



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO INGENIERÍA CIVIL

**ENSAYO EN MESA VIBRADORA DE UN MARCO
ARRIOSTRADO CON BARRAS DE SMA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL

EVELYN ANDREA VILCHES GONZALEZ

PROFESOR GUÍA
MARÍA OFELIA MORONI YADLIN

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
MAURICIO JUAN SARRAZIN ARELLANO
RICARDO ANTONIO HERRERA MARDONES

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2010

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL.
POR: EVELYN VILCHES GONZALEZ
FECHA: 23 AGOSTO DE 2010
PROF. GUIA: M^a OFELIA MORONI Y.

“ENSAYO EN MESA VIBRADORA DE UN MARCO ARRIOSTRADO CON BARRAS DE SMA”

En este trabajo se ensayó un marco de acero de escala reducida de dimensiones 1,5mx1,5mx0,8m, con el objetivo de verificar la capacidad que tienen barras de NiTiNOL (aleación de Niquel y Titanio), para disipar energía sísmica.

Las barras de NiTiNOL de 48cm de longitud y 2,46mm de diámetro se incluyen como parte del sistema de arriostramientos, en el centro del vano principal de la estructura, la cual se ensaya en la mesa vibradora del Laboratorio de Dinámica de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil, aplicando señales sinusoidales y registros sísmicos reales escalados.

Como instrumentación se utilizan acelerómetros, celdas de carga y potenciómetros, con los cuales se obtienen aceleraciones a nivel de losa y sobre el marco, esfuerzo y deformación en barras y desplazamientos laterales del marco. La estructura sin arriostrar tiene un amortiguamiento de 1,55% y periodo de 0,44s. Al incorporar las diagonales el amortiguamiento aumenta a 2,5% y el periodo baja a 0,15s y 0,16s, dependiendo de la pretensión de las barras. Los desplazamientos y aceleraciones en el techo de la estructura se reducen con respecto al caso de la estructura sin diagonales cuando se aplica el registro de Llole en su componente N10E reducido al 50%.

Con la utilización de diagonales en estructuras reales es posible disminuir la magnitud de los desplazamientos frente a sollicitaciones sísmicas. Además, si éstas incorporan materiales SMA (Shape Memory Alloys), se pueden controlar las aceleraciones en la estructura.

Los periodos obtenidos de manera experimental se verifican analíticamente, al igual que la respuesta ante el registro sísmico escalado al 50%.

Índice

CAPITULO 1	4
Introducción	4
1.1. Objetivos	6
1.1.1. Objetivos Generales	6
1.1.2. Objetivos Específicos	6
CAPITULO 2	7
Antecedentes	7
2.1. Materiales SMA	7
2.2. Antecedentes de ensayos realizados.....	10
2.2.1. F. Bartera, R. Giacchetti (2004).....	10
2.2.2. Pierre Lafortune et al (2007).....	11
2.2.3. Vicenç Torra Ferré (2009)	12
2.3. Antecedentes sobre capacidades y uso de la mesa vibradora	14
2.4. Antecedentes del marco a ensayar.....	16
CAPITULO 3	19
Modelo analítico de la estructura	19
3.1. Marco tridimensional sin arriostramientos.....	21
3.1.1. Datos de entrada.....	22
3.1.2. Resultados	22

3.2. Marco tridimensional arriostrado	26
3.2.1. Datos de entrada	27
3.2.2. Resultados	27
3.3. Energía disipada según el modelo	32
3.4. Resumen.....	34
CAPITULO 4	35
Diseño y materialización de conexiones en el marco arriostrado.....	35
4.1. Conexiones en el marco arriostrado	36
4.2. Sistema de mordazas para barras de NiTiNOL	41
CAPITULO 5	45
Ensayos y análisis de resultados.....	45
5.1. Ensayos con Llolleo 25% y 50%	48
5.2. Ensayos con señales sinusoidales.....	53
5.3. Ensayos con Llolleo 75% y 100%	57
5.4. Ensayos sin diagonales	60
5.5. Disipación de energía.....	62
5.6. Revisión y validación del modelo	66
CAPITULO 6	70
Conclusiones y comentarios.....	70

REFERENCIAS.....	75
ANEXO 1: Gráficos de ensayos sin diagonales	77
A: Ensayo Llolleo 25% . Sin diagonales.....	78
B: Ensayo Llolleo 50% . Sin diagonales	79
ANEXO 2: Gráficos de ensayos con diagonales	80
A: Ensayo Llolleo 25% . Con diagonales. Pretensión: 84,5MPa.....	81
B: Ensayo Llolleo 50% . Con diagonales. Pretensión: 184,3MPa	83
C: Ensayo Llolleo 75% . Con diagonales. Pretensión: 219,1MPa.....	85
D: Ensayo Llolleo 100% . Con diagonales. Pretensión: 220,7MPa.....	87
E: Ensayo Seno 3,5Hz/8mm. Con diagonales. Pretensión: 205,8MPa.....	89
F: Ensayo Seno 3,5Hz/10mm. Con diagonales. Pretensión: 212,2MPa	91
G: Ensayo Seno 3,5Hz/12mm. Con diagonales. Pretensión: 183,3MPa	93

CAPITULO 1

Introducción

El presente Trabajo de Título tiene por motivación la búsqueda de elementos que mejoren el comportamiento de las estructuras que se ubican en zonas de peligro sísmico, a través de una disminución de las amplitudes de los movimientos oscilantes y/o de las deformaciones remanentes que, aunque aceptadas por norma, son perjudiciales.

Las estructuras que deben resistir acciones sísmicas muestran un mejor comportamiento al contar con disipadores sísmicos capaces de absorber parte de la energía que deberían absorber ellas mismas. Los materiales SMA (Shape Memory Alloy), pueden ser utilizados como disipadores, dado que en estos se destaca su gran resistencia a la fatiga, su superelasticidad (o memoria de forma) y buena resistencia a la corrosión, características que suelen permanecer estables.

Una de las aleaciones SMA más utilizada hoy en día es la de Níquel-Titanio. Este material tiene la capacidad de absorber energía en un ciclo de carga y descarga, experimentando transformaciones que le permiten deformarse plásticamente y recuperar su forma original al ser sometido a un ciclo térmico adecuado.

En los últimos años se han realizado diversas investigaciones orientadas a conocer las propiedades elásticas y resistentes de nuevos materiales, como lo son los SMA. Así mismo, se han realizado simulaciones y ensayos de estructuras de marcos arriostrados.

Se han realizados ensayos de estructuras reales, Bartera et al (2004) y a escala reducida, Lafortune et al (2007), demostrándose que la utilización de arriostramientos siempre resulta en la disminución de la amplitud de los movimientos de la estructura, aunque no necesariamente de las aceleraciones. En general éstas aumentan. Si, además, los arriostramientos u otro tipo de disipadores están compuestos, en parte o totalmente, por materiales SMA, se obtienen mejores resultados, es decir, se observa una rápida atenuación de la respuesta estructural.

Lafortune et al (2007) ensayó una estructura a escala reducida sometida a pruebas dinámicas en distintas frecuencias, concluyendo que la utilización de diagonales aporta estabilidad a la estructura, más aún si éstas están pretensadas; la energía disipada aumenta al aumentar el pretensado de los cables, pero no asegura una disminución en los desplazamientos, y los cables pretensados siempre trabajan, consiguiéndose mejor control estructural al pretensar entre un 1,0 y 1,5%.

Por otra parte, McCormick et al (2007) simuló el comportamiento de marcos planos de 3 y 6 pisos, en los que se incluyen arriostramientos de acero o con SMA, demostrando que los desplazamientos en el caso con diagonales de acero son significativamente mayores que cuando se utilizan diagonales con SMA, por lo que las columnas tendrían una mayor demanda de esfuerzos de flexión. Además, el uso de SMA provee mayores beneficios en estructuras bajas o en los primeros pisos de estructuras altas, disminuyendo así las deformaciones remanentes y de entre pisos.

El presente trabajo muestra los resultados del estudio experimental de un marco a escala reducida arriostrado con barras de SMA, en este caso se cuenta con barras de NiTiNOL de 2,46mm de diámetro, las cuales se utilizan como parte del sistema de arriostramientos de un marco de acero tridimensional, rotulado en la base, cuyas dimensiones son 1,5m de altura, 1,5m de ancho y 0,8m de profundidad. Se estudia su comportamiento en mesa vibradora bajo la acción del registro obtenido en Lollole en 1985, en su componente N10E.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivos Generales

El objetivo general de este trabajo es verificar el efecto de disipación de energía sísmica de barras de NiTiNOL, colocadas como arriostramientos, en un marco de acero.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Diseñar el sistema de arriostramientos de la estructura a ensayar y su materialización.
- Definir la forma en que se realiza el ensayo, en lo relacionado con cargas e intensidad de aceleraciones aplicadas.
- Definir instrumentación para la adquisición de datos.
- Evaluar la energía disipada por las barras de NiTiNOL y verificar que la estructura no presente fallas ni deformaciones remanentes.
- Comparar resultados analíticos del programa RUAUMOKO 3D con valores obtenidos experimentalmente.

CAPITULO 2

Antecedentes

2.1. Materiales SMA

Los materiales con memoria de forma (SMA por su sigla en inglés de Shape Memory Alloy), presentan la capacidad de absorber energía en un ciclo de carga y descarga sin presentar deformaciones remanentes. La aleación de Níquel Titanio (NiTiNOL) es uno de ellos.

El NiTiNOL es de interés para la ingeniería estructural por sus propiedades mecánicas, buena resistencia al calor y la corrosión, su capacidad de disipar energía y por ser reciclable, características que lo hacen un muy buen material para ser utilizado en estructuras con resistencia sísmica.

La capacidad de las aleaciones de Níquel-Titanio de recuperar sus condiciones iniciales luego de ser sometidas a tensión depende de la deformación del material y de la temperatura. El comportamiento del NiTiNOL está basado en una transformación de fase termoelástica. La fase de alta temperatura se conoce como austenita. Si se disminuye la temperatura o se aplica tensión la austenita se transforma en martensita. Si el material es enfriado por debajo de la temperatura de *martensita final*, la austenita se transforma por completo en martensita, pero sin

variar su forma macroscópica. Sin embargo, a escala atómica se puede observar un cambio en la orientación de la estructura del cristal, lo cual no sucede en la mayoría de los metales, que suelen deformarse por deslizamiento de dislocaciones.

El comportamiento de este material se caracteriza por su *Efecto de Memoria* y su *Superelasticidad*. El efecto de memoria de forma se presenta cuando ocurre un cambio de forma en el material en su fase martensítica debido a esfuerzos aplicados, es decir, se produce un cambio en la orientación de los cristales, y si los materiales son calentados por sobre de la temperatura *de austenita final* es posible revertir la transformación conservando sus propiedades mecánicas, y sin que presente deformación remanente. Por otra parte, la superelasticidad es la habilidad que presenta el material de regresar a su forma original luego de deformarse. Este fenómeno está basado en la formación de martensita por esfuerzo. La aplicación de esfuerzos causa que la austenita se transforme a martensita sin necesidad de alcanzar la temperatura de cambio de fase. La martensita que se induce por esfuerzo sólo presenta una pequeña variante en su estructura cristalina, lo que genera que al eliminar el esfuerzo aplicado, el material regresa de inmediato a su forma natural. (Espinoza, 2007).

Tabla 2.1: Valores representativos de ensayos a tracción.

Propiedad	Probeta A	Probeta D
Deformación por pretensión	0,5%	0,5%
Modulo de elasticidad E [GPa]	---	51,4
Esfuerzo de transformación [MPa]	495,7	519,11
Tensión máxima [MPa]	1176,2	1298,42
Deformación máxima [%]	9,6	9,5

Referencia: Espinoza, 2007

Para este trabajo se utilizan barras de NiTiNOL de 2,46mm de diámetro y 48cm de longitud. Las barras fueron proporcionadas por el profesor Vincent Torrá de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Las propiedades de las barras, según Espinoza (2007), se indican en la tabla 2.1. Estos valores fueron obtenidos del ensayo en tracción de probetas de 70mm de longitud con composición 55,9%Ni y 44,1%Ti, fabricadas por la empresa Special Metals. Los ensayos se realizaron a temperatura ambiente en una máquina MTS del Laboratorio de Vialidad del Ministerio de Obras Publicas (MOP), la cual permite imponer alargamientos cíclicos a la probeta, mediante el movimiento de un vástago.

El esfuerzo de transformación corresponde a la tensión de “fluencia”, esfuerzo bajo el cual se inicia el cambio de fase del material de *austenita* a *martensita*, mientras que la tensión máxima corresponde a la tensión última (Janke et al (2005) y Espinoza (2007)). Se ha comprobado que la tensión de transformación se reduce al aumentar el número de ciclos y que, además, se ve afectada con los procesos de envejecimiento (tratamiento térmico). Por ejemplo, una barra de NiTiNOL puede aumentar su tensión de transformación si es sometida a un envejecimiento de 2 meses, pero también puede disminuir si el proceso se alarga a 7 meses, de acuerdo a ensayos realizados por Torrá (2009).

2.2. Antecedentes de ensayos realizados

Entre la bibliografía revisada durante la realización de este trabajo se consideró más ampliamente la relacionada específicamente con ensayos de estructuras, reales o a escala reducida, en las que se habían utilizado sistemas de disipación constituidos, en parte, por materiales SMA. En particular se utilizaron tres artículos como referencia y modelo para los ensayos a realizar, los que se resumen a continuación.

2.2.1. F. Bartera, R. Giacchetti (2004)

Este trabajo consistió en el ensayo de una estructura real compuesta por marcos de concreto reforzado, 1 piso de altura 3,1m, con losa de 0,1m, columnas de 0,20x0,30m y vigas de 0,20x0,35m en la dirección x , y 0,30x0,35m en la dirección y .

El sistema de disipación, tipo Chevron, estaba compuesto por arriostramientos de acero en serie con un sistema de disipación de energía formado por HDR (High Damping Rubber) o por cables de SMA (Shape Memory Alloy), ambos con un comportamiento en histéresis característico. La conexión entre el sistema de arriostramientos y la estructura se realizó de dos maneras, una que aumenta la rigidez de la estructura (sistema rígido de disipación), y otra que permite mayor flexibilidad durante los ensayos (sistema cinemático de disipación).

Se realizaron ensayos para los dos distintos disipadores en vibraciones libres y forzadas en un amplio rango de amplitud de frecuencias y desplazamientos con el fin de simular la frecuencia contenida en una excitación sísmica.

Las conclusiones más importantes de estos ensayos son:

- que comenzando con una razón de amortiguamiento de 2-3% en columnas en el caso sin disipadores, es posible incrementarla incluso hasta un 10% o 12% utilizando un sistema de arriostramientos de acero. Ambos disipadores, HDR y SMA, son capaces de incrementar bastante el amortiguamiento
- un sistema cinemático de arriostramientos puede incrementar el amortiguamiento sin aumentar la rigidez del sistema excesivamente
- un sistema cinemático de arriostramientos con HDR evitó deformaciones remanentes, mientras que en caso rígido mostró una aceptable capacidad de recentrado
- la capacidad de amortiguamiento de los HDR es ampliamente estable solo si el esfuerzo aplicado es corte puro; si se tiene corte compuesto con torque, en el caso cinemático, la tasa de amortiguamiento se vuelve altamente variable
- el comportamiento en histéresis de los SMA es inestable y muestra un progresivo decaimiento en la disipación de energía

2.2.2. Pierre Lafortune et al (2007)

Se ensayó un marco plano a escala reducida en una pequeña mesa vibradora. El marco, de dimensiones 31x50cm, contaba con placas de aluminio de 1.6mm de espesor por columnas y una placa de policarbonato de 12,7mm de espesor por viga. Utilizando acelerómetros en la viga y en la mesa vibradora se realizaron ensayos con el marco sin arriostramientos, con arriostramientos de acero consistentes en un cable de acero suave y con arriostramientos de SMA formados

por un segmento corto de NiTiNOL unido a un cable de acero más largo de 0,68mm de diámetro. La utilización de un pequeño tensor permitía ajustar la longitud del cable de SMA.

Se ensayó la estructura, con los distintos arriostramientos, bajo la acción del terremoto de Kobe registrado en 1995, escalado en tiempo y magnitud para conseguir las aceleraciones correctas en la mesa vibradora de escala reducida, usando una masa de 0,48kg, que produce un nivel bajo de excitación, y otra de 1,0kg que induce un alto nivel de excitación llevando las diagonales de acero a la fluencia.

La utilización de SMA redujo los desplazamientos de techo de 37,5mm (diagonales de acero en fluencia), a 7,6mm, es decir, una disminución del 80%. Finalmente, la utilización de diagonales con SMA permite mayores esfuerzos que en el caso con acero, resultando en un mayor control de los desplazamientos y una rápida disminución de la respuesta del marco, incluso al ser sometido a altas aceleraciones. Estos resultados muestran la ventaja de la utilización de SMA para el control sísmico.

2.2.3. Vicenç Torra Ferré (2009)

Se ensayó un marco plano de acero de 3,0m de altura y 4,0m de ancho, soportado por un sistema de ruedas rígidamente alineadas y una serie de ruedas de soporte lateral en la parte inferior y en la parte superior. Analizando los datos del comportamiento de la estructura sin aleación amortiguadora se determinó la cantidad de SMA necesaria, longitud y número de barras, a utilizar en las diagonales. Los arriostramientos del marco debían contar con 3 barras, de NiTiNOL o CuAlBe, en una diagonal y 2 en la otra, de aproximadamente 50cm. En la diagonal se colocaron tensores para regular la pretensión total sobre las barras.

Se realizaron ensayos sin carga para observar el comportamiento de los instrumentos de medición y luego se utilizó masa agregada:

- se observa un cambio de amplitud entre las oscilaciones libres y las amplitudes al oscilar con el SMA (reducción a 1/3). El análisis en frecuencias de las respuestas de la deformación en función del tiempo indica el cambio de comportamiento dinámico con los amortiguadores y la reducción de la amplitud. Además indica que la frecuencia del pórtico depende de la carga

- la oscilación libre al principio resultó, aproximadamente, el doble de la oscilación amortiguada. Pero se observa que la fuerza máxima sobre el SMA decae de 2,5 kN hasta menos de 2 kN. Ello sugiere que hay una disminución progresiva de la acción amortiguadora del SMA a partir de una pretensión inicial del orden de 1,2kN. Este tema debe ser estudiado después de haber sometido a cargas cíclicas los amortiguadores para reducir la tensión propia de cada barra que hará que las deformaciones sean más importantes en la SMA

- se cree que para desarrollar una aplicación industrial habría que usar una barra de acero más que un cable para completar el largo de las diagonales. El cable deja oscilar con demasiada libertad el amortiguador introduciendo otras frecuencias

- debe analizarse muy cuidadosamente el diseño práctico de los amortiguadores para evitar, o disminuir, la introducción de rigidez en la estructura por su utilización. Es posible reducir la amplitud de las oscilaciones aumentando la rigidez a expensas de una alteración importante en la respuesta dinámica de la estructura. Pero el objetivo del amortiguador no es situar dos diagonales “muy rígidas”, el objetivo es reducir la amplitud a base de extraer energía mecánica y convertirla en calor en las barras de SMA.

2.3. Antecedentes sobre capacidades y uso de la mesa vibradora

Barrientos (2008) describe la mesa vibradora como un sistema de 1 grado de libertad que consiste en una base con rieles de apoyo y es accionada por un gato hidráulico que permite desplazamientos horizontales. El gato es un cilindro hidráulico que impone los desplazamientos, conectado a una servo-válvula que recibe señales generadas por un computador a través de un sistema de control. La fuente de energía de dicho actuador consiste en una bomba hidráulica con un motor eléctrico de 60HP.

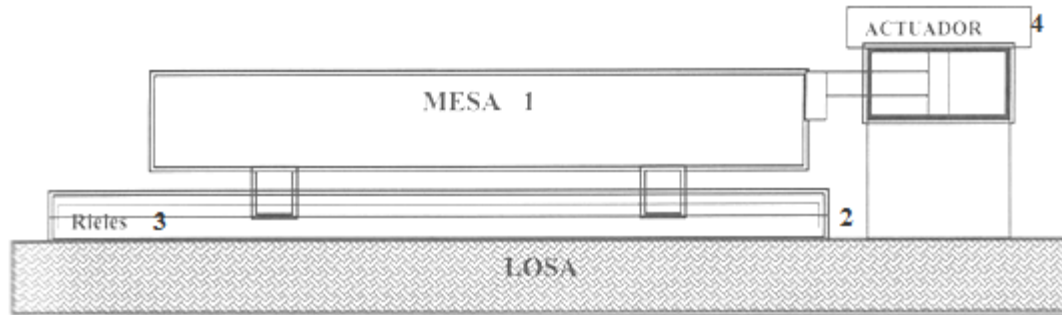
Las especificaciones básicas de la mesa se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Especificaciones básicas

Parámetro	Diseño	Reales
Peso máximo	3ton	3ton
Desplazamiento máximo	±0,2m	±0,195m
Aceleración máxima	1,00g*	1,00g*
Velocidad máxima	0,6m/s	0,4m/s
Frecuencia	15Hz	15Hz

*g=9,8m/s² Referencia: Barrientos, 2008

La mesa de 2100x1300x200mm se muestra en la figura 2.1. Todas las conexiones son soldadas, excepto las conexiones a los carros de los rieles y al actuador hidráulico que se han fijado con pernos.



Referencia: Barrientos, 2008

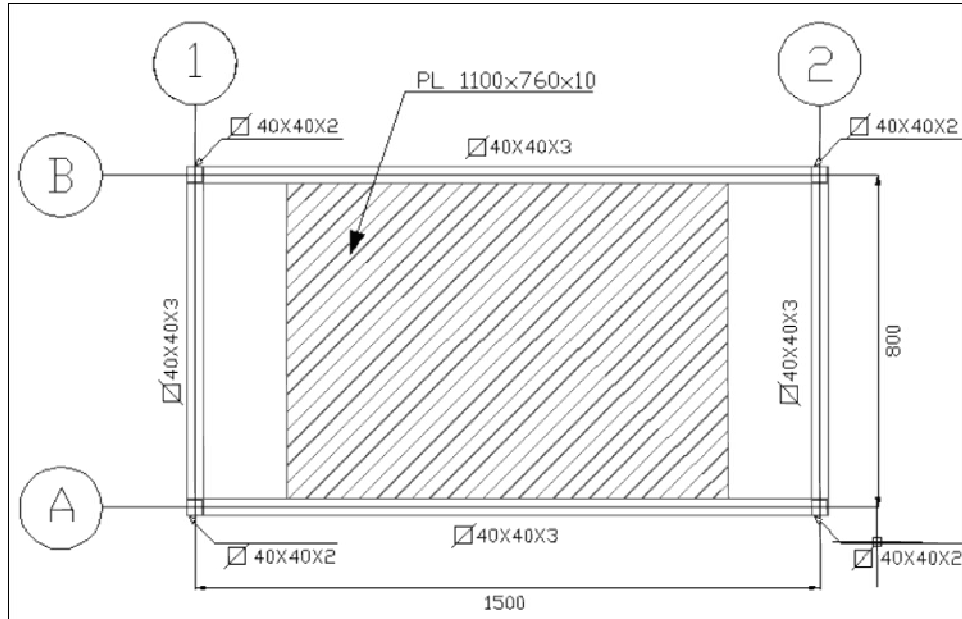
Figura 2.1: Esquema general de la Mesa

La mesa vibradora cuenta con los siguientes componentes mecánicos:

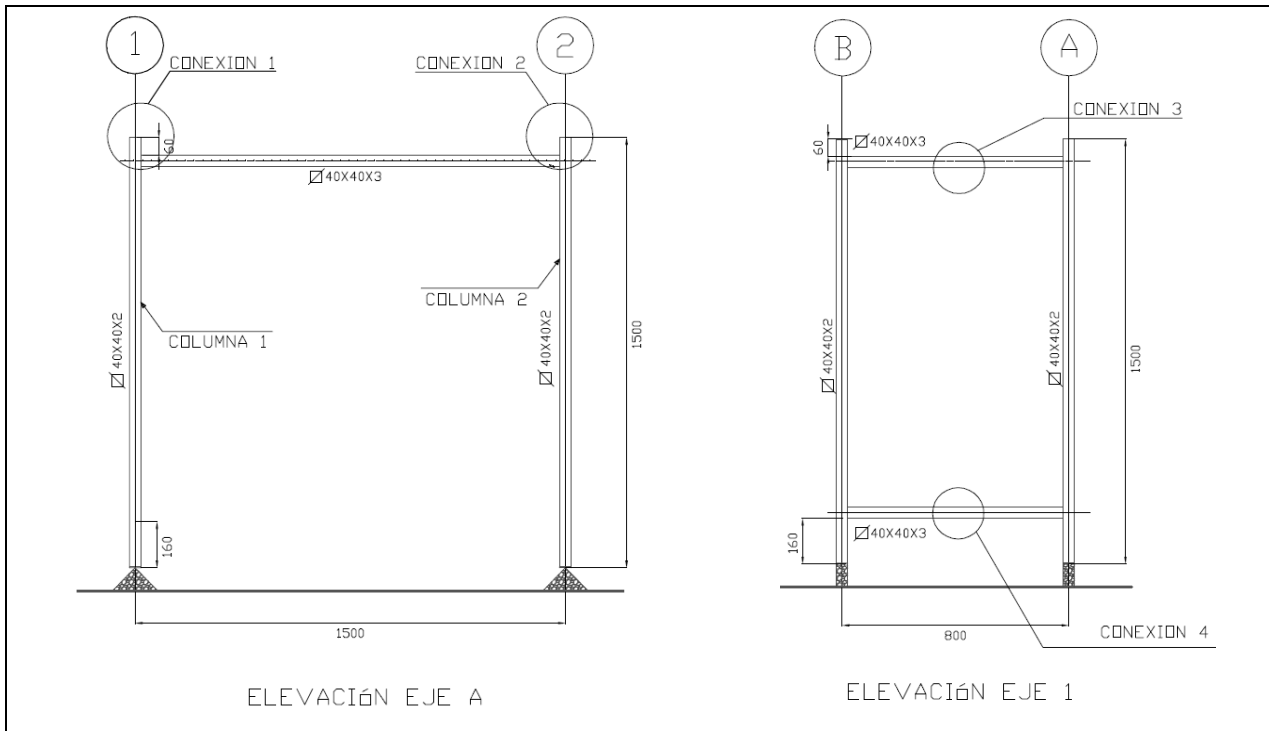
1. Plataforma de acero
2. Perfil para posicionamiento de rieles (riel de soporte)
3. Riel de precisión
4. Estructura de soporte del servo-actuador hidráulico
5. Conexión rótula mesa

2.4. Antecedentes del marco a ensayar

Para los ensayos se utiliza la estructura mostrada en la Figura 2.2.



(a) Vista en planta. Cota 1,5m



(b) Elevación.

Figura 2.2: Marco a ensayar



Figura 2.3: Estructura: marco arriostrado

La figura 2.3 muestra una vista tridimensional de la estructura.

Las vigas son perfiles cajón plegados de acero estructural 40x40x3mm.

Las columnas son perfiles cajón plegados de acero estructural de 40x40x2mm.

Las diagonales son perfiles cajón plegados de acero estructural de 20x20x2mm.

Adicionalmente se utiliza una plancha de acero uniendo ambos marcos, para favorecer su trabajo conjunto, aportar carga muerta a la estructura y posibilitar la utilización de cargas adicionales.

Este marco, rotulado en la base (Figura 2.4 y 2.5), ya fue utilizado por Olea (2009) para probar la capacidad de barras de NiTiNOL y CuAlBe como elementos de conexión viga-columna.

En este caso se utilizan conexiones viga-columna apernadas que permitan que la estructura se comporte como marco rígido, es decir, que transmita momento a través de las conexiones viga-columna.

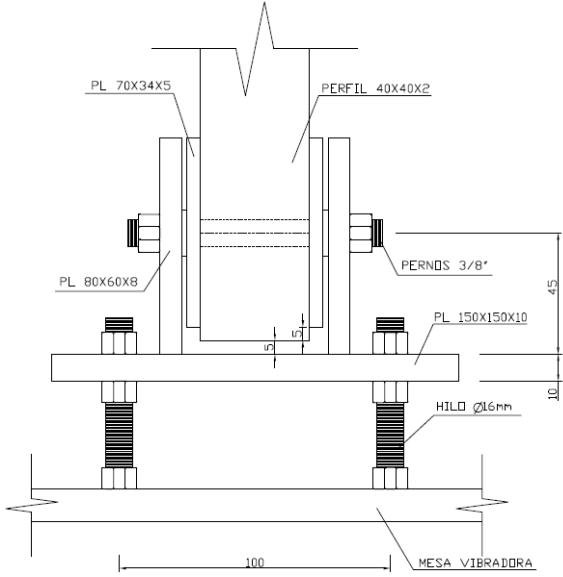


Figura 2.4: Estructura: base rotulada. Elevación.

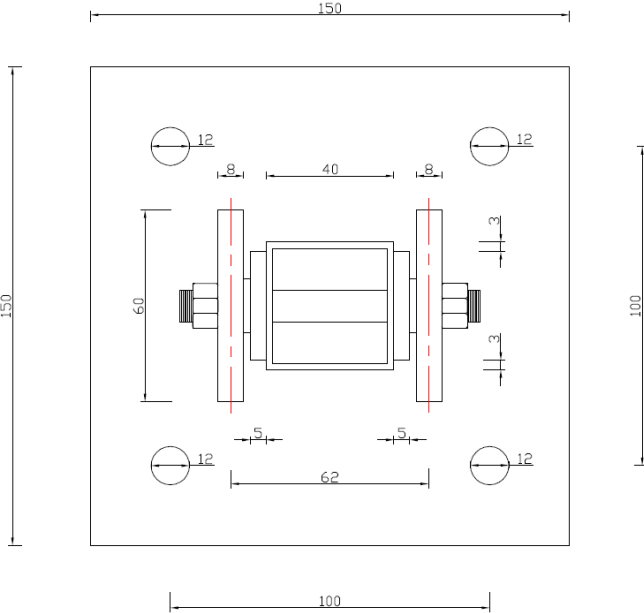


Figura 2.5: Estructura: base rotulada. Planta.

CAPITULO 3

Modelo analítico de la estructura

Para la modelación analítica del marco arriostrado se utilizó el software RUAUMOKO, desarrollado por el departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Canterbury. RUAUMOKO permite realizar análisis dinámicos no lineales de una estructura.

Se realizaron dos modelaciones

Modelo 1: Marco 3D, rotulado en la base

Modelo 2: Marco 3D, rotulado en la base, arriostrado con barras de NiTiNOL

En la modelación se consideró que el peso de la placa del marco real, más la carga adicional y el peso de la mitad superior de la estructura suman 180kgf, los cuales se reparten entre los cuatro nodos en que se conectan las vigas y columnas (marco real), resultando masas puntuales de 45kgf en cada nodo.

Se realizó un análisis modal, luego uno estático y por último uno dinámico en el tiempo. Para el análisis dinámico se utilizó el registro del sismo de 1985 Lolloe, en su componente N10E, para ambos modelos. El sismo tiene una duración de 116,42s y se aplica en una sola dirección.

Las características de los perfiles que forman el marco, y que fueron ingresadas en el programa, se muestran en las tablas 3.1 y 3.2.

Tabla 3.1: Características y parámetros de los perfiles

Elemento	Dimensiones [mm]	E* [kgf/m²]	G* [kgf/m²]	A* [m²]	I* [m⁴]
Viga	□40 x 40 x 3	2,1 x 10 ¹⁰	7,8x10 ⁹	4,44x 10 ⁻⁴	1,02x10 ⁻⁷
Columna	□40 x 40 x 2	2,1 x 10 ¹⁰	7,8x10 ⁹	3,04x 10 ⁻⁴	7,34x10 ⁻⁸
Barra acero	□20 x 20 x 2	2,1 x 10 ¹⁰	7,8x10 ⁹	1,44x 10 ⁻⁴	7,87x10 ⁻⁹
Barra NiTiNOL	Φ 2,46	5,14 x 10 ⁹	---	4,75x 10 ⁻⁶	1,79x10 ⁻¹²

* En unidades que utiliza el programa

Tabla 3.2: Esfuerzos de fluencia

Elemento	Dimensiones [mm]	Py [kgf]	My [kgf-m]
Viga	□40 x 40 x 3	11237,9	129,06
Columna	□40 x 40 x 2	7694,4	92,84
Barra acero	□20 x 20 x 2	3644,7	19,92
Barra NiTiNOL	Φ 2,46	246,6	-

En la modelación de las barras se utilizan los valores generados por el ensayo de la Probeta D (Tabla 2.1), que entrega toda la información que es necesario incluir en el modelo. Las barras se incluyen como parte del sistema de arriostramientos del marco de acero.

3.1. Marco tridimensional sin arriostramientos

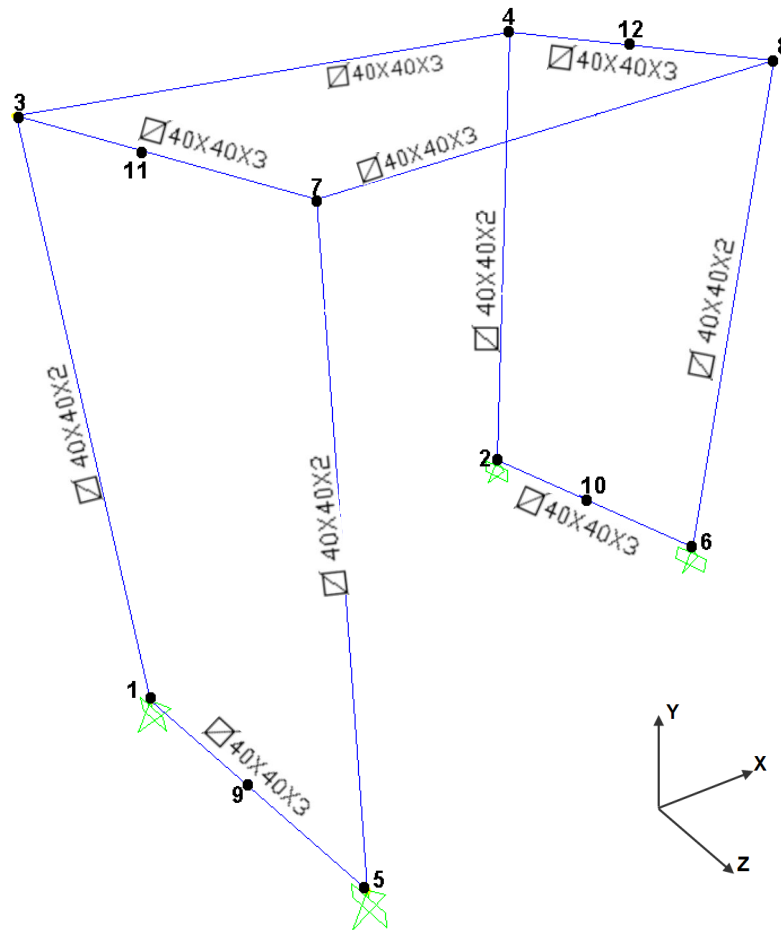


Figura 3.1: Marco sin arriostrar.

El marco de la figura 3.1 (Modelo 1), tiene dimensiones de 1,5m de altura por 1,5m de largo y 0,8m de ancho, está formado por elementos de acero: 4 columnas, 2 vigas largas y 4 vigas cortas. Se consideran conexiones viga-columna rígidas, es decir, que transmiten momento. Los datos de los elementos utilizados se encuentran en las tablas 3.1 y 3.2.

En la base de la estructura se permite el giro en torno al eje z y se restringe en la dirección perpendicular, en torno al eje x. Se considera el nodo 1 en el origen del sistema de referencia.

3.1.1. Datos de entrada

Utilizando RUAUMOKO 3D se modela el marco de la figura 3.1, ingresando como datos de entrada los valores de las tablas 3.1 y 3.2.

Para los modos 1 y 2 se introduce un amortiguamiento del 2%, que es utilizado para el cálculo de las variables α y β de Rayleigh de la matriz de amortiguamiento:

$$C = \alpha [M] + \beta [K]$$

Los valores para los modos superiores son calculados por el programa.

En cada uno de los nodos superiores (3, 4, 7 y 8), se aplica una carga puntual de 45kgf.

3.1.2. Resultados

El análisis modal (Tabla 3.3) entrega un periodo de 0,42s para el primer modo o una frecuencia amortiguada de 2,35Hz.

El análisis estático entrega valores de los esfuerzos en cada elemento y las cargas en cada nodo de la estructura cuando no se aplica la sollicitación sísmica.

Tabla 3.3: Resultados. Formas modales.

1 NATURAL FREQUENCIES				

MODE	Frequency	Period	% Damping	Damped Freq
	[1/s]	[s]	[%]	[1/s]
1	2.357E+00	4.242E-01	2.000E+00	2.357E+00
2	4.724E+01	2.117E-02	2.000E+00	4.723E+01
3	1.523E+02	6.566E-03	6.171E+00	1.520E+02
4	1.524E+02	6.563E-03	6.174E+00	1.521E+02
5	1.594E+02	6.273E-03	6.457E+00	1.591E+02
6	1.595E+02	6.269E-03	6.461E+00	1.592E+02
7	2.620E+02	3.817E-03	1.058E+01	2.605E+02
8	2.662E+02	3.756E-03	1.075E+01	2.647E+02

RAYLEIGH DAMPING Alpha= 5.64298E-01 Beta= 1.28366E-04

Del análisis dinámico se obtienen los Figuras de desplazamientos en un nodo superior y las relaciones Momento-Curvatura y Corte Basal-Desplazamiento Nodal (Figuras 3.2, 3.3 y 3.4).

El desplazamiento relativo máximo de un nodo superior es de 8,2cm, en la dirección del sismo. Se observan deformaciones remanentes en la estructura, hacia el final del registro (Figura 3.2), de 15mm, aproximadamente.

Las columnas presentan comportamiento elastoplástico (Figura 3.3), rotulándose cerca del extremo superior por flexión, y alcanzan un esfuerzo de momento de 91,1kgf-m con una curvatura de $7,58 \times 10^{-2} \text{m}^{-1}$.

Graficando los valores del corte basal que afecta a la estructura y los desplazamientos de los nodos superiores debidos al sismo, se observa que la estructura tiene un comportamiento global de tipo elastoplástico (Figura 3.4)

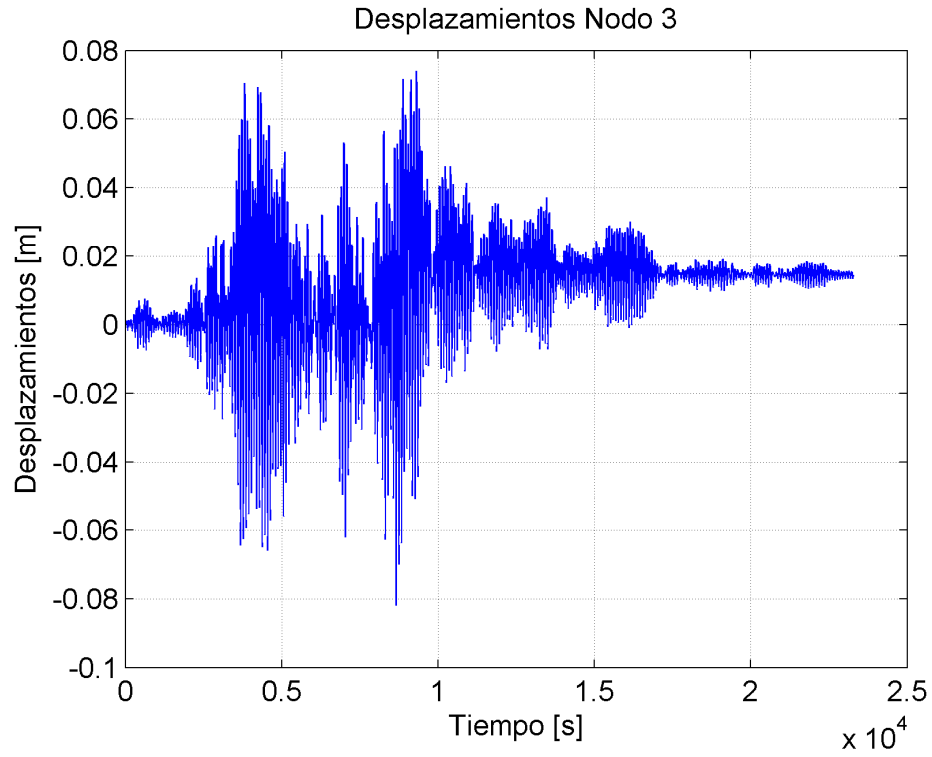


Figura 3.2: Desplazamiento de un nodo superior.

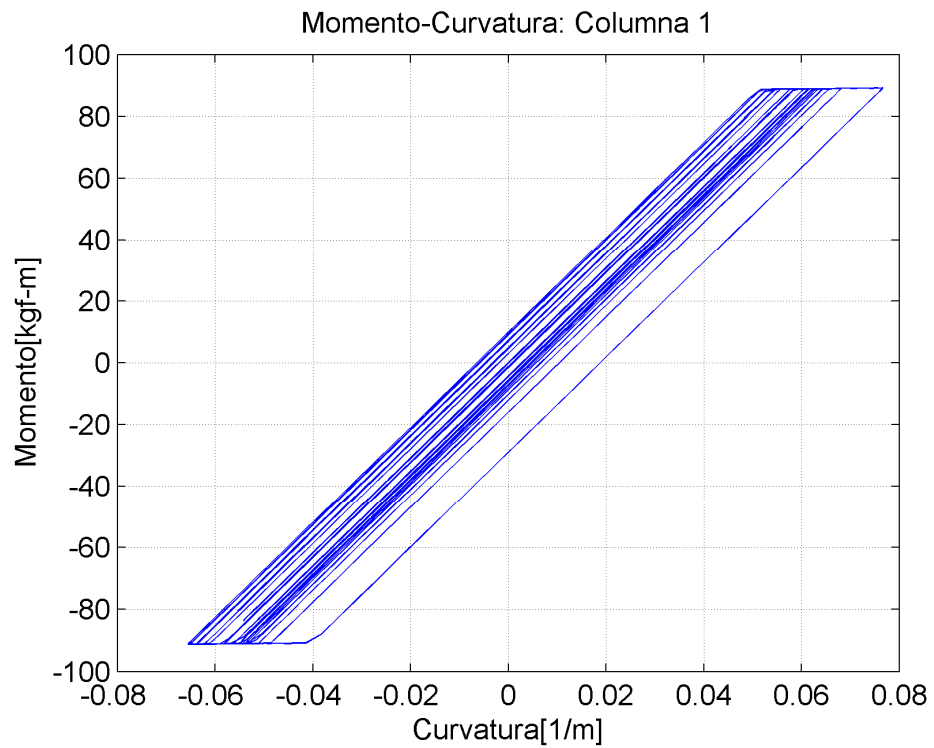


Figura 3.3: Momento - Curvatura del extremo superior de una columna.

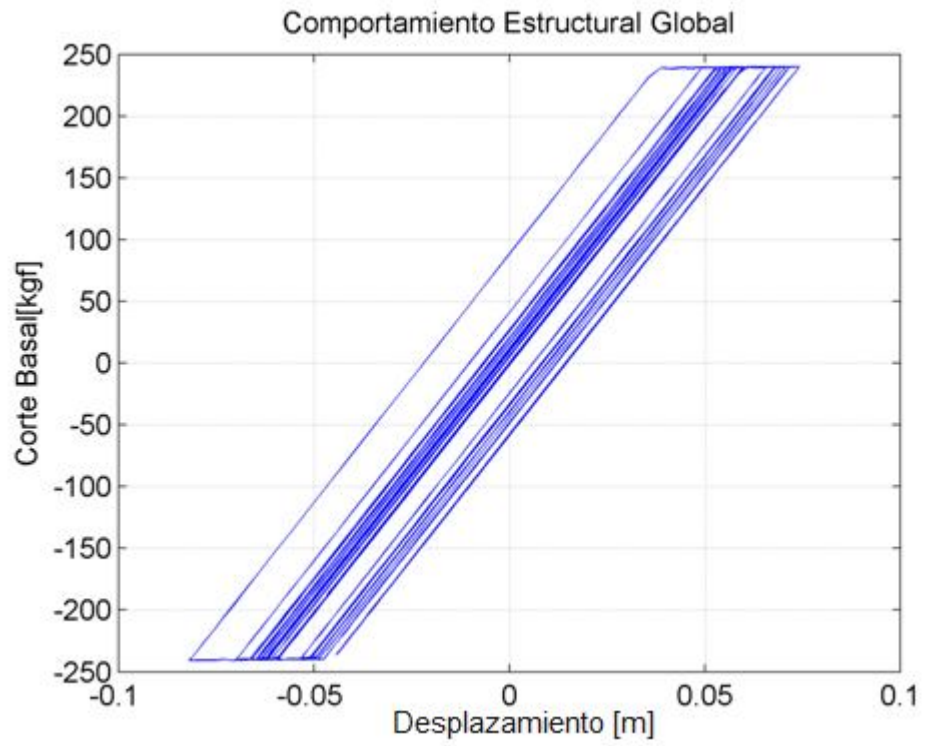


Figura 3.4: Corte Basal – Desplazamiento de un nodo superior.

3.2.1. Datos de entrada

Al Modelo 1 se agrega un sistema de arriostramientos compuesto por dos diagonales ubicadas en el centro del vano entre los marcos principales. En cada diagonal se conecta una barra de NiTiNOL de 48cm con una barra de acero de 20x20x2mm. Las características de ambas barras se encuentran en las tablas 3.1 y 3.2, y son los valores que se entregan al modelo como datos de entrada.

La longitud de las barras de NiTiNOL que se utiliza en el modelo se ha elegido en base a los materiales con los que se cuenta, es decir, barras con longitud útil de 48cm.

3.2.2. Resultados

El análisis modal entrega un periodo de 0,12s para el primer modo o una frecuencia amortiguada de 8,13Hz.

Tabla 3.4: Resultados. Formas modales.

1 NATURAL FREQUENCIES				

MODE	Frequency [1/s]	Period [s]	% Damping [%]	Damped Freq [1/s]
1	8.132E+00	1.230E-01	2.000E+00	8.130E+00
2	4.724E+01	2.117E-02	2.000E+00	4.723E+01
3	1.525E+02	6.558E-03	5.599E+00	1.523E+02
4	1.526E+02	6.555E-03	5.602E+00	1.523E+02
5	1.594E+02	6.273E-03	5.845E+00	1.591E+02
6	1.595E+02	6.269E-03	5.849E+00	1.592E+02
7	2.621E+02	3.815E-03	9.522E+00	2.609E+02
8	2.662E+02	3.756E-03	9.669E+00	2.650E+02

RAYLEIGH DAMPING Alpha= 1.74364E+00 Beta= 1.14978E-04

A los amortiguamientos para los modos 1 y 2, considerados principales, se asigna un valor del 2%, mientras que los valores para los modos superiores son calculados por el programa, utilizando la siguiente relación:

$$\lambda_n = \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{\omega_n} + \beta \cdot \omega_n \right)$$

Donde ω_n corresponde a la frecuencia circular natural del modo n,

$$\alpha = \frac{2 \omega_1 \omega_2 (\omega_1 \lambda_2 - \omega_2 \lambda_1)}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

$$\beta = \frac{2(\omega_1 \lambda_1 - \omega_2 \lambda_2)}{\omega_1^2 - \omega_2^2}$$

Si el amortiguamiento ingresado al programa para los modos 1 y 2 se disminuye, también lo harán los valores de α y β y, por lo tanto, los amortiguamientos de los modos superiores serán menores, incidiendo en el amortiguamiento global de la estructura, sin embargo, como éstos tienen participación modal cercana a cero el amortiguamiento calculado para los nodos superiores debería ser irrelevante en los resultados del programa.

En ese caso, las barras de NiTiNOL son capaces de alcanzar mayores esfuerzos durante el sismo y los desplazamientos de la estructura aumentan.

El desplazamiento máximo de un nodo superior es de 1,27cm, en la dirección del sismo, para el marco arriostrado. Las barras se deforman un máximo de 8mm con un esfuerzo de 262,4kgf.

En la figura 3.6 se comparan los desplazamientos de un nodo superior del marco en los casos con y sin arriostramientos. En verde se muestra el caso arriostrado, y en azul el caso sin arriostrar, que presenta deformaciones remanentes.

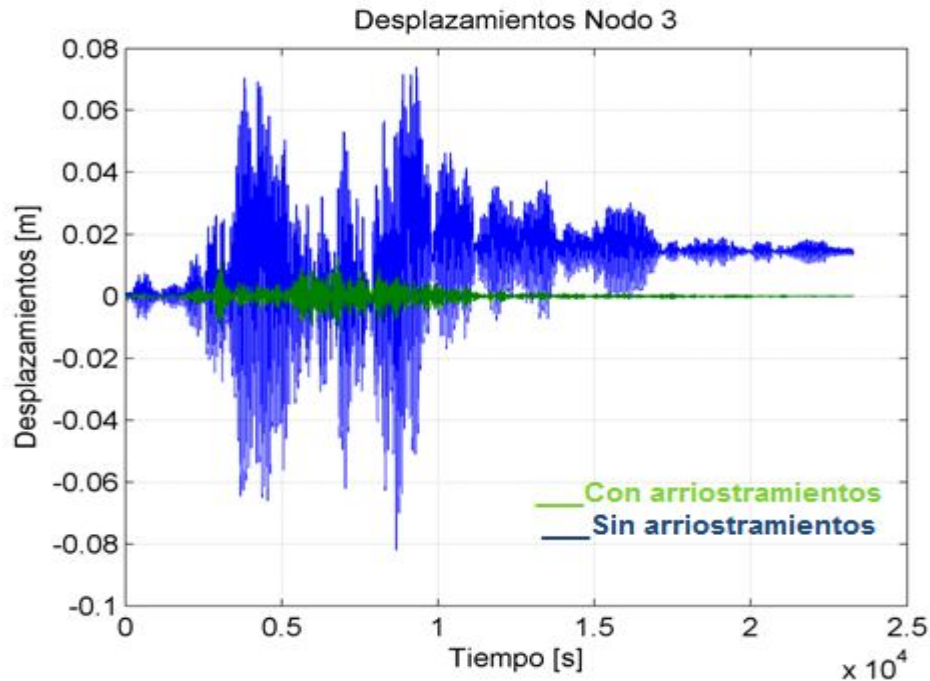


Figura 3.6: Desplazamiento de un nodo superior.

Las columnas alcanzan un esfuerzo de momento máximo de 19,2kgf-m con una curvatura de $1,17 \times 10^{-2} \text{m}^{-1}$ y no sufren plastificación.

Las barras de NiTiNOL sin pretensar alcanzan el esfuerzo de transformación, pero también sufren compresión (Figura 3.7), por lo que deben ser pretensadas para evitar que se compriman durante el sismo. El pretensado de las barras se realiza a la mitad del esfuerzo de transformación, lo que corresponde a 123,3kgf (Figura 3.8).

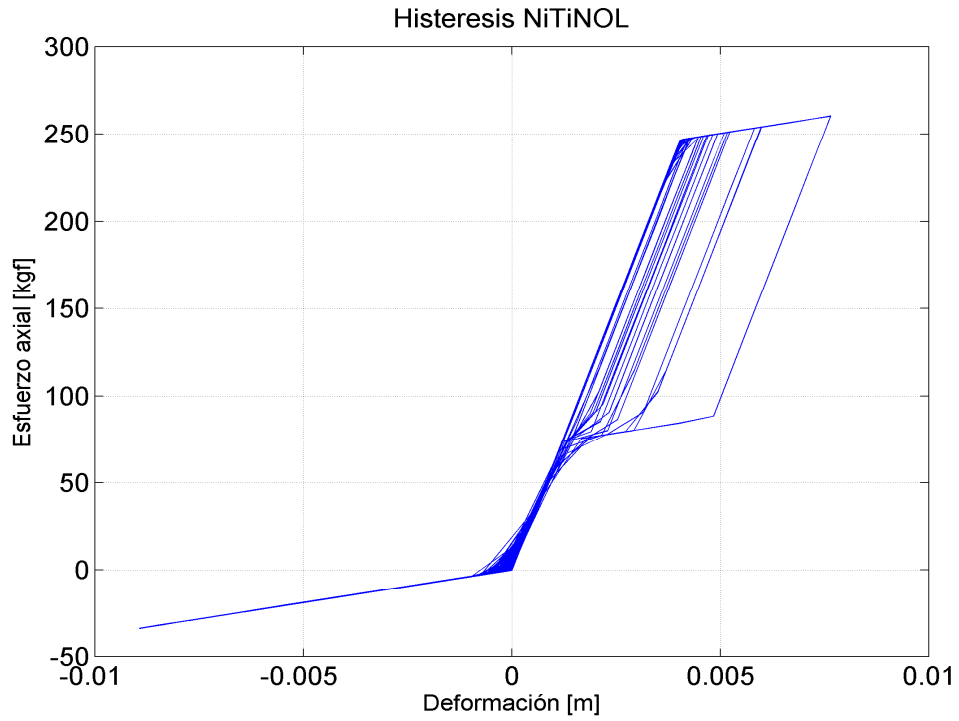


Figura 3.7: Histéresis NiTiNOL. Sin pretensar.

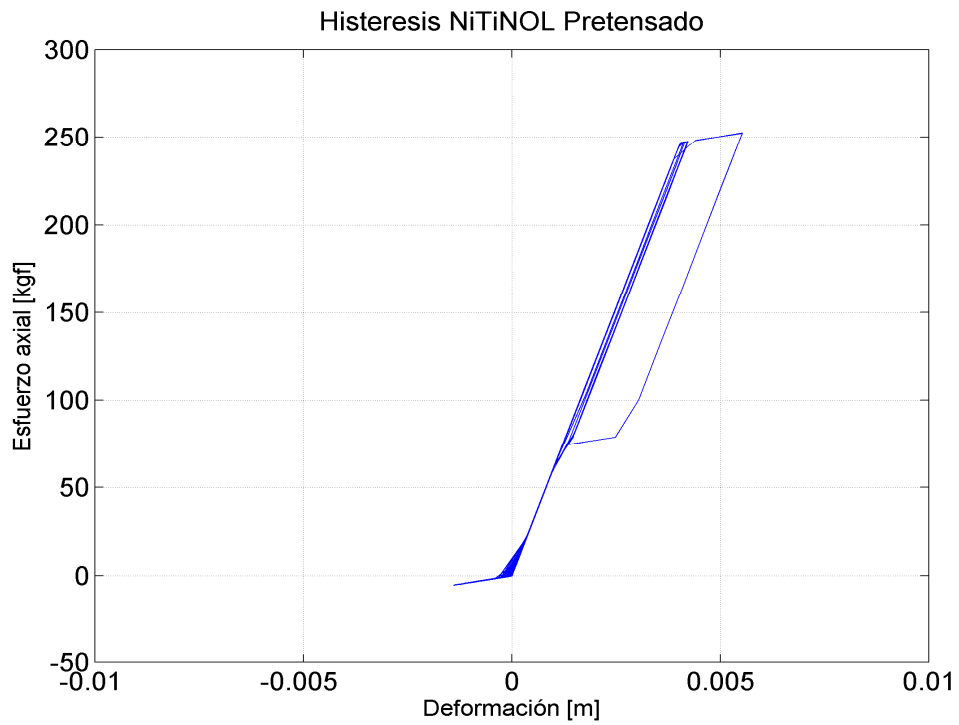


Figura 3.8: Histéresis NiTiNOL. Pretensado: 123kgf.

Con las barras pretensadas disminuye el rango de la zona comprimida, pero aún se tienen valores negativos de esfuerzo axial. Lo anterior indica que es necesario aumentar la magnitud del esfuerzo de pretensión (Figura 3.9).

Cuando las barras se pretensan a 123kgf el desplazamiento máximo de un nodo superior disminuye a 4,8mm. En el caso con pretensión a 185kgf este desplazamiento es de 4,0mm.

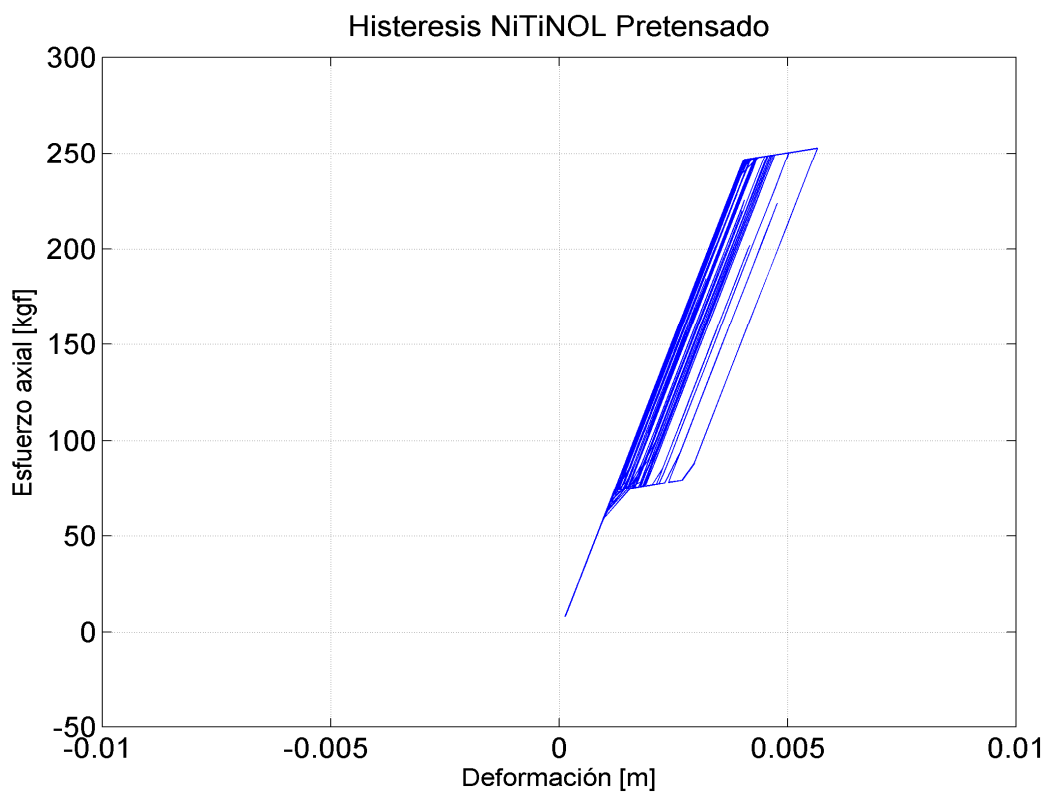


Figura 3.9: Histéresis NiTiNOL. Pretensado: 185kgf.

Para los ensayo se diseñó un dispositivo que evita la compresión de las barras y en el modelo se indicó que la resistencia a la compresión sería igual a cero, por lo tanto es posible suponer que los resultados que indican compresión en las barras corresponden a una limitación del modelo utilizado.

3.3. Energía disipada según el modelo

RUAUMOKO utiliza la siguiente ecuación de equilibrio:

$$\text{Energía Cinética} + \text{Energía de amortiguamiento} + \text{Energía Elástica} = \text{Trabajo Aplicado}$$

El primer término corresponde a la energía cinética por velocidades absolutas, el segundo a la energía disipada por amortiguamiento viscoso y el tercero a la suma de la energía de deformación elástica de la estructura y el trabajo plástico, o de histéresis, disipado.

El programa entrega los valores en el tiempo del trabajo plástico, el cual interesa conocer ya que corresponde a la energía disipada por la estructura. Las curvas en el gráfico de la figura 3.10 corresponden a la energía disipada por el sistema en los casos de marco sin arriostrar, arriostrado y con arriostramientos pretensados, en azul, verde y rojo, respectivamente.

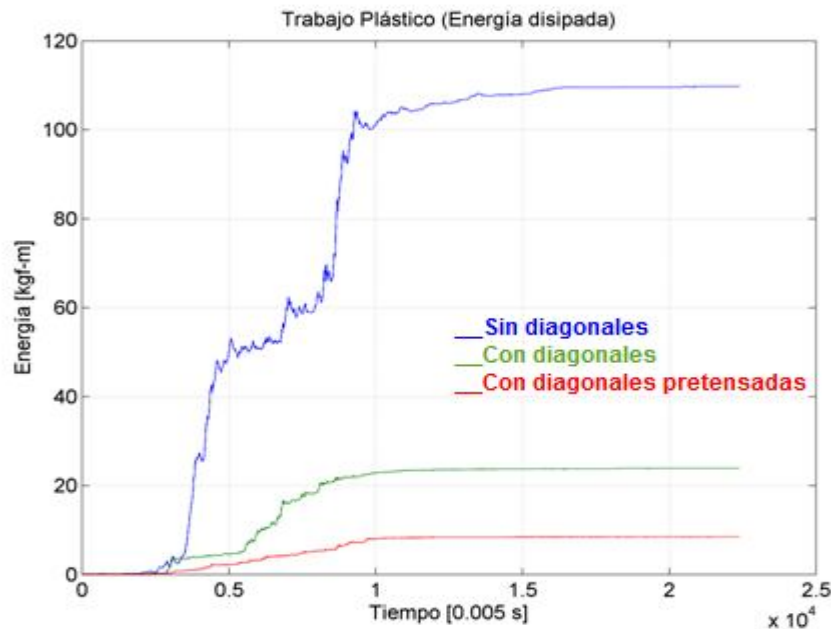


Figura 3.10: Energía

En función del gráfico de la figura 3.10 se concluye que en el caso con las barras pretensadas la energía disipada por la estructura global es mucho menor que al no contar con diagonales, en cuyo caso toda la carga debe ser soportada por el marco rígido produciéndose deformaciones remanentes por la plastificación de los elementos que lo componen, en particular sus columnas.

En el primer caso las columnas sufren grandes deformaciones, llegando a la fluencia del material, es por esto se que produce una alta disipación de energía por trabajo plástico. En los casos con diagonales, el trabajo plástico disminuye drásticamente debido a que los elementos del marco se comportan elásticamente y, por lo tanto, no disipan energía, es decir, se puede suponer que la disipación de energía se debe al trabajo que realizan las barras de NiTiNOL y es menor que en el caso sin diagonales debido a que por la disminución de los desplazamientos las barras sufren pequeñas deformaciones y las estructura no sufre deformaciones remanentes.

3.4. Resumen

En la tabla 3.5 se muestra un resumen de los resultados obtenidos al someter el marco del modelo a solicitaciones sísmicas.

Tabla 3.5: Resultados. Resumen.

Elemento	Variable de respuesta	Marco rígido solo	Marco rígido con diagonales SMA	Diferencia [%]
	Desplazamiento máximo [cm]	8,18	1,27	84
	Deformación remanente [mm]	15	0	100
Columna	Momento [kgf-m]	91,12	19,2	79
	Axial [kgf]	-170,6	-174,5	
	Corte [kgf]	60,8	12,8	79
Viga Larga	Momento [kgf-m]	95,2	19,2	80
	Axial [kgf]	0,84	15,8	
	Corte [kgf]	125,6	25,6	80
Viga Corta	Momento [kgf-m]	0	19,4	
	Axial [kgf]	0	0	0
	Corte [kgf]	0	97,9	

En casi todas las variables de respuesta se obtienen importantes disminuciones porcentuales. La deformación remanente en la estructura se elimina completamente, mientras que los desplazamientos se reducen en un 84%.

En las columnas y las vigas longitudinales los esfuerzos de flexión y corte se reducen en un 79 y 80%, respectivamente al utilizar arriostramientos. El esfuerzo de compresión axial aumenta en un 2% en el caso de las columnas, mientras que en la viga longitudinal aunque el aumento porcentual es importante, en magnitud no es tan significativo.

En las vigas cortas, donde se conecta la diagonal al marco aparecen esfuerzos de flexión y corte cuando se colocan las diagonales

CAPITULO 4

Diseño y materialización de conexiones en el marco arriostrado

Las conexiones que deben diseñarse corresponden a las indicadas en la figura 2.2b: conexiones 1, 2, 3 y 4.

El diseño de las conexiones se realiza basado en los materiales disponibles. Como se cuenta con la estructura principal se modificó la conexión viga-columna con el fin de transformarla de flexible a rígida (Conexiones 1 y 2. Figura 4.1).

Las conexiones 3 y 4 (Figura 4.4), corresponden a la unión del sistema de arriostramientos al marco, el cual se realiza en mitad de las vigas cortas (Figura 4.8).

Por otra parte, las barras de NiTiNOL que se utilizan tienen una longitud útil de 48cm, que no incluye el sistema de mordazas ni las conexiones al marco o al perfil de acero. El resto de la diagonal debe completarse con un perfil de acero estructural 20x20x2mm (Conexión 5. Figura 4.9).

4.1. Conexiones en el marco arriostrado

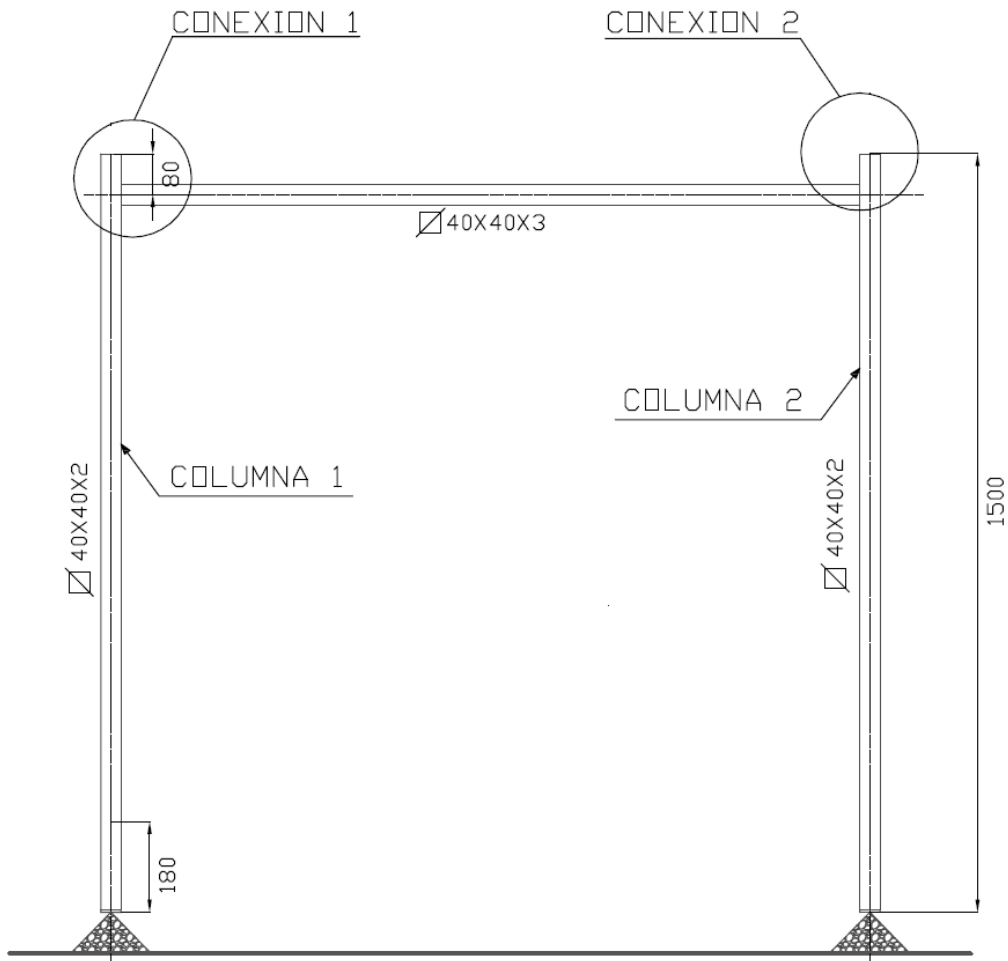


Figura 4.1: Conexiones 1 y 2.

La conexión viga-columna se materializa con placas en los extremos de las vigas que se unen a las placas en las columnas utilizando pernos de 5/16" (aproximadamente 8mm). Las placas de unión son de dimensiones 110x75x5mm (Figura 4.2 y 4.3).

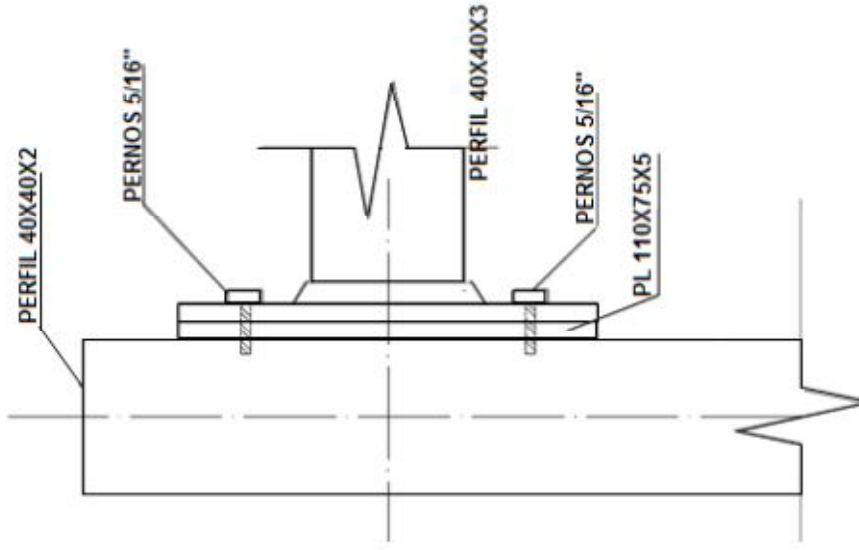


Figura 4.3: Conexiones viga columna.

Vista lateral.

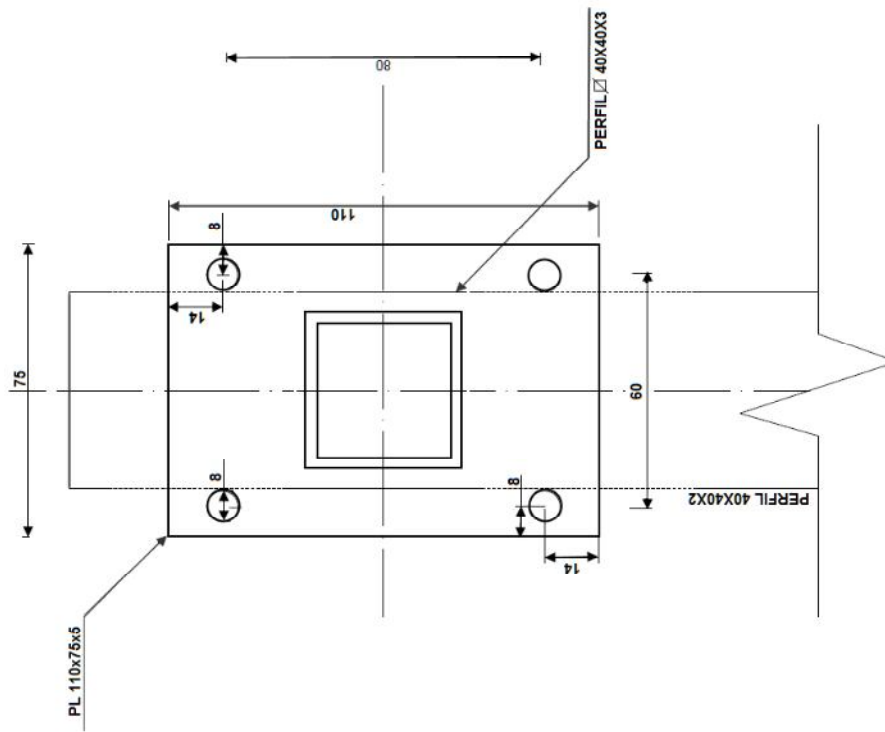


Figura 4.2: Conexiones viga columna.

Vista frontal.

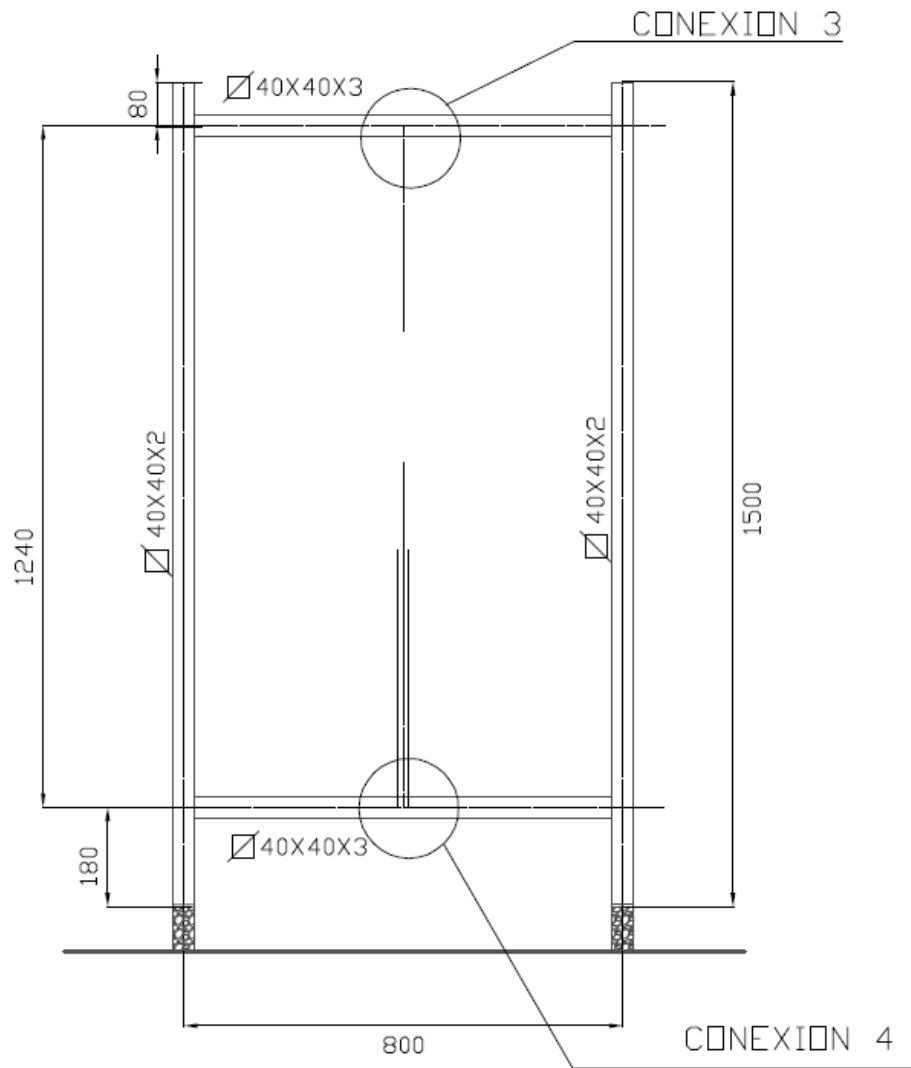


Figura 4.4: Conexiones 3 y 4.

En las conexiones de la diagonal al marco se utilizan placas de acero de 5mm de espesor. En cada conexión se colocan dos placas perforadas (Figura 4.5 y 4.6), entre las cuales se introduce un cáncamo (Figura 4.7 y 4.8) para luego unir los tres elementos con un perno de 3/4" (aproximadamente 19mm). La diagonal se une al marco atornillándola a un cáncamo en cada extremo.

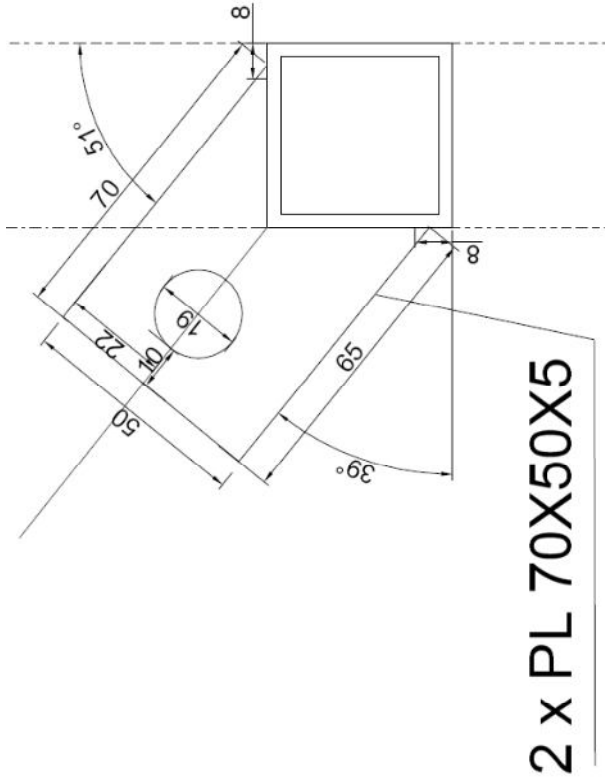


Figura4.6: Conexión en viga inferior

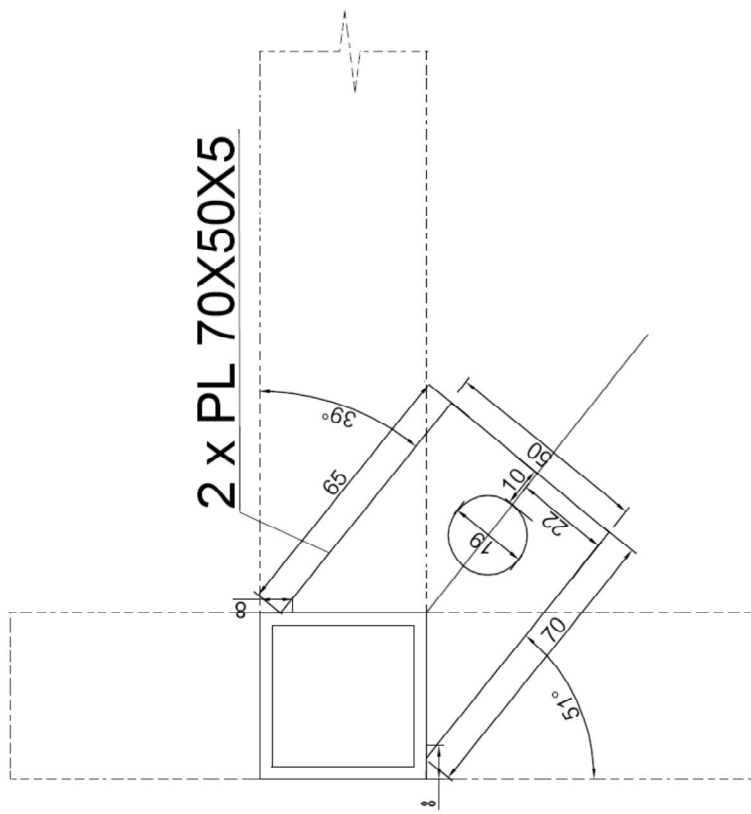


Figura4.5: Conexión en viga superior

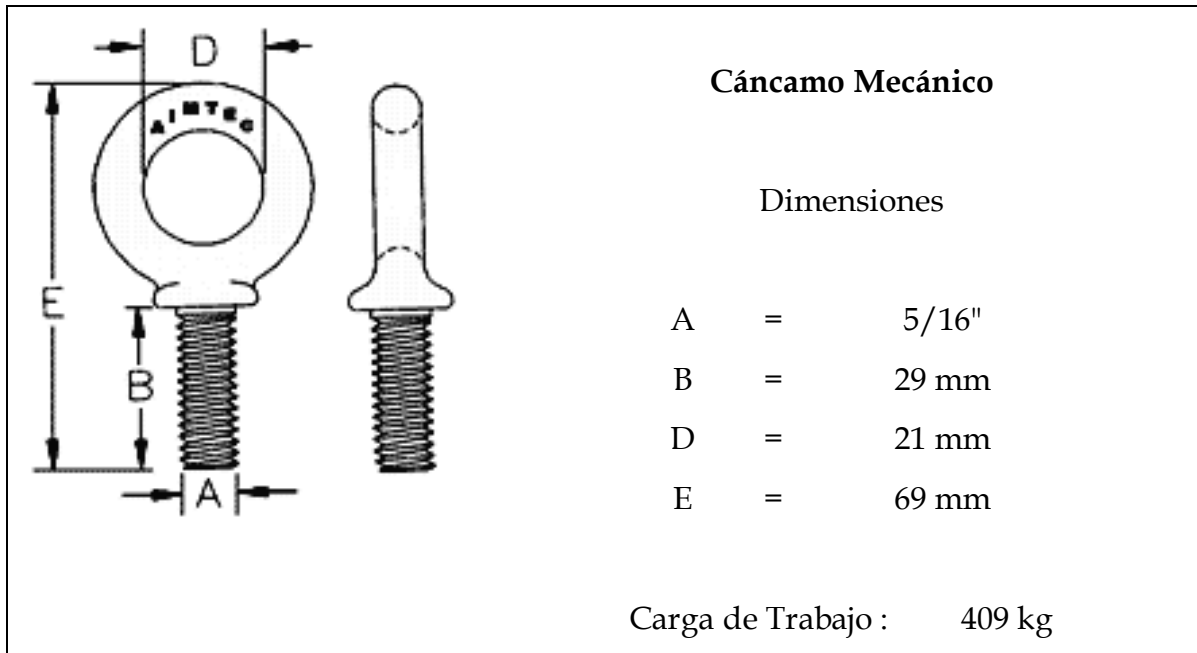


Figura 4.7: Cáncamo.

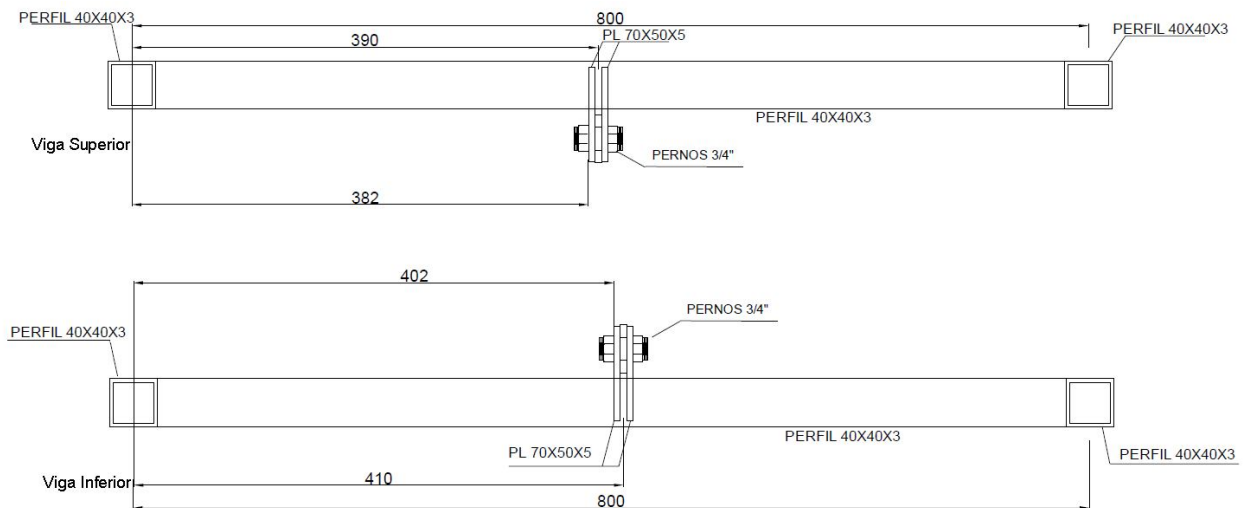


Figura 4.8: Conexión en vigas. Vista desde interior del marco

Los centros de las conexiones se desplazan 1cm desde la mitad de la viga, hacia la izquierda en la viga superior y 1cm a la derecha en la inferior, para evitar que en el cruce de las diagonales se produzca flexión en los elementos, disminuyendo, además, el roce.

4.2. Sistema de mordazas para barras de NiTiNOL

La conexión entre los elementos de las diagonales se materializa soldando un tensor en uno de los extremos del perfil de acero (Figura 4.9), luego el tensor se atornilla al sistema de mordaza de la barra de NiTiNOL (Figura 4.10).

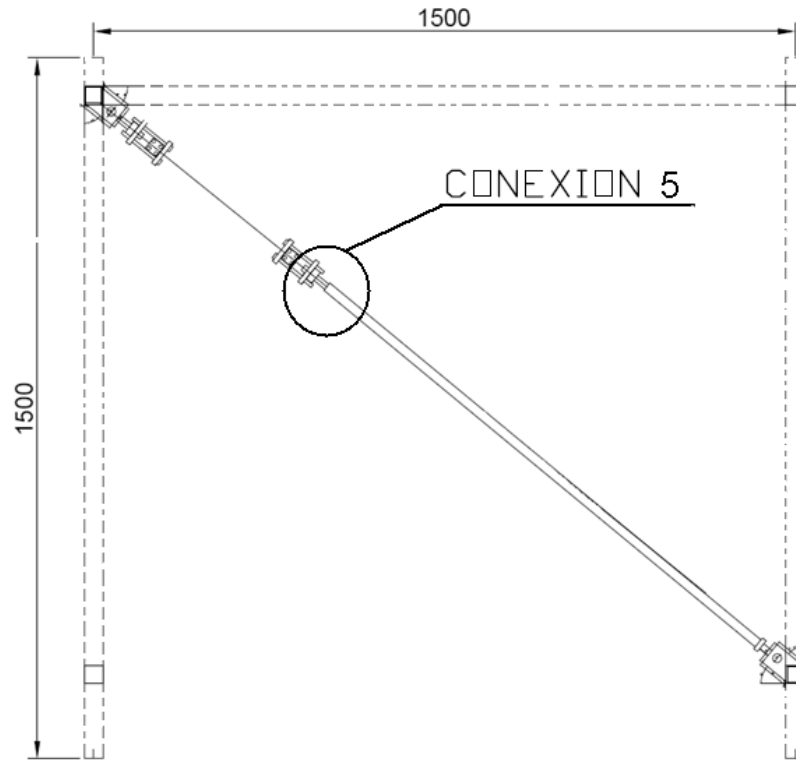


Figura 4.9: Conexión 5.

Por otra parte, la barra de NiTiNOL se conecta al marco en el sistema de mordazas que consiste en un par de discos de acero, de 10mm de espesor y 60mm de diámetro, conectados por pernos tipo Parker de 100mm de longitud y 7mm de diámetro, la mordaza se ubica entre los discos como se muestra en la figura 4.10 y 4.11.

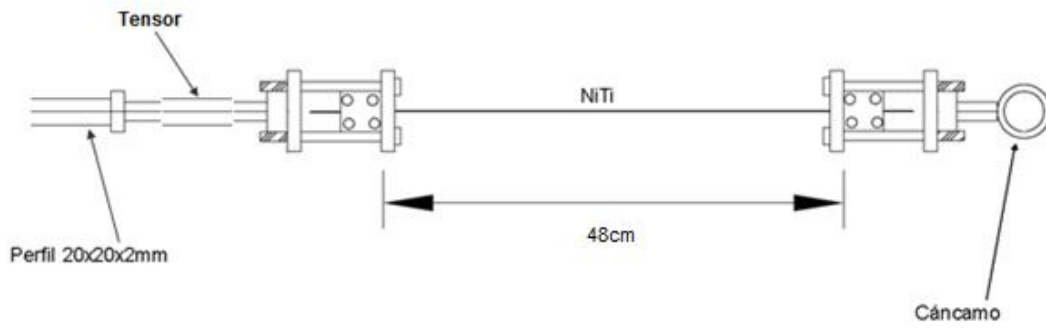


Figura 4.10: Conexión barra de NiTiNOL.

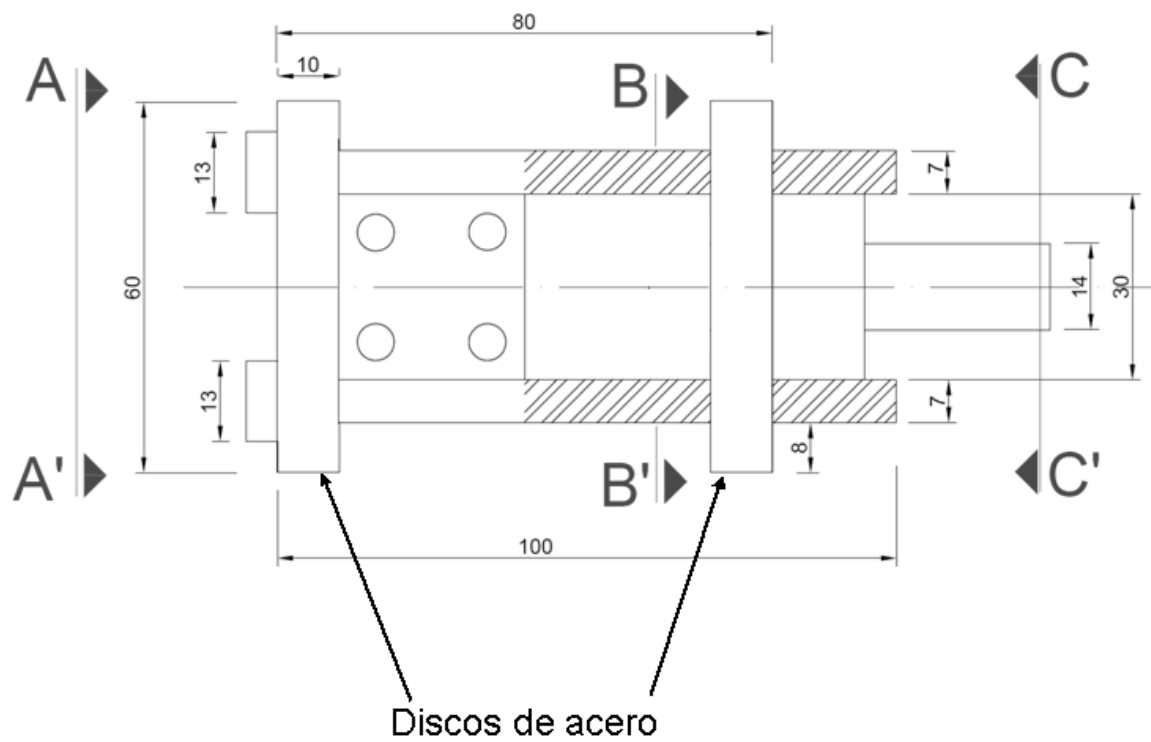


Figura 4.11: Conexión barra de NiTiNOL. Mordaza.

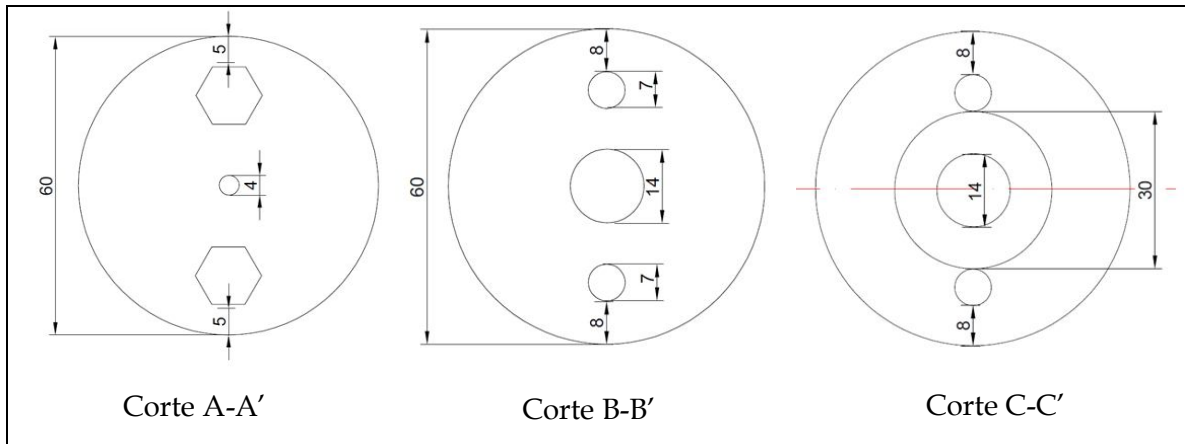


Figura 4.12: Corte A-A', B-B' y C-C'.

La mordaza queda libre, de manera que puede desplazarse para evitar que la barra sufra compresión durante el ensayo. Para simplificar la fabricación de las conexiones se permite el desplazamiento de las mordazas en ambos extremos.

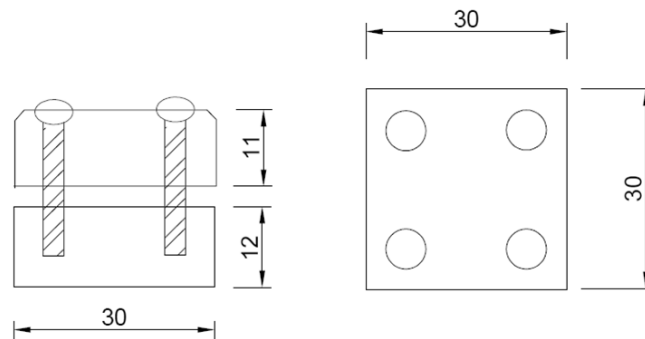


Figura 4.13: Mordaza

La mordaza tiene dimensiones en planta de 30x30mm, mientras que en altura, la parte superior tienen un espesor de 11mm y 12mm la inferior (Figura 4.13). La barra se introduce en el centro del disco (Corte A-A') y pasa a través de la mordaza, para ser fijada en su posición para el ensayo utilizando 4 pernos con golilla de presión de 50mm de longitud y 6mm de diámetro. Se utilizaron limas en cada mordaza (Figura 4.14), para evitar el desplazamiento de las barras durante los ensayos.

Las figuras 4.14 y 4.15 corresponden a la conexión del sistema de mordazas al marco, en una viga superior del marco y a la diagonal, respectivamente.



Figura 4.14: Conexión mordaza-marco.

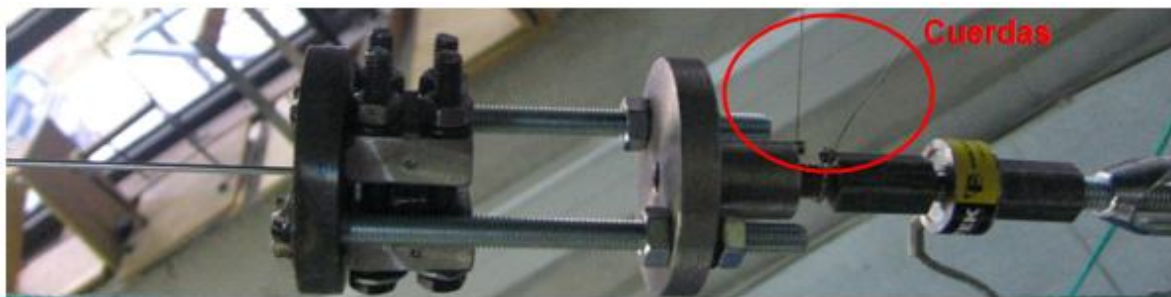


Figura 4.15: Conexión mordaza-diagonal.

Para evitar el movimiento fuera del plano de las diagonales se utilizaron cuerdas de guitarra (Figura 4.15), por ser alambres de pequeño diámetro y con una resistencia suficiente para mantener las diagonales centradas. Se colocaron dos cuerdas en cada diagonal buscando un ángulo de 90 grados con respecto a su propio eje, para no introducir esfuerzos en la dirección transversal. Las cuerdas se conectaron a las vigas longitudinales, a derecha e izquierda de la diagonal.

CAPITULO 5

Ensayos y análisis de resultados

Los ensayos se realizaron en mesa vibradora, bajo la acción del registro de Llolleo, componente N10E, escalado a 25, 50, 75 y 100% obtenido durante el sismo del 3 de marzo de 1985 y señales sinusoidales de amplitud variable entre 8 y 12 mm y frecuencia de 3,5 Hz.

Para el registro de datos de aceleración, desplazamiento y esfuerzos se utilizaron:

- i. Acelerómetros: en el techo de la estructura, en la mesa y en dos columnas para medir aceleraciones transversales.
- ii. Sensor láser: para medir desplazamiento absoluto, se coloca fuera de la mesa vibradora.
- iii. Sensor ultrasónico y potenciómetro: para medir desplazamiento relativo, se ubican en un poste a 1,3m de la superficie de la mesa. Además se colocaron potenciómetros para medir la deformación de las barras
- iv. Celdas de carga: en las diagonales de la estructura, entre el dispositivo de conexión de la barra de NiTiNOL y el perfil de acero.
- v. Se intentó usar extensómetros en las barras para medir su deformación, pero debió descartarse debido a que los instrumentos deslizaban a lo largo de las barras invalidando los datos registrados.

Una vez instalados los instrumentos se realizaron ensayos de pullback para determinar el periodo natural de la estructura y el amortiguamiento equivalente.

Para el marco arriostrado se obtuvo un periodo de entre 0,15 y 0,16s dependiendo de la pretensión aplicada, y un amortiguamiento equivalente igual a 2,5%.

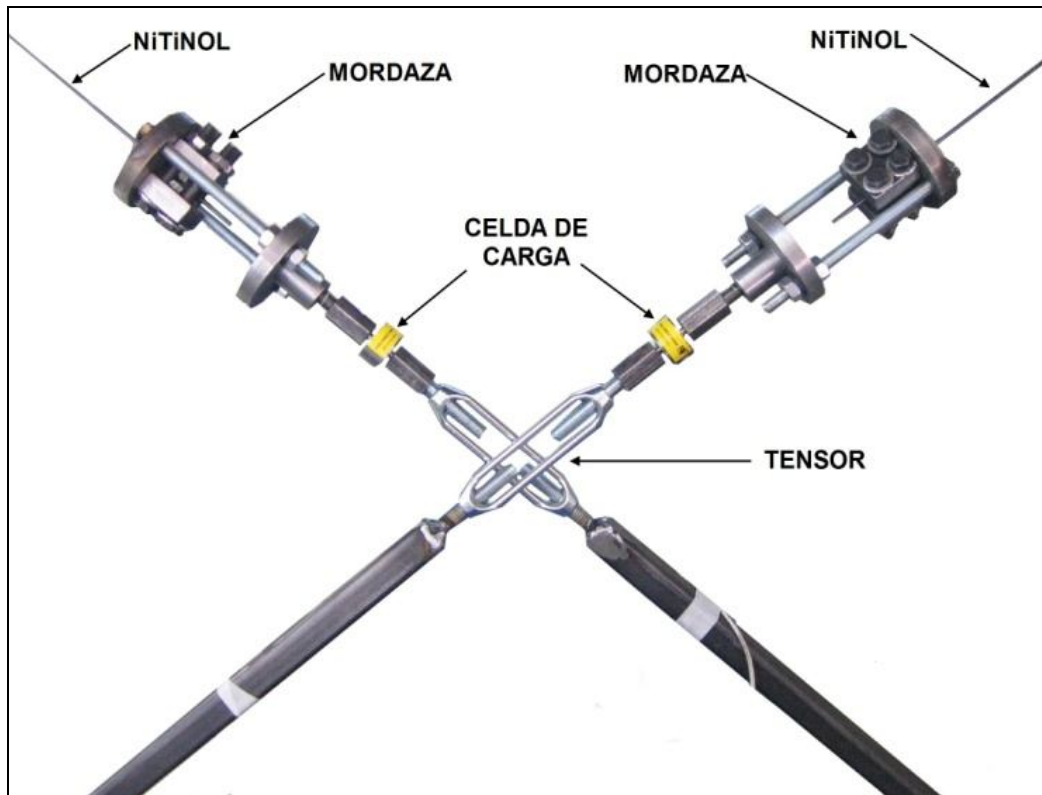


Figura 5.1: Instrumentación de la diagonal

En la figura 5.1 se muestra un detalle de las diagonales utilizadas, se indica la ubicación de las celdas de carga conectadas por un lado al sistema de mordazas de las barras de NiTiNOL y por el otro al tensor que permite pretensar las barras antes de cada ensayo.

En la figura 5.2 se observa la estructura instalada sobre la mesa vibradora, con todos los instrumentos de medición colocados.



Figura 5.2: Instalación marco arriostrado sobre mesa vibradora

5.1. Ensayos con Llolleo 25% y 50%

En los primeros 5 ensayos se utiliza el registro de Llolleo escalado al 25% y 50%. Los ensayos al 50% se inician con una pretensión promedio de 84,5MPa. La máxima pretensión utilizada es de 184,3MPa.

Integrando la aceleración medida en el techo de la estructura, para obtener los desplazamientos, se obtienen curvas muy cercanas entre los registros del sensor láser y los datos de la integración.

Los resultados obtenidos muestran que los registros del sensor ultrasónico y el potenciómetro utilizados para medir desplazamientos relativos son muy semejantes, con una diferencia máxima de 0,6mm entre los datos (Figura 5.3).

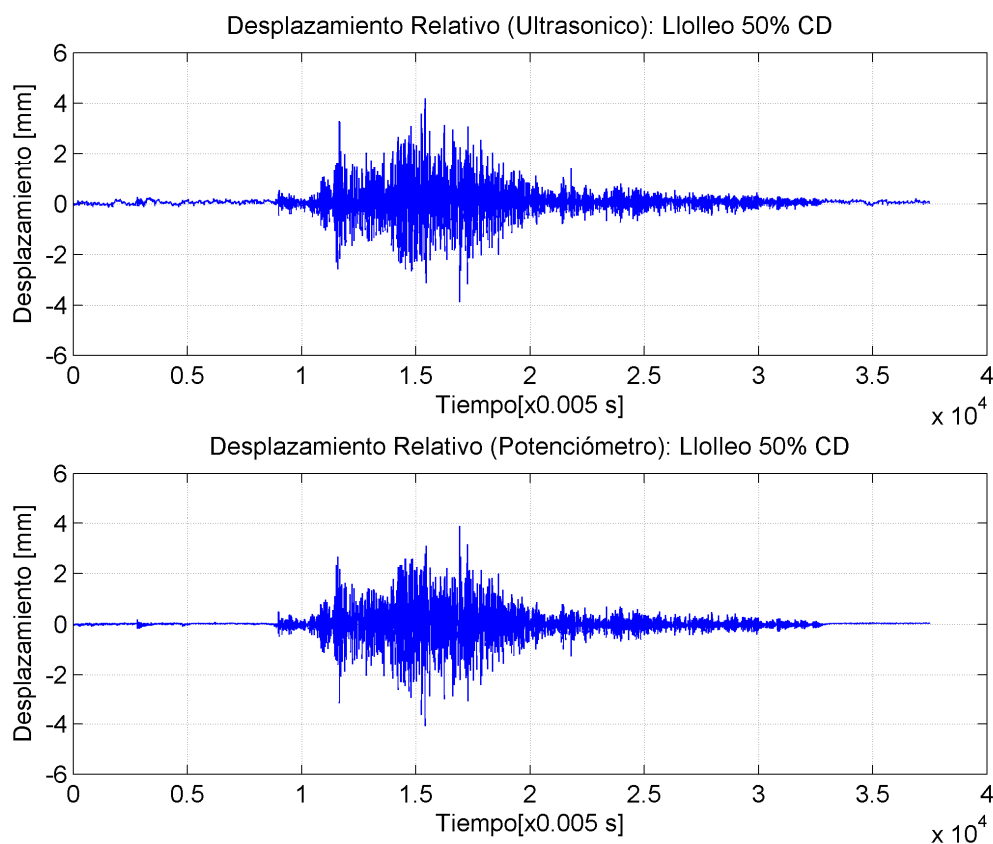


Figura 5.3: Desplazamiento relativo. Lollo 50%

En la siguiente tabla se entregan los valores máximos registrados para cada ensayo, en las columnas se muestran: pretensado promedio de las barras (pt), desplazamiento relativo (dr), desplazamiento por sensor láser (dl), aceleración de techo (a1) y base (a2) y, finalmente, tensión en las barras de NiTiNOL 1 (f1) y 2 (f2).

Tabla 5.1: Valores máximos de respuesta del marco.

Ensayo	pt	dr	dl	a1	a2	f1	f2
	[MPa] _(kgf)	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[MPa] _(kgf)	[MPa] _(kgf)
Llolleo 25%	84,5 ₍₄₁₎	2,2	22,6	0,4	0,20	198,6 _(96,4)	185,4 ₍₉₀₎
Llolleo 50% (a)	78,9 _(38,3)	4,1	43,5	0,7	0,44	302,5 _(146,8)	282,0 _(136,9)
Llolleo 50% (b)	184,3 _(89,4)	8,0	50,5	1,1	0,44	551,4 _(267,7)	581,5 _(282,3)
Llolleo 50% (c)	147,5 _(71,6)	8,4	45,4	1,1	0,44	565,7 _(274,6)	580,9 ₍₂₈₂₎
Llolleo 50% (d)	148,5 _(72,1)	5,8	44,1	0,9	0,44	466,5 _(226,5)	406,2 _(197,2)

El registro de los datos generados por las celdas de carga (esfuerzo) se entrega en unidades de fuerza (kgf). Estos valores en la tabla 5.1 se muestran entre paréntesis. Los valores de la pretensión y tensiones en las barras 1 y 2, en unidades de presión (MPa), se han calculado utilizando el diámetro correspondiente a las barras de NiTiNOL, 2,46mm, lo que da un área de 4,75mm².

En todos los ensayos se observa amplificación en la aceleración que afecta a la estructura, es decir, la aceleración en la base (forzante) es menor que la registrada en el techo, observándose la misma situación con distintas pretensiones.

La aceleración en techo resulta ser, aproximadamente, el doble de la de base (Figura 5.4).

Durante los ensayos aparece torsión en la estructura, es decir el marco se mueve fuera del plano longitudinal, lo que se confirma con los registros de aceleraciones transversales, que alcanzan valores de hasta 0.4g (Figura 5.5). La torsión disminuye si se aumenta la pretensión de las barras.

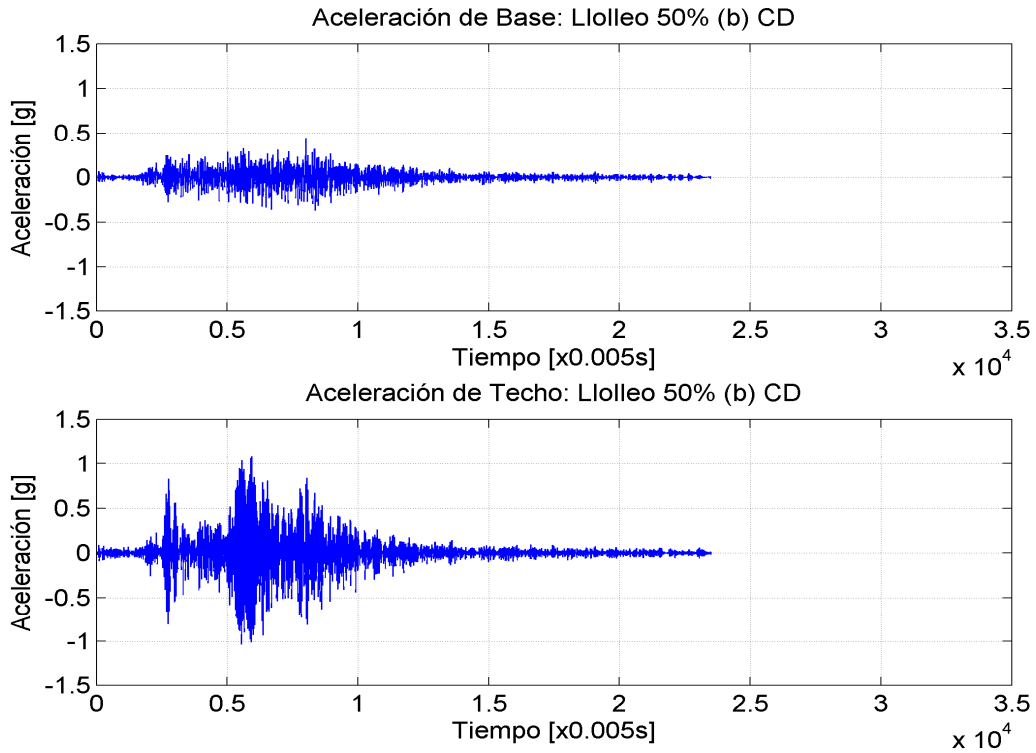


Figura 5.4: Aceleraciones longitudinales. Lollole 50%. Pretensión 184.3MPa.

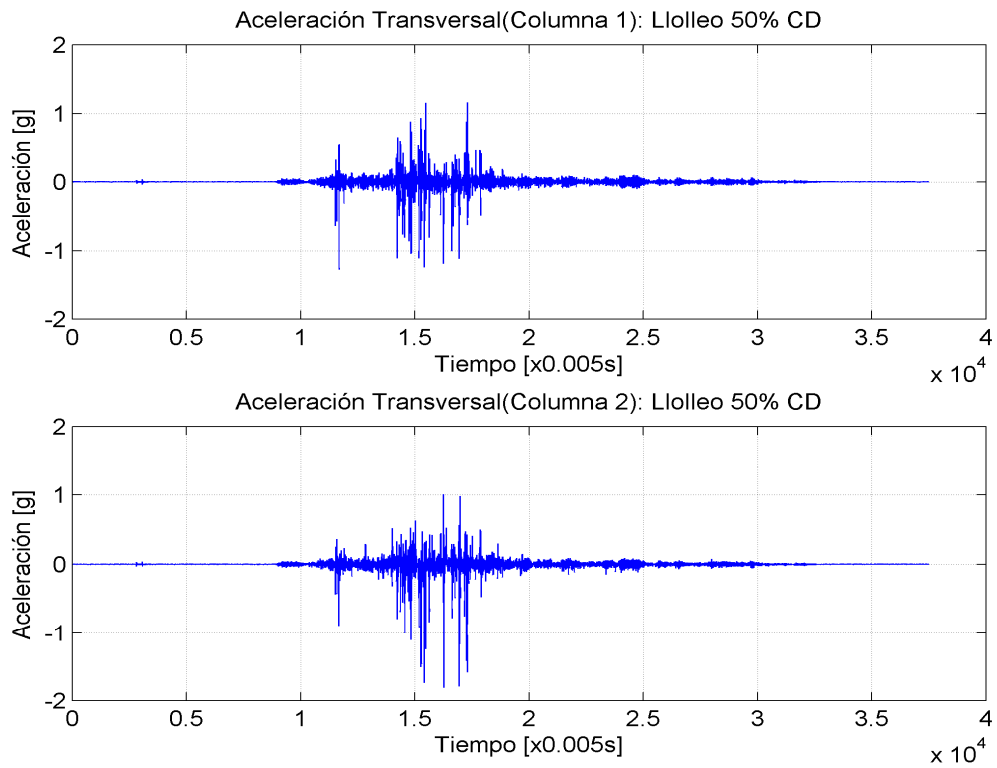


Figura 5.5: Aceleraciones transversales. Lollole 50%.

Los registros de tensiones en las barras de NiTiNOL muestran simetría, es decir, cuando una diagonal está cerca de la compresión, o tensión menor o igual a cero, la otra se encuentra traccionada (Figura 5.6).

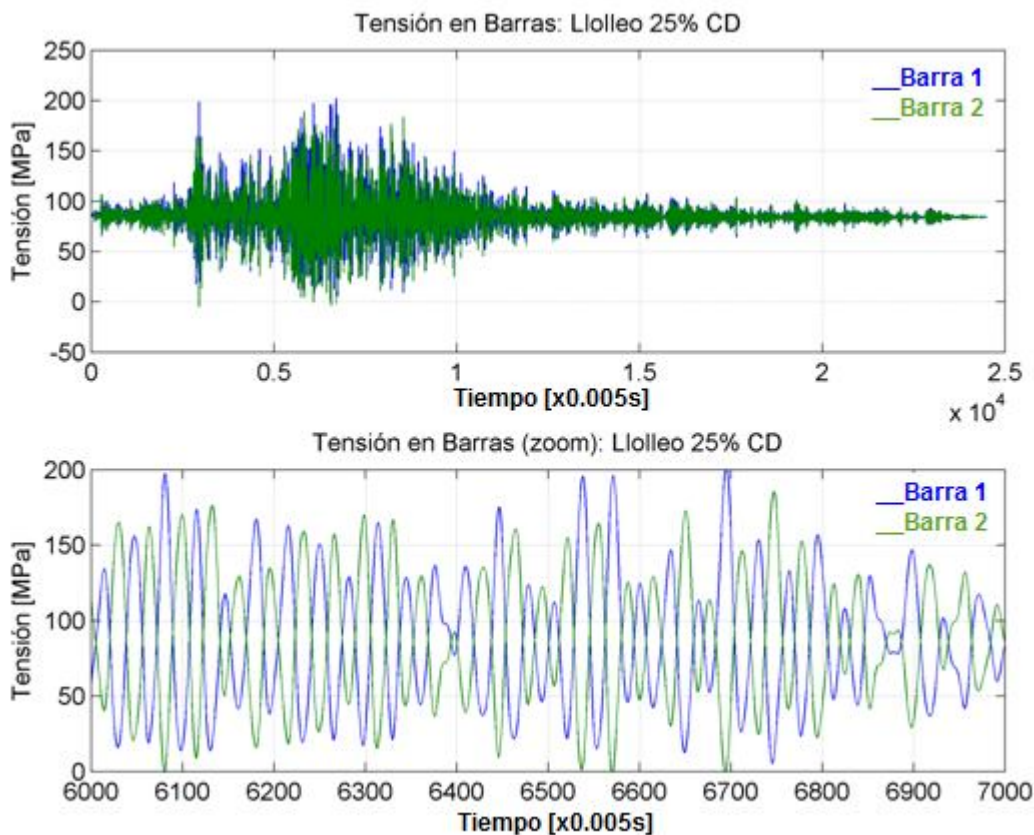


Figura 5.6: Tensión en barras. Lolloo 25%.

Todo lo anterior indicaría que la instrumentación es adecuada y que el sistema funciona, sin embargo, existen dudas acerca del correcto funcionamiento del dispositivo diseñado para evitar que las barras de NiTiNOL sufran compresión, como sucede al utilizar un escalamiento del sismo del 50% o más, apareciendo tensiones negativas de al menos 35MPa, que corresponden a valores registrados durante los ensayos (Figura 5.7).

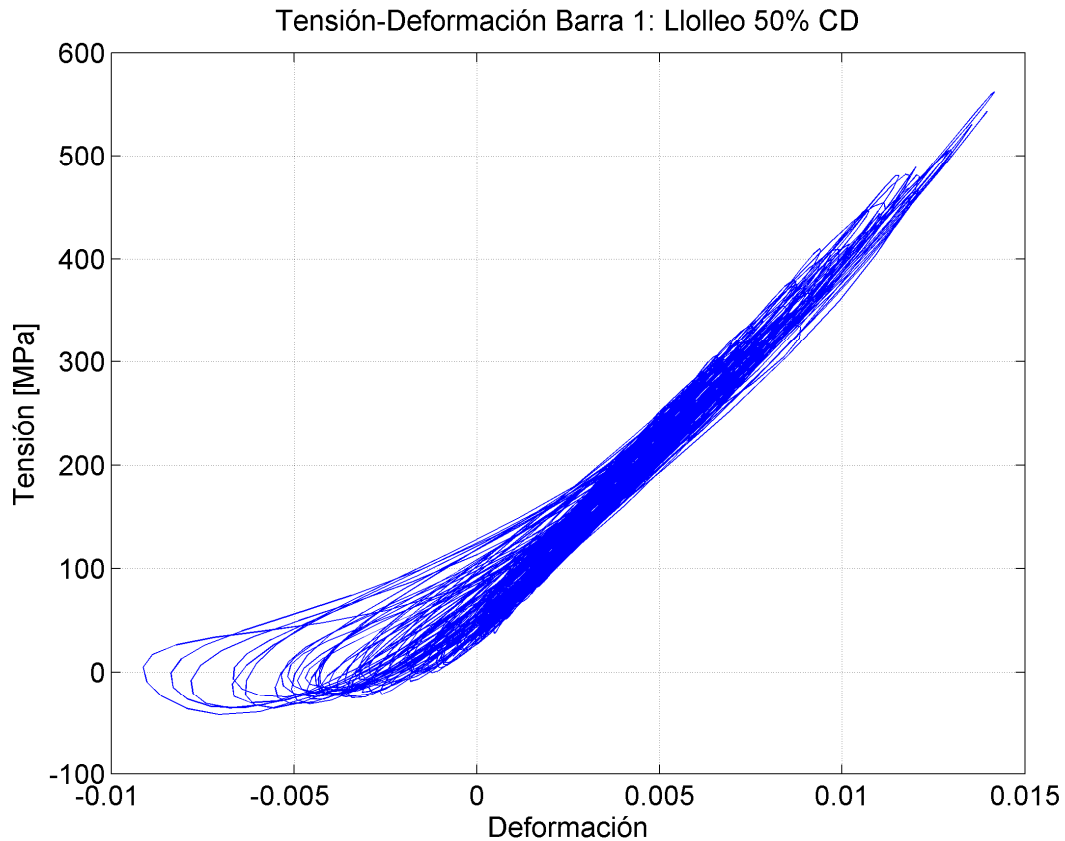


Figura 5.7: Tensión – Deformación. Barra 1. Lollole 50%
Pretensión 184.3MPa.

Dadas las características de las barras de NiTiNOL se esperaba que éstas fluyeran a una tensión por sobre los 520MPa, sin embargo, aunque en los ensayos al 50% (casos b y c) las barras superan la tensión de transformación, no es posible determinar, en el Figura anterior, el punto en que sucede la fluencia, por lo que se decidió utilizar funciones sinusoidales con el fin de inducir mayores deformaciones en el marco.

5.2. Ensayos con señales sinusoidales

En la tabla 5.2 se entregan los valores máximos de respuesta del marco para cada ensayo con señales sinusoidales. En las columnas se muestran: pretensado promedio de las barras (pt), desplazamiento relativo (dr), desplazamiento por sensor láser (dl), aceleración de techo (a1) y base (a2) y, finalmente, tensión en las barras de NiTiNOL 1 (f1) y 2 (f2). Los valores entre paréntesis corresponden a los esfuerzos en las barras en unidades de fuerza (kgf).

Tabla 5.2: Valores máximos de respuesta del marco.

Ensayo	pt	dr	dl	a1	a2	f1	f2
	[MPa](kgf)	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[MPa](kgf)	[MPa](kgf)
Seno 3,5Hz 8mm	205,8 _(99,9)	9,0	26,4	1,2	0,6	590,2 _(286,5)	642,2 _(311,8)
Seno 3,5Hz 10mm*	205,0 _(99,5)	76,0	76,0	1,7	0,7	549,2 _(266,6)	735,0 _(356,8)
Seno 3,5Hz 10mm	213,4 _(103,6)	5,5	23,0	0,9	0,6	479,4 _(232,7)	438,4 _(212,8)
Seno 3,5Hz 10mm**	212,2 ₍₁₀₃₎	4,8	24,8	0,8	0,6	448,0 _(217,5)	421,0 _(204,3)
Seno 3,5Hz 12mm**	183,3 ₍₈₉₎	10,4	52,9	1,2	0,7	628,6 _(305,1)	562,3 _(272,9)

*Ensayo falló por deslizamiento de la mordaza en la barra 1

**Ensayo con señal con inicio y final suavizado

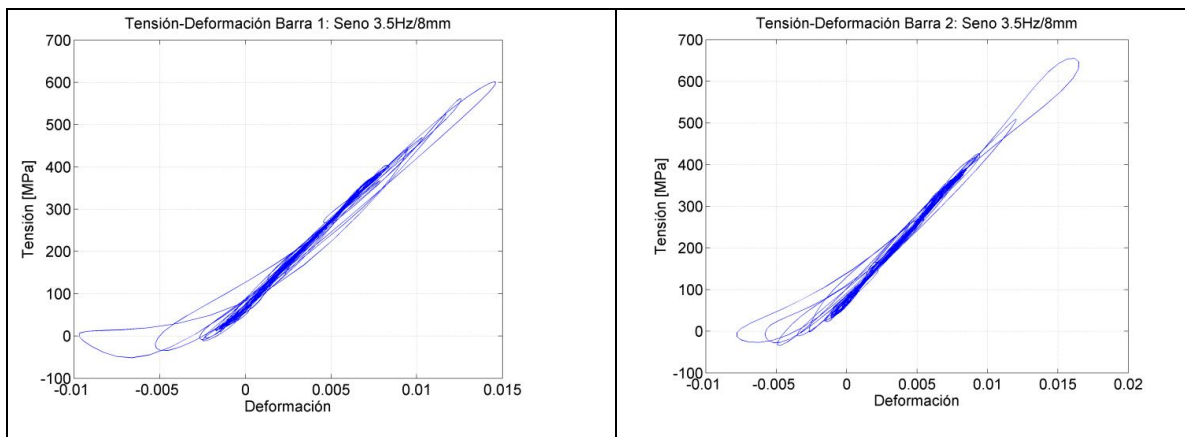


Figura 5.8: Tensión-Deformación. Seno 3,5Hz/8mm.

Los ensayos con sinusoides se iniciaron con una señal seno de 3,5Hz y 8mm de amplitud, alcanzando tensiones por sobre los 600MPa, con lo que deberían entrar en fluencia, sin embargo no es posible observarlo en los gráficos (Figura 5.8); no se observa un cambio en la pendiente.

Se incrementó la amplitud de la señal sinusoidal para producir mayores desplazamientos, este aumento provocó el deslizamiento de una mordaza en la barra 1, esto causó que la otra barra entrara en fluencia al recibir toda la carga (Figura 5.9).

La barra 1 sufrió un alargamiento de entre 1 y 2mm y todas las conexiones de la estructura debieron revisarse para continuar con los ensayos.

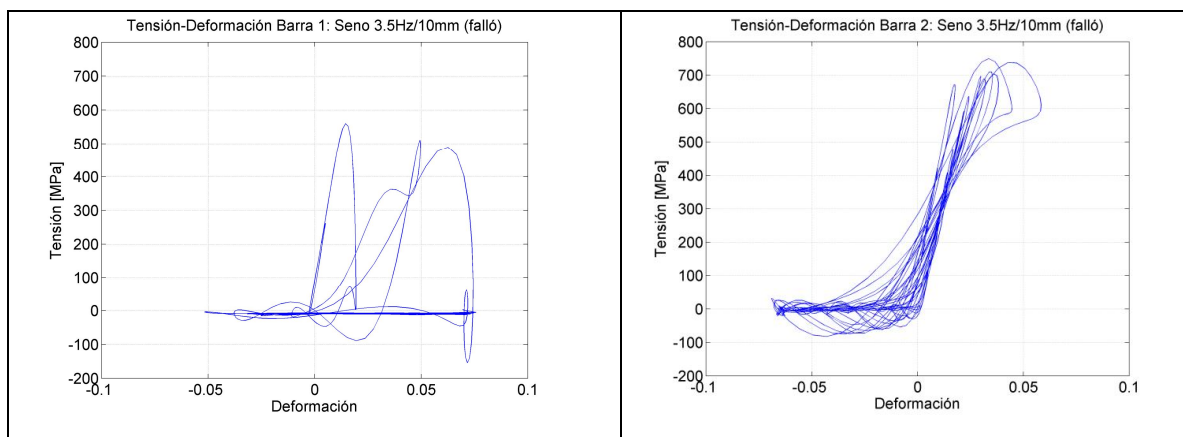


Figura 5.9: Tensión-Deformación. Seno 3,5Hz/10mm (falló).

Se realizó un nuevo ensayo con igual amplitud (Figura 5.10). Las curvas de histéresis muestran un punto de cambio de pendiente que se encuentra por debajo de la tensión de fluencia esperada (aproximadamente 516MPa), por lo que se considera que las barras no fluyen y, por lo tanto, se incrementa la amplitud de la señal. No se observa zona de compresión.

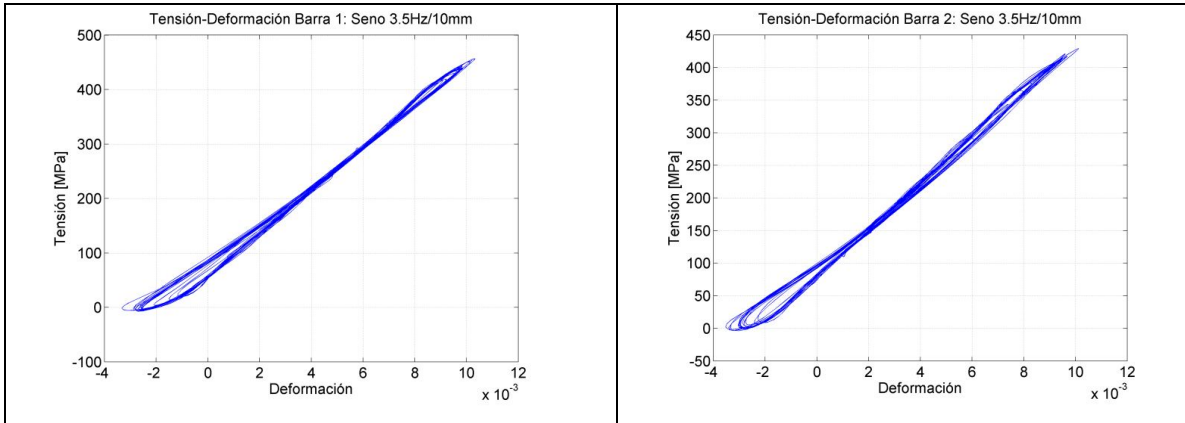


Figura 5.10: Tensión-Deformación. Seno 3,5Hz/10mm.

El gráfico de la figura 5.11 muestra las deformaciones que sufren las barras durante el ensayo. Según los potenciómetros instalados para medir deformaciones en las barras, la 1 se deforma un máximo de 3,7mm, mientras que la barra 2 no supera los 2mm.

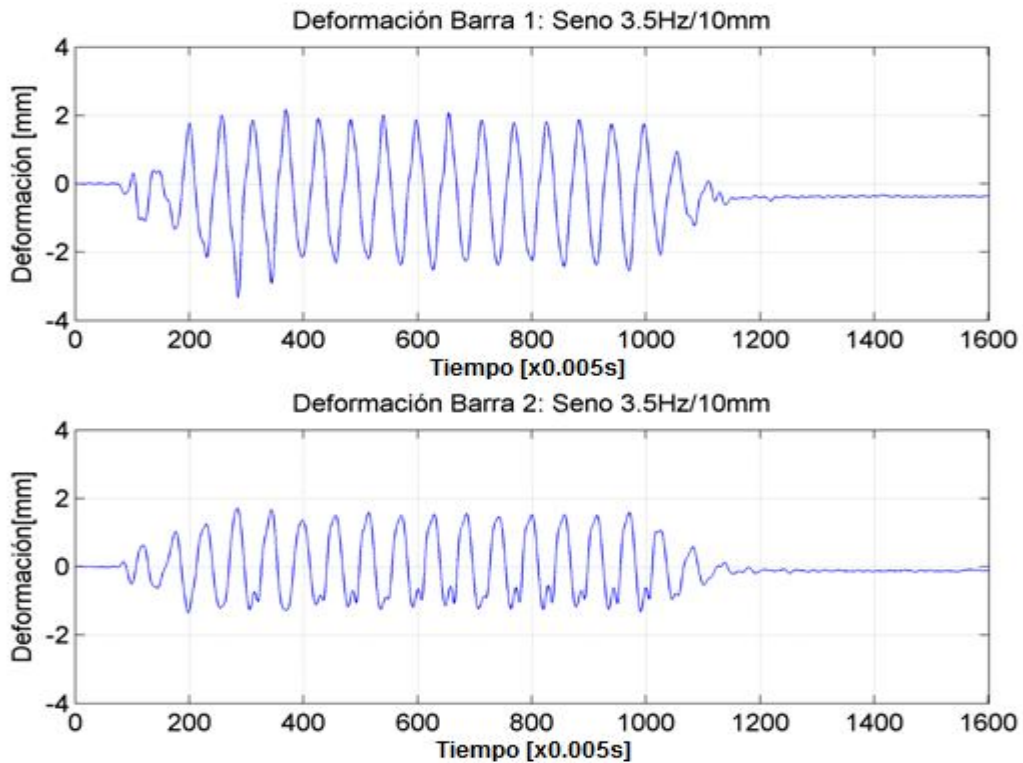


Figura 5.11: Deformación barras. Seno 3,5Hz/10mm.

Para el último ensayo con sinusoides se utiliza una señal de 3,5Hz y 12mm de amplitud. En este ensayo las barras alcanzan la fluencia y es posible identificar el punto en que se produce el cambio de pendiente de la curva de histéresis (Figura 5.12).

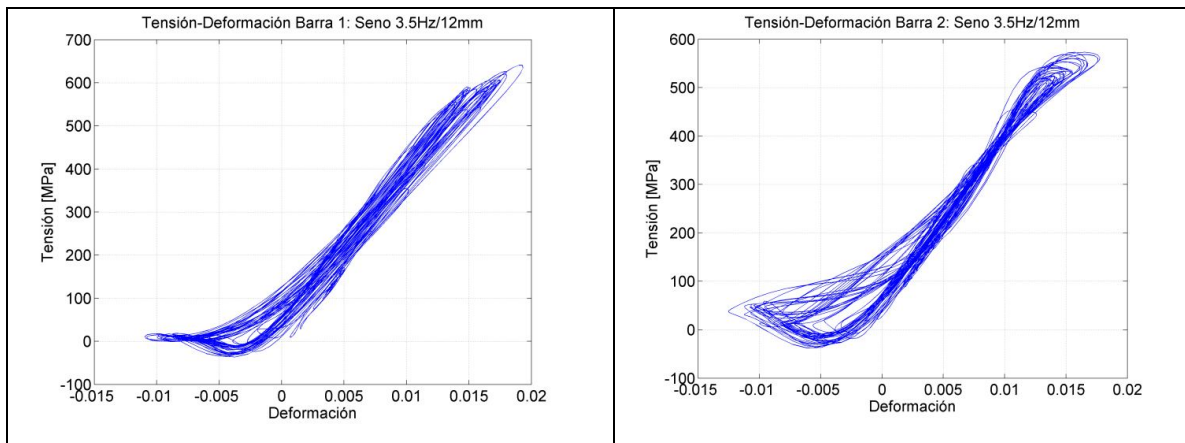


Figura 5.12: Tensión-Deformación barras. Seno 35Hz y 12mm.

El Figura correspondiente a la barra 1 (izquierda), muestra una mejor convergencia hacia la tensión cero, con una zona de compresión menor que la barra 2. La zona de compresión se explica por un mal funcionamiento del sistema para evitarla, es decir, la mordaza no desliza como debería o desliza con retraso.

5.3. Ensayos con Llolleo 75% y 100%

Con el fin de llevar las barras al máximo de su resistencia se realizan ensayos con Llolleo escalado al 75 y 100%.

En la tabla 5.3 se muestran los valores máximos de respuesta del marco para estos dos últimos ensayos, en las columnas se muestran: pretensado promedio de las barras (pt), desplazamiento relativo (dr), desplazamiento por sensor láser (dl), aceleración de techo (a1) y base (a2) y, finalmente, tensión en las barras de NiTiNOL 1 (f1) y 2 (f2). Los valores entre paréntesis corresponden a los esfuerzos en las barras en unidades de fuerza (kgf).

Tabla 5.3: Valores máximos de respuesta del marco.

Ensayo	pt	dr	dl	a1	a2	f1	f2
	[MPa](kgf)	[mm]	[mm]	[g]	[g]	[MPa](kgf)	[MPa](kgf)
Llolleo 75%	219,1 _(106,3)	11,8	78,6	1,4	0,6	687,4 _(333,7)	652,1 _(316,5)
Llolleo 100%	220,7 _(107,1)	13,9	89,9	1,5	0,7	703,3 _(341,4)	678,3 _(329,3)

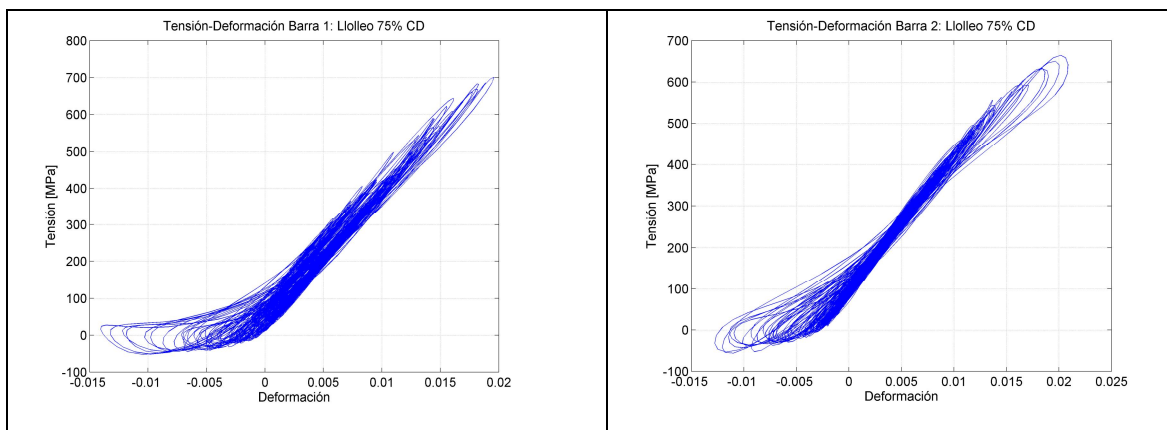


Figura 5.13: Tensión-Deformación barras. Llolleo 75%.

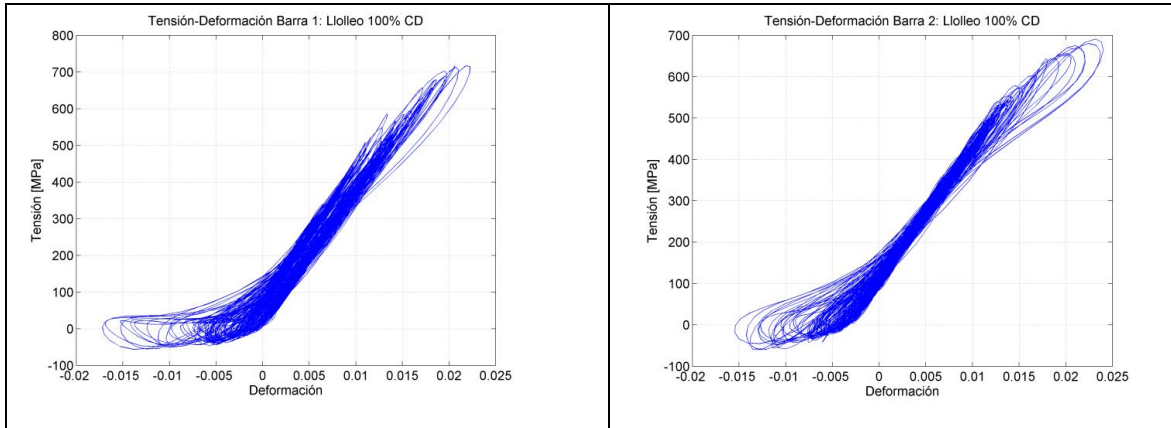


Figura 5.14: Tensión-Deformación barras. Lollo 100%.

Las figuras anteriores muestran que las barras entran en fluencia para Lollo escalado a 75 y 100%. En ambos casos la fluencia se observa mejor en el gráfico correspondiente a la barra 2.

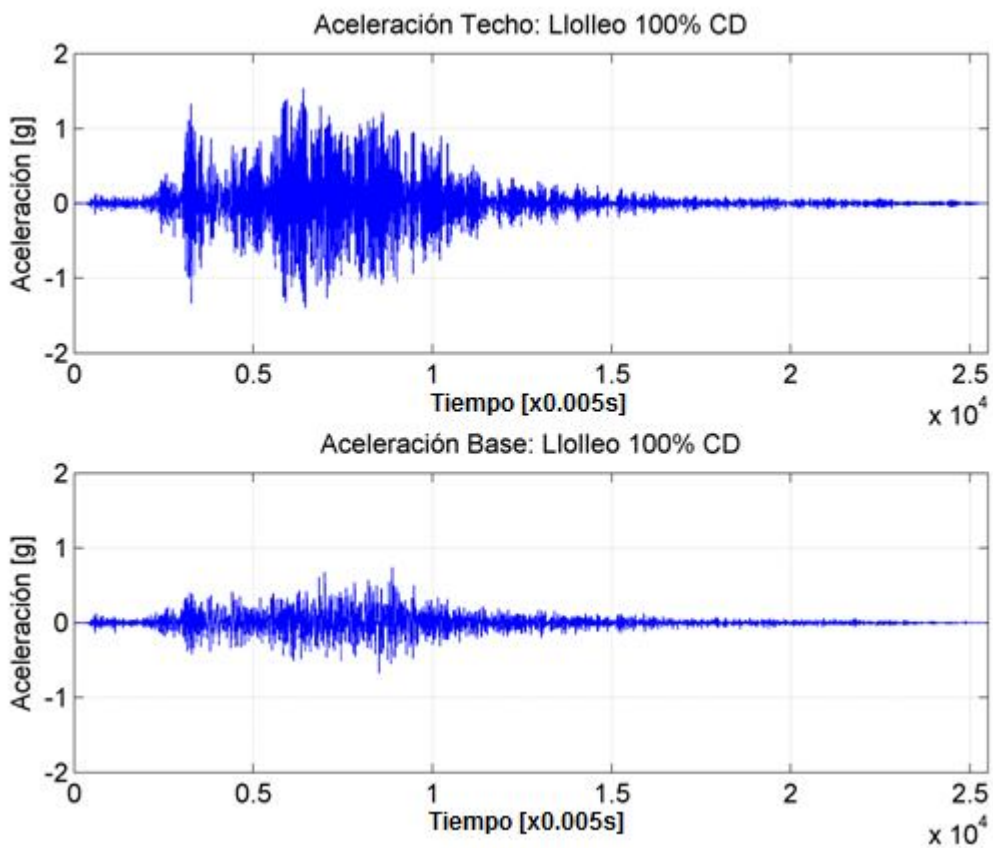


Figura 5.15: Aceleraciones de techo y base. Lollo 100%.

Como en todos los ensayos anteriores aquí también se tiene que la aceleración de techo (Figura 5.15), corresponde, al menos, al doble del valor de la forzante (base).

Para el sismo al 100% el desplazamiento máximo del techo de la estructura es de algo más que 10mm, según la lectura de los sensores de movimiento relativo (Figura 5.16).

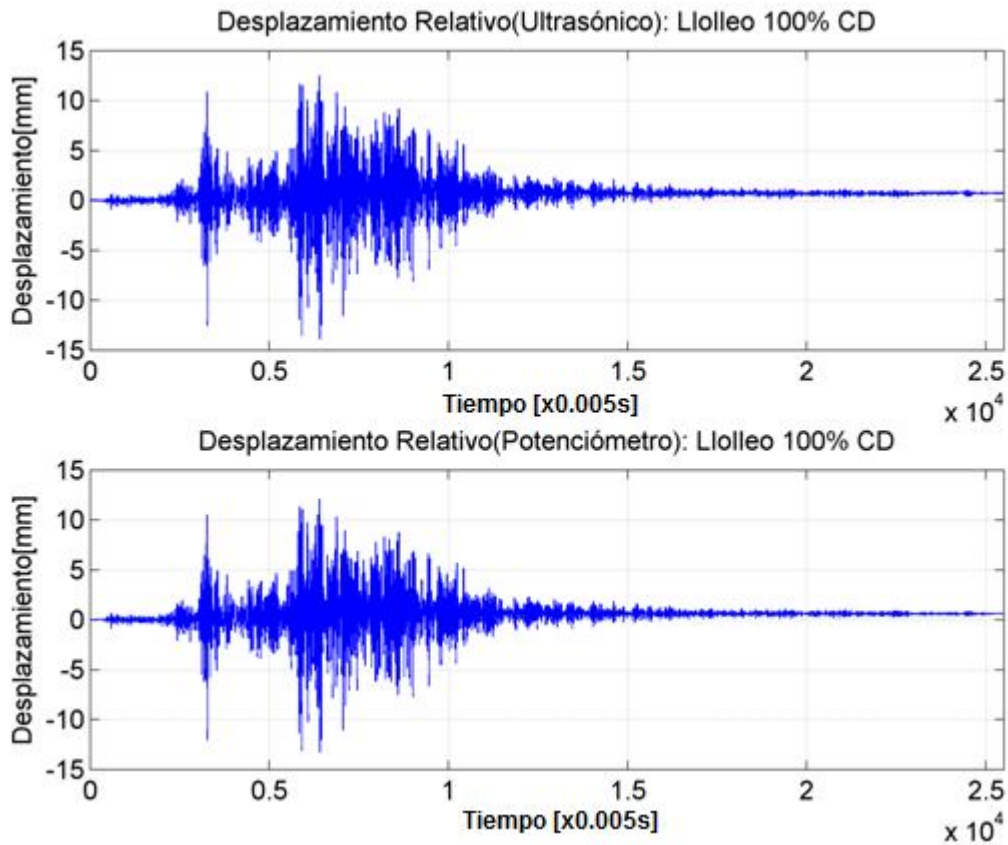


Figura 5.16: Desplazamiento relativo techo. Lollole 100%.

5.4. Ensayos sin diagonales

Se realizaron ensayos con el marco sin diagonales para comprobar los beneficios de la utilización de barras de NiTiNOL en el sistema de arriostramientos del marco.

Para conocer los valores de período y amortiguamiento equivalente la estructura se sometió a ensayos de pullback, resultando un período de 0,44s y una razón de amortiguamiento equivalente de 1,55%.

Luego se aplicó el registro del sismo escalado al 25% y 50%

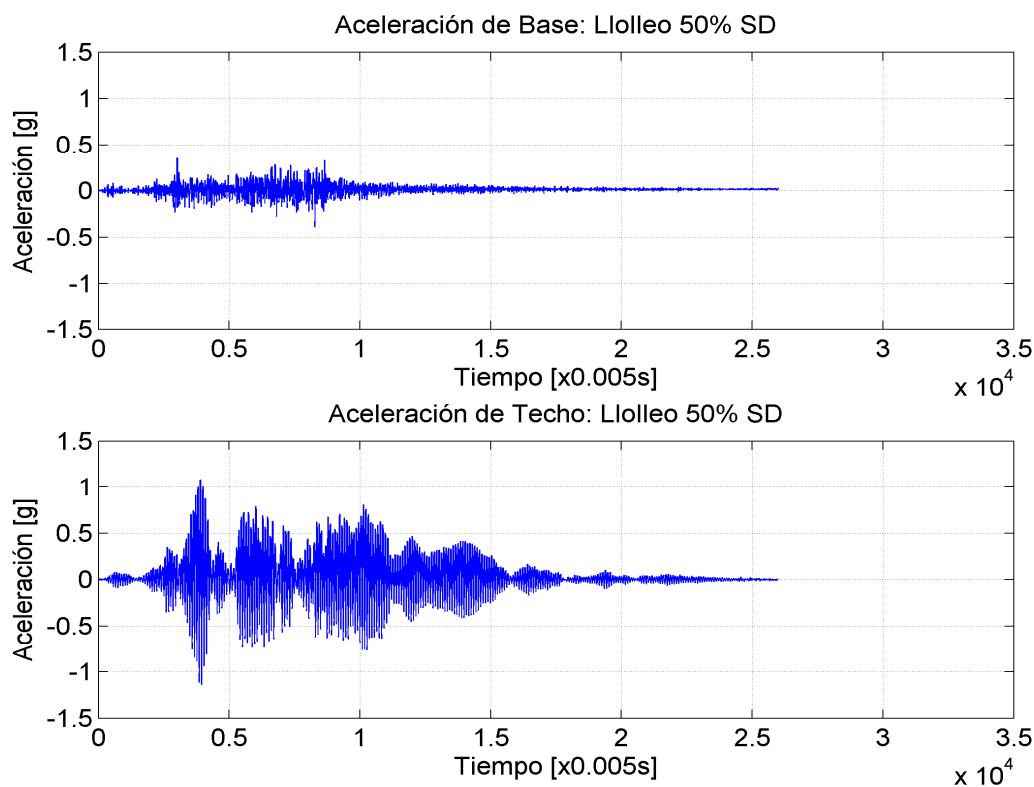


Figura 5.17: Aceleraciones de techo y base. Lloleo 50%.

De la figura 5.17, la aceleración de techo llega a más de 1g, valor que es semejante al caso en que se utilizan diagonales en el ensayo con sismo escalado al 50% (Tabla 5.1).

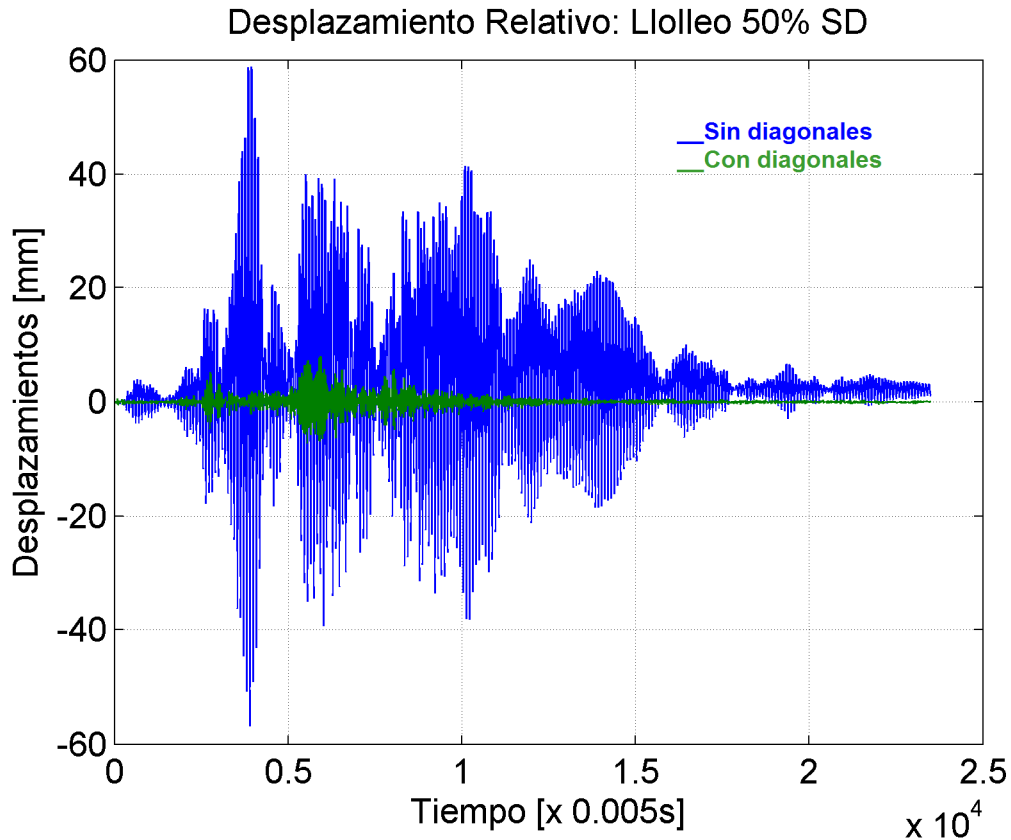


Figura 5.18: Desplazamiento relativo de techo. Lollo 50%.

En el gráfico de la figura 5.18 se comparan los desplazamientos relativos bajo las solicitaciones del sismo escalado al 50%. En el marco sin arriostramientos el desplazamiento máximo es casi 60mm (en azul), mucho mayor que en el caso con diagonales (en verde) para igual solicitación, además se observa deformación remanente en ese caso

Para evitar accidentes producto de los violentos movimientos de la estructura no se realizaron ensayos con Lollo a escala sobre el 50%.

5.5. Disipación de energía

Para estimar la energía disipada en un ensayo del marco arriostrado se integró la aceleración registrada en el techo para luego calcular la energía cinética como un medio de la masa por la velocidad al cuadrado. Por otra parte, se graficó el trabajo realizado por las barras de NiTiNOL obtenido de multiplicar el esfuerzo por la deformación de ellas. Se eligió el ensayo con señal seno a 3,5Hz y 12mm de amplitud, por ser más estable que los registros sísmicos.

La energía de entrada del sistema durante el ensayo corresponde a la aportada por la mesa vibradora que reproduce la señal sinusoidal de 3.5Hz y 12mm de amplitud. Considerando que la energía se conserva en el sistema, la energía de entrada debe ser igual a la suma de las energías cinética, de amortiguamiento viscoso, elástica y de trabajo plástico. Como no se observó plastificación en los elementos de acero del marco durante el ensayo se concluye que el trabajo plástico, o de histéresis, es realizado sólo por las barras de NiTiNOL.

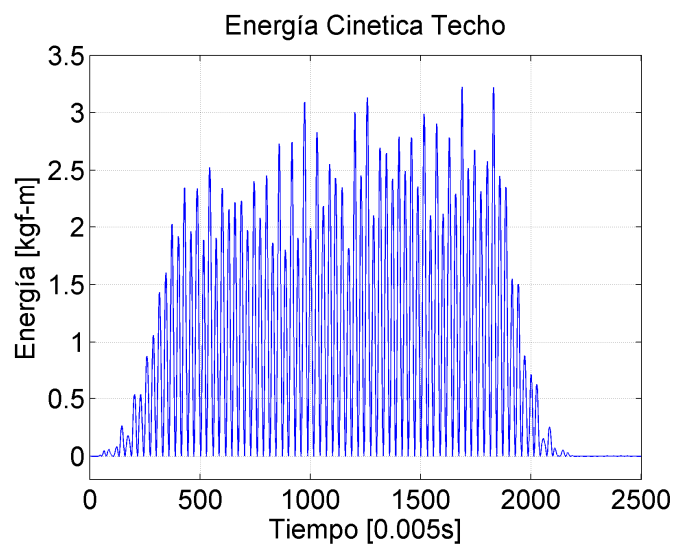


Figura 5.19: Energía cinética en la estructura

La energía cinética del marco tiene un máximo de 3,22kgf-m.

Las barras 1 y 2 disipan un máximo de 1,57 y 1,21kgf-m cuando son sometidas al mismo ensayo con señal sinusoidal (Figura 5.20).

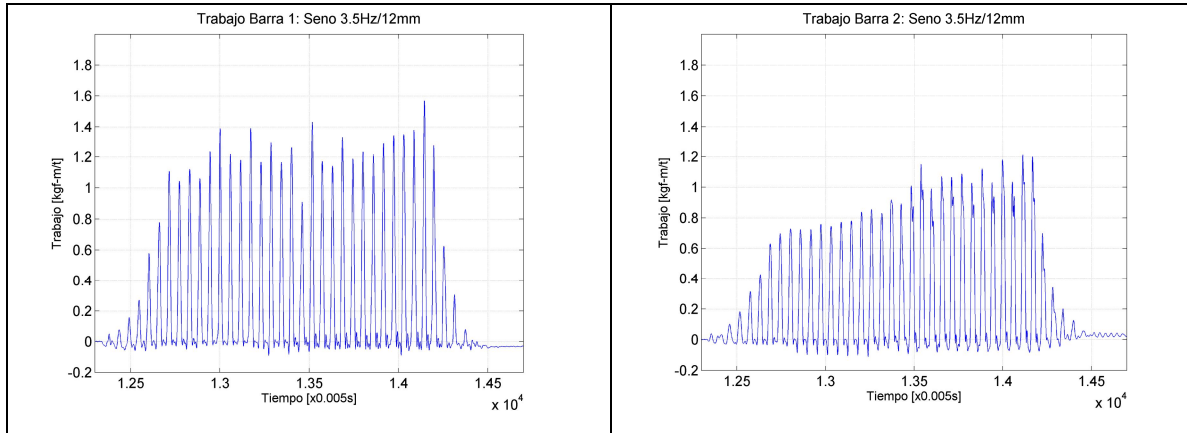


Figura 5.20: Trabajo en las barras. Seno 3.5Hz/12mm

La información anterior no permite la comparación entre los casos con y sin diagonales, por lo que se grafica la energía cinética del marco y el trabajo de las barras para los casos con y sin arriostramientos con el sismo escalado al 50%.

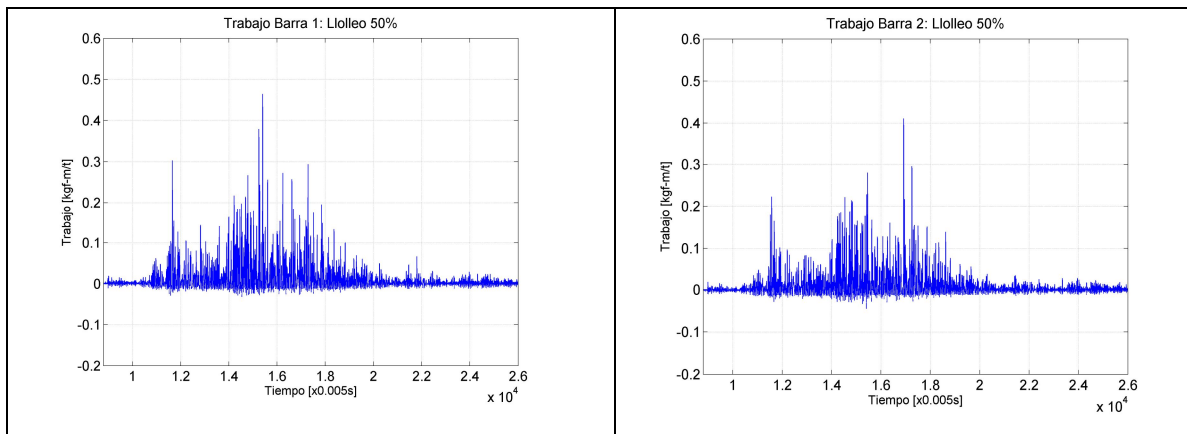


Figura 5.21: Trabajo en las barras. L1olloe 50%. Pretensión: 38.3kgf

Las figuras 5.21 y 5.22 muestran el trabajo realizado por las barras para el sismo escalado al 50% con distintas pretensiones. Se observa que a mayor pretensión aumenta el trabajo de las barras, o sea, su contribución a la disipación de energía es mayor.

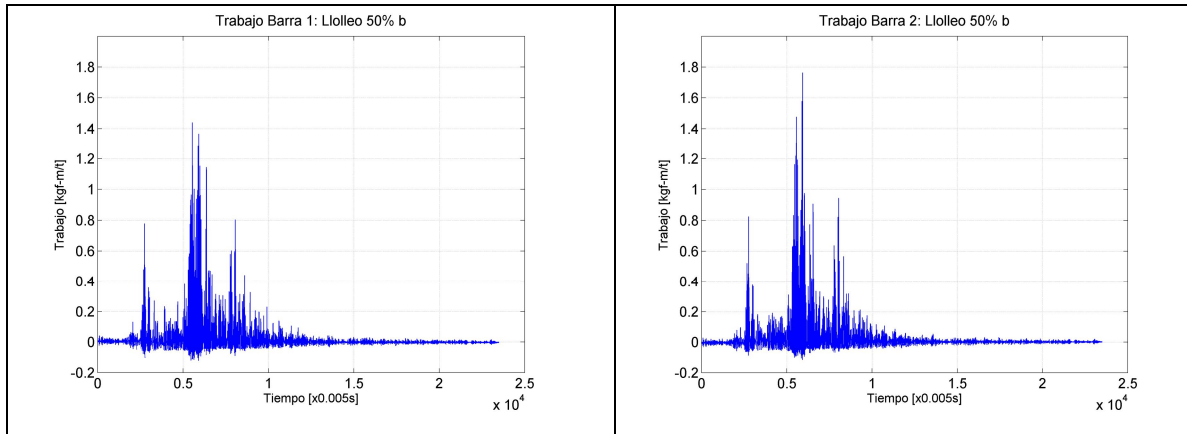


Figura 5.22: Trabajo en las barras. . Lollole 50%. Pretensión: 89.4kgf

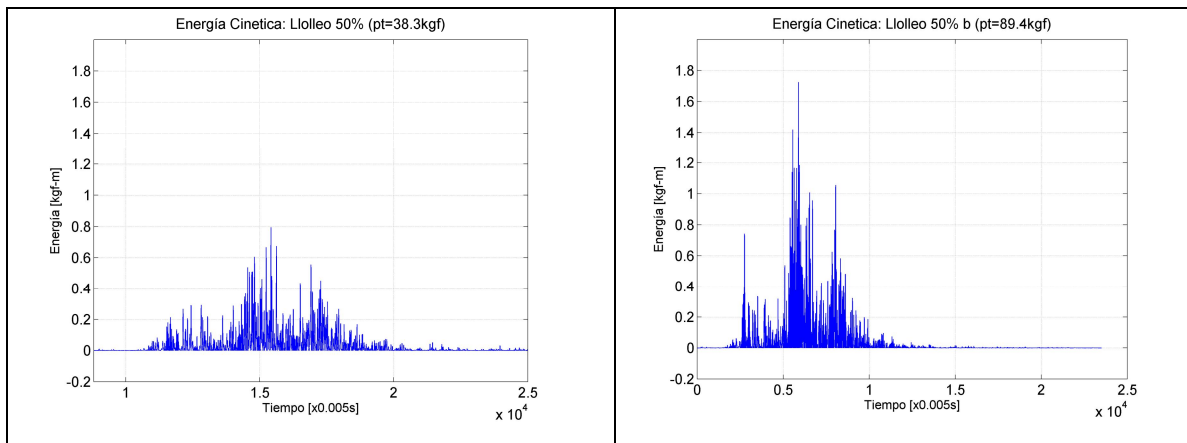


Figura 5.23: Energía cinética marco arriostrado. Lollole 50%.

La figura anterior muestra que en el caso con mayor pretensión la energía cinética, que se obtuvo de integrar las aceleraciones del marco, es mayor. Esto se explica porque en el registro de aceleraciones de techo se producen valores mayores en el

caso con mayor pretensión. Lo que coincide con lo descrito en la literatura, es decir, el uso de diagonales disminuye los desplazamientos pero las aceleraciones pueden aumentar.

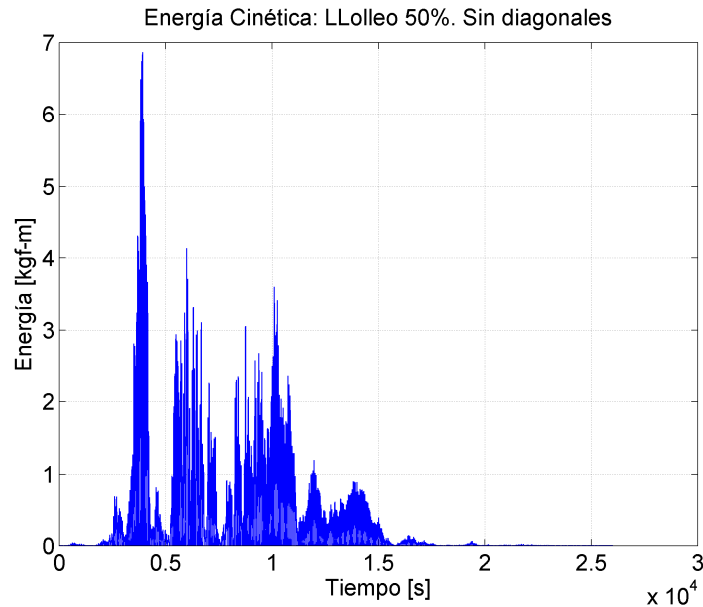


Figura 5.24: Energía cinética marco sin diagonales. Llolleo 50%.

Por último, la energía cinética en el caso sin diagonales (Figura 5.24), es mucho mayor que en los casos de marco arriostrado. Debido a que se trata de una estructura menos rígida ante la aplicación de la señal sísmica se producen velocidades mayores en el techo.

En este último caso la estructura sufrió deformación permanente, los elementos del marco, posiblemente las columnas, se plastificaron, de esta manera se disipó, en parte, la energía introducida al sistema. El marco quedó deformado, observándose que las columnas perdieron verticalidad.

5.6. Revisión y validación del modelo

Una vez terminados los ensayos del marco con y sin diagonales se revisaron los modelos del programa RUAUMOKO para verificar la validez de los datos generados por él.

Tabla 5.4: Periodo y amortiguamiento.

Variable	Caso	Modelo	Ensayo
Amortiguamiento [%]	Con diagonales	2,00	2,50
	Sin diagonales	2,00	1,55
Periodo [s]	Con diagonales	0,11	0,15
	Sin diagonales	0,42	0,44

En una primera mirada se tiene que los periodos naturales obtenidos del ensayo se acercan bastante a los predichos por los modelos iniciales, sobretodo en el caso sin diagonales. Es probable que la diferencia se deba a las condiciones reales que no es posible incluir en el modelo, como la conexión viga-columna apernada que el programa idealiza como soldada, el roce entre los elementos de la estructura, etc.

Tabla 5.5: Modelos RUAUMOKO 3D.

Modelo	Caso	Diagonales	Amortiguamiento [%]	Pretensado [kgf]
1	Llolleo 25%	No	1,55	-
2	Llolleo 50%	No	1,55	-
3	Llolleo 25%	Si	2,5	41,0
4	Llolleo 50a%	Si	2,5	38,3
5	Llolleo 50b%	Si	2,5	89,4
6	Llolleo 75%	Si	2,5	106,3
7	Llolleo 100%	Si	2,5	107,1

En los modelos debe modificarse el valor del amortiguamiento utilizado y luego comparar los resultados en lo que se refiere a valores máximos de deformaciones y esfuerzos. Además se modificó la estructura para incluir las patas del marco.

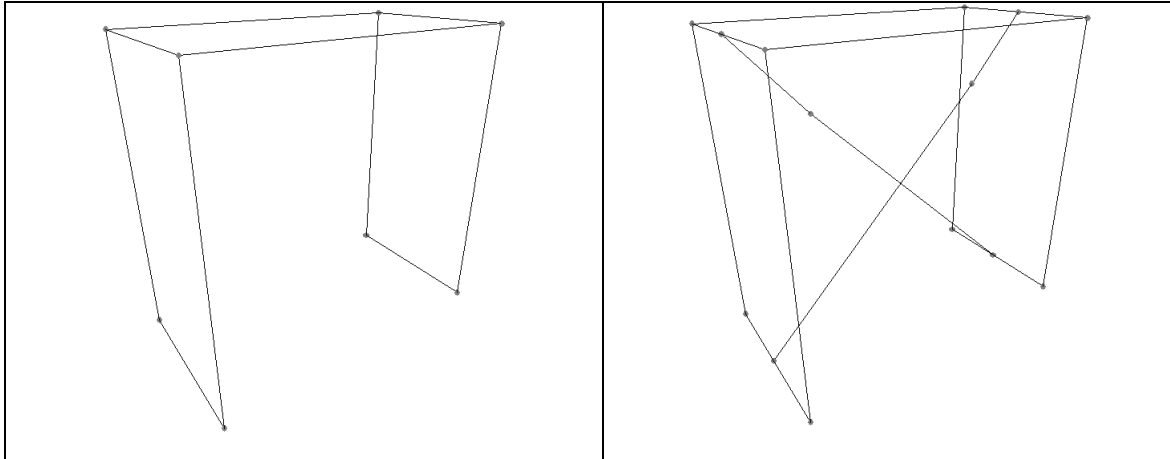


Figura 5.25: Modelo inicial

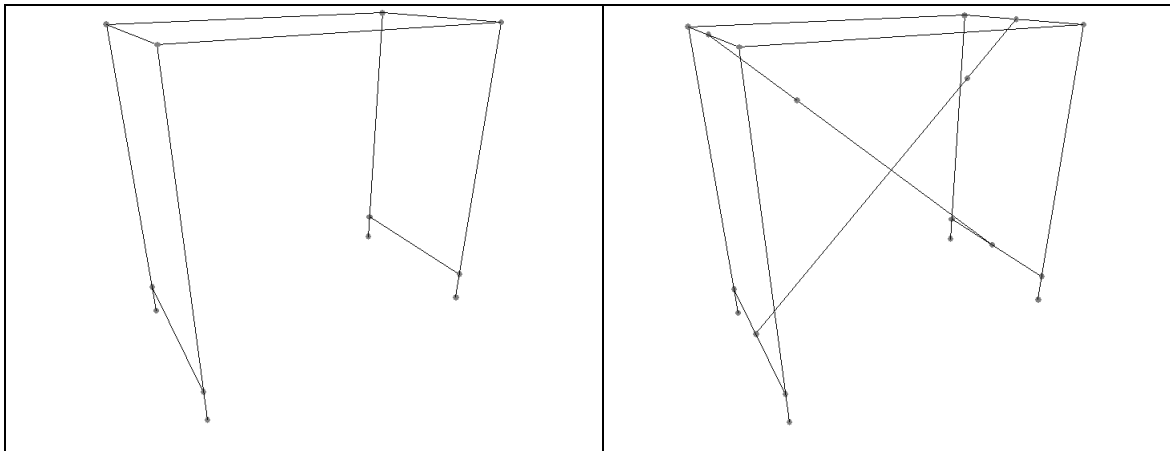


Figura 5.26: Modelo modificado

Tabla 5.6: Resultados modelos modificados RUAUMOKO 3D

Modelo	Periodo fundamental [s]	Frecuencia [Hz]	Delta x* [mm]	M _{max} [kgf-m]	Curvatura** [m ⁻¹]	Def. Barra [mm]	Esfuerzo [kgf]
1	0,39	2,54	17,35	3,65	0,002	-	-
2	0,39	2,54	34,70	7,30	0,004	-	-
3	0,137	7,29	8,58	5,03	0,003	5,46	55,06
4	0,137	7,29	17,29	7,73	0,005	11,01	70,05
5	0,137	7,29	18,27	10,82	0,007	11,28	119,20
6	0,137	7,29	25,30	13,94	0,009	16,12	148,90
7	0,137	7,29	34,07	16,95	0,011	21,70	167,3

* Desplazamiento de un nodo superior de la estructura en la dirección del sismo

**Curvatura en extremo superior de una columna

Tabla 5.7: Resultados ensayos. Valores máximos

Modelo	Periodo fundamental [s]	Delta x* [mm]	Esfuerzo [kgf]		Deformación promedio [mm]
			Barra 1	Barra 2	
1	0,44	32	-	-	-
2	0,44	58	-	-	-
3	0,15	2,2	96,40	90,00	1,71
4	0,15	4,1	146,8	136,9	3,19
5	0,15	8,0	267,7	282,3	6,22
6	0,15	11,8	333,7	316,5	9,17
7	0,15	13,9	341,4	329,3	10,80

* En los ensayos con marco arriostrado el periodo es de entre 0.15 y 0.16s

Basado en las tablas 5.6 y 5.7 se concluye que el nuevo modelo predijo con una diferencia de 0.05s el período de modo 1 de la estructura para el caso sin diagonales. Cuando se utilizan diagonales el modelo presenta una diferencia de 0.02s.

Para los desplazamientos el modelo modificado entrega valores por encima de los obtenidos en los ensayos, llegando a más del doble en algunos casos. En el modelo inicial sucedía lo contrario, es decir, los valores de desplazamientos, deformaciones y esfuerzos en las barras eran menores que los obtenidos al ensayar la estructura.

Es válido suponer que los resultados obtenidos¹ son producto de las modificaciones realizadas a la estructura del modelo, donde el incluir las patas del marco parece aportar mayor flexibilidad al sistema y, por lo tanto, se producen mayores desplazamientos de techo al aplicar el sismo.

¹ Todos los modelos y sus resultados se encuentran en el disco anexo al final de este documento.

CAPITULO 6

Conclusiones y comentarios

Se fabricó un marco espacial de acero que incluye un par de diagonales con barras de NiTiNOL como disipadores sísmicos. La estructura se ensayó en una mesa vibradora bajo la acción de registros sísmicos escalados y señales sinusoidales.

La fabricación de la estructura y la elección de una adecuada instrumentación para registrar desplazamientos, deformaciones y esfuerzos fue algo compleja, dada la cantidad de información que se deseaba recoger y la necesidad de utilizar los dispositivos más adecuados. Se debió modificar el diseño original para facilitar y acelerar el proceso de fabricación de las piezas y para incluir el dispositivo de conexión de las celdas de carga a la diagonal, el cual no fue incluido en el diseño inicial de conexiones. Para esto se reutilizaron piezas del marco utilizado por Olea (2009).

Previo a la realización de los ensayos se modeló la estructura utilizando el programa RUAUMOKO 3D, con el fin de tener una aproximación de los desplazamientos y esfuerzos que podría sufrir el marco. También se obtuvo periodos y frecuencias para los modos de vibrar de la estructura (Tablas 5.5 y 5.6).

Con respecto al modelo analítico desarrollado, no es posible confirmar ni descartar por completo su utilidad. El ensayo de la estructura entrega resultados que pueden estar afectados por múltiples errores, desde el ruido en las señales de respuesta hasta el roce entre los elementos. Las diagonales no tienen un comportamiento ideal, como lo sería que se movieran sólo en el plano en la dirección de las señales sísmicas y sinusoidales utilizadas. Este movimiento fuera del plano aumenta el roce entre las diagonales, pudiendo afectar el registro de los esfuerzos en las barras (celdas de carga), y de sus deformaciones (potenciómetros). Además, se registraron importantes aceleraciones transversales en el marco, situación que el modelo no predijo.

Dejando de lado el caso particular de la estructura ensayada, el programa RUAUMOKO, con una interfaz muy sencilla y fácil de utilizar, puede resultar muy útil para el análisis no lineal de estructuras, siempre que se conozca la manera de incluir todas las variables importantes en el código del modelo que se analiza, porque permite obtener una gran cantidad de información del análisis modal, estático y dinámico en forma rápida; generar Figuras y rescatar datos en formato de texto (.txt), para ser utilizados por otros programas, como Matlab, en este caso.

En cuanto a la estructura, ésta, con y sin diagonales, fue sometida a ensayos tipo pullback para determinar periodo y amortiguamiento. En el marco sin arriostrar se obtuvo una razón de amortiguamiento equivalente de 1,55% y un periodo de 0,44s. Al incorporar las diagonales, el amortiguamiento aumentó a 2,5% y el periodo resultó entre 0,15 y 0,16s, dependiendo de la pretensión aplicada. La utilización de diagonales aumenta la rigidez de la estructura, reduciendo su periodo y se produce un aumento en el amortiguamiento equivalente, posiblemente, debido a la utilización del NiTiNOL y su importante capacidad de disipación.

De los resultados obtenidos, sin duda los más claros son los generados por señales sinusoidales, dado que se trata de una cantidad considerablemente menor de datos que en el caso de los registros sísmicos y, además, son señales con amplitud constante, lo que estabiliza la respuesta de las barras de NiTiNOL. En los casos con registros sísmicos sucede lo contrario, la respuesta es inestable, lo que explica la poca claridad que existe en las figuras de histéresis de las barras donde se hace difícil observar el inicio de la fluencia.

Para que las barras de NiTiNOL alcancen la tensión de fluencia y disipen energía es necesario que una barra de 48cm, como en este caso, se deformen al menos 4,8mm, por lo tanto el marco debería sufrir desplazamientos de techo de 6mm, que sólo se lograron en el ensayo con señal sinusoidal de amplitud 12mm y en puntos de gran amplitud de la señal sísmica escalada al 50%, 75% o 100%, o con alta pretensión. El resto del tiempo las barras se mantienen en régimen elástico y no disipan energía, solo funcionan como tensores.

Al aplicar un registro sísmico de igual escala con distinta pretensión en las barras de NiTiNOL (Llolleo 50%, casos b, c y d, según la Tabla 5.1), el caso con mayor pretensión (b), presenta una disminución en la magnitud de los desplazamientos, pero la barra 1 no logra alcanzar la misma tensión máxima que el caso con menor pretensión. Los casos c y d, con pretensiones casi iguales, presentan diferencias en los desplazamientos relativos y aceleraciones de techo. Además, se registran esfuerzos máximos en las barras con diferencias entre 50kgf y 80kgf. Por otra parte, el caso a, con menor pretensión, presenta desplazamientos de la mitad que el caso b, con menor amplificación de la aceleración entre base y techo.

En los ensayos con señales sinusoidales, al aplicar la señal con 8mm de amplitud las barras superan la tensión de transformación con desplazamiento relativo de techo de 9mm, pero al usar 10mm de amplitud sólo se logran 4,8mm, por lo que las

barras no fluyen. Si se supone que durante los ensayos con el sismo escalado al 25 y 50% las conexiones viga-columna pierden rigidez al ceder los pernos por los bruscos movimientos y, aparentemente, sucedió lo mismo con una mordaza de la barra 1, es posible que al momento de ensayar con un seno de 8mm el marco fuera más flexible. Luego que la mordaza de la barra 1 cedió, se revisaron las conexiones del marco y se aseguraron, con lo que la estructura recuperó, en cierto modo, la rigidez de los primeros ensayos permitiendo desplazamientos menores aun cuando la señal utilizada tenía mayor amplitud.

En todos los ensayos se observó amplificación de la aceleración entre la base y el techo del marco arriostrado. Con el sismo escalado al 50% el caso sin diagonales sufren una mayor amplificación (Tabla 5.1, caso a), y la diferencia entre los desplazamientos a nivel de techo es importante, aumenta de 8 a 60mm al quitar las diagonales, quedando con deformación permanente.

El marco sin diagonales es menos rígido que uno arriostrado, por lo tanto tiene un periodo mayor. Al colocar diagonales el periodo se reduce y los desplazamientos serán menores, sin embargo, es posible que las aceleraciones y fuerzas aumenten. Lo anterior puede explicarse si se observa un espectro de aceleraciones de sismos chilenos en suelos duros, los cuales presentan máximos en periodos cortos. Para reducir esas aceleraciones es necesario aumentar el amortiguamiento, lo que puede conseguirse utilizando materiales especiales como los SMA que a mayores pretensiones presenta una mayor razón de amortiguamiento equivalente, disminuyendo desplazamientos y aceleraciones (Casos con señales sinusoidales).

Es posible concluir que la utilización de diagonales, independiente del material utilizado, siempre disminuye la amplitud de los desplazamientos porque aumenta la rigidez, evitando así daño en los elementos que la forman. El no tener deformaciones remanentes es una gran mejora sobre la estructura tradicional sin diagonales.

En cuanto al NiTiNOL, se comprobó que trabaja al sufrir deformaciones por sobre el 1%, es decir, se produce histéresis por lo que es capaz de disipar energía. En este trabajo no fue posible obtener una manera óptima de cuantificar la energía disipada por el sistema completo, sólo fue posible, con los datos registrados, graficar el trabajo plástico de disipación realizado por las barras y compararlo con la energía cinética producida por los desplazamientos del marco a nivel de techo. En los casos analizados (Llolleo 50%) se observa que al aumentar la pretensión de las barras aumenta el trabajo realizado, pero también la energía cinética, porque aumentan también los desplazamientos registrados (Figuras 5.21, 5.22 y 5.23). Lo anterior sugiere que el marco disminuyó su rigidez luego del primer ensayo con el sismo escalado al 50% y pretensión de 38,3kgf, donde tuvo un desplazamiento máximo de 4,1mm y para el segundo ensayo, con pretensión de 89,4kgf, se obtuvo 8,0mm.

Para futuras experiencias se sugiere revisar y asegurar conexiones de la estructura luego de cada ensayo.

Finalmente, queda por ver la factibilidad económica y práctica de aplicar estos dispositivos en estructuras reales, pues los desplazamientos requeridos para que el material efectivamente disipe energía son importantes, considerando las dimensiones que deberían tener los arriostramientos a utilizar en una estructura de tamaño real, pudiendo producir daños en elementos no estructurales. Además, es posible que el tiempo transcurrido entre la instalación de los disipadores y la ocasión en que se produzcan los desplazamientos necesarios para que las barras trabajen, sea suficiente para que las propiedades del material se modifiquen y, de esta manera, no se obtenga la respuesta esperada, por lo que las instalaciones deberían ser supervisadas regularmente para verificar la conservación de las propiedades iniciales, considerando que el 'envejecimiento' del material puede modificar la tensión de transformación (Torrá, 2009).

REFERENCIAS

José Francisco Barrientos Oliva. *Montaje, puesta en marcha y calibración de una mesa de vibrar de un grado de libertad*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. (2008)

F. Bartera, R. Giacchetti. *Steel dissipating braces for upgrading existing building frames*. Journal of Constructional Steel Research 60 (2004) p. 751-769

S. Bruno, C. Valente. *Comparative response analysis of conventional and innovative seismic protection strategies*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 31 (2002) p. 1067-1092

Carolina Belén Espinoza Castillo. *Caracterización de las propiedades superelásticas de barras de NiTiNOL*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. (2007)

L. Janke, C. Czaderski, M. Motavalli and J. Ruth. *Applications of shape memory alloys in civil engineering structures – Overview, limits and new ideas*. Materials and Structures 38 (June 2005) p. 578-592

Pierre Lafortune, Jason McCormick, Reginald DesRoches, Patrick Terriault. *Testing of Superelastic Recentering Pre-Strained Braces for Seismic Resistant Design*. Journal of Earthquake Engineering 11 (2007) p. 383-399

Jason McCormick, Reginald DesRoches, Davide Figazza and Ferdinando Auricchio. *Seismic Assessment of Concentrically Braced Steel Frames with Shape Memory Alloy Braces*. Journal of Structural Engineering ASCE Vol 133, N°6 (Junio 2007) p. 862-870

Manfred Olea Guajado. *Ensayo en mesa vibradora de marco de acero con conexiones de SMA*. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile. (2009)

G. Song, N. Ma, H.-N. Li. *Applications of shape memory alloys in civil structures*. Engineering Structures 28 (2006) p. 1266-1274

V. Torra (2009) Física Aplicada, UPC, Comunicación personal

Vicenç Torra Ferré. *Proyecto: Materiales y sistemas inteligentes: ensayos realistas de las Aleaciones con Memoria (AMF) en amortiguamiento de sistemas en estructura porticada*. Informe final (tercera anualidad). Septiembre 2009

D. Wang and A. Filiatrault. *Shake Table Testing of a Self-Centering Post-Tensioned Steel Frame*. The 14th World Conference on Earthquake Engineering Octubre 12-17, Beijing, China (2008)

ANEXO 1: Gráficos de ensayos sin diagonales

A: Ensayo Lloleo 25% . Sin diagonales

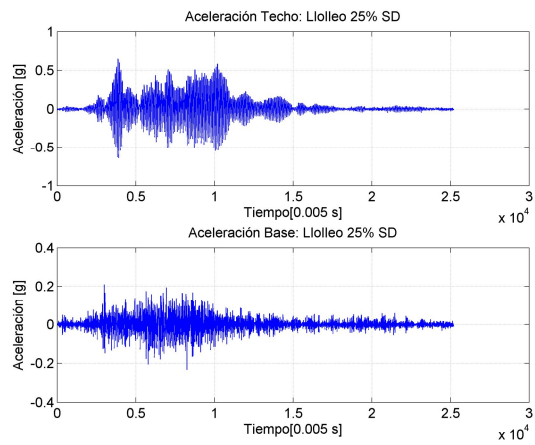


Figura A1: Aceleraciones de Techo y Base

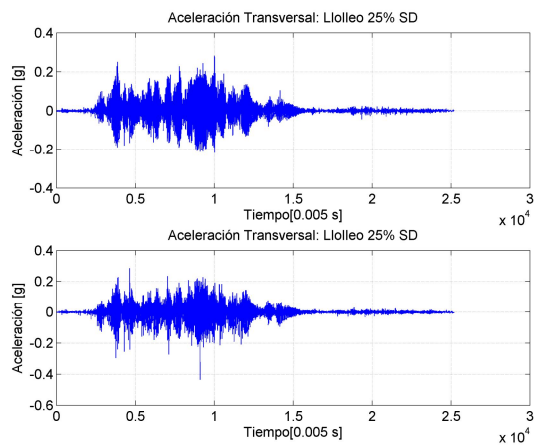


Figura A2: Aceleraciones Transversales

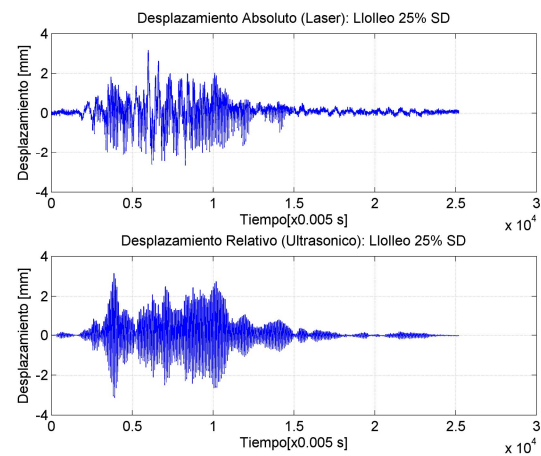


Figura A3: Desplazamientos

B: Ensayo Lloleo 50% . Sin diagonales

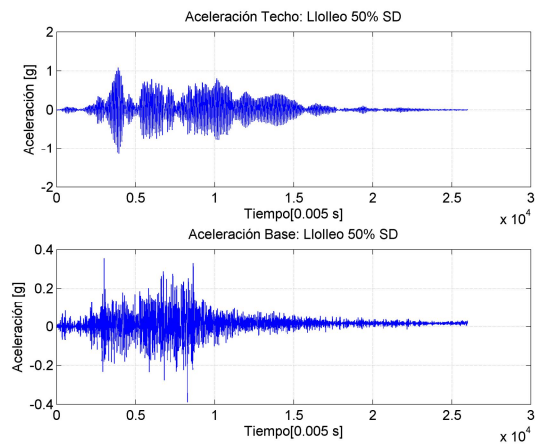


Figura B1: Aceleraciones de Techo y Base

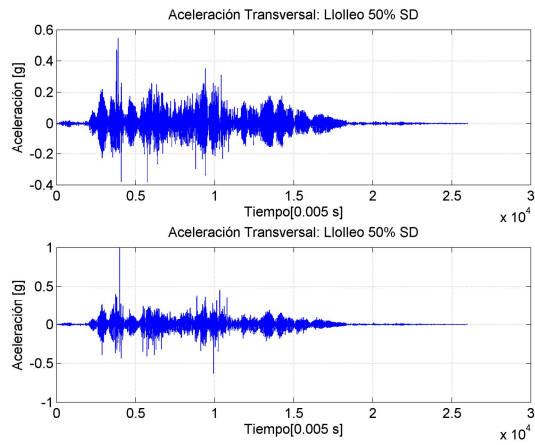


Figura B2: Aceleraciones Transversales

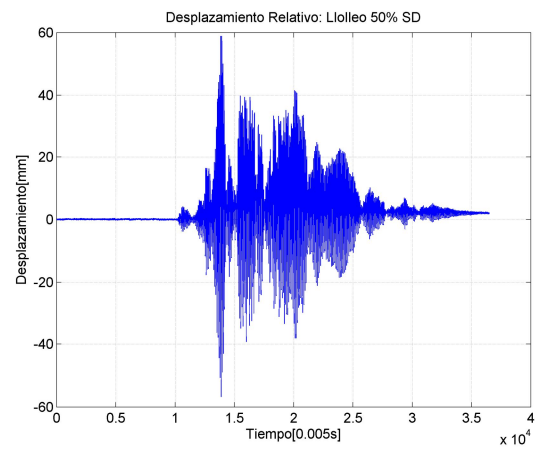


Figura B3: Desplazamiento Relativo de techo

ANEXO 2: Gráficos de ensayos con diagonales

A: Ensayo Lloleo 25% . Con diagonales. Pretensión: 84,5MPa

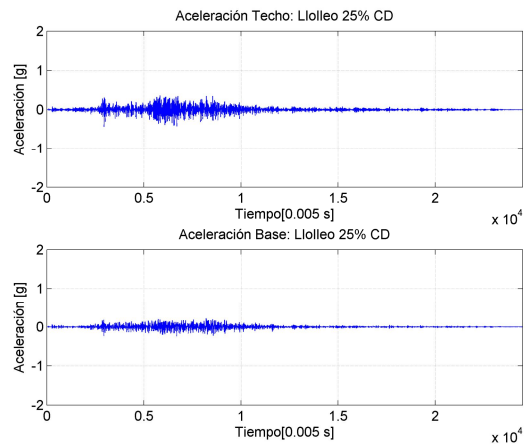


Figura A1: Aceleraciones de Techo y Base

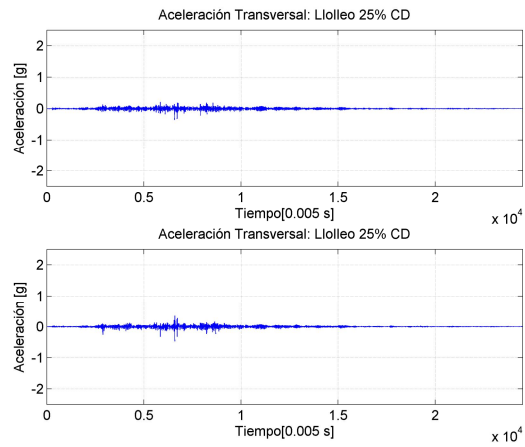


Figura A2: Aceleraciones Transversales

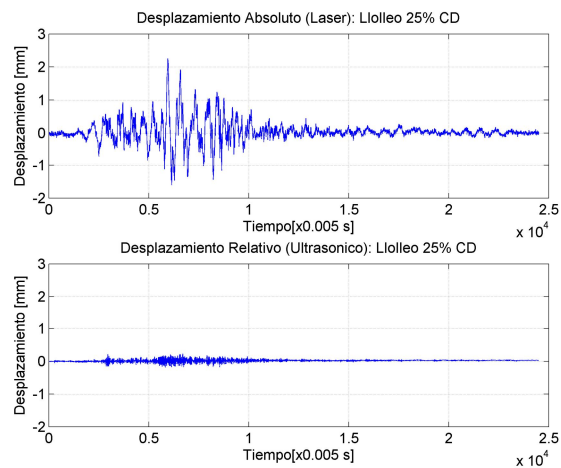


Figura A3: Desplazamientos

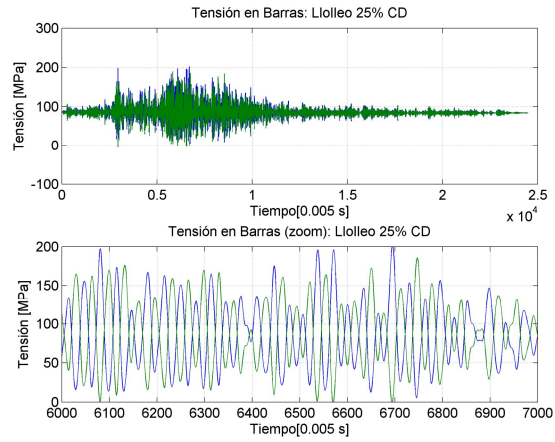


Figura A4: Tensión en barras

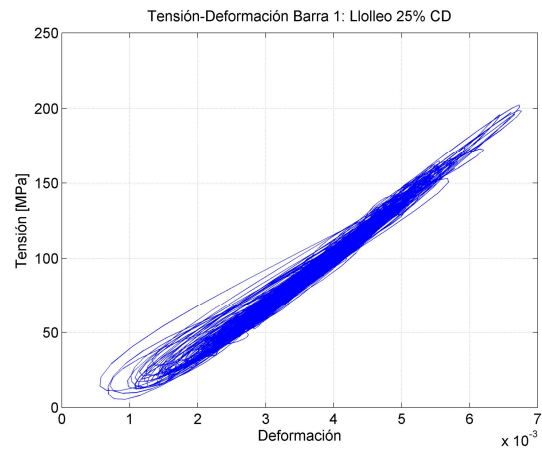


Figura A5: Histeresis Barra 1

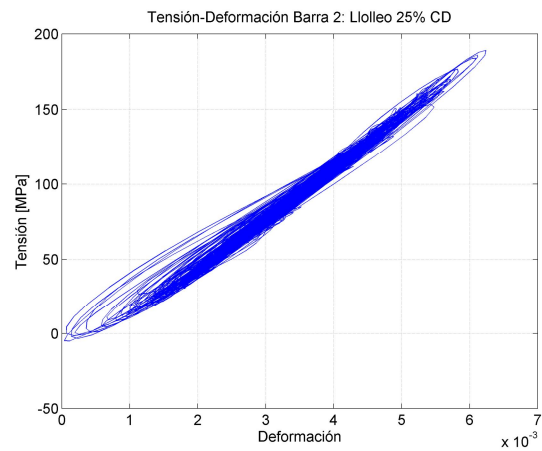


Figura A6: Histeresis Barra 2

B: Ensayo Lloleo 50% . Con diagonales. Pretensión: 184,3MPa

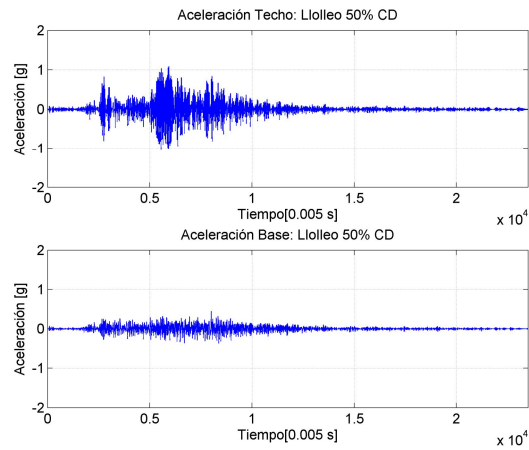


Figura B1: Aceleraciones de Techo y Base

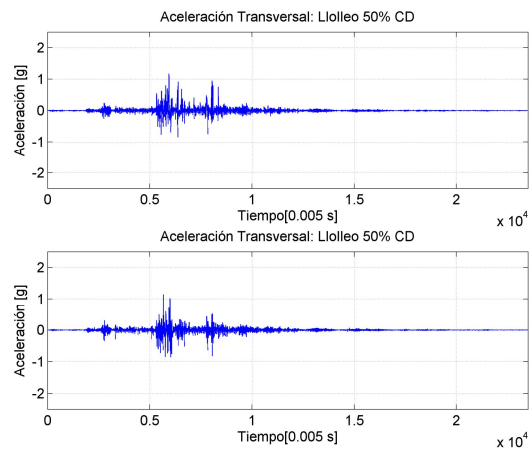


Figura B2: Aceleraciones Transversales

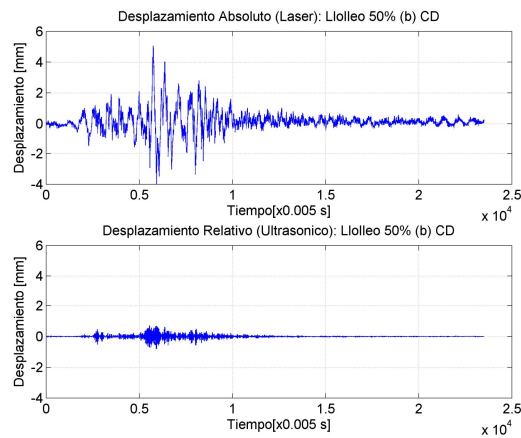


Figura B3: Desplazamientos

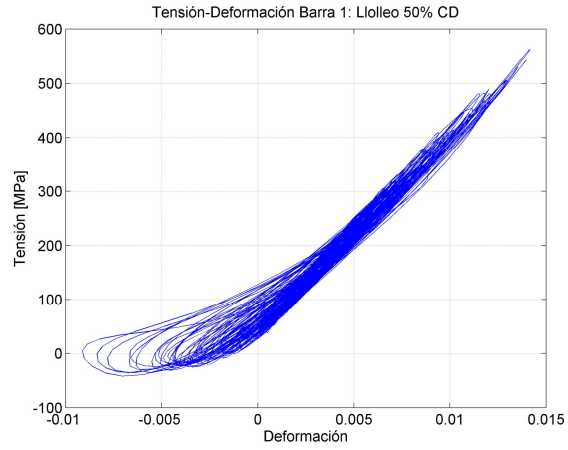


Figura B4: Histeresis Barra 1

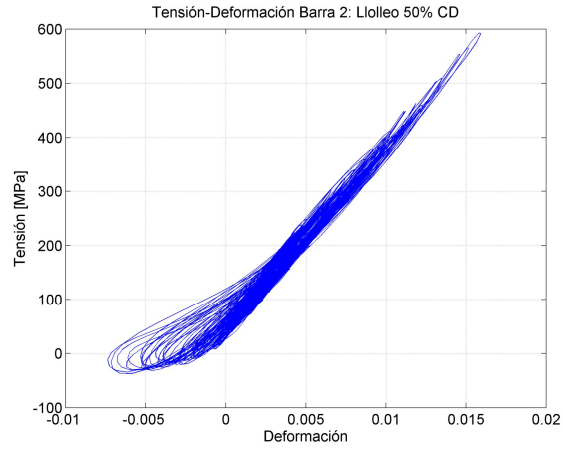


Figura B5: Histeresis Barra 2

C: Ensayo Lolloo 75% . Con diagonales. Pretensión: 219,1MPa

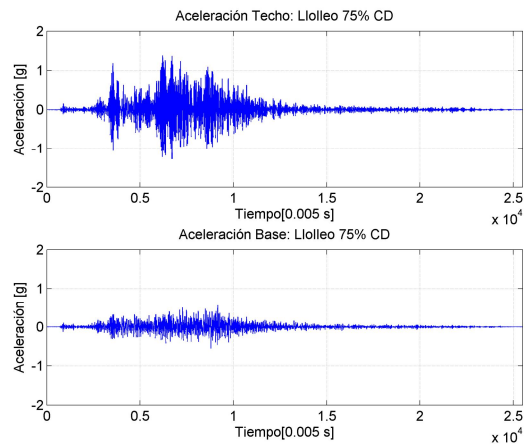


Figura C1: Aceleraciones de Techo y Base

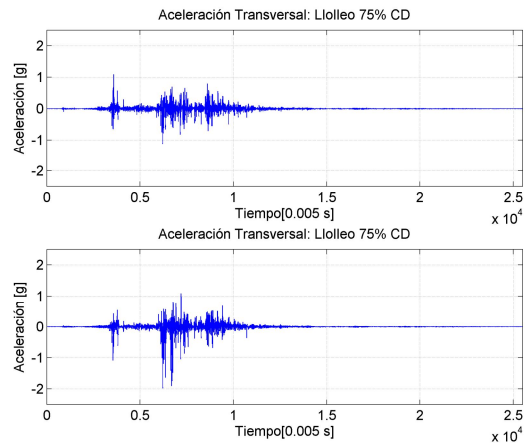


Figura C2: Aceleraciones Transversales

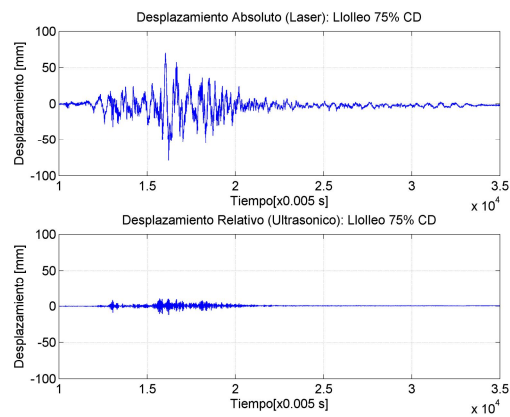


Figura C3: Desplazamientos

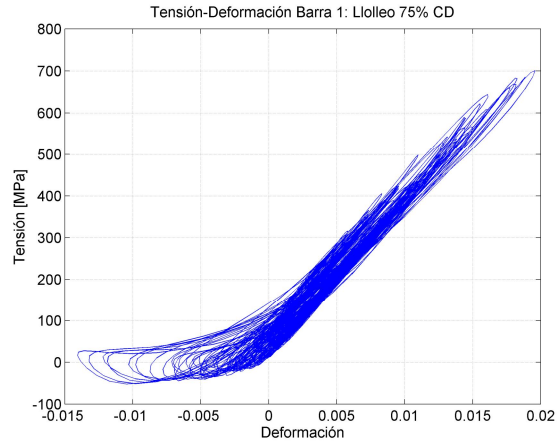


Figura C4: Histeresis Barra 1

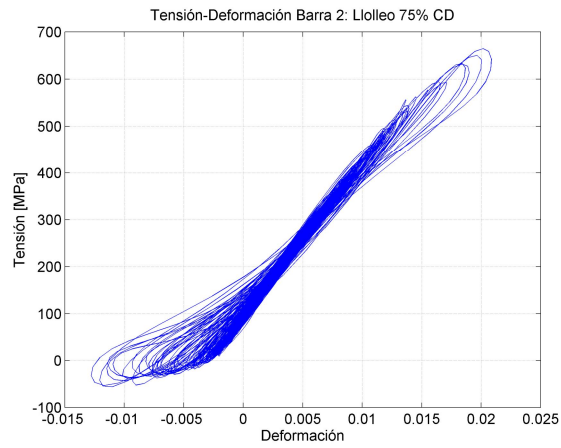


Figura C5: Histeresis Barra 2

D: Ensayo Lloleo 100% . Con diagonales. Pretensión: 220,7MPa

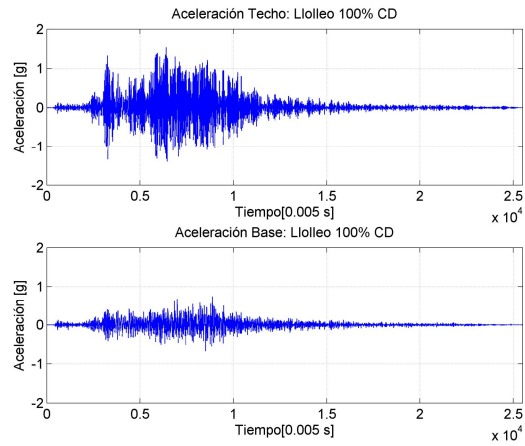


Figura D1: Aceleraciones de Techo y Base

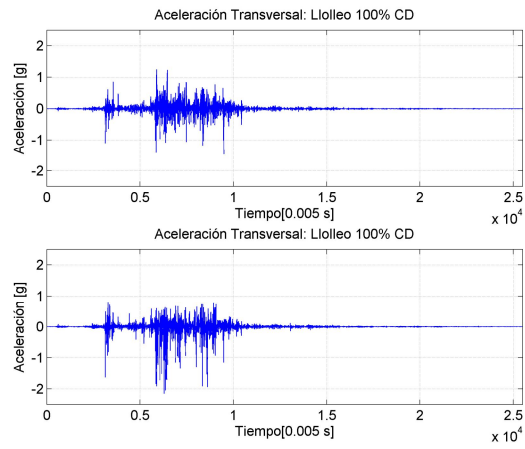


Figura D2: Aceleraciones Transversales

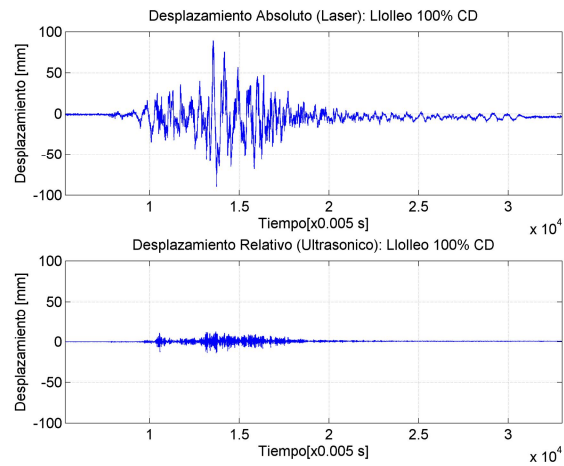


Figura D3: Desplazamientos

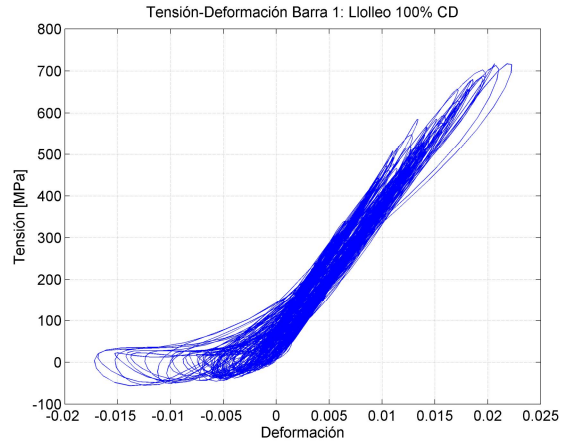


Figura D4: Histéresis Barra 1

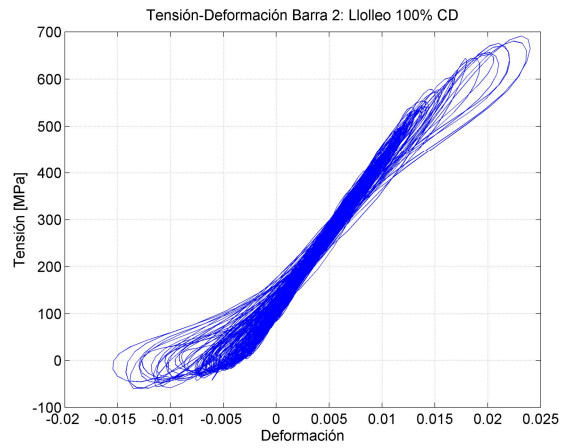


Figura D5: Histéresis Barra 2

E: Ensayo Seno 3,5Hz/8mm. Con diagonales. Pretensión: 205,8MPa

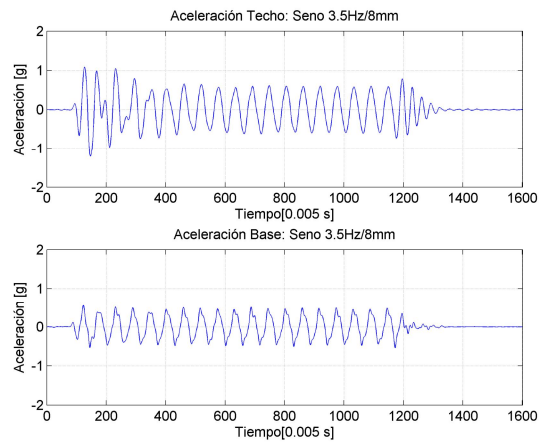


Figura E1: Aceleraciones de Techo y Base

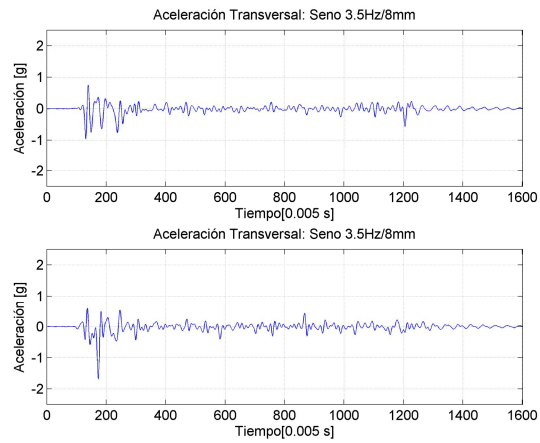


Figura E2: Aceleraciones Transversales

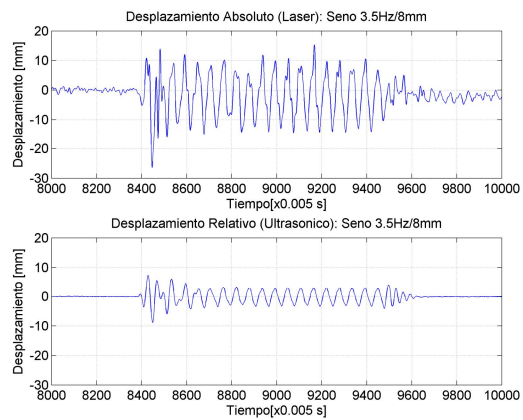


Figura E3: Desplazamientos

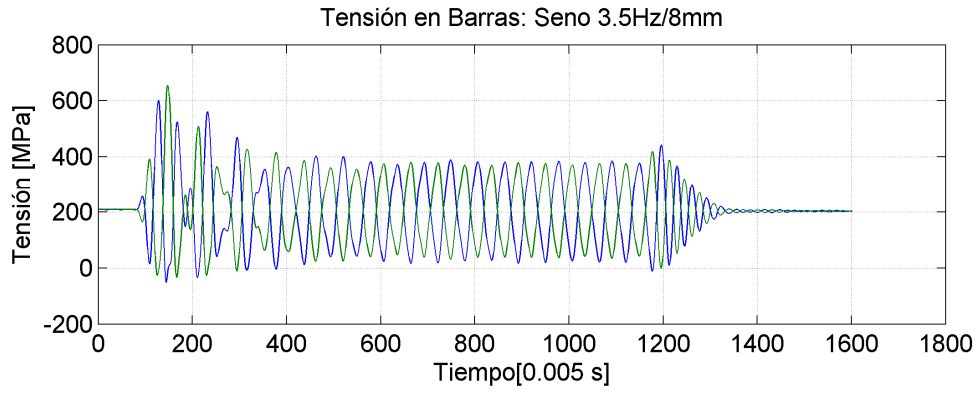


Figura E4: Tensión en barras

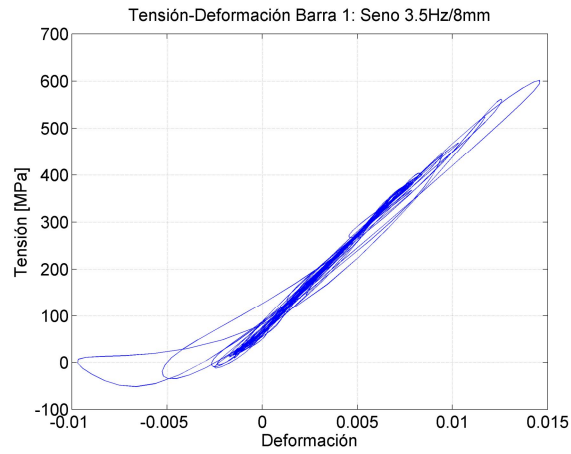


Figura E5: Histeresis Barra 1

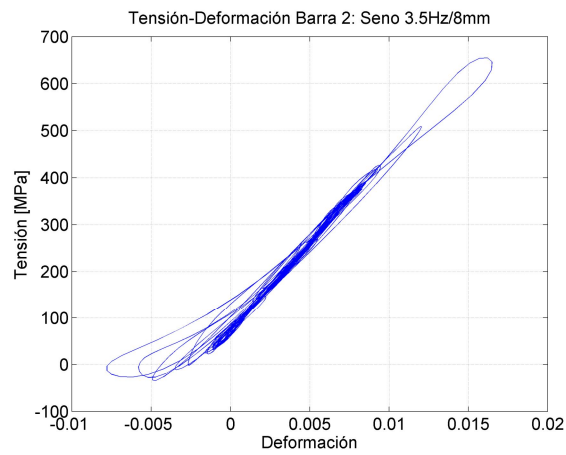


Figura E6: Histeresis Barra 2

F: Ensayo Seno 3,5Hz/10mm. Con diagonales. Pretensión: 212,2MPa

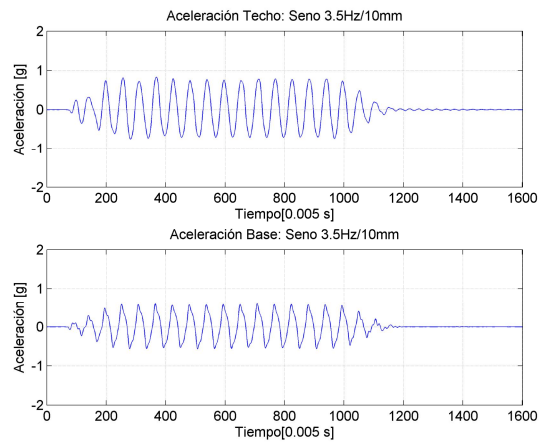


Figura B1: Aceleraciones de Techo y Base

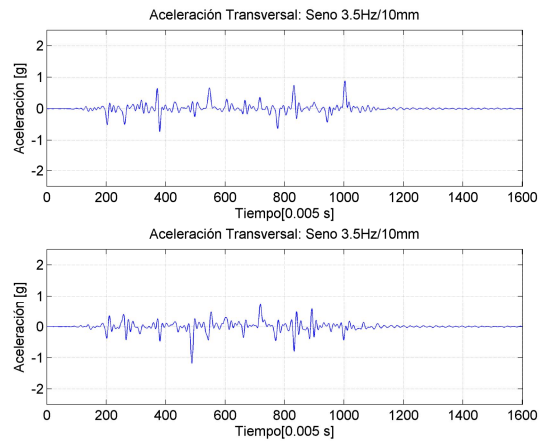


Figura B2: Aceleraciones Transversales

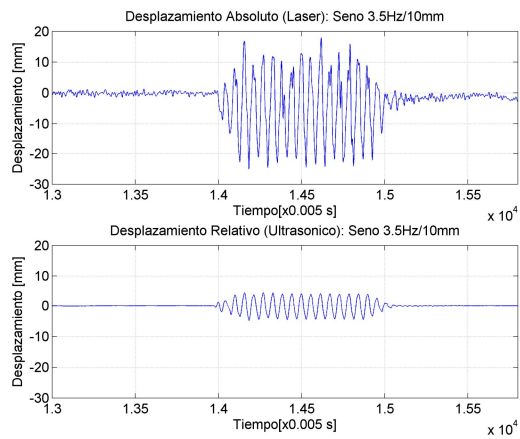


Figura B3: Desplazamientos

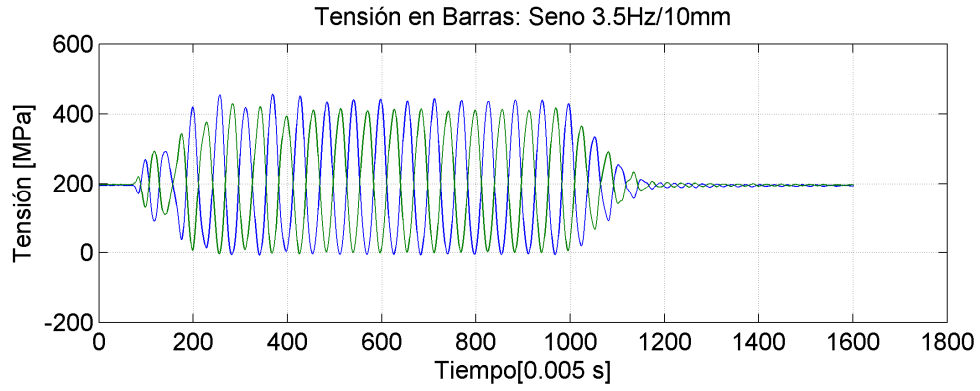


Figura B4: Tensión en barras

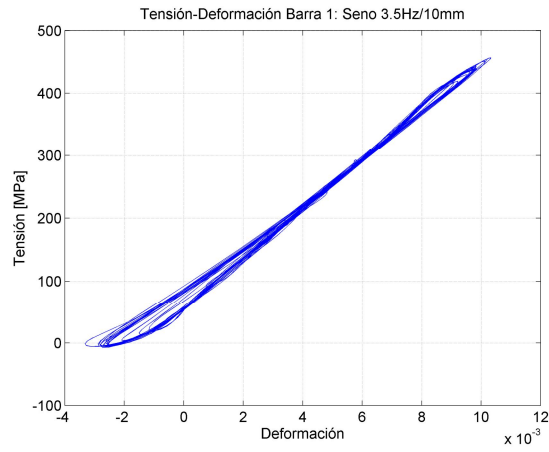


Figura B5: Histeresis Barra 1

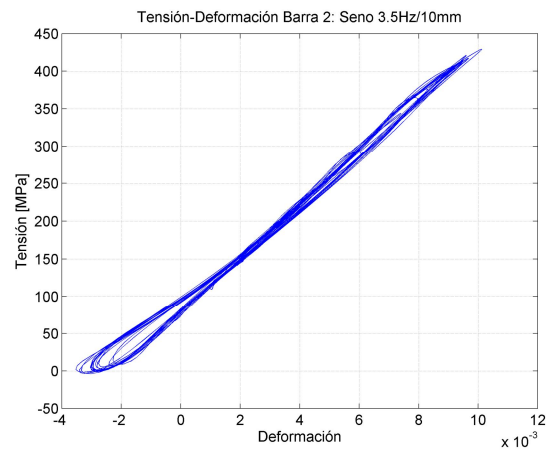


Figura B6: Histeresis Barra 2

G: Ensayo Seno 3,5Hz/12mm. Con diagonales. Pretensión: 183,3MPa

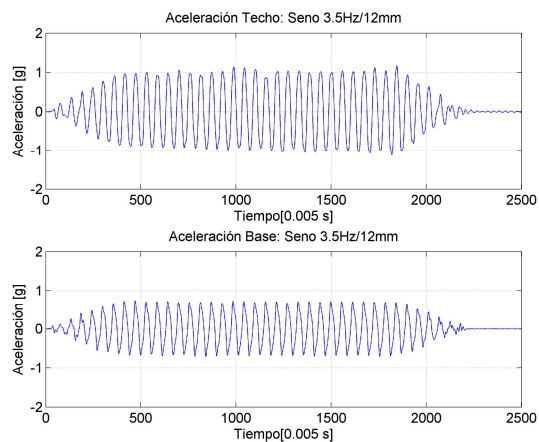


Figura G1: Aceleraciones de Techo y Base

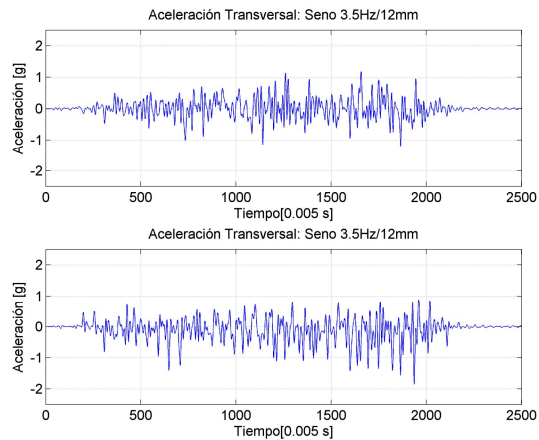


Figura G2: Aceleraciones Transversales

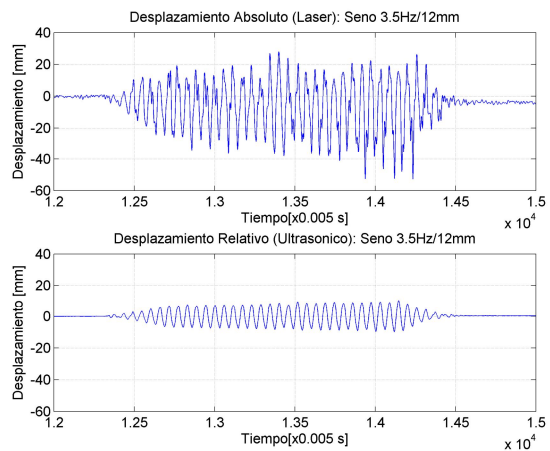


Figura G3: Desplazamientos

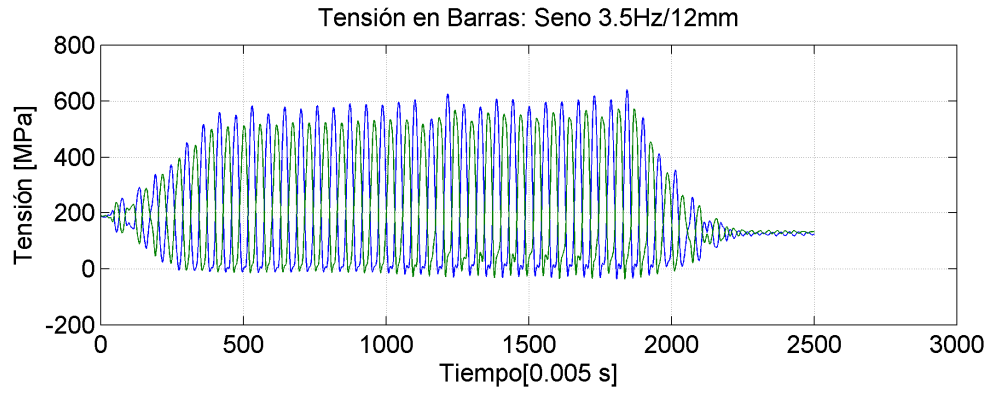


Figura G4: Tensión en barras

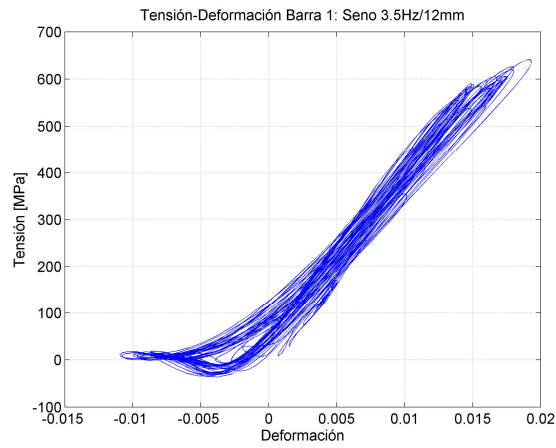


Figura G5: Histeresis Barra 1

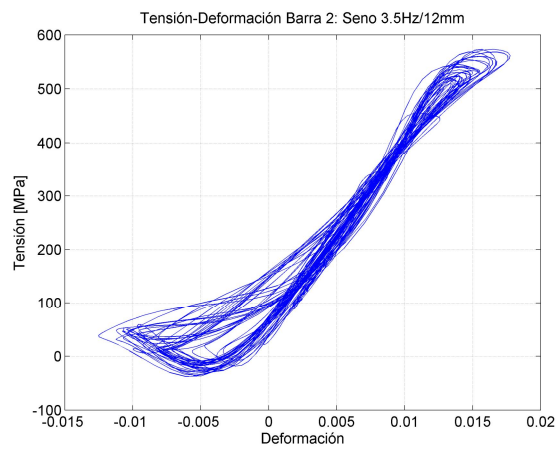


Figura G6: Histeresis Barra 2