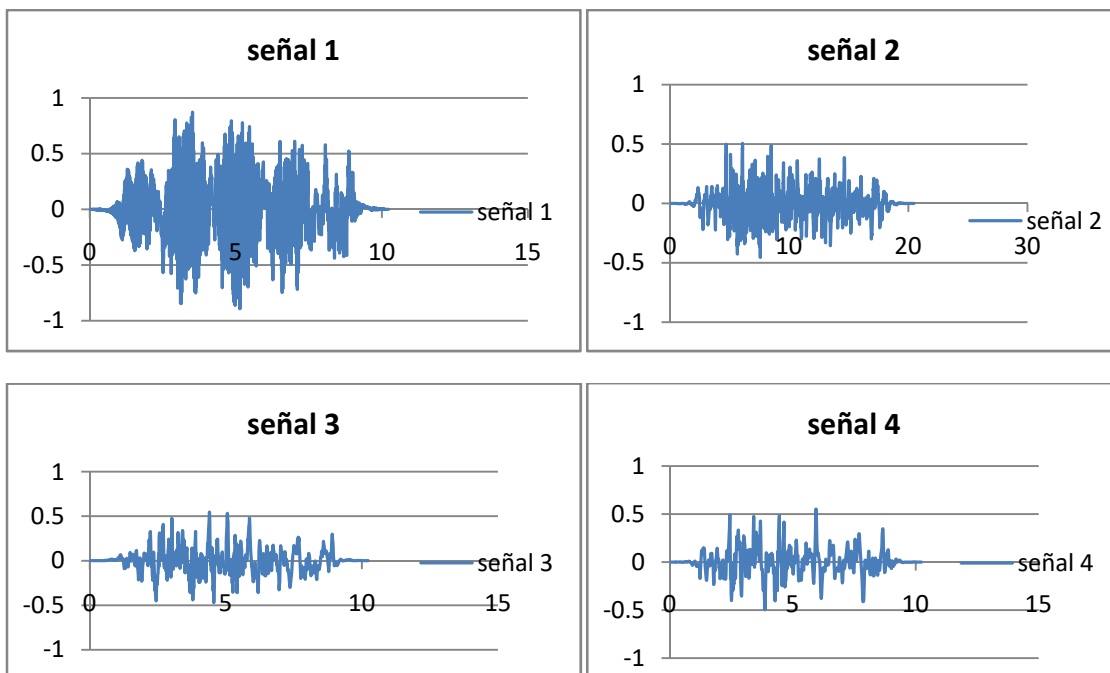


Figura 4.4. Espectro sísmico

Señales sísmicas

A partir del espectro de diseño obtenido anteriormente se generaron 6 señales mediante el proceso de *spectralmatching* para llevar a cabo el análisis tiempo historia. El *spectralmatching* es un proceso en el que se obtienen acelerogramas sintéticos cuyo espectro de respuesta es compatible con el espectro objetivo uniforme, en este caso el que se obtiene usando la norma E.030 peruana. Las 6 señales que se han usado son las siguientes.



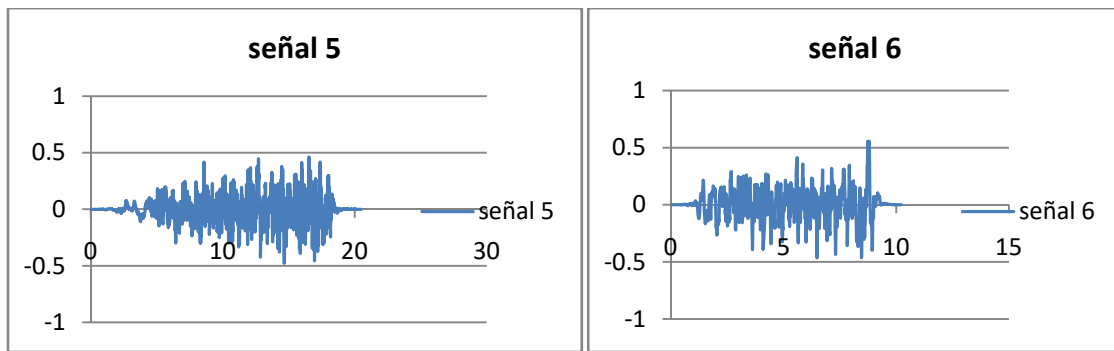


Figura 4.5. Seis señales sintéticas para el espectro de diseño de Lima

4.1.3. Análisis

Para ambos sistemas, SLB y BRB, se ha partido de un modelo base en el que se han definido todas las acciones, permanentes y variables, las condiciones de contorno y la geometría del edificio. A partir de ese modelo se han generado dos modelos distintos uno con la solución de SLB4 y otro con la solución de BRB. Las Figura 4.6y Figura 4.7muestran la implementación de los dispositivos en el edificio. Tal y como se ve en la Figura 4.6 los disipadores SLB4 se conectan a la estructura mediante muros desacoplados, en cambio en la Figura 4.7los BRB se han diseñado como links en toda la longitud de la diagonal que representa la longitud entera del brazo. La propuesta con BRBs original estaba compuesta por dispositivos con una fuerza de inicio de plastificación (F_y) entre 1760kN a 5720kN mientras que la propuesta con SLB4 todos los dispositivos son iguales con un F_y de 466kN. Es decir, la fuerza de inicio de plastificación, teniendo en cuenta que hay dos SLB4 por muro, es entre 2 y 6 veces mayor en los BRBs que en los SLB4.

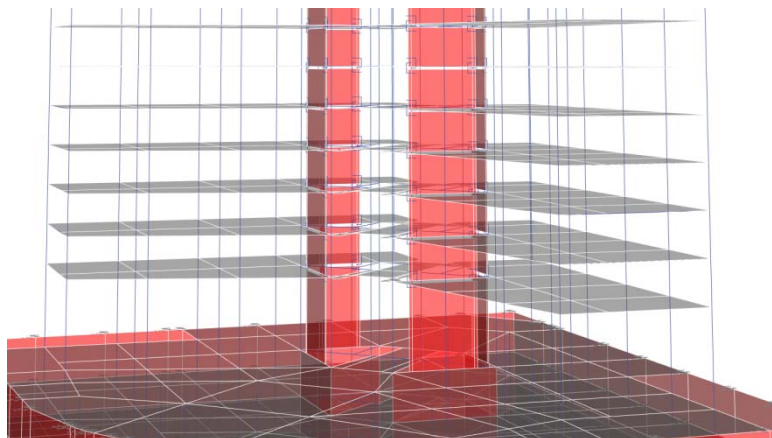


Figura 4.6. Disposición de los dispositivos SLB4 con muros desacoplados

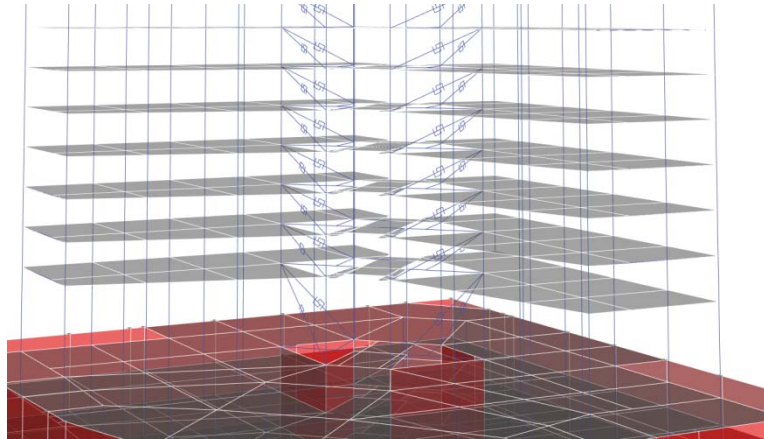


Figura 4.7. Disposición de los brazos de pandeo restringido (BRB)

Para realizar el análisis primero se realizó un análisis modal para obtener los periodos fundamentales de la estructura. En la Tabla 4-4 se muestra un resumen de los tres primeros periodos fundamentales del edificio para cada sistema propuesto y para la estructura original. Se puede observar que el sistema de SLB4 proporciona una mayor rigidez en el edificio que el sistema BRB dado que los periodos son más bajos.

Tabla 4-4. Tres primeros periodos fundamentales de la estructura

	Periodo (sec)	Ux	Uy	sumUx	sumUy
Sin dispositivos					
Modal 1	5.408	0.2158	0.2263	0.2158	0.2263
Modal 2	5.097	0.0412	0.0397	0.2571	0.2661
Modal 3	4.291	0.1866	0.1793	0.4437	0.4453
Sistema BRB					
Modal 1	4.802	0.0414	0.0453	0.0414	0.0453
Modal 2	4.507	0.2132	0.2249	0.2546	0.2702
Modal 3	3.927	0.1837	0.1704	0.4384	0.4406
Sistema SLB4					
Modal 1	4.642	0.0329	0.0368	0.0329	0.0368
Modal 2	4.366	0.2186	0.2385	0.2514	0.2753
Modal 3	3.955	0.2018	0.1801	0.4532	0.4554

Posteriormente se realizó el análisis tiempo historia no lineal de integración directa mediante el método de Hilber-Hughes-Taylor para ambos sistemas con un incremento de tiempo de 0.01s. Mediante este análisis se obtienen, para cada una de las seis señales, el desplazamiento de entrepiso en altura y el cortante basal.

4.2. Comparativa técnica

4.2.1. Cortante basal

En la Tabla 4-5 se muestran los cortantes a nivel lobby obtenidos para cada señal y en la última columna el promedio. Para cada señal se observa una disminución en el cortante usando el sistema de SLB4 en comparación al de BRB entre el 5 y el 23% siendo en promedio una reducción del 15%.

Tabla 4-5. Cortante basal para ambos sistemas

Cortante Basal (kN)							
	Señal 1	Señal 2	Señal 3	Señal 4	Señal 5	Señal 6	Promedio
Sistema BRB	77617.82	79482.34	84031.07	81551.04	62276.97	87230.87	78698.35
Sistema SLB4	73985.2	68578.34	69102	66312.2	56017.04	67084.11	66846.48
Reducción %	5	14	18	19	10	23	15

Teniendo en cuenta que hay cuatro dispositivos SLB4 de $F_y=466\text{kN}$ en cada dirección, se puede establecer que la fuerza de plastificación de los dispositivos, en referencia al cortante promedio en el lobby, es del 3%. En cambio, para el sistema de BRBs, teniendo en cuenta que se disponen sólo dos dispositivos pero que en el lobby son de máxima fuerza de plastificación ($F_y=5720\text{kN}$), la relación entre el cortante y la fuerza de plastificación es del 14.5%.

Tabla 4-6. Coeficiente sísmico

Coeficiente Sísmico							
	Señal 1	Señal 2	Señal 3	Señal 4	Señal 5	Señal 6	Promedio
Sistema BRB	0.146	0.150	0.159	0.154	0.117	0.165	0.148
Sistema SLB4	0.140	0.130	0.131	0.126	0.106	0.127	0.127

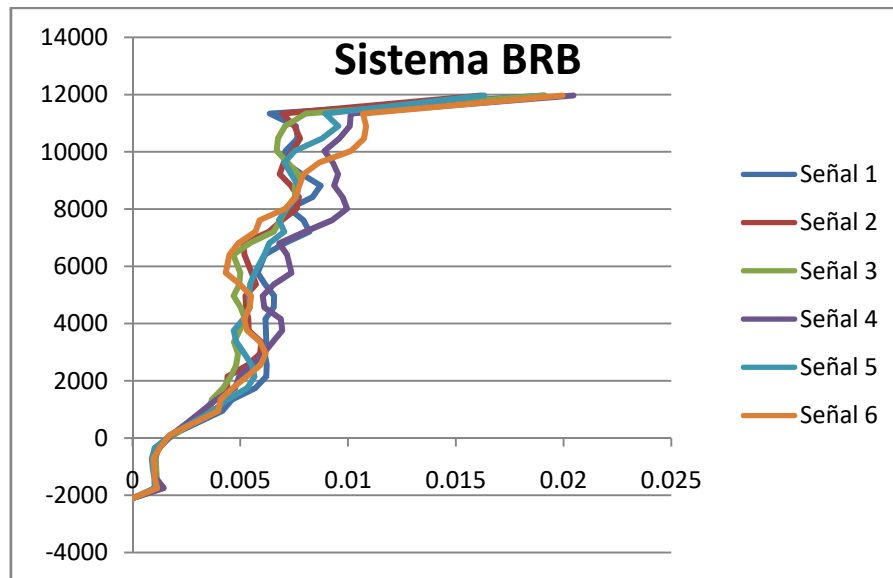
La Tabla 4-6 muestra el cociente entre la fuerza horizontal en la base y el peso de la estructura llamado coeficiente sísmico, C . Tal y como se puede observar, en el sistema de disipación usando BRBs el coeficiente sísmico varía entre 0.146 y 0.165 en cambio en el sistema con SLB4 varía entre 0.106 y 0.14.

4.2.2. Desplazamiento de entrepiso

En las Figura 4.6a) y b) se muestra el desplazamiento de entrepiso para cada señal empleando ambos sistemas, con BRB y con SLB4. El valor en el último nivel no se considera dado que claramente necesita rigidización y por otra parte, los dispositivos sólo se han incorporado

hasta el nivel 23. Es decir, probablemente se requerirá rigidizar la estructura en el último nivel puntualmente para ambas alternativas.

a)



b)

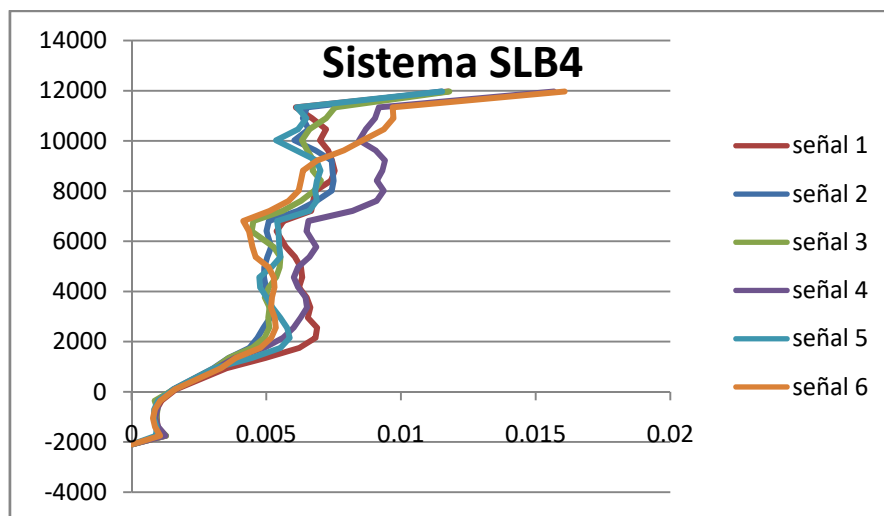


Figura 4.8. Desplazamiento de entepiso con sistema BRB (A) y con SLB4 (B)

La Figura 4.9 muestra la media de los drifts para cada señal con ambos sistemas de disipación, SLB4 y BRB, y en el edificio sin protección sísmica.

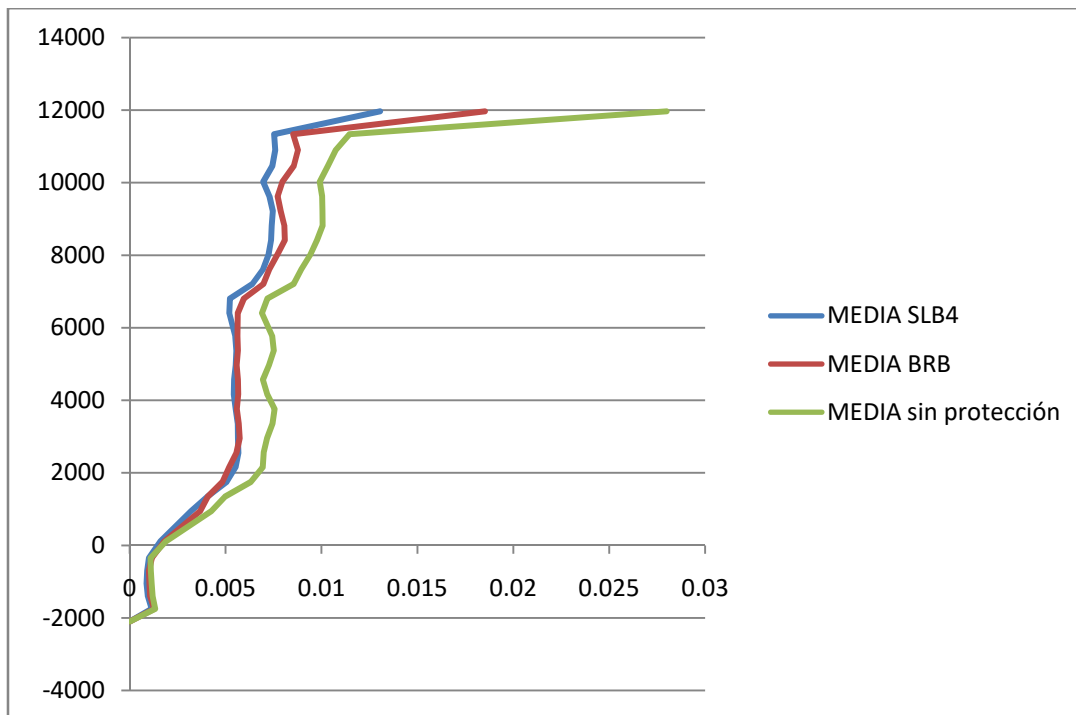


Figura 4.9. Desplazamiento de entrespiso medio para el edificio original y para ambos sistemas de protección BRB y SLB4

Tabla 4-7. Diferencia drift BRB vs SLB4

Sótano-Nivel 1	Nivel 2 a 5	Nivel 6 a 13	Nivel 14 a 22	Nivel 23 a 26
de 10 a 14%	de 0 a -7%	de 1 a 4%	de 5 a 12%	13%

La Tabla 4-7 muestra la diferencia que hay entre el drift usando SLB4 respecto al drift usando BRB. Observando la tabla podemos concluir que la alternativa con SLB4 es consistentemente mejor al sistema con BRBs exceptuando en los cuatro primeros niveles en que el sistema con BRBs presenta una ligera mejora. Además se puede observar que a medida que el edificio aumenta en altura la mejora del SLB4 respecto al BRB también aumenta dejando en evidencia que en edificios de gran altura los SLB4 son la solución más óptima.

4.2.3. Amortiguamiento equivalente

Un procedimiento de diseño aceptado para estructuras equipadas con disipadores o amortiguadores es mediante el amortiguamiento equivalente. Para calcular dicho amortiguamiento se plantea a continuación un procedimiento iterativo.

El proceso propuesto para obtener el amortiguamiento equivalente consiste en realizar un análisis no lineal tiempo historia preciso para cada una de las señales y obtener los valores promedio del drift y el cortante en la base. Estos resultados se consideran reales pero demasiado complejos para ofrecer un diseño práctico de la estructura. Con tal de facilitar el cálculo surge este proceso iterativo en el que se incrementa el amortiguamiento global de la

estructura en un modelo lineal hasta que los resultados en este encajen con los resultados “reales” obtenidos en el análisis no lineal.

Este método brinda una herramienta que permite diseñar en un modelo lineal aplicando un amortiguamiento equivalente global en toda la estructura. Hay que tener presente que el error que se encontrará en el drift en cada nivel y, el cortante en la base, serán distintos por lo que el amortiguamiento global dependerá de si se prima ajustar los desplazamientos o las fuerzas.

Las Tabla 4-8a) y b) muestran el cálculo del amortiguamiento equivalente para el sistema de BRBs. Tal y como se puede ver al aumentar el amortiguamiento de 5 a 10% el valor del cortante obtenido en el cálculo lineal ya iguala al cortante no lineal o “real” con un error del 2%.

Tabla 4-8. Amortiguamiento equivalente con el sistema de BRBs teniendo en cuenta a) Drift y b) Cortante basal

a)

DRIFT						PROMEDIO	MODELO	Error
SEÑAL 1	SEÑAL 2	SEÑAL 3	SEÑAL 4	SEÑAL 5	SEÑAL 6			
0.0087	0.0078	0.0080	0.0101	0.0095	0.0108	0.0092	NonLinear BRB	-
0.0121	0.0108	0.0104	0.0124	0.0139	0.0140	0.0122	Linear BRB Damp. 5%	33%
0.0095	0.0087	0.0086	0.0108	0.0112	0.0122	0.0102	Linear BRB Damp. 10%	11%

b)

Cortante Basal						PROMEDIO	MODELO	Error
SEÑAL 1	SEÑAL 2	SEÑAL 3	SEÑAL 4	SEÑAL 5	SEÑAL 6			
77617.8	79482.3	84031.1	81551.0	62277.0	87230.9	78698.4	NonLinear BRB	-
105438.9	87448.7	93782.7	82050.5	71725.1	98924.9	89895.1	Linear BRB Damp. 5%	14%
82872.7	70814.2	84836.0	75485.3	67584.1	79520.7	76852.2	Linear BRB Damp. 10%	-2%

Las Tabla 4-9a) y b) muestran el proceso iterativo para obtener el amortiguamiento equivalente usando el sistema de SLB4. A diferencia del sistema con BRBs, el uso de SLB4 proporciona un mayor amortiguamiento equivalente para que el modelo lineal converja con el

modelo “real” o no lineal. En otras palabras, el uso de los dispositivos SLB4 permite aumentar el doble de amortiguamiento que usando BRBs (de 10 a 20%) y por lo tanto un ahorro significativo en el diseño estructural global.

Tabla 4-9. Amortiguamiento equivalente con el sistema de SLB4 teniendo en cuenta a) Drift y b) Cortante basal

a)

DRIFT						PROMEDIO	MODELO	Error
SEÑAL 1	SEÑAL 2	SEÑAL 3	SEÑAL 4	SEÑAL 5	SEÑAL 6			
0.0075	0.0075	0.0076	0.0094	0.0070	0.0097	0.0081	NonLinear SLB	-
0.0110	0.0108	0.0118	0.0123	0.0111	0.0154	0.0121	Linear SLB Damp. 5%	49%
0.0090	0.0088	0.0103	0.0111	0.0105	0.0137	0.0106	Linear SLB Damp. 10%	30%
0.0071	0.0067	0.0080	0.0092	0.0091	0.0111	0.0085	Linear SLB Damp. 20%	5%

b)

Cortante basal						PROMEDIO	MODELO	Error
SEÑAL 1	SEÑAL 2	SEÑAL 3	SEÑAL 4	SEÑAL 5	SEÑAL 6			
73985.2	66312.2	68578.3	69102.0	56017.0	67084.1	66846.5	NonLinear SLB	-
103399.8	81030.3	97864.4	86030.2	86808.0	76987.6	88686.7	Linear SLB Damp. 5%	33%
83451.6	60690.6	88350.9	71064.4	73689.2	67120.4	74061.2	Linear SLB Damp. 10%	11%
66070.3	54768.6	75477.2	62938.4	56132.0	59081.2	62411.3	Linear SLB Damp. 20%	-7%

5. Conclusiones

En esta tesis se ha estudiado y propuesto un nuevo tipo de disipador por corte SLB que pueda extender los límites de deformación de los actuales dispositivos SLB y, que además cumpla con requerimientos similares a los que se le exigen a los brazos de pandeo restringido en la normativa AISC en cuanto a sus protocolos de carga cíclica y ensayos. Este trabajo ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

5.1. Ensayos y su configuración

- Se ha podido observar que el *setup* es un aspecto muy importante para la realización de cualquier ensayo. El *setup* propuesto (Figura 3.13), aunque con resultados imprevistos por ser la primera vez que se realizaba, proporcionó un sistema simple para caracterizar histeréticamente dispositivos de protección sísmica sin recurrir a costosas máquinas especializadas para ello. Adicionalmente permite estudiar el sub-ensamblaje disipador muro de hormigón para caracterizar la respuesta con los anclajes de hormigón.
- En el primer ensayo que se hizo no se evitó el giro del dispositivo en el extremo de carga, con lo que los resultados obtenidos en ese ensayo no son representativos. Sin embargo los otros tres ensayos fueron satisfactorios para poder calibrar el modelo matemático ya que se usó una estructura auxiliar para evitar el giro (Figura 3.14).
- La sujeción del bloque de hormigón a la losa de carga se considera un aspecto significativo a mejorar en próximos ensayos dado que un pequeño giro en la base origina un giro significativo en el extremo del dispositivo donde se aplica la carga. Este efecto se amplifica o se resalta más por la gran rigidez de los dispositivos SLB, los cuales empiezan a plastificar bajo decimas de mm.
- Para futuros ensayos se recomienda reemplazar el bloque de concreto por perfiles metálicos con uniones atornilladas a los dispositivos y con una sujeción muy firme entre el perfil metálico y la losa de carga. De esta forma no se podrían ensayar los anclajes de los dispositivos en hormigón armado pero permitiría atornillar y desatornillar distintos disipadores en el mismo perfil y estarían empotrados en la base.

5.2. Generales

- Ambos dispositivos propuestos (*Alternativa 1 y 2*) pueden verificar los ciclos de carga requeridos para los brazos de pandeo restringido teniendo en cuenta que uno de ellos falló por tener una soldadura insuficiente. Para evitar el fallo en la soldadura de la

Alternativa 2 se podría, por ejemplo, hacer un bisel más grande que asegurase una penetración total de la soldadura.

- En la Figura 3.35 se puede ver que la *Alternativa 1* presenta una curva histerética amplia con lazos convexos lo que implica una gran disipación de energía. Este dispositivo, además, no ha presentado ningún adelgazamiento o “*pinching*” que muestre señal de inicio de fallo.
- Aunque la *Alternativa 1* no fallase ni tuviera pérdida de resistencia en ningún momento se pudo ver en el ensayo, y comprobar numéricamente, que pandea lateralmente a partir de los 32mm de desplazamiento (Figura 3.27). Aunque este hecho no afecte directamente a la disipación de energía del dispositivo es recomendable que esto se evite o se intente reducir.
- Gracias a los ensayos 3 y 4 se puede confirmar que el ratio altura disipativa/espesor de ventana de los dispositivos SLB debe de ser superior a 0.1 para asegurar que no haya abolladura local del alma. Durante el cuarto ensayo se observó inicios de abolladura en el dispositivo que tenía un ratio de 0,08 (espesor de la zona fresada 4mm, altura disipativa 50mm). Para los otros tres ensayos y, con un ratio de 0,1 (espesor de la zona fresada 5mm, altura disipativa 50mm), no se observó signo alguno de inicio de abolladura siendo el ensayo 3 la misma alternativa de disipador pero con más espesor en la zona fresada que en el ensayo 4. De esta forma, gracias a esta tesis, y junto con resultados de ensayos en otras campañas de pruebas, se puede confirmar la observación anterior.

5.3. Correlación numérico experimental

- Los elementos 3D sólidos del software DIANA FEA, junto con la aproximación de Nadai para definir la curva tensión deformación real del acero, proporcionan una buena aproximación para el comportamiento cíclico de los dispositivos. La aproximación de Bozzo para cargas cíclicas mayores a 0.2 de deformación no es precisa ya que aumenta excesivamente las tensiones.
- La pérdida de resistencia que se origina en los ensayos de platina no corresponde a la pérdida de resistencia de los dispositivos ya que éstos son capaces de redistribuir los esfuerzos y, por lo tanto, para su análisis y diseño no se debe incluir dicha caída en la definición del material.
- Se ha comprobado que para este ensayo el modelo isotrópico logra captar de forma más precisa el comportamiento de los disipadores que los modelos cinemáticos. En estudios anteriores (Cocozza, 2016), mediante el software ANSYS, se concluyó que la mejor aproximación al comportamiento cíclico de los dispositivos se conseguía

mediante el modelo de plastificación de Chaboche. Usando el software DIANA FEA, en este trabajo se ha podido observar que el modelo isotrópico también es válido dando una muy buena correlación numérico experimental tal y como muestra la Figura 3.35.

- Un parámetro importante que permite comparar técnicamente la respuesta de brazos excéntricos es la denominada “rotación inelástica” o ratio entre el desplazamiento perpendicular y la longitud del brazo excéntrico. En esta investigación se puede concluir que la rotación inelástica de estos dispositivos es dos veces mayor que en otros dispositivos por corte (Figura 3.37).
- La técnica DIC permite obtener con precisión los desplazamientos y deformaciones pero realizando un ensayo en que la muestra no tenga rotación fuera del plano de la imagen. Para futuros ensayos con esta técnica se tendrá en cuenta fijar bien la muestra.

5.4. Comparativa BRBs vs SLBs en un proyecto real

- Se ha comprobado en el Capítulo 4 que esta nueva generación de SLB aporta un ahorro económico muy importante frente a los BRBs (Tabla 4-1).
- Mediante los modelos no lineales tiempo historia se ha mostrado cómo diseñar los edificios gracias al amortiguamiento equivalente aportado por los dispositivos SLB y BRB. Y, gracias a ello, se ha podido observar que el amortiguamiento equivalente que proporcionan los SLB es mayor que el de los BRBs que, en otras palabras, implica que los SLB aportan un mayor ahorro en el diseño estructural.
- También se han obtenido los desplazamientos de entrepiso gracias a los modelos no lineales tiempo historia, y se ha podido comprobar un mejor comportamiento estructural del edificio equipado con SLB que con BRB. Comparando los resultados obtenidos con los BRB y los SLB, observamos que los SLB reducen un 15% el cortante basal y, además, presentan un drift menor en la mayor parte del edificio (Tabla 4-7).
- Se puede observar que la respuesta estructural usando SLB respecto los BRB mejora cuanto mayor sea la altura del edificio, con lo que se puede prever que para edificios de gran altura los dispositivos SLB de cuarta generación darán una mejor respuesta estructural al edificio que los BRBs (Tabla 4-7).

Referencias

- AISC. (2016). *Specification for Structural Steel Buildings*. Illinois.
- Bozzo, L. M. (2020). *Análisis y diseño utilizando disipadores sísmicos tipo SLB*. Barcelona.
- Bozzo, L. M., & Barbat, A. H. (1999). *Diseño sismorresistente de edificios - Técnicas convencionales y avanzadas*. Barcelona: REVERTE.
- Bozzo, L. M., & Bozzo, M. (2003). *Losas reticulares mixtas - Proyecto, análisis y dimensionamiento*. Barcelona: Editorial Reverté.
- Bozzo, L. M., Foti, D., & Lopez-Almansa, F. (1996). Design criteria for earthquake resistant buildings with energy dissipators. *11th World Conference on Earthquake Engineering*. Acapulco.
- Bozzo, L. M., Ramirez, J., Bairan, J., Bozzo, G., & Muñoz, E. (2020). Precast buildings equipped with SLB seismic devices. *17th World Conference on Earthquake Engineering*. Sendai.
- Bryan Riggs. (2017, Enero 5). *2D Digital Image Correlation using Ncorr (MATLAB) - Tutorial (PART 1) [video]*. Retrieved from <https://www.youtube.com/watch?v=cXfeiBXjN18>
- Cocozza, F. (2016). *Numerical modelling and experimental behaviour of "Bozzo Shear Link" dissipators*. Tesi di Laurea. UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II.
- Corporación de Desarrollo Tecnológico. (2012). *Sistemas de Aislación Sísmica y Disipación de Energía. EMB Construcción*.
- FEMA 356. (2000). *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. Reston.
- Ferreira, D., & Schreppers, G.-J. (2020). *Diana User's Manual*. Delft: DIANA FEA bv.
- Franchioni G. (2001). *Experimental investigations on semi-active and passive systems for seismic risk mitigation*. ISMES.
- Hurtado, F. (2006). *Propuesta de disipador genérico "SL" para edificios y su diseño sismorresistente*. Doctoral thesis.
- Hurtado, F., & Bozzo, L. M. (2008). Numerical and experimental analysis of a shear-link energy dissipater for seismic protection of buildings. *14th World Conference on Earthquake Engineering*. China.
- Ma, X.; Borchers, E.; Pena, A.; Krawinkler, H.; Billington, S.; Deierlein, G.G.;. (2010). *Design and Behavior of Steel Shear Plates with Openings ad Energy-dissipating Fuses*. Department of Civil and Enviromental Engineering, Stanford University.
- Nonlinear Buckling of a Cylinder*. (n.d.). Retrieved Diciembre 2020, from DIANA FEA: https://dianafea.com/system/files/bucklcylinder_104.pdf
- Norma Técnica de Edificación E.030 Diseño Sismorresistente*. (2017). Lima.

Nuzzo, I., Losanno, D., Caterino, N., Serino, G., & Bozzo, L. M. (2017). Experimental investigation of low cost steel shear links for seismic energy dissipation. *Journal of Engineering Structures* .

Pantoja, M., Flores, M., Bozzo, L. M., & Gonzales, H. (2020). NUMERICAL ANALYSIS AND EXPERIMENTAL CORRELATION OF UNCOUPLED CONCRETE WALLS INCORPORATING SLB DEVICES. *17th World Conference on Earthquake Engineering* .

Popov, E. P., Kasai, K., & Engelhardt, M. D. (1987). *Advances in Design of Eccentrically Braced Frames*. Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering.

Sabelli, R., Mahin, S., & Chunho, C. (2003). Seismic demands on steel braced frame buildings with buckling-restrained braces. *Engineering Structures* .

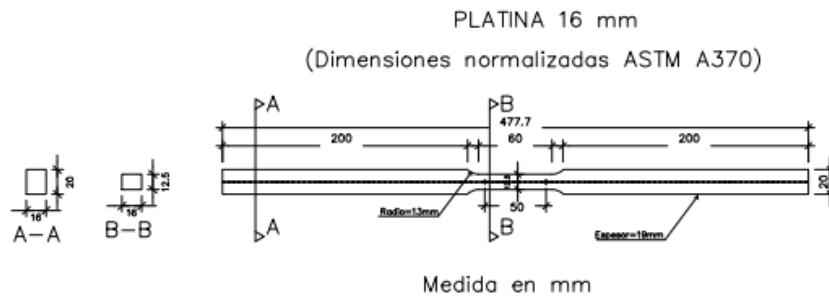
Tsai, K. C., Chen, H. W., Hong, C. P., & Su, Y. (1993). *Design of steel triangular plate energy absorber for seismic resistance construction*.

Watanabe, A., Hitomi, Y., Saeki, E., Wada, A., & Fujimoto, M. (1988). *Properties of brace encased in buckling-restraining concrete and steel tube*. Tokyo: JADP.

Whittaker, A., Bertero, V., Alonso, J., Thompson, C., & Scholl, R. (1998). *Passive energy dissipation using steel plate added damping and stiffness elements* .

Xiaodong Ji, Y. W. (2016). Cyclic behavior of very short steel shear links. *Journal of Structural Engineering* .

Anexo 1. Ensayos de platina de 16mm y 25mm



LABORATORIO DE MATERIALES

Departamento de Ingeniería
Sección Ingeniería Mecánica



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

CON SISTEMA DE ASEGURAMIENTO DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025

CA/LMSIM/476/2020

Lima, 25 de noviembre de 2020

Señores:
POSTENSA S.A.C
Presente. -

Estimados Señores:

En relación al ensayo realizado en nuestro laboratorio, correspondiente al servicio con código **MAT-NOV-0834/2020**, y de acuerdo con el requerimiento indicado, hacemos extensiva la siguiente información adicional:

- Proyecto: Universidad Santa María de Arequipa.
- Ensayo de Disipadores en Cantabria.

Atentamente,

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica

MSc. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP. 123320
Jefe de Laboratorio de Materiales

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales - PUCP

Av. Universitaria 1801 - San Miguel.
Lima - Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 - Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

Telefax
(511) 626 - 2855

 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	LABORATORIO DE MATERIALES CITE materiales LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL – DA CON REGISTRO N°LE-027	 INACAL DA - Perú Laboratorio de Ensayo Acreditado Registro INACAL: 027
CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025		

INFORME DE ENSAYO

Informe N° : MAT-NOV-0834-2020

Número de Páginas : 3

Solicitado por : POSTENSA S.A.C

Dirección : Calle Teniente Alberto Chabrier N° 126 San Isidro - Lima

Fecha de Emisión : 2020.11.25.

1. CONDICIONES DE ENSAYO

- **Tipo de Ensayo** : Tracción
- **Métodos de Ensayo** :
 - ASTM A370 – 19 e1 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
 - ASTM E8/E8M – 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- **Fecha de Ejecución** : 2020.11.24.

2. CONDICIONES AMBIENTALES

- **Lugar de Ensayo** : Laboratorio de Materiales (PUCP).
- **Temperatura** : Temperatura Ambiente (20°C).

3. OBSERVACIONES

- Las muestras ensayadas fueron proporcionadas por el solicitante.

1 de 3

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales – PUCP

Av. Universitaria, 1801 – San Miguel,
Lima – Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 – Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 – 3000
Anexo: 4642

Telefax
(511) 626

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Secretaría de Investigación Científica

MSc. ANDRÉS ROJO BALBUENA CIP, 124820
Jefe de Laboratorio de Materiales



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATOLICA
DEL PERÚ

LABORATORIO DE MATERIALES CITE materiales



CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025

MAT-NOV-0834/2020

ENSAYO DE TRACCIÓN

MAT-Lab-4.04 Rev.6

INFORME DE LABORATORIO

Número Total de Páginas: 3

REALIZADO POR : Laboratorio de Materiales - Analista 04.

MUESTRA : Probetas de acero.

FECHA DE EJECUCIÓN : 2020.11.24.

RESULTADOS:

MUESTRA		T1	T2
SECCIÓN TRANSVERSAL	ANCHO (mm)	12.40	12.55
	ESPEJOR (mm)	15.85	15.80
	ÁREA (mm ²)	196.5	198.3
CARGAS (kN)	FLUENCIA	63.5	65.5
	MÁXIMA	95.6	95.7
ESFUERZOS (MPa)	FLUENCIA	323	330
	MÁXIMA	487	482
LONGITUD ENTRE MARCAS (mm)		50.0	50.0
LONGITUD FINAL ENTRE MARCAS (mm)		69.8	69.9
ALARGAMIENTO (%)		39.6	39.9

Incertidumbres (factor de cobertura K=2, para un nivel de confianza de 95%)

• Esfuerzo máximo (MPa)	± 4.3	± 4.2
• Esfuerzo de fluencia (MPa)	± 3.7	± 3.8
• Alargamiento (%)	± 0.9	± 0.9

OBSERVACIONES:

- Condición de las muestras: Sección reducida normalizada.
- Las probetas ensayadas fueron proporcionadas por el solicitante.
- La probeta T1 fue extraída de la muestra UCSM M1.
- La probeta T2 fue extraída de la muestra UCSM M2.

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales.

Los resultados no pueden ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

2 de 3

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio

Av. Universitaria 1801 - San Miguel
Lima - Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 - Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica
ING. ANDRÉS ROZAS GALLEGOS CIP. 113029
Jefe del Laboratorio de Materiales



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

LABORATORIO DE MATERIALES CITE materiales



INACAL
DA - Perú
Laboratorio de Ensayo
Autorizada

Registro N° 12 - 027

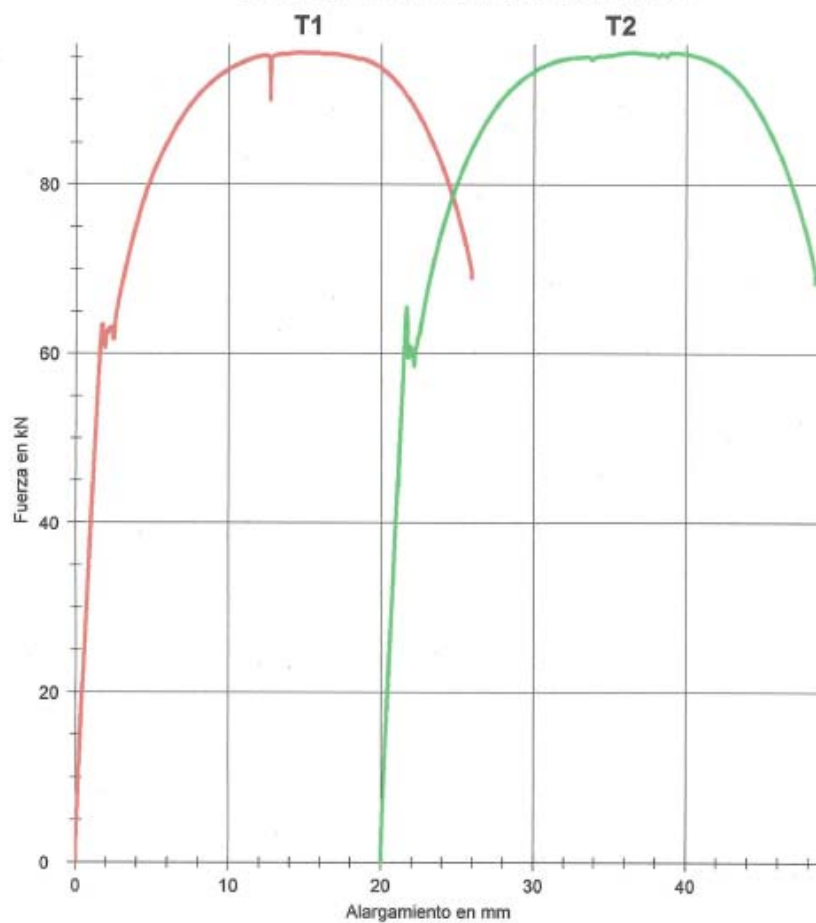
CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025

24.11.20

Zwick / Roell

MAT-NOV-0834/2020

CURVA FUERZA - ALARGAMIENTO



AC - 30061

3 de 3

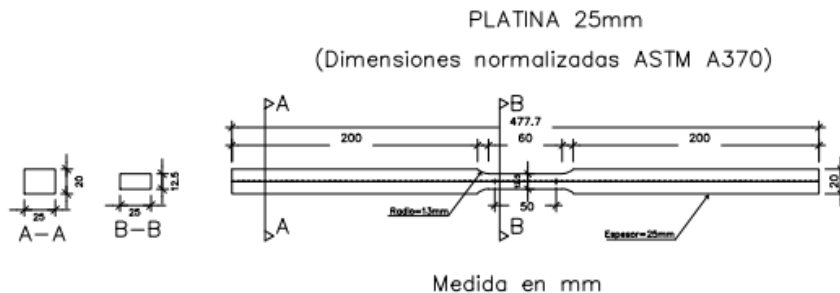
Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio

Av. Universitaria 1801 - San Miguel,
Lima - Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 - Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica
MSc. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP. 123020
Jefe de Laboratorio de Materiales



 PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ	LABORATORIO DE MATERIALES CITE Materiales LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL – DA CON REGISTRO N°LE-027	 INACAL DA - Perú Organismo de Acreditación Registro N°LE-027
CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025 INFORME DE ENSAYO		

Informe N° : MAT-ENE-0065-1-2020.

Número de Páginas : 3

Solicitado por : POSTENSA S.A.C.

Dirección : Jirón Jorge Vanderghen N° 351 Miraflores – Lima.

Fecha de Emisión : 2020.01.21.

1. CONDICIONES DE ENSAYO

- **Tipo de Ensayo** : Tracción
- **Métodos de Ensayo** :
 - ASTM A370 – 18 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
 - ASTM E8/E8M – 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- **Fecha de Ejecución** : 2020.01.21.

2. CONDICIONES AMBIENTALES

- **Lugar de Ensayo** : Laboratorio de Materiales (PUCP).
- **Temperatura** : Temperatura Ambiente (24°C).

3. OBSERVACIONES

- Las muestras ensayadas fueron proporcionadas por el solicitante.

1 de 3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica


 MSc. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP: 123020
 Director Citemateriales

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales – PUCP.

Av. Universitaria 1801 – San Miguel.
Lima – Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 – Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

Telefax
(511) 626 - 2855





PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

LABORATORIO DE MATERIALES CITE materiales



Registro N° 127 - 027

CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025

MAT-ENE-0065-1/2020

ENSAYO DE TRACCIÓN

MAT-Lab-4.04 Rev.6

INFORME DE LABORATORIO

Número Total de Páginas: 3

REALIZADO POR : Laboratorio de Materiales - Analista 05.
MUESTRA : 01 Probeta de acero plana N°1
FECHA DE EJECUCIÓN : 2020.01.21

RESULTADOS:

MUESTRA		1
SECCIÓN TRANSVERSAL	ANCHO (mm)	12.34
	ESPESOR (mm)	24.35
	ÁREA (mm ²)	300.5
CARGAS (kN)	FLUENCIA	96.6
	MÁXIMA	140.0
ESFUERZOS (MPa)	FLUENCIA	321
	MÁXIMA	466
LONGITUD ENTRE MARCAS (mm)		50.0
LONGITUD FINAL ENTRE MARCAS (mm)		71.3
ALARGAMIENTO (%)		42.5

Incertidumbres (factor de cobertura K=2, para un nivel de confianza de 95%)

• Esfuerzo máximo (MPa)	± 3.8
• Esfuerzo de fluencia (MPa)	± 3.5
• Alargamiento (%)	± 0.8

OBSERVACIONES:

- Condición de la muestra: Visualmente en buen estado.
- La probeta ensayada fue proporcionada por el solicitante.

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales.

Los resultados no pueden ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

2 de 3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica

MSc. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP 123420
Director Citemateriales

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales – PUCP

Av. Universitaria 1801 – San Miguel,
Lima – Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 – Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

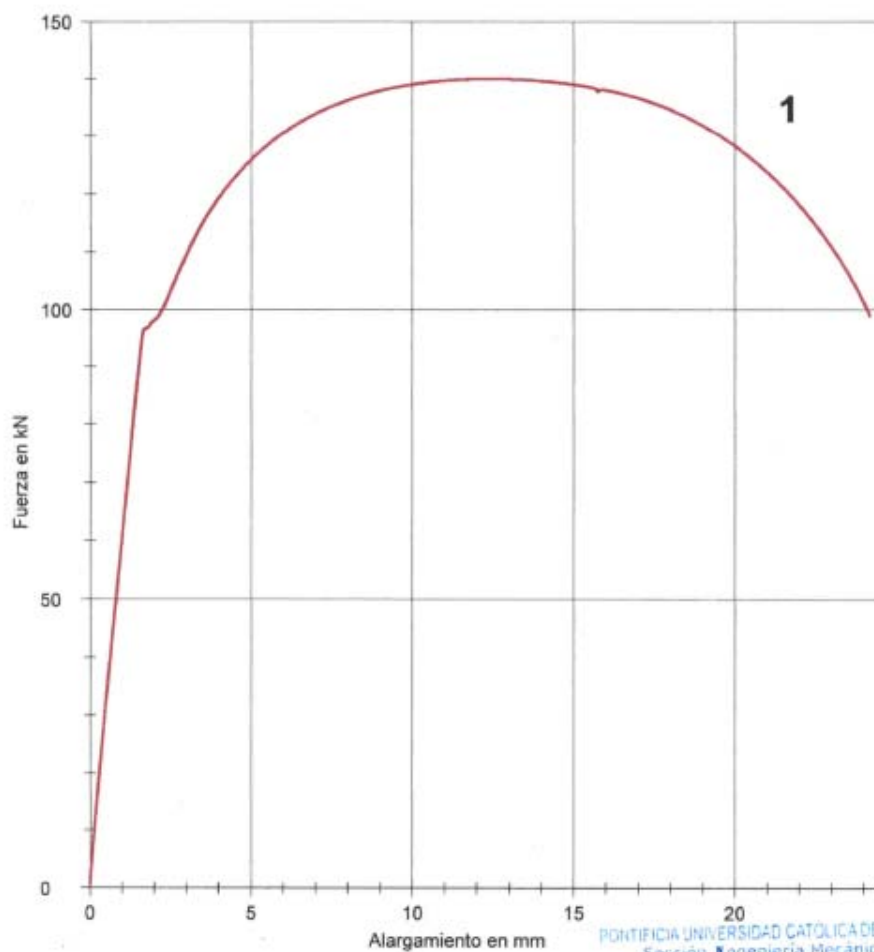
Telefax
(511) 626 - 2855

21.01.20

Zwick / Roell

MAT-ENE-0065-1/2020

CURVA FUERZA - ALARGAMIENTO



3 de 3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica

MSr. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP. 123620
Director Citemateriales

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales - PUCP

Av. Universitaria 1801 - San Miguel.
Lima - Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 - Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

Telefax
(511) 626 - 2855

INFORME DE ENSAYO

Informe N° : MAT-ENE-0065-2-2020.

Número de Páginas : 3

Solicitado por : POSTENSA S.A.C.

Dirección : Jirón Jorge Vanderghen N° 351 Miraflores – Lima.

Fecha de Emisión : 2020.01.21.

1. CONDICIONES DE ENSAYO

- **Tipo de Ensayo** : Tracción
- **Métodos de Ensayo** :
 - ASTM A370 – 18 Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products
 - ASTM E8/E8M – 16a Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials
- **Fecha de Ejecución** : 2020.01.21.

2. CONDICIONES AMBIENTALES

- **Lugar de Ensayo** : Laboratorio de Materiales (PUCP).
- **Temperatura** : Temperatura Ambiente (24°C).

3. OBSERVACIONES

- Las muestras ensayadas fueron proporcionadas por el solicitante.

1 de 3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica


MSc. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP. 123620
Director Citemateriales

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales – PUCP.

Av. Universitaria 1801 – San Miguel.
Lima – Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 – Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

Telefax
(511) 626 - 2855





PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

LABORATORIO DE MATERIALES CITE materiales



Registro N° 111- 017

CON SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD SEGÚN NTP ISO/IEC 17025

MAT-ENE-0065-2/2020

ENSAYO DE TRACCIÓN

MAT-Lab-4.04 Rev.6

INFORME DE LABORATORIO

Número Total de Páginas: 3

REALIZADO POR : Laboratorio de Materiales - Analista 05.
MUESTRA : 01 Probeta de acero plana N°2
FECHA DE EJECUCIÓN : 2020.01.21

RESULTADOS:

MUESTRA		1
SECCIÓN TRANSVERSAL	ANCHO (mm)	12.31
	ESPESOR (mm)	24.25
	ÁREA (mm ²)	298.5
CARGAS (kN)	FLUENCIA	102.0
	MÁXIMA	142.0
ESFUERZOS (MPa)	FLUENCIA	342
	MÁXIMA	476
LONGITUD ENTRE MARCAS (mm)		50.0
LONGITUD FINAL ENTRE MARCAS (mm)		70.2
ALARGAMIENTO (%)		40.3

Incertidumbres (factor de cobertura K=2, para un nivel de confianza de 95%)

• Esfuerzo máximo (MPa)	± 3.8
• Esfuerzo de fluencia (MPa)	± 3.7
• Alargamiento (%)	± 0.8

OBSERVACIONES:

- Condición de la muestra: Visualmente en buen estado.
- La probeta ensayada fue proporcionada por el solicitante.

Los resultados presentados son válidos únicamente para las muestras ensayadas.

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales.

Los resultados no pueden ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce.

2 de 3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica

MSc. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP. 123020
Director Citemateriales

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales - PUCP

Av. Universitaria 1801 - San Miguel
Lima - Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 - Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

Telefax
(511) 626 - 2855



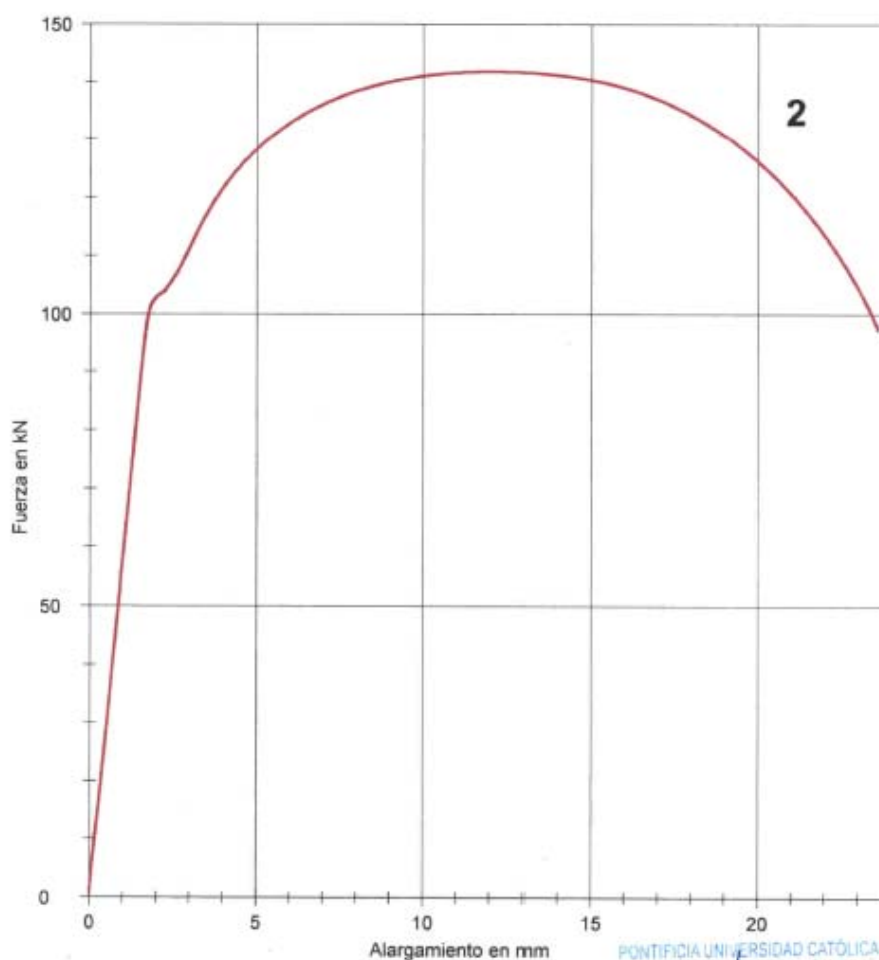
AC - 05365

21.01.20

Zwick / Roell

MAT-ENE-0065-2/2020

CURVA FUERZA - ALARGAMIENTO



3 de 3

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
Sección Ingeniería Mecánica

MSc. ANIBAL ROZAS GALLEGOS CIP. 123020
Director Citemateriales

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe sin la autorización escrita del Laboratorio de Materiales - PUCP

Av. Universitaria 1801 - San Miguel,
Lima - Perú
<http://www.pucp.edu.pe>

Apartado Postal
N° 1761 Lima 100 - Perú
labmat@pucp.edu.pe

Teléfono
(511) 626 - 2000
Anexo: 4842

Telefax
(511) 626 - 2855

Anexo 2. Informe del laboratorio

LADICIM

Universidad de Cantabria
E.T.S. de Ing. de Caminos, Canales y Puertos
Avda. de los Castros, nº 44.
39005-Santander, Cantabria, Spain.
tel: **+34 942 201 819**. Fax: **+34 942 201 818**
e-mail: **ladicim@unican.es**
www.ladicim.unican.es

INFORME Nº 20208/01

CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE DISIPADORES SLB

LADICIM
LABORATORIO DE LA DIVISIÓN DE
CIENCIA E INGENIERÍA DE LOS MATERIALES

UC
UNIVERSIDAD
DE CANTABRIA

DATOS DEL CLIENTE:

Solicitado por:	LUIS BOZZO ESTRUCTURAS Y PROYECTOS, S.L.
Dirección:	Calle Bailen, 71 bis 4º-1ª, 08009 Barcelona (España)
Contacto:	Luis Bozzo
e-mail:	lbozrot@ciccp.es
Teléfono:	616 03 05 42

INFORMACIÓN SUMINISTRADA POR EL CLIENTE:

Armadura según plano

DATOS DE LAS MUESTRAS

Código	Descripción	Ref. Cliente
20208B-1	Disipador de acero	SLB4 20_5_Sin alas
20208B-2	Disipador de acero	SLB4 20_5_Sin alas
20208B-3	Disipador de acero	SLB4 20_5
20208B-4	Disipador de acero	SLB4 20_4



Figura 1. Aspecto de los dos tipos de disipadores ensayados en recepción, SLB4 20_5_Sin alas (izq.) y SLB4 20_5 (der.)

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

FECHAS:

Recepción de muestras	15 de octubre de 2020
Ensayo	25 de noviembre de 2020

ENSAYOS REALIZADOS EN EL INFORME:

Ensayo	Norma	Metodología
Fabricación (armado/hormigonado)	---	Procedimiento interno
Ensayos del hormigón	UNE 12390-3:2009	---
Ensayos de histéresis sobre disipadores		Procedimiento interno

Preparación de las muestras de ensayo:**1. Preparación de las armaduras:**

Tras recibir las barras corrugadas, dobladas en la planta de prefabricados de acuerdo a los planos proporcionados por el cliente, se procedió a introducir los disipadores en el interior del armado principal. Tras posicionar cada disipador se procedió a fijarlo y culminar el ensamblado de la armadura mediante soldaduras en el LADICIM.



Figura 2. Aspecto de las barras corrugadas tras la preparación en la planta de prefabricados (izq.) y labores de soldadura realizadas en el laboratorio (der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

2. Encofrado y hormigonado

Finalizado la preparación de las armaduras de refuerzo de los disipadores, se continuó con el encofrado y hormigonado. Debido a la elevada densidad de armaduras se utilizó hormigón autocompactante.

La capacidad de las amasadoras disponibles en el laboratorio obligó a realizar dos amasadas de hormigón para cada disipador. Se fabricaron dos probetas cúbicas de lado 100 mm en cada amasada para determinar la resistencia a compresión del hormigón durante los días que se realizaron los ensayos.



Figura 3. Detalle del armado de los disipadores 20208B-1,2 y 3 (izq.) y del disipador 20208B-4 (der.)



Figura 4. Aspecto del encofrado tras añadir la primera amasada de hormigón (izq.) y aspecto de los cuatro disipadores en los bloques de hormigón (der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

3. Realización de los ensayos

Los ensayos se desarrollaron en un banco metálico acanalado, los bloques de hormigón se fijaron al banco mediante varillas roscadas de alta resistencia y chapas de acero, del mismo modo se fijó el dissipador al actuador. Adicionalmente, se colocó en el actuador un taco de madera del ancho del bastidor para evitar desplazamiento en el eje perpendicular al del actuador.

Se aplicaron rampas simétricas de desplazamiento proporcionadas por el cliente. Durante los ensayos se registró el desplazamiento del actuador dotado de un LVDT y la carga aplicada por un actuador con célula de carga de 500 kN.



Figura 5. Detalle de la fijación de uno de los dissipadores en el banco de ensayos (izq.) y detalle del dissipador bajo el actuador (der.)

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

RESULTADOS:

Ensayo de compresión sobre probeta cúbica de hormigón 100x100 mm

Bloque	Amasada	Resistencia a compresión (MPa)	Resistencia a compresión media (MPa)	Resistencia a compresión con factor 0,9 (MPa)
1	1	48.58	54.315	48.884
		52.25		
	2	57.38		
		59.05		
2	1	51.32	54.153	48.737
		66.64		
	2	48.84		
		49.81		
3	1	43.55	49.785	44.8
		44.43		
	2	51.24		
		59.92		
4	1	54.76	56.858	51.172
		62.83		
	2	54.01		
		55.83		

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

Ensayos de histéresis sobre disipadores

Muestra 20208B-1 (SLB4 20_5_Sin alas)

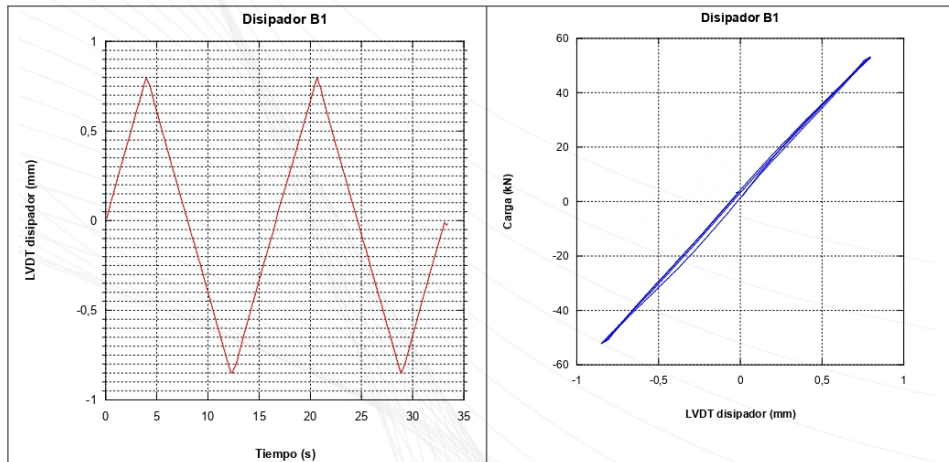


Figura 6. Primer bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-1(der.).

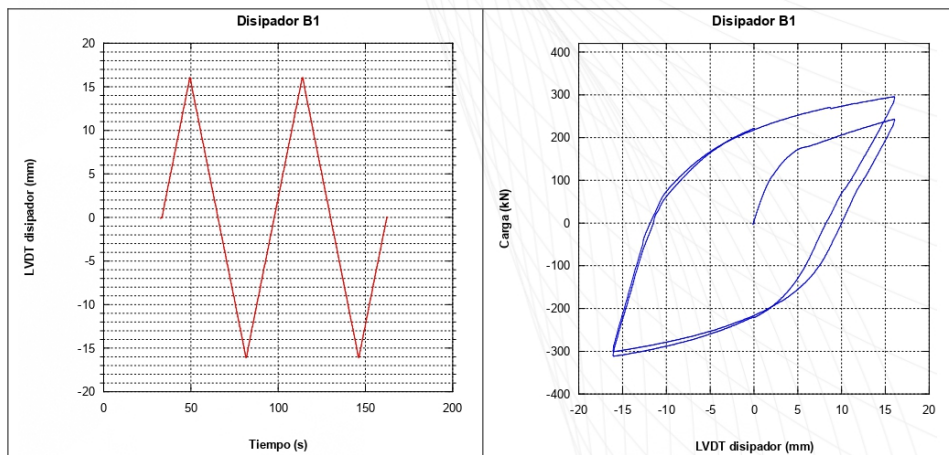


Figura 7. Segundo bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-1(der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

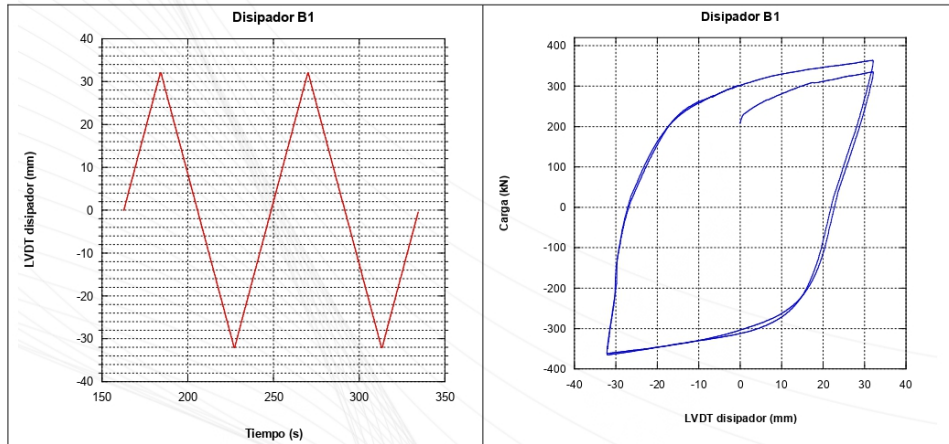


Figura 8. Tercer bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-1(der.)

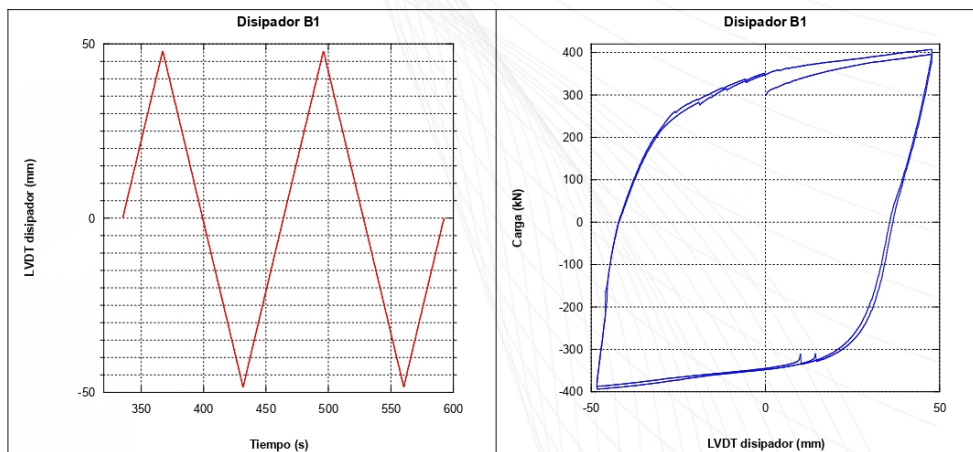


Figura 9. Cuarto bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-1(der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

Muestra 20208B-2 (SLB4 20_5_Sin alas)

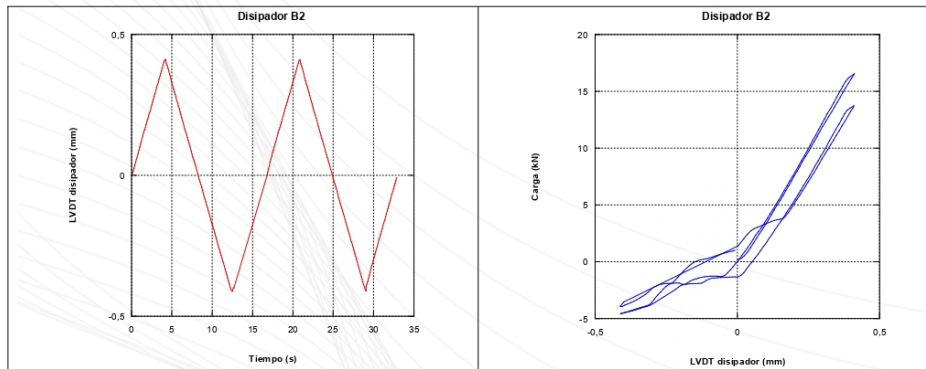


Figura 10. Primer bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-2(der.).

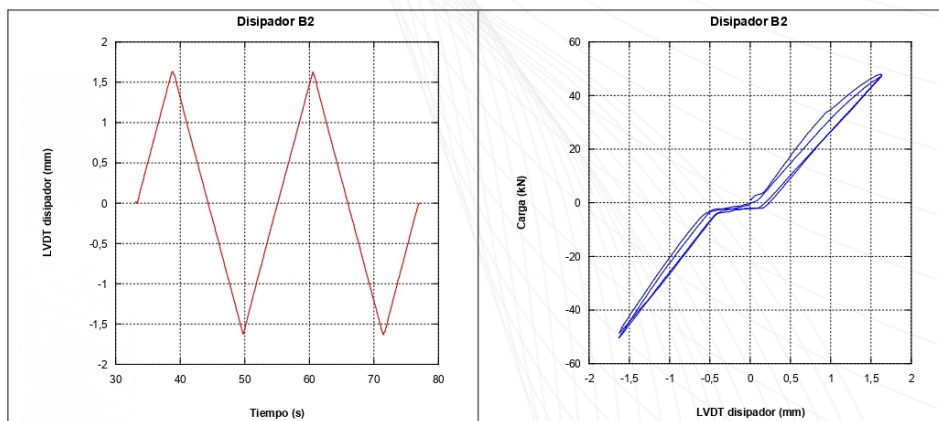


Figura 11. Segundo bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-2(der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

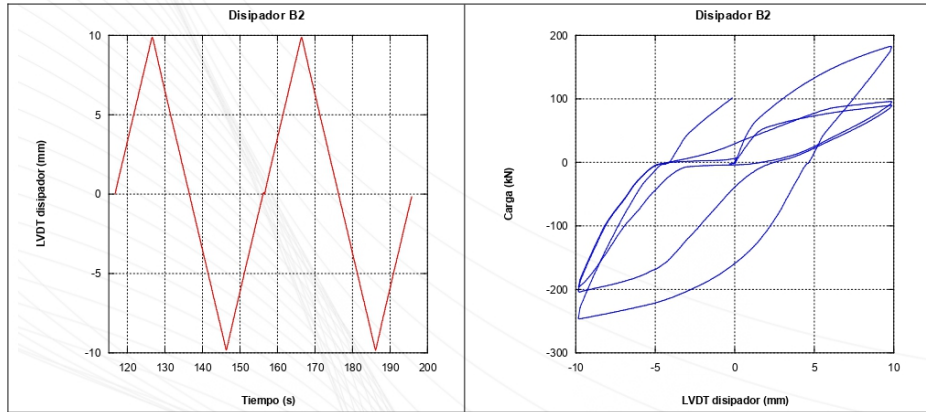


Figura 12. Tercer bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-2(der.).

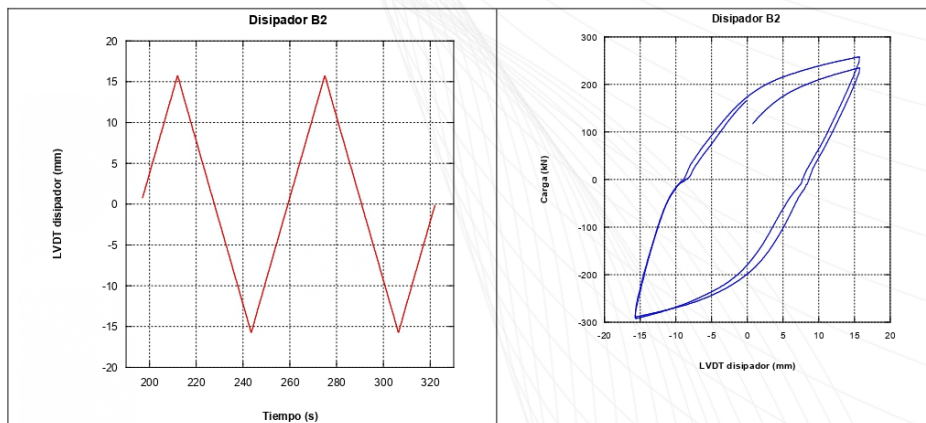


Figura 13. Cuarto bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-2(der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

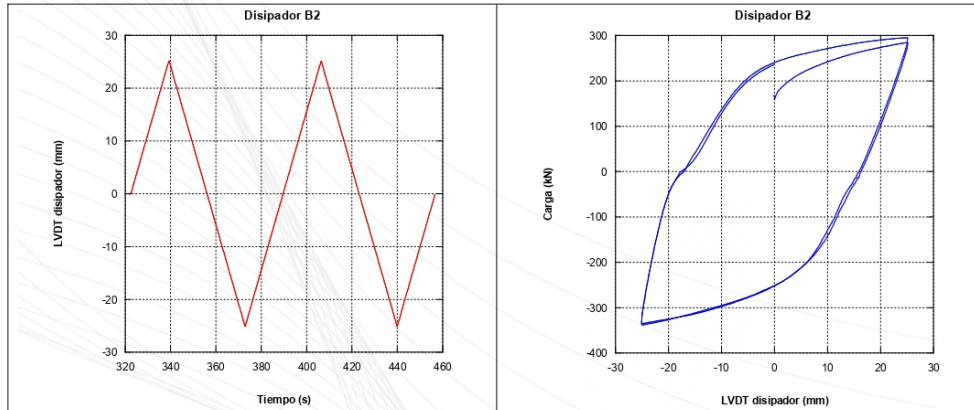


Figura 14. Quinto bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-1(der.).

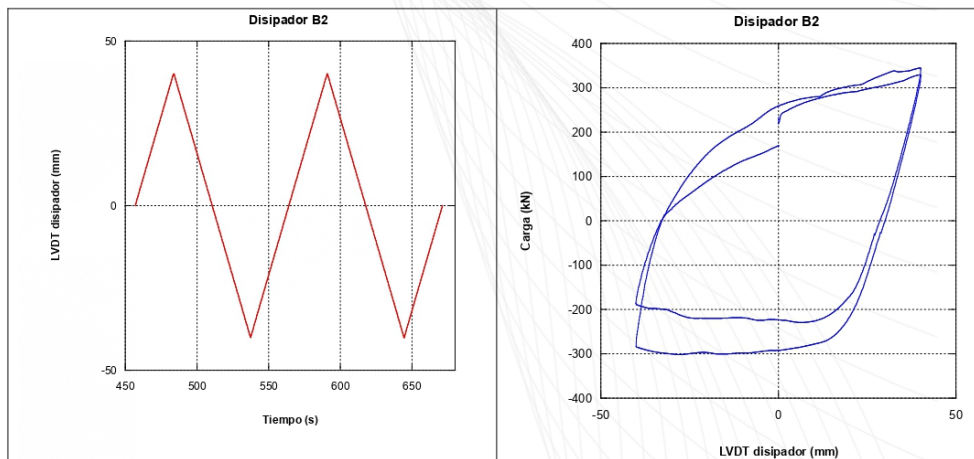


Figura 15. Sexto bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-2(der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

Muestra 20208B-3 (SLB4 20_5)

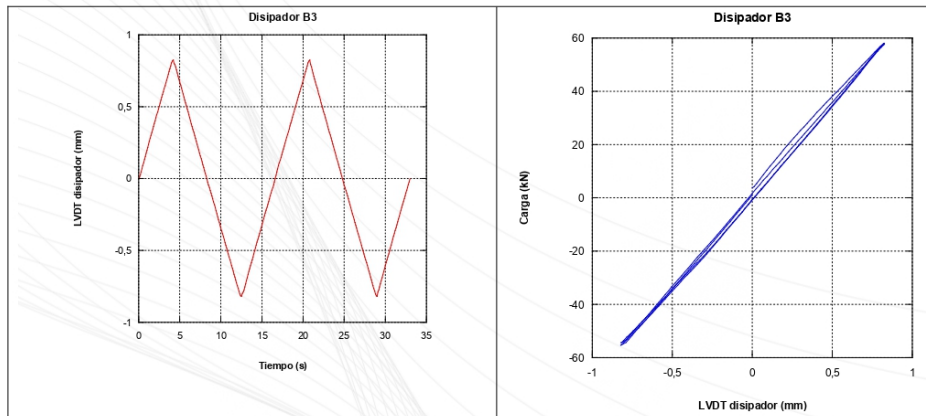


Figura 16. Primer bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-3(der.).

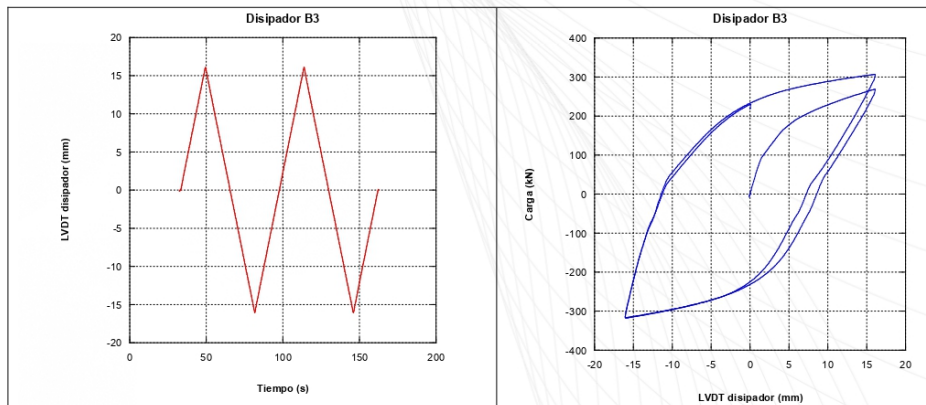


Figura 17. Segundo bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-3(der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

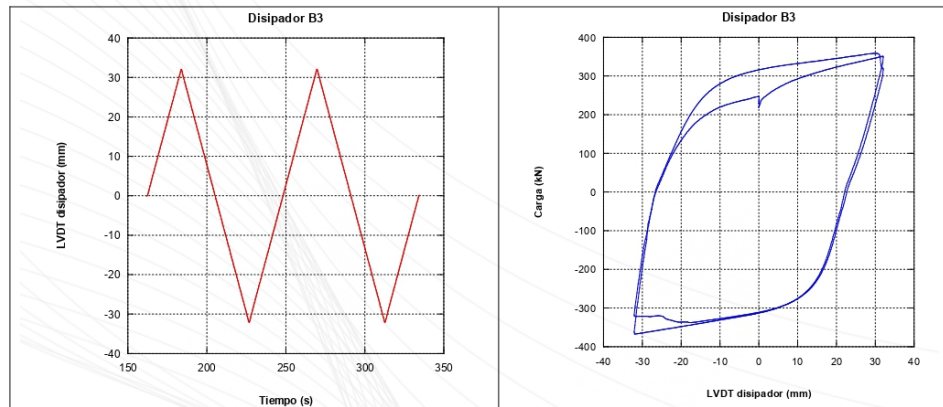


Figura 18. Tercer bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-3(der.).

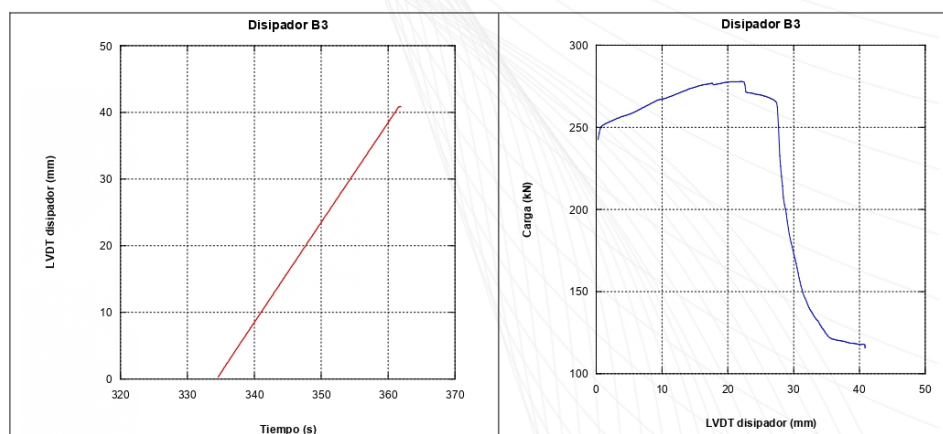


Figura 19. Cuarto bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-3(der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

Muestra 20208B-4 (SLB4 20_4)

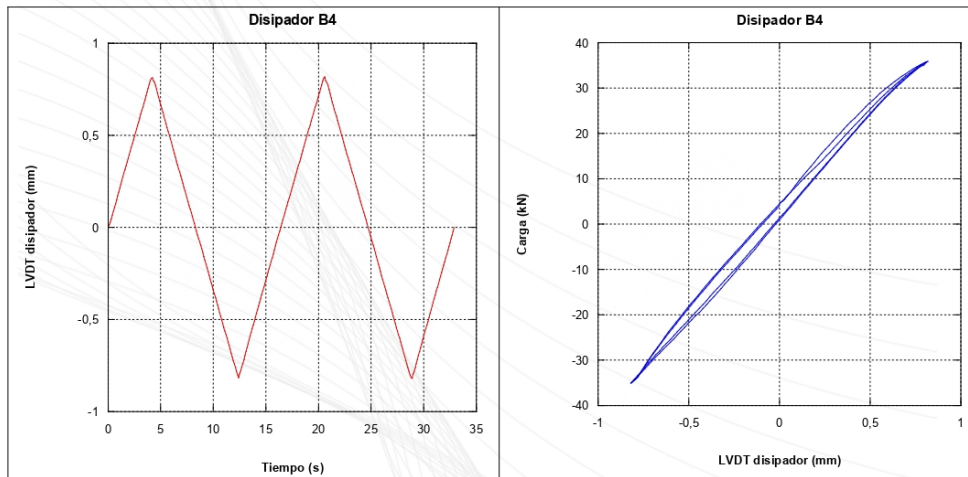


Figura 20. Primer bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-4(der.).

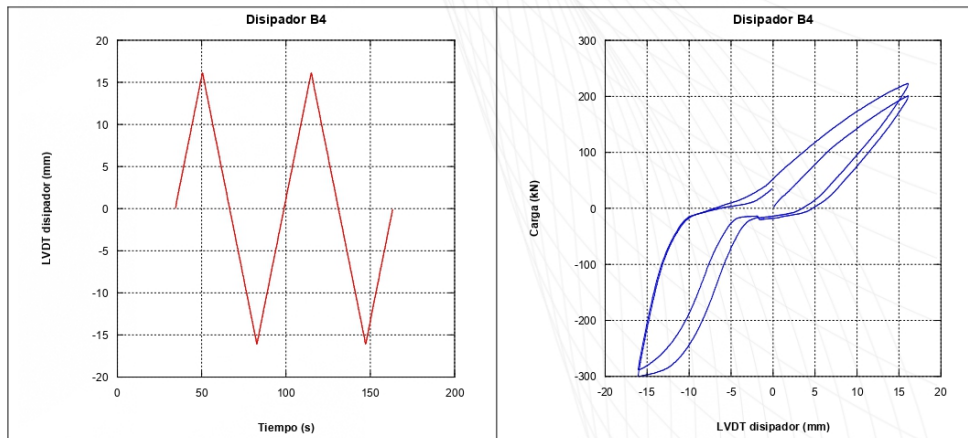


Figura 21. Segundo bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-4 (der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

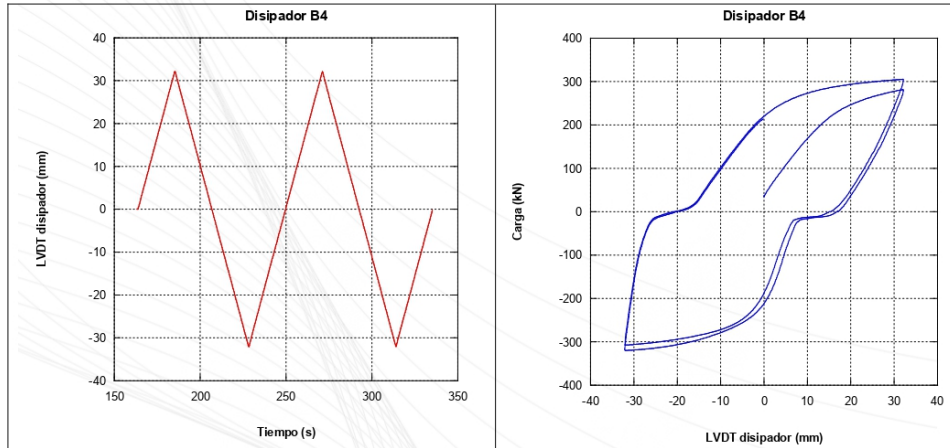


Figura 22. Tercer bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-4(der.).

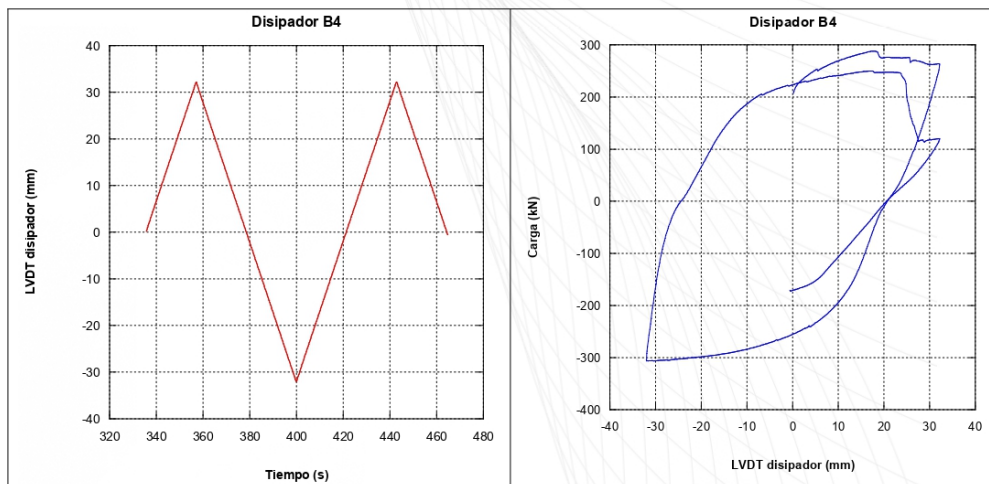


Figura 23. Repetición del tercer bloque de desplazamiento aplicado (izq.) y comportamiento de la muestra 20208B-4(der.).

Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

CONSERVACIÓN DE LAS MUESTRAS ENSAYADAS

De no indicarse lo contrario, el LADICIM desechará las muestras recepcionadas tras un período de almacenamiento de tres meses, posterior a la emisión del informe.

Santander, 18 de diciembre de 2020.

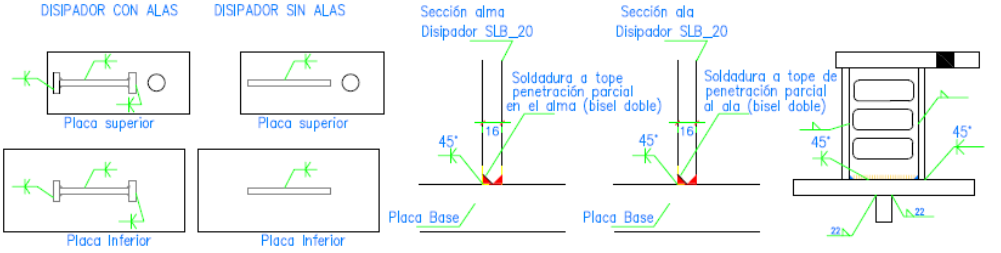
Firmado:



Firmado digitalmente
por CARRASCAL
VAQUERO ISIDRO
ALFONSO - 09780749E
Fecha: 2020.12.18
15:55:01 +01'00'

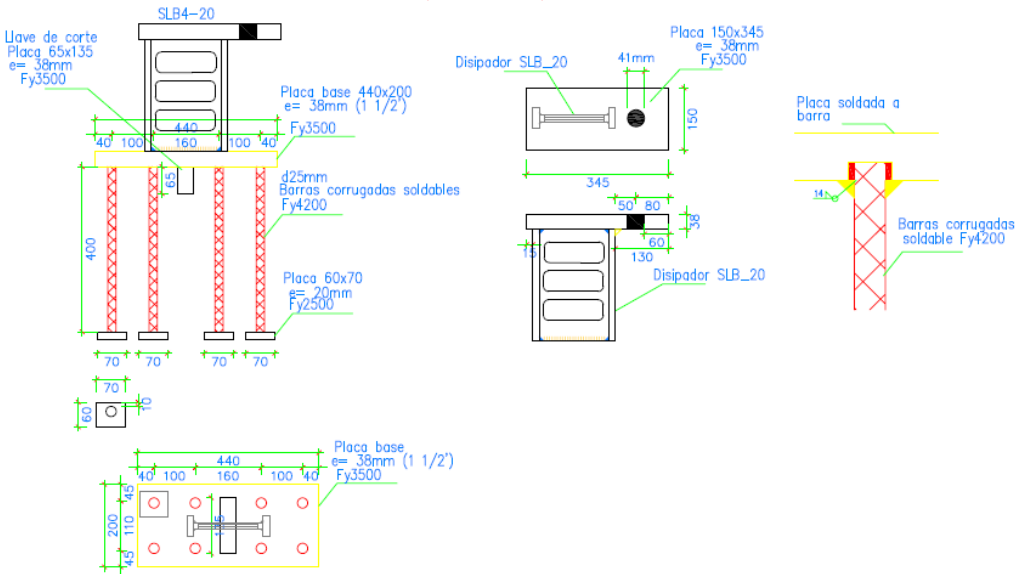
Este informe consta de 16 hojas numeradas correlativamente. Sólo afecta a las muestras sometidas a ensayo. No podrá ser reproducido parcialmente sin la autorización escrita del LADICIM. Cualquier impresión del informe será considerada como una copia. La información incluida en este informe identificada como proporcionada por el cliente es responsabilidad única del mismo.

Anexo 3. Disposición del ensayo



Nota: Todas las soldaduras son de FEXX 70KSI
 Nota: El detalle de soldadura es el mismo tanto para la placa superior e inferior

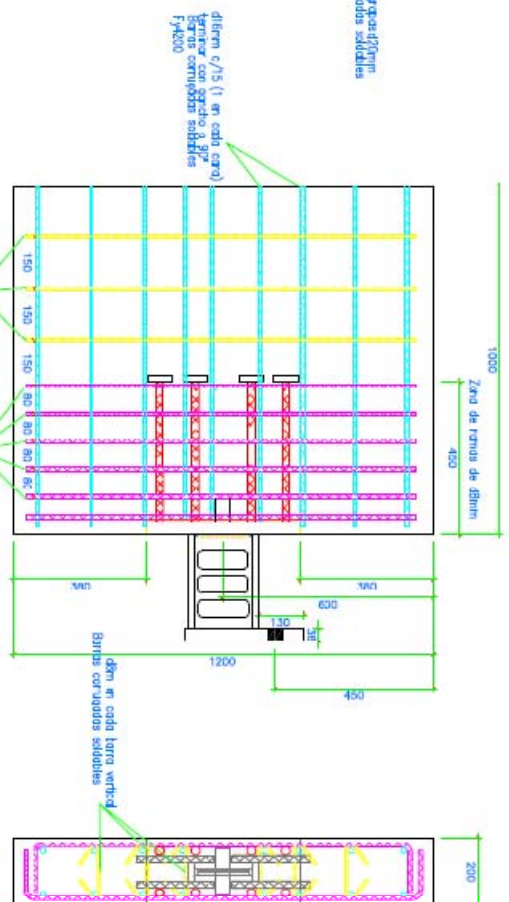
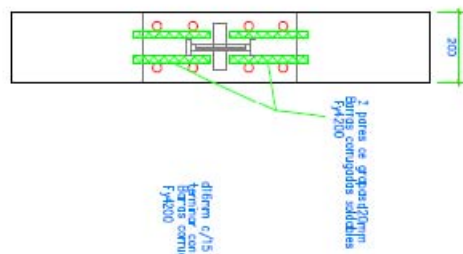
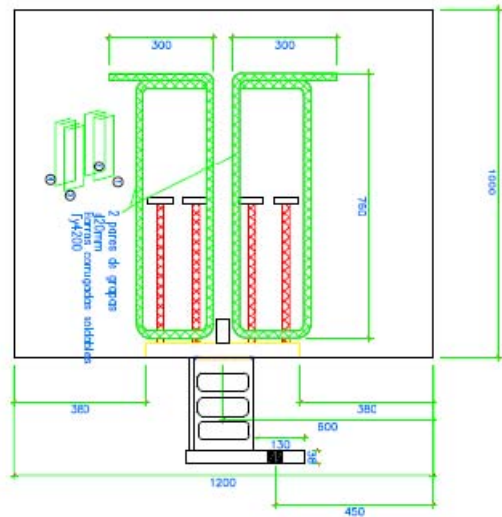
Detalle de soldaduras disipador a placas



Detalle placa base disipador y anclajes

DETALLE CONEXIÓN DISIPADOR CON MURO DE HORMIGÓN

ELEVACIÓN 1/10



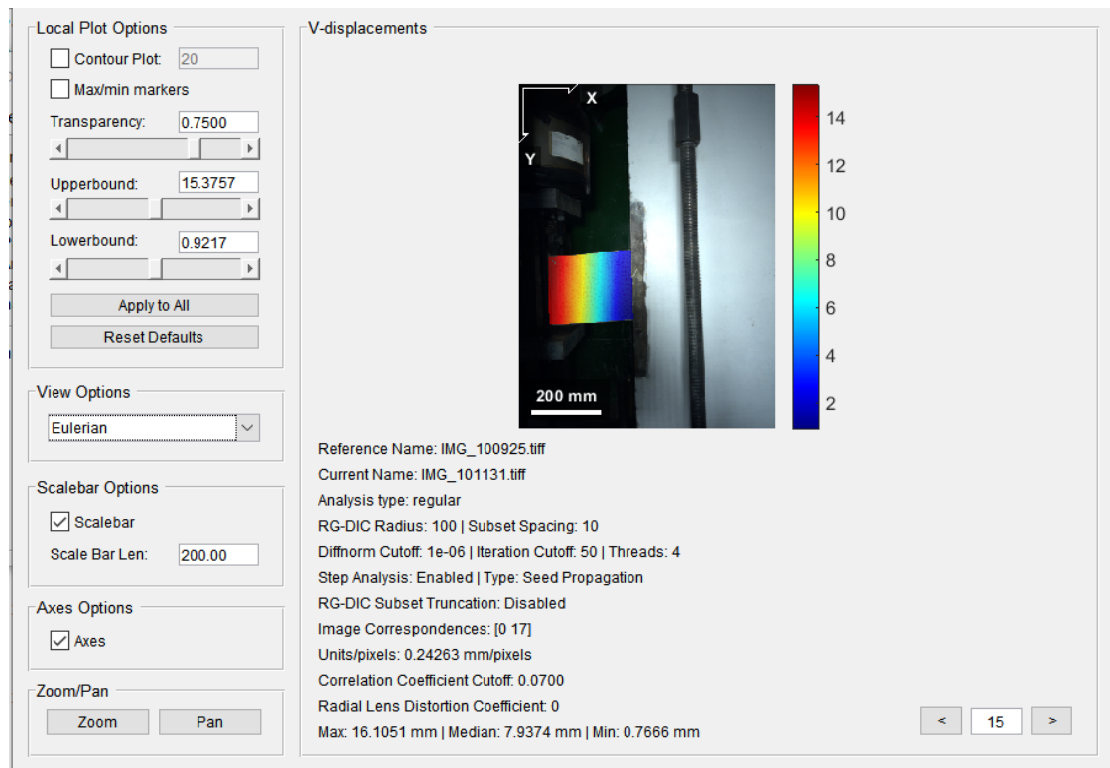
Detalle de acero de refuerzo para anclajes

Detalle de acero de refuerzo horizontal en muro

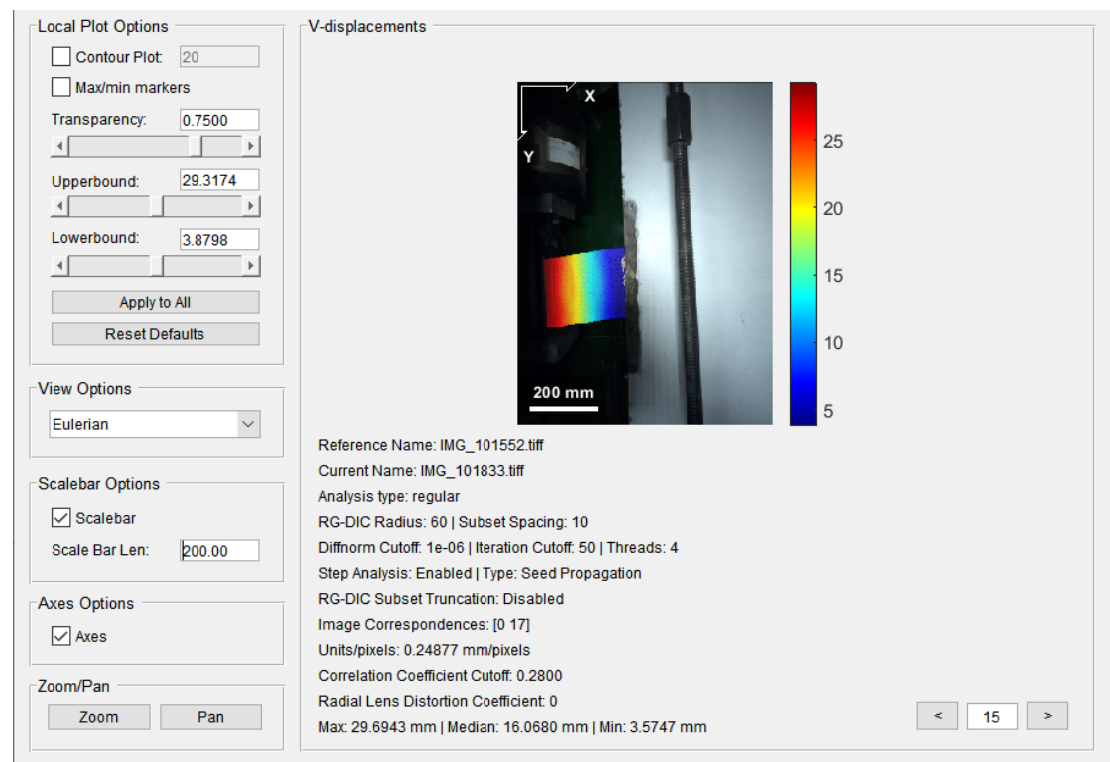
Anexo 4. Digital ImageCorrelation del Ensayo 1

Desplazamientos en el eje vertical Y

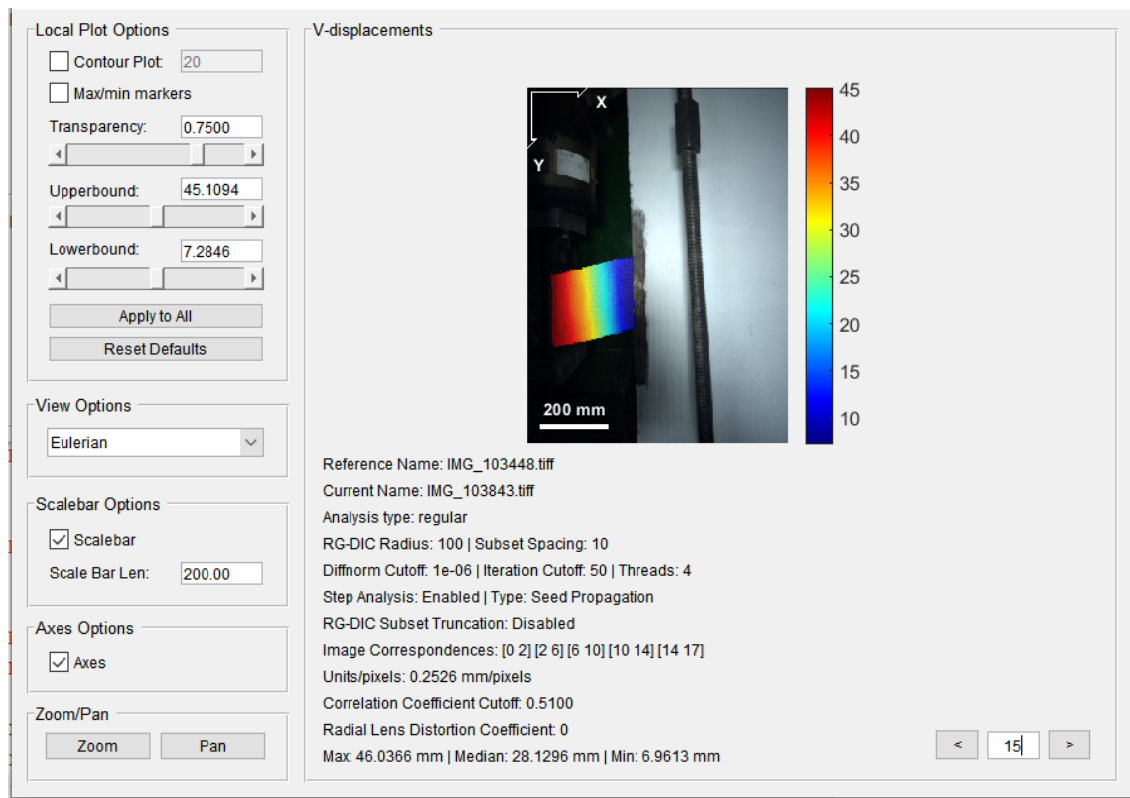
Carga de 16mm



Carga de 32mm

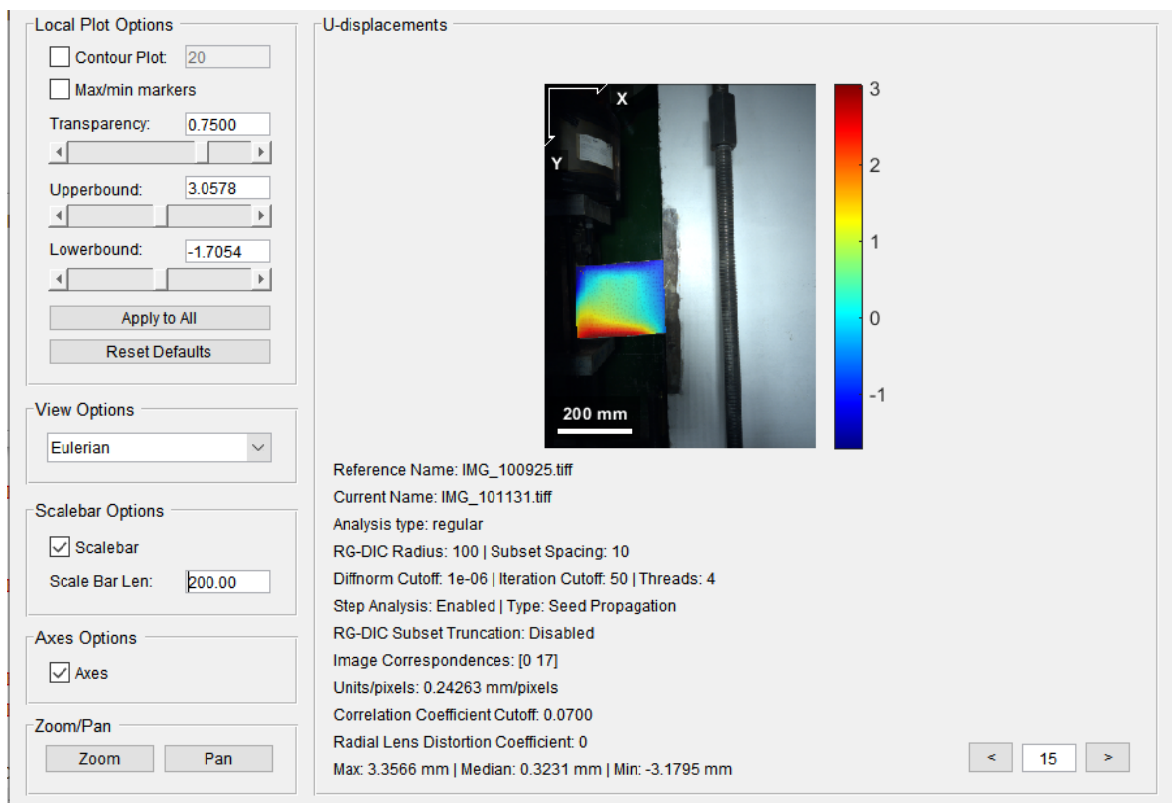


Carga de 48mm

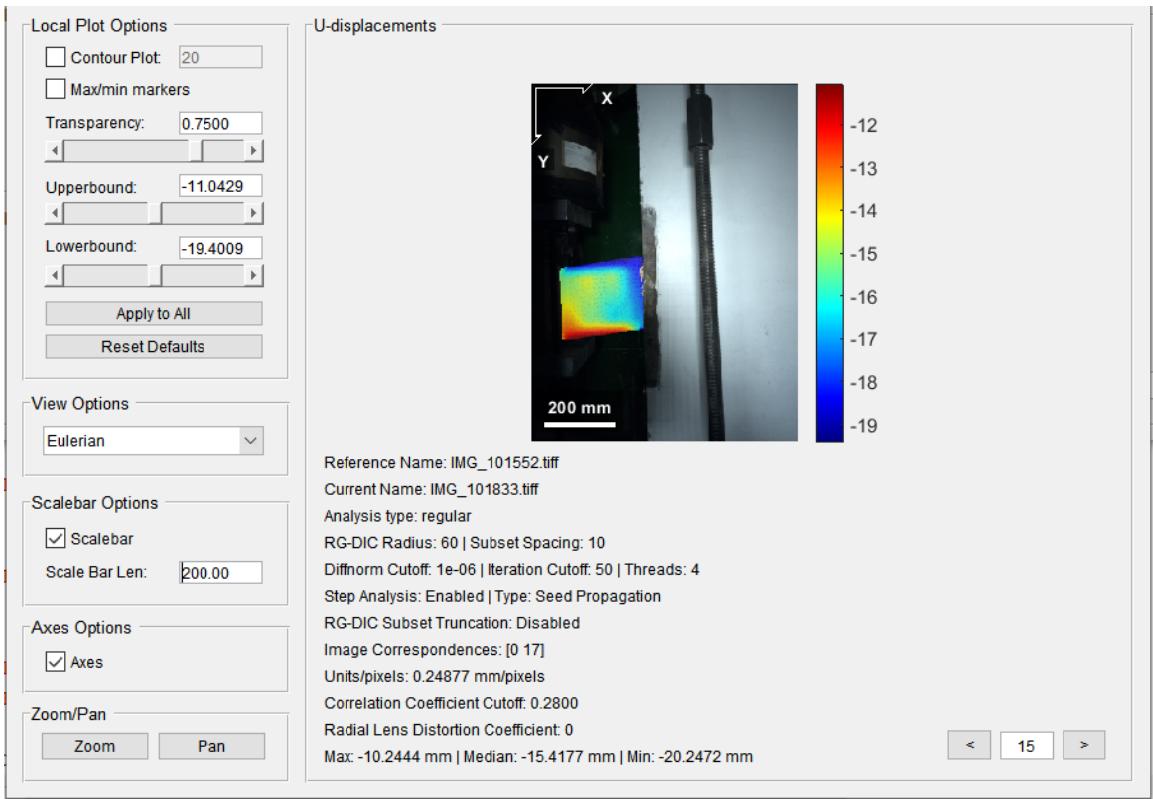


Desplazamientos en el eje horizontal X

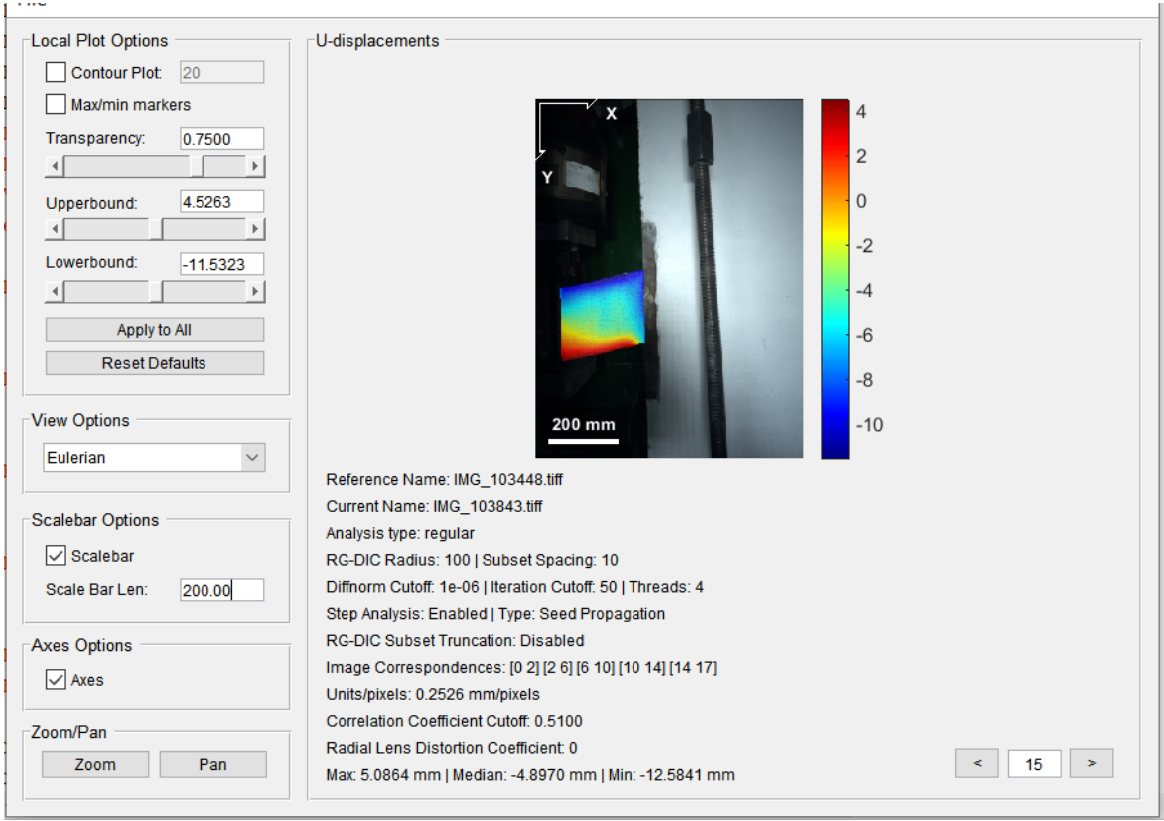
Carga de 16mm



Carga de 32mm

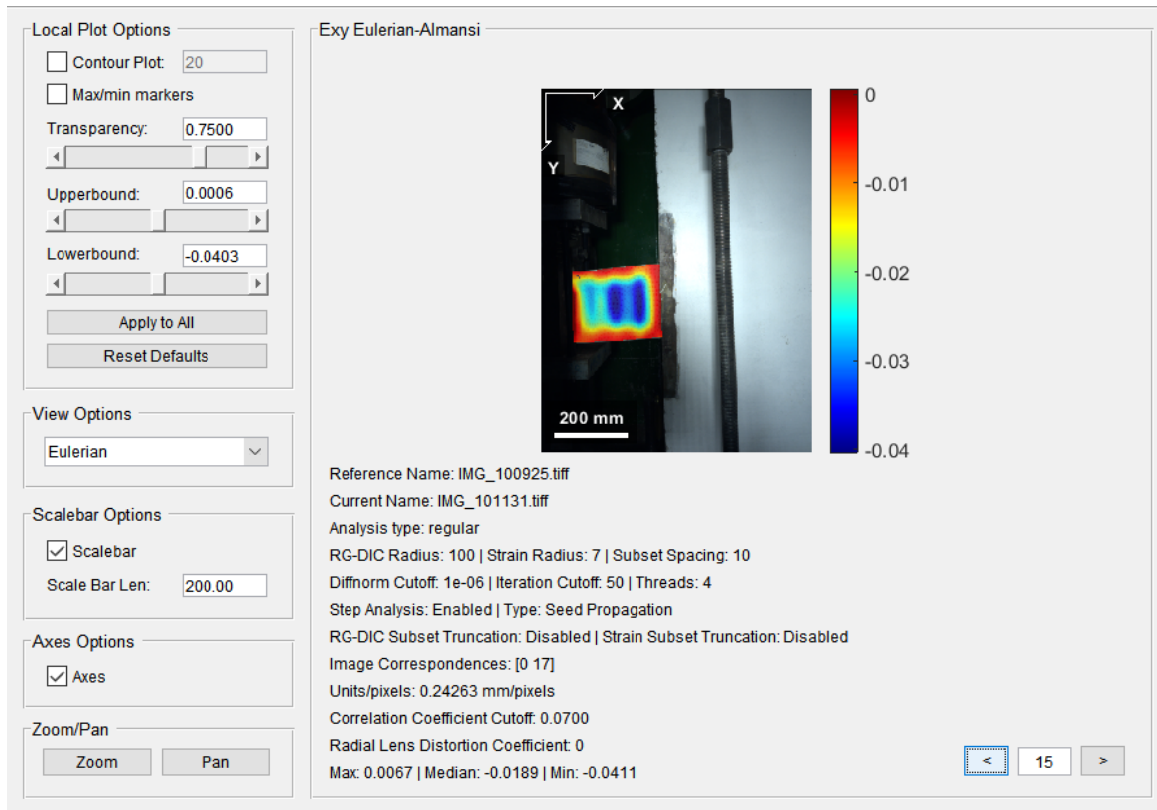


Carga de 48mm

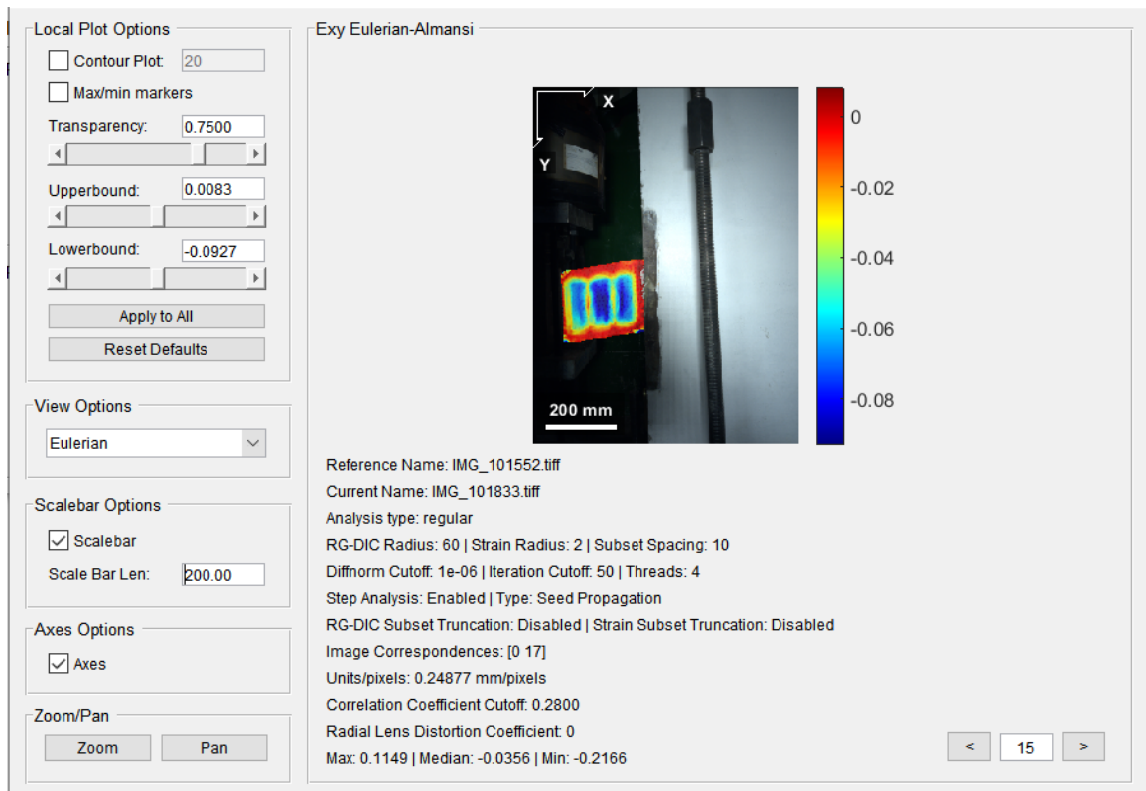


Deformación en el plano XY

Carga de 16mm



Carga de 32mm



Carga de 48mm

