



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

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE ARRIOSTRAMIENTO CON PANDEO
RESTRINGIDO POR UN MATERIAL NO TRADICIONAL

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

FABIÁN DOMINGO ESCOBEDO GUTIÉRREZ

PROFESOR GUÍA

RICARDO HERRERA MARDONES

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

MARÍA OFELIA MORONI YADLIN

JUAN BELTRÁN MORALES

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL
POR: FABIÁN ESCOBEDO GUTIÉRREZ
FECHA: OCTUBRE 2016
PROF. GUÍA: RICARDO HERRERA MARDONES

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE ARRIOSTRAMIENTO CON PANDEO RESTRINGIDO POR UN MATERIAL NO TRADICIONAL”

Los arriostramientos convencionales de acero se pandean en compresión y se fracturan en pocos ciclos. Por dicho motivo se propone como elemento de protección sísmica, un arriostramiento de pandeo restringido que usa un material no tradicional para confinar el elemento de acero con el fin de evitar el pandeo. Este trabajo tiene como objetivo estudiar experimentalmente el comportamiento de un arriostramiento de pandeo restringido por un material no tradicional ante solicitaciones monotónicas y cíclicas.

El ensayo consiste, básicamente, en imponer a los arriostramientos desplazamientos monotónicos o cíclicos, alternadamente de tracción y compresión, a niveles crecientes de amplitud hasta llegar a la falla del elemento. Además se verifican las propiedades dinámicas (módulo de corte G y amortiguamiento β) del elastómero utilizando una máquina para ensayar probetas a corte directo y las propiedades mecánicas del núcleo de acero.

Se fabrican 4 probetas con distintas configuraciones del tubo exterior y de la interfaz entre el núcleo y el material confinante. La primera consta de un tubo cuadrado, una interfaz no adherida o *unbonded*; la segunda consta de un tubo cuadrado, una interfaz *unbonded*; la tercera consta de un tubo cuadrado, una interfaz adherida o *bonded* y la cuarta consta de un tubo exterior cuadrado con tapas en sus extremos, una interfaz *unbonded*. A la primera se le aplica una acción monotónicamente creciente y a las otras tres acciones cíclicas crecientes en magnitud.

Se concluye que el nuevo material confinante restringe parcialmente el pandeo del núcleo de acero, los ciclos de histéresis presentan mayor capacidad en tracción que en compresión, en tracción se observa la fluencia del acero y los arriostramientos tienen capacidad de disipación de energía. Además, el peso del prototipo es menor que los arriostramientos rellenos con mortero de hormigón, lo que avala continuar con el estudio de estos prototipos. Esta investigación es financiada por el proyecto CA13I10026 del “Programa IDeA Fondef – Conicyt.

AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, quisiera agradecer a mi profesor guía, Ricardo Herrera Mardones, por la confianza depositada en mí para el desarrollo de este trabajo y por su buena disposición a responder mis preguntas. Al profesor Juan Felipe Beltrán, quien en las reuniones semanales me aportaba conocimiento vital para interpretar los datos obtenidos en los ensayos realizados y así lograr entender mejor el tema en investigación. También a la profesora María Ofelia Moroni, por la constante presión en términos de avance en escritura de mi trabajo.

Al profesor Pedro Soto, por el conocimiento otorgado en cuanto al uso del sistema de control y adquisición, además de su buena voluntad y disposición a ayudar siempre que se le fue solicitado.

A Ferrocacho por la fabricación de los prototipos y al proyecto CA13I10026 del “Programa IDeA Fondef – Conicyt” por el financiamiento.

A Marlena Murillo, una persona muy amable y comprometida con el proyecto, muy agradecido por esos días de arduo trabajo en el laboratorio en conjunto, también por esos momentos de alegría y conversa que permitieron distender el ambiente y hacerlo ameno.

A Eduardo Núñez, por la ayuda en comprender la teoría y su aporte en temas de montaje, por la alegría brindada en el laboratorio.

A Víctor González, por enseñarme a utilizar las herramientas de trabajo como el taladro, entre otras, además de todo el apoyo brindado en labores de montaje.

A mi familia, en especial a mis padres, por todo el apoyo que me brindaron durante esta etapa tan importante en el desarrollo de mi vida, la cual fue difícil y de harto trabajo. A mis hermanos que fueron un pilar fundamental para distraerme en los momentos de mayor tensión. A mi abuelita, por siempre estar pendiente de mis avances.

A Bastián Mellado, quien me mantuvo siempre presionado y estuvo preocupado en cada instancia de este trabajo, agradecer los permisos otorgados mientras trabaja en IDIEM ya que fueron fundamentales para no perder la constancia ni perder el foco.

A mi profesor de atletismo Mario Rodríguez, quien siempre mantuvo la confianza en mis condiciones físicas y siempre me recibió con los brazos abiertos a pesar del poco entrenamiento en el periodo de desarrollo de mi trabajo de título.

A mis amigos de atletismo, José Pradenas, Nicole Zamora, Emilio Molina, Camilo Laborda, María José Fredes, Alonso Duque, Braulio Burgos, Juan Canales, Francisco Hevia, Daniel Quintana, Javiera Cifuentes, Valeria Tort, entre otros; que a pesar de que en las competencias siempre fuimos rivales, son muy grandes amigos.

Finalmente agradecer a mis amigos del colegio, Cristián Henríquez, Andrés Cardemil, Carlos Barra, Víctor Caballero, Yacir Pinto, Fernando Zambrano, Felipe Quintana, Cristóbal Cornejo, por el apoyo y por la amistad que ha perdurado en los años.

*Dedicada a mis padres
Moisés Ernesto Escobedo Arcila
Patricia del Carmen Gutiérrez Cruces*

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Objetivos.....	3
1.2	Alcance de cada capítulo.....	3
2	ANTECEDENTES.....	5
2.1	Ensayos de BRB.....	5
2.2	Protocolo de carga.....	11
2.3	Sistema de ensayo.....	12
2.3.1	Apoyos fijos.....	12
2.3.2	Apoyo deslizante.....	14
2.3.3	Conexión Gusset.....	15
2.4	Sistema de control y adquisición.....	16
2.4.1	Sistema de control.....	16
2.4.2	Sistema de adquisición.....	17
3	PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.....	19
3.1	Propiedades del material confinante.....	19
3.1.1	Ensayo de tracción del elastómero.....	19
3.1.2	Ensayo de corte directo.....	24
3.2	Propiedades del núcleo acero.....	30
3.2.1	Ensayo de tracción del acero.....	30
4	DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS ARRIOSTRAMIENTOS CON PANDEO RESTRINGIDO.....	37
4.1	Componentes.....	37
4.1.1	Núcleo del arriostramiento.....	37
4.1.2	Material confinante.....	38
4.1.3	Camisa exterior.....	39
4.1.4	Interfaz núcleo de acero y material confinante.....	40
4.2	Fabricación.....	41
4.3	Prototipos a ensayar.....	47
5	METODOLOGÍA DE MONTAJE, INSTRUMENTACIÓN Y ENSAYO DE LOS PROTOTIPOS.....	48
5.1	Metodología de montaje.....	48
5.2	Metodología de instrumentación.....	50
5.2.1	Instalación de strain gages.....	50
5.2.2	Instalación de LVDTs.....	52

