



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

***“ENSAYO EN MESA VIBRADORA DE MARCO DE
ACERO CON CONEXIONES SMA”***

**MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL**

MANFRED OLEA GUAJARDO

Profesor Guía:

MARÍA OFELIA MORONI YALDIN

Miembros de la Comisión:

MAURICIO SARRAZIN ARELLANO

RICARDO HERRERA MARDONES

Santiago de Chile

Agosto 2009

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL.
POR: MANFRED OLEA G.
FECHA: JUNIO DE 2009
PROF. GUIA: M^a OFELIA MORONI Y.

“ENSAYO EN MESA VIBRADORA DE MARCO DE ACERO CON CONEXIONES SMA”

Se ha observado que frente a eventos sísmicos de magnitud considerable, las uniones viga-columna en estructuras de acero pueden presentar fallas, debido a fracturas en la soldadura o deformación plástica de la unión. Esto genera la posibilidad de estudiar sistemas de disipación de energía en las conexiones viga columna. Una alternativa es la incorporación de disipadores en base a SMA (Shape Memory Alloys).

Este estudio es de carácter teórico-experimental, donde se describe el comportamiento de un modelo a escala reducida de una estructura de acero de un piso, en cuyas conexiones viga-columna se usan barras SMA. Previo a la ejecución de ensayos, se modeló la estructura y las acciones en ella, utilizando un programa de análisis no lineal, para tener una estimación en el orden de magnitud de la respuesta del modelo experimental.

Las conexiones viga-columna están formadas por 4 barras SMA, y el marco se sometió a ensayos tipo pull-back y registros sinusoidales y de sismos reales en una mesa vibradora de un grado de libertad. Se usan dos tipos de barras: de Nitinol de 2,5 mm de diámetro y de CuAlBe de 3,3 mm de diámetro. Ambos materiales se encuentran en fase austenita a temperatura ambiente y han sido caracterizados con anterioridad en ensayos cíclicos de tracción.

La instrumentación incluye acelerógrafos a nivel de losa y de techo, un potenciómetro para medir desplazamiento de techo, y celdas de carga y potenciómetros para medir fuerzas y deformaciones en las barras SMA de cada conexión.

A partir de los ensayos tipo pullback se obtiene el período fundamental y el amortiguamiento por decremento logarítmico, resultando 0.52 [seg] y un 2.3% para el marco con barras de Nitinol y 0.47 [seg] y 1.4% para el marco con barras de CuAlBe.

Al aplicar el registro de Lolloe N10E escalado en un 25% y 50% al marco con conexiones de Nitinol, se observa reducciones en la aceleración del techo, comparada con la aceleración espectral, del orden del 24% para el registro escalado a un 25% y del 49% para el registro escalado a un 50%. Para el marco con conexiones de CuAlBe, la reducción de la aceleración es de un 14% para el registro de Lolloe escalado en un 25%.

INDICE

CAPITULO 1	10
Introducción	10
1.1. Generalidades	10
1.2. Objetivos	11
1.2.1. Objetivos Generales.....	11
1.2.2. Objetivos Específicos.....	11
1.3. Metodología	12
1.4. Contenido por Capítulos	12
CAPITULO 2	14
Antecedentes Generales	
2.1. Aleaciones con Memoria de Forma (SMA)	14
2.1.1. Mecanismo del Efecto de Memoria de Forma y Superelasticidad.....	14
2.1.2. Principales parámetros que representan el comportamiento mecánico de materiales superelásticos [6].....	18
2.2. Aleaciones con Memoria de Forma Níquel-Titanio	19
2.2.1. Propiedades Mecánicas de las Aleaciones NiTi.....	19
2.2.2. Fabricación de las aleaciones NiTi[5].....	20
2.3. Estudios de Aleaciones SMA	21
2.3.1. C. Espinoza (2007)[6].....	21
2.3.2. J. Sepúlveda (2006)[12].....	22
2.3.3. DesRoches et al (2004)[4].....	23
2.3.4. Liu y Humbeeck (1999) [9].....	23
2.3.5. Ocel et al (2004)[10].....	24
2.3.6. Abolmaali et al (2005)[1].....	24
2.3.7. M. Iványi (2000)[8].....	24
CAPITULO 3	26
Análisis Teórico de la Estructura	
3.1. Descripción de la Estructura a Estudiar	26
3.2. Estimación de la Respuesta de la Estructura	28
3.2.1. Conexión SMA.....	28
3.2.2. Conexión Rígida.....	
3.3. Conexión SMA. Modelo M1	
3.4. Conexión Rígida. Modelo M2	
CAPITULO 4	38
Desarrollo Experimental	
4.1. Mesa Vibradora	38
4.1.1. Descripción de la Mesa Vibradora.....	38
4.2. Construcción de la Estructura	40
4.2.1. Estructura con Conexión SMA NiTi.....	41
4.2.2. Estructura con Conexión SMA CuAlBe.....	44
4.3. Instrumentación	44
4.3.1. Calibración de los Instrumentos.....	47
4.4. Ensayos	48
4.4.1. Pullback.....	48

4.4.2.	Ensayos Dinámicos.....	50
CAPITULO 5	.....	55
	Análisis de Resultados Experimentales	
5.1.	Adquisición de Datos.	55
5.2.	Conexión SMA de Nitinol.	56
5.2.1.	Registro Lollo a un 25%	56
5.2.2.	Registro Lollo a un 50%	61
5.2.3.	Registro Lollo a un 75%	66
5.2.4.	Señal Sinusoidal.....	72
5.3.	Conexión SMA CuAlBe.	79
5.3.1.	Señal Sinusoidal.....	79
5.3.2.	Registro Lollo a un 25%	85
5.4.	Aceleración Espectral y Energía Disipada.	92
CAPITULO 6	.....	95
	Conclusiones y Recomendaciones	95
ANEXO A.	.....	101
ANEXO B.	.....	114
ANEXO C.	.....	119

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Geometría Cristalográfica de un material SMA.	15
Figura 2.2. Diagrama Tridimensional Tensión-Deformación-Temperatura que ilustra el comportamiento de las SMA para una aleación NiTi [5].....	16
Figura 2.3. Curva Tensión-Deformación de un material con comportamiento superelástico.....	17
Figura 2.4. Identificación de parámetros E_D , E_E y E_T para el cálculo del amortiguamiento equivalente.	18
Figura 2.5. Curva Esfuerzo-Deformación. Ensayo Cíclico a 1 [Hz][6].	22
Figura 2.6. Curva de Histéresis Punta de Viga[12].	23
Figura 3.1. Vista en planta de la Estructura.	27
Figura 3.2. Elevaciones de la Estructura.....	27
Figura 3.3. Modelo de la Conexión SMA en Ruumoko.....	28
Figura 3.4. Diagrama de cuerpo libre para la determinación de la rigidez rotacional.....	29
Figura 3.5. Momento v/s Rotación de la Conexión 1.	31
Figura 3.6. Fuerza Axial v/s Deformación de las Barras Superiores de la Conexión 1.	32
Figura 3.7. Tensión v/s Deformación Unitaria de las Barras Superiores de la Conexión 1.	32
Figura 3.8. Variación de la Fuerza Axial en el Tiempo de las Barras Superiores e Inferiores.....	33
Figura 3.9. Amortiguamiento versus Deformación Unitaria.	34
Figura 3.10. Diagrama Momento-Curvatura del Nodo Superior de una Columna de la Estructura.	34
Figura 3.11. Diagrama Momento-Curvatura del Nodo Superior de una Columna de la Estructura.	35
Figura 3.12. Variación del Momento en Nodo Superior de una Columna.....	36
Figura 3.13. Variación del Desplazamiento en Nodo Superior de una Columna.	36
Figura 3.13. Variación de la Energía Absorbida por la estructura en el tiempo.	37
Figura 4.1. Esquema general de la mesa.....	39
Figura 4.2. Mesa Vibradora.	40
Figura 4.3. Estructura ensayada.	40
Figura 4.4. Detalle de la Conexión SMA. Vista en Lateral.	41
Figura 4.5. Detalle de la Conexión SMA. Vista en Planta.	41
Figura 4.6. Detalle de Mordazas.....	42
Figura 4.7. Detalle del Apoyo. Vista Lateral.	42
Figura 4.8. Detalle del Apoyo. Vista en Planta.	43
Figura 4.9. Materialización de la conexión del Nudo 2 y su instrumentación.	43
Figura 4.10. Ubicación de la Instrumentación. (a): Potenciómetros. (b): Celdas de Carga.	44
Figura 4.11. (a): Potenciómetros 1 y 2. (b): Celda de Carga F6 y Potenciómetro 1.	45
Figura 4.12. (a): Ubicación de los acelerómetros Kistler en la estructura. (b): Ubicación del acelerómetro FBA11 en la mesa vibradora.	45
Figura 4.13. (a): Acelerómetros Kistler A3 y A4. (b): Acelerómetro FBA11.....	46
Figura 4.14. Extensómetro 3542-050M-020-ST de 50 [mm] de rango.	46
Figura 4.15. Potenciómetro utilizado para medición de desplazamientos de techo.	46
Figura 4.16. (a): Montaje para calibración de celdas de carga. (b): Pesos utilizados para la calibración de las celdas.	47
Figura 4.17. Montaje para calibración de potenciómetros.....	48
Figura 4.18. Curva Fuerza-Deformación. Mordazas más limas.....	51
Figura 4.19. Sistema de sujeción Mordazas más Limas.	54
Figura 5.1. Acelerómetros A2 y A3.....	56

Figura 5.2. Acelerómetro A4.	57
Figura 5.3. Acelerómetros FBA11, A2 y A3.	57
Figura 5.4. Variación de la fuerza en las barras en el tiempo. Conexión Nudo 4.	58
Figura 5.5. Variación de la Deformación en el tiempo. Conexión Nudo 4.	58
Figura 5.6. Curva Tensión Deformación. Barra 4, Nudo 4.	59
Figura 5.7. Curva Tensión-Deformación.	59
Figura 5.8. Registro de Desplazamientos.	60
Figura 5.9. Desplazamiento Relativo.	60
Figura 5.10. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.	61
Figura 5.11. Acelerómetros A2 y FBA11.	61
Figura 5.12. Acelerómetros A3 y A4.	62
Figura 5.13. Celdas de carga del Nudo 1 en el tiempo.	62
Figura 5.14. Potenciómetros del Nudo 1 en el tiempo.	63
Figura 5.15. Tensión-Deformación. Barra 4, Nudo 2.	63
Figura 5.16. Curva Tensión-Deformación.	64
Figura 5.17. Curva Tensión-Deformación. Barras superiores, Nudo 3.	64
Figura 5.18. Potenciómetro 3 en el tiempo.	65
Figura 5.19. Registro de Desplazamientos.	65
Figura 5.20. Desplazamiento Relativo.	66
Figura 5.21. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.	66
Figura 5.22. Acelerómetro FBA11.	67
Figura 5.23. Acelerómetros A3 y A4.	68
Figura 5.24. Momento de Torsión.	68
Figura 5.25. Comparación entre celdas filtradas y sin filtrar.	69
Figura 5.26. Celdas de carga del nudo 1 en el tiempo.	70
Figura 5.27. Potenciómetros del nudo 1 en el tiempo.	70
Figura 5.28. Curva Tensión-Deformación. Barra 4, nudo 2.	71
Figura 5.29. Curva Tensión-Deformación. Conexión nudo 1.	71
Figura 5.30. Curva Tensión Deformación. Conexión nudo 4.	72
Figura 5.31. Acelerómetros A2 y A3.	73
Figura 5.32. Acelerómetros FBA11, A2 y A3.	73
Figura 5.33. Acelerómetro A4.	74
Figura 5.34. Celdas de carga del nudo 4 en el tiempo.	74
Figura 5.35. Potenciómetros del nudo 4 en el tiempo.	75
Figura 5.36. Curva Tensión Deformación. Barra 4, nudo 2.	75
Figura 5.37. Curva Tensión-Deformación. Nudo 2, Barras Inferiores.	76
Figura 5.38. Curva Tensión Deformación. Nudo 4.	76
Figura 5.39. Registro de Desplazamientos.	77
5.40. Desplazamiento Relativo.	77
Figura 5.41. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.	78
Figura 5.42. Acelerómetros A2 y A3.	80
Figura 5.43 Acelerómetros FBA11, A2 y A3.	80
Figura 5.44. Acelerómetro A4.	81
Figura 5.45. Celdas de carga del nudo 4 en el tiempo.	81
Figura 5.46. Potenciómetros del nudo 4 en el tiempo.	82
Figura 5.47. Curva Tensión Deformación. Barra 4, nudo 1.	82
Figura 5.48. Curva Tensión-Deformación. Nudo 1, Barras Inferiores.	83
Figura 5.49. Curva Tensión Deformación. Nudo 4.	83
Figura 5.50. Registro de Desplazamientos.	84

Figura 5.51. Desplazamiento Relativo.....	84
Figura 5.52. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.....	85
Figura 5.53. Acelerómetros A2 y A3.....	85
Figura 5.54. Acelerómetros A2, A3 y FBA11.....	86
Figura 5.55. Acelerómetro A4.....	86
Figura 5.56. Celdas de carga del nudo 4 en el tiempo.....	87
Figura 5.57. Potenciómetros del nudo 4 en el tiempo.....	87
Figura 5.58. Curva Tensión Deformación. Barra 4, nudo 1.....	88
Figura 5.59. Curva Tensión-Deformación. Nudo 1, Barras Inferiores.....	88
Figura 5.60. Curva Tensión Deformación. Nudo 4.....	89
Figura 5.61. Registro de Desplazamientos.....	89
Figura 5.62. Desplazamiento Relativo.....	90
Figura 5.63. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.....	90
Figura 5.64. Transformada de Fourier para la señal sinusoidal 1,5 [Hz] y 8 [mm].....	91
Figura 5.65. Espectro de aceleración para Lolloo a un 25%.....	92
Figura 5.66. Espectro de aceleración para Lolloo a un 50%.....	92
Figura 5.67. Espectro de aceleración para Lolloo a un 75%.....	93
Figura 5.68. Energía Disipada.....	93

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación de NiTi con un acero inoxidable AISI316[5].	19
Tabla 2.2. Valores representativos de Ensayos a Tracción[6].	21
Tabla 2.3. Contribución de diferentes factores a la Rigidez Inicial de la Conexión[8].	25
Tabla 3.1. Propiedades del Nitinol	30
Tabla 4.1. Especificaciones básicas de diseño[3].	39
Tabla 4.2. Constante de calibración de las celdas.	47
Tabla 4.3. Constante de calibración de los potenciómetros.	48
Tabla 4.4. Ensayos tipo Pullback.	49
Tabla 4.5. Propiedades dinámicas de la Estructura: NiTi.	52
Tabla 4.6. Ensayos Dinámicos.	52
Tabla 5.1. Tensión y Deformación máxima.	72
Tabla 5.2. Resumen Resultados conexión de Nitinol.	78
Tabla 5.3. Propiedades dinámicas de la Estructura: CuAlBe.	79
Tabla 5.4. Tensión y Deformación máxima.	83
Tabla 5.5. Tensión y Deformación máxima.	89
Tabla 5.6. Resumen Resultados conexión de CuAlBe.	91
Tabla 5.7. Comparación entre la aceleración espectral y aceleración de los ensayos para Lollole escalado.	93

CAPITULO 1

Introducción

1.1. Generalidades.

Una de las sollicitaciones más significativas en el diseño estructural corresponde a la acción sísmica, la cual debe ser resistida adecuadamente por la estructura, disipando la energía sísmica sin presentar daños acumulativos.

En construcciones convencionales de acero, la disipación de energía ocurre en las zonas en que se forman rótulas plásticas, especialmente en las uniones viga-columna. Esta disipación está ligada a una respuesta de la estructura en el rango no lineal, lo que trae como consecuencia daños en el sistema estructural.

Cuando se sobrepasa la resistencia de la estructura debido a un sismo, es necesario cambiarla o bien proveerle sistemas de protección sísmica que le ayuden a no alcanzar niveles de exigencias mayores a su capacidad.

En función de esto es que se han realizado diversos estudios con la finalidad de mejorar el diseño estructural. Se cuenta con antecedentes que indican que el comportamiento de las estructuras ubicadas en zonas sísmicas mejora considerablemente si éstas cuentan con dispositivos capaces de controlar vibraciones. Esta característica la poseen los disipadores sísmicos, los cuales absorben la energía, logrando disminuir la que es absorbida por la estructura.

Existen variados tipos de disipadores los que, sin embargo, presentan ciertas limitaciones como poca durabilidad y dificultad de ser reparados o sustituidos. Un requisito primordial que deben cumplir estos dispositivos es que su comportamiento cíclico no presente degradación significativa ante un evento telúrico y que posea una vida útil considerable, es decir, que tenga la vida útil de la estructura en la cual será utilizado.

Los materiales llamados Shape Memory Alloys (SMA) o Aleaciones con Memoria de Forma, corresponden a aleaciones metálicas binarias o terciarias capaces de experimentar transformaciones de manera que pueden deformarse plásticamente y volver a su forma original después de eliminarse la acción, es decir, las deformaciones son no lineales y reversibles lo que implica un comportamiento muy interesante y útil para el diseño de disipadores de energía y su uso en el área de la ingeniería sísmica. Este comportamiento se conoce con el nombre de superelasticidad [2].

Entre las aleaciones más conocidas se encuentra la aleación llamada Nitinol, formada por Níquel y Titanio (NiTi). Dentro de la misma familia del Nitinol están aquellas que se le adiciona otro elemento metálico (NiTi-X) como Hierro o Aluminio. Otras familias son las aleaciones basadas en Cobre, como CuZnAl, CuAlBe, CuAlNi, y aleaciones ferrosas como FeMnSi y FeNiC entre otros.

1.2. Objetivos.

1.2.1. Objetivos Generales.

Diseñar y ensayar en una mesa vibradora una estructura de marco de acero con disipadores de energía para conexiones viga-columna usando barras de aleación SMA de Nitinol y CuAlBe.

1.2.2. Objetivos Específicos.

Se distinguen los siguientes objetivos:

- Realizar un modelo teórico de la estructura con el objeto de tener una referencia de los resultados a obtener producto de los ensayos.
- Diseñar y fabricar un marco de acero con conexión SMA de Nitinol y CuAlBe (determinar dimensiones de vigas y columnas, elementos que la componen, determinar la longitud de las barras para la conexión flexible, establecer el método de carga a utilizar e instrumentos de medición de la respuesta estructural).
- Estudiar la capacidad de disipar energía de la conexión SMA.
- Ensayar la estructura en una mesa vibradora.
- Analizar resultados y comportamiento de ambas conexiones bajo los criterios de disipación energética y deformaciones.

1.3. Metodología.

- Establecer las dimensiones del marco y perfiles a utilizar en su construcción de acuerdo a las características de la mesa vibradora, disponibilidad de equipos de medición y cantidad de barras SMA.
- Realizar un modelo teórico utilizando el programa Ruaumoko para tener sensibilidad del orden de magnitud de los resultados que se esperan obtener de los ensayos. En el modelo teórico se verifican distintas configuraciones de la ubicación de las barras SMA, con el fin de poder determinar una disposición adecuada de los disipadores en la estructura.
- Confección de la estructura.
- Ensayo del marco con disipadores. Se realiza un Pull-Back para determinar las características dinámicas de la estructura. Posteriormente se somete la estructura a diversos registros sinusoidales y sísmicos para evaluar su comportamiento y la capacidad de disipar energía que presenta el Nitinol utilizado como unión viga-columna.
- Comparación de los resultados obtenidos empíricamente con los resultados teóricos.
- Ensayo de la estructura utilizando disipadores SMA CuAlBe. Se somete la estructura a un Pull-Back para obtener sus características dinámicas. Luego se evalúa el comportamiento ante registros sísmicos y sinusoidales.
- Comparar la respuesta de las estructuras (conexión NiTi v/s conexión CuAlBe).

1.4. Contenido por Capítulos.

CAPITULO 1: Se refiere a la introducción de esta memoria. Se incluye generalidades, objetivos generales y específicos, metodología.

CAPITULO 2: Se reportan los antecedentes principales acerca de las características del disipador a utilizar. Se desarrolla una revisión de sus propiedades mecánicas, de los parámetros que representan su comportamiento, etc. Se mencionan además diversos estudios relacionados con los SMA.

CAPITULO 3: Se describen los procedimientos de los ensayos realizados. En este capítulo se presentan las características de la mesa vibradora, se detallan las propiedades de las barras utilizadas y se caracteriza la estructura.

CAPITULO 4: En éste capítulo se aborda el análisis teórico de la estructura, donde se compara el comportamiento de una conexión SMA (con barras de Nitinol) y una conexión rígida.

CAPITULO 5: Este capítulo trata el análisis de resultados. Se realiza una comparación entre el comportamiento de las conexiones SMA.

CAPITULO 6: Se comentan los resultados obtenidos y se concluye acerca del cumplimiento de los objetivos propuestos en el Capítulo 1.

CAPITULO 2

Antecedentes Generales

2.1. Aleaciones con Memoria de Forma (SMA).

2.1.1. Mecanismo del Efecto de Memoria de Forma y Superelasticidad.

La principal característica de los materiales SMA radica en que pueden experimentar dos fases cristalográficas, dependiendo del nivel de esfuerzo y temperatura en que se encuentre la aleación. Estas fases tienen la misma composición química, pero difieren en su composición cristalográfica, la que es estable a diferentes niveles de energía, es decir, a diferentes temperaturas y esfuerzos [2]. Las fases antes mencionadas son:

Austenita: Fase cristalográfica típicamente estable a bajos niveles de tensión y a elevada temperatura. Posee una estructura cristalina muy ordenada.

Martensita: Fase cristalográfica típicamente estable a elevados niveles de tensión y a baja temperatura. Posee una estructura cristalina menos ordenada que la austenita.

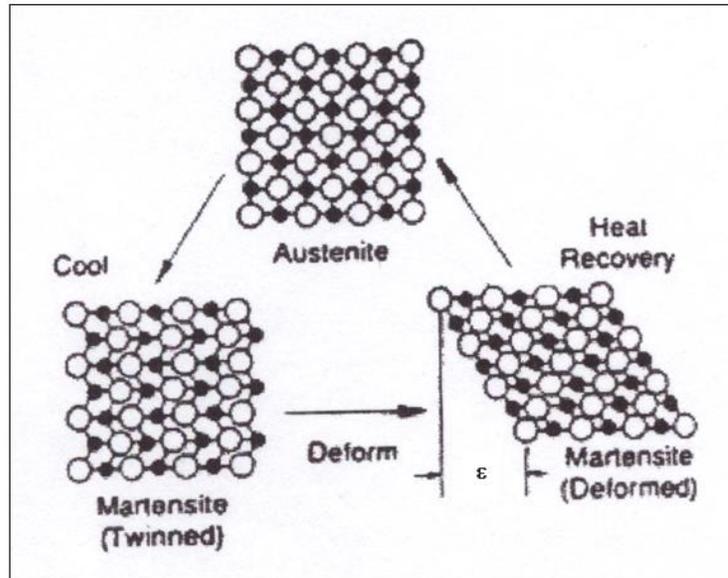


Figura 2.1. Geometría Cristalográfica de un material SMA.

La geometría cristalográfica es de orden cúbica centrada, pero al cambiar de fase austenita a martensita, la geometría tiende a inclinarse. Como resultado de esto, se produce una gran deformación elástica con una reversibilidad cuando retorna la fase austenita (ver Figura 2.1.). Esta propiedad de no degradar la estructura cristalina cuando el material está bajo tensión, es el llamado **comportamiento superelástico**. Esto se debe a que la aleación experimenta una transformación de fase reversible mientras se deforma, en lugar de una dislocación intragranular, como es típico del acero.

En ausencia de esfuerzos, un SMA se caracteriza por cuatro temperaturas de transformación: M_s y M_f , que corresponden a la temperatura de inicio y término respectivamente, en que ocurre la transformación desde la fase austenita a martensita. A_s y A_f indican, respectivamente, las temperaturas de inicio y fin de la transformación inversa, es decir, de martensita a austenita [12].

Estas temperaturas se ilustran en la Figura 2.2.

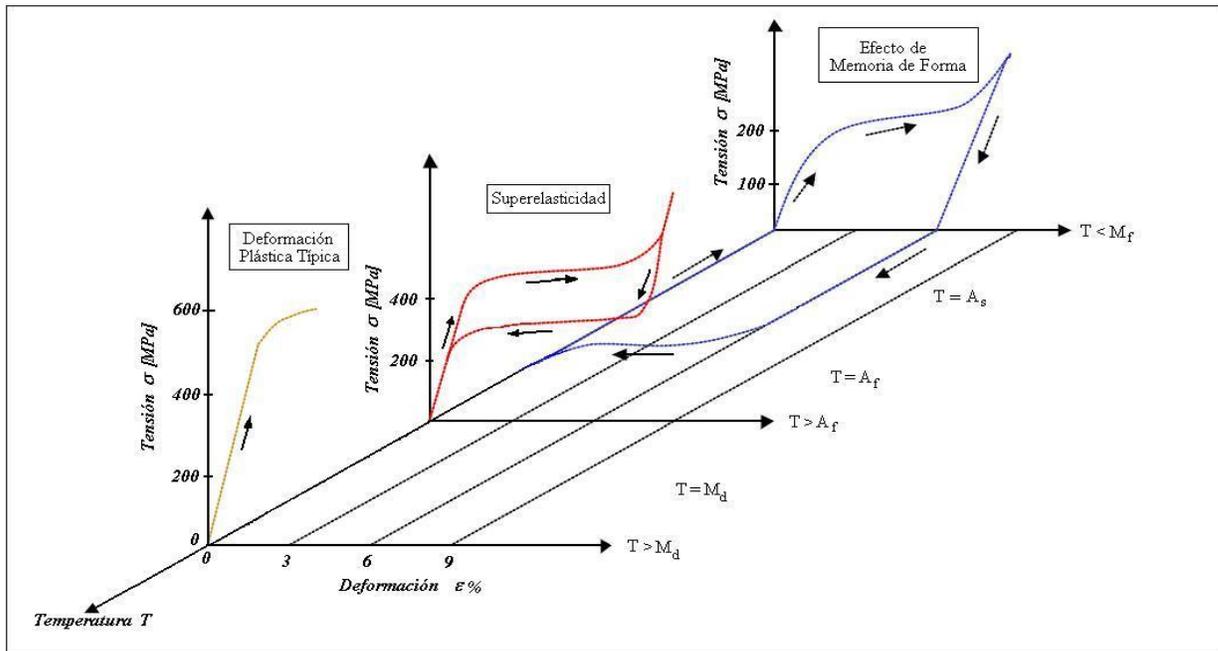


Figura 2.2. Diagrama Tridimensional Tensión-Deformación-Temperatura que ilustra el comportamiento de las SMA para una aleación NiTi [5].

La superelasticidad se presenta sólo en la fase austenita, es decir, dentro de ciertos límites de temperatura ($A_r < T < M_d^{(1)}$). La Figura 2.3 muestra la curva tensión-deformación de un material con características superelásticas. Se observa que exhibe un comportamiento lineal cuando se aplica una carga hasta un cierto esfuerzo, en ese tramo el material se encuentra en fase austenita, sin embargo, al pasar de este esfuerzo se genera un cambio en la rigidez, formando un plateau que se mantiene hasta que la martensita está completamente formada. Cuando se descarga (a temperatura constante) la fase martensita se vuelve inestable y se produce el efecto inverso, es decir, el material recupera las propiedades de la fase austenita y queda sin deformación remanente cuando se llega al estado de carga nulo. Como resultado de este proceso, se produce una disipación de energía que corresponde al área del ciclo histerético. Esta es la característica principal que hace que este tipo de material sea interesante para el uso en el campo de la ingeniería sísmica.

Cuando el material es sometido a carga estando en fase martensita, de tal forma que existan deformaciones remanentes, éste puede recuperar su forma inicial aplicándole temperatura; ésta debe ser mayor que A_r . El **efecto de memoria de forma** se refiere a la habilidad que tiene el material para recobrar su forma original, cuando se ha deformado plásticamente, tras la aplicación de un ciclo térmico adecuado.

⁽¹⁾ M_d : Temperatura en que la austenita ya no se forma en martensita inducida por esfuerzos (la austenita es estable a la deformación).

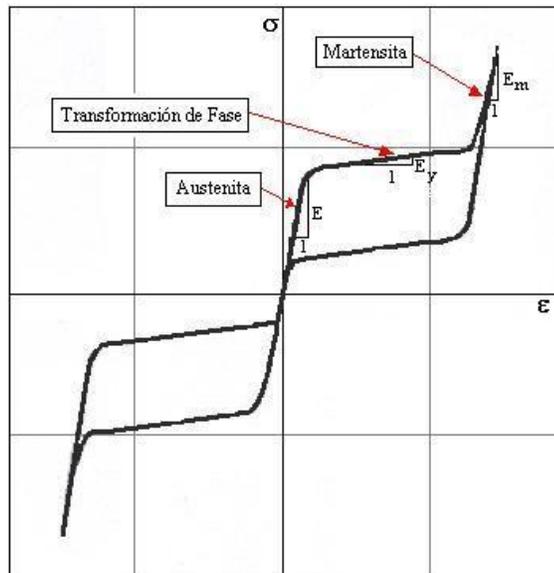


Figura 2.3. Curva Tensión-Deformación de un material con comportamiento superelástico.

Desde el punto de vista de la Ingeniería Civil, las características más interesantes que se desarrollan en los SMA para las distintas fases son [2]:

(a) Comportamientos comunes a ambas fases, austenita y martensita:

- Amortiguamiento debido a la histéresis en el espacio esfuerzo-deformación.
- Alta estabilidad de las propiedades mecánicas en un amplio rango de tiempo.
- Ausencia de efecto de fatiga.
- Ausencia de efectos de corrosión.

(b) Comportamiento típico de la fase austenita:

- Deformación residual nula hasta un valor de deformación máxima aproximado de 10% bajo cargas aplicadas.

(c) Comportamiento típico de la fase martensita:

- Mayor amortiguamiento con respecto a la fase austenita.
- Posibilidad de recobrar completamente la deformación residual suministrándole calor (efecto de memoria de forma).

2.1.2 Principales parámetros que representan el comportamiento mecánico de materiales superelásticos [6].

Los principales parámetros que se utilizan para caracterizar el comportamiento de un material SMA son: Rigidez secante, la cual se calcula según la Ecuación (2.1); Energía disipada por ciclo (E_D), la cual corresponde al área encerrada en un ciclo; y amortiguamiento equivalente (ξ_{eq}), que se determina de acuerdo a la Ecuación 2.2 ó 2.3⁽²⁾.

$$K_s = \frac{F_{max} - F_{min}}{\delta_{max} - \delta_{min}} \quad (2.1)$$

En la ecuación (2.1), F_{max} y F_{min} corresponden a los esfuerzos máximos y mínimos de la curva de histéresis respectivamente. δ_{max} y δ_{min} representan las deformaciones máximas y mínimas respectivamente.

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{2\pi E_R} \quad (2.2)$$

$$\xi_{eq} = \frac{E_D}{4\pi E_T} \quad (2.3)$$

Los valores de E_E , E_D y E_T corresponden a las áreas que se muestran en la siguiente figura:

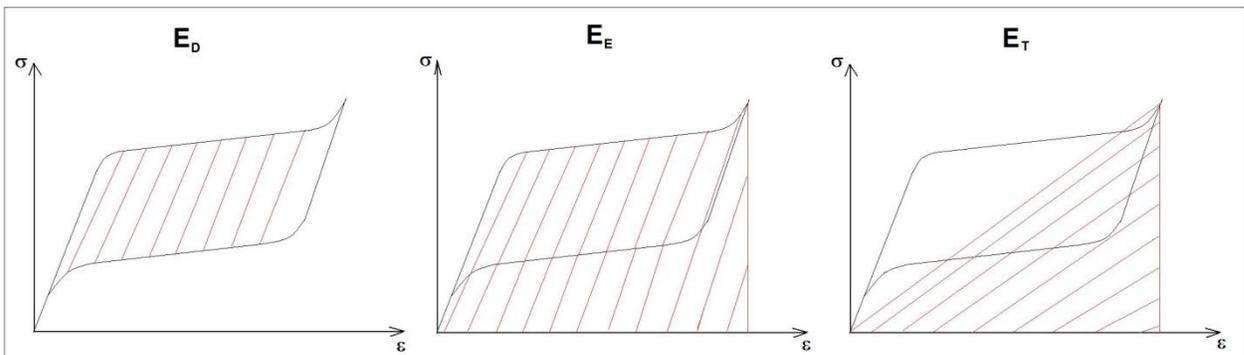


Figura 2.4. Identificación de parámetros E_D , E_E y E_T para el cálculo del amortiguamiento equivalente⁽³⁾.

⁽²⁾ Ecuación (2.2): Amortiguamiento Equivalente según Liu y Van Humbeeck.

Ecuación (2.3): Amortiguamiento Equivalente según DesRoches.

⁽³⁾ E_D : Energía disipada por ciclo; E_E : Área encerrada por la curva superior del ciclo; E_T : Área encerrada por la recta que une los puntos mínimos y máximos de deformación y tensión

2.2. Aleaciones con Memoria de Forma Níquel-Titanio.

En este sub-capítulo se destacan las principales propiedades mecánicas del Nitinol, material que se usa en el desarrollo de esta memoria, así como también se describe brevemente su proceso de fabricación y tratamiento final.

2.2.1. Propiedades Mecánicas de las Aleaciones NiTi.

El Nitinol es capaz de experimentar deformaciones relativamente altas sin que éstas sean permanentes (alrededor del 8%-10%), es relativamente estable frente a cargas cíclicas, tiene una elevada resistividad eléctrica y es resistente a la corrosión. En la Tabla 2.1., se comparan las propiedades de esta aleación frente al acero inoxidable.

Tabla 2.1. Comparación de NiTi con un acero inoxidable AISI316[5].

Propiedad	Nitinol	Acero Inoxidable
Deformación recuperable [%]	8	0,2
Módulo de Elasticidad [MPa]	$8,7 \cdot 10^4$ (A) – $1,4 \cdot 10^4$ (M)	$2 \cdot 10^5$
Tensión de Fluencia [MPa]	200~700 (A) – 70~140 (M)	248~517
Resistencia última a tracción [MPa]	900 (f.a.) – 2000 (w.h.)	448~827
Elongación a rotura [%]	24~50 (f.a.) – 5~10 (w.h.)	20
Resistencia a la corrosión	Excelente	Muy Buena

Nota: A: Austenita; M: Martensita; f.a.: fully annealed (totalmente recocido); w.h.: work hardened (endurecido).

En el Nitinol, es posible modificar sustancialmente las temperaturas de transformación (y por tanto el comportamiento superelástico y de memoria de forma) mediante pequeñas variaciones en el contenido de Ti/Ni, o bien sustituyendo el Níquel por Cobalto. Es posible bajar la temperatura A_f aumentando el contenido de Níquel, sin embargo, si se añade Níquel por encima del 55,6 wt%, aparece una segunda fase estable ($Ti-Ni_3$) y las propiedades del NiTi se pierden. Por ello, para evitarlo, se suele sustituir el Níquel por Cobalto para bajar las temperaturas. Se ha de vigilar la adición de otros elementos como el carbón u oxígeno, pues cambian o inhiben las temperaturas y propiedades mecánicas, con lo que deben ser minimizados.

Un adecuado endurecimiento y tratamiento térmico pueden mejorar notablemente la facilidad con que se deforma la martensita, dar mayor resistencia a la austenita y permitir el efecto de memoria de forma. Por el contrario, otras temperaturas y tiempos en el tratamiento térmico, pueden conseguir el efecto inverso.

Otra de las peculiaridades que pueden presentar las SMA en base a Níquel y Titanio, es que bajo determinadas condiciones, se presenta una transformación de fase intermedia denominada **Transformación de fase R**. Esta transformación (debido a una distorsión romboédrica de la celda unitaria cúbica austenítica) precede a la transformación martensítica y es típica en aleaciones termomecánicamente tratadas, aleaciones ricas en Ni, aleaciones envejecidas a una

temperatura adecuada y en aleaciones ternarias como NiTiFe y NiTiAl[5]. Dado que es una transformación de fase termoelástica, también puede dar lugar al efecto de memoria de forma y superelasticidad. No obstante, la amplitud de su histéresis es mucho más pequeña si se compara con la transformación martensítica.

2.2.2. Fabricación de las aleaciones NiTi[5].

Para asegurar la calidad y consistencia de los materiales fabricados con Nitinol, es importante conocer y entender los procesos seguidos para obtener este material y los efectos que tiene en las propiedades y formas finales.

En teoría, todos los componentes fabricados con Nitinol (alambres, tubos, barras, flejes, láminas, etc.) siguen los mismos pasos de fabricación. Primero se funden en vacío, se trabajan en caliente, se trabajan en frío y se tratan en caliente para conseguir las propiedades finales. Los procesos subsecuentes necesarios como cortar, formar en caliente, cortar por láser, soldar y tratamientos superficiales, se aplican para producir el elemento final.

Es importante mencionar que las temperaturas de transición son altamente sensibles a la composición de la aleación, una variación de un 1% en la cantidad de cualquiera de los dos elementos (Ni o Ti), puede cambiar en 100°C la temperatura de transformación. La familia de aleaciones típicas NiTi comerciales cubre un rango de temperaturas de transformación A_f desde 100°C hasta -50°C. Se utiliza un DSC (calorímetro de barrido diferencial) para determinar la temperatura A_f final que se garantiza en la venta. La presencia de impurezas también afecta a las temperaturas de transformación; algunas de ellas son depresoras de la transformación, disminuyendo dichas temperaturas y otras provocan lo contrario.

Dado que las temperaturas de transformación son tan sensibles a la composición, el método de fundición ha de ser muy cuidadoso; cualquier contaminante significaría cambiar la aleación y probablemente desecharla (los materiales deben estar muy bien mezclados para asegurar homogeneidad y uniformidad). Se suele hacer en horno de vacío o atmósfera inerte. Los más usados son: horno en vacío por inducción (VIM) y horno en vacío por arco (VAR).

Después de la fundición, se refina la microestructura mediante una deformación adicional. La microestructura de la aleación recién obtenida tiene muy poca ductilidad y no presenta SME⁽⁴⁾ ni SE⁽⁵⁾. Dado esto, se realiza un trabajo en caliente para modificar dicha microestructura. Dependiendo de la forma final, el tratamiento puede ser distinto: extrusión, laminado en barra o lámina ó forjado. Las temperaturas suelen ser entre 600°C y 800°C.

Para conseguir las propiedades mecánicas y físicas deseadas en la mayoría de las aplicaciones, es necesario realizar un trabajo en frío en varios pasos precedidos de trabajo en caliente. Con el trabajo en frío se obtiene la forma final, el acabado superficial final, una microestructura refinada y las propiedades mecánicas deseadas.

⁽⁴⁾ SME: Shape Memory Effect (Efecto de Memoria de Forma)

⁽⁵⁾ SE: Superelasticity (Superelasticidad)

2.3. Estudios de Aleaciones SMA.

En la Universidad de Chile, en los Departamentos de Ingeniería Civil e Ingeniería Mecánica, se han hecho investigaciones acerca de la fabricación y comportamiento de Aleaciones con Memoria de Forma. Dentro de ellas se mencionan las siguientes:

2.3.1. C. Espinoza (2007)[6].

Se caracterizó el comportamiento superelástico de barras de Nitinol de 2,46 [mm] de diámetro. Se realizaron ensayos mecánicos para estudiar el comportamiento frente a cargas estáticas y ciclos dinámicos de carga y descarga. En el caso de ensayos dinámicos, se llevaron a cabo a diferentes amplitudes, frecuencias y número de ciclos, observando así de qué manera influyen las diferentes variables en la capacidad de disipar energía del material. Para los ensayos de tracción a rotura se obtuvieron deformaciones hasta de 10%, y tensión de falla de aproximadamente 1300 [MPa]. A partir de las curvas de carga y descarga de los ensayos cíclicos, se determinó el módulo de elasticidad austenítico, la rigidez secante, la pendiente de la zona plástica, etc. Se concluyó que el material presenta comportamiento superelástico para deformaciones reales menores a un 7% y para todas las frecuencias ensayadas a temperatura ambiente. Se determinó además, que a medida que aumenta el número de ciclos, el material va disminuyendo su capacidad de disipar energía.

En la Tabla 2.2 se muestran valores característicos de un ensayo a tracción. Para efectos comparativos, se incluyen los valores generales dados por DesRoches et al (2004).

Tabla 2.2. Valores representativos de Ensayos a Tracción[6].

Propiedad	Probeta A	Probeta D	DesRoches
Deformación por Pretensión [%]	0,5	0,5	
Módulo de Elasticidad [GPa]	---	51,4	30 – 83
Esfuerzo de Transformación [MPa]	495,7	519,11	195 - 690
Tensión Máxima [MPa]	1176,2	1298,42	895 - 1900
Deformación Máxima [%]	9,6	9,5	5 - 50

A continuación se presenta el ciclo de histéresis de unos de los ensayos cíclicos realizados. A partir de este ensayo se obtuvieron las propiedades del Nitinol que le fueron asignadas al modelo computacional analizado en el Capítulo 3.

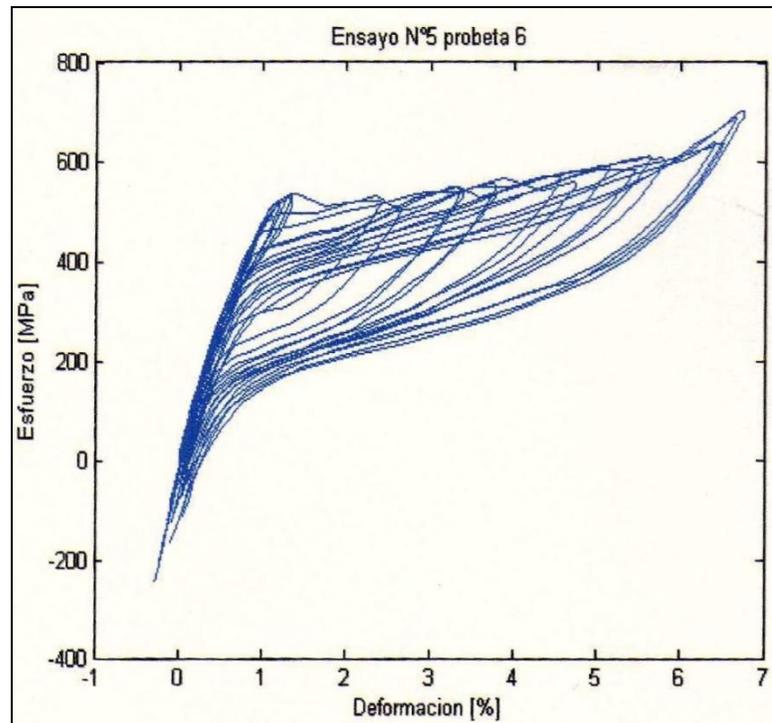


Figura 2.5. Curva Esfuerzo-Deformación. Ensayo Cíclico a 1 [Hz][6].

2.3.2. J. Sepúlveda (2006)[12].

Se usó una aleación SMA CuAlBe superelástica como disipador de energía en conexiones de acero viga columna. Primeramente, en el MOP, se realizaron ensayos monotónicos hasta la rotura y ensayos dinámicos a 0,25 [Hz] y 1 [Hz] a barras SMA CuAlBe de 3 [mm] de diámetro. Posteriormente, se usaron 4 barras SMA de 182 [mm] de largo útil y 3 [mm] de diámetro, previamente tratadas térmicamente, como disipadores en una conexión viga columna. Se le impusieron giros a la conexión obteniéndose amortiguamientos y disipación de energía máxima de $\beta_1=5,48\%$, $\beta_2=10,96\%$, $\beta_3=4,19\%$ y $E_D=8,15$ [kgf/cm²] para un giro de la conexión de 2,2% y una deformación de 1,72%. La elasticidad secante tuvo como valor máximo 6000 [kgf/cm²] para un 0,4% y un mínimo de 2000 [kgf/cm²] para un 1,5%. Los valores de beta corresponden al factor de pérdida, amortiguamiento equivalente y fricción interna, respectivamente todos calculados a partir de razones entre distintas áreas encerrada por las curvas tensión deformación de los ensayos cíclicos. El valor de E_D , corresponde a la energía disipada. Las barras ensayadas en el MOP y la conexión se comportaron de manera similar, la frecuencia a la cual se realizan los ensayos no influye en los resultados. La conexión con disipadores mostró un comportamiento estable y sin degradación de la resistencia. No se apreciaron daños en la viga ni en las soldaduras. Como conclusiones se pueden mencionar que las barras no presentaron un deterioro aparente de su capacidad de recuperar deformaciones, lo que permitió realizar 10 ensayos utilizando las mismas barras, luego de los cuales quedaron con una deformación remanente despreciable. Las barras SMA usadas para estimar la demanda de momento, mantuvieron su forma original y su resistencia luego de una gran cantidad de ciclos, con giros de la conexión de hasta un 2,15% real, no observándose ningún deterioro en la viga o en algún otro elemento.

Una de las curvas obtenidas en los ensayos se muestra en la figura siguiente.

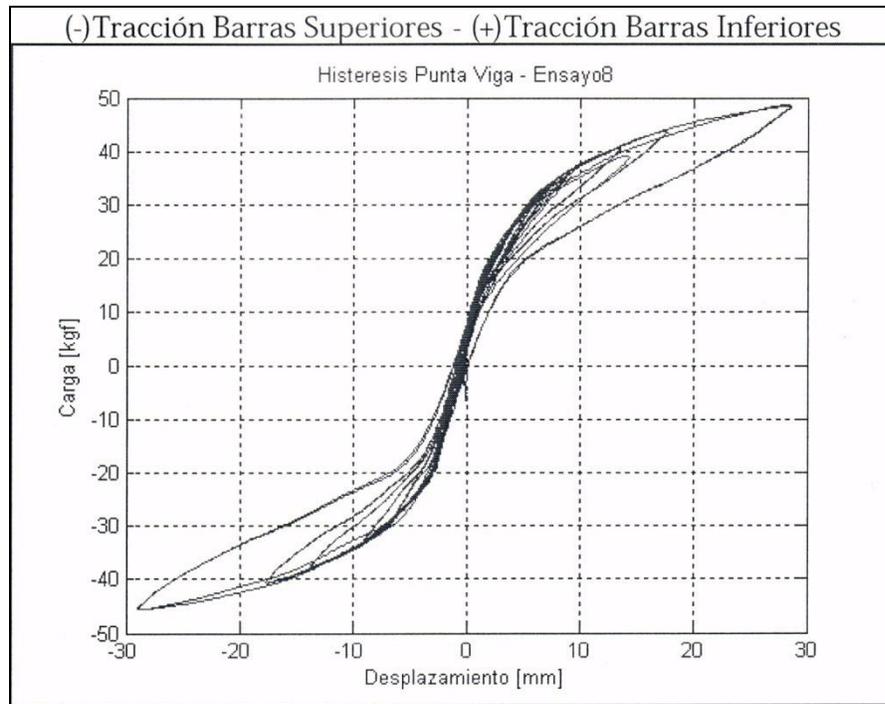


Figura 2.6. Curva de Histéresis Punta de Viga[12].

2.3.3. DesRoches et al (2004)[4].

Estudiaron el comportamiento de barras de Nitinol de 1,8 [mm], 7,1 [mm], 12,7 [mm] y 24,5 [mm] de diámetro, tratando de determinar cómo influye el efecto del diámetro de las barras, de la historia de carga y de la frecuencia de la carga sobre las propiedades de resistencia, amortiguamiento viscoso equivalente y el recentramiento (habilidad del material de retomar su forma original luego de retirar la carga). Concluyeron que las barras de menor diámetro tienen mayor resistencia y amortiguamiento que las barras de diámetros mayores, aunque en ningún caso se sobrepasa un 7% de amortiguamiento equivalente. El recentramiento no se vio afectado ante variaciones del diámetro. Para deformaciones cíclicas mayores al 6% se produjo degradación en el amortiguamiento y en el recentramiento. Al aumentar la frecuencia de carga se observó una reducción de la histéresis y del amortiguamiento, pero no se alteró el recentramiento.

2.3.4. Liu y Humbeeck (1999) [9].

Estudiaron el comportamiento mecánico de alambres de Nitinol de 1 [mm] y 2 [mm] de diámetro en fase austenita. Concluyeron que el comportamiento depende de la frecuencia, el amortiguamiento decrece con el aumento de ésta. Además el amortiguamiento aumenta a medida que baja la temperatura, ya que al final se tiene más martensita.

2.3.5. Ocel et al (2004)[10].

Ensayaron dos conexiones viga-columna usando barras de Nitinol. En la conexión 1 utilizaron barras de 35 [mm] de diámetro y 229 [mm] de largo. En la conexión 2 se emplearon barras de 36,5 [mm] de diámetro y una longitud de 273 [mm]. La aleación estaba en su forma martensítica, por lo tanto se aprovechó el efecto de memoria de forma para disipar energía. Se realizó un tratamiento térmico a las barras para devolverles su forma original y, posterior al tratamiento, la conexión fue ensayada nuevamente. Entre los resultados obtenidos se pueden mencionar:

- Para un giro de 4% en la conexión, se mantenía estable la histéresis, sin degradación de la resistencia.
- No se observó fluencia en la viga ni en la columna.
- En la conexión 1, la recuperación de la deformación de las barras fue de un 76% ante una carga de 22 [kN], sometiéndolas a 288°C durante 8 minutos. En la conexión 2, la recuperación fue de un 54%, aplicando una carga de 3,6 [kN] y una temperatura de 400°C por 27 minutos.
- Al re-ensayar las barras, se obtuvo una histéresis similar a la inicial, sin pérdida de resistencia, rigidez o muestras de fatiga para giros de 4%.

2.3.6. Abolmaali et al (2005)[1].

Esta investigación se llevó a cabo en dos fases. Primero se buscó el tratamiento térmico óptimo para lograr el efecto superelástico, por lo cual se ensayaron pernos de Nitinol de variados diámetros sometidos tanto a ensayos monotónicos como cíclicos. Se compararon temperaturas de tratamiento de 300°C y 350°C. Resultó que para un tratamiento a 300°C, se encontró una tensión de transición más alta; y para un tratamiento de 350°C, se obtuvo una tensión última más alta y una mejor disipación de energía. Por lo tanto, para la segunda fase de experimentos, se eligió el tratamiento a 350°C.

La segunda fase de experimentación consistió en ensayar conexiones con pernos de acero y de Nitinol y comparar la disipación de energía. La conexión se compone de dos perfiles T unidos por las alas con cuatro pernos. Los pernos fallaron en ambos casos al mismo nivel de tensiones por concentración de tensiones en el hilo. La energía disipada por la conexión con nitinol fue mayor a la conexión convencional.

2.3.7. M. Iványi (2000)[8].

Se ensayó un marco de acero a escala real con conexiones viga-columna semirrígidas. Se realizaron 3 ensayos, donde se variaba el sistema de carga. La estructura ensayada correspondió a una estructura de marco de 2 pisos. El primer piso constaba de dos vanos, donde el de mayor longitud se proyectaba en un segundo piso. Para las vigas se utilizaron perfiles IPE 140 e IPE 180, y para las columnas perfiles HEA 140 y HEA 180. Como conexión viga columna se usaron placas a nivel dispuestas entre los elementos principales de la estructura. Las conexiones antideslizantes

son muy susceptibles a desprendimientos de los pernos para niveles de momento relativamente bajos. Una vez que la descompresión ocurre, el diagrama momento-rotación de la conexión, generalmente cambia irreversiblemente. Sin embargo, las conexiones con placas a nivel, no están afectas a desprendimientos de pernos para una misma magnitud de momento, además exhiben un comportamiento momento-rotación similar bajo cargas repetitivas moderadas. La estructura fue cargada tanto vertical como horizontalmente, empleándose gatos hidráulicos para la aplicación de las cargas. Uno de los resultados obtenidos fue la identificación de diversos factores que afectan la rigidez de la conexión, los que se muestran en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Contribución de diferentes factores a la Rigidez Inicial de la Conexión[8].

Conexión	Rigidez Inicial [kN·m]	Contribución del alma de la columna en corte [%]	Contribución del ala de la columna en tracción [%]	Contribución de los pernos [%]	Contribución de la placa en tracción[%]
B11-1	3267	30,4	4,7	63,3	1,5
B11-2	3575	35,3	12,2	50,8	1,7
B13-1	1847	25,0	5,6	67,5	1,9
B13-2	2096	38,4	19,2	40,1	2,3
B14-1	1844	34,0	10,0	54,4	1,5
B14-2	1856	36,0	21,9	40,7	1,4

De los cuatro parámetros considerados, la contribución de la placa es relativamente baja, mientras que los pernos tienen la mayor contribución a la rigidez.

CAPITULO 3

Análisis Teórico de la Estructura

Si bien el estudio desarrollado en esta memoria está abocado a determinar la capacidad del Nitinol como disipador de energía al ser utilizado como conector de elementos estructurales, se realizó un modelo con conexiones convencionales con el fin de tener un patrón comparativo y establecer si es necesario o útil el uso de este tipo de materiales.

3.1. Descripción de la Estructura a Estudiar.

La estructura a ensayar corresponde a un marco tridimensional de un piso a escala reducida. Posee una planta rectangular de 1,5 [m] de largo y 0,8 [m] de ancho; la altura es de 1,5 [m]. La estructura, en su parte superior, lleva una placa de acero de dimensiones 1100x760x10 [mm], la cual le brinda mayoritariamente la masa, 80 [kg] aproximadamente. No obstante, fue necesario incorporarle “pesos” de manera de aumentar la masa a 180 [kg], con el fin de que la estructura entrase en fluencia. Se consideró el marco simplemente apoyado en la base. La estructura se muestra en las figuras 3.1 y 3.2.

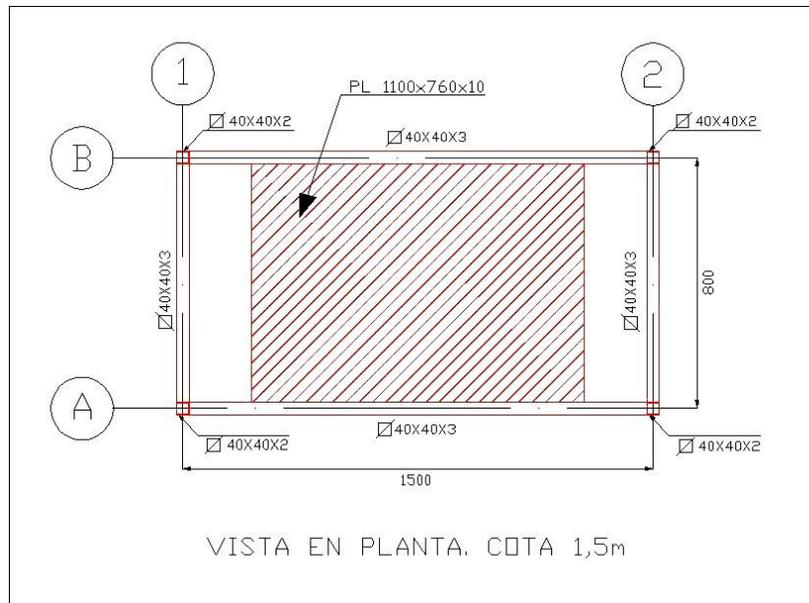


Figura 3.1. Vista en planta de la Estructura.

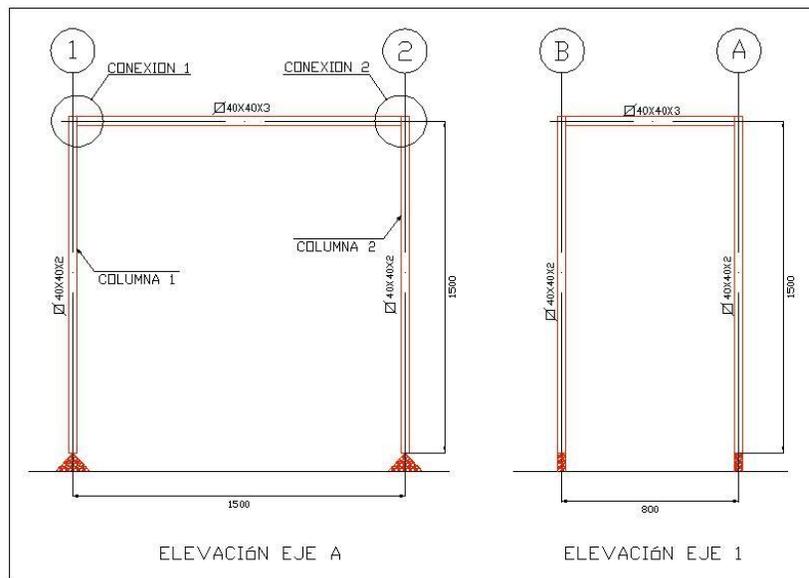


Figura 3.2. Elevaciones de la Estructura.

Los perfiles utilizados corresponden a perfiles rectangulares de acero estructural. Para las vigas se utilizaron perfiles Cajón 40x40x3, y para las columnas perfiles Cajón 40x40x2.

3.2. Estimación de la Respuesta de la Estructura.

Previo a la ejecución de los ensayos, con la finalidad de obtener de una manera aproximada la respuesta estructural, se llevó a cabo una modelación computacional utilizando el Software de Análisis No-Lineal Ruaumoko.

3.2.1. Conexión SMA.

Este modelo (en adelante modelo M1) corresponde a un marco de acero, donde se utilizan conexiones SMA en las uniones viga columna. Las solicitaciones actuantes en la estructura, corresponden al peso propio y la acción sísmica. Se realizó un análisis en el tiempo, para lo cual se utilizó el registro sísmico Lolloe en su componente N10E. La estructura fue excitada en su dirección longitudinal considerándose las vigas y las columnas como un material elastoplástico. Para modelar la ley constitutiva de las barras de Nitinol, se utilizó el modelo histerético *Flag-Shaped* (Hyst 50) incorporado en el Software Ruaumoko. La conexión fue modelada utilizando un resorte rotacional, para lo cual se utilizó el elemento "Spring" del mismo software. Se obtuvo que el Nitinol se comporta de la manera deseada, sin presentar deformaciones remanentes; además no se observó rotulación plástica en vigas y columnas. La estructura con este tipo de conexiones presentó un período fundamental de 0,6 [seg]. El máximo momento que toman las columnas de este modelo es de 35,5 [kgf·m], logrando mantener la estructura en el rango elástico. En cuanto a la conexión SMA, se consideró que ésta rotaba en torno a uno de los extremos de la viga, con ello se asumió que las barras de Nitinol nunca trabajan a la compresión, es decir, sólo se traccionan. El máximo giro que se obtuvo en la conexión fue de aproximadamente 0,052 [rad]. Un detalle del modelamiento de la conexión se muestra en la Figura 3.3.

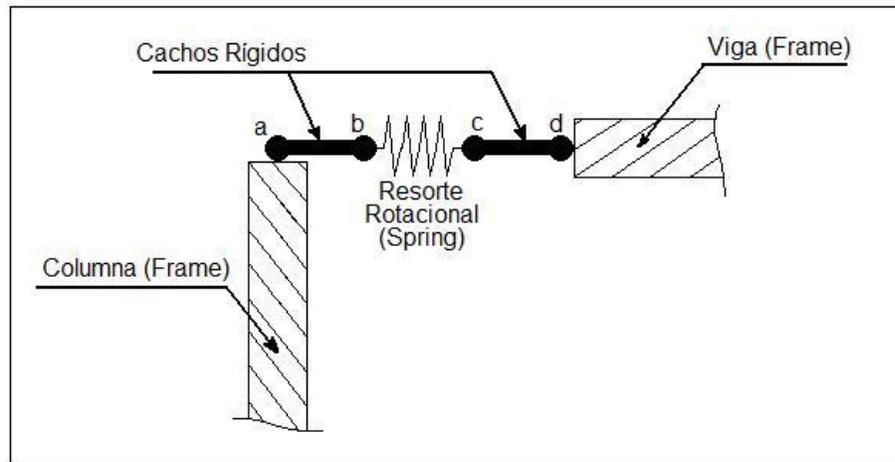
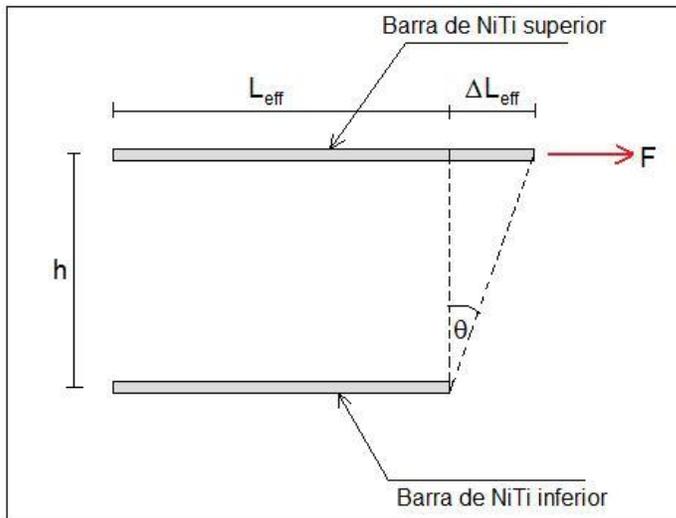


Figura 3.3. Modelo de la Conexión SMA en Ruaumoko.

La definición del resorte en el software exige la creación de 4 nodos (a, b, c y d). Entre los nodos **a-b** y **c-d**, se definen elementos rígidos, los que eventualmente pueden tener longitud nula. Para el caso del Modelo M1, tanto la longitud de los elementos rígidos como la de los resortes es nula, por lo tanto los cuatro nodos necesarios para definir el elemento *spring* poseen las mismas coordenadas. A este elemento se le dan las propiedades de rigidez, comportamiento histerético, propiedades de fluencia, etc. Estas propiedades fueron calculadas a partir de las propiedades de cada barra. A modo de ejemplo, se presenta el cálculo de la rigidez.



F: Fuerza Axial en la barra (tracción)

L_{eff}: Longitud efectiva de la barra

ΔL_{eff}: Deformación

h: Distancia entre centroides de las barras

θ: Giro

Figura 3.4. Diagrama de cuerpo libre para la determinación de la rigidez rotacional.

Se tiene que el giro θ , queda definido por $\theta = \frac{\Delta L_{eff}}{h}$ (Figura 3.4). Además se tiene que la rigidez del resorte rotacional está dada por $k_{\theta} = \frac{M}{\theta}$, donde **M** es el momento producido por la fuerza **F**, por lo tanto $M=F \cdot h$. La fuerza **F** puede expresarse como $F=k \cdot \Delta L_{eff}$, donde $k = \frac{EA}{L_{eff}}$ corresponde a la rigidez axial de la barra; **E** es el Módulo de Elasticidad del Nitinol; **A** es la sección transversal de las barras. Con estas expresiones el momento queda como $M = EA \cdot \frac{\Delta L_{eff}}{L_{eff}} \cdot h$, por lo tanto la rigidez del resorte se define como:

$$k_{\theta} = \frac{E \cdot A \cdot h^2}{L_{eff}} \quad (3.1)$$

Las propiedades de las barras de Nitinol usadas en el modelo, basadas en ensayos cíclicos, son las siguientes[6]:

Tabla 3.1. Propiedades del Nitinol

Módulo de Elasticidad [GPa]	42
Tensión de Fluencia [MPa]	400
Tensión Máxima [MPa]	584
Deformación Máxima [%]	5
Factor de Bilinealidad $r^{(1)}$	0,062
Longitud Efectiva [cm]	13
Deformación de Fluencia [%]	1

Nota: Los valores mostrados corresponden a valores promedio de ensayos cíclicos a 1[Hz] realizados por Espinoza [6].

⁽¹⁾ Parámetro requerido por el software Ruaumoko.

3.2.2. Conexión Rígida.

Este modelo (en adelante modelo M2) corresponde a una estructura con conexiones rígidas. Las solicitaciones actuantes en la estructura, corresponden al peso propio de ésta y la acción sísmica. Se realizó un Análisis en el Tiempo, para lo cual se utilizó el registro sísmico Lollole en su componente N10E. La estructura fue excitada en su dirección longitudinal considerándose las vigas y las columnas como un material elastoplástico. Se observó la aparición de rótulas plásticas en el extremo superior de las columnas. Sin embargo, las vigas se comportaron dentro del rango lineal elástico durante todo el tiempo considerado para el análisis (70 segundos). La estructura tiene un período fundamental de 0,42 [seg]. A partir del análisis se obtuvieron los esfuerzos y deformaciones en los elementos y la variación de ellos en el período de tiempo considerado. Se pueden mencionar a modo de ejemplo que el momento máximo alcanzado por las columnas durante el análisis fue de 92,5 [kgf·m] con una rotación máxima de 0,011 [rad]. El desplazamiento máximo de los nudos superiores (unión viga-columna) en la dirección longitudinal con respecto al suelo fue de 8,5 [cm] a los 46,5 [seg] del análisis.

3.3. Conexión SMA. Modelo M1.

3.3.1. Análisis en el Tiempo.

En este análisis se consideró una ventana de tiempo de 70 segundos con un intervalo de tiempo de integración de 0,005 [seg]. Se consideraron 4 modos de vibrar obteniéndose los siguientes amortiguamientos modales: 2.7% para el modo 1; 3,5% para los modos 2 y 3, y 3% para el modo 4. Estos valores fueron calculados usando el método de Rayleigh fijando el amortiguamiento de los modos 1 y 4 en 2%. Dado que la estructura es excitada en una sola dirección, su período fundamental corresponde al período del primer modo de vibrar. La masa considerada en el análisis correspondió a la aportada por la mitad superior de la estructura más los pesos añadidos (aproximadamente 180 [kg]). Del análisis se obtuvo una frecuencia de 1,658 [Hz], o equivalentemente, un período fundamental de 0,603 [seg] (primer modo).

Tras realizar el análisis en el tiempo bajo la acción sísmica de Lollole N10E, es posible obtener el comportamiento de los elementos de la estructura. Sin embargo, lo que presenta mayor interés, es conocer el comportamiento del resorte rotacional, que representa la conexión SMA.

En la figura 3.5, se observa el Momento versus Rotación de una conexión SMA de la estructura. Se observa claramente el comportamiento típico de los materiales superelásticos.

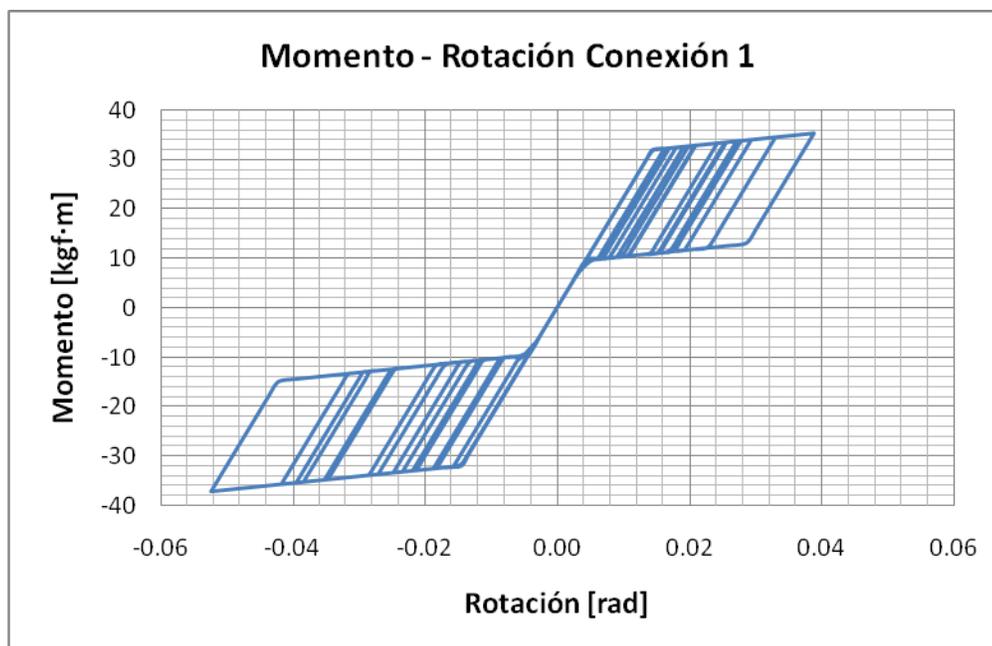


Figura 3.5. Momento v/s Rotación de la Conexión 1.

La figura 3.6 muestra la Fuerza Axial en función de la Deformación de las barras superiores. Se observa una deformación máxima de 0,42 [cm] en las barras de NiTi, tomando una fuerza de 460 [kgf] (230 [kgf] cada barra superior).



Figura 3.6. Fuerza Axial v/s Deformación de las Barras Superiores de la Conexión 1.

En la Figura 3.7 se observa el diagrama tensión-deformación unitaria de las barras superiores.

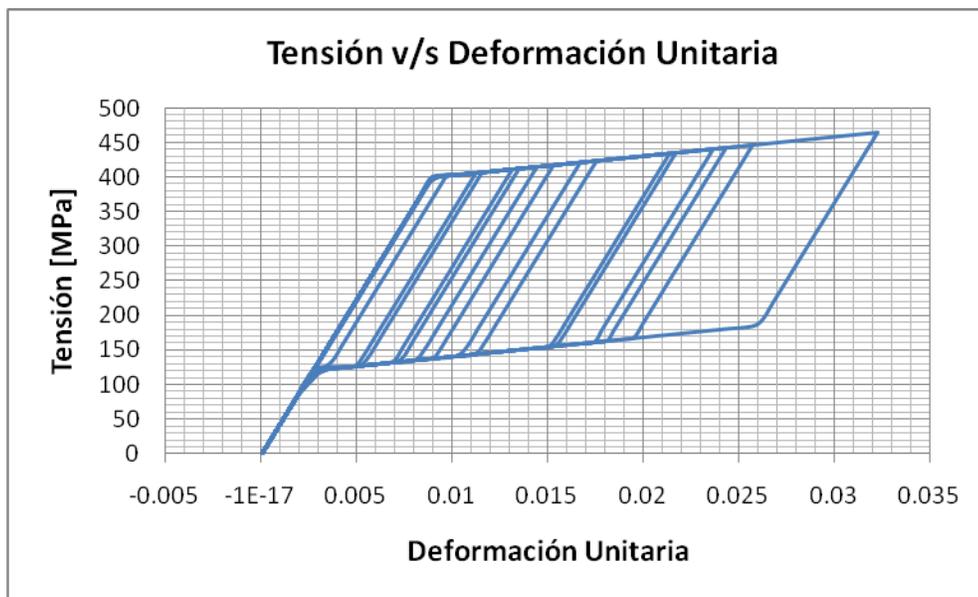


Figura 3.7. Tensión v/s Deformación Unitaria de las Barras Superiores de la Conexión 1.

Se aprecia que las barras trabajan a una tensión máxima de 460 [MPa] experimentando una deformación del 3,2%, valores que están muy por debajo de la capacidades de tensión y deformación del Nitinol (Ver Tabla 2.2).

La Figura 3.8 muestra la variación de la Fuerza Axial de las Barras Superiores e Inferiores en el tiempo.

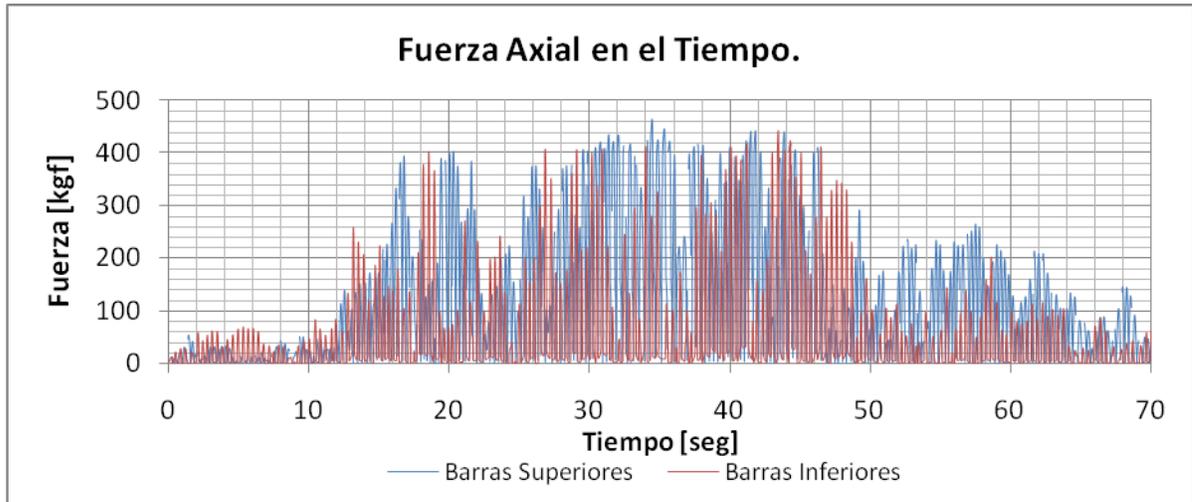


Figura 3.8. Variación de la Fuerza Axial en el Tiempo de las Barras Superiores e Inferiores.

Se observa que tanto las barras superiores como inferiores se encuentran siempre traccionadas, no tomando esfuerzos de compresión, esto debido a que se supuso en el modelo que la conexión rota en torno a cada vértice. Por lo tanto cuando ésta rote y un par de barras se encuentra en tracción, en el par opuesto la viga estará ejerciendo presión contra la columna (contacto acero-acero), por lo que el par inferior no trabajará, de esta manera, no tomará cargas de compresión. Esto explica, además, por qué en la Figura 3.6, sólo se observa el ciclo histerético en el cuadrante positivo.

La figura 3.9 muestra la variación de la razón de amortiguamiento de la conexión versus la deformación unitaria a partir de la curva mostrada en la figura 3.7. Se aprecia que existe una tendencia creciente del amortiguamiento a medida que aumenta la deformación. Sin embargo la tasa de crecimiento es baja y alcanza un máximo luego de cierto nivel de deformación, manteniéndose luego constante.

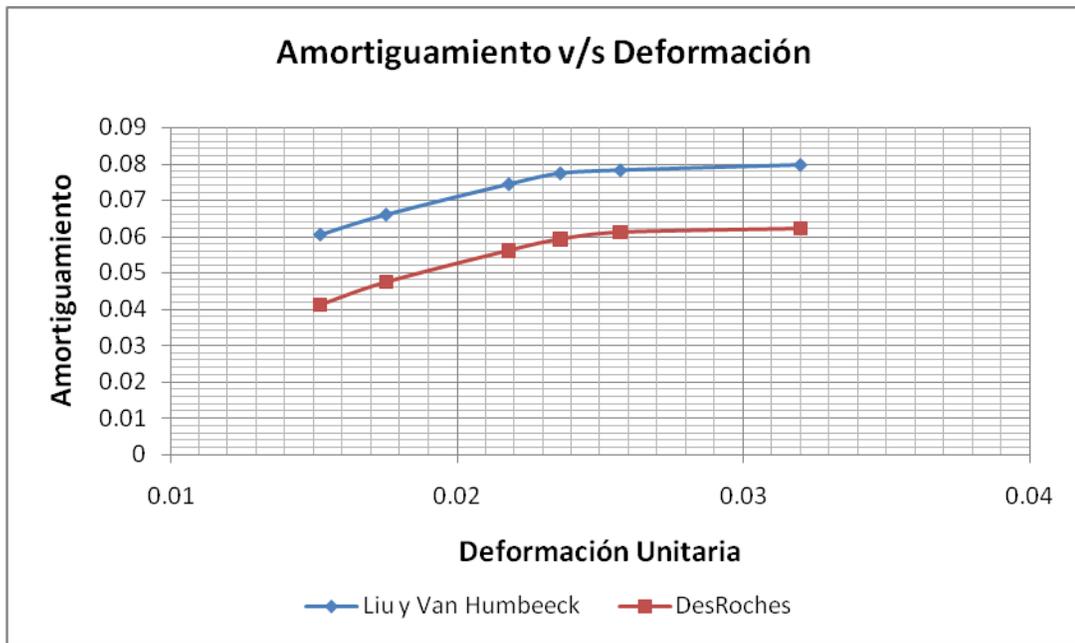


Figura 3.9. Amortiguamiento versus Deformación Unitaria.

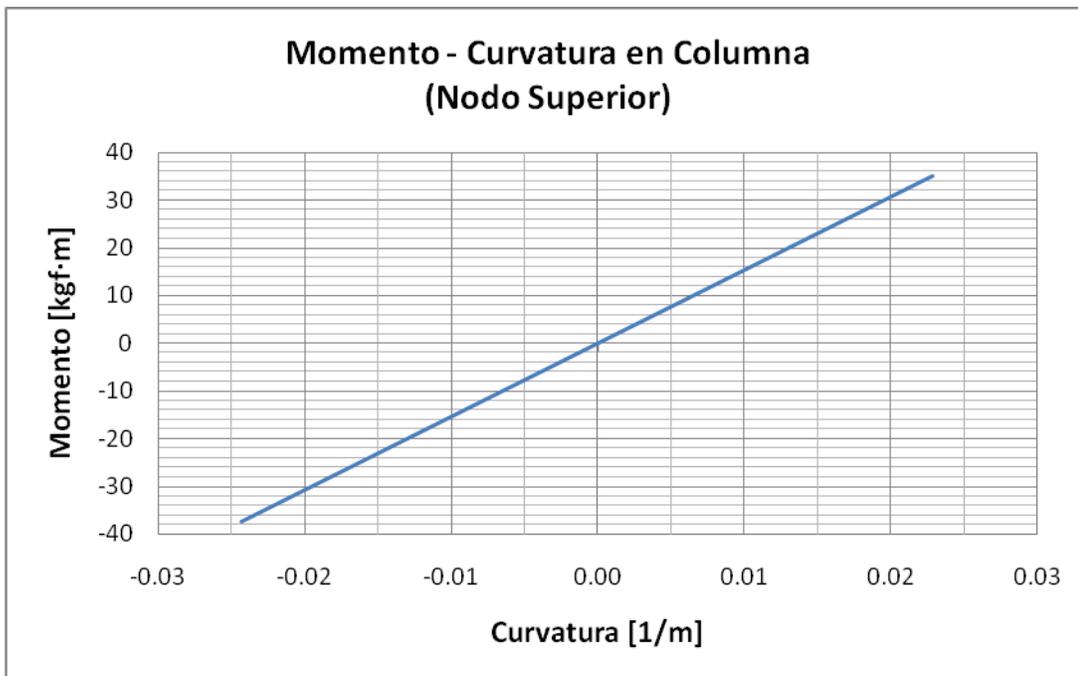


Figura 3.10. Diagrama Momento-Curvatura del Nodo Superior de una Columna de la Estructura.

La Figura 3.10 muestra el diagrama momento-curvatura de una columna de la estructura. Se observa claramente que el comportamiento de ésta se encuentra en el rango lineal elástico.

3.4. Conexión Rígida. Modelo M2.

3.4.1. Análisis en el Tiempo.

Dado que la estructura es excitada en una sola dirección, su período fundamental corresponde al período del primer modo de vibrar. La masa a considerar en el análisis corresponde a la masa de la mitad superior de la estructura, vale decir la masa de las vigas, la plancha, la mitad de la masa de las columnas y los pesos añadidos. Ante esto se obtuvo un período de 0,424 [seg], equivalente a una frecuencia de 2,35 [Hz].

Del análisis, es posible obtener el comportamiento de los elementos (vigas y columnas) durante la acción del sismo. El gráfico siguiente, muestra el Momento versus Curvatura de una columna de la estructura, en el nodo superior de la misma, es decir, en el punto de conexión viga-columna. Corresponde al mismo nodo mostrado en la figura 3.10. Se observa claramente un comportamiento elastoplástico.

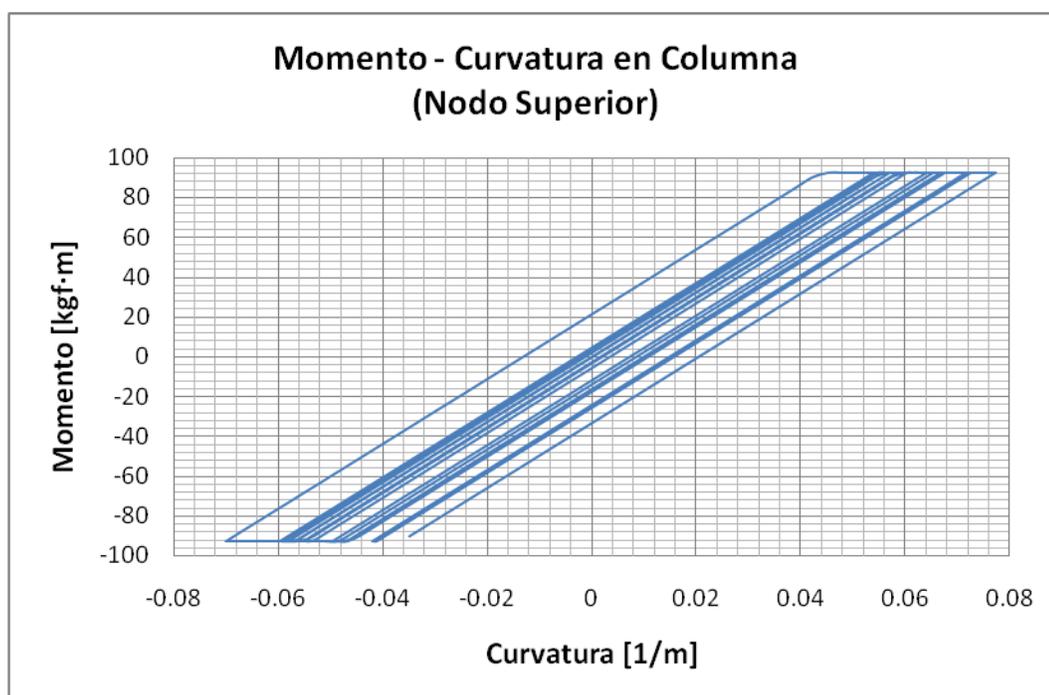


Figura 3.11. Diagrama Momento-Curvatura del Nodo Superior de una Columna de la Estructura.

Se desprende del análisis, que el máximo momento experimentado en la conexión soldada es de 92,5 [kgf·m], lo que se puede observar en la figura 3.11. Es importante señalar que para los niveles de rotación plástica alcanzados, la columna estaría destruida. Esto hace que la incorporación de disipadores SMA sea una ventaja, ya que con ellos las columnas tuvieron un comportamiento elástico (ver figura 3.10).

Se muestra además como varían el momento y los desplazamientos que experimenta el mismo punto durante la ventana de tiempo considerada (ver figuras 3.12 y 3.13).

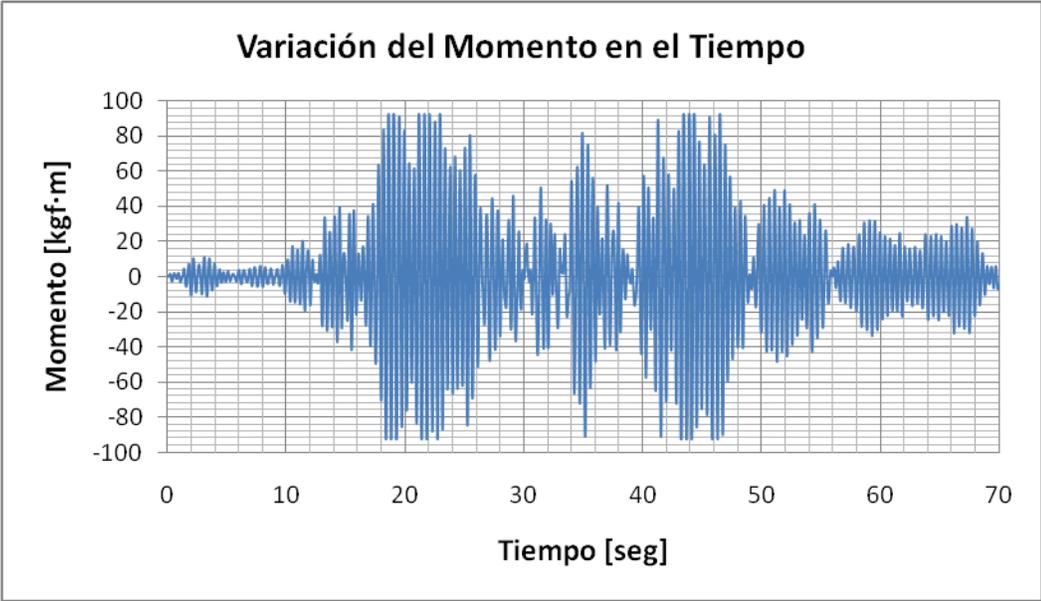


Figura 3.12. Variación del Momento en Nudo Superior de una Columna.

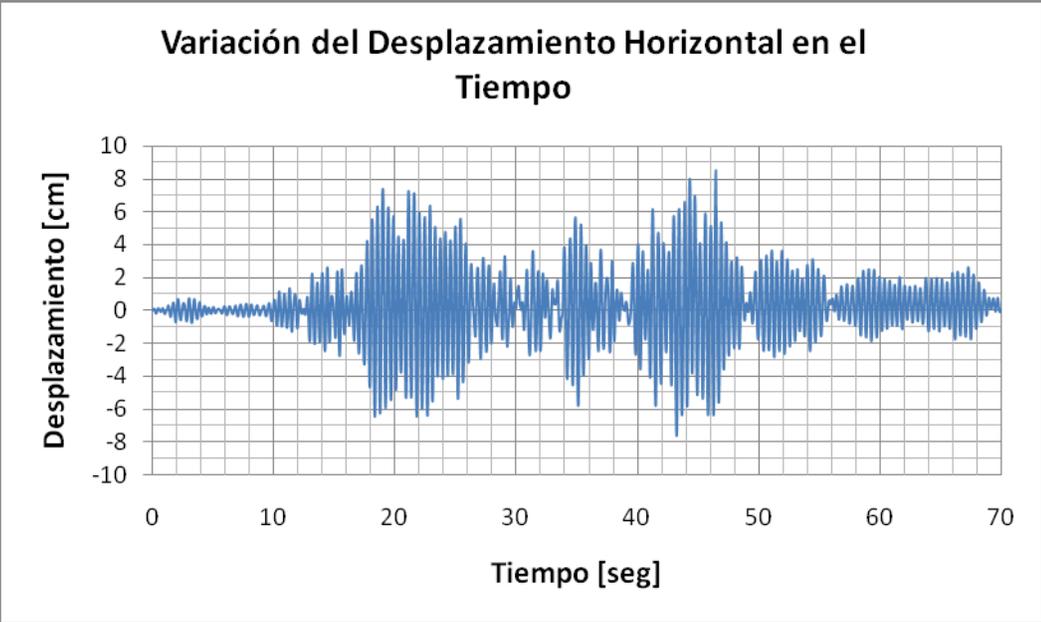


Figura 3.13. Variación del Desplazamiento en Nudo Superior de una Columna.

Al tratarse de una estructura de 1 piso, el gráfico anterior representa la variación en el tiempo del desplazamiento del piso con respecto al suelo, donde el desplazamiento máximo ocurre alrededor de los 46 segundos, tiempo perteneciente al rango donde el registro sísmico presenta las mayores e aceleraciones.

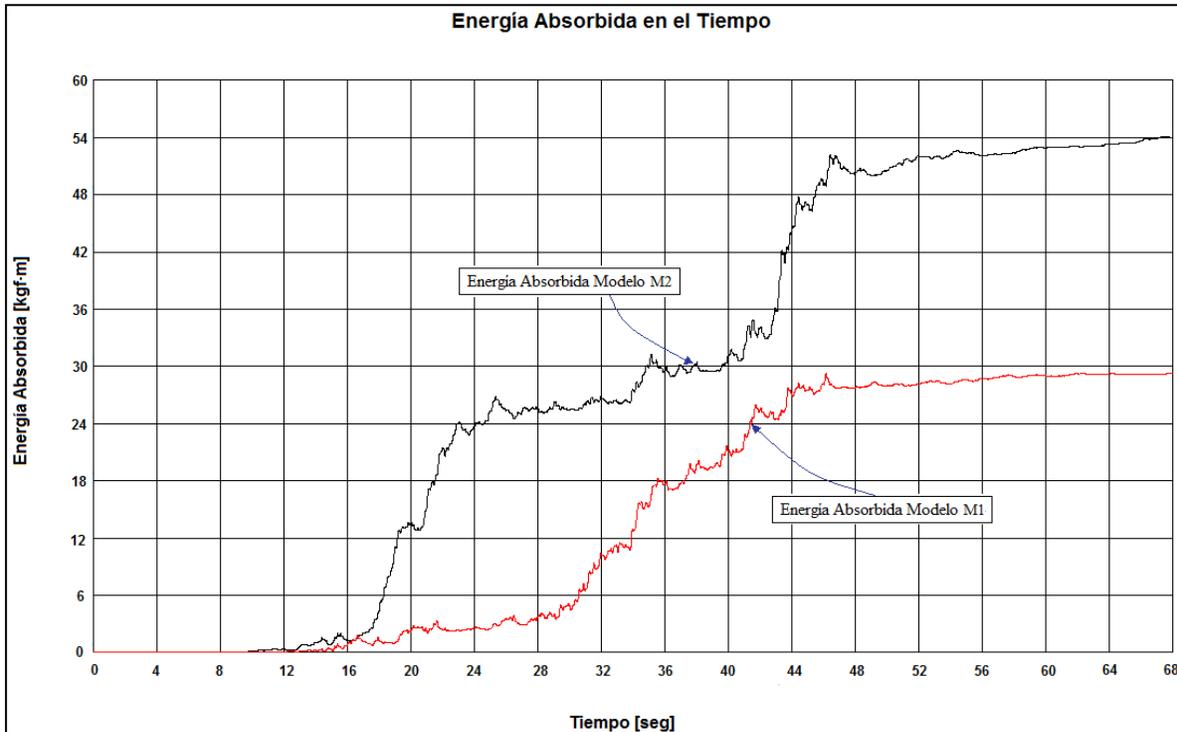


Figura 3.13. Variación de la Energía Absorbida por la estructura en el tiempo.

Se observa que la estructura del Modelo M1 absorbe menos energía que la estructura del Modelo M2, lo que indica que el Modelo M1, el cual presenta conexiones SMA, disipa una mayor cantidad de energía que el modelo con conexiones soldadas.

CAPITULO 4

Desarrollo Experimental

4.1. Mesa Vibradora.

Actualmente las mesas de vibrar son la mejor manera de realizar investigaciones, a una escala manejable, de cómo las acciones sísmicas influyen en las estructuras. Países como Japón y Estados Unidos van a la vanguardia en el desarrollo de estos dispositivos, con lo que han logrado un progreso importante en el mejoramiento de las estructuras ante eventos sísmicos de magnitud considerable. En Miki (ciudad al Norte de Kobe, Japón) se encuentra la mesa vibradora más grande del mundo. Es una mesa de 6 G.D.L. con una superficie de 300 [m²] en la cual es posible realizar ensayos a escala real.

Sin embargo, los países que han desarrollado mesas vibratorias ajustan sus diseños a su realidad sísmica, que no necesariamente coincide con la tipología de sismos presentes en nuestro país.

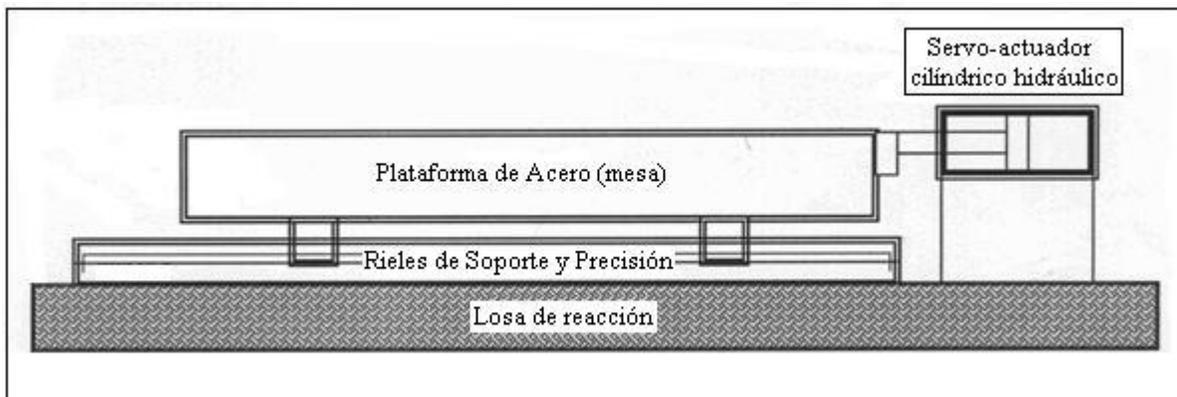
4.1.1. Descripción de la Mesa Vibradora.

La Mesa Vibradora a utilizar permite el movimiento en sólo una dirección. Se encuentra montada en el Laboratorio Experimental de Estructuras, ubicado en el primer piso del Edificio de Ingeniería Civil. La mesa fue diseñada para soportar una carga de 3000 [kgf], con dimensiones de piso de 2,1 [m] x 1,3[m]. En la tabla siguiente se describen las especificaciones básicas de la mesa.

Tabla 4.1. Especificaciones básicas de diseño[3].

Tamaño	2,1 [m] x 1,3 [m]
Peso máximo de diseño	3 [tonf]
Manejo mecánico	Central oleohidráulica, acumulador, servo-válvula controladora, servo-actuador hidráulico de 5 [tonf]
Desplazamiento máximo	$\pm 0,2$ [m]
Aceleración máxima	1,0·g
Velocidad máxima	0,6 [m/s]
Frecuencia de Operación	Hasta 15 [Hz]

El sistema consiste en una base con rieles de apoyo para la mesa y un actuador hidráulico que permite desplazamientos horizontales en la dirección del eje de los rieles. El actuador es un cilindro hidráulico conectado a una servo-válvula de control, la que a su vez está conectada a un sistema de control y éste a un computador que genera las señales, las cuales son convertidas en desplazamientos del actuador. La fuente de energía de dicho actuador consiste en una bomba hidráulica con un motor eléctrico de 60 [HP].



Fig

ura 4.1. Esquema general de la mesa.

Las dimensiones de la mesa son 2,1 [m] x 1,3 [m] x 0,2 [m]. Todas las conexiones son soldadas, con excepción de las conexiones a las guías lineales y al actuador hidráulico, las que se fijan mediante pernos.

Las alas inferiores de los perfiles perimetrales y centrales son de 100 [mm]. La mesa posee una altura de 200 [mm], las almas de los perfiles y atiesadores son de 6 [mm] de espesor. La placa superior posee un espesor de 12 [mm].



Figura 4.2. Mesa Vibradora.

4.2. Construcción de la Estructura.

La construcción de la estructura se realizó en el Taller de la División de Recursos Hídricos del Edificio de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile. Esta labor fue realizada por don Juan Donoso, encargado del taller.



Figura 4.3. Estructura ensayada.

4.2.1. Estructura con Conexión SMA NiTi.

La conexión SMA se basó en la conexión utilizada por José Sepúlveda[12]. Las vigas longitudinales (Figura 3.4, Elevación Eje A), en sus extremos, poseen soldadas a ellas unas placas de acero de dimensiones 50x50x8. Estas a su vez se encuentran en contacto con una placa de dimensiones 110x75x5 soldada a la columna. En esta conexión se utilizaron 4 barras de Nitinol de 2.5 [mm] de diámetro y 180 [mm] de longitud. Para la sujeción de las barras se utilizó un sistema de mordazas, las que se distribuyen en las columnas y en las vigas. En las figuras 4.4 a 4.8 se detallan la conexión, las mordazas y los apoyos a la mesa.

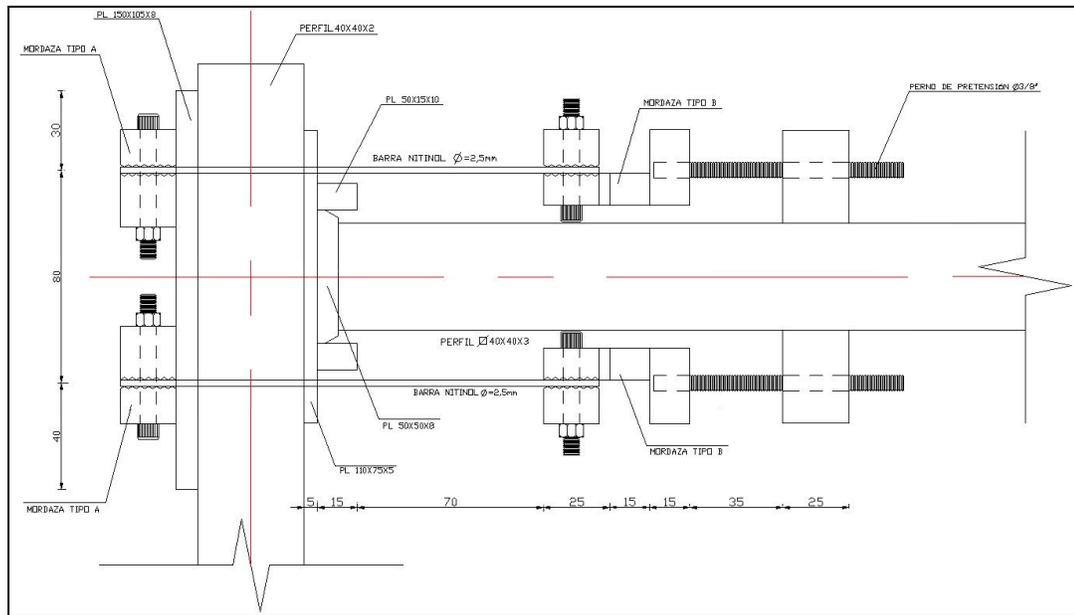


Figura 4.4. Detalle de la Conexión SMA. Vista en Lateral.

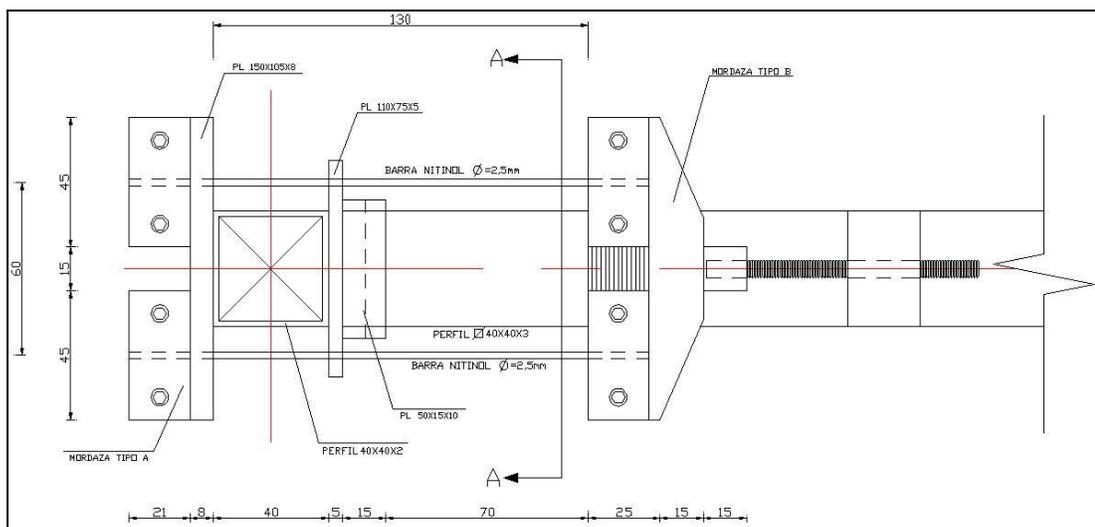


Figura 4.5. Detalle de la Conexión SMA. Vista en Planta.

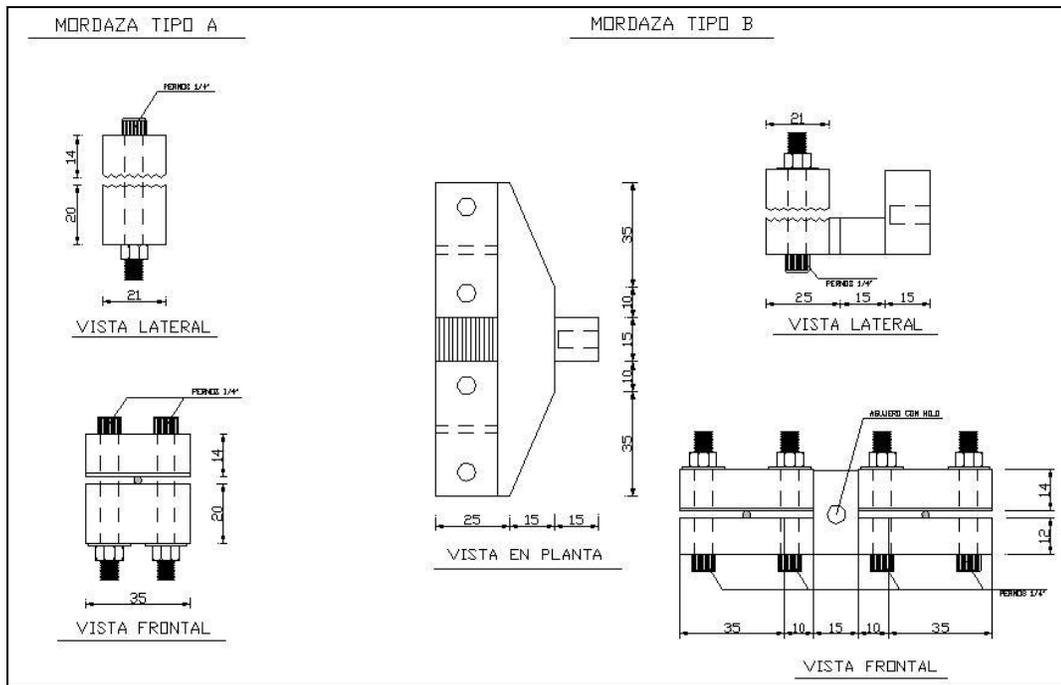


Figura 4.6. Detalle de Mordazas.

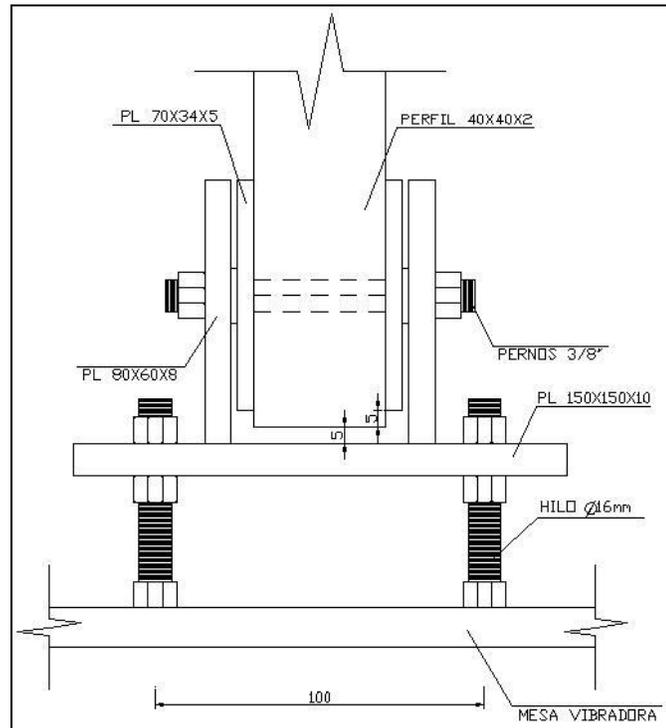


Figura 4.7. Detalle del Apoyo. Vista Lateral.

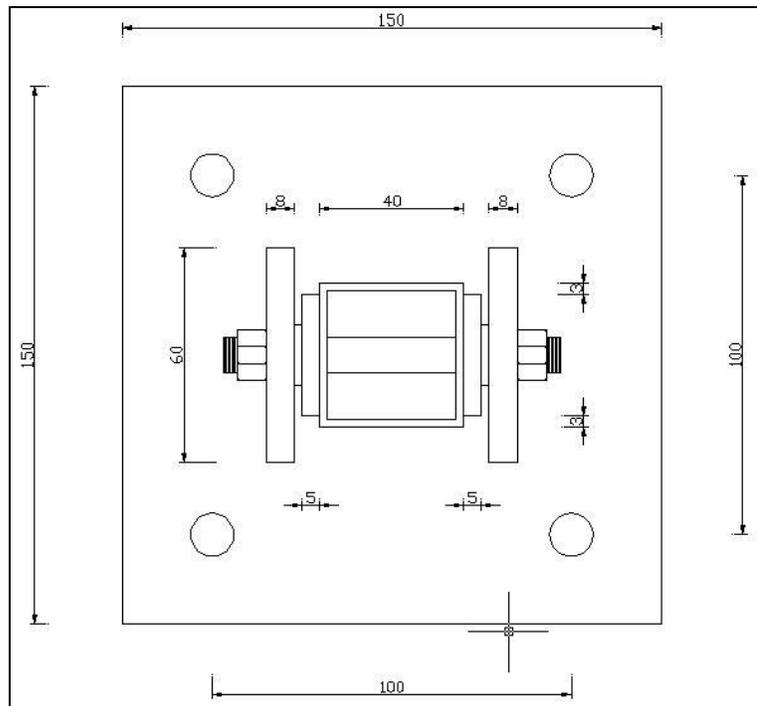


Figura 4.8. Detalle del Apoyo. Vista en Planta.

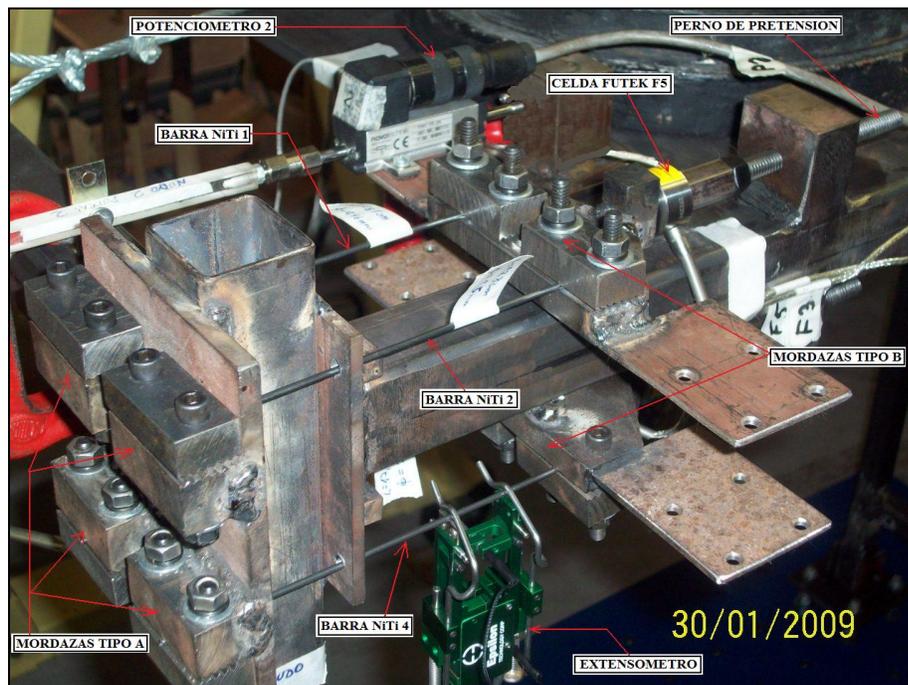


Figura 4.9. Materialización de la conexión del Nudo 2 y su instrumentación.

4.2.2. Estructura con Conexión SMA CuAlBe.

Las uniones viga-columna, conexión 1 y conexión 2 (ver Figura 3.2), se materializaron de la misma manera que la estructura con conexiones SMA NiTi. La diferencia radica en que se reemplazaron las barra de Nitinol de 2,5 [mm] de diámetro por barras de CuAlBe de 3,34 [mm] de diámetro.

4.3. Instrumentación.

Para medir las deformaciones en las barras SMA, se utilizaron potenciómetros Novotechnik TS 25, cuyo rango de medición es de 25 [mm]. Estos se ubicaron en los costados de las mordazas Tipo B. Además se utilizó un extensómetro modelo 3542-050M-020-ST de 50 [mm] de rango. Este se ubicó en la barra N°4 del Nudo 2 (ver figura 4.11 (a) y figura 4.14).

Para la medición de la fuerza en las barras se emplearon ocho celdas de carga circulares de 1000 [lbs], las que se ubicaron de tal manera que midiesen la carga de 2 barras en conjunto, asumiéndose que la carga se repartía uniformemente en cada barra (ver figura 4.11 (b)).

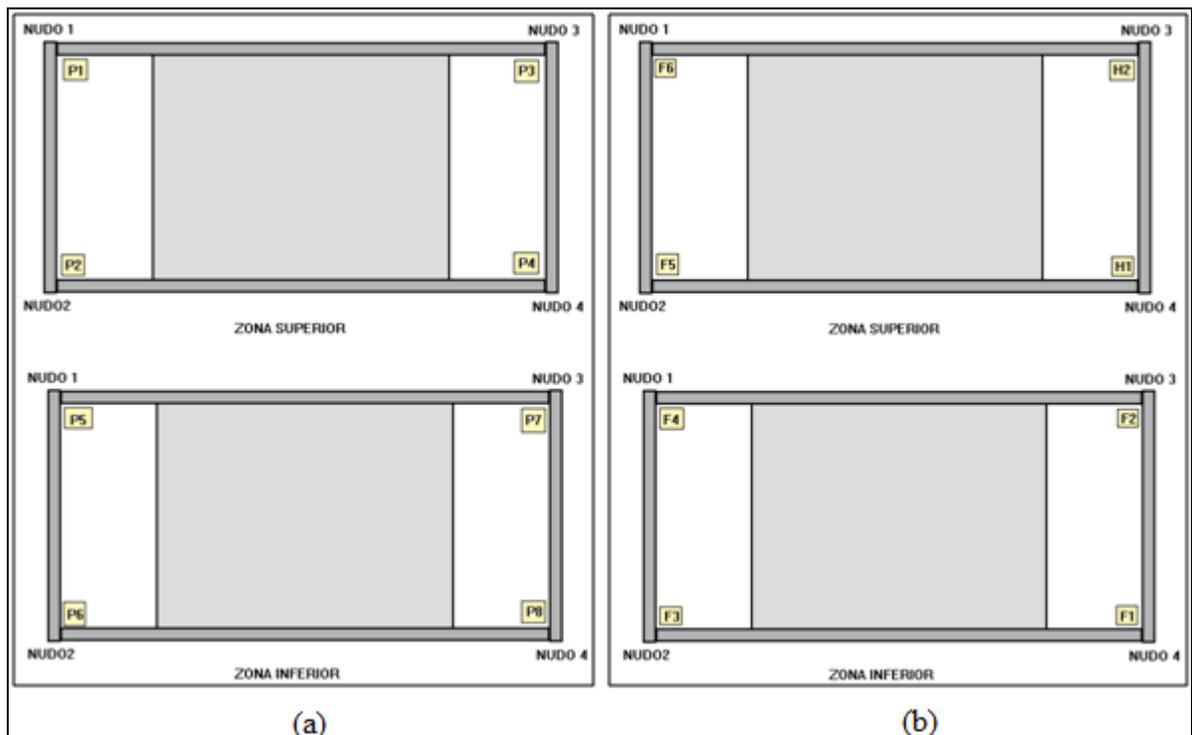


Figura 4.10. Ubicación de la Instrumentación. (a): Potenciómetros.
(b): Celdas de Carga.

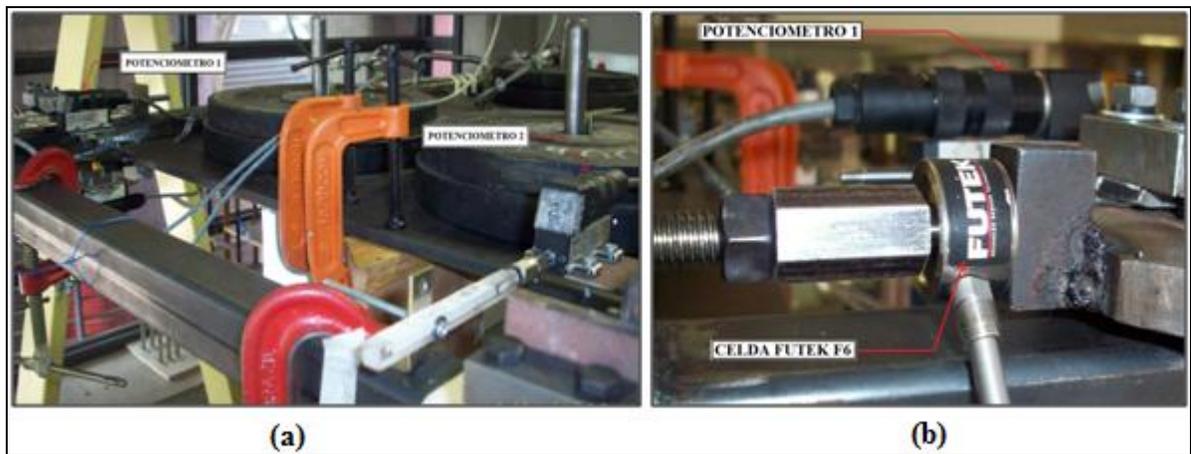


Figura 4.11. (a): Potenciómetros 1 y 2. (b): Celda de Carga F6 y Potenciómetro 1.

Se utilizaron tres acelerómetros Kistler modelo 8304B de 2-g dispuestos como se indican en la figura 4.12. Con éstos se midieron las aceleraciones experimentadas por la estructura durante los ensayos. Con los acelerómetros A2 y A3 (ambos miden la aceleración en el sentido longitudinal) se buscó observar alguna potencial torsión en planta. El acelerómetro A4 mide la aceleración transversal. Se utilizó un cuarto acelerómetro ubicado en la mesa vibradora. Éste corresponde a un acelerómetro FBA11 de 1-g.

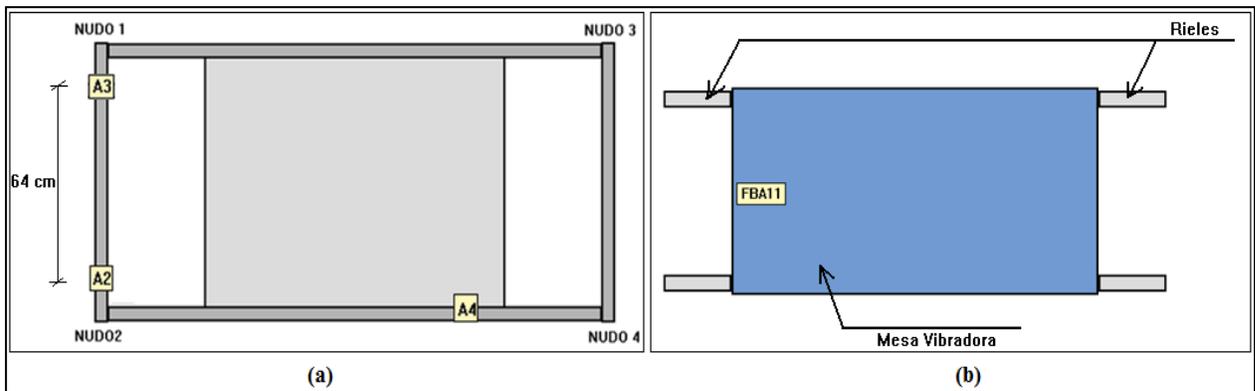


Figura 4.12. (a): Ubicación de los acelerómetros Kistler en la estructura. (b): Ubicación del acelerómetro FBA11 en la mesa vibradora.



Figura 4.13. (a): Acelerómetros Kistler A3 y A4. (b): Acelerómetro FBA11.

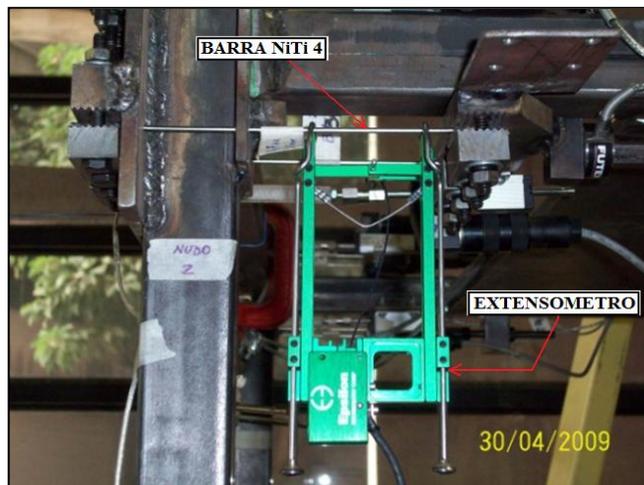


Figura 4.14. Extensómetro 3542-050M-020-ST de 50 [mm] de rango.

Para medir el desplazamiento de techo, se utilizó un sensor laser para los ensayos donde la excitación fue el registro de Llolejo escalado en su amplitud en un 25%, 50% y 75%. Para los siguientes ensayos, donde se excitó la estructura con una señal sinusoidal, se utilizó un potenciómetro cuyo rango de medición es 100 [mm].



Figura 4.15. Potenciómetro utilizado para medición de desplazamientos de techo.

4.3.1. Calibración de los Instrumentos.

Para la utilización de los instrumentos es necesario calibrarlos de acuerdo al rango de fuerzas o deformaciones en el que serán usados. Primero se calibraron las celdas de carga utilizando discos de acero cuyos pesos son conocidos. Estos pesos se fueron apilando uno encima de otro sobre una placa de acero ubicada en la zona superior de la celda de carga (ver figura 4.16) de manera de registrar el voltaje equivalente al peso utilizado. Suponiendo que la celda posee un comportamiento lineal, se buscó la pendiente de la recta que relaciona la carga con el voltaje. Esta pendiente corresponde a la constante de conversión de voltaje a unidad de fuerza, que es la misma para tracción y compresión.



Figura 4.16. (a): Montaje para calibración de celdas de carga. (b): Pesos utilizados para la calibración de las celdas.

En la tabla 4.2 se muestran las constantes de la calibración de las ocho celdas utilizadas en los ensayos.

Tabla 4.2. Constante de calibración de las celdas.

Celda de Carga	Constante [kgf/volt]
Futek F1	92,051
Futek F2	91,690
Futek F3	91,503
Futek F4	92,084
Futek F5	91,745
Futek F6	91,729
Honeywell H1	87,041
Honeywell H2	92,255

Para la calibración de los potenciómetros se utilizó un perno para desplazar el vástago de éste y un dial digital ubicado en extremo opuesto del perno que midió el desplazamiento del vástago. Mediante una tuerca se fue desplazando el perno, el cual hacía mover el pasador del potenciómetro mientras que en el extremo opuesto, el dial medía el desplazamiento equivalente al voltaje registrado (ver figura 4.17).



Figura 4.17. Montaje para calibración de potenciómetros.

Las constantes obtenidas para cada potenciómetro se obtuvieron realizando el mismo procedimiento utilizado para las celdas. Dichas constantes se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4.3. Constante de calibración de los potenciómetros.

Potenciómetro	Constante [mm/volt]
Potenciómetro P1	6,501
Potenciómetro P2	6,302
Potenciómetro P3	6,275
Potenciómetro P4	6,271
Potenciómetro P5	6,552
Potenciómetro P6	6,428
Potenciómetro P7	6,601
Potenciómetro P8	6,244
Potenciómetro PT	22,582

4.4. Ensayos.

Los ensayos se llevaron a cabo en el Laboratorio Experimental de Estructuras de la Universidad de Chile, donde se encuentra montada la mesa vibradora. Se cuenta con dos computadores; uno controla la mesa vibradora, con el cual se le envía la señal con que ésta debe excitar la estructura. El segundo computador se utiliza para la adquisición de datos provenientes de todos los instrumentos utilizados.

4.4.1. Pullback.

Previo a los ensayos sísmicos se llevaron a cabo 7 ensayos tipo Pullback con el fin de obtener las propiedades dinámicas de la estructura y verificar el funcionamiento de la instrumentación. Los Pullback realizados se llevaron a cabo para distintos niveles de pretensión de las barras SMA de Nitinol, fuerza que varió entre los 50 kgf y 200 kgf, incrementándose en 50 kgf con respecto al ensayo previo. Los primeros cuatro ensayos constan de seis Pullback cada uno, mientras que los tres restantes de cinco.

Tabla 4.4. Ensayos tipo Pullback.

Serie de Ensayos	Pretensión [kgf]	Pullback	T _n [seg]	f _n [Hz]	β [%]	Descripción
1	50	P1.1	0.410	2.441	4.6	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P1.2	0.4	2.502	4.7	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P1.3	0.413	2.418	5.2	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P1.4	0.409	2.442	5.4	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P1.5	0.419	2.386	5.2	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P1.6	0.419	2.386	5.2	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		Promedio	0.412	2.429	5.1	
2	100	P2.1	0.410	2.441	4.8	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P2.2	0.401	2.496	5.0	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P2.3	0.400	2.502	4.8	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P2.4	0.404	2.473	5.3	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P2.5	0.399	2.504	5.2	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P2.6	0.401	2.496	4.9	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		Promedio	0.403	2.485	5.0	
3	150	P3.1	0.396	2.528	5.0	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P3.2	0.399	2.504	5.2	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P3.3	0.397	2.516	5.3	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P3.4	0.399	2.503	5.1	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P3.5	0.399	2.504	5.1	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P3.6	0.401	2.491	5.2	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		Promedio	0.398	2.508	5.2	
4	200	P4.1	0.395	2.529	5.9	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P4.2	0.397	2.516	5.5	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P4.3	0.395	2.533	5.6	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P4.4	0.399	2.504	5.9	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P4.5	0.395	2.532	6.2	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P4.6	0.398	2.515	6.2	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		Promedio	0.397	2.522	5.9	
5	200	P5.1	0.393	2.545	5.7	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P5.2	0.399	2.506	5.6	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P5.3	0.402	2.488	5.9	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P5.4	0.401	2.494	5.8	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P5.5	0.401	2.494	6.0	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		Promedio	0.399	2.505	5.8	
6 *	200	P6.1	0.381	2.625	5.6	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P6.2	0.405	2.469	5.5	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P6.3	0.401	2.494	5.8	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado norte.
		P6.4	0.410	2.439	5.6	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		P6.5	0.398	2.513	5.4	Fuerza aplicada a viga transversal. Lado sur.
		Promedio	0.399	2.508	5.6	
7	200	P7.1	0.406	2.463	5.6	Fza. aplicada a plancha de acero. Lado norte.
		P7.2	0.412	2.427	5.8	Fza. aplicada a plancha de acero. Lado norte.
		P7.3	0.411	2.433	5.6	Fza. aplicada a plancha de acero. Lado norte.
		P7.4	0.408	2.451	5.9	Fza. aplicada a plancha de acero. Lado sur.
		P7.5	0.408	2.451	5.6	Fza. aplicada a plancha de acero. Lado sur.
		Promedio	0.409	2.445	5.7	

(*): Esta serie es análoga a la serie 5. Sin embargo, a partir de esta serie se incluye un extensómetro en la barras N°4 del Nudo 2.

Con la realización de estos ensayos fue posible comprobar que los instrumentos estaban registrando correctamente las perturbaciones recibidas por la estructura. Sin embargo, los parámetros obtenidos (frecuencia natural y amortiguamiento) no son representativos de la estructura ensayada, debido a que los pernos de los apoyos se encontraban con un apriete mayor al necesario y no se cumplía la condición de apoyo rotulado. Se producía una disipación friccional adicional a la disipación de energía de las conexiones SMA. En ensayos posteriores se corrigió este problema.

4.4.2. Ensayos Dinámicos.

Se realizaron 25 ensayos dinámicos, utilizando como señal forzante sinusoides de distintas amplitudes y frecuencias, y el registro de Lollo component N10E. También se realizaron 3 nuevos ensayos tipo pullback. Todas las barras de Nitinol se pretensaron hasta una fuerza alrededor de 200 [kgf]. El registro sísmico se escaló al 25%, 50% y 75% de su amplitud. En algunos de los ensayos escalados a un 50%, se observó saturación de ciertas celdas de carga. Para el ensayo al 75%, se observó saturación de las ocho celdas de carga. Durante alguno de estos ensayos, las series de tiempo de las celdas y potenciómetros evidenciaron claramente que las barras de NiTi pierden pretensión después de la sollicitación sísmica. Además, se observó que las curvas de histéresis de las barras SMA se desplazaban durante la sollicitación sísmica (ver figura 5.18). Como una primera explicación a este fenómeno, se pensó que las mordazas no eran efectivas, produciéndose deslizamiento de las barras SMA. Al revisar las mordazas se descubrió fluencia local de ellas en la zona de apoyo de las barras, por lo que la tesis de deslizamiento podía explicar dicho comportamiento.

Ante esto se buscó como solución la incorporación de trozos de limas para fierro con el fin de mejorar el apriete y sujeción, y así evitar el deslizamiento. Éstas se ubicaron entre las mordazas y las barras (ver figura 4.19). Si bien el acero con que están hechas estas herramientas es duro, presenta el problema de ser muy frágil, por lo que se fracturaban fácilmente ante el apriete de los pernos.

Con el fin de evaluar la factibilidad de esta solución antes de continuar con los ensayos, se decidió ensayar una probeta a tracción. Éste se realizó en el IDIEM, de la Universidad de Chile.

La siguiente figura muestra la curva carga-deformación de la probeta ensayada. Dada la continuidad de la curva, se concluye que no hubo deslizamiento del Nitinol, pese a la fractura de las limas debido al apriete de los pernos.

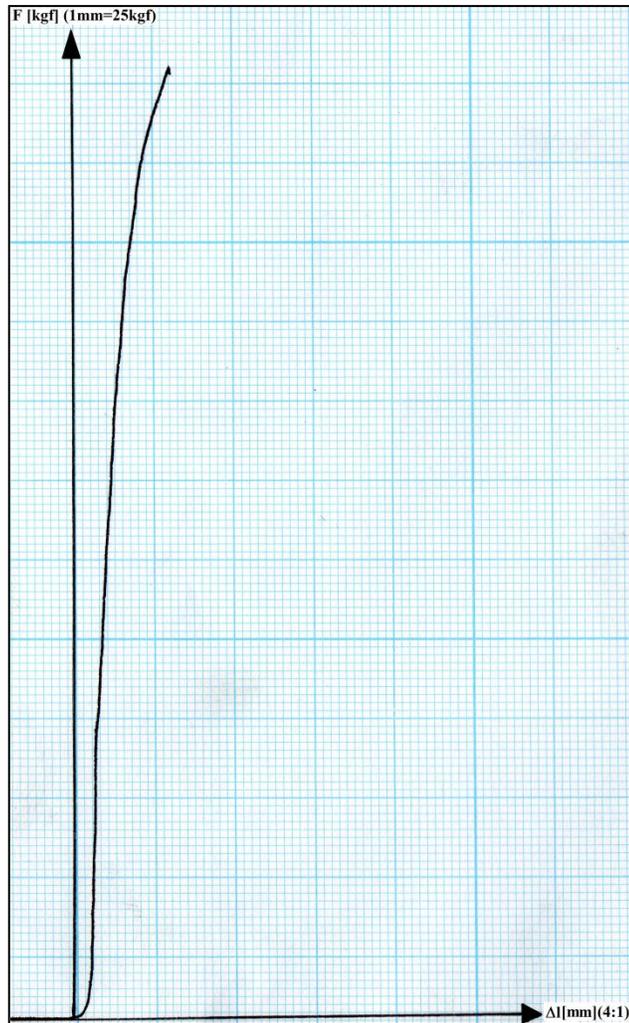


Figura 4.18. Curva Fuerza-Deformación. Mordazas más limas.

Durante el desarrollo de algunos ensayos se escuchó un ruido de golpes entre acero-acero proveniente del techo de la estructura. Estos sonidos se originaban del deslizamiento de los pesos añadidos, que chocaban con las barras dispuestas para su ubicación, los cuales trabajaban como TMD. Esto se eliminó colocando pernos entre los pesos y las barras de sujeción de éstos.

Además en algunos ensayos se observó que ciertos potenciómetros quedaban trabados, pues en la serie de tiempo se aprecia que no tomaron datos en torno a la predeformación inicial. Lo hicieron sólo en un sentido. En el nudo 3 ocurrió en todas las ocasiones.

Luego se realizó un ensayo utilizando el registro de Lollole escalado en un 50%, observándose el mismo comportamiento de los ensayos previos. A simple vista no se advirtió deslizamiento de las barras de Nitinol en las mordazas y dada la simetría en las curvas de los potenciómetros ubicados en el Nudo N^o4, se descartó la tesis de deslizamiento de las barras. El fenómeno que se observa en las curvas de histéresis se asocia más bien al comportamiento del material ante el sismo, comportamiento que se explica en el Capítulo 5.

Al no notar una mejoría en las curvas cíclicas, se decidió usar una señal sinusoidal forzante de 10 segundos de duración. Estos ensayos se realizaron con señales a distintas frecuencias, las que variaron entre 1,5 [Hz] a 2,5 [Hz] para distintos niveles de desplazamientos basales (entre 5 [mm] a 10 [mm]). La ejecución de estos ensayos se realizó soltando las tuercas de los pernos de los apoyos, brindándoles así la condición de rótula correspondiente. Al igual que en los ensayos anteriores, hubo potenciómetros que no trabajaron adecuadamente. Las barras resistieron adecuadamente los ciclos impuestos, sin que se apreciara pérdida en su resistencia. No se observó fractura en las soldaduras.

A partir del ensayo N°11 (ver tabla 4.6) se obtuvieron las propiedades dinámicas de la estructura rotulada en la base. Estos parámetros se calcularon mediante el decremento logarítmico a partir de los datos de los acelerómetros A2 y A3, los cuales se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 4.5. Propiedades dinámicas de la Estructura: NiTi.

Acelerómetro	T_n [seg]	f_n [Hz]	β [%]
A2	0,52	1,922	2,4
A3	0,517	1,934	2,13
Promedio	0.519	1.928	2.27

La siguiente tabla muestra un resumen con los ensayos realizados.

Tabla 4.6. Ensayos Dinámicos.

N°	Ensayo	Señal Forzante	Sujeción de Barras	Descripción
1	Llo25a	Llolleo al 25%	Mordazas	Ensayo fallido. Error en la señal de excitación. Conexión NiTi.
2	Llo25b	Llolleo al 25%	Mordazas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 25%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas (disipador friccional). Conexión NiTi.
3	Llo25c	Llolleo al 25%	Mordazas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 25%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas (disipador friccional). Conexión NiTi.
4	Llo50a	Llolleo al 50%	Mordazas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 50%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas (disipador friccional). Conexión NiTi.
5	Llo50b	Llolleo al 50%	Mordazas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 50%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas (disipador friccional). Conexión NiTi.
6	Llo50c	Llolleo al 50%	Mordazas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 50%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas (disipador friccional). Conexión NiTi.
7	Llo75a	Llolleo al 75%	Mordazas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 75%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas (disipador friccional). Conexión NiTi.
8	Llo50d	Llolleo al 50%	Mordazas más limas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 50%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas (disipador friccional). Conexión NiTi.
9	Reg25_5	Sinusoide a 2,5 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 2,5 [Hz] con un desplazamiento basal de 5mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas (disipador friccional). Conexión NiTi.

Continuación Tabla 4.6.

Nº	Ensayo	Señal Forzante	Sujeción de Barras	Descripción
10	Reg20_5a	Sinusoide a 2,0 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 2,0 [Hz] con un desplazamiento basal de 5mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas (disipador friccional). Conexión NiTi.
11	Pullback	-	Mordazas más limas	Fuerza aplicada a la viga transversal. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión NiTi.
12	Reg20_5b	Sinusoide a 2,0 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 2,5 [Hz] con un desplazamiento basal de 5mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión NiTi.
13	Reg15_8a	Sinusoide a 1,5 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 1,5 [Hz] con un desplazamiento basal de 8mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión NiTi.
14	Reg15_8b	Sinusoide a 1,5 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 1,5 [Hz] con un desplazamiento basal de 8mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión NiTi.
15	Reg15_10a	Sinusoide a 1,5 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 1,5 [Hz] con un desplazamiento basal de 10mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión NiTi.
16	Reg15_5a	Sinusoide a 1,5 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 1,5 [Hz] con un desplazamiento basal de 5mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión NiTi.
17	Llo25d	Llolleo al 25%	Mordazas más limas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 25%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión NiTi.
18	Llo25e	Llolleo al 25%	Mordazas más limas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 25%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión NiTi.
19	Pullback	-	Mordazas más limas	Fuerza aplicada a la viga transversal. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban apretadas. Conexión CuAlBe.
20	Pullback	-	Mordazas más limas	Fuerza aplicada a la viga transversal. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión CuAlBe.
21	Reg15_5b	Sinusoide a 1,5 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 1,5 [Hz] con un desplazamiento basal de 5mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión CuAlBe.
22	Reg15_8c	Sinusoide a 1,5 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 1,5 [Hz] con un desplazamiento basal de 8mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión CuAlBe.
23	Reg15_8d	Sinusoide a 1,5 [Hz]	Mordazas más limas	Se utilizó una señal sinusoidal de 1,5 [Hz] con un desplazamiento basal de 8mm. El registro tiene una duración de 10 segundos. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión CuAlBe.
24	Llo25f	Llolleo al 25%	Mordazas más limas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 25%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión CuAlBe.
25	Llo25g	Llolleo al 25%	Mordazas más limas	Se utilizó el registro de Llolleo escalado en un 25%. Las tuercas del perno de los apoyos se encontraban sueltas. Conexión CuAlBe.

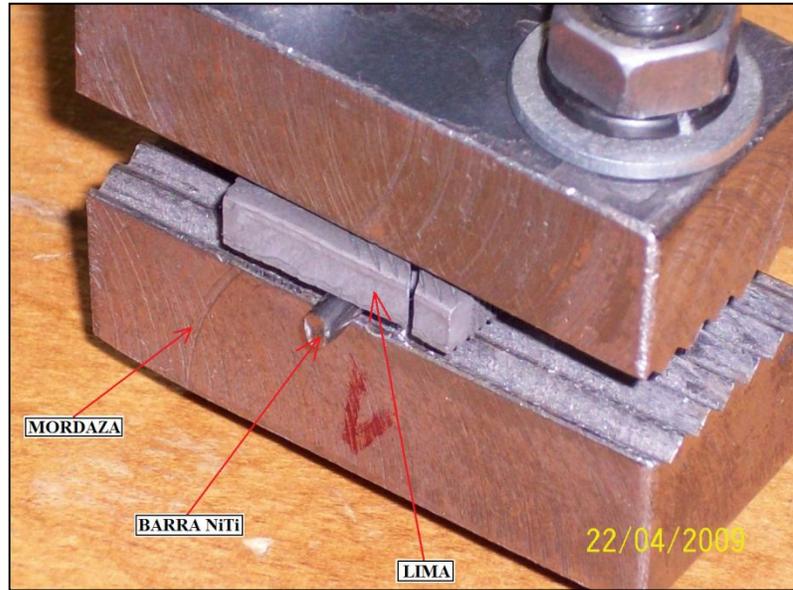


Figura 4.19. Sistema de sujeción Mordazas más Limas.

CAPITULO 5

Análisis de Resultados Experimentales

5.1. Adquisición de Datos.

Dada la instrumentación utilizada, se tiene la siguiente información para realizar el análisis:

- Aceleraciones impuestas por la mesa vibradora.
- Aceleraciones longitudinales en el techo de la estructura.
- Aceleraciones transversales experimentadas por la estructura.
- Deformación de todas las barras de Nitinol medidas con potenciómetros.
- Deformación de una barra de Nitinol mediante un extensómetro.
- Carga aplicada sobre las barras superiores e inferiores de las cuatro conexiones.
- Desplazamiento de techo de la estructura obtenido en algunos casos directamente con la utilización de un potenciómetro o mediante la integración del registro de aceleraciones en otros.

En primer lugar se presenta un análisis detallado del ensayo N°18, por considerarse el más representativo de las condiciones deseadas para este trabajo utilizando el registro de Lolloo a un 25%. Luego se muestra un análisis análogo para Lolloo a un 50% y a un 75% (Ensayos N°5 y N°7 respectivamente). Luego se realiza el mismo análisis utilizando la señal sinusoidal a 1,5 [Hz] de frecuencia y 5[mm] de desplazamiento basal. Un procedimiento análogo se realiza con los ensayos N°23 y N°25, correspondientes a la estructura con conexiones de CuAlBe.

5.2. Conexión SMA de Nitinol.

5.2.1. Registro Lloleo a un 25%.

Los resultados que se muestran a continuación corresponden a los ensayos realizados utilizando como señal forzante el registro de Lloleo escalado en un 25% de su amplitud (Ensayos N° 18). El sistema de sujeción utilizado corresponde a mordazas más limas. Las tuercas de los pernos de los apoyos se encontraban sueltas, por lo que la estructura se encontraba rotulada en la base.

Durante este ensayo los acelerómetros A2 y A3 miden las aceleraciones de la estructura en el sentido de la excitación. Dada la ubicación de estos instrumentos, fueron útiles, además, para verificar una potencial torsión en planta, la cual no fue observada, como se muestra en la figura 5.1, ya que ambos registros de aceleraciones se mantienen prácticamente superpuestos.

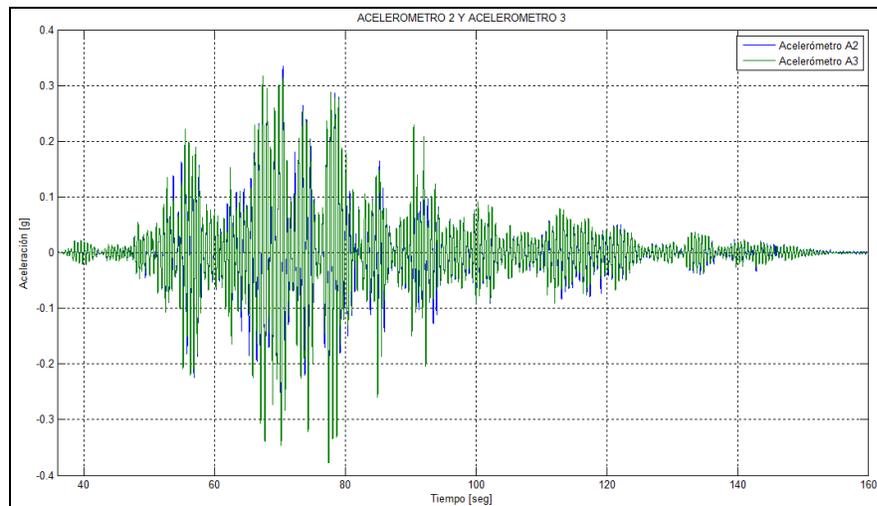


Figura 5.1. Acelerómetros A2 y A3.

La figura 5.2 muestra el registro del Acelerómetro A4, que se utilizó para medir la aceleración transversal de la estructura. Como se observa, se obtuvieron bajas magnitudes comparadas con las alcanzadas por los acelerómetros A3 y A4. Dado esto se podría decir que no hubo torsión, sin embargo no es tan directo concluir, puesto que en este ensayo sólo se constaba con un acelerómetro para medir la aceleración trasversal.

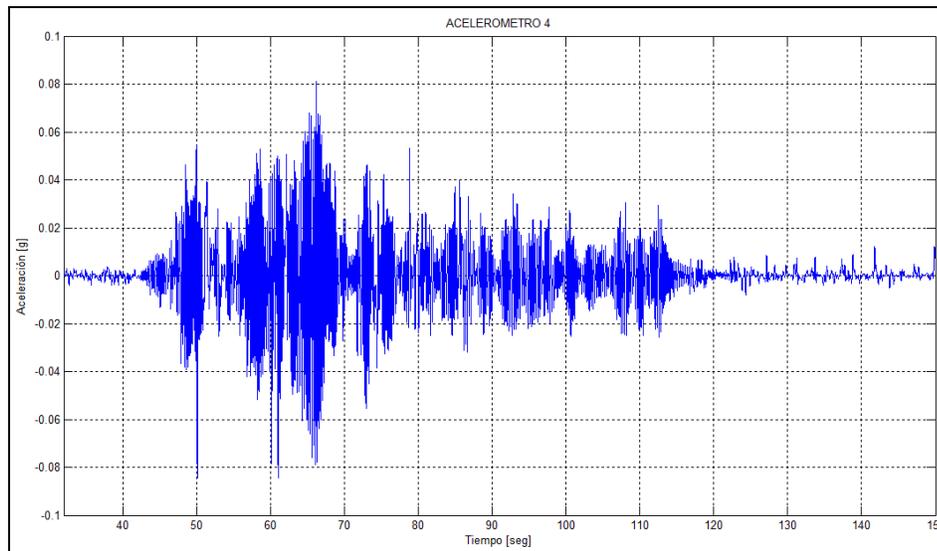


Figura 5.2. Acelerómetro A4.

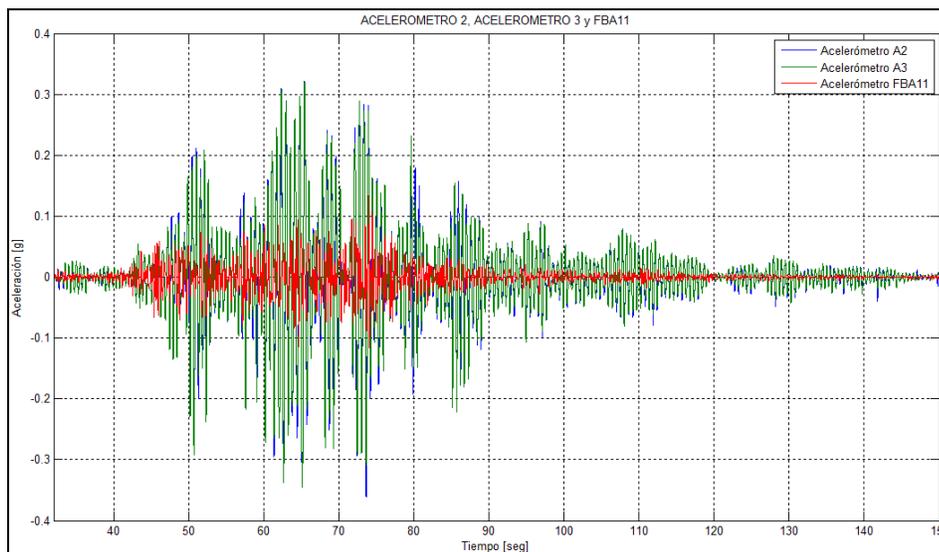


Figura 5.3. Acelerómetros FBA11, A2 y A3.

En la figura 5.3 se ilustra una comparación entre la aceleración basal, registrada por el acelerómetro FBA11, y la aceleración de techo. Se observa amplificación de la aceleración. Se obtuvo un peak de 0,14g para la aceleración basal y un peak de 0,35g para la aceleración de techo.

Como se ve en la figura 5.4, parte insignificante de la tensión inicial se pierde al finalizar el ensayo. De una fuerza inicial de 197 [kgf] para las barras superiores se llegó a una fuerza de 191 [kgf] al finalizar (pérdida de 6 [kgf] de tensión), mientras que las barras inferiores comenzaron el ciclo con 208 [kgf] y quedaron con una fuerza de 205 [kgf] al finalizar el ensayo. Se observa que la carga máxima en las barras inferiores (Celda Futek F1) es mayor que en las barras superiores, casi 400 [kgf] versus 350 [kgf] (cada barra superior e inferior toma la mitad de esta fuerza).

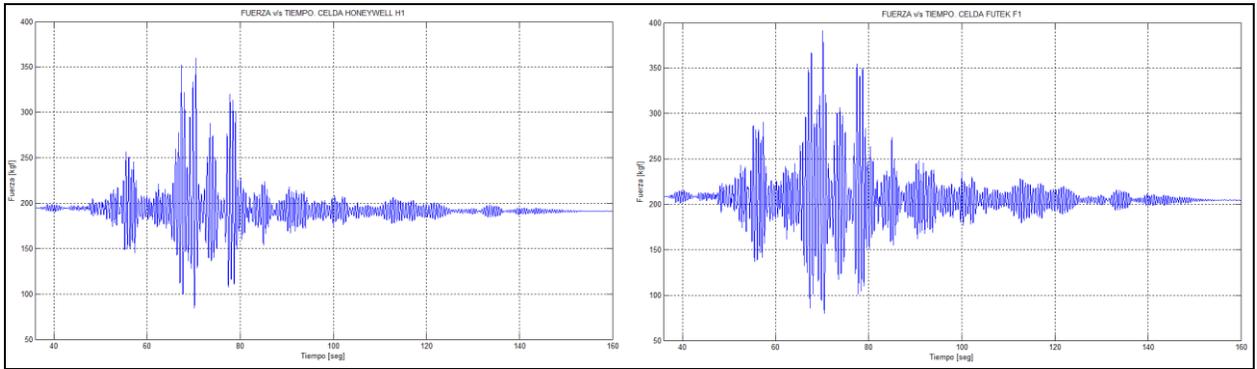


Figura 5.4. Variación de la fuerza en las barras en el tiempo. Conexión Nudo 4.

No se observaron deformaciones remanentes significativas en [mm] por las barras inferiores, lo que se aprecia en la figura 5.5, donde la deformación inicial (correspondiente a la carga de pretensión) es prácticamente igual a la deformación obtenida al finalizar el ensayo. Las barras superiores quedaron con una deformación de 0,28 [mm], 0,04 [debajo de la deformación inicial]. Esta diferencia se asocia a la pérdida de pretensión, la cual fue más notoria en las barras superiores que en las inferiores.

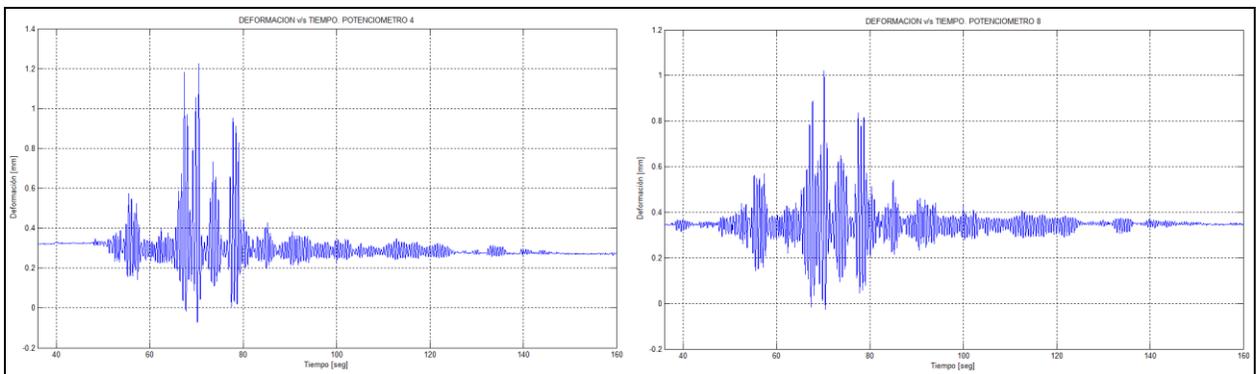


Figura 5.5. Variación de la Deformación en el tiempo. Conexión Nudo 4.

Durante este ensayo se instrumentó la Barra N°4 del Nudo N°4 con un extensómetro cuyo rango de medición es de 50 [mm]. La curva tensión-deformación obtenida utilizando este instrumento (ver figura 5.6) presenta una histéresis similar a la mostrada en la figura 5.7 (obtenida con el potenciómetro). Se obtuvo una tensión máxima de 400 [MPa] para una deformación unitaria de 0,75% y una tensión mínima de 80 [MPa] correspondiente a una deformación de 0,04%.

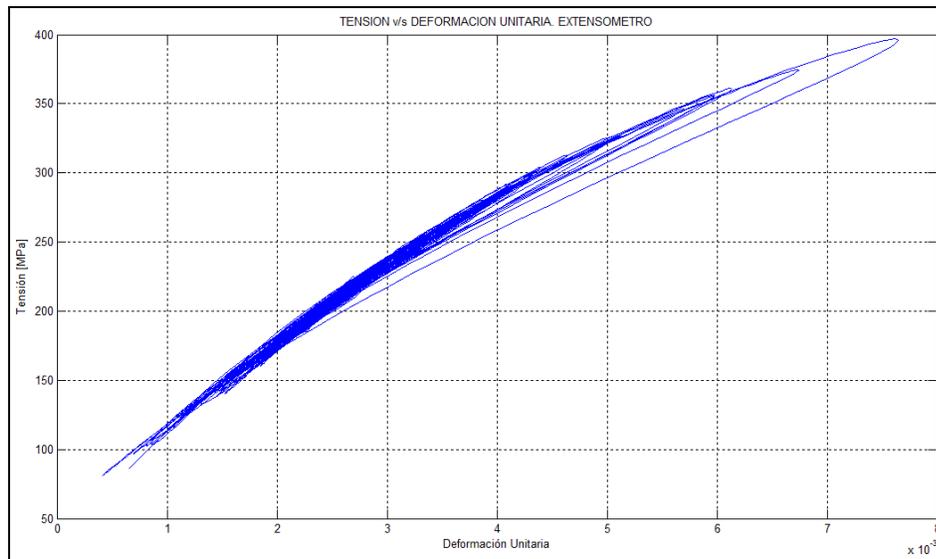


Figura 5.6. Curva Tensión Deformación. Barra 4, Nudo 4.

Dado que sólo se conoce la pretensión inicial de las barras (alrededor de 100 kgf por barra) y no su predeformación, es necesario conocer de manera aproximada la deformación inicial producto de la pretensión. Para ello se asumió que para ese nivel de carga y temperatura, el material se comporta dentro del rango elástico lineal, por lo que la predeformación en cada barra se calculó con la ley de Hooke con un módulo de elasticidad de 80 [GPa]. Esto se repite para todos los ensayos.

La Figura 5.7 muestra el ciclo de histéresis de la conexión del Nudo 4 a partir de las deformaciones obtenidas con los potenciómetros.

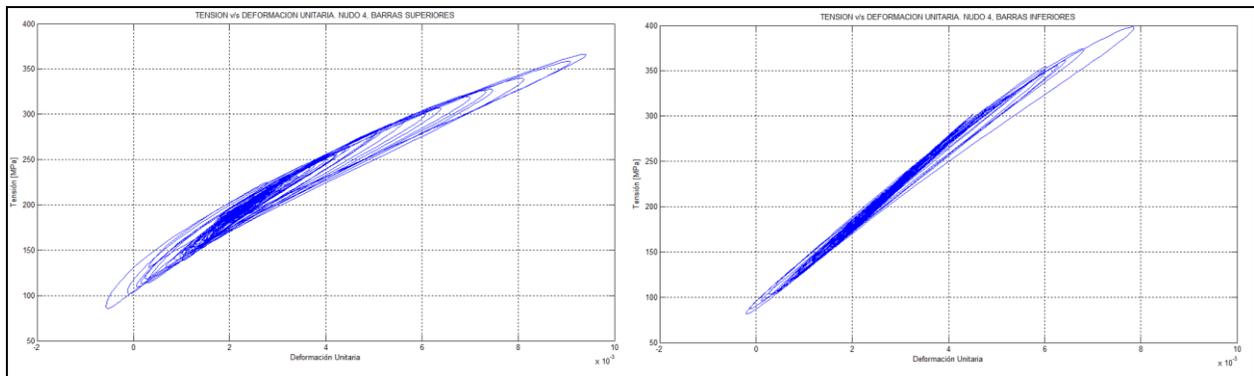


Figura 5.7. Curva Tensión-Deformación.

Se observa disipación de energía mediante la histéresis de las barras. En las barras superiores se obtuvo una deformación unitaria máxima de 0,93% para una tensión de 370 [MPa] y una deformación mínima de -0,05% correspondiente a una tensión de 80 [MPa]. En las barras inferiores los valores extremos fueron 0,8% y 400 [MPa] para la deformación unitaria máxima y tensión máxima respectivamente. La deformación mínima fue de -0.02% para una tensión de 80 [MPa]. Se observa que las deformaciones mínimas resultaron negativas, lo que indica que las

barras pudieron haberse flexionado levemente, no comprimido, pues las tensiones mínimas son positivas.

En el resto de los nudos se obtuvieron resultados similares.

Al comparar con las curvas obtenidas en el Ensayo N°2 (ver anexo A), se aprecia que prácticamente no hubo histéresis, manteniéndose el material en el rango lineal. En ese caso la disipación de energía ocurrió principalmente por fricción en los apoyos, lo que explica el comportamiento lineal de las barras.

En la figura 5.8 se muestra una comparación entre el desplazamiento de la mesa, que corresponde a la señal de entrada de ella, y el desplazamiento de techo de la estructura. Se observa un máximo de 2,4 [cm] en la mesa, correspondiente al 50% del desplazamiento máximo absoluto experimentado por la estructura; como esto no ocurre simultáneamente, el desplazamiento relativo máximo es mayor que esa diferencia. La figura 5.9 muestra el desplazamiento relativo.

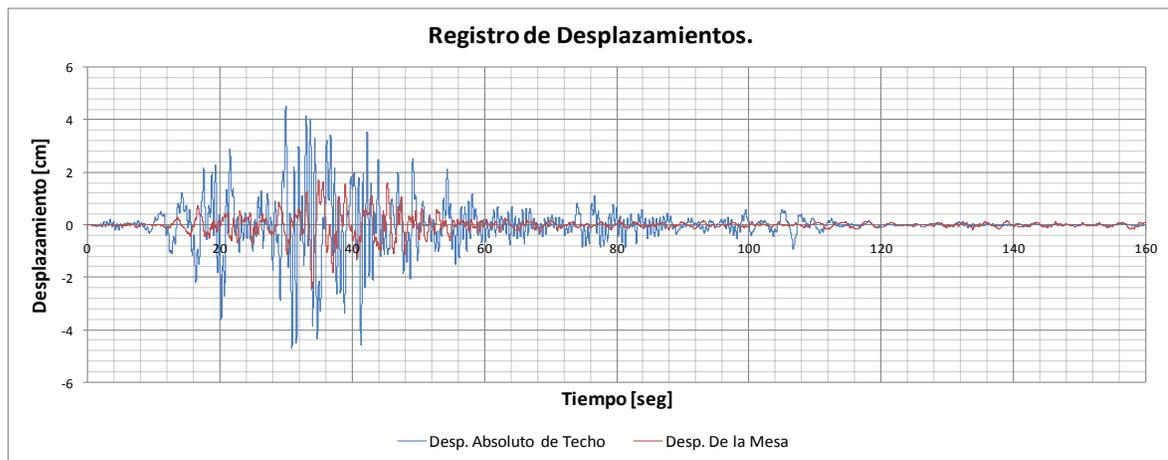


Figura 5.8. Registro de Desplazamientos⁽¹⁾.

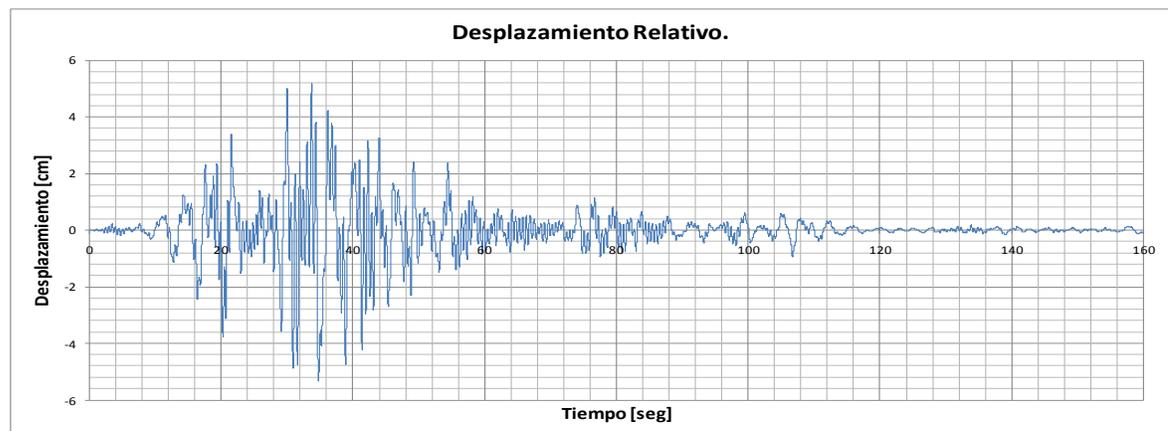


Figura 5.9. Desplazamiento Relativo.

⁽¹⁾ Los desplazamientos se obtuvieron integrando el registro de aceleraciones de los acelerómetros FBA11 y A2 para el desplazamiento de la mesa y desplazamiento absoluto respectivamente.

En la figura 5.10 se ilustra el corte basal versus el desplazamiento relativo del techo de la estructura. Se alcanza un corte máximo de 0,67 [kN], el cual se calculó como el producto de la masa de la estructura por la aceleración absoluta experimentada por ésta.

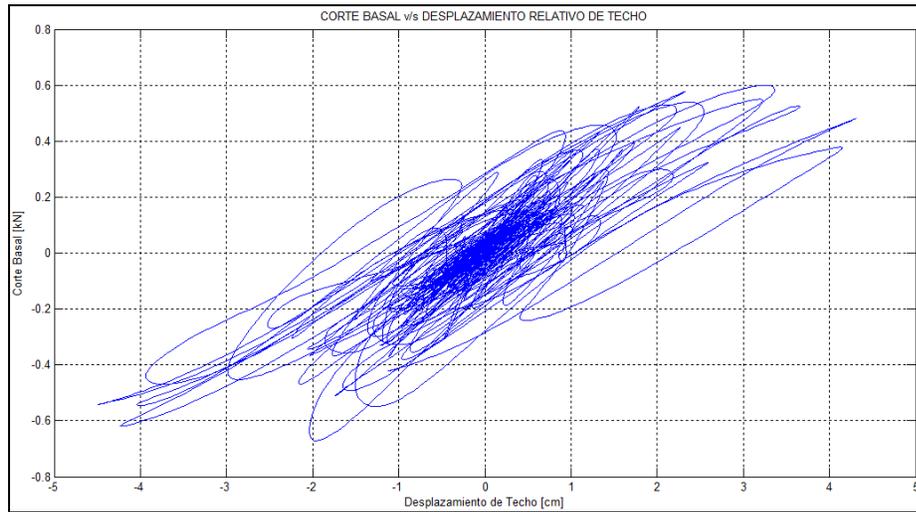


Figura 5.10. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.

5.2.2. Registro Llolleo a un 50%.

Los resultados expuestos a continuación corresponden a los ensayos realizados utilizando como señal forzante el registro de Llolleo escalado a un 50% de su amplitud (Ensayo N° 5). El sistema de sujeción utilizado corresponde solamente a las mordazas. Las tuercas de los pernos de los apoyos se encontraban apretadas, por lo que existía un disipador friccional adicional.

Para medir la aceleración del techo de la estructura se utilizó el acelerómetro A2, donde se obtuvo un peak de 0,45-g. La aceleración basal se midió con el acelerómetro FBA11, obteniéndose un máximo de 0,26-g. La siguiente figura muestra la aceleración de techo y aceleración basal, donde se observa amplificación en las aceleraciones.

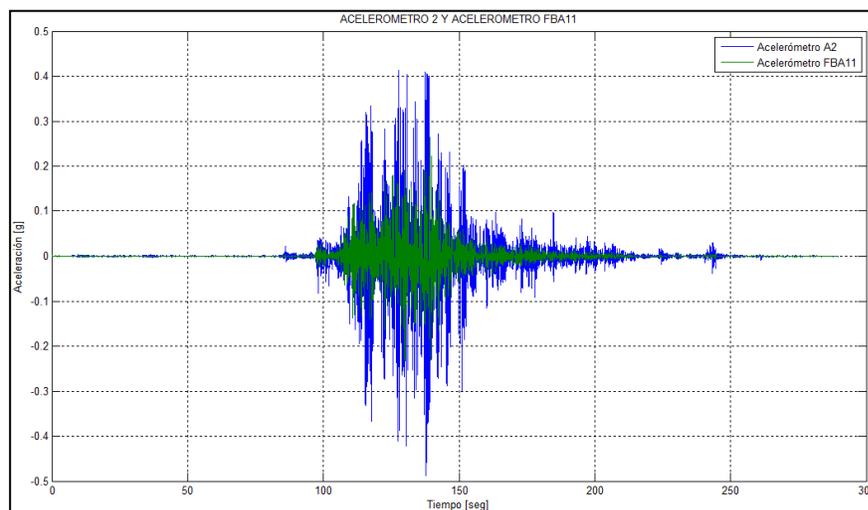


Figura 5.11. Acelerómetros A2 y FBA11.

Para medir la aceleración transversal se utilizaron los acelerómetros A3 y A4, ubicados entre los nudos 2 y 4 separados a una distancia de 70 [cm]. Se aprecia que ambos acelerómetros registraron similares y bajas aceleraciones, lo que indica que no hubo torsión en planta.

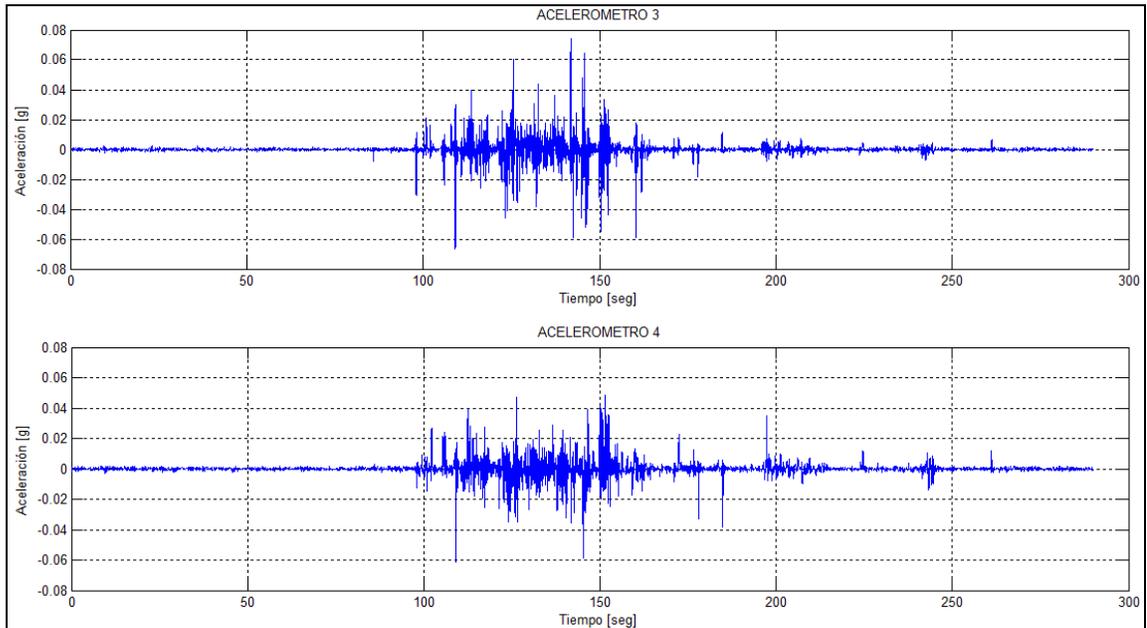


Figura 5.12. Acelerómetros A3 y A4.

En este caso hubo pérdida significativa de pretensión, como se muestra en la figura 5.13, pasando de una pretensión inicial de 202,5 [kgf] a una fuerza final de 167,4 [kgf] en las barras superiores y de 209,2 [kgf] a 190,7 [kgf] finales para las barras inferiores. Al observar la figura 5.14, queda en evidencia que esta pérdida de pretensión ocurre aproximadamente a los 140 [seg], momento en que las barras toman la mayor carga, esto es 500 [kgf]. Considerando que se utilizaron barras de 2,5 [mm] de diámetro, se tiene una tensión máxima en las barras de aproximadamente 510 [MPa] valor que es del orden del esfuerzo de transformación de fase del Nitinol, por lo tanto esta pérdida de pretensión se asocia a que el material pudo haber llegado a su límite elástico.

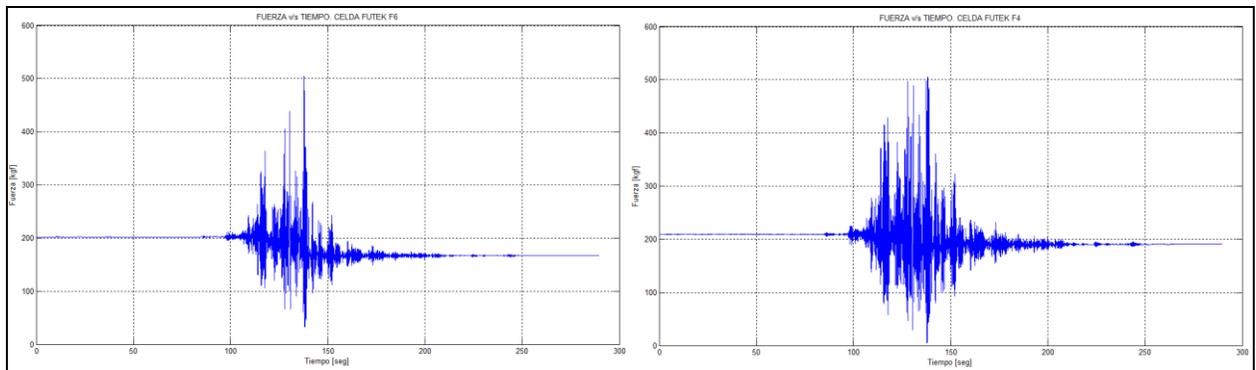


Figura 5.13. Celdas de carga del Nudo 1 en el tiempo.

Las deformaciones remanentes son poco significativas (ver figura 5.14). En las barras superiores la deformación inicial fue de 0,35 [mm] quedando en 0,37 [mm] tras realizado el ensayo. Para

las barras inferiores, la deformación inicial correspondió a 0,33 [mm] quedando con una deformación final de 0,38 [mm] luego de realizada la prueba.

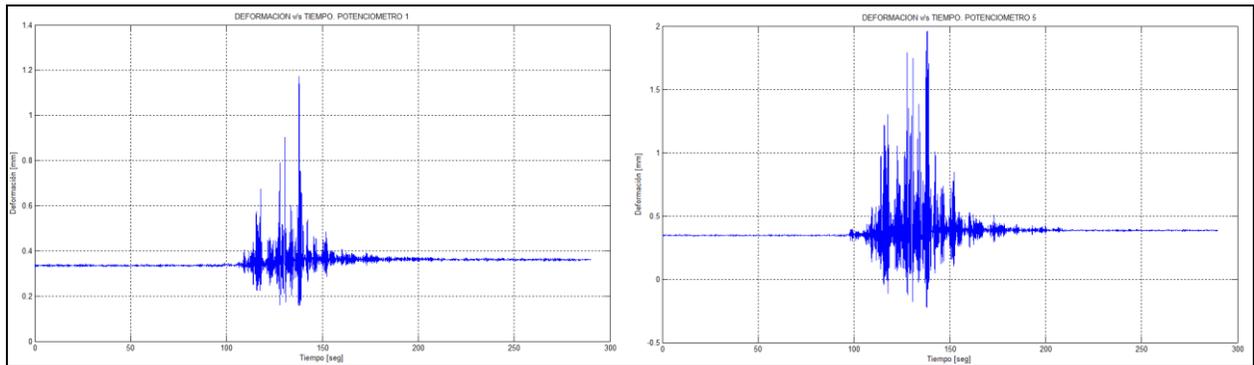


Figura 5.14. Potenciómetros del Nudo 1 en el tiempo.

En este ensayo se instrumentó la barra N°4 del nudo 2 con un extensómetro cuyo rango de medición es de 25 [mm]. La figura 5.15 ilustra la curva tensión-deformación obtenida, donde la barra muestra un comportamiento en el rango elástico no lineal. Se obtuvo una tensión máxima de 470 [MPa] para una deformación unitaria de 0,38% y una tensión mínima de 35 [MPa] correspondientes a una deformación de 0,01%. Pese a que se trata de nudos distintos, los valores de tensión obtenidos son del orden a los mostrados en la figura 5.16, no así las deformaciones, que son mucho menores. Pareciera que la deformación en las barras no ocurre de forma uniforme, por lo cual en ensayos posteriores se usó un extensómetro de 50 [mm], con el cual se obtuvo resultados más comparables en algunos casos.

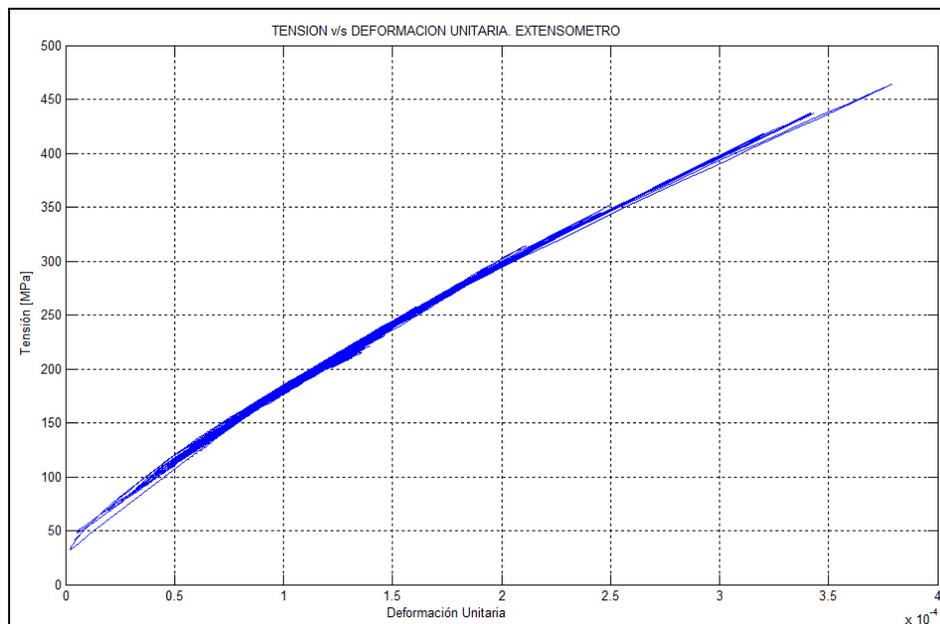


Figura 5.15. Tensión-Deformación. Barra 4, Nudo 2.

La figura 5.16 muestra la curva de histéresis desarrollada por la conexión del nudo 1. Se aprecia que los ciclos obtenidos son más amplios en comparación a la figura 5.15, así como también comienza a aparecer un deslizamiento en las curvas, especialmente en las barras superiores. En

éstas, la tensión máxima fue de 515 [MPa] correspondientes a una deformación unitaria de 0,9%, mientras que en las barras inferiores la tensión máxima fue de 520 [MPa] para una deformación de 1,5%. La tensión y deformación mínima fue de 35,7 [MPa] y 0,11% para las barras superiores respectivamente y de 6,2 [MPa] y -0,17% en las barras inferiores.

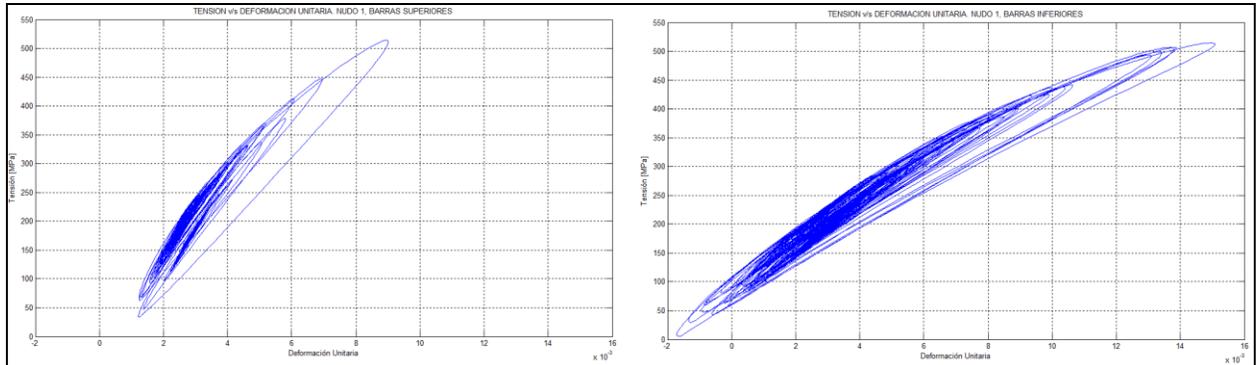


Figura 5.16. Curva Tensión-Deformación.

La figura 5.17 corresponde a la histéresis experimentada por las barras superiores de la conexión del nudo 3. En ella se advierten dos corrimientos horizontales de los ciclos, sin embargo, no se observa una disminución sustancial en la rigidez del ciclo de las barras. Este corrimiento se explica por deformaciones remanentes que van experimentando las barras a medida que son sometidas al sismo.

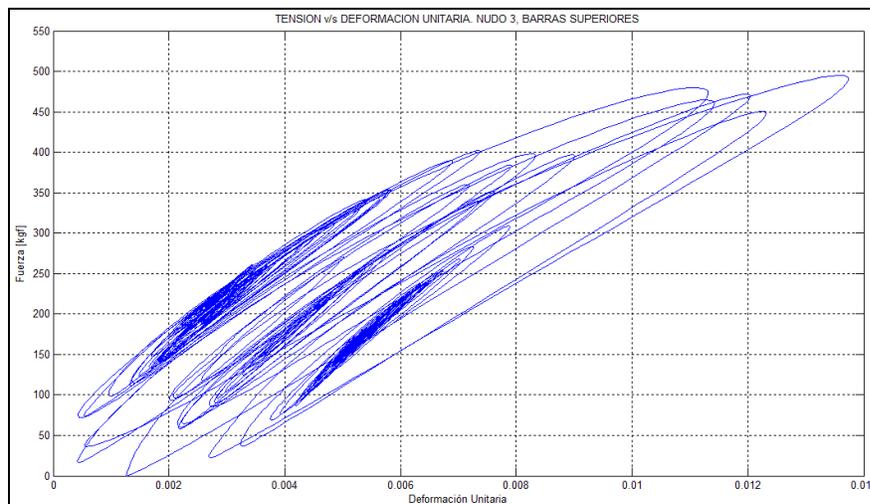


Figura 5.17. Curva Tensión-Deformación. Barras superiores, Nudo 3.

Se observa en la figura 5.18 que las deformaciones ocurren en torno a tres puntos distintos. Primero en torno a la deformación inicial de 0,37 [mm]. Luego, entre aproximadamente los 127[seg] y 138 [seg], la deformación oscila en torno a los 0,55 [mm] y finalmente las deformaciones están en torno a 0,7 [mm]. Esto explica los tres ciclos que se ven en la figura 5.18.

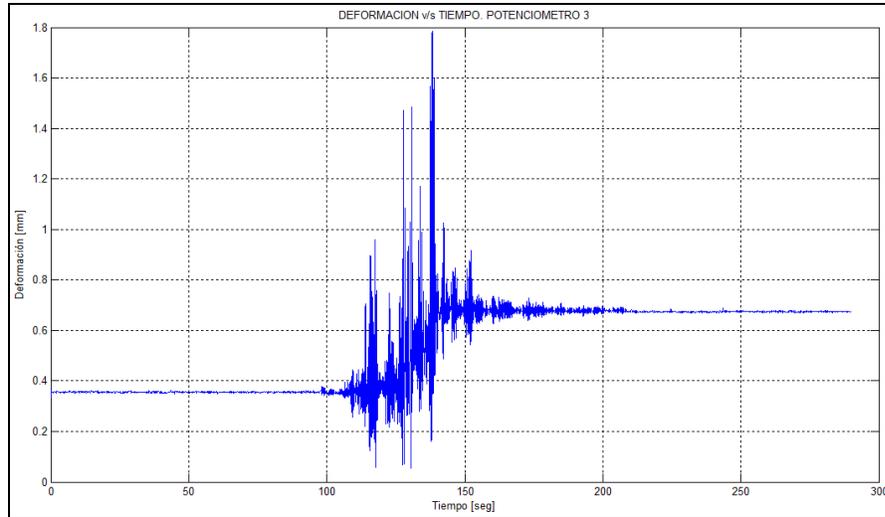


Figura 5.18. Potenciómetro 3 en el tiempo.

Este fenómeno podría explicarse debido a la característica que posee el registro de Lollo, con peaks consecutivos de alta frecuencia. Por lo tanto, es posible que las barras no alcanzaran a recuperar su forma inicial de un peak a otro quedando con deformaciones remanentes que se traducen en curvas histeréticas cuyos ciclos se inician en puntos distintos. Sin embargo, al finalizar los ensayos las barras prácticamente no han cambiado su longitud ni muestran signos de estricción, habiendo recuperado su forma original.

En la figura 5.19 se muestran los desplazamientos de la mesa y el techo de la estructura. Se observa un peak de 5 [cm] de la mesa versus 11[cm] de desplazamiento experimentado por la estructura.

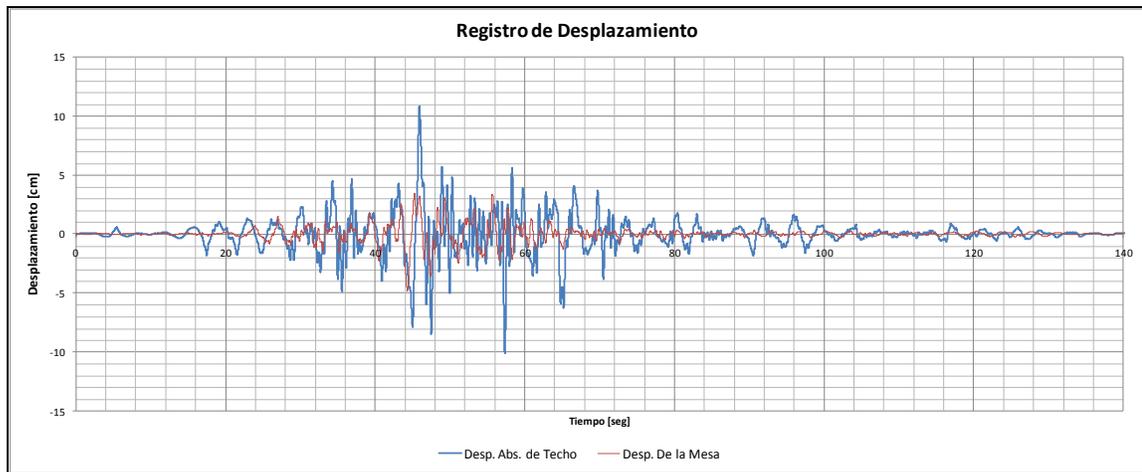


Figura 5.19. Registro de Desplazamientos.

A partir de esos registros se obtiene la figura 5.20, que corresponde al desplazamiento relativo del techo de la estructura.

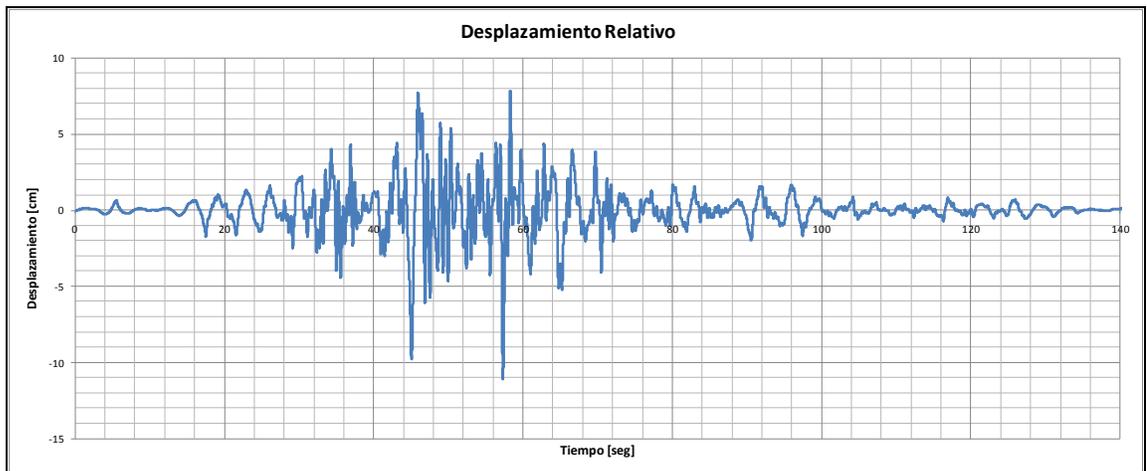


Figura 5.20. Desplazamiento Relativo.

La figura 5.21 muestra el corte basal versus el desplazamiento relativo de techo. El corte máximo es de aproximadamente 0,8 [kN]

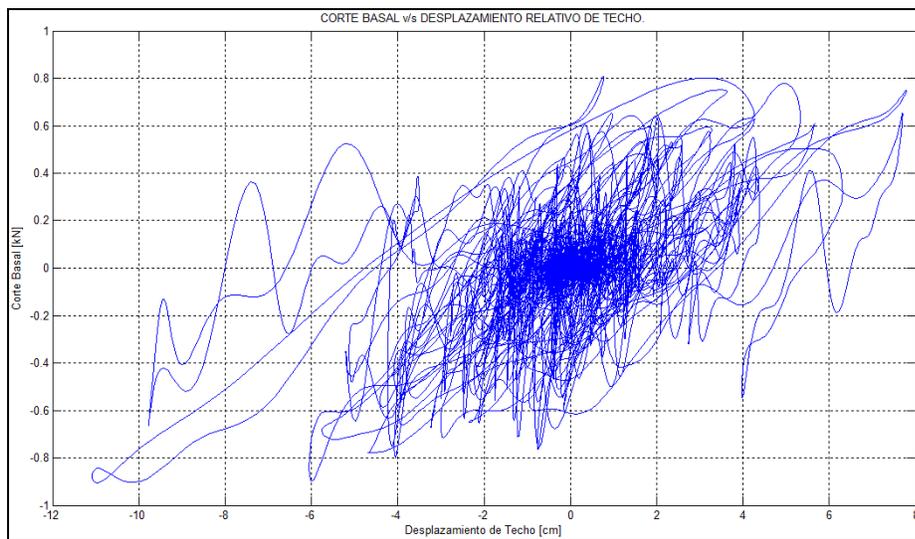


Figura 5.21. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.

5.2.3. Registro Lolloe a un 75%.

En este ensayo se utilizó como señal forzante el registro de Lloleo escalado a un 75% de su amplitud (Ensayo N°7). Se observó que las ocho celdas de carga utilizadas presentaron saturación, sin embargo, se decidió incluir los resultados de este ensayo filtrando las señales. El sistema de sujeción utilizado corresponde solamente a las mordazas. Las tuercas de los pernos de los apoyos se encontraban apretadas, por lo que existe un disipador friccional adicional. Entonces las curvas de histéresis de las figuras 5.28 y 5.29 incluyen ambas disipaciones: la de histéresis de las barras y la de fricción en los apoyos.

No se muestra la aceleración longitudinal de techo, ya que el acelerómetro utilizado para medirla (acelerómetro A2) no funcionó.

La figura 5.22 ilustra la aceleración basal, registrada por el acelerómetro FBA11, donde se observa una aceleración máxima de 0,4-g

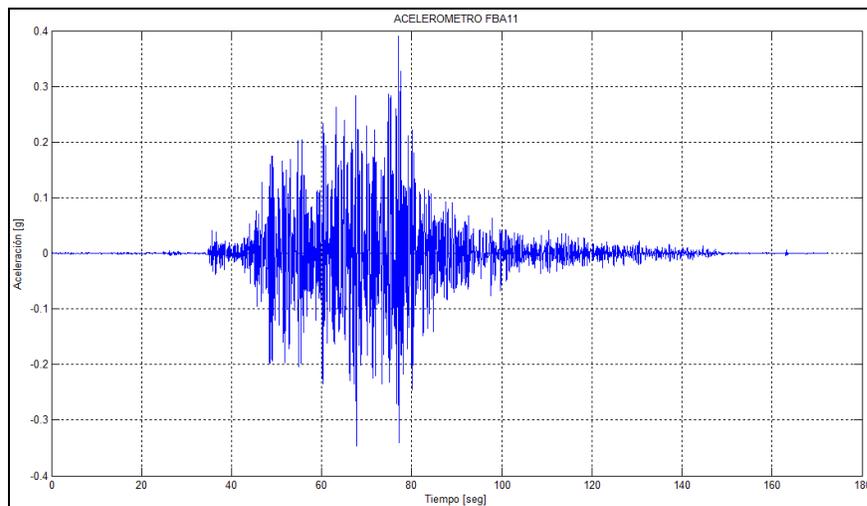


Figura 5.22. Acelerómetro FBA11.

Se utilizaron los acelerómetros A3 y A4, entre los nudos 2 y 4, para medir la aceleración transversal en la estructura y chequear una posible torsión en planta. El registro de estos instrumentos se aprecia en la figura 5.24, donde dada la similitud entre ellos y la magnitud de las aceleraciones, es posible aseverar la inexistencia de torsión.

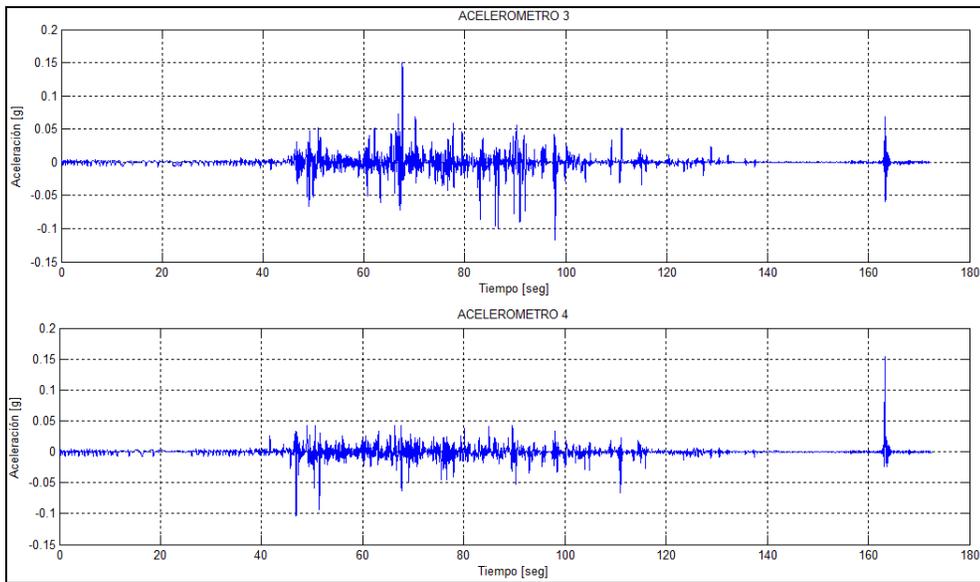


Figura 5.23. Acelerómetros A3 y A4.

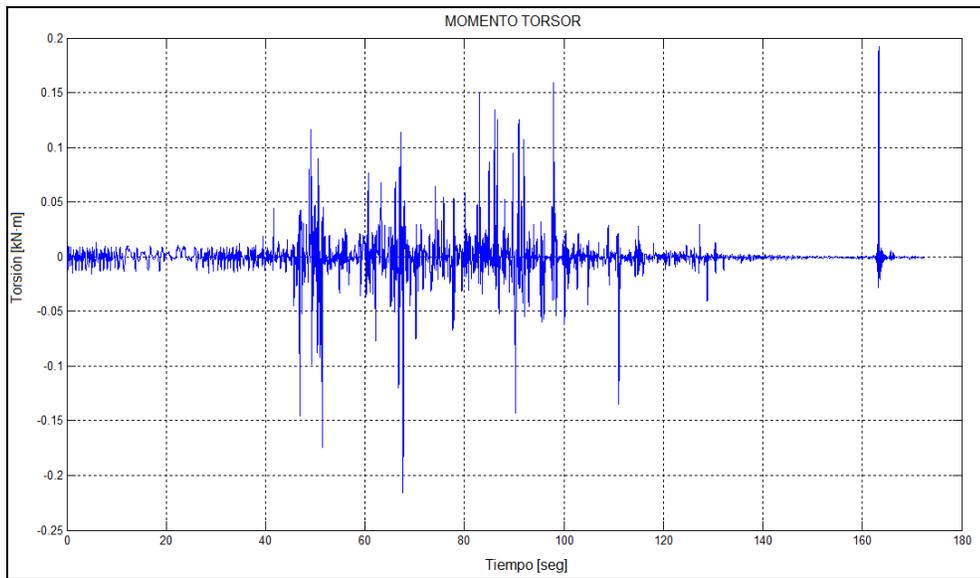


Figura 5.24. Momento de Torsión.

Si bien en la figura 5.23 se observan peaks que alcanzan los 0,15·g y 0,1·g en los acelerómetros A3 y A4 respectivamente, éstos se asocian a golpes y no representan aceleraciones experimentadas por la estructura en el sentido transversal. En la figura 5.24 se observa el momento de torsión calculado a partir de los acelerómetros A3 y A4. Se advierte que en términos generales la magnitud del momento es baja, excepto ciertos peaks que sobrepasan los 0,2 [kN·m] producto de golpes en la estructura durante la ejecución del ensayo.

En la figura 5.25 se muestra la diferencia entre la señal original de las celdas de carga y la filtrada. Se observa que la extrapolación realizada por el filtro en la zona de saturación es despreciable.

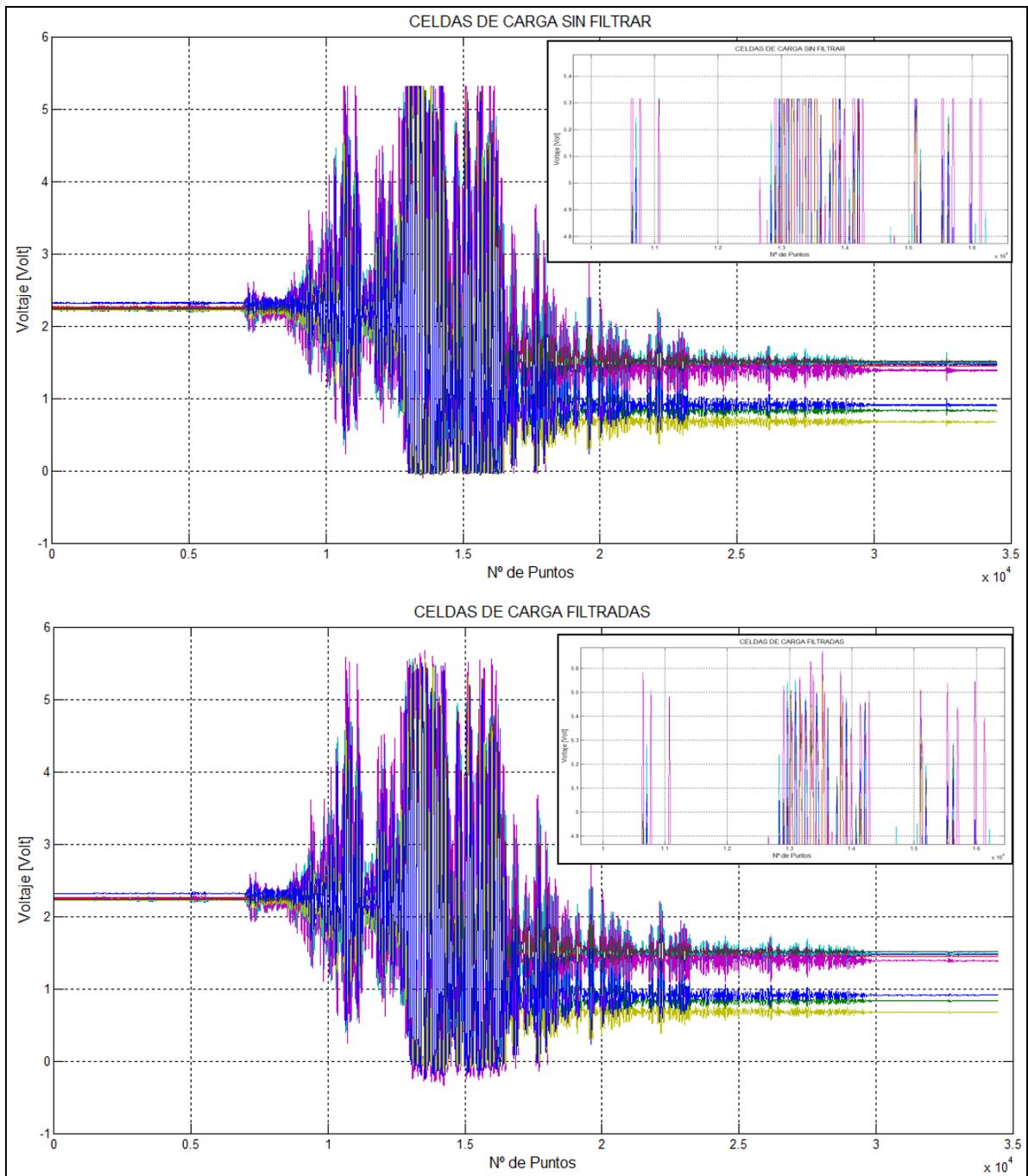


Figura 5.25. Comparación entre celdas filtradas y sin filtrar.

En este ensayo hubo una pérdida importante de la tensión inicial de las barras, lo que se nota claramente en la figura 5.26, donde hubo una pérdida de 141,8 [kgf] en las barras superiores del nudo 1 (de una pretensión inicial de 204 [kgf] a 62,2 [kgf] finales) y una pérdida de 67.9 [kgf] en las barras inferiores del mismo nudo (de 205,4 [kgf] se llegó a 137.5 [kgf]).

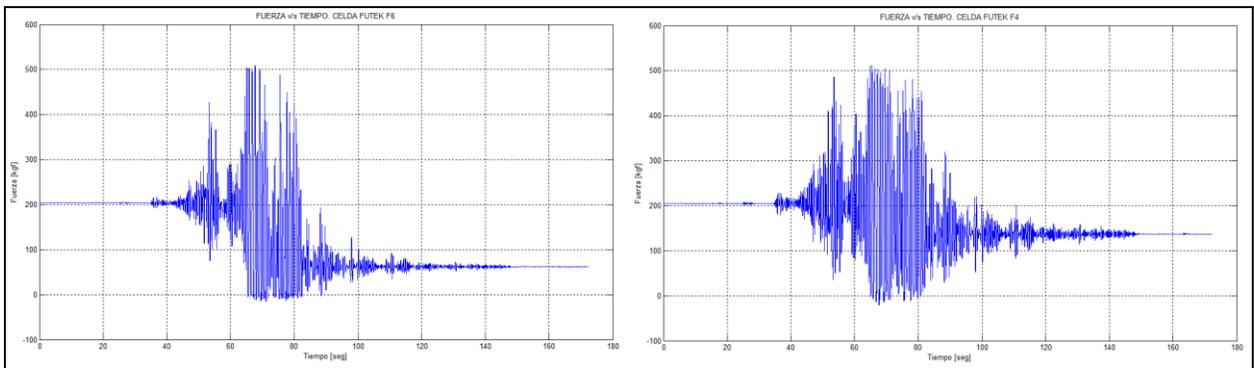


Figura 5.26. Celdas de carga del nudo 1 en el tiempo.

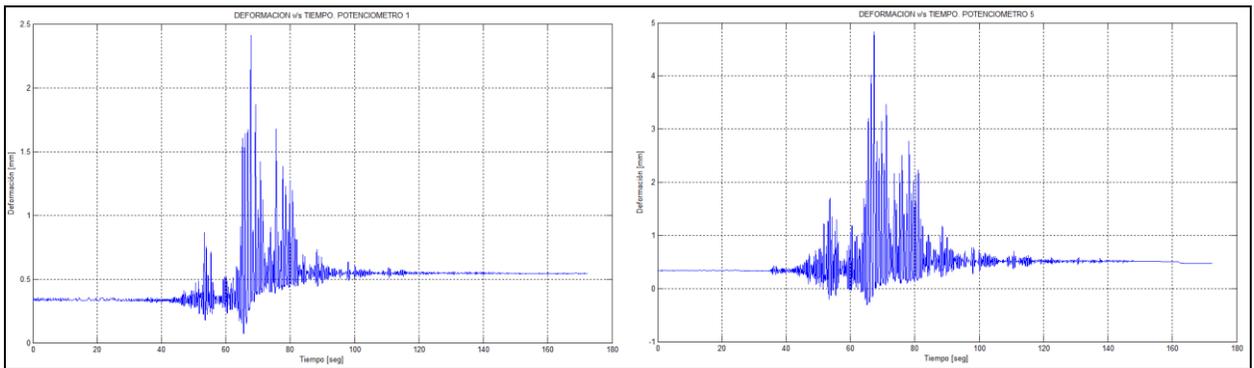


Figura 5.27. Potenciómetros del nudo 1 en el tiempo.

Al igual que en los ensayos descritos previamente, se observaron deformaciones remanentes (ver figura 5.27). En las barras superiores la deformación inicial fue de 0,34 [mm] quedando en 0,53 [mm] después del ensayo. Para las barras inferiores, la deformación inicial correspondió a 0,32 [mm] quedando con una deformación final de 0,51 [mm] luego de realizadas las pruebas.

El gráfico tensión-deformación, donde la deformación se obtuvo a partir del extensómetro (figura 5.28) ubicado en la barra N°4 del nudo 2, presenta histéresis en la zona de altas tensiones y deformaciones, sin embargo, en términos globales, tiende más bien a un comportamiento elástico. No obstante, los valores máximos y mínimos de deformación son del orden de los obtenidos a partir de los potenciómetros, curvas que se presentan en la figura 5.29.

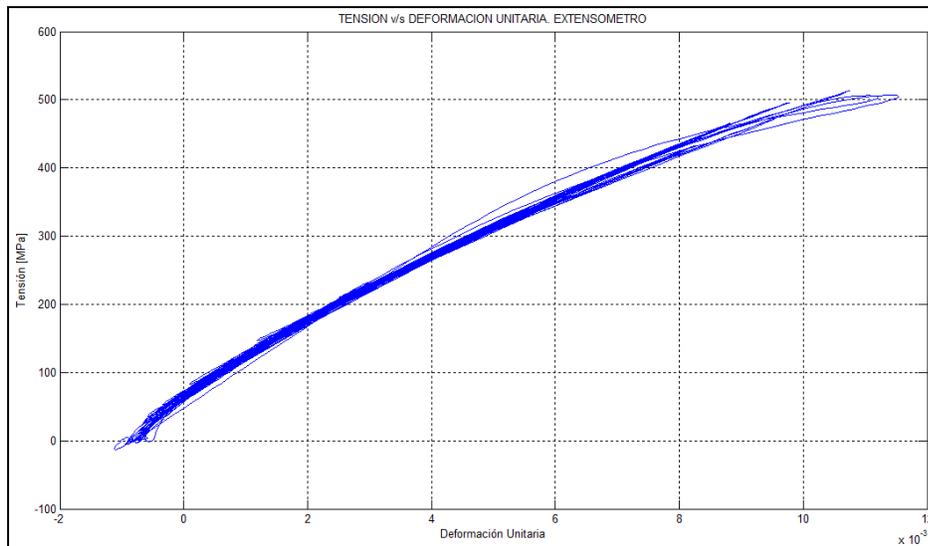


Figura 5.28. Curva Tensión-Deformación. Barra 4, nudo 2.

La figura 5.29 muestra los ciclos de histéresis de la conexión del nudo 1 (deformación a partir de los potenciómetros). En ella se advierte que los ciclos son más amplios y las curvas se asemejan más a las teóricas SMA. Se repite el fenómeno de desplazamiento de las curvas, cuya explicación fue descrita previamente.

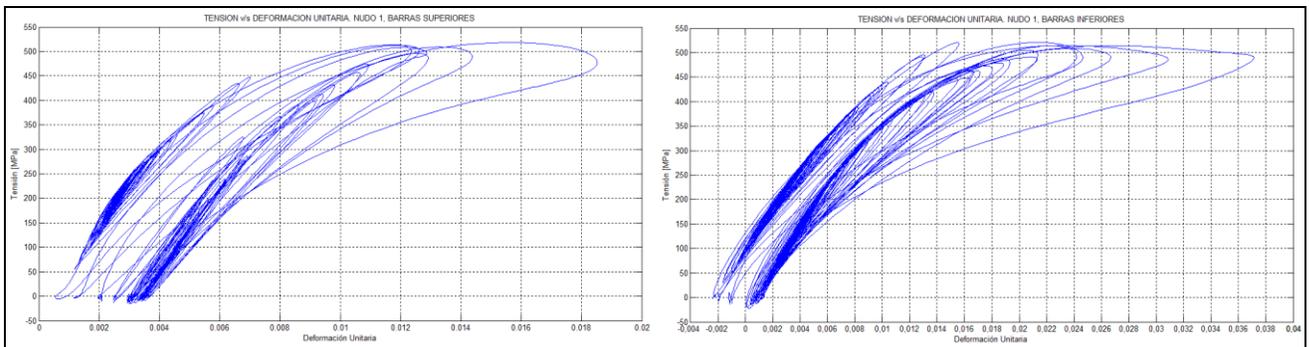


Figura 5.29. Curva Tensión-Deformación. Conexión nudo 1.

En la figura 5.30 se señalan las curvas tensión-deformación de la conexión del nudo 4, las cuales siguen el comportamiento de las curvas de la figura anterior.

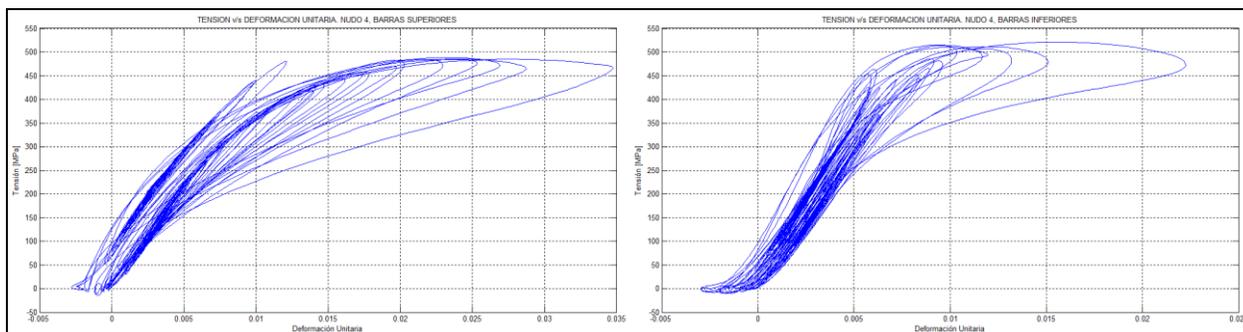


Figura 5.30. Curva Tensión Deformación. Conexión nudo 4.

En la tabla 5.1 se resumen las tensiones y deformaciones máximas alcanzadas por las barras de las conexiones de las figuras 5.29 y 5.30.

Tabla 5.1. Tensión y Deformación máxima.

Valores máximos y mínimos	NUDO 1		NUDO 4	
	Barras Superiores	Barras Inferiores	Barras Superiores	Barras Inferiores
σ_{\max} [MPa]	525	520	480	525
ϵ_{\max} [%]	1,85	3,7	3,5	2,25
σ_{\min} [MPa]	-5	-15	-10	-10
ϵ_{\min} [%]	0,05	-0,2	-0,25	-0.25

En las figuras 5.29 y 5.30 se observa un plateau formado aproximadamente al alcanzar una tensión de 500 [MPa], lo que es interesante desde el punto de vista de la fuerza que es transferida las barras de Nitinol, ya que indica que al alcanzar dicha tensión, las barras no son capaces de seguir tomando carga.

5.2.4. Señal Sinusoidal.

Como señal forzante se utilizó una señal sinusoidal durante 10 segundos. Se realizaron ensayos a 2,5 [Hz] y 5 [mm] de desplazamiento; 2 [Hz] y 5[mm]; 1,5[Hz] y 10[mm]; 1,5[Hz] y 8[mm]; 1,5 [Hz] y 5[mm]. El sistema de sujeción utilizado fue mordazas más trozos de limas. Las tuercas de los pernos de los apoyos se encontraban sueltas.

Los resultados que se presentan a continuación corresponden al Ensayo N°16, vale decir, una señal sinusoidal de 1,5 [Hz] con 5 [mm] de desplazamientos en la mesa.

Con respecto a las aceleraciones, se dispusieron los acelerómetros A2 y A3, en dirección longitudinal, entre los nudos 1 y 2 con el objetivo de medir la torsión en planta, fenómeno no observado durante la ejecución del ensayo. Esto se concluye a partir de la figura 5.31, donde las aceleraciones registradas por ambos instrumentos se encuentran superpuestas.

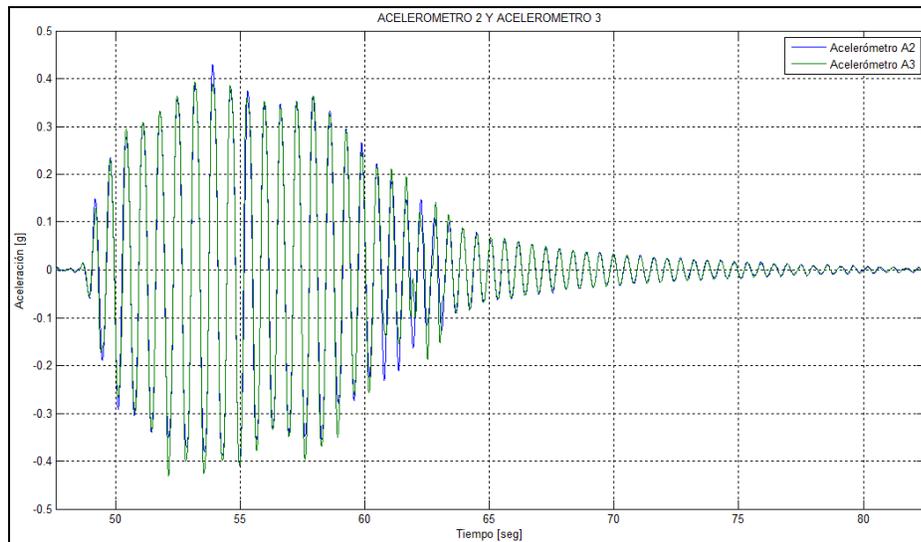


Figura 5.31. Acelerómetros A2 y A3.

La aceleración basal se midió con el acelerómetro FBA11, observándose mayor amplificación dinámica que en los casos donde se usó el registro de Lolloe. La señal forzante tiene un peak de aceleración de aproximadamente 0,05-g, mientras que la estructura alcanzó aceleraciones del orden de 0,4-g, lo que significa un aumento de 8 veces la aceleración basal. La figura 5.32 muestra una comparación entre la aceleración basal (acelerómetro FBA11) y la experimentada por la estructura (acelerómetros A2 y A3).

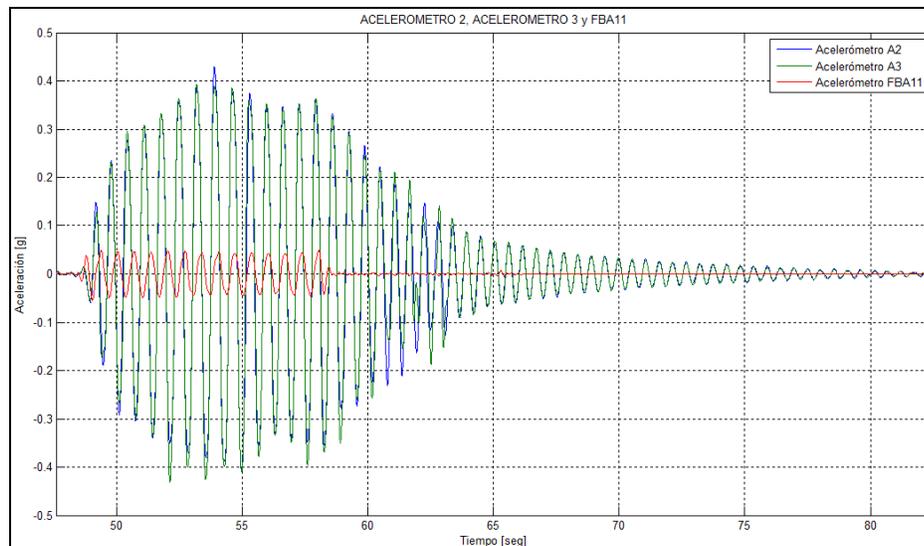


Figura 5.32. Acelerómetros FBA11, A2 y A3.

La aceleración transversal se midió con el acelerómetro A4, cuyo registro se observa en la figura 5.33, donde se aprecian aceleraciones de baja magnitud en comparación con la aceleración longitudinal.

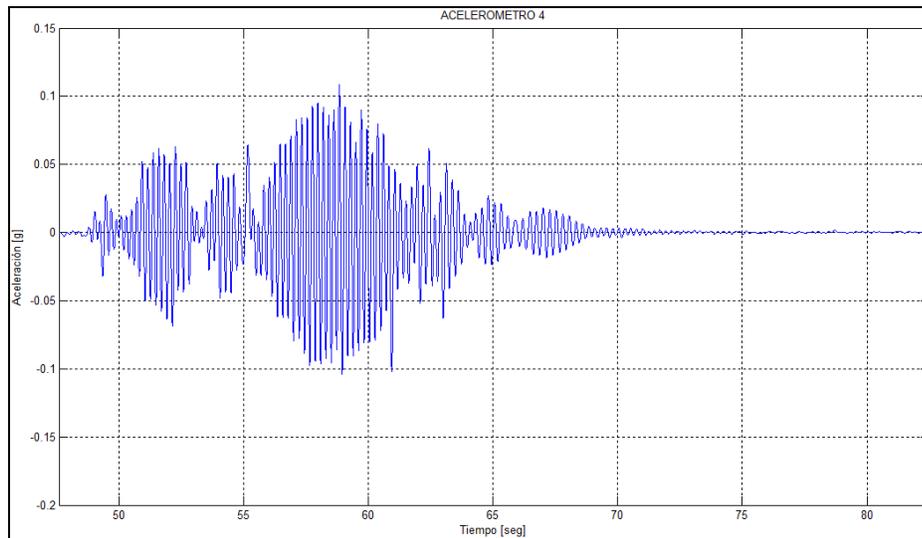


Figura 5.33. Acelerómetro A4.

Del mismo modo que en los ensayos con el registro de Lollo, hubo pérdida de la pretensión inicial, lo que se muestra en la figura 5.34, pasando de una pretensión inicial de 196 [kgf] a 184.3 [kgf] finales en las barras superiores, y de 204 [kgf] a 196 [kgf] en las barras inferiores. En promedio hubo una pérdida de pretensión aproximada de 10 [kgf], lo cual no es muy significativo si se considera la magnitud de la aceleración experimentada por la estructura.

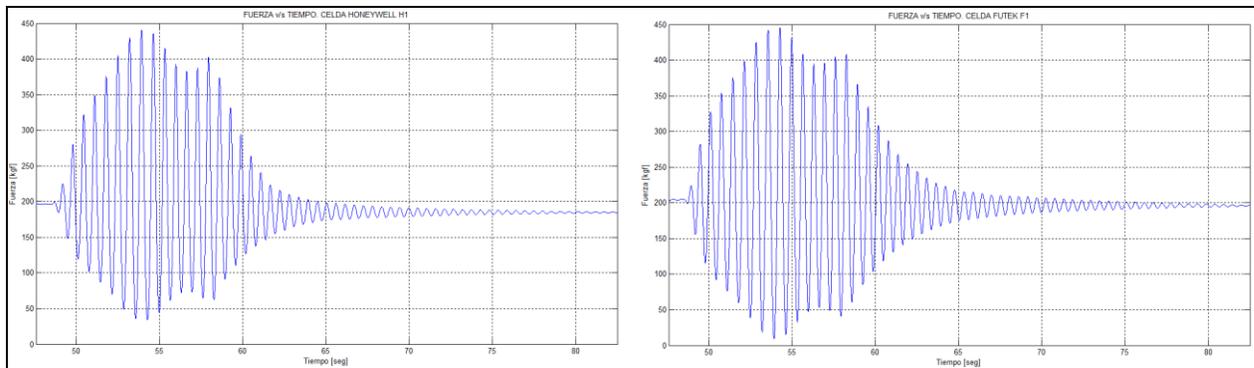


Figura 5.34. Celdas de carga del nudo 4 en el tiempo.

En la figura 5.35 se señalan las deformaciones de las barras de la conexión del nudo 4.

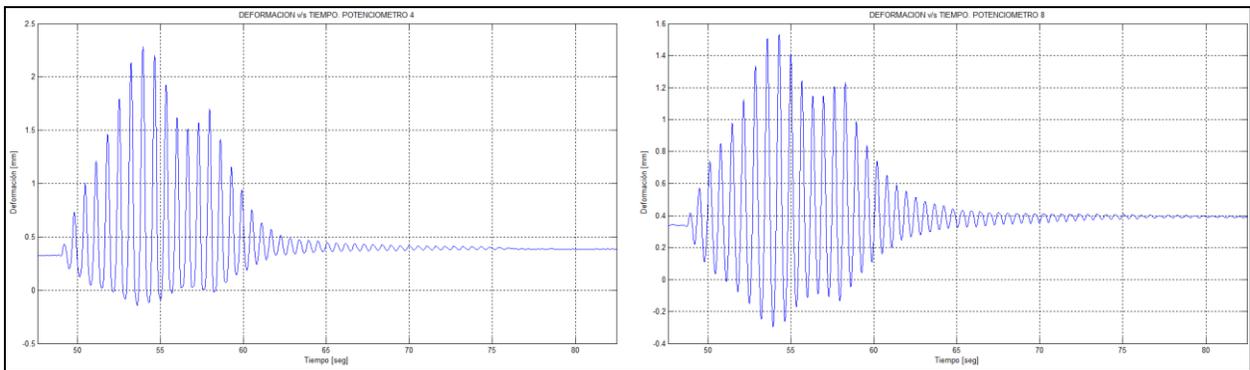


Figura 5.35. Potenciómetros del nudo 4 en el tiempo.

De la figura se desprende que las barras de la conexión quedaron con pequeñas deformaciones residuales, con un alargamiento de 0,08 [mm] tanto en la barras superiores como inferiores (de 0,32 [mm] a 0,4 [mm] en las barras superiores e inferiores)

En este ensayo se registro la deformación de la barra 4 del nudo 2 con un extensómetro de 50 [mm] de rango de medición, observándose una tendencia que se acerca más a un comportamiento elástico que a uno superelástico (ver figura 5.36). En cuanto a las deformaciones, se obtuvieron deformaciones unitarias máximas y mínimas menores a las obtenidas con los potenciómetros, figura 5.37.

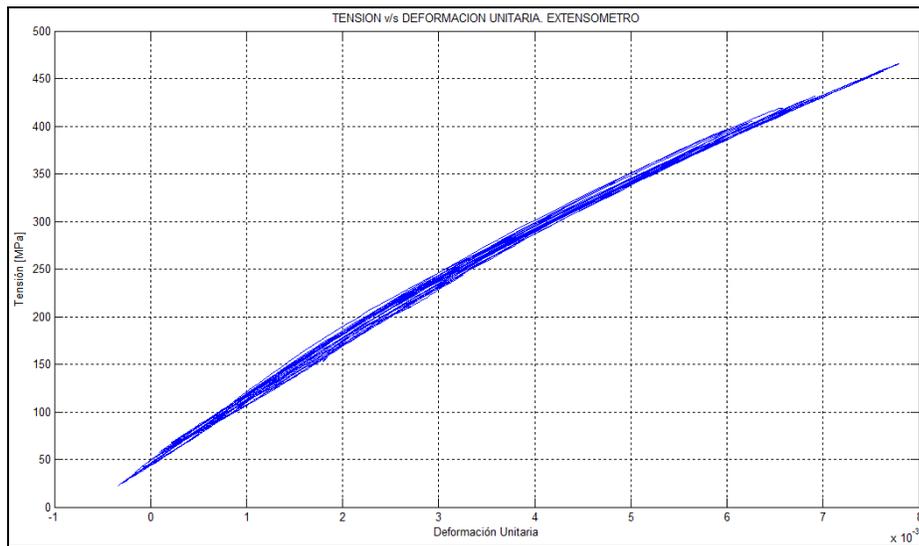


Figura 5.36. Curva Tensión Deformación. Barra 4, nudo 2.

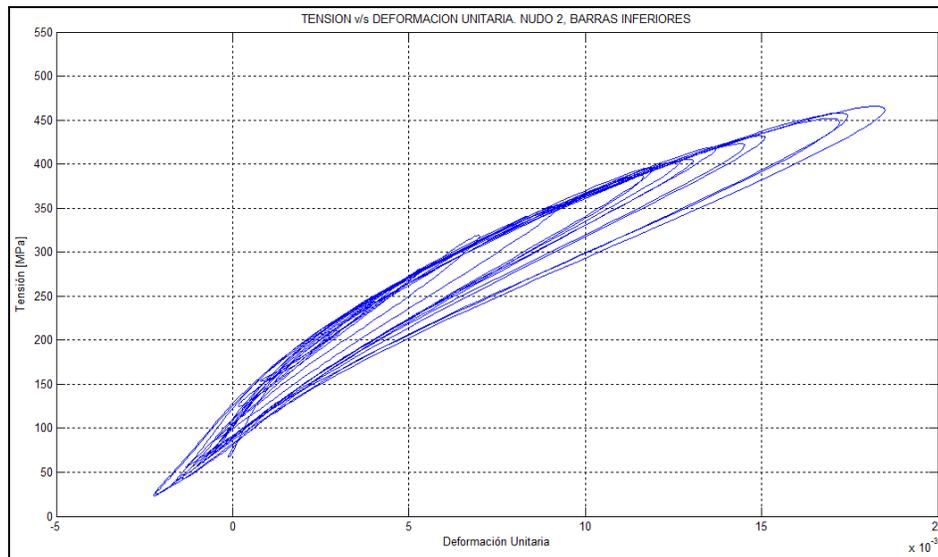


Figura 5.37. Curva Tensión-Deformación. Nudo 2, Barras Inferiores.

La figura 5.38 muestra la curva tensión-deformación de la conexión del nudo 4. Se observa una tensión máxima de 450 [MPa] correspondientes a una deformación de 1,75% y una tensión mínima de 40 [MPa] para una deformación unitaria de -0,1% para las barras superiores. En las barras inferiores se alcanzó una tensión máxima de 451 [MPa] logrando una deformación de 1,2% y una tensión mínima de 10 [MPa] para una deformación de -0,24%. No se advierten desplazamientos de las curvas cíclicas como ocurre en los ensayos anteriores.

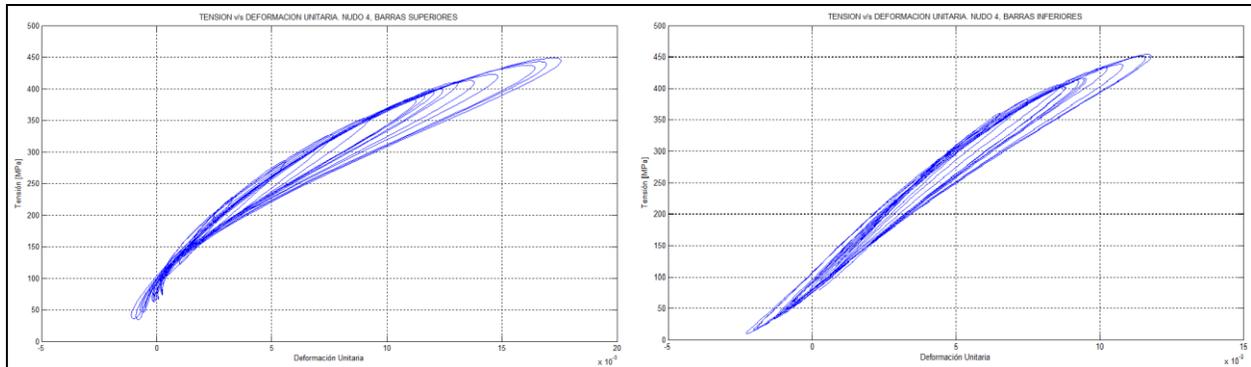


Figura 5.38. Curva Tensión Deformación. Nudo 4.

Se muestra en la figura 5.39 el desplazamiento de la mesa vibradora y el desplazamiento de la estructura. Se observa que el desplazamiento de la estructura fue 14.4 veces superior al desplazamiento de la mesa.

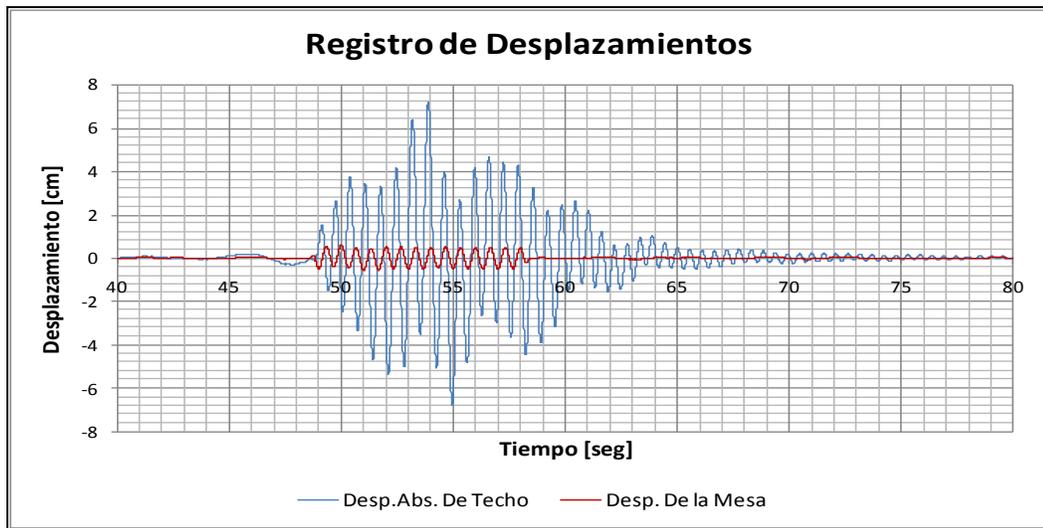
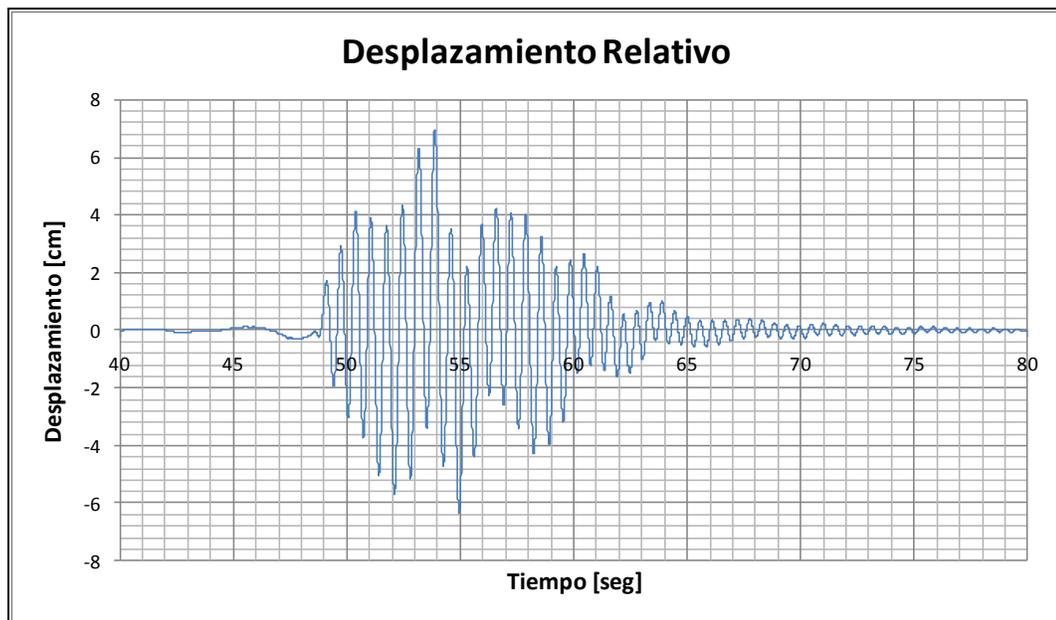


Figura 5.39. Registro de Desplazamientos.

En la figura 5.40 se expone el desplazamiento relativo de estructura, que dada la diferencia entre el desplazamiento de techo y de la mesa, es prácticamente igual al desplazamiento absoluto.



5.40. Desplazamiento Relativo.

En la figura 5.41 se presenta el corte basal versus el desplazamiento de techo.

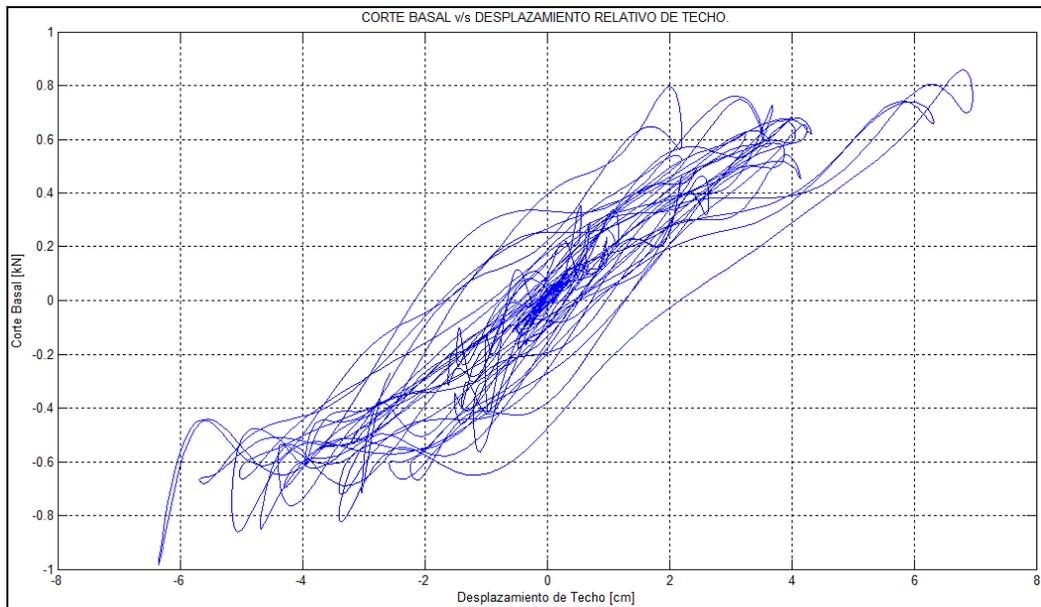


Figura 5.41. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.

En la tabla 5.2 se muestra un resumen de los valores máximos y mínimos de tensiones y deformaciones de los 4 nudos para los ensayos descritos anteriormente.

Tabla 5.2. Resumen Resultados conexión de Nitinol.

Señal de Excitación	Nudo N°	Barras Superiores				Barras Inferiores			
		σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	σ_{min} [MPa]	ϵ_{min} [%]	σ_{max} [MPa]	ϵ_{max} [%]	σ_{min} [MPa]	ϵ_{min} [%]
Llolleo 25%	1	-	-	-	-	375	0.53	110	0.16
	2	480	0.6	50	0.13	365	1.1	90	0.01
	3	400	0.87	85	0.05	-	-	-	-
	4	370	0.93	80	-0.05	400	0.8	80	-0.02
Llolleo 50%	1	515	0.9	35.7	0.11	520	1.5	6.2	-0.17
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	500	1.3	12	-0.05	-	-	-	-
	4	470	1.1	30	-1	450	0.69	10	-0.05
Llolleo 75%	1	525	1.85	-5	0.05	520	3.7	-15	-0.2
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	-	-	-	-	-	-	-	-
	4	480	3.5	-10	-0.25	525	2.25	-10	-0.25
Sinusoide 1,5 [HZ] y 5[mm]	1	470	0.78	50	0.1	-	-	-	-
	2	-	-	-	-	460	1.75	25	-0.24
	3	470	1.5	25	-0.1	-	-	-	-
	4	450	1.75	40	-0.1	451	1.2	10	-0.24

5.3. Conexión SMA CuAlBe.

Con el fin de tener un patrón comparativo, se realizaron 7 ensayos utilizando barras SMA de CuAlBe de 3,34 [mm] de diámetro. Los ensayos comprenden pullbacks, ensayos con señales sinusoidales y utilizando el registro de Lolloo escalado a un 25%.

En estos ensayos las barras fueron pretensadas con 150 [kgf]. Se observó que las mordazas tipo B se inclinaban hacia un costado, perdiendo el paralelismo entre el plano de las barras superiores e inferiores.

A partir del registro del ensayo N°20 se calcularon las propiedades dinámicas de la estructura con conexiones de CuAlBe, obteniéndose lo siguiente:

Tabla 5.3. Propiedades dinámicas de la Estructura: CuAlBe.

Pullback	T_n [seg]	f_n [Hz]	β [%]
Tramo 1	0,465	2,15	1,44
Tramo 2	0,468	2,13	1,41
Tramo 3	0,463	2,15	1,43
Promedio	0.465	2,14	1,42

A continuación se exponen los resultados más representativos de cada ensayo.

5.3.1. Señal Sinusoidal.

Los resultados que en esta sección se presentan corresponden al ensayo N°23, es decir, una señal sinusoidal de 1,5 [Hz] de frecuencia y 8 [mm] de desplazamiento basal.

La figura 5.42 muestra la aceleración longitudinal experimentada por la estructura, la que se registro con los acelerómetros A2 y A3. Se registró un peak máximo de aproximadamente 0,4·g. Se observa que ambas señales se encuentran superpuestas y considerando la ubicación de los acelerómetros (entre los nudos 1 y 2) se concluye que no hubo torsión en planta.

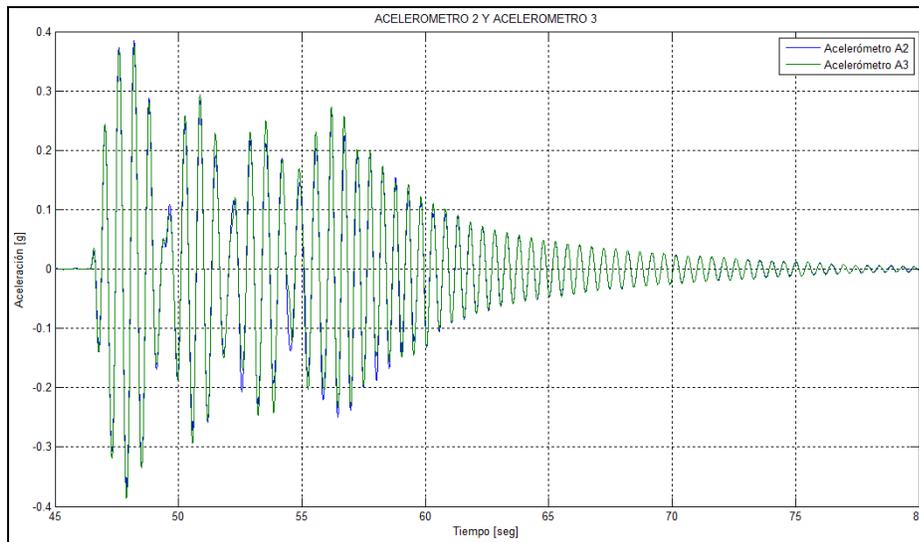


Figura 5.42. Acelerómetros A2 y A3.

En la figura 5.43 se observa una comparación entre la aceleración longitudinal experimentada por la estructura y la aceleración basal. La aceleración máxima de la señal forzante es de 0.07g correspondiente aproximadamente a un sexto de la aceleración máxima de la estructura.

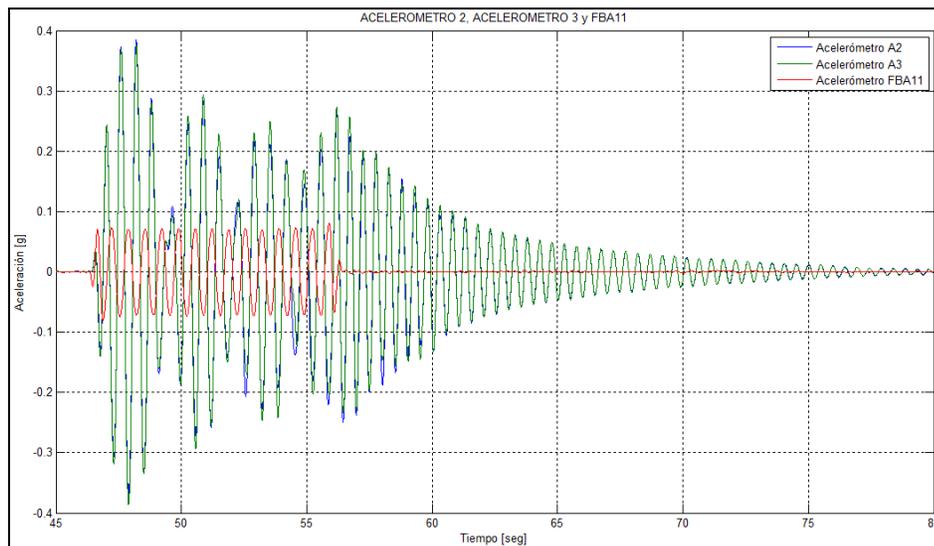


Figura 5.43 Acelerómetros FBA11, A2 y A3.

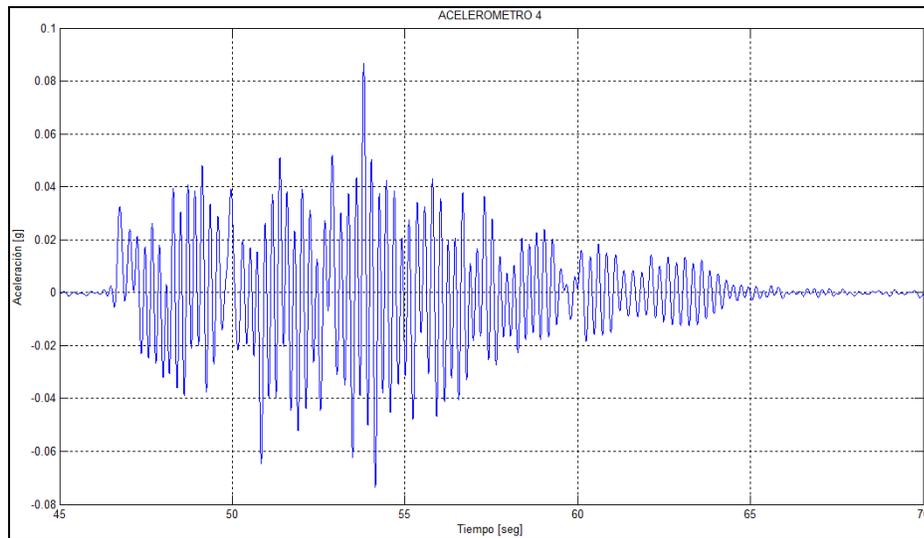


Figura 5.44. Acelerómetro A4.

La figura 5.44 corresponde a la aceleración transversal de la estructura medida con el acelerómetro A4. Se observan peaks del orden de algunos de los alcanzados en la aceleración longitudinal, los cuales se asocian a golpes generados por la oscilación que experimentaron las mordazas tipo B durante el ensayo.

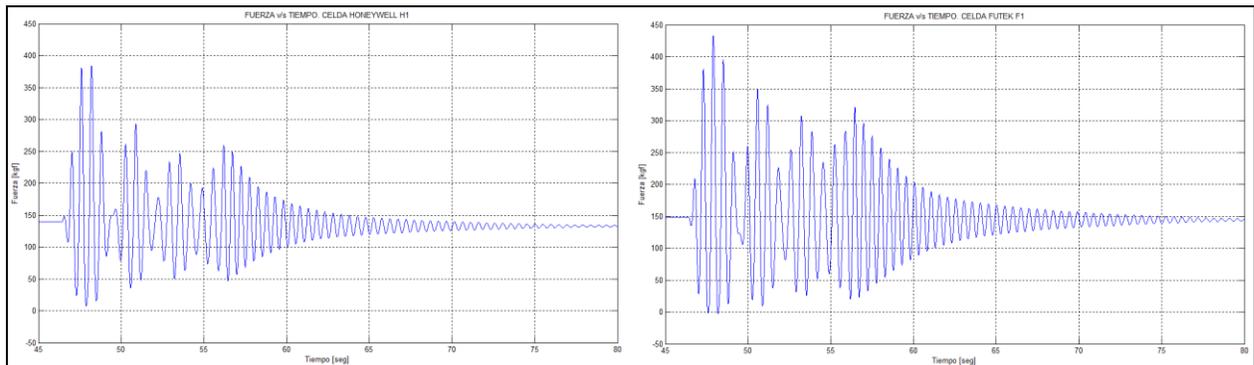


Figura 5.45. Celdas de carga del nudo 4 en el tiempo.

En la figura 5.45 se observa la serie de tiempo correspondiente a las celdas de carga del nudo 4. Se advierte que hubo una leve pérdida de la pretensión inicial. Las barras superiores se descargaron de 143 [kgf] a 137 [kgf] y las inferiores lo hicieron de 150 [kgf] a 146 [kgf].

Las barras quedaron con deformaciones remanentes, lo que se observa en la figura 5.46. Estas deformaciones ocurren en las barras inferiores del nudo 4, las que quedaron con una deformación final de 0,21 [mm] (0,05 [mm] más que la deformación inicial). No se observan deformaciones remanentes en las barras superiores, puesto que pasaron de una deformación inicial de 0,15 [mm] a una deformación de 0,13 [mm], producto de la pérdida de tensión en las barras

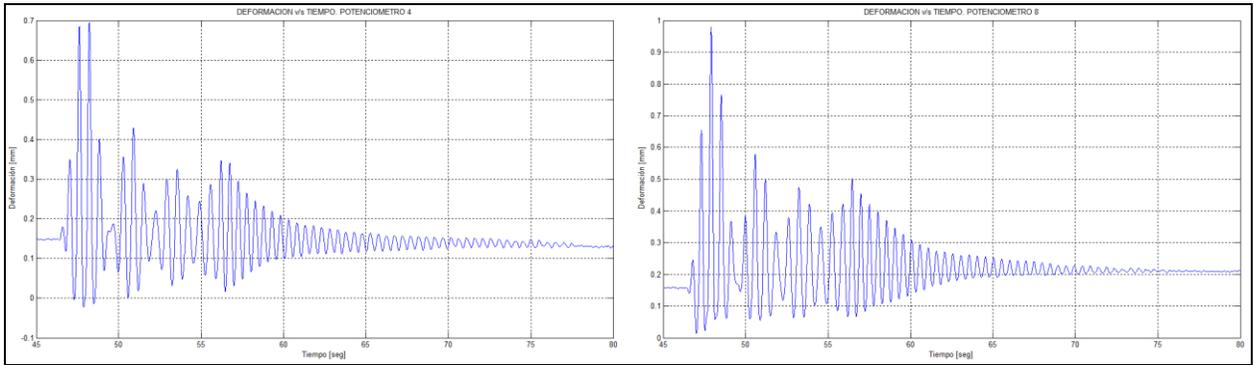


Figura 5.46. Potenciómetros del nudo 4 en el tiempo.

En este ensayo se instrumentó la barra N°4 del nudo 1 con un extensómetro cuyo rango de medición es 50 [mm]. En la figura 5.47 se observa la curva tensión-deformación de la barra 4 utilizando el extensómetro para medir su deformación. Se obtuvo una tensión y deformación máxima de 275 [MPa] y 0,42% respectivamente. Los valores mínimos son -10 [MPa] de tensión y una deformación unitaria de 0,005%.

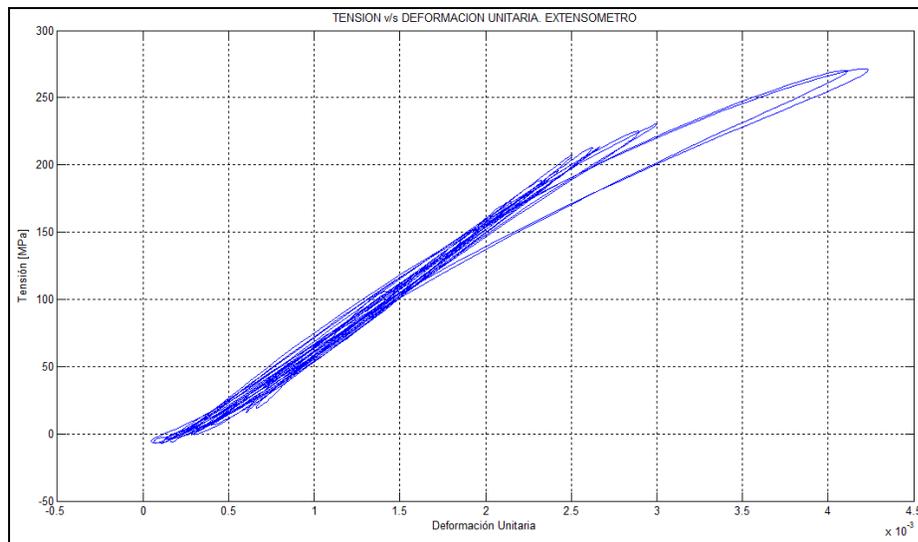


Figura 5.47. Curva Tensión Deformación. Barra 4, nudo 1.

Al comparar la figura 5.47 con la curva de histéresis equivalente obtenida utilizando el potenciómetro inferior del nudo 1 (ver figura 5.48), se tiene que tanto los valores de tensión como deformación unitaria son del mismo orden de magnitud.

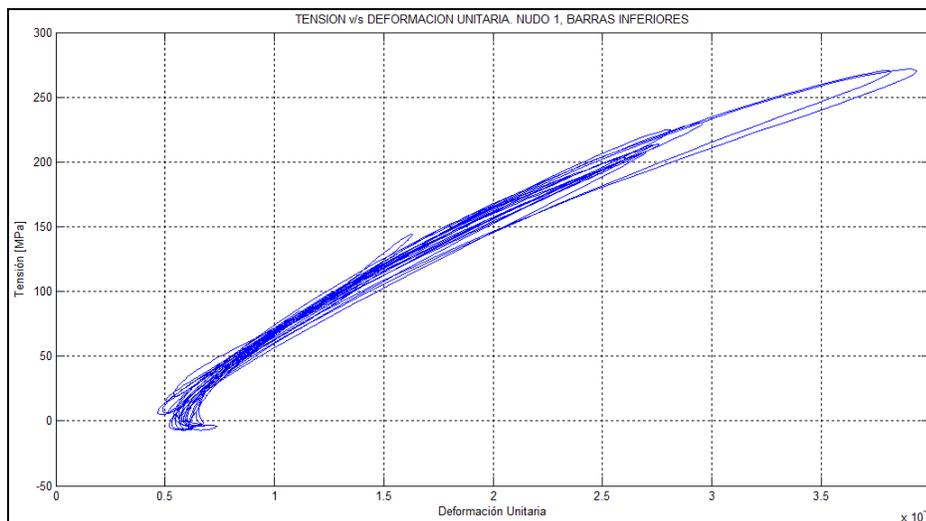


Figura 5.48. Curva Tensión-Deformación. Nudo 1, Barras Inferiores.

En la figura 5.49 se exponen las curvas tensión-deformación del nudo 4.

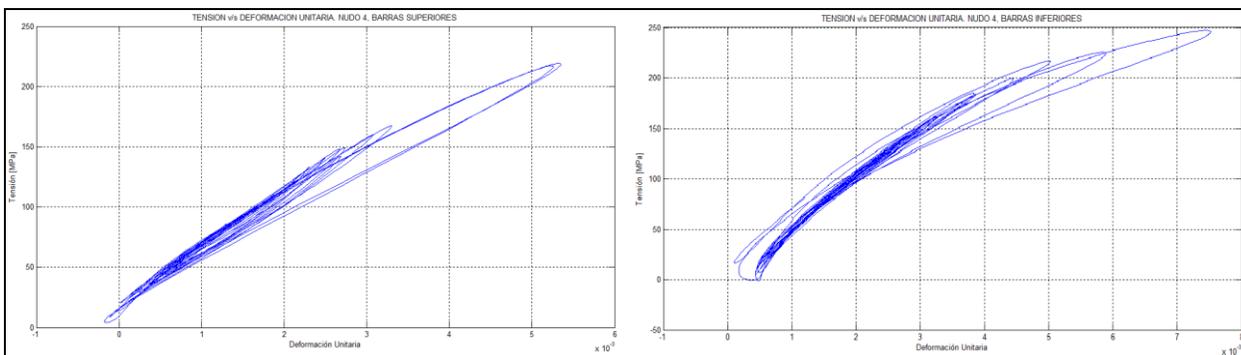


Figura 5.49. Curva Tensión Deformación. Nudo 4.

Los valores máximos y mínimos de las barras superiores e inferiores se resumen en la siguiente tabla.

Tabla 5.4. Tensión y Deformación máxima.

Valores máximos y mínimos	NUDO 4	
	Barras Superiores	Barras Inferiores
σ_{\max} [MPa]	218	246
ϵ_{\max} [%]	0,53	0,75
σ_{\min} [MPa]	4,8	-1,8
ϵ_{\min} [%]	-0,017	0,01

En la figura 5.50 se ilustra una comparación entre los desplazamientos de la base y el techo de la estructura. El desplazamiento de la estructura resultó ser aproximadamente 6 veces el desplazamiento basal.

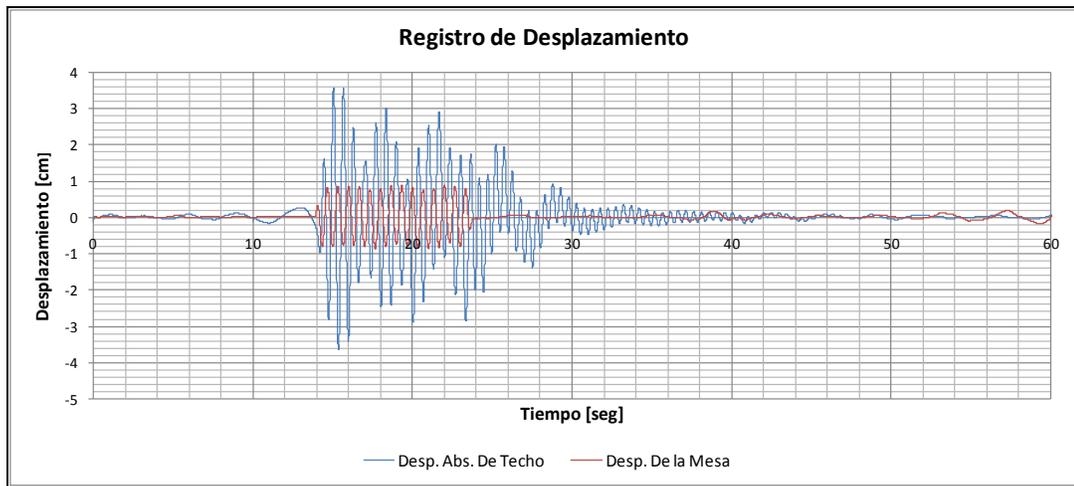


Figura 5.50. Registro de Desplazamientos.

El desplazamiento relativo se ilustra en la figura 5.51.

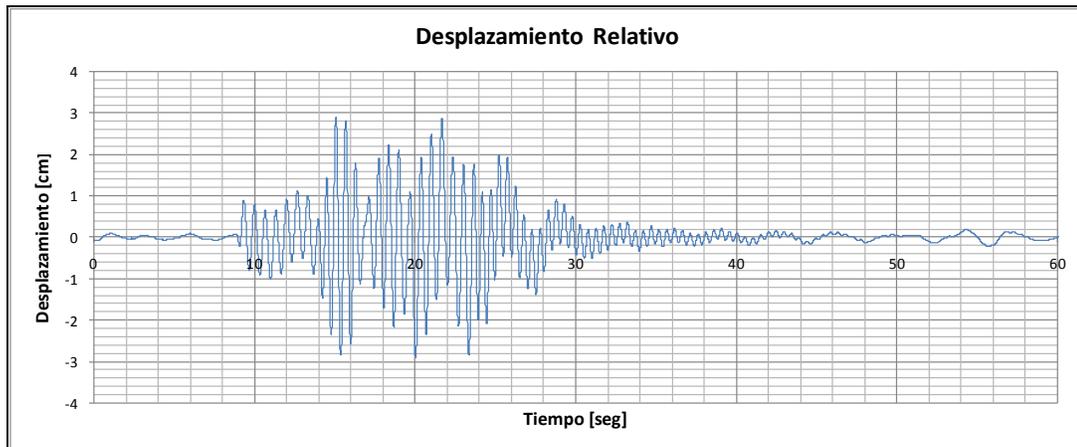


Figura 5.51. Desplazamiento Relativo.

La figura 5.52 muestra el corte basal versus el desplazamiento de techo.

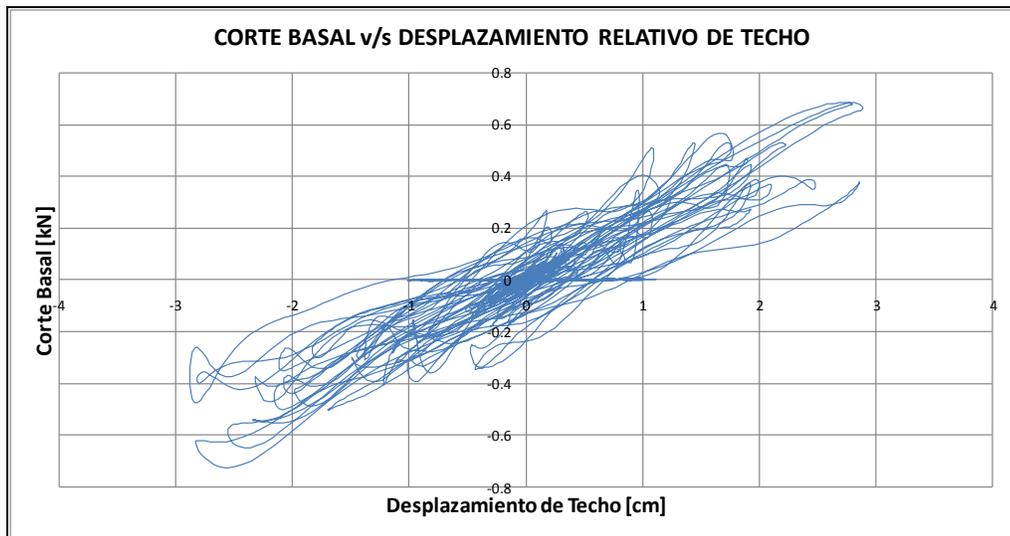
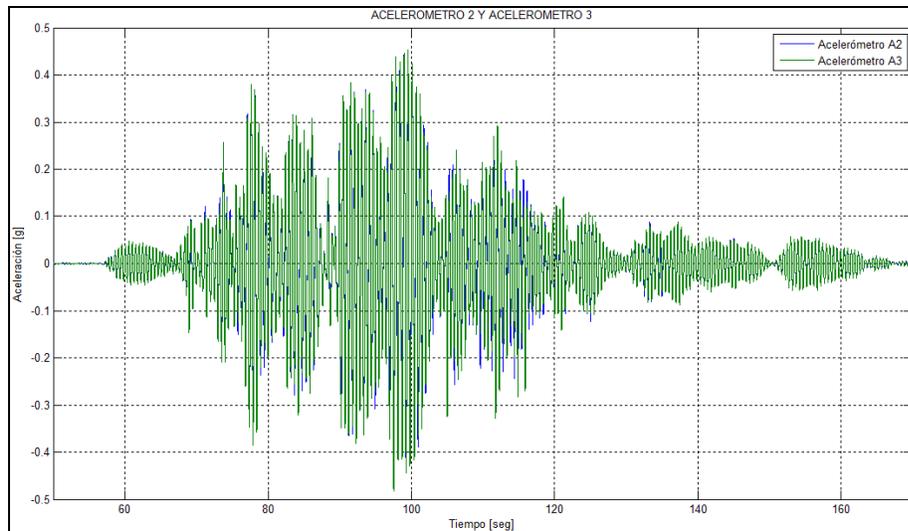


Figura 5.52. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.

5.3.2. Registro Lolloo a un 25%.

Los resultados mostrados a continuación corresponde al ensayo N°25, o sea, utilizando como señal de excitación el registro de Lolloo escalado a un 25%.

En la figura 5.53 se ilustra la aceleración longitudinal del techo de la estructura, registrada por los acelerómetros A2 y A3, dispuestos entre los nudos 1 y 2. Se observa un peak máximo de 0,48-g. Se aprecia que ambos registros se encuentran superpuestos, por lo que se descarta que haya habido torsión en planta.



5.53. Acelerómetros A2 y A3.

La aceleración de la mesa vibradora fue registrada por el acelerómetro FBA11, cuyo registro se expone en la figura 5.54 comparándolo con los acelerómetros A2 y A3. La aceleración basal máxima fue de 0,13-g, aproximadamente un 27% de la aceleración máxima experimentada por la estructura. La amplificación en este caso fue menor a la ocurrida con la señal sinusoidal.

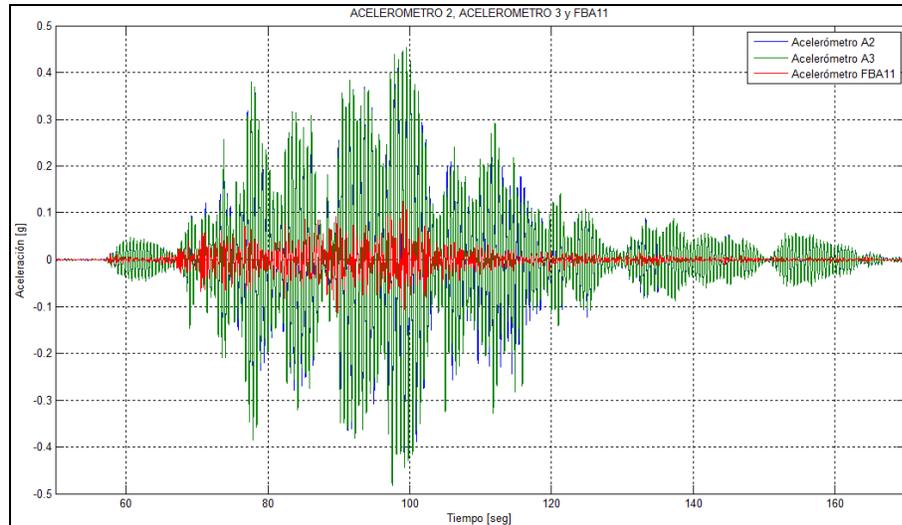


Figura 5.54. Acelerómetros A2, A3 y FBA11.

Las aceleraciones transversales registradas fueron de baja magnitud, como se ve en la figura 5.55. Con esto se confirma que no hubo torsión en planta.

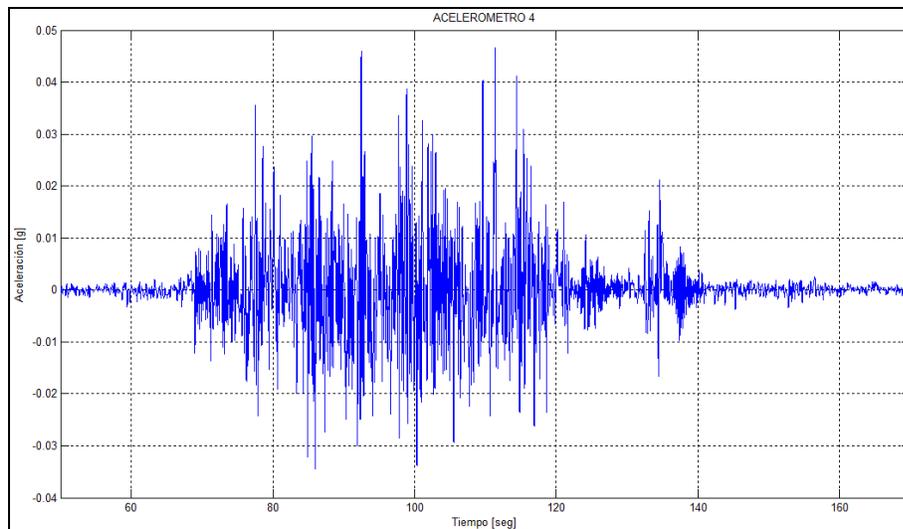


Figura 5.55. Acelerómetro A4.

En la figura 5.56 se muestra cómo varía la carga en las barras superiores e inferiores del nudo 4. Se observa que las barras superiores sufren una pequeña descarga, de 142 [kgf] a 137 [kgf]. La descarga en las barras inferiores es un tanto más notoria, de 150 [kgf] iniciales a 138 [kgf] al terminar el ensayo.

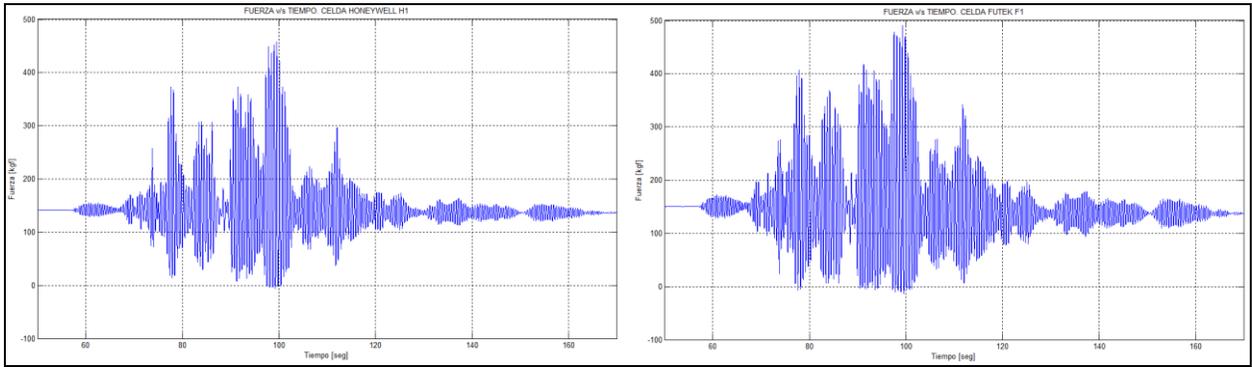


Figura 5.56. Celdas de carga del nudo 4 en el tiempo.

En la figura 5.57 se aprecia que no hubo deformación residual en las barras superiores. En las barras inferiores la deformación remanente fue de 0,12 [mm], donde dichas barras comienzan el ensayo con una deformación de 0,16 [mm], producto de la pretensión, y terminan con una deformación de 0,28 [mm].

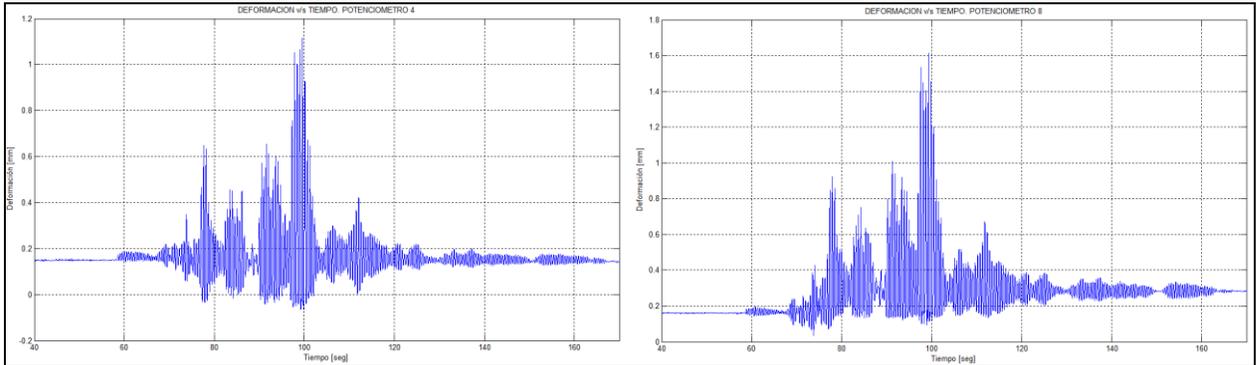


Figura 5.57. Potenciómetros del nudo 4 en el tiempo.

Análogamente al ensayo anterior, la barra 4 del nudo 1 se encontraba instrumentada con un extensómetro de 50 [mm] de rango. La curva de histéresis obtenida con este instrumento se muestra en la figura 5.58. En ella se puede ver que la tensión máxima y mínima es de 307 [MPa] y -9,8 [MPa] respectivamente, mientras que la deformación máxima es de 0,55% y la mínima de -0,045%

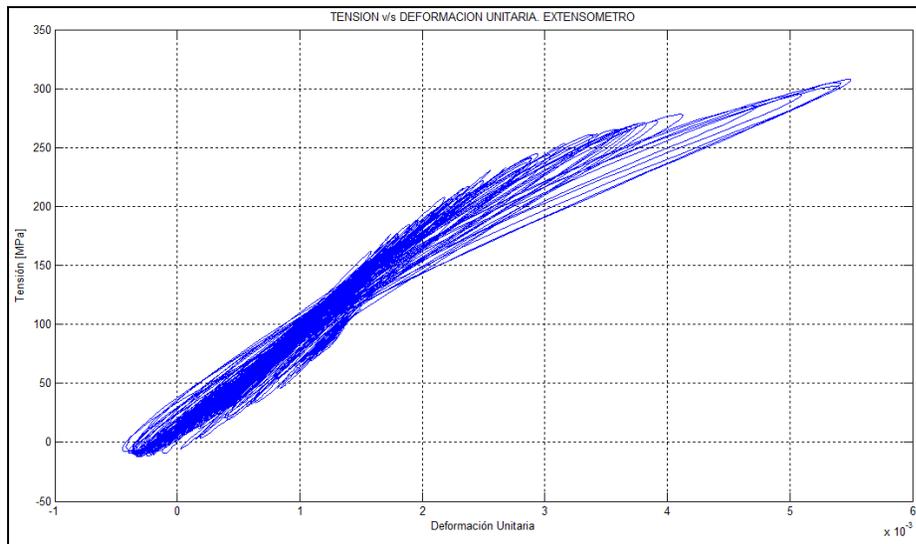


Figura 5.58. Curva Tensión Deformación. Barra 4, nudo 1.

Al comparar la curva de la figura 5.58 con su curva equivalente obtenida mediante el potenciómetro P5 (ver figura 5.59), se observa que los valores máximos y mínimos son del mismo orden de magnitud, tanto para las tensiones como para las deformaciones.

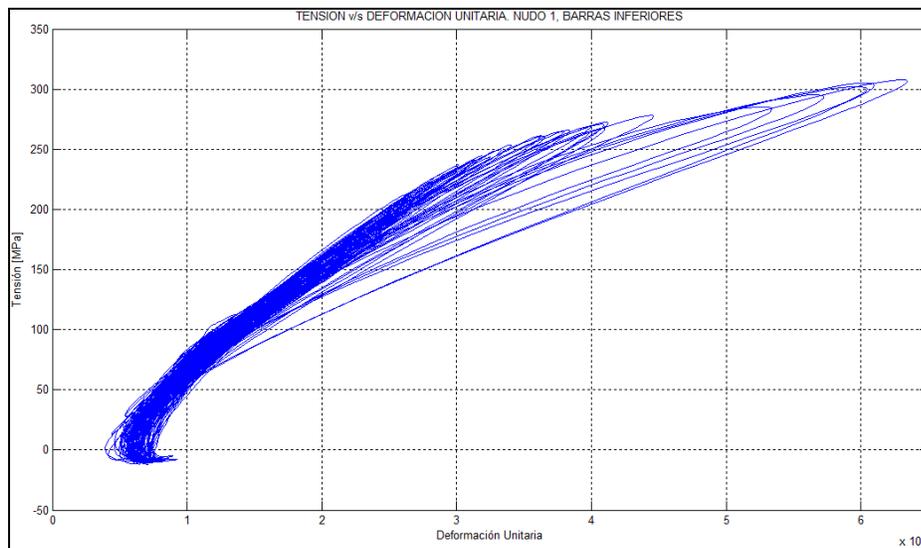


Figura 5.59. Curva Tensión-Deformación. Nudo 1, Barras Inferiores.

En la figura 5.60 se presentan las curvas de histéresis de la conexión del nudo 4.

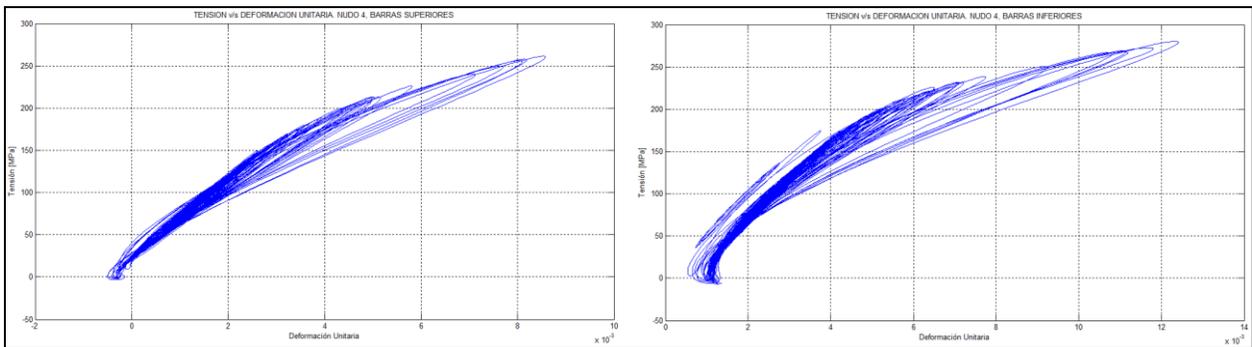


Figura 5.60. Curva Tensión Deformación. Nudo 4.

Los valores máximos y mínimos de las barras superiores e inferiores se sintetizan en la siguiente tabla.

Tabla 5.5. Tensión y Deformación máxima.

Valores máximos y mínimos	NUDO 4	
	Barras Superiores	Barras Inferiores
σ_{\max} [MPa]	261	279
ϵ_{\max} [%]	0,85	1,24
σ_{\min} [MPa]	-3,4	-3,5
ϵ_{\min} [%]	-0,039	0,088

En la figura 5.61 se observa el desplazamiento de la mesa comparado con el desplazamiento del techo de la estructura. Esta última alcanzó un desplazamiento de 7,2 [cm], mientras que la mesa 2,4 [cm].

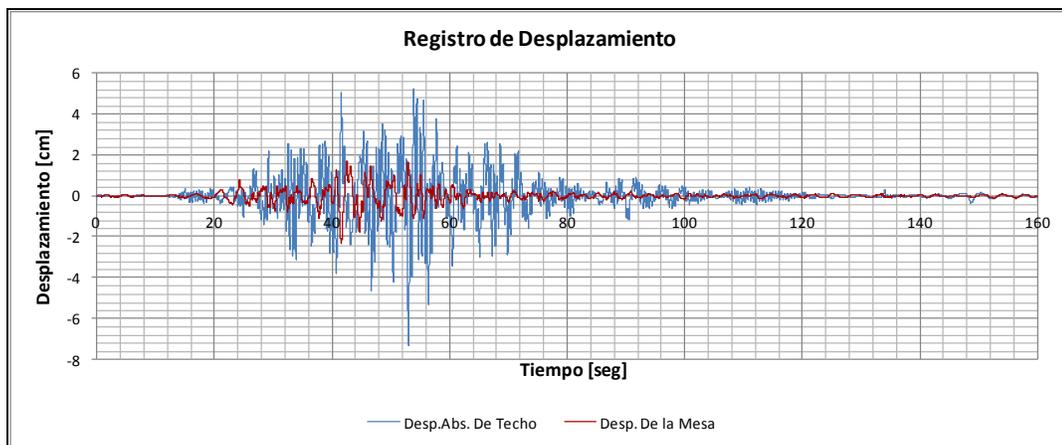


Figura 5.61. Registro de Desplazamientos.

La figura 5.62 muestra el desplazamiento relativo del techo de la estructura.

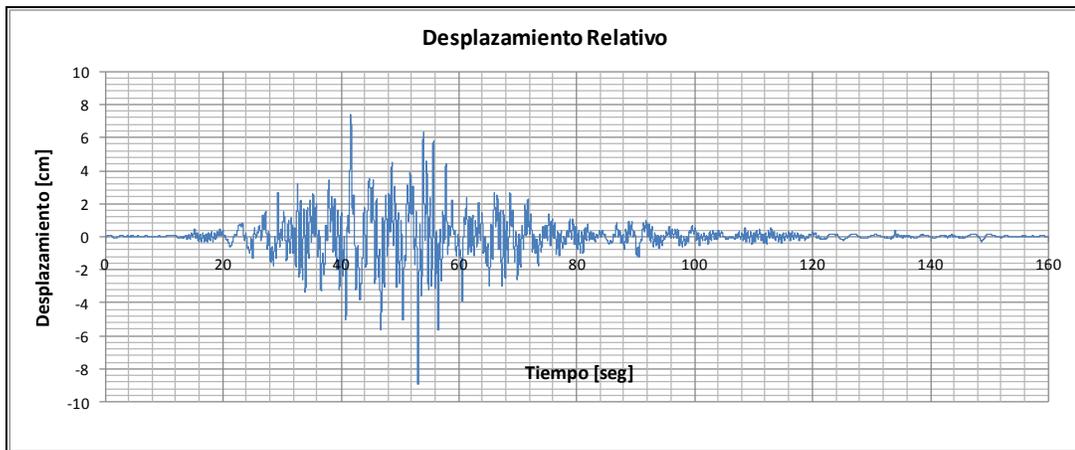


Figura 5.62. Desplazamiento Relativo.

En la figura siguiente se ilustra el corte basal en función del desplazamiento relativo de la estructura.

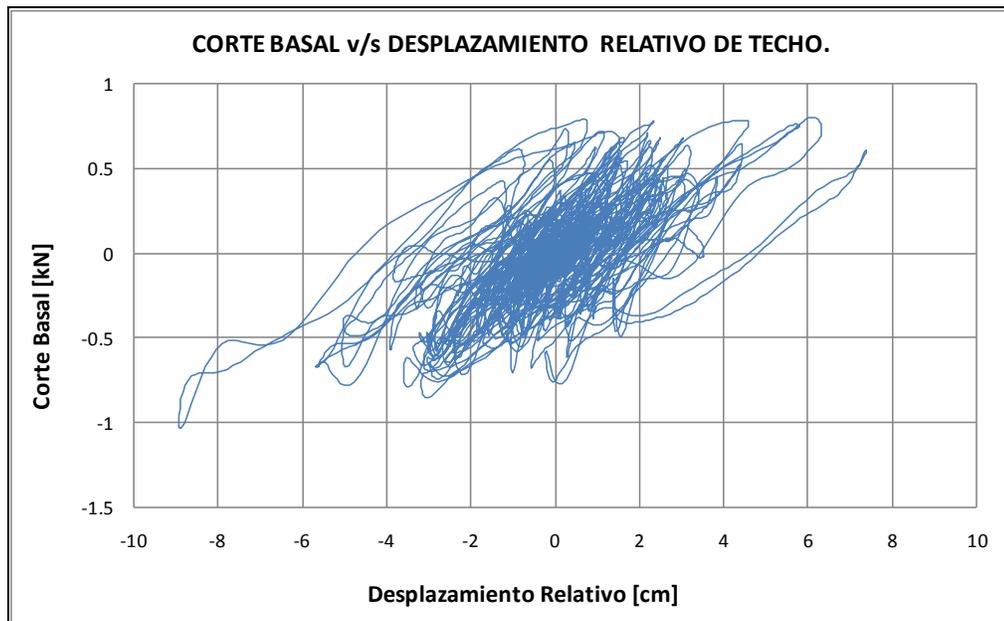


Figura 5.63. Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo.

En la tabla 5.6 se muestra un resumen de los valores máximos y mínimos de tensiones y deformaciones de los 4 nudos para los ensayos con conexión de CuAlBe.

Tabla 5.6. Resumen Resultados conexión de CuAlBe.

Señal de Excitación	Nudo N°	Barras Superiores				Barras Inferiores			
		σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [%]	σ_{\min} [MPa]	ϵ_{\min} [%]	σ_{\max} [MPa]	ϵ_{\max} [%]	σ_{\min} [MPa]	ϵ_{\min} [%]
Sinusoide 1,5 [Hz] y 8 [mm]	1	-	-	-	-	270	0.39	-15	0.05
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	260	0.401	0	0.06	-	-	-	-
	4	218	0.53	4.8	-0.017	246	0.75	-1.8	0.01
Llolleo 25%	1	-	-	-	-	320	0.64	-10	0.05
	2	-	-	-	-	-	-	-	-
	3	300	0.55	-10	0.06	290	0.86	-5	0.075
	4	261	0.85	-3.4	-0.039	279	1.24	-3.5	0.088

Al observar los registros de aceleración de techo, se aprecia un efecto modulado en la aceleración pese a que la señal forzante era de amplitud constante. Se creyó, en un comienzo, que este fenómeno se debía a la aparición de un segundo modo de vibrar, para lo cual se realizó una transformada de Fourier a la señal de entrada (figura 5.64). Sin embargo, no se observaron peaks de frecuencias correspondientes a otros modos. La explicación radica en las diferencias de frecuencia existente entre la señal forzante y la estructura. Esta última al responder ante la sollicitación externa lo hace a su frecuencia, generándose un desfase con la señal de entrada. Con esto, en ocasiones existe superposición de la onda y en otros instantes las señales se restan.

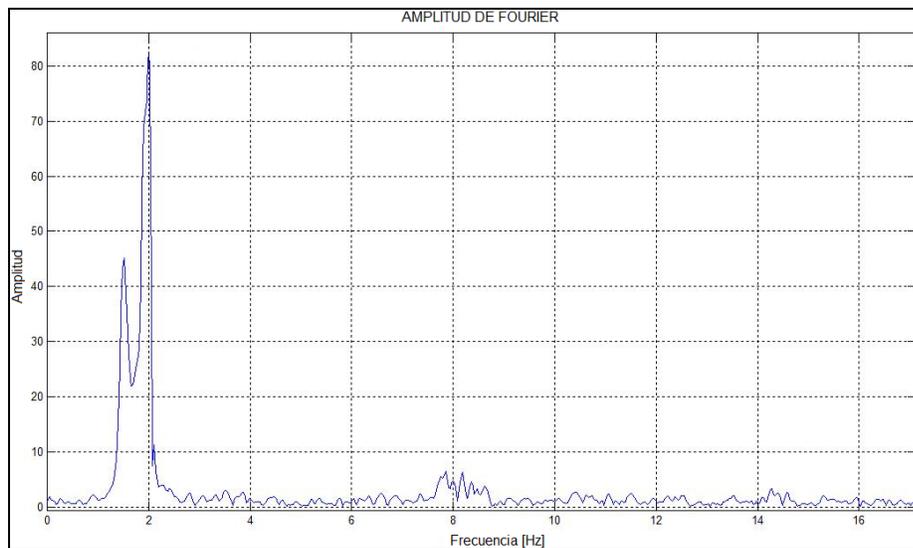


Figura 5.64. Transformada de Fourier para la señal sinusoidal 1,5 [Hz] y 8 [mm].

En la figura 5.64 se observan dos peaks bien marcados; uno alrededor de los 1,5 [Hz] y otro en torno a los 2 [Hz]. El primero corresponde a la frecuencia de la señal forzante, mientras que el segundo corresponde a la frecuencia de la estructura.

5.4. Aceleración Espectral y Energía Disipada.

Como se observó en la sección anterior, en todos los ensayos, tanto para la conexión de NiTi como para la conexión de CuAlBe, no hubo reducción de las aceleraciones en la estructura producto de la incorporación del material SMA. Siempre se observó amplificación, la que fue más notoria al utilizar como señal forzante una onda sinusoidal de amplitud constante y de período similar al de la estructura.

En la tabla 5.6 se comparan las aceleraciones obtenidas experimentalmente con las espectrales para el registro de Lollole N10E escalado en distintos porcentajes. Tanto para los casos en que se usó Nitinol como aquellos en que se empleó CuAlBe, las aceleraciones máximas en el modelo son mucho menores que las espectrales, lo cual muestra el efecto disipador de las conexiones.

En las siguientes figuras se muestran los espectros de respuesta del registro de Lollole escalado a un 25%, 50% y 75% para los amortiguamientos de 1,4% y 2,3% (estructura con CuAlBe y NiTi respectivamente).

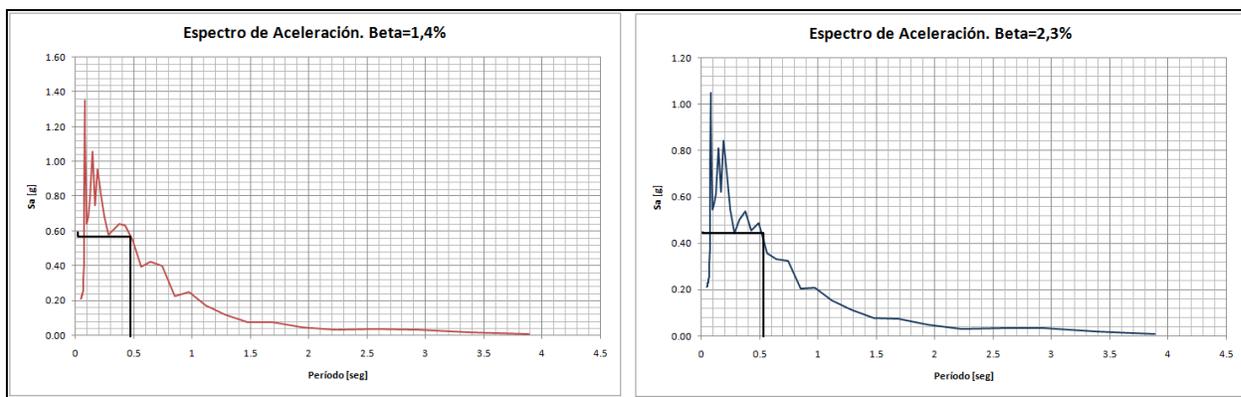


Figura 5.65. Espectro de aceleración para Lollole a un 25%.

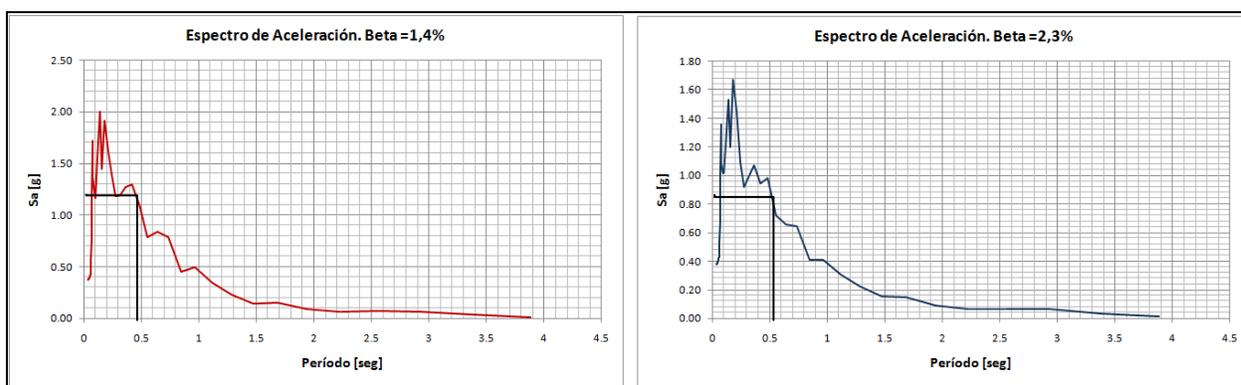


Figura 5.66. Espectro de aceleración para Lollole a un 50%.

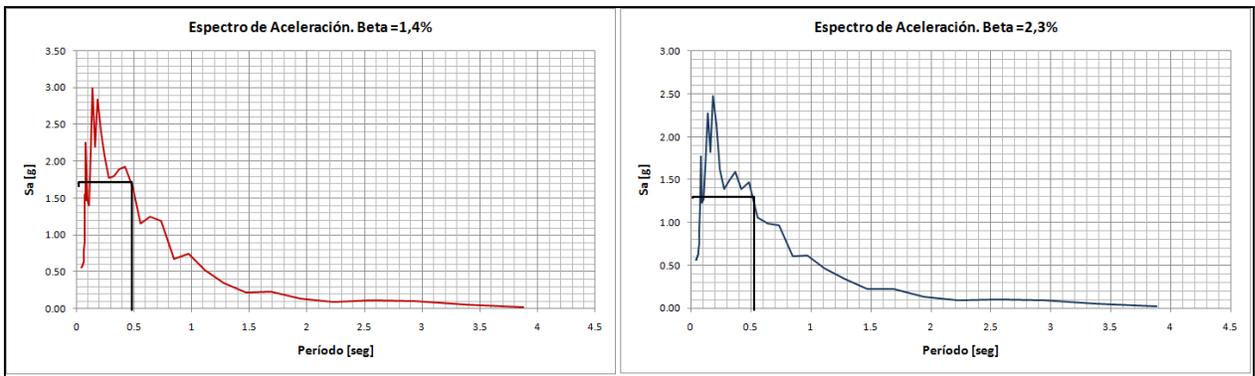


Figura 5.67. Espectro de aceleración para Llolleo a un 75%.

De los gráficos mostrados en las figuras 5.65, 5.66 y 5.67 en conjunto con las tablas 4.5 y 5.3 se resume lo siguiente:

Tabla 5.7. Comparación entre la aceleración espectral y aceleración de los ensayos para Llolleo escalado.

Registro	Conexión Nitinol		Conexión CuAlBe	
	Aceleración Espectral [g]	Aceleración del Ensayo [g]	Aceleración Espectral [g]	Aceleración del Ensayo [g]
Llolleo al 25%	0,46	0,35	0,56	0,48
Llolleo al 50%	0,88	0,45	1,2	-
Llolleo al 75%	1,3	-	1,75	-

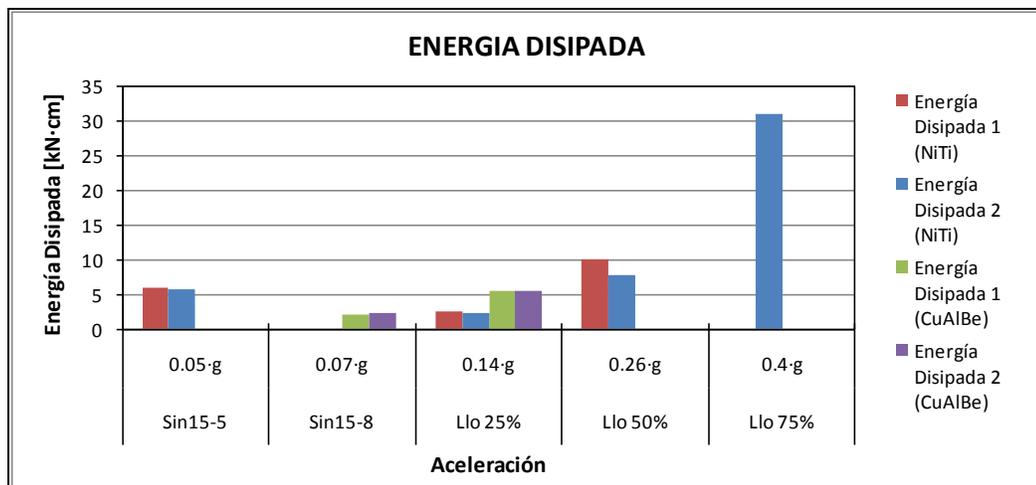


Figura 5.68. Energía Disipada.

La figura 5.68 muestra la energía disipada por ambas conexiones para distintas señales de excitación. Esta energía fue calculada a partir de las curvas “Corte Basal v/s Desplazamiento de Techo”, a lo que se le llamó Energía Disipada 1, calculada a partir del área encerrada por la envolvente de las curvas; y a partir de las curvas “Tensión-Deformación unitaria” de las barras de la conexión, lo que se denominó Energía Disipada 2, calculada como el área encerrada por la envolvente de los ciclos mayores.

Se observa que la energía calculada por ambos métodos es prácticamente igual, a excepción del caso Lolloo a un 50%, debido a que en aquel ensayo los pernos de los apoyos se encontraban apretados, por lo que se introdujo un disipador friccional, adicional a la disipación de las barras de Nitinol y se obtuvo que la Energía Disipada 1 fuera mayor a la Energía Disipada 2.

En los otros casos la diferencia entre ambas formas de cálculo de disipación es despreciable.

No se cuenta con datos de comparación para el registro de Lolloo a un 75%, ya que no se disponen de datos para estimar el desplazamiento del techo, debido a que en aquel ensayo falló el acelerómetro A2, que medía la aceleración longitudinal, y no se contaba con otro instrumento para medir el desplazamiento de la estructura. Sin embargo se esperaría el mismo resultado que para el caso de Lolloo al 50%, puesto que los pernos de los apoyos se encontraban apretados.

CAPITULO 6

Conclusiones y Recomendaciones

En este trabajo se construyó un marco espacial de acero con conexiones SMA, el cual se ensayó en una mesa vibradora bajo la acción del registro Lolloo N10E-Marzo de 1985- y señales sinusoidales de frecuencia y amplitud variables.

Con anterioridad a la ejecución de los ensayos, se realizó un modelo en Ruaumoko para tener un orden de magnitud de los resultados esperados, usando propiedades de las barras de NiTi de acuerdo a Espinoza [6]. Al modelo se aplicó el registro de Lolloo sin escalar obteniéndose tensiones en las barras de Nitinol cercanas a los 460 [MPa] y deformaciones cercanas al 3,5%. Sin embargo, experimentalmente estas tensiones se vieron superadas utilizando el registro escalado en un 50%. También se encontraron diferencias en el período de la estructura, amortiguamiento y deformación de las barras, entre otros. Estas diferencias se deben principalmente a dos razones. Una de ellas es constructiva, pues no se pudieron materializar de buena forma consideraciones hechas en el modelo, como el apoyo rotulado o paralelismo en las barras de Nitinol. El otro motivo fue el modelamiento de la conexión, para lo cual se usó un resorte rotacional con propiedades de rigidez, incluida la que aporta la pretensión de las barras. Este aumento de rigidez se simuló mediante la rigidez geométrica, por lo tanto la conexión modelada nunca inicia el análisis con carga inicial, por lo que la fuerza que toma es inferior a la real. Además, al resorte rotacional se le impone un modelo histerético incluido en el software, el cual no admite deformaciones remanentes, con ciclos de histéresis bastante mayores que los reales, lo que se traduce en un amortiguamiento mayor.

En cuanto a los ensayos con el registro Lollole N10E se puede comentar lo siguiente:

- Conexión SMA Nitinol:

En los primeros ensayos realizados con el registro de Lollole escalado a un 25% se obtuvieron ciclos de carga y descarga “angostos”, que se asemejan más bien a un comportamiento elástico. Sin embargo, a medida que se repetían los ensayos con la misma señal de entrada, el comportamiento de las barras fue mejorando hasta obtener curvas como las que se muestran en la figura 5.7 donde se obtuvo, para las barras superiores, una deformación unitaria máxima de 0,93% para una tensión de 370 [MPa] y una deformación mínima de -0,05% correspondiente a una tensión de 80 [MPa]. No se produjeron deformaciones remanentes considerables en las barras. No obstante, en las barras superiores del nudo 4 se llegó a 0,04 [mm] de deformación por debajo de la deformación inicial, esto debido a la pérdida de pretensión inicial, la cual fue de alrededor de 3 a 6 [kgf]. Se observa simetría en la histéresis desarrollada en el nudo 4.

Lo mismo ocurrió en los ensayos con el registro de Lollole escalado a un 50%, obteniéndose curvas con una histéresis más marcada en las últimas pruebas con ese registro. Las tensiones máximas en las barras son del orden de los 515 [MPa] con deformaciones unitarias máximas de alrededor del 1% al 1,5%. En estos ensayos las curvas cíclicas sufren desplazamientos, pudiéndose ver hasta tres series de ciclado en torno a puntos distintos (ver figura 5.18). Para este nivel de solicitaciones, la pérdida de pretensión se hace más evidente, llegando a perderse alrededor de 35 [kgf] en las barras superiores del nudo 1. Sin embargo, no todas las barras se descargan a este nivel; en promedio la pérdida de pretensión resultó ser del orden de los 15[kgf] a 20 [kgf]. Se alcanzaron deformaciones residuales del orden de 0,05 [mm] en las barras inferiores del nudo 1. Si bien tanto en las barras superiores como inferiores se aprecia un comportamiento histerético, y por ende disipación de energía, no se observa una clara simetría en el comportamiento ya que existe una marcada diferencia entre las deformaciones alcanzadas por las barras superiores e inferiores.

Se realizó un ensayo con el registro escalado al 75%, pero se saturaron todas las celdas de carga. Pese a esto, se decidió incluir los resultados de este ensayo debido a que la extrapolación realizada por el filtro utilizado es depreciable si se hace una comparación entre la señal filtrada y sin filtrar. Las curvas obtenidas se asemejan a las curvas de histéresis que se encuentran en la literatura (figura 5.28); sin embargo, presentan el mismo comportamiento de desplazamiento que se advirtió en el ensayo anterior. Se obtuvieron tensiones máximas en el NiTi cercanas a los 520 [MPa], con deformaciones máximas alrededor del 2% al 4%. La disminución de la pretensión inicial es aún más considerable, perdiéndose casi completamente en las barras superiores de la conexión del nudo 1 (pérdida de 141,8 [kgf]). Las deformaciones residuales también aumentan, llegando a 0,2 [mm] para las barras inferiores del nudo 1, lo que corresponde a una deformación del 0,15% si se considera un largo útil de 13 [cm].

Se creyó, en un comienzo, que el desplazamiento de las curvas tensión deformación que ocurre con los registros de Lollole al 50% y 75%, se debía al deslizamiento de las barras en las mordazas de sujeción. Ante esto se decidió incorporar trozos de limas ubicadas entre las barras y las

mordazas con el fin de mejorar la sujeción. Se ensayó el nuevo sistema de mordazas sin encontrar evidencia de deslizamiento.

Al repetir un ensayo para el registro de Lolloleo al 50%, sin cambios en los resultados, se descartó la teoría del deslizamiento. Una posible explicación a este fenómeno radica en la característica que poseen los sismos chilenos en general, y en particular el registro de Lolloleo, que son peaks consecutivos de alta frecuencia. Por lo tanto, es posible que las barras no alcancen a recuperar su forma inicial de un peak a otro quedando con deformaciones momentáneas que se traducen en curvas de histéresis cuyos ciclos se inician en puntos distintos. Esto se observa en la variación de la deformación que experimentan las barras superiores del nudo 3 (figura 5.17), donde las deformaciones oscilan en torno a tres puntos distintos durante la serie de tiempo.

- Conexión SMA CuAlBe:

Para el registro de Lolloleo a un 25% se obtuvo una tensión máxima de 261 [MPa] y una tensión mínima de -3,4 [MPa] en la barras superiores, mientras que las barras inferiores llegaron a una tensión máxima de 279 [MPa] y -3,5 [MPa] de tensión mínima. La deformación máxima y mínima de las barras superiores son del orden de 0,8% y -0,04% respectivamente. En las barras inferiores las deformaciones son del orden de 1,2% para la deformación máxima y 0,08% para la mínima. Hubo una pérdida de pretensión promedio de 10 [kgf], específicamente 12 [kgf] en las barras inferiores del nudo 4. En algunas barras, las deformaciones remanentes alcanzaron los 0,12 [mm], como es el caso de las barras inferiores del nudo 4.

Con respecto a los ensayos con señales sinusoidales se observa lo siguiente:

- Conexión SMA Nitinol:

Las curvas de histéresis obtenidas en estos ensayos (realizados con el sistema de sujeción mordazas más limas) se asemejan a las de los ensayos con el registro de Lolloleo al 50%, en cuanto al nivel de tensiones y deformaciones alcanzado. Sin embargo, los ciclos de carga y descarga son más claros en las curvas donde se utilizó una señal sinusoidal (ver figura 5.37).

En esta serie de ensayos no se observó el fenómeno de desplazamiento de las curvas que se mencionó anteriormente, lo que refuerza la tesis de que este comportamiento depende de la sollicitación dinámica actuante y que no hubo problemas de deslizamiento de las barras con respecto a las mordazas. Se observó disminución de la pretensión inicial, al igual que en los ensayos con el registro de Lolloleo, y un aumento leve en la deformación remanente de algunas barras (0,08 [mm] en las barras del nudo 4). Las tensiones máximas son cercanas a los 450 [MPa] y deformaciones unitarias máximas alrededor del 1,2% al 1,8%. No se observó una marcada simetría en el comportamiento de los nudos debido a que en la mayoría de los casos existe una diferencia entre los valores máximos y mínimos de tensión y deformación de las barras superiores e inferiores de cada nudo.

- Conexión SMA CuAlBe:

En el nudo 4 se observaron tensiones máximas entre los 220[MPa] a 250 [MPa], con deformaciones máximas del orden del 0,5% a 0,75%. Al igual que en los casos anteriores hubo pérdida de la pretensión inicial al concluir los ensayos (alrededor de 5 [kgf] en las barras inferiores del nudo 4). También se observó la presencia de deformación remanente de las barras, de aproximadamente 0,05% en las barras inferiores del nudo 4.

En todos los ensayos, con conexión SMA de NiTi y CuAlBe, se utilizó un extensómetro en una de las barras, de 25 [mm] en algunos ensayos y de 50 [mm] en otros. La curva tensión deformación obtenida con el extensómetro de 50[mm] de rango, presenta un comportamiento histerético superelástico similar a la curva de histéresis obtenida con el potenciómetro equivalente al extensómetro, excepto en el ensayo N°16, donde la curva tensión-deformación derivada del extensómetro presenta un comportamiento más bien elástico, aunque se aprecia cierta histéresis en la zona de mayores tensiones y deformaciones. En los ensayo N°5 y N°7 se utilizó un extensómetro de 25 [mm] de rango. En estos casos las curvas siempre difieren de las obtenidas utilizando los potenciómetros, mostrando siempre un comportamiento elástico. Esto podría deberse a que en la zona de medición del extensómetro (zona central de la barra), el material no experimenta cambios de fase, no produciéndose fluencia, lo cual sí ocurre en las zonas cercanas a la sujeción (extremos de las barras), lo que explica que las curvas hechas a partir de los potenciómetros sí muestren fluencia.

Si bien hubo deformaciones remanentes, éstas fueron de magnitud despreciable. La mayor deformación fue de 0,2 [mm], lo que corresponde a una deformación unitaria del 0,15% por lo que se puede considerar que no existió un deterioro en su capacidad de recuperar deformaciones. Al aplicar las señales sinusoidales de amplitud constante, las deformaciones remanentes son aún menores.

La conexión SMA utilizada para tomar el momento, mantuvo su forma original y resistencia, tras toda la serie de ensayos, no observándose daños en las columnas, vigas o en algún otro elemento. Ante esto se puede decir que el NiTi y CuAlBe efectivamente protegieron la estructura, evitando deformaciones plásticas o fractura en las soldaduras, disipando la energía liberada por el sismo a través de los ciclos de histéresis.

Con respecto a la energía disipada, se observa que ambos materiales SMA disipan energía. Se puede establecer una comparación entre el NiTi y el CuAlBe para el registro de L1ollo al 25%. En la figura 5.67 se observa que el CuAlBe disipó mayor energía que el Nitinol. Esto se debe a que la aleación en base a Cobre es menos rígida que el NiTi, pudiendo alcanzar mayores deformaciones, lo que se traduce en ciclos de histéresis más amplios y por consiguiente una mayor capacidad de disipación.

Para mejorar los resultados en futuras investigaciones, sería útil lo siguiente:

- Utilizar un sistema de mordazas distinto, donde haya un diseño acabado de ellas, tomando en cuenta la dureza de los materiales involucrados, sus propiedades mecánicas y metalografía de los materiales a utilizar.
- Una mejor precisión en la fabricación de las estructuras o elementos a ensayar, ya que en este caso hubo muchos problemas de montaje, donde no coincidían de buena manera las piezas. De esta forma podrían evitarse factores externos no deseados, como la fricción entre algunos elementos.
- El sistema de pretensión utilizado no fue el idóneo. Se pretensaron las barras superiores o inferiores al mismo tiempo, asumiendo que ambas tomaban la mitad de la carga aplicada, donde una celda de carga medía la fuerza en ambas barras. Con el sistema utilizado es muy probable que las barras no queden rectas; ante esto al iniciar el proceso de tensado, una de ellas comenzará a tomar carga antes que la otra. Lo ideal sería buscar la manera de pretensarlas individualmente, donde se asegure que cada barra quede con la misma tensión inicial.
- Si se usan potenciómetros para medir las deformaciones, es necesario preocuparse del montaje de éstos, tratando de no usar elementos anexos para extender el vástago. En este caso se utilizaron barras de acrílico como extensión del vástago para llegar a una referencia fija, obteniéndose resultados no concluyentes en algunas barras producto de posibles desangulaciones que hacían que el potenciómetro se trabase, no trabajando de manera adecuada.
- Sería útil realizar nuevos ensayos con registros de sismos tipo chileno incorporando un nuevo sistema de sujeción para las barras SMA de la conexión. Luego comparar con registros de baja frecuencia y más controlados para así concluir con certeza a que se debió el desplazamiento de las curvas de histéresis durante los ensayos con Lloleo al 50% y 75% y vislumbrar de mejor manera una futura aplicación de los SMA en la ingeniería sísmica chilena.
- Se recomienda realizar un tratamiento térmico a las barras SMA de Nitinol antes de ser ensayadas. Las utilizadas en esta memoria no tienen tratamiento térmico ni envejecimiento.
- Se recomienda, antes de realizar los ensayos definitivos, realizar pruebas de entrenamiento al material, como ensayos cíclicos controlados a una determinada frecuencia, ya que se observó un mejor comportamiento a medida que se realizaban los últimos ensayos con una determinada sollicitación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Abolmaali A., Treadway J., Aswath P., Lu F. K., McCarthy E. (2005)**, *"Hysteresis Behavior of T-stub Connections with Superelastic Shape Memory Fasteners"*, Journal of Constructional Steel Research Vol.62, issue 8, pp:831-838.
- [2] **Arellano, Daren (2002)**, *"Determinación del amortiguamiento en Estructuras con Disipadores de Energía de Material SMA de Cobre"*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [3] **Barrientos, José (2008)**, *"Montaje, Puesta en Marcha y Calibración de una Mesa de Vibrar Unidireccional"*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [4] **DesRoches, R., McCormick, J., and Delemont, M.A. (2004)**, *"Cyclical properties of Superelastic Shape Memory Alloys"*, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 130, Nº5, pp. 38-46, Junio.
- [5] **de la Flor, Silvia (2005)**, *"Simulación Numérica y Correlación Experimental de las Propiedades Mecánicas en las Aleaciones con Memoria de Forma"*, Tesis Doctoral para optar al grado Doctor Ingeniero Industrial, Universitat Politècnica de Catalunya.
- [6] **Espinoza Castillo, Carolina (2007)**, *"Caracterización de las Propiedades Superelásticas de Barras de Nitinol"*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [7] **Garrau, Sylvain (2008)**, *"Estudio Analítico de una Conexión Viga Columna usando Aleación SMA CuAlBe"*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.
- [8] **Iványi, Miklós (2000)**, *"Full-scale tests of steel frames with semi-rigid connections"*, Engineering Structures, 22 (2), pp. 168-179.
- [9] **Liu y Van Humbeeck, MANDSIDE PROJECT (1999)**, *"Memory Alloys for New Seismic Isolation and Energy Dissipation Devices"*, The Italian Department for National Technical Services, Rome.
- [10] **Ocel, J., DesRoches, R., Leon, R.T., Krumme, R., Hayes, J.R., and Sweeney, S. (2004)**, *"Steel Beam-Column Connections Using Shape Memory Alloys"*, ASCE Journal of Structural Engineering, Vol. 5, Nº1, pp. 732-740, Mayo.
- [11] **P. Lafortune, J. McCormick, R. DesRoches, P. Terriault (2007)**, *"Testing of Superelastic Recentering Pre-Strained Braces for Seismic Resistant Design"*. Journal of Earthquake Engineering.
- [12] **Sepúlveda León, José (2006)**, *"Diseño y Ensayo de un Disipador de Energía usando Aleación SMA CuAlBe Superelástica para Conexiones Viga Columna"*, Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Chile.

ANEXO A.
Gráficos conexión SMA de NiTi.

1. Ensayo N°2. Registro Lolloeo al 25%

1.1. Tensión – Deformación usando potenciómetros.

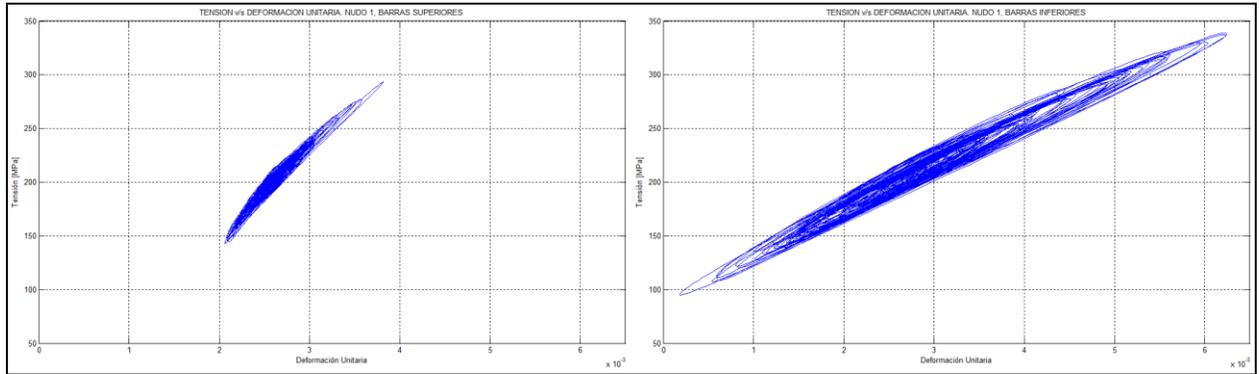


Fig.A1. Tensión - Deformación. Nudo 1

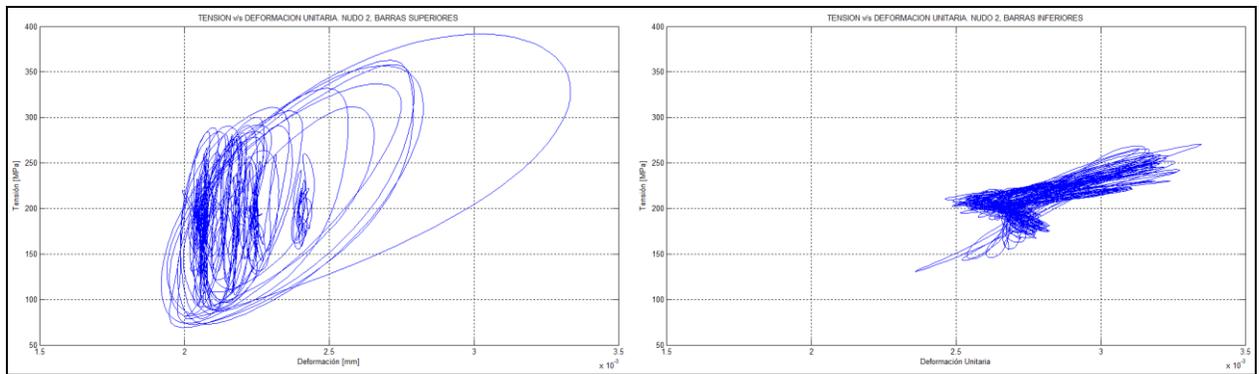


Fig.A2. Tensión - Deformación. Nudo 2

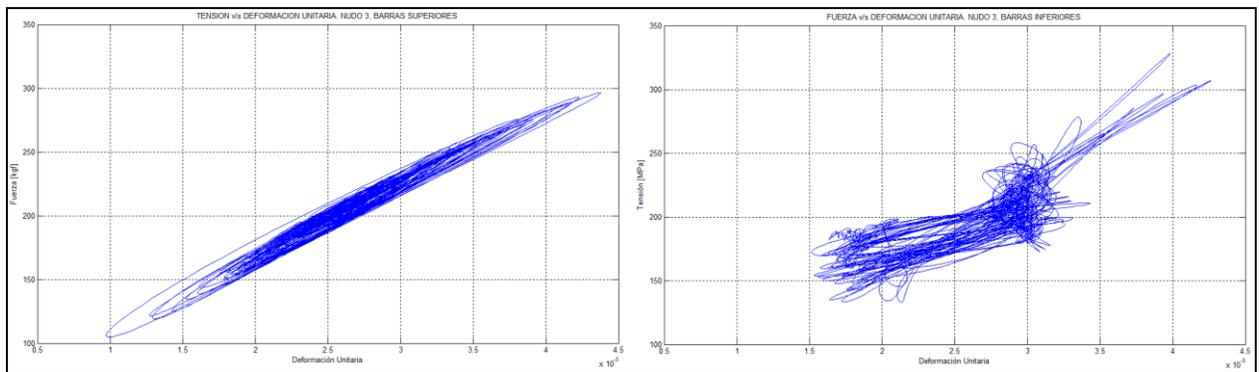


Fig.A3. Tensión – Deformación. Nudo 3

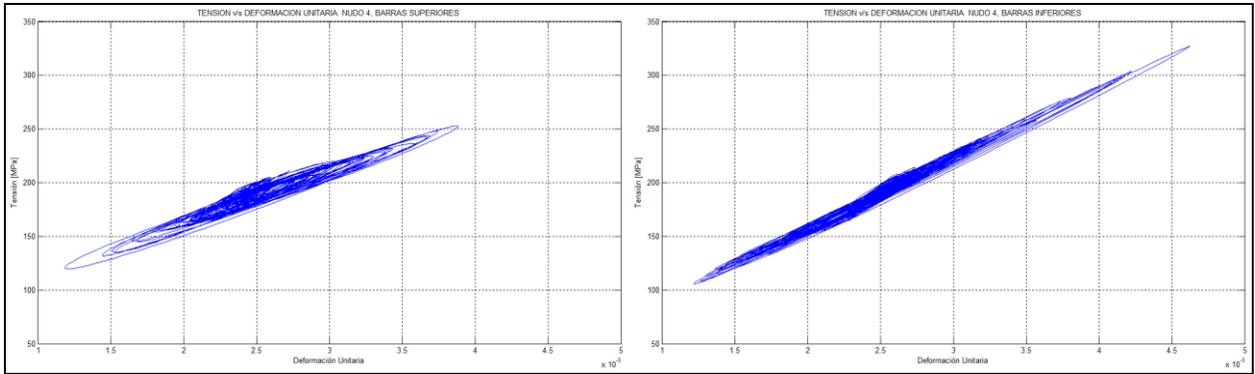


Fig. A4. Tensión – Deformación. Nudo 4

1.2. Tensión – Deformación usando extensómetro.

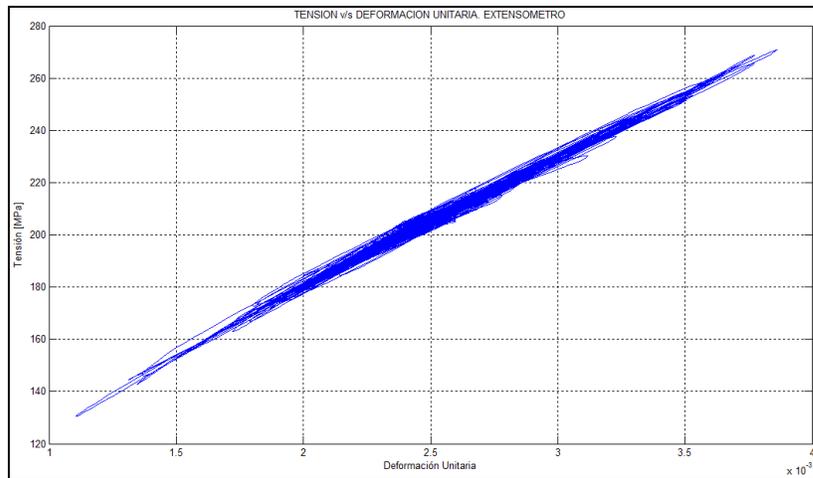


Fig. A5. Tensión – Deformación. Barra 4, Nudo 2.

2. Ensayo N°3. Registro Lloleo al 25%.

2.1. Tensión – Deformación usando potenciómetros.

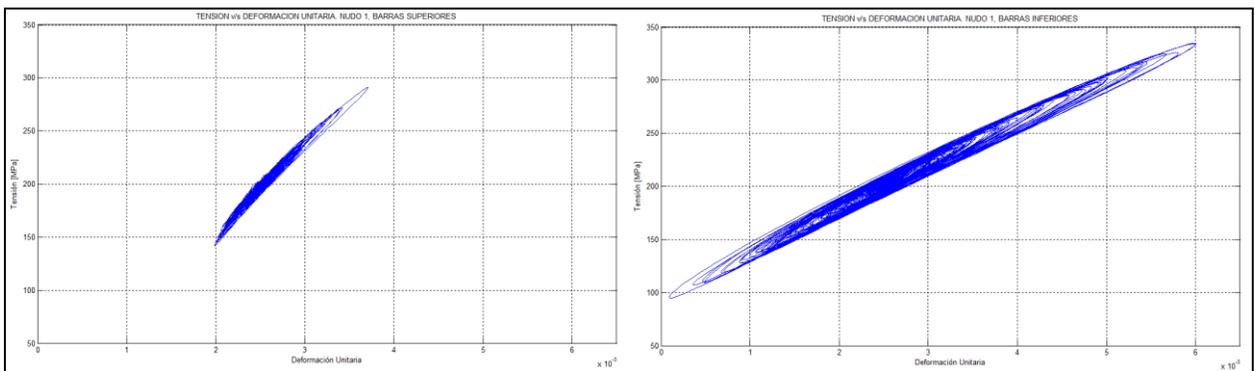


Figura A.6. Tensión - Deformación. Nudo 1.

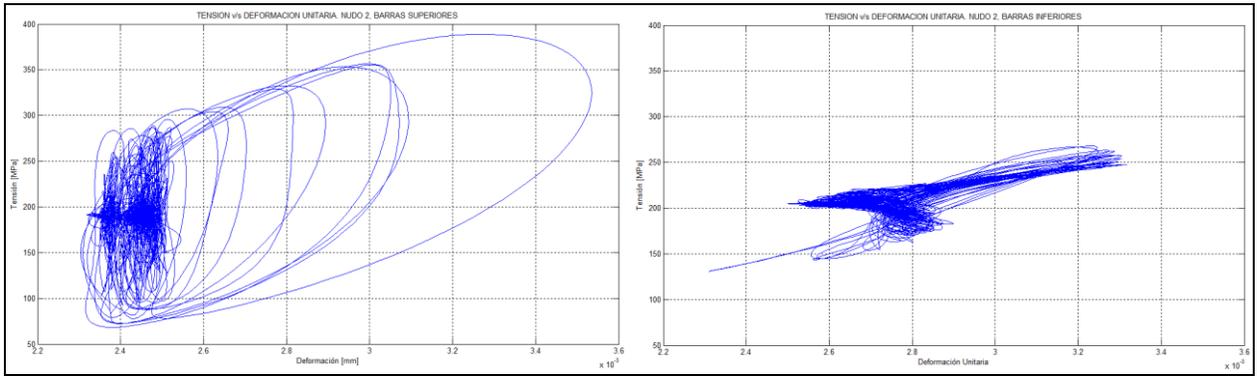


Figura A.7. Tensión – Deformación. Nudo 2.

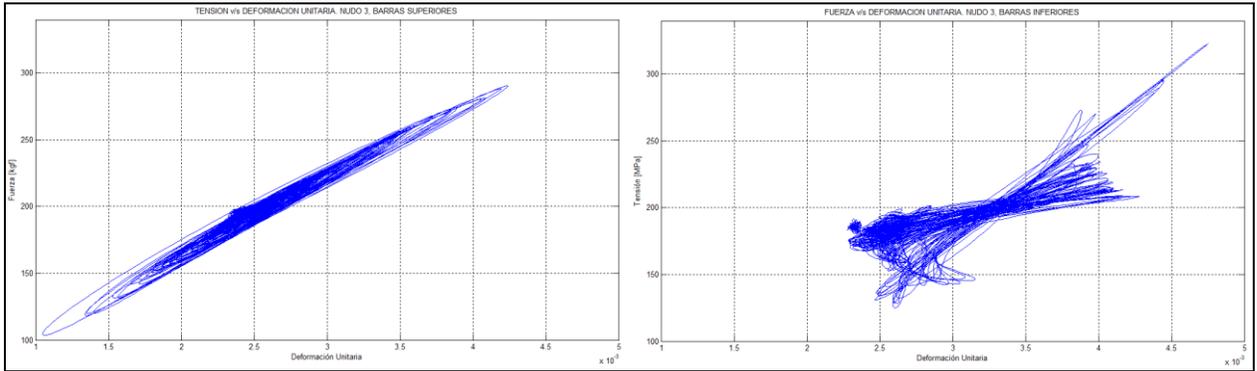


Figura A.8. Tensión – Deformación. Nudo 3.

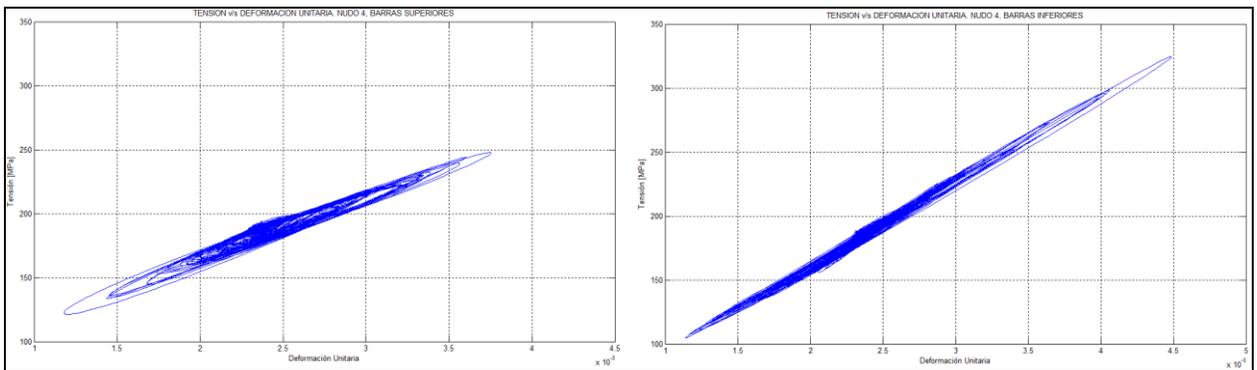


Figura A.9. Tensión – Deformación. Nudo 4.

2.2. Tensión – Deformación usando extensómetro.

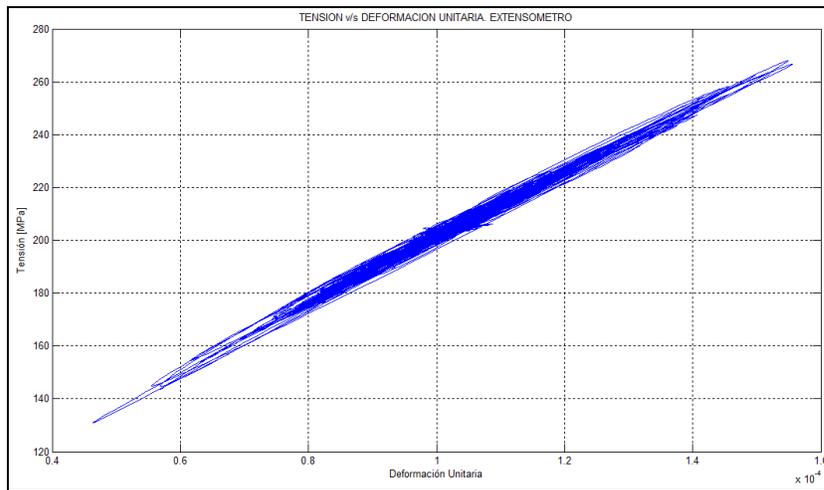


Fig. A10. Tensión – Deformación. Barra 4, Nudo 2.

3. Ensayo N°17. Registro Lloleo al 25%.

3.1. Tensión – Deformación usando potenciómetros.

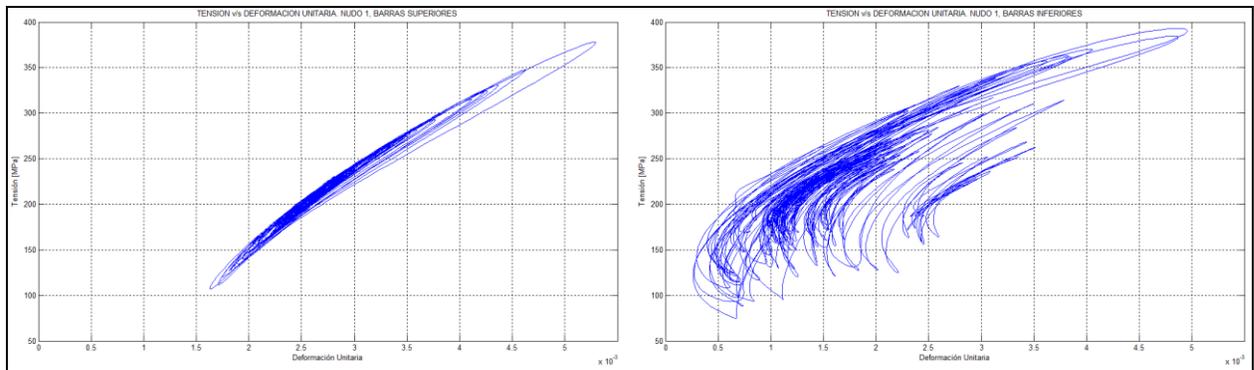


Figura A.11. Tensión – Deformación. Nudo 1.

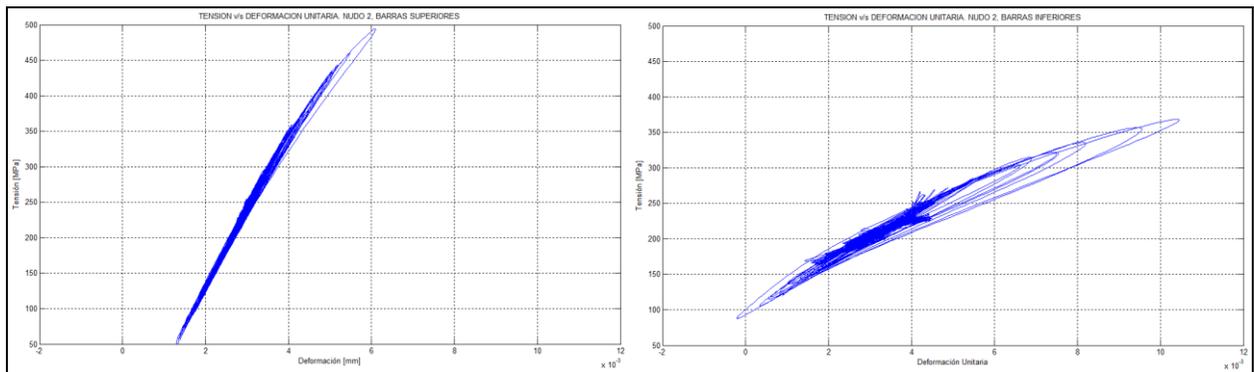


Figura A.12. Tensión – Deformación. Nudo 2

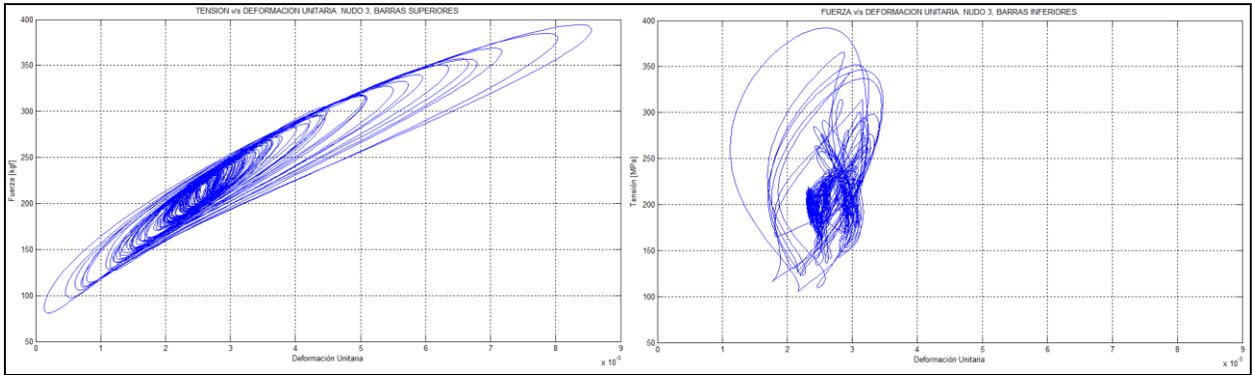


Figura A.13. Tensión – Deformación. Nudo 3.

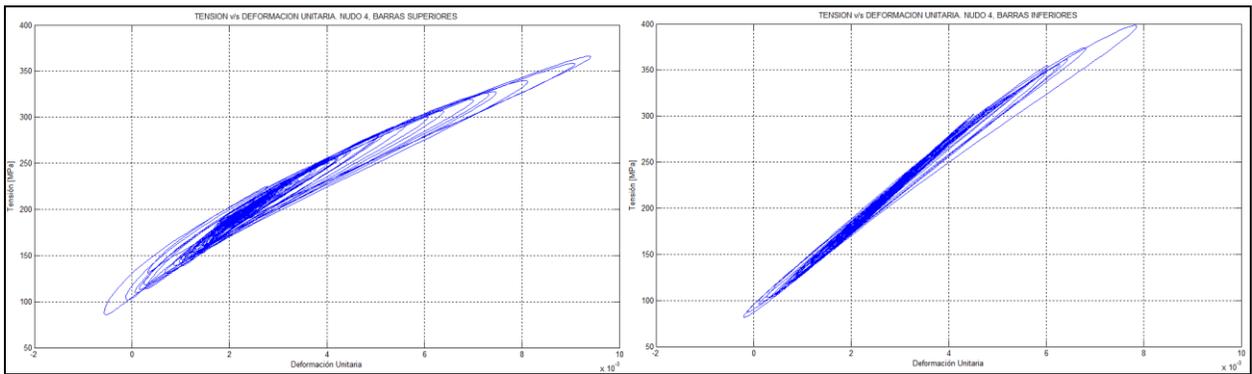


Figura A.14. Tensión – Deformación. Nudo 4.

3.2. Tensión – Deformación usando extensómetro.

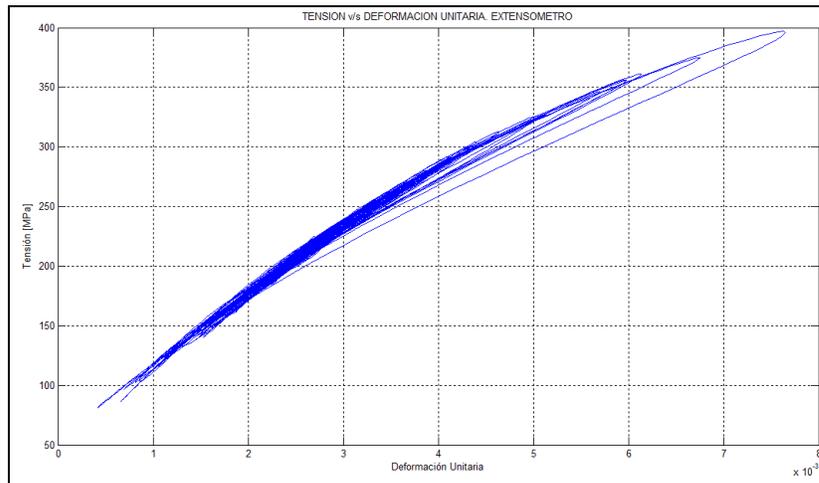


Figura A.15. Tensión – Deformación. Barra 4, nudo 2.

4. Ensayo N°18. Registro Llole al 25%.

4.1. Tensión – Deformación usando potenciómetros.

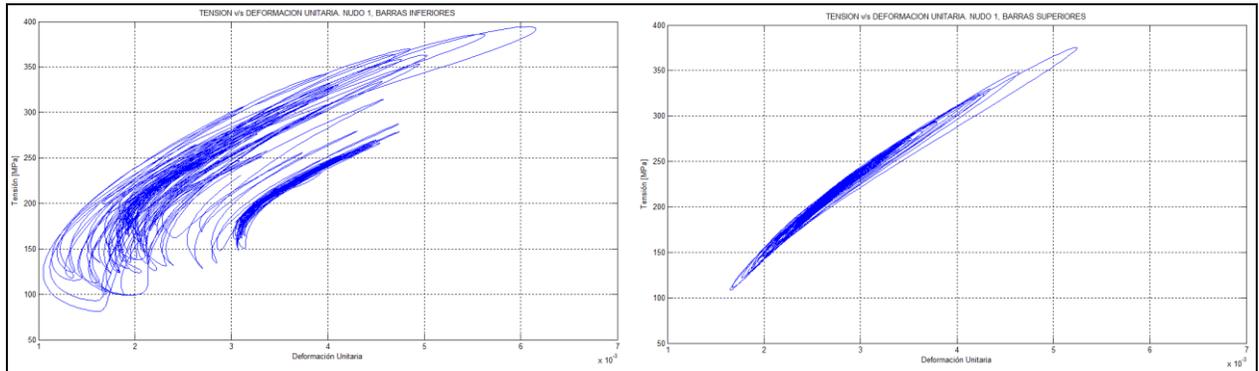


Figura A.16. Tensión – Deformación. Nudo 1.

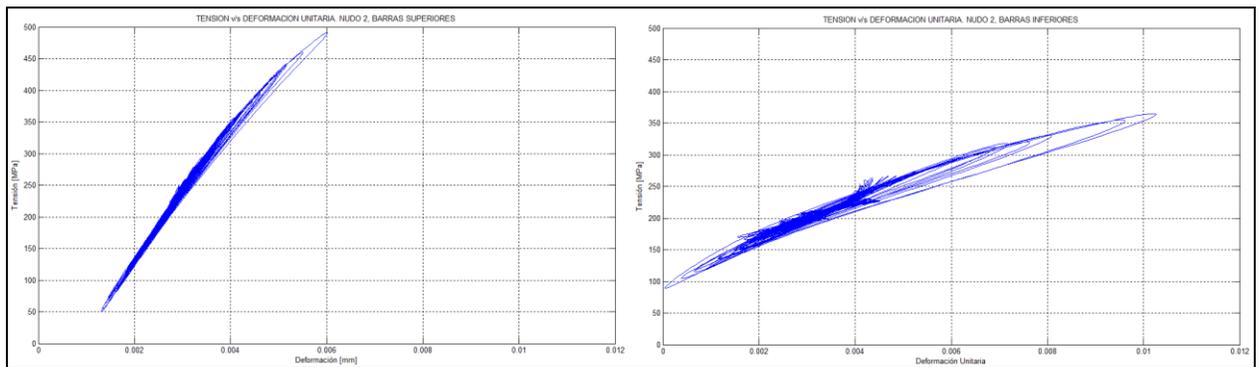


Figura A.17. Tensión – Deformación. Nudo 2.

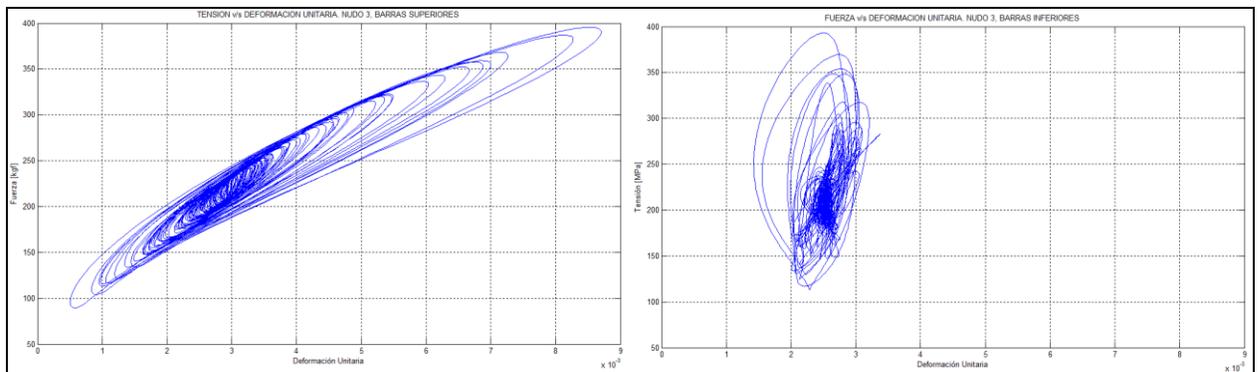


Figura A.18. Tensión – Deformación. Nudo 3.

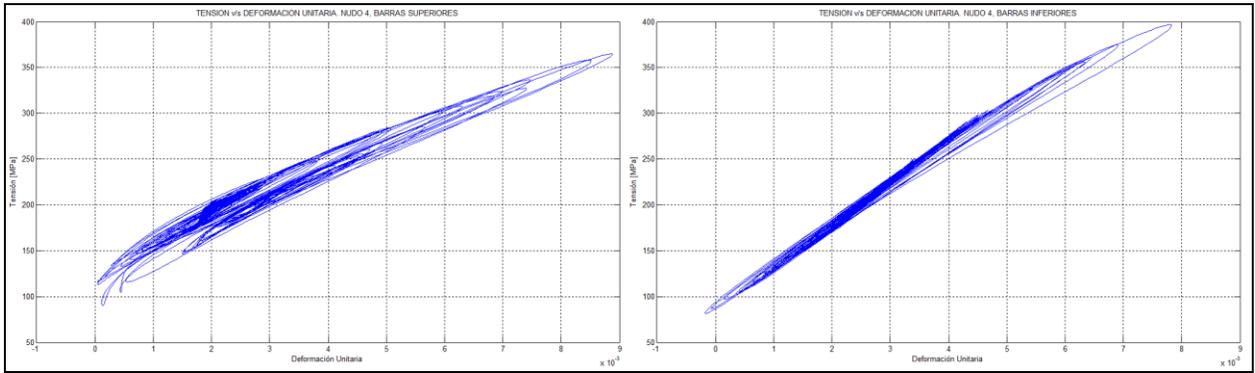


Figura A.19. Tensión – Deformación. Nudo 3.

4.2. Tensión – Deformación usando extensómetro.

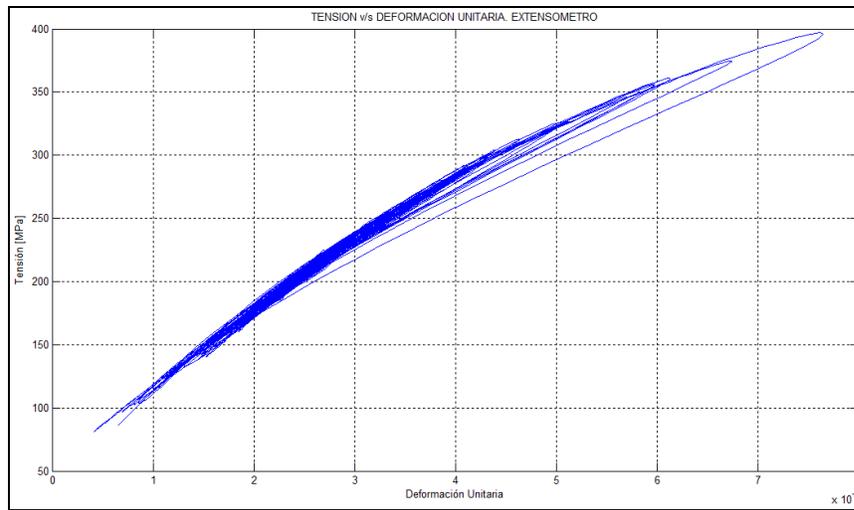


Figura A.20. Tensión – Deformación. Barra 4, nudo 4.

5. Ensayo N°5. Registro Lolloleo al 50%.

5.1. Tensión – Deformación usando potenciómetros.

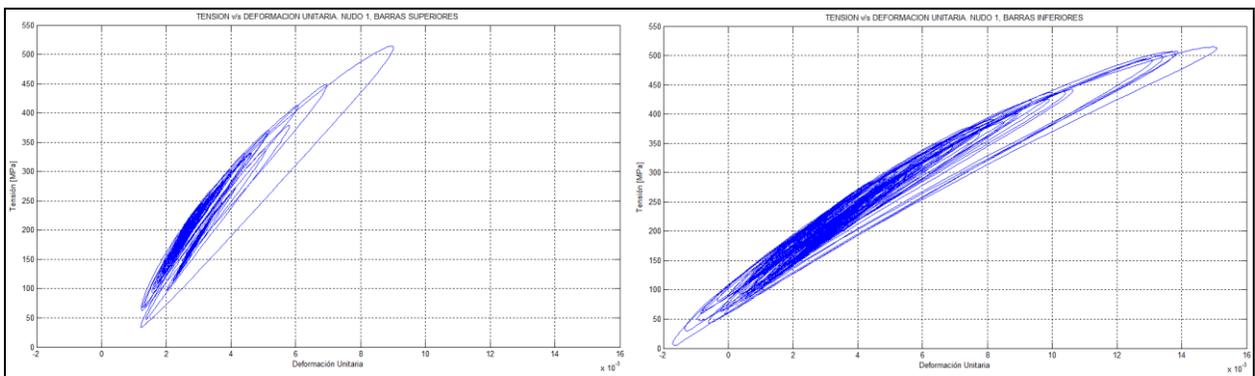


Figura A.21. Tensión – Deformación. Nudo 1.

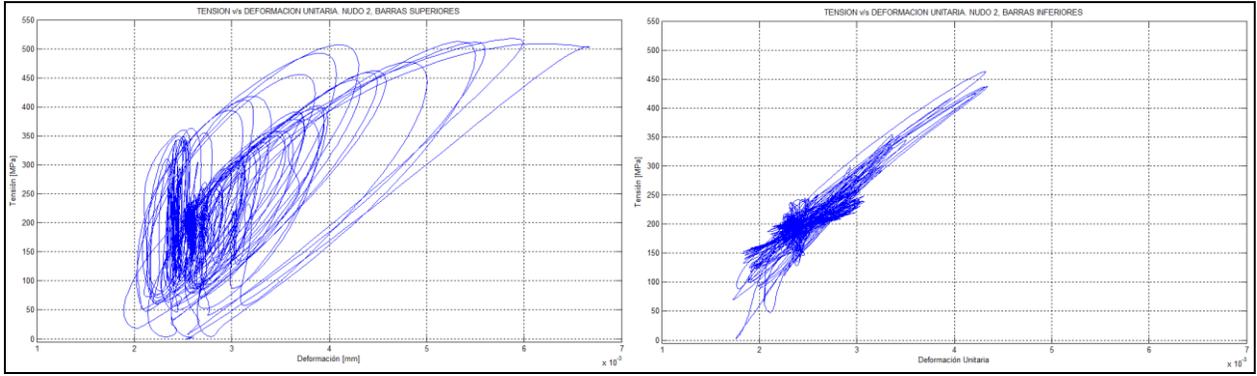


Figura A.22. Tensión – Deformación. Nudo 2.

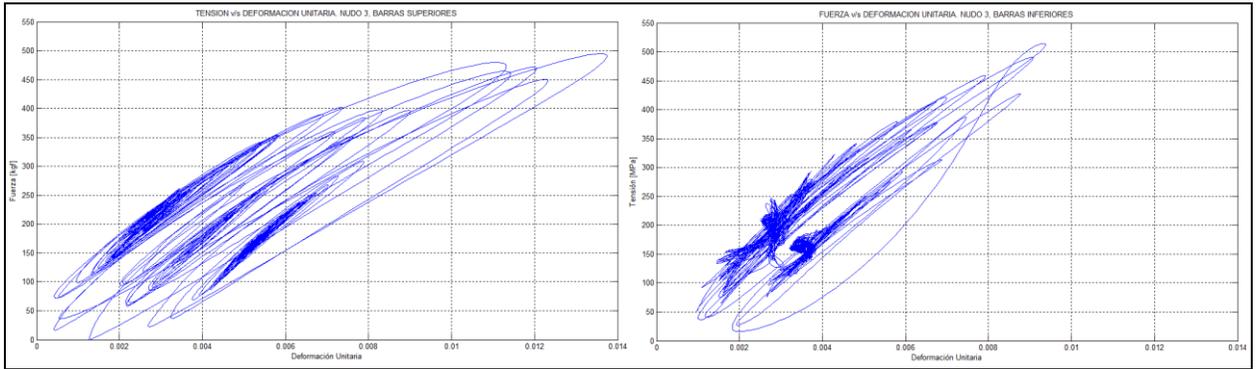


Figura A.23. Tensión – Deformación. Nudo 3.

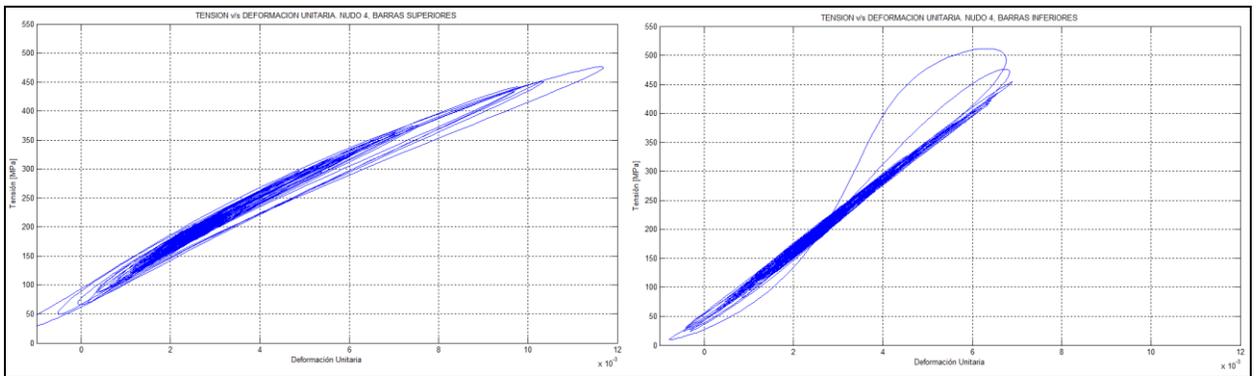


Figura A.24. Tensión – Deformación. Nudo 4.

5.2. Tensión – Deformación usando extensómetro.

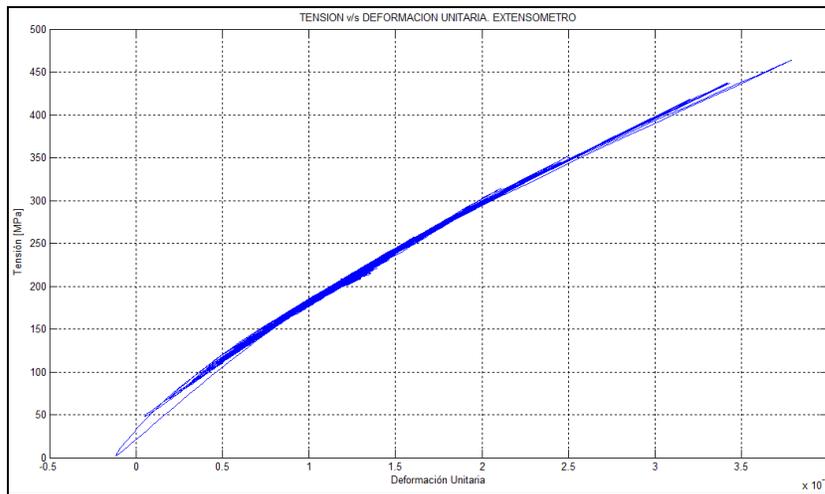


Figura A.25. Tensión – Deformación. Barra 4, nudo 2.

6. Ensayo N°7. Registro Llolejo al 75%.

6.1. Tensión – Deformación usando potenciómetros.

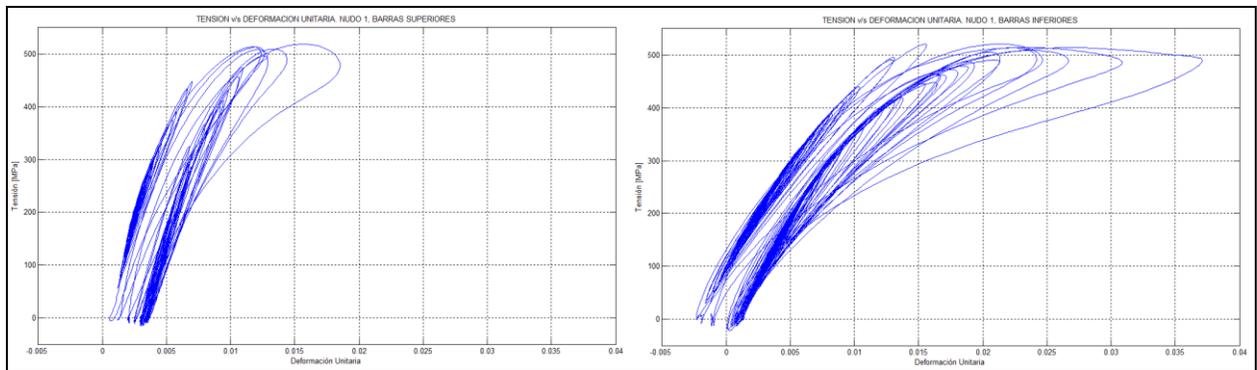


Figura A.26. Tensión – Deformación. Nudo 1.

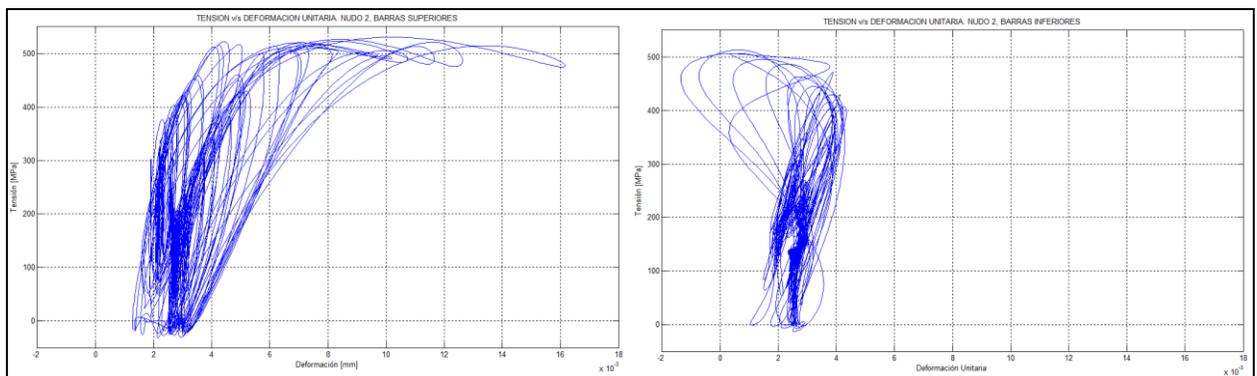


Figura A.27. Tensión – Deformación. Nudo 2.

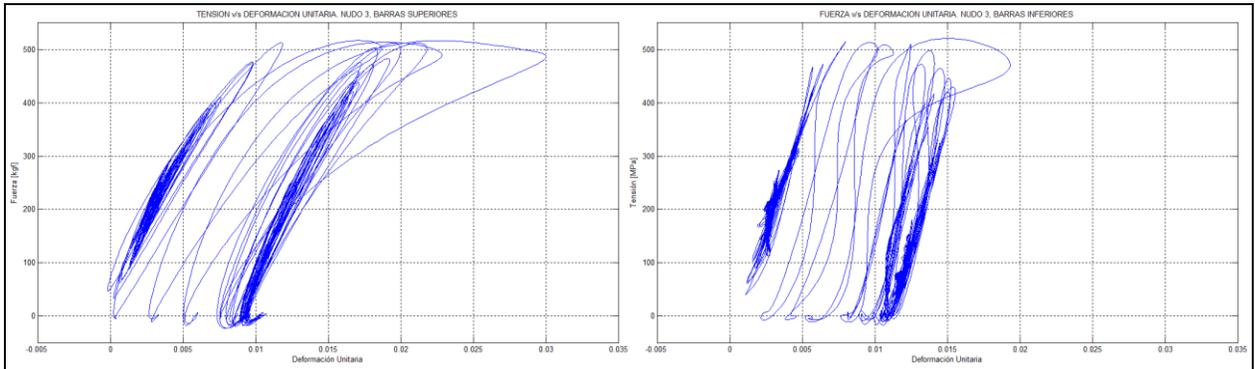


Figura A.28. Tensión – Deformación. Nudo 3.

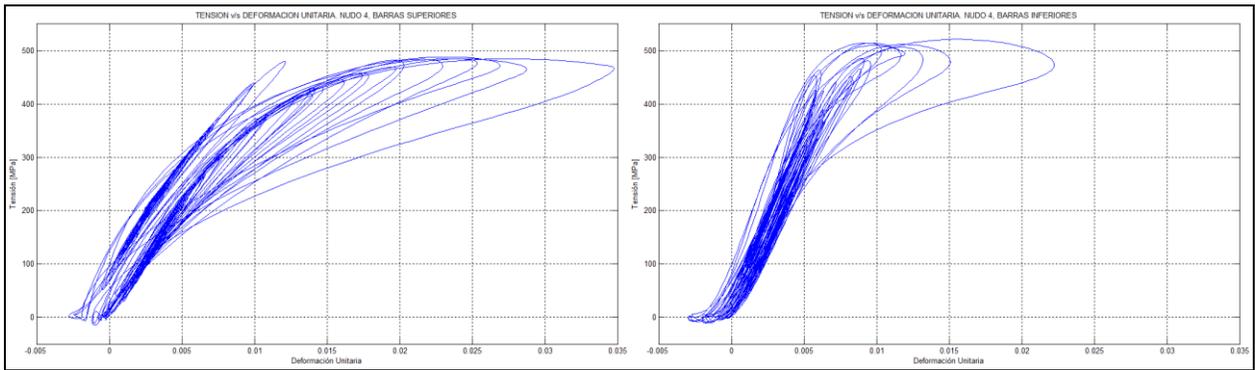


Figura A.29. Tensión – Deformación. Nudo 4.

6.2. Tensión – Deformación usando extensómetro.

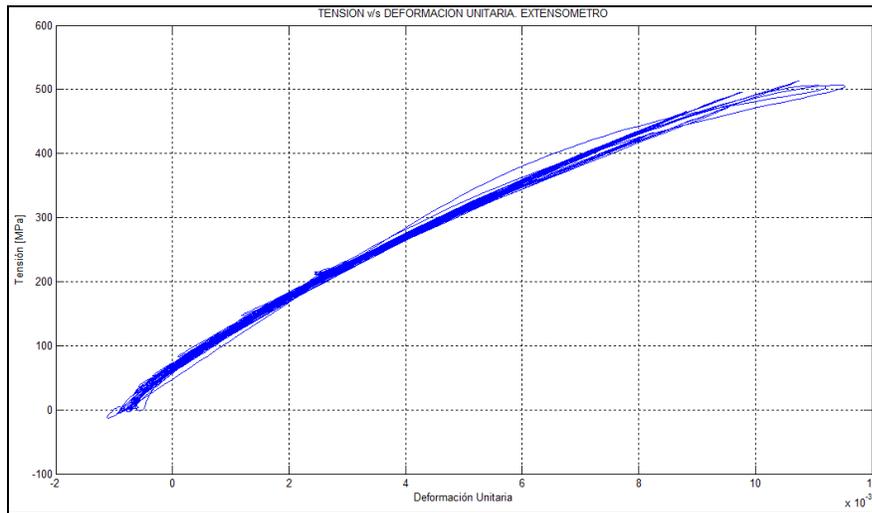


Figura A.30. Tensión – Deformación. Barra 4, nudo 2.

7. Ensayo N°16. Señal Sinusoidal 1,5[Hz] y 5[mm].

7.1. Tensión – Deformación usando potenciómetros.

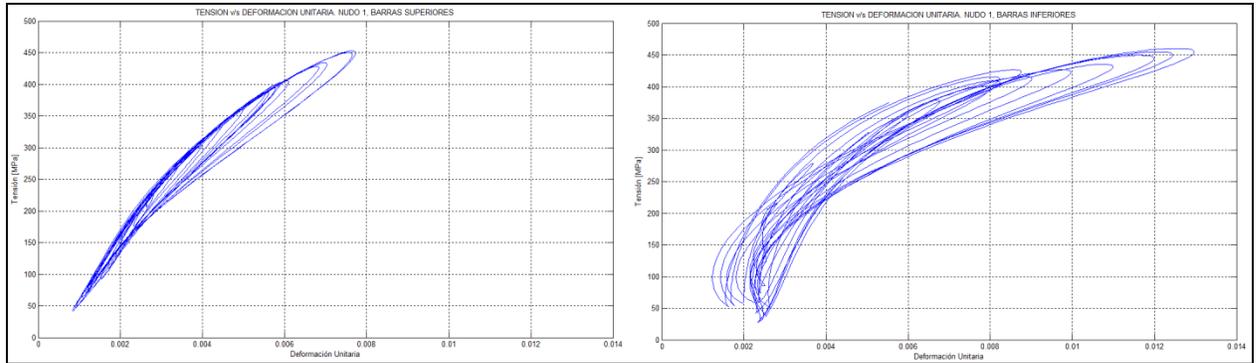


Figura A.31. Tensión – Deformación. Nudo 1.

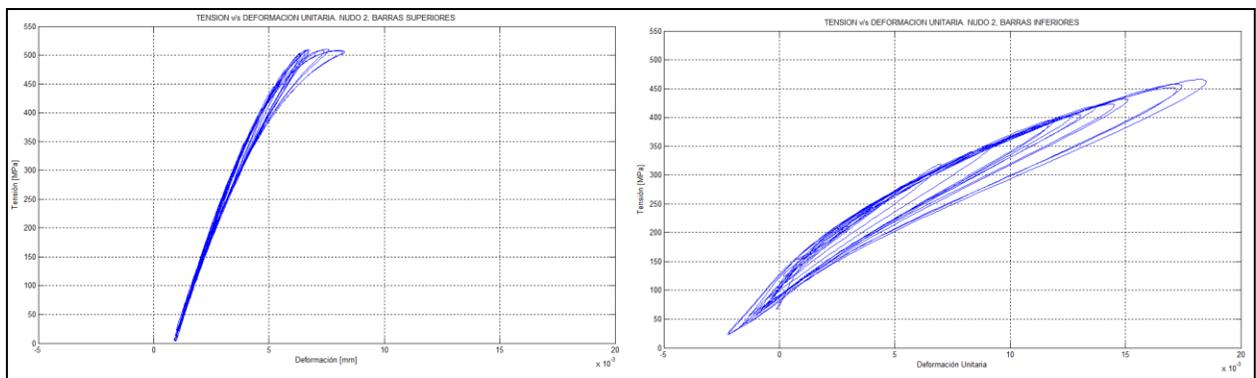


Figura A.32. Tensión – Deformación. Nudo 2.

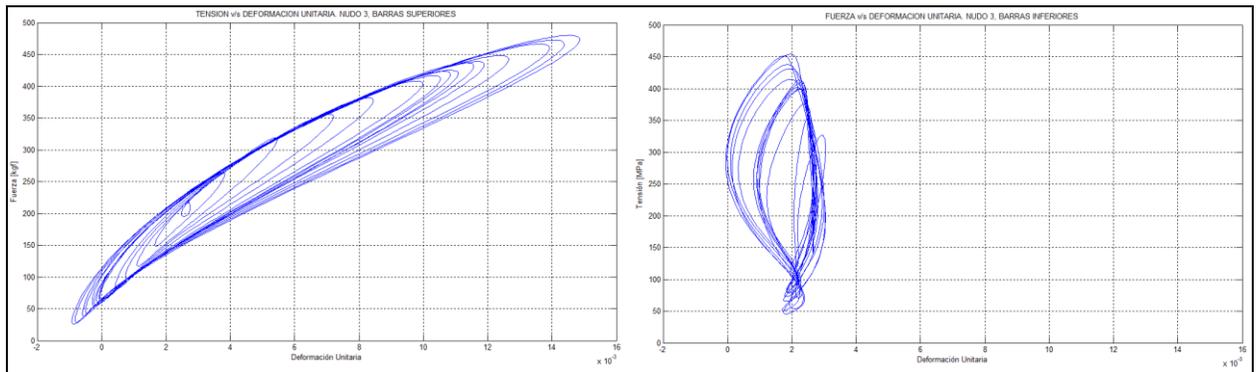


Figura A.33. Tensión – Deformación. Nudo 3.

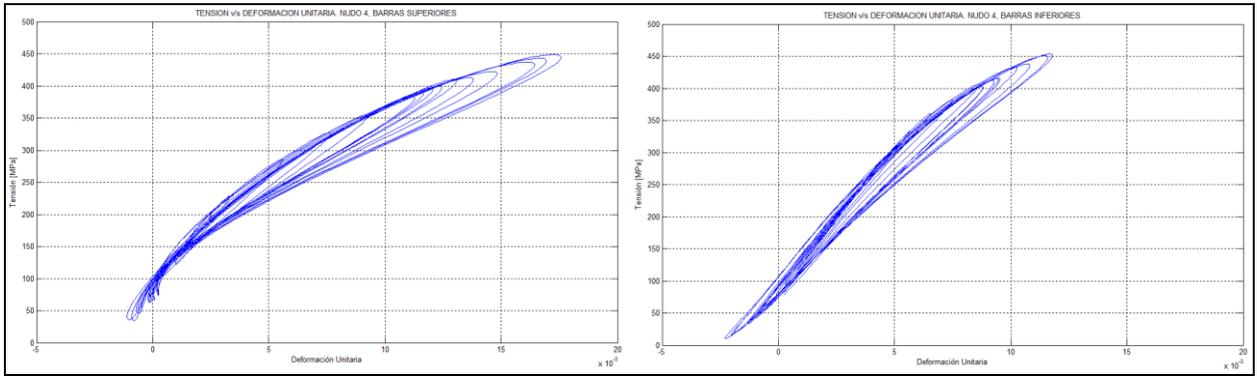


Figura A.34. Tensión – Deformación. Nudo 4.

7.2. Tensión – Deformación usando extensómetro.

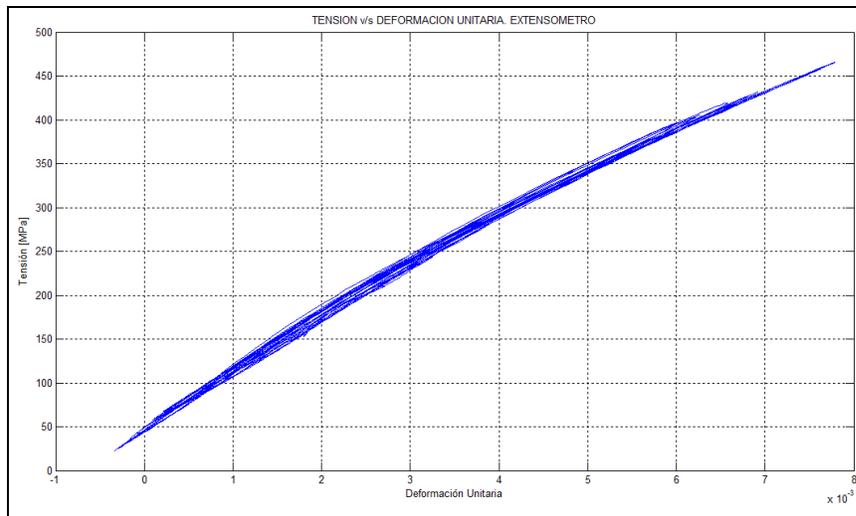


Figura A.35. Tensión – Deformación. Barra 4, nudo 2.

ANEXO B.
Gráficos conexión SMA de CuAlBe.

1. Ensayo N°25. Registro Llole al 25%.

1.1. Tensión – Deformación usando potenciómetros.

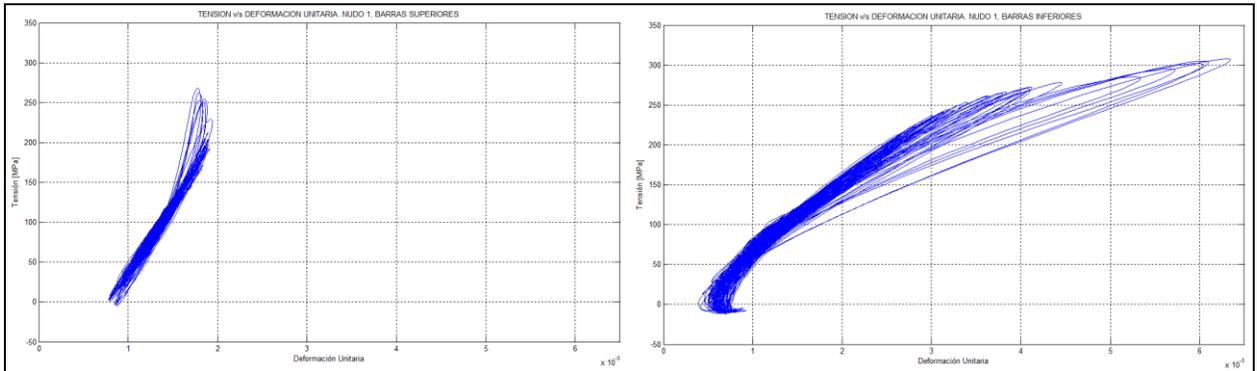


Figura B.1. Tensión – Deformación. Nudo 1.

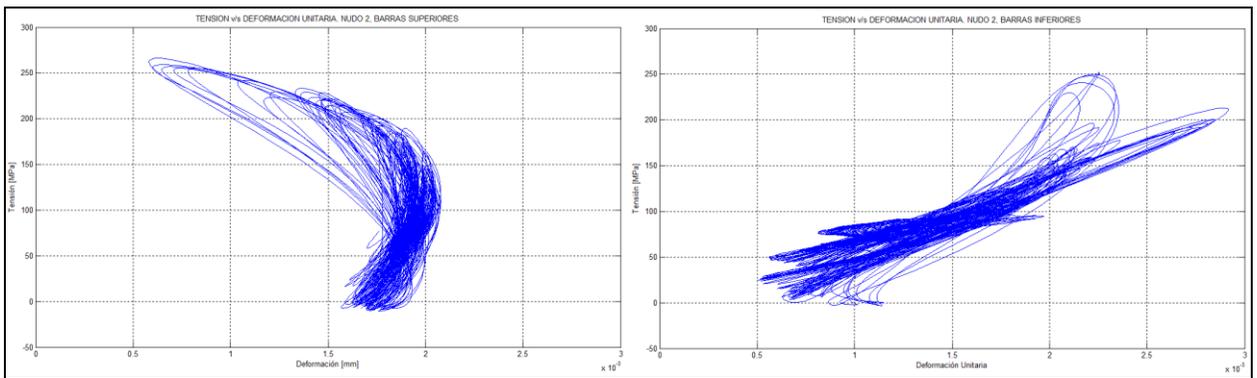


Figura B.2. Tensión – Deformación. Nudo 2.

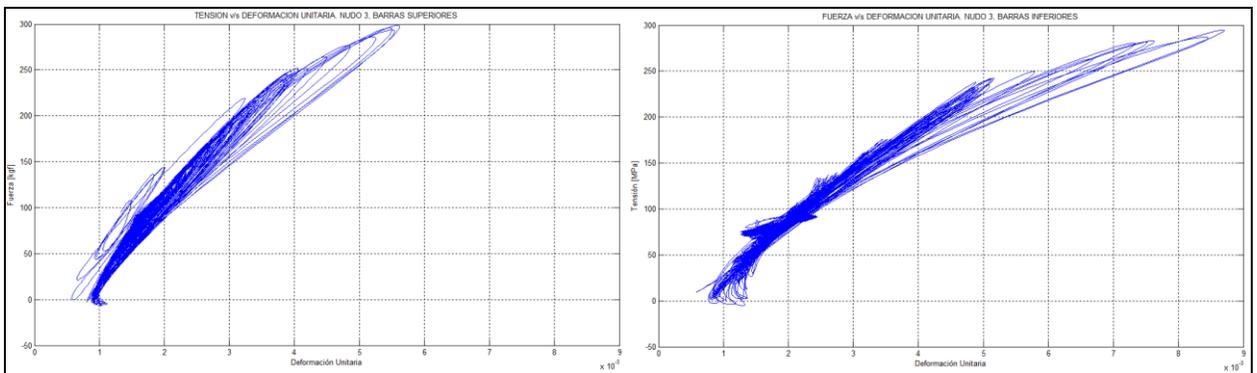


Figura B.3. Tensión – Deformación. Nudo 3.

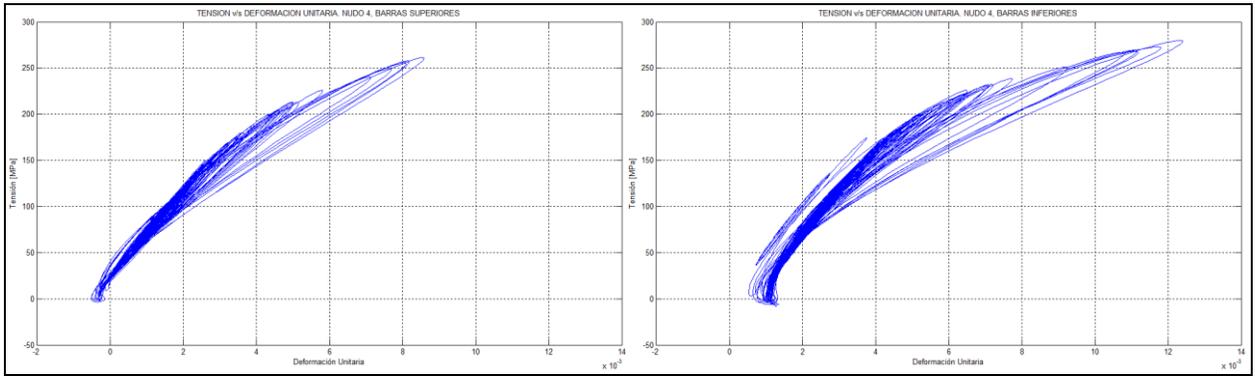


Figura B.4. Tensión – Deformación. Nudo 4.

1.2. Tensión – Deformación usando extensómetro.

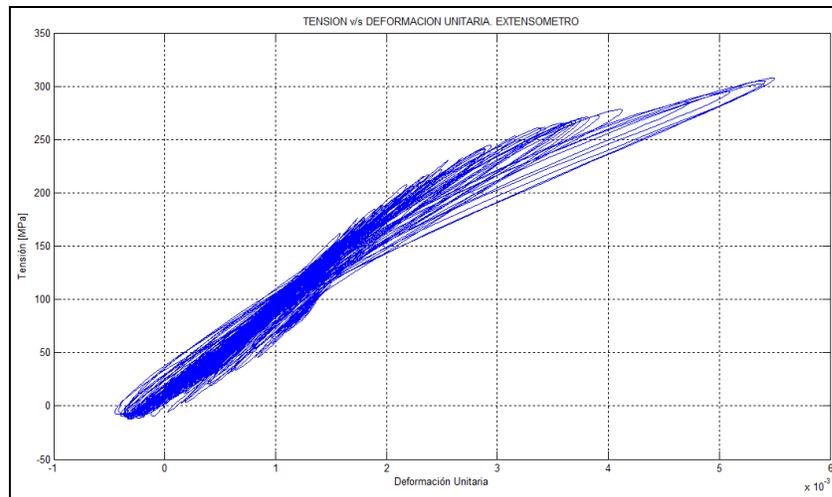


Figura B.5. Tensión – Deformación. Barra 4, nudo 1.

2. Ensayo N°23. Señal Sinusoidal 1,5[Hz] y 8[mm].

2.1. Tensión – Deformación usando potenciómetros.

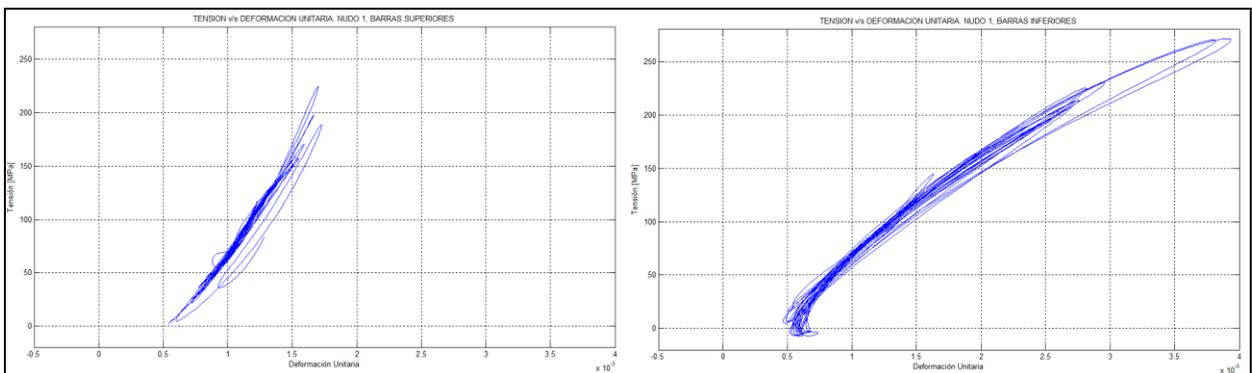


Figura B.6. Tensión – Deformación. Nudo 1.

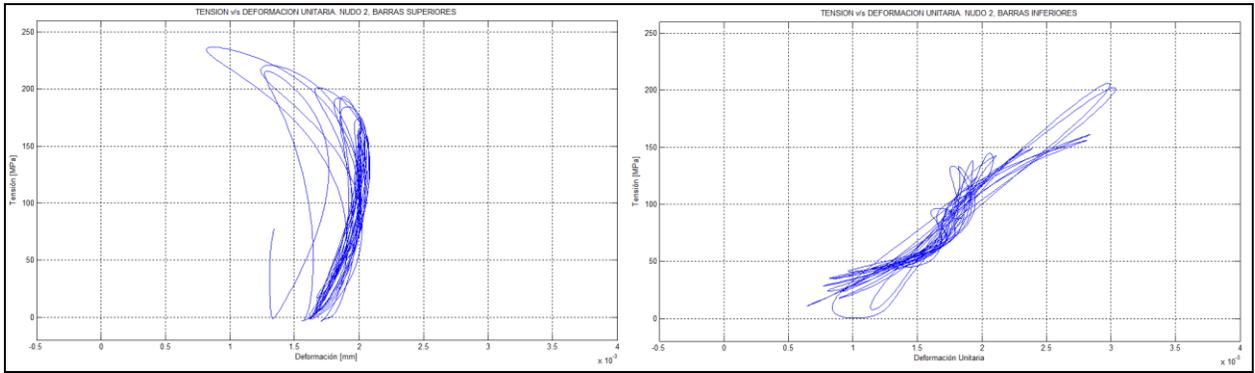


Figura B.7. Tensión – Deformación. Nudo 2.

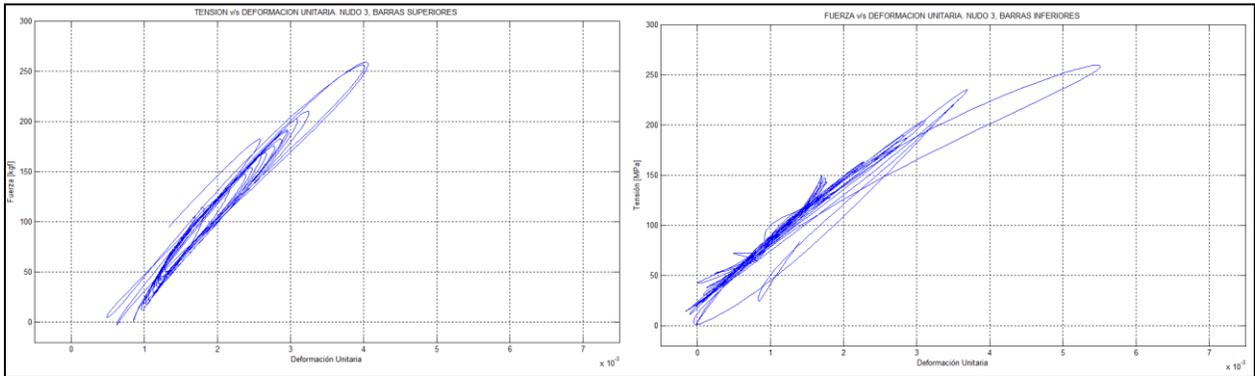


Figura B.8. Tensión – Deformación. Nudo 3.

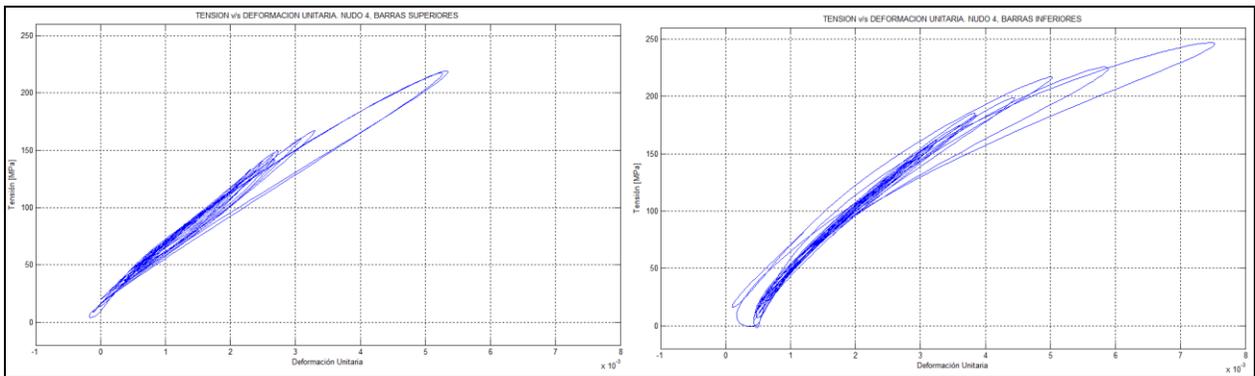


Figura B.9. Tensión – Deformación. Nudo 4.

2.2. Tensión – Deformación usando extensómetro.

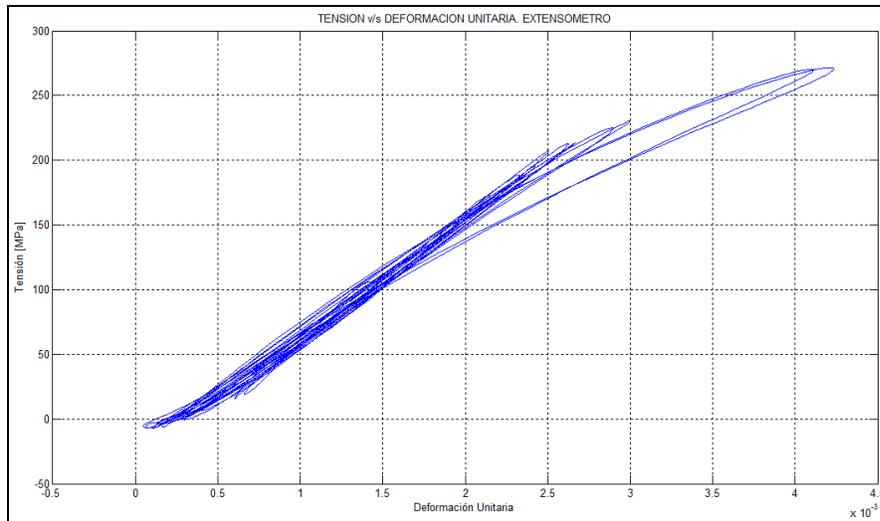


Figura B.10. Tensión – Deformación. Barra 4, nudo 1.

ANEXO C.

Llolleo Original v/s Llolleo reproducido por la Mesa Vibradora.

1. Llolleo sin escalar. Registro de Aceleraciones.

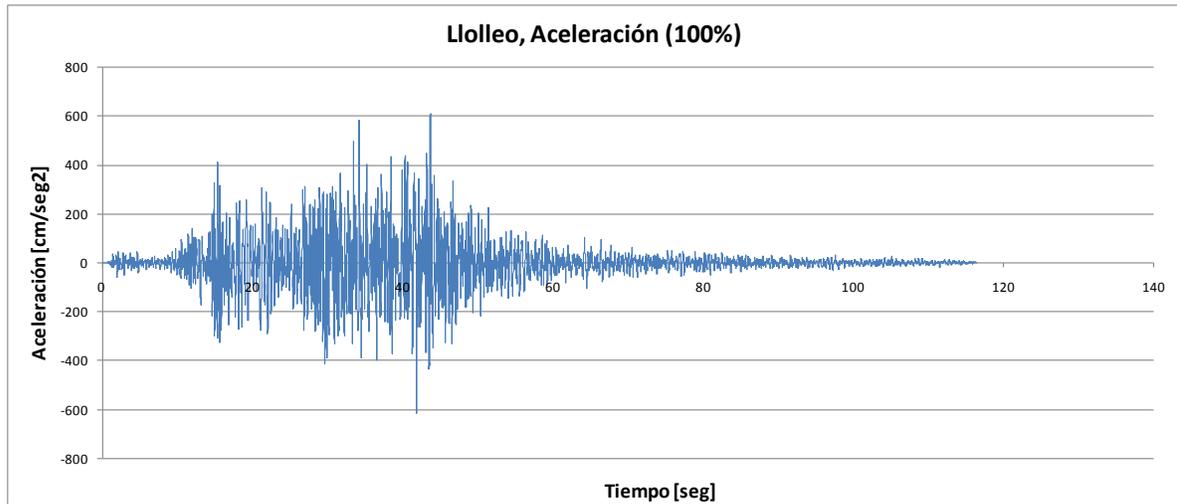


Figura C1. Registro de aceleración original.

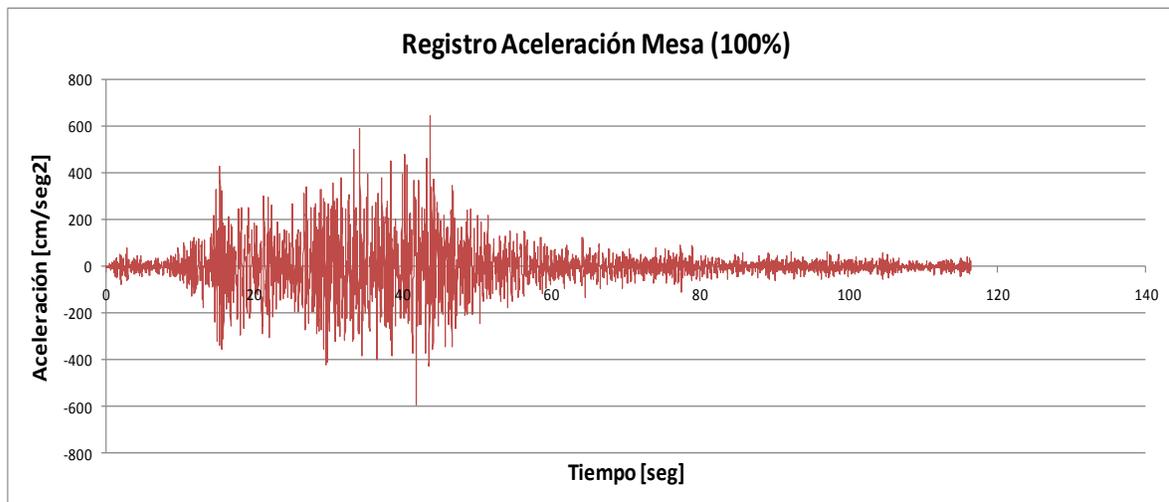


Figura C2. Registro de aceleración reproducido por la mesa.

2. Llolleo escalado a un 75% de la amplitud. Registro de Aceleraciones.

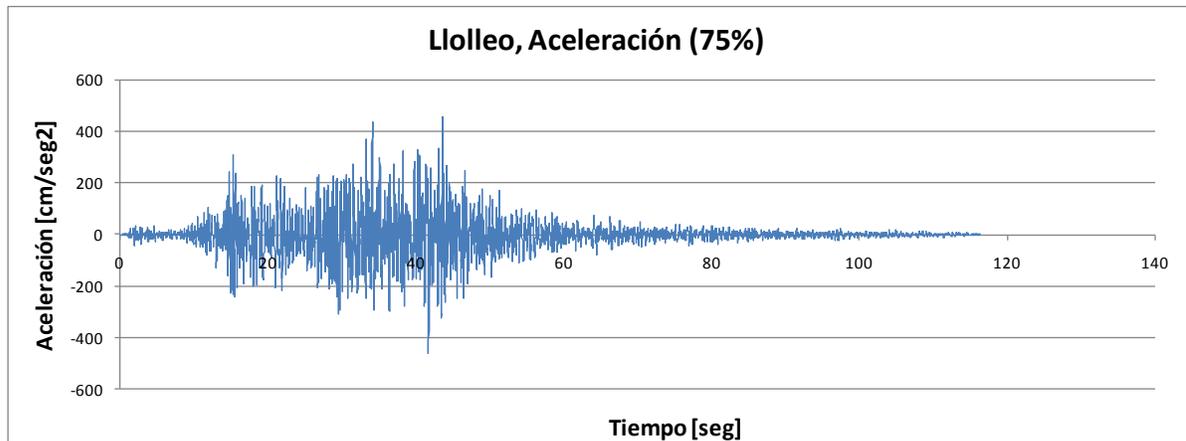


Figura C3. Registro de aceleración original.

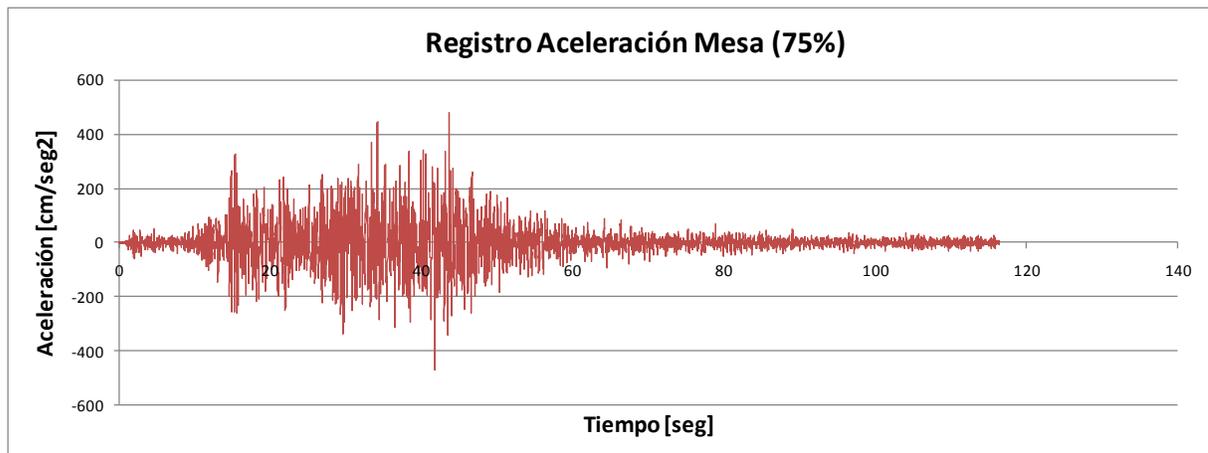


Figura C4. Registro reproducido por la mesa.

3. Llolleo escalado a un 50% de la amplitud. Registro de Aceleraciones

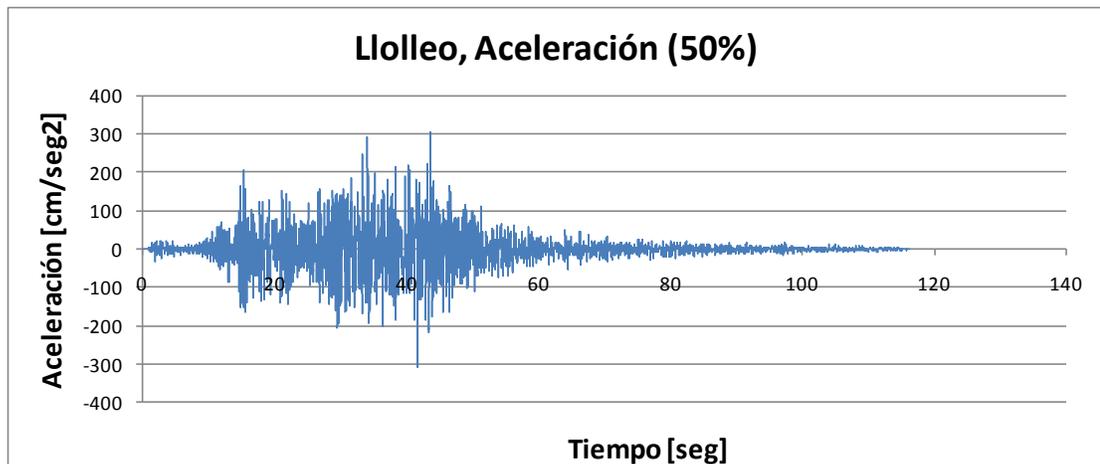


Figura C5. Registro de Aceleración original.

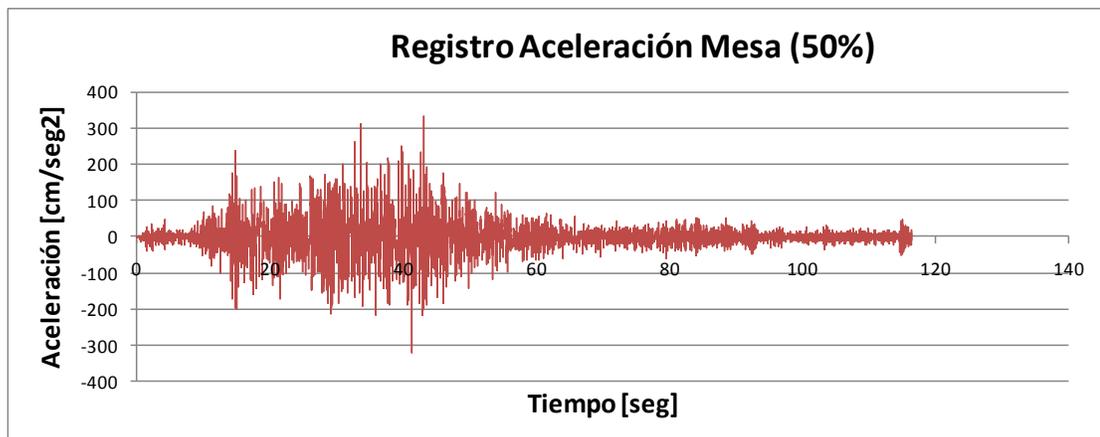


Figura C6. Registro reproducido por la mesa.

4. Llollo escaldado a un 25% de la amplitud. Registro de Aceleraciones

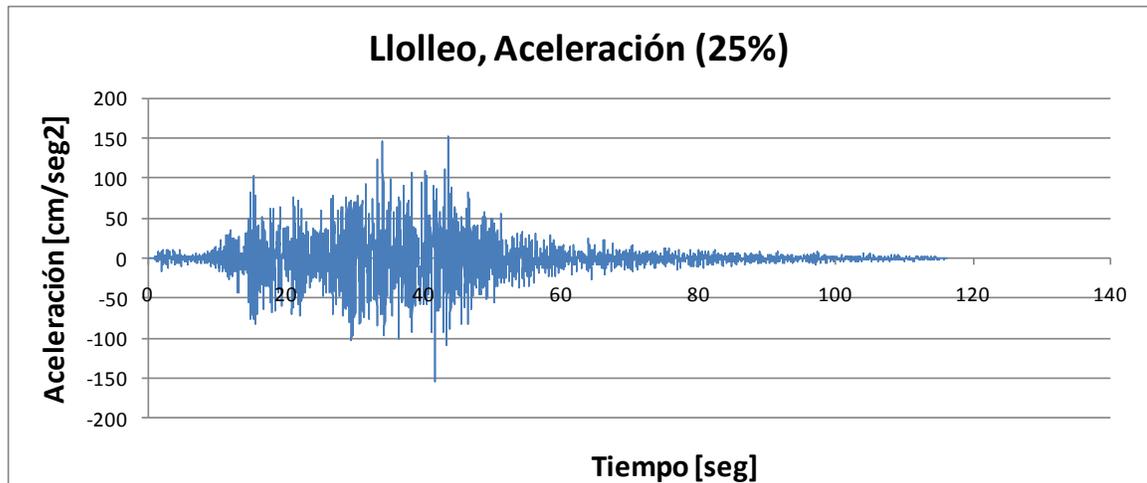


Figura C7. Registro de Aceleración original.

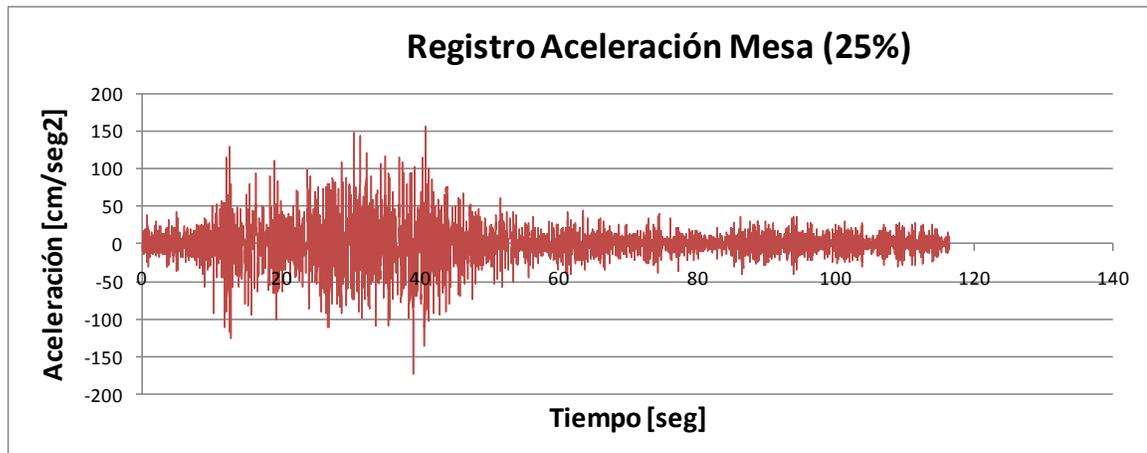


Figura C8. Registro reproducido por la mesa.