5.3	Metodología de ensayo.....	56
5.4	Metodología de desmontaje.....	58
6	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
6.1	Ensayo prototipo A (BRB1).....	59
6.2	Ensayo prototipo B (BRB2).....	60
6.3	Ensayo prototipo C (BRB3).....	62
6.4	Ensayo prototipo D (BRB4).....	63
6.5	Análisis de resultados.....	64
6.5.1	Ciclos de histéresis.....	65
6.5.2	Curva de energía disipada en función del desplazamiento.....	66
6.5.3	Historial de desplazamientos de sensores (LVDT).....	66
6.5.4	Historial de deformaciones de sensores (strain gage).....	67
6.5.5	Desplazamientos fuera del plano.....	67
6.6	Comparación con arriostramientos con material tradicional.....	78
7	CONCLUSIONES.....	79
7.1	Limitaciones y recomendaciones.....	80
	BIBLIOGRAFÍA.....	82

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Comportamiento riostra típica y de pandeo restringido (Santelices, 2014). ...	1
Figura 1.2: Componentes de un arriostramiento de pandeo restringido.	2
Figura 2.1: Ensayo BRB realizado por Black (Black et al. 2000).	6
Figura 2.2: Montaje experimental realizado por Black (Black et al. 2000).	6
Figura 2.3: Historial de desplazamiento y curva de histéresis (Black et al. 2000).	7
Figura 2.4: Sección transversal BRBs (Newell et al. 2006).	8
Figura 2.5: Montaje experimental (Newell et al. 2006).	9
Figura 2.6: Ubicación de potenciómetros (Newell et al. 2006).	9
Figura 2.7: Ciclos de histéresis prototipo 1G y 2G (Newell et al. 2006).	10
Figura 2.8: Ciclos de histéresis prototipo 3G y 4G (Newell et al. 2006).	10
Figura 2.9: Historial de desplazamiento aplicado al BRB (Espinoza 2016).	11
Figura 2.10: Vista en planta y elevación del sistema de ensayo (Espinoza 2016).	12
Figura 2.11: Apoyo fijo conectado al extremo del arriostramiento.	13
Figura 2.12: Apoyo fijo conectado al extremo del actuador.	13
Figura 2.13: Apoyo deslizante.	14
Figura 2.14: Conexión placa Gusset con extremo del BRB.	15
Figura 2.15: Servo válvula de control MOOG (Espinoza 2016).	17
Figura 2.16: Esquema instrumentación (Espinoza, 2016).	18
Figura 3.1: Probetas de elastómero – Ensayo de tracción.	19
Figura 3.2: Pieza estándar para cortar probetas de elastómero (ASTM D412-06a).	20
Figura 3.3: Curva tensión – elongación probetas Serie 1.	22
Figura 3.4: Curva tensión – elongación probetas Serie 2.	22
Figura 3.5: Curva tensión – elongación probetas Serie 3.	23
Figura 3.6: Resumen curva tensión – elongación.	23
Figura 3.7: Máquina de ensayo de corte directo.	24
Figura 3.8: Dimensiones probetas de corte directo.	25
Figura 3.9: Probetas de elastómero para ensayo de corte directo.	25
Figura 3.10: Posición inicial probeta de corte directo.	26
Figura 3.11: Posición deformada probeta de corte directo.	26
Figura 3.12: Módulo de corte en función de la deformación.	29
Figura 3.13: Amortiguamiento en función de la deformación.	29
Figura 3.14: Dimensiones probeta para ensayo de tracción (ASTM E8/E8M–15a).	30
Figura 3.15: Probetas para ensayo de tracción.	31
Figura 3.16: Máquina universal INSTRON y extensómetro (Izquierda), instante previo a la fractura sin extensómetro (Derecha).	32
Figura 3.17: Comparación máquina universal (MU) y extensómetro (Ext) – Probeta 1.	33
Figura 3.18: Comparación máquina universal (MU) y extensómetro (Ext) – Probeta 2.	33
Figura 3.19: Comparación máquina universal (MU) y extensómetro (Ext) – Probeta 3.	34
Figura 3.20: Comparación máquina universal (MU) y extensómetro (Ext) – Probeta 4.	34
Figura 3.21: Curva tensión deformación de probeta plana de acero.	35
Figura 3.22: Fractura probetas planas de acero.	36
Figura 4.1: Dimensiones núcleo y atiesador de acero.	37
Figura 4.2: Formas de uso del elastómero.	38
Figura 4.3: Dimensiones tubo de acero.	39
Figura 4.4: Superficie arenada – interfaz bonded.	40
Figura 4.5: Núcleo de acero sin atiesador.	41

Figura 4.6: Atiesador para núcleo de acero.	41
Figura 4.7: Perforado y soldadura núcleo de acero y atiesador.	41
Figura 4.8: Soldadura núcleo de acero y tope central.	42
Figura 4.9: Perforaciones camisa exterior.	42
Figura 4.10: Relleno con planchas de elastómero zona extrema.	43
Figura 4.11: Relleno con planchas de elastómero zona central.	43
Figura 4.12: Gancho guía en extremo del núcleo.	44
Figura 4.13: Incorporación núcleo-elastómero a la camisa exterior.	44
Figura 4.14: Matriz del arriostramiento.	45
Figura 4.15: Fijación en el extremo del núcleo.	45
Figura 4.16: Inyección elastómero por perforaciones.	46
Figura 4.17: Matriz de pivotes para prensado.	46
Figura 4.18: Prensado de elastómero.	46
Figura 4.19: Tapas extremas.	47
Figura 5.1: Instalación actuador hidráulico.	48
Figura 5.2: Unión apernada actuador hidráulico y apoyo fijo.	49
Figura 5.3: Unión actuador hidráulico y sistema móvil con pasador.	49
Figura 5.4: Unión apernada arriostramiento y placa Gusset.	50
Figura 5.5: Instalación de strain gages.	51
Figura 5.6: Conexión strain gages al sistema de adquisición.	51
Figura 5.7: Instalación sensores de desplazamiento longitudinal.	52
Figura 5.8: Instalación sensores de desplazamiento fuera del plano.	53
Figura 5.9: Incorporación sensor de desplazamiento fuera del plano.	53
Figura 5.10: Instalación sensores de desplazamiento fuera del plano cara superior.	54
Figura 5.11: Conexión LVDTs al sistema de adquisición.	54
Figura 5.12: Instrumentación arriostramiento.	55
Figura 5.13: Historial de desplazamiento – Prototipo A.	56
Figura 5.14: Historial de desplazamiento – Prototipos B.	57
Figura 5.15: Historial de desplazamiento – Prototipo C y D.	57
Figura 6.1: Fractura núcleo de acero prototipo A.	60
Figura 6.2: Configuración final prototipo B.	61
Figura 6.3: Fractura núcleo de acero prototipo C.	64
Figura 6.4: Curva carga en función del desplazamiento del actuador.	68
Figura 6.5: Curva carga en función del desplazamiento del núcleo.	69
Figura 6.6: Energía disipada en función del desplazamiento.	70
Figura 6.7: Degradación de la rigidez en función del desplazamiento.	71
Figura 6.8: Historial de desplazamiento del núcleo de acero.	72
Figura 6.9: Historial de desplazamiento relativo entre núcleo y camisa exterior.	73
Figura 6.10: Historial de deformación longitudinal zona central.	74
Figura 6.11: Historial de deformación longitudinal cara inferior.	75
Figura 6.12: Historial de deformación longitudinal cara superior.	76
Figura 6.13: Historial de deformación transversal.	77

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Dimensiones pieza C (ASTM D412-06a).....	20
Tabla 3.2: Resultados tensión-elongación probetas - Serie 1.....	21
Tabla 3.3: Resultados tensión-elongación probetas - Serie 2.....	21
Tabla 3.4: Resultados tensión-elongación probetas - Serie 3.....	21
Tabla 3.5: Módulo de corte y amortiguamiento – Deformación 50%	27
Tabla 3.6: Módulo de corte y amortiguamiento – Deformación 75%	27
Tabla 3.7: Módulo de corte y amortiguamiento – Deformación 100%.....	28
Tabla 3.8: Módulo de corte y amortiguamiento – Deformación 115%.....	28
Tabla 3.9: Resumen de módulo de corte y amortiguamiento.....	28
Tabla 3.10: Dimensiones probetas planas de acero ASTM A36	31
Tabla 3.11: Comparación módulo de Young entre máquina universal y extensómetro.	32
Tabla 3.12: Resumen propiedades de las probetas de acero.....	35
Tabla 5.1: Numeración de strain gages.	51
Tabla 5.2: Notación de LVDTs.	55
Tabla 6.1: Carga máxima en ciclos para el prototipo A.....	59
Tabla 6.2: Carga máxima en ciclos para el prototipo B.....	61
Tabla 6.3: Carga máxima en ciclos para el prototipo C.	62
Tabla 6.4: Carga máxima en ciclos para el prototipo D.	63
Tabla 6.5: Desplazamientos máximos fuera del plano.....	67
Tabla 6.6: Peso arriostamiento con relleno de elastómero.	78
Tabla 6.7: Peso arriostamiento con relleno de mortero.	78

1 INTRODUCCIÓN.

Entre los sistemas estructurales existentes para resistir las acciones sísmicas, uno de los más utilizados en estructuras de acero es el de marcos arriostrados, es decir, marcos que incorporan elementos diagonales que aumentan la rigidez y resistencia lateral de la estructura. Aun cuando el acero es un material muy eficiente, para evitar problemas de pandeo por compresión, se requiere disponer de secciones significativamente mayores que las requeridas para resistir esfuerzos de tracción debido a que los elementos esbeltos son más susceptibles al pandeo. Esto se traduce en mayores costos de construcción. Además un factor importante a considerar en el desarrollo de estructuras de acero es la alta sismicidad en Chile. Durante el terremoto del Maule de 2010, se evidenció que los arriostramientos convencionales de acero se pandean en compresión y se fracturan en pocos ciclos. Una solución para restringir el pandeo de arriostramientos de acero es la utilización de mortero u hormigón como material confinante. Sin embargo su fabricación es de alta complejidad, y de alto costo, pues se debe evitar la adherencia del mortero al elemento de acero y detallar las conexiones en sus extremos de manera muy prolija.

En este trabajo de título se propone como elemento de protección sísmica, un arriostramiento de pandeo restringido, en inglés *buckling restrained brace* (BRB), que utiliza un material no tradicional para confinar el elemento de acero, el que idealmente resuelve gran parte de los problemas de fabricación que tienen las soluciones actuales, por su facilidad de manejo y bajo costo. Estos arriostramientos son dispositivos de control de respuesta ante sollicitaciones dinámicas, como es el caso de las fuerzas sísmicas. La comparación entre comportamiento de las riostras convencionales con respecto a los BRBs se muestra en la figura 1.1, donde se observa que las riostras típicas presentan un decaimiento en la fuerza tanto en compresión como en tracción, lo cual no ocurre en los BRBs que tienen un comportamiento estable.

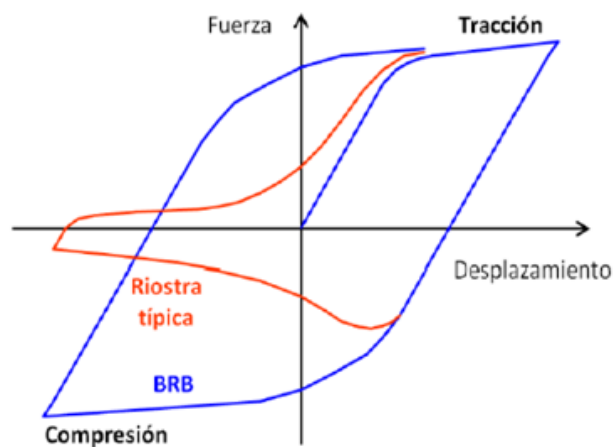


Figura 1.1: Comportamiento riostra típica y de pandeo restringido (Santelices, 2014).

La configuración de estos arriostramientos consta de un núcleo de acero que transmite los esfuerzos axiales. Este acero es de alta ductilidad como por ejemplo acero ASTM A36 o bien de baja resistencia, cuyo esfuerzo de fluencia sea predecible y tenga baja variabilidad. Además, consta de un tubo exterior de acero, que puede tener diversas configuraciones, el cual se rellena de un material confinante que restringe el pandeo del núcleo de acero. También consta de una interfaz, *unbonded* o *bonded*, entre el núcleo y el material confinante. La interfaz *unbonded*, permite eliminar las transferencias de corte y la concentración de las deformaciones localizadas, permitiendo la contracción lateral y dilatación del núcleo de acero al ser sometido a esfuerzos axiales.

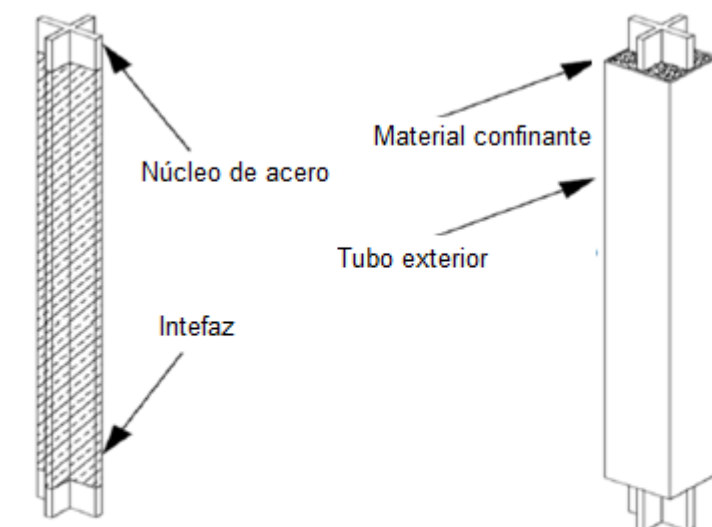


Figura 1.2: Componentes de un arriostramiento de pandeo restringido.

Este trabajo de título continúa los estudios realizados por Morral (2015), y Espinoza (2016), quienes diseñaron el prototipo y el montaje de ensayo; ahora corresponde la etapa de fabricación y ensayo experimental. Esta investigación es financiada por el proyecto CA13I10026 del “Programa IDeA Fondef – Conicyt.

1.1 Objetivos.

El objetivo principal del presente trabajo es estudiar experimentalmente el comportamiento de un arriostamiento de pandeo restringido ante solicitaciones monotónicas y cíclicas. Las solicitaciones requeridas para el ensayo de estos elementos corresponden a ciclos de tracción y compresión.

Los objetivos específicos de este trabajo son:

1. Construir e instrumentar cuatro prototipos de arriostamientos con pandeo restringido.
2. Validar el comportamiento de los cuatro prototipos.
3. Evaluar la capacidad de disipación de energía del arriostamiento.
4. Evaluar económicamente el espécimen y comparar con arriostamientos fabricados con materiales tradicionales.

1.2 Alcance de cada capítulo.

A continuación se entrega un breve resumen del contenido de los capítulos siguientes.

En el **Capítulo 1. Introducción** se presenta una breve introducción, los objetivos y el alcance de cada capítulo con el fin de entender la problemática a estudiar.

En el **Capítulo 2. Antecedentes** se revisan los documentos, normativa y antecedentes relativos a la teoría y principales ensayos de arriostamientos de pandeo restringido en los cuales se basa el diseño de las probetas a ensayar. Luego se revisa el sistema de ensayo proporcionado por Espinoza (2016) con el fin de entender el montaje experimental y las condiciones del ensayo, historial de carga y desplazamiento. Finalmente, se estudia el sistema de control y adquisición de datos, con los elementos principales que lo componen y la forma en que interactúan.

En el **Capítulo 3. Propiedades de los materiales** se presentan las características de cada uno de los principales materiales bases del arriostamiento con pandeo restringido, con el fin de conocer las propiedades mecánicas de estos. Se estudian las propiedades del material confinante mediante el módulo de corte y amortiguamiento según la metodología proporcionada por Herrera (1998) y la curva tensión-deformación según la norma ASTM D412-06a. También se miden las propiedades del acero utilizado, módulo de elasticidad, tensión de fluencia, tensión máxima y la elongación, según la norma ASTM E8/E8M-15a.

En el **Capítulo 4. Diseño y fabricación de los arriostamiento con pandeo restringido** se presenta el diseño de los componentes de cuatro prototipos, núcleo, material confinante, tubo exterior e interfaz núcleo-material confinante. Estos prototipos se someten a ensayos cíclicos aplicando alternadamente tracción y compresión, a niveles crecientes de amplitud. También, se describe su fabricación y sus particularidades. Finalmente, se describe el montaje experimental de los prototipos.

En el **Capítulo 5. Metodología de montaje, instrumentación y ensayo de los prototipos** se presenta tanto la metodología de montaje previa a realizar el ensayo como también la metodología de instrumentación de los cuatro prototipos. Además se mencionan las distintas consideraciones y mejoras realizadas a lo largo de los ensayos.

En el **Capítulo 6. Presentación y análisis de resultados** se presentan los resultados experimentales obtenidos, además del análisis cuantitativo y cualitativo de los resultados para cada uno de los prototipos ensayados. Se evalúan en términos de sus capacidades de absorción de energía mediante el análisis por ciclo de histéresis, deformación inelástica y resistencia, y los modos de falla observados.

En el **Capítulo 7. Conclusiones** se presentan los principales comentarios, limitaciones y conclusiones del trabajo realizado, así como recomendaciones para estudios posteriores. Se evalúa la factibilidad técnica y económica de fabricar arriostramientos de pando restringido por materiales no tradicionales y se analizan las ventajas y desventajas de este tipo de elementos con respecto a alternativas existentes en el mercado.

2 ANTECEDENTES.

En el presente capítulo se presenta una revisión bibliográfica con el fin de comprender las consideraciones del diseño del arriostramiento y del sistema de ensayo.

2.1 Ensayos de BRB.

Los arriostramientos de pandeo restringido (BRBs) utilizados para resistir las acciones sísmicas en los sistemas estructurales han sido populares en Japón desde el terremoto de Kobe en 1995 (Reina y Normike, 1997). Con la idea de prevenir el pandeo en los arriostramientos bajo sollicitaciones de compresión, una solución es el uso de los BRBs que constan de un núcleo de acero, el cual es confinado con el uso de mortero de hormigón contenido en un tubo exterior.

Los marcos con arriostramientos de pandeo restringido también han ganado aceptación en los diseños ingenieriles en Estados Unidos desde el terremoto de Northridge, California (Clark et al. 1999, Lopez 2001, Shuhaibar et al. 2002), y un número no menor de construcciones han utilizado BRBs en los últimos años.

Una de las investigaciones que permite diseñar el sistema de ensayo se basa en el estudio realizado por Black et al (2000). Ellos ensayaron arriostramientos de pandeo restringido con distintas secciones transversales. El sistema de ensayo utilizado requiere de un actuador hidráulico el cual reacciona contra un apoyo fijo, que corresponde a una columna empotrada. En el otro extremo de cada probeta, ésta reacciona contra otro apoyo fijo, que al igual que el anterior es una columna empotrada en una losa de reacción lo suficientemente rígida para desprestigiar sus deformaciones a lo largo del ensayo. Además en la conexión actuador-probeta cuenta con un apoyo móvil.

Los prototipos ensayados tienen como factor común el largo del arriostramiento, el cual corresponde a 4,5 [m] de extremo a extremo incluyendo la zona de conexión. Los ejemplares con mayor área transversal alcanzan una resistencia a la fluencia de alrededor de 2000 [kN]. La fuerza ejercida por el actuador utilizado en este caso corresponde aproximadamente a 4500 [kN] en compresión y 3100 [kN] en tracción con un rango de desplazamiento aproximado de ± 15 [cm] para cada lado.

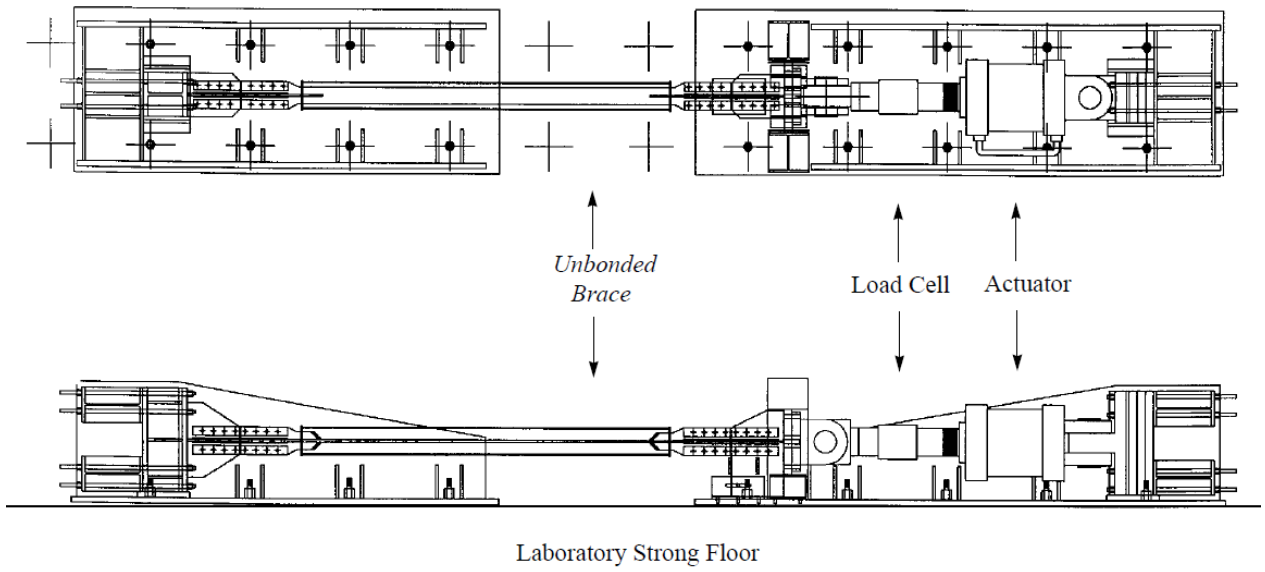


Figura 2.1: Ensayo BRB realizado por Black (Black et al. 2000).



Figura 2.2: Montaje experimental realizado por Black (Black et al. 2000).

En este ensayo, se instalaron dos sensores de desplazamiento en el extremo de cada probeta para medir desplazamiento relativo entre la pletina central y el tubo exterior. Además se instalaron potenciómetros para medir desplazamiento relativo entre los extremos del arriostramiento. También, se utilizan dos potenciómetros que registran el desplazamiento entre extremos, incluida la conexión y otros dos sensores registran el desplazamiento entre los extremos de la camisa de confinamiento. Finalmente se instalaron dos sensores de desplazamiento para registrar el movimiento fuera del plano de la camisa de confinamiento.

El control de estos ensayos fue realizado estableciendo un historial de deformación cíclico cuya amplitud aumenta progresivamente basándose en múltiplos del desplazamiento entre piso de diseño. Esta deformación aumenta conforme avanza el número de ciclos.

Para todos los patrones de carga aplicados se obtuvieron respuestas estables, registrándose fuerzas superiores en la fase de compresión en comparación con las fuerzas obtenidas en la fase de tracción. La alta estabilidad obtenida en los ensayos realizados por Black puede explicarse en el hecho que las cargas son aplicadas solamente de manera axial dejando de lado las demandas rotacionales en los extremos de cada probeta.

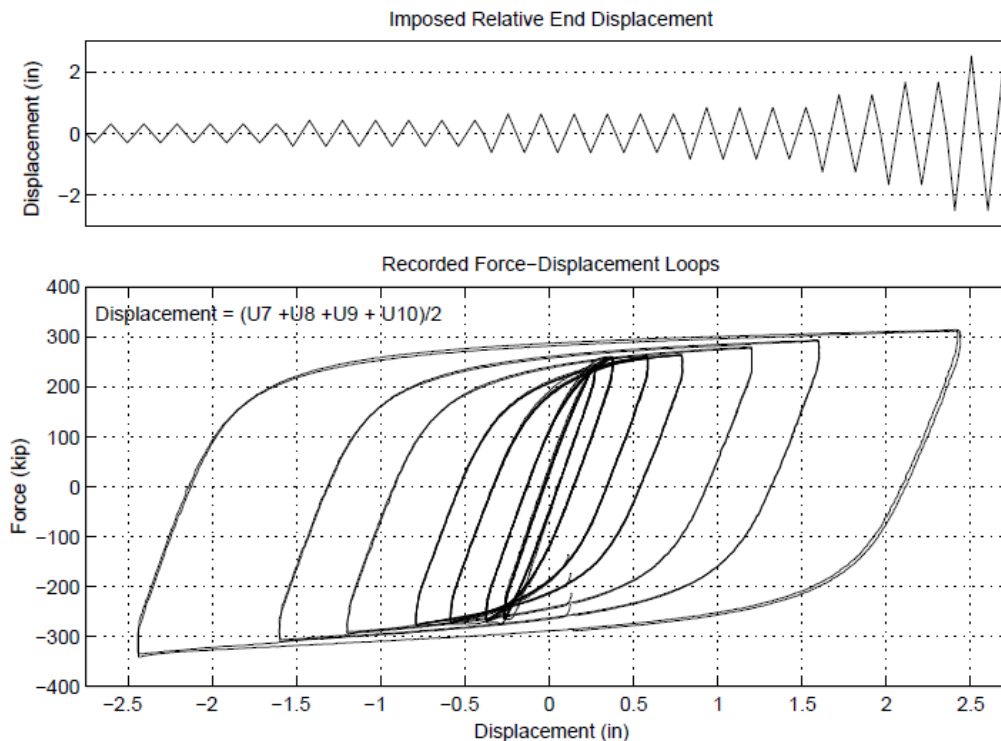


Figura 2.3: Historial de desplazamiento y curva de histéresis (Black et al. 2000).

Por otro lado, uno de los ensayos de BRBs que se estudian para diseñar la sección transversal del arriostramiento, es la investigación realizada por Newell et al. (2006). Ellos ensayaron dos pares (cuatro en total) de arriostramientos con pandeo restringido a escala, en una instalación experimental de la Universidad de California, San Diego. El primer par (1G, 2G) corresponde a un BRB, cuyo núcleo de acero se compone por una placa plana, mientras que el segundo par (3G, 4G) tienen una sección transversal cruciforme. Se consideraron dos especímenes de cada geometría, con el fin de validar los resultados experimentales. En ambos pares el núcleo de acero es confinado por un perfil cuadrado de acero relleno de mortero de hormigón, como se muestra en la figura 2.4.

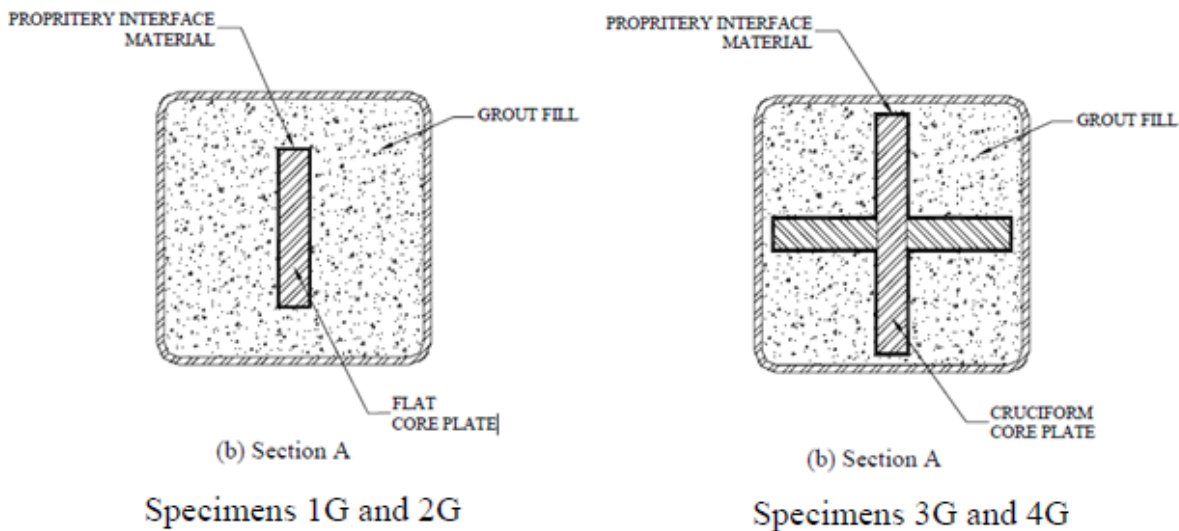
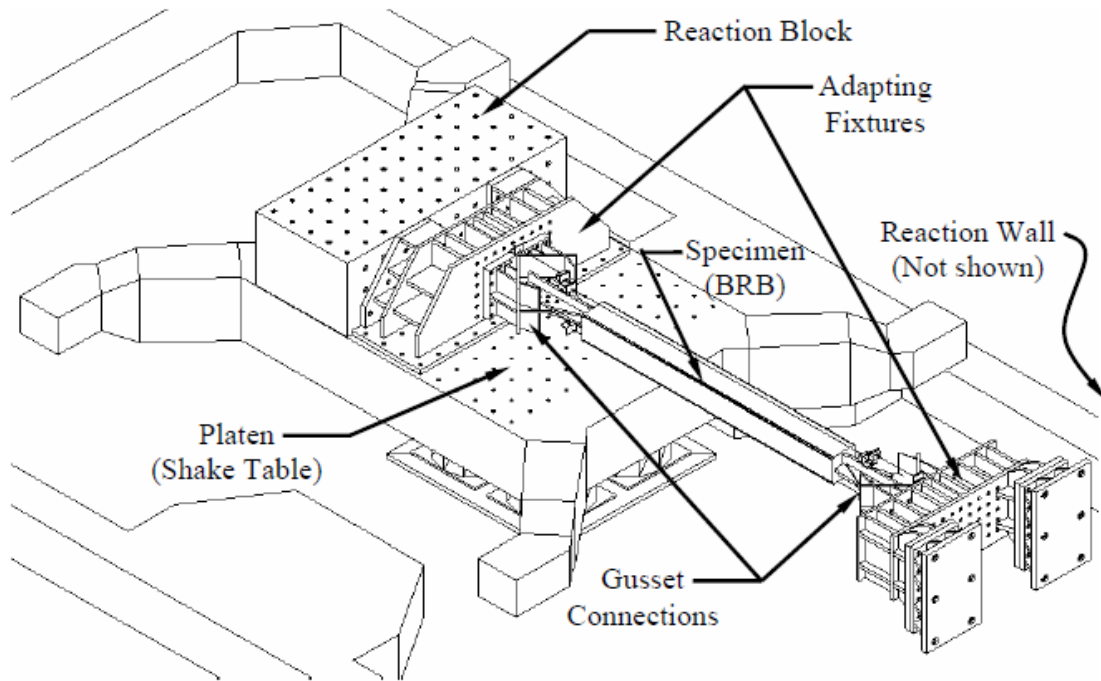


Figura 2.4: Sección transversal BRBs (Newell et al. 2006).

El objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta cíclica de los arriostramientos de pandeo restringido, siguiendo los criterios dispuestos en las disposiciones sísmicas AISC y FEMA 450; las cuales para aprobar el diseño de un prototipo, requieren que se incluyan en los ensayos las demandas rotacionales en la conexión del arriostramiento, además de un ensayo uniaxial o en una subestructura.

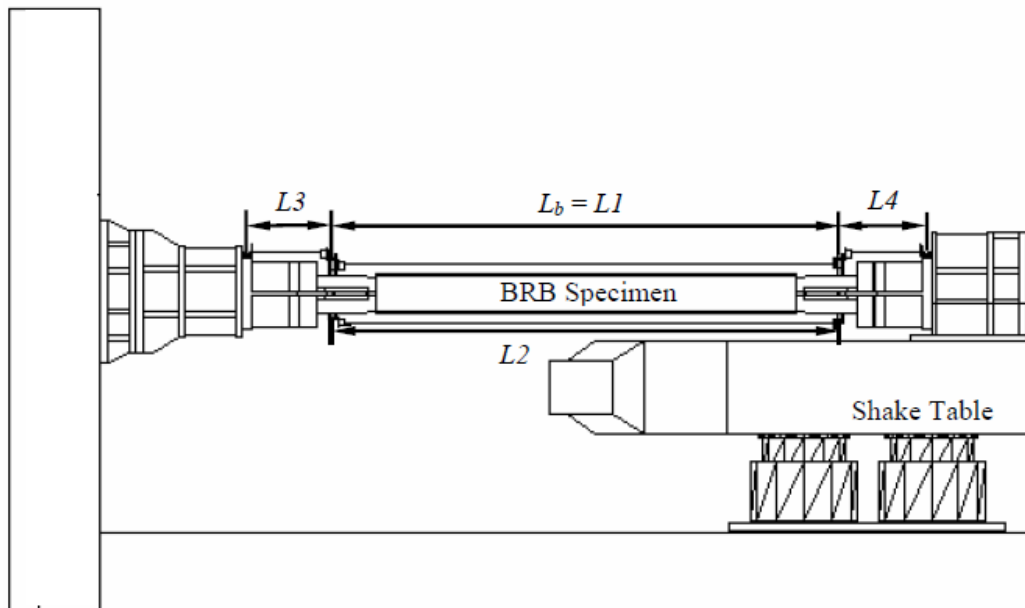
Los ensayos se realizan en una mesa vibratoria, denominada Dispositivo de Modificación de Respuesta Sísmica (SRMD) de la Universidad de California, San Diego. Esta mesa impuso los desplazamientos tanto longitudinales como transversales en los prototipos a ensayar. En la figura 2.5 se muestra el montaje experimental.



(b) Setup Overview

Figura 2.5: Montaje experimental (Newell et al. 2006).

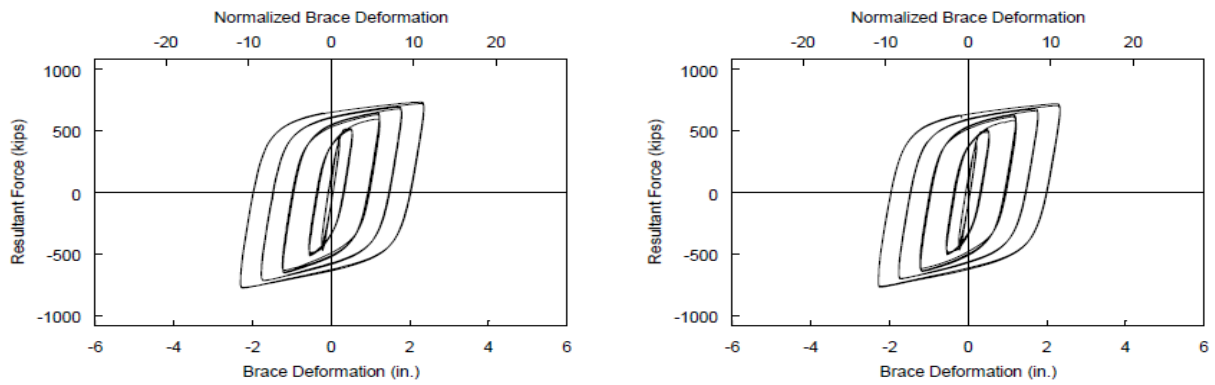
Se utilizaron cuatro potenci6metros para medir la deformaci6n axial del n6cleo del prototipo (instrumentos L1 y L2) y de la conexi6n Gusset (L3 y L4). En la figura 2.6 se muestra la ubicaci6n de los instrumentos de medici6n.



(a) Displacement Transducer Locations

Figura 2.6: Ubicaci6n de potenci6metros (Newell et al. 2006).

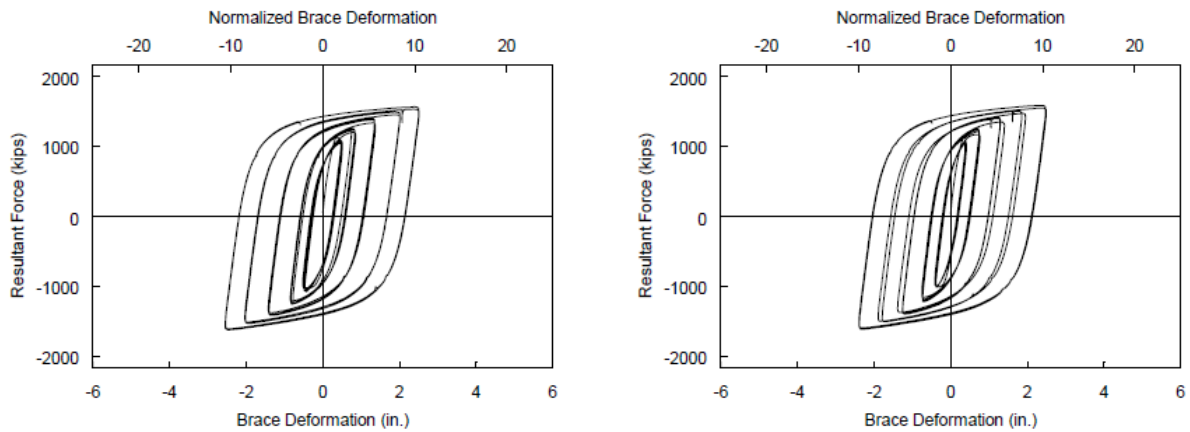
Para cada uno de los especímenes, se obtuvieron los siguientes resultados:



Specimen 1G: Brace Force versus Axial Deformation

Specimen 2G: Brace Force versus Axial Deformation

Figura 2.7: Ciclos de histéresis prototipo 1G y 2G (Newell et al. 2006).



Specimen 3G: Brace Force versus Axial Deformation

Specimen 4G: Brace Force versus Axial Deformation

Figura 2.8: Ciclos de histéresis prototipo 3G y 4G (Newell et al. 2006).

En base a los resultados obtenidos por Newell et al. (2006), y considerando la capacidad de los equipos a utilizar en los ensayos del presente trabajo, se optó por un núcleo de acero similar a la sección transversal de los prototipo 1G y 2G, cuyos valores máximos de carga están alrededor de 750 [kips].

2.2 Protocolo de carga.

El protocolo de carga para realizar los ensayos de los arriostramientos de pandeo restringido es definido por Espinoza (2016), el cuál considera el apéndice T de las disposiciones sísmicas de la AISC, donde la deformación impuesta corresponde a la deformación axial del núcleo de acero del espécimen.

- (1) 2 ciclos de carga con una deformación correspondiente a $\Delta b = 1,0\Delta b_y = 3,1 [mm]$
- (2) 2 ciclos de carga con una deformación correspondiente a $\Delta b = 0,5\Delta b_m = 7,75 [mm]$
- (3) 2 ciclos de carga con una deformación correspondiente a $\Delta b = 1,0\Delta b_m = 15,5 [mm]$
- (4) 2 ciclos de carga con una deformación correspondiente a $\Delta b = 1,5\Delta b_m = 23,25 [mm]$
- (5) 2 ciclos de carga con una deformación correspondiente a $\Delta b = 2,0\Delta b_m = 31 [mm]$
- (6) Adicionalmente se completan los ciclos de carga a una deformación correspondiente a $\Delta b = 2,0\Delta b_m$.

Para el ensayo del prototipo de arriostramiento se requiere lograr una deformación inelástica axial acumulada de al menos 200 veces Δb_y .

Donde:

Δb_y : Valor de deformación para la fluencia del núcleo de cada riostra de pandeo restringido. Este valor corresponde a $\Delta b_y = 3,1 [mm]$

Δb_m : Valor de la deformación en el arriostramiento correspondiente al desplazamiento entre piso de diseño. Este valor corresponde a $\Delta b_m = 15,5 [mm]$

Los valores de Δb_y y Δb_m fueron calculados por Espinoza (2016). En la figura 2.9 se muestra el historial de desplazamiento a aplicar a los prototipos a ensayar.

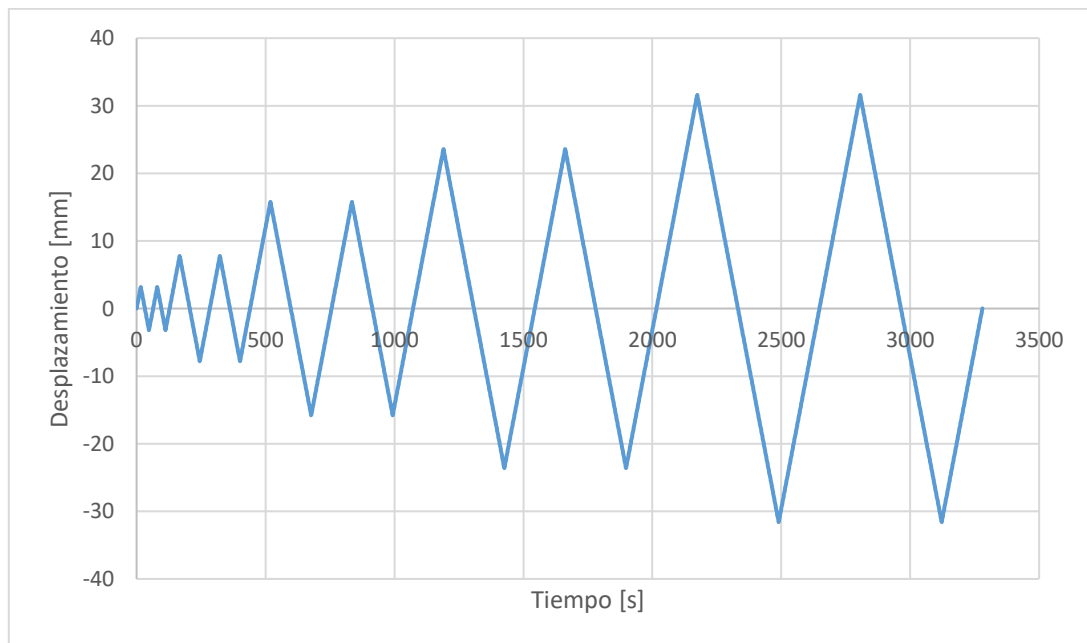


Figura 2.9: Historial de desplazamiento aplicado al BRB (Espinoza 2016).

2.3 Sistema de ensayo.

El sistema de ensayo para arriostramientos de pandeo restringido fue diseñado por Espinoza (2016). Los esfuerzos requeridos para el ensayo de estos elementos corresponden a ciclos de tracción y compresión. Dichos ciclos de tracción y compresión se aplican a deformación controlada en base a los requerimientos de carga indicados en las disposiciones sísmicas de la norma AISC 341 y se obtienen curvas de carga en función del desplazamiento que permiten evaluar el comportamiento de las probetas ensayadas.

Este sistema consiste en dos apoyos fijos y uno móvil o deslizante. En uno de los apoyos fijos se conecta un extremo del arriostramiento y en el otro se conecta el actuador hidráulico. En la figura 2.10 se muestra el esquema del sistema de ensayo.

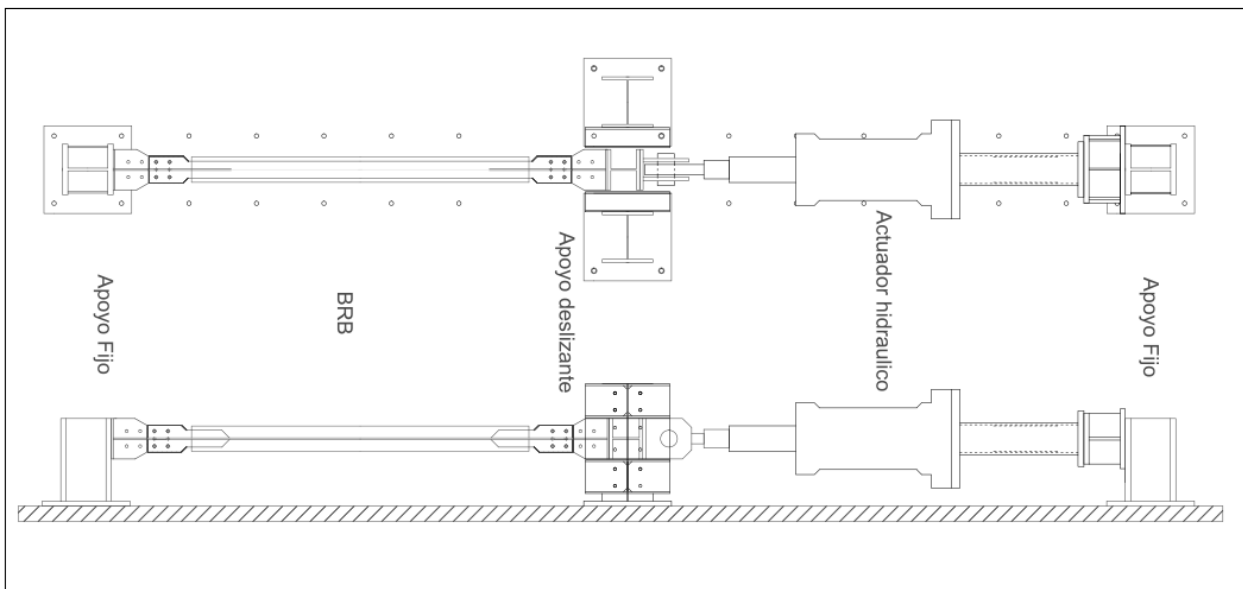


Figura 2.10: Vista en planta y elevación del sistema de ensayo (Espinoza 2016).

En los siguientes puntos se describe brevemente cada uno de los elementos pertenecientes al sistema de ensayo, el detalle de los cálculos y consideraciones se encuentran en el trabajo desarrollado por Espinoza (2016).

2.3.1 Apoyos fijos.

Estos elementos se pueden apreciar en ambos extremos de la figura 2.10. Corresponden a una columna de acero de dimensiones 300 x 300 x 32 x 16, la cual está conectada en su parte superior al extremo del arriostramiento o bien al extremo del actuador. En la parte inferior la columna se encuentra soldada por todo el contorno a una placa de 30 [mm], la que a su vez se encuentra fija contra la losa del laboratorio por medio de 4 barras de anclaje de 32 [mm] de diámetro post tensadas a 25 [tf]. Su función es proveer un apoyo fijo tanto para el extremo del arriostramiento (Figura 2.11) como para el extremo del actuador hidráulico (Figura 2.12).



Figura 2.11: Apoyo fijo conectado al extremo del arriostramiento.



Figura 2.12: Apoyo fijo conectado al extremo del actuador.

2.3.2 Apoyo deslizante.

Este elemento se observa en el centro de la figura 2.10. Corresponde a un conjunto de columnas y vigas dispuestas de manera tal de asegurar que el desplazamiento del arriostamiento sea únicamente en el eje axial evitando el movimiento vertical y transversal. Las uniones entre los elementos se realizan mediante conexiones apernadas con el objetivo de facilitar la instalación y reemplazo de probetas. En la figura 2.13 se aprecia la disposición de vigas y columnas que conforman el apoyo móvil. El largo de las vigas que restringen el movimiento fuera del eje corresponde a 50 [cm] y fue determinado a partir del rango de movimiento total del actuador, con el objetivo de eliminar la posibilidad que en algún momento el apoyo móvil quede sin restricción fuera del eje de aplicación de cargas. En todas las superficies que quedan en la cavidad interior del apoyo por donde se desliza el arriostamiento y su conexión, se dispone de una película de technyl de 5 [mm] de espesor con el fin de disminuir la fricción que pueda afectar las fuerzas aplicadas por el actuador.



Figura 2.13: Apoyo deslizante.

2.3.3 Conexión Gusset.

Este elemento se encarga de unir el arriostramiento de pandeo restringido al resto del sistema estructural. Para efectos del sistema de ensayo en particular, donde el objetivo principal es evaluar el desempeño de las probetas en términos de las curvas de histéresis y comportamiento a nivel de núcleo y material confinante, bajo una acción uniaxial sin imponer demandas rotacionales significativas en los extremos de las probetas, se diseñó una conexión que resista las solicitaciones del ensayo en su rango lineal elástico, evitando así modos de falla en las conexiones.

La conexión y placa Gusset se diseñan con una forma transversal cruciforme para disponer de líneas de pernos en dos planos (Figura 2.14). Esta conexión otorga estabilidad a la pletina de acero especialmente en la zona adyacente al tubo de confinamiento y reduce longitudinalmente el espacio que se necesita para disponer el número de pernos necesario para resistir las solicitaciones de diseño. Además los atiesadores por ambos lados aportan área extra para repartir de mejor forma la carga axial y disminuir los esfuerzos en el acero, reduciendo así la probabilidad de que la placa Gusset entre en el rango no lineal de esfuerzos o presente pandeo.



Figura 2.14: Conexión placa Gusset con extremo del BRB.

2.4 Sistema de control y adquisición.

El sistema de control y adquisición de datos corresponde al conjunto de sensores, hardware y programas, los cuales se encargan por una parte de controlar la acción del actuador hidráulico en todo instante para cumplir con las disposiciones de carga de acuerdo a lo establecido en la normativa vigente y por otra parte se encarga de obtener, procesar y mostrar los resultados de todas las variables físicas de interés para los efectos del ensayo, tales como carga, desplazamiento y deformación.

La teoría que implica el sistema de control y adquisición se detalla en Espinoza (2016). En los siguientes puntos se resume las características principales.

2.4.1 Sistema de control.

El sistema de control opera desde un computador con el objetivo principal de manejar la acción del actuador hidráulico en cada instante de los ensayos. Para llevar a cabo la tarea anterior, el software debe disponer de toda la información acerca de la posición del actuador hidráulico durante los ensayos. Esto se realiza mediante la comunicación del computador y el o los sensores. En el caso particular de este ensayo la normativa establece que se debe aplicar un historial de desplazamiento, por lo tanto esta variable se transforma en la variable de control, la cual se monitorea en todo momento con un sensor de desplazamiento ubicado en el actuador hidráulico. Por otra parte el resto de las variables provenientes de sensores como celda de carga, strain gages o el resto de los LVDT van dirigidas hacia el sistema de adquisición de datos.

El software de control realiza las siguientes tareas durante el ensayo:

- Modifica e interpreta las señales de entrada provenientes del sensor de desplazamiento ubicado en el actuador hidráulico.
- Detecta estados críticos del sistema.
- Mantiene interacción con el usuario.
- Genera un gráfico de desplazamiento en función del tiempo aplicado.

El actuador hidráulico es controlado por una servo válvula (Figura 2.15), la cual controla el flujo de aceite proveniente del sistema de bombeo que permite mover el actuador. Debido a que el ensayo es cuasi estático, los caudales de la bomba que se utilizan corresponden a 6 [lt /min].



Figura 2.15: Servo válvula de control MOOG (Espinoza 2016).

2.4.2 Sistema de adquisición.

El sistema de adquisición de datos corresponde al sistema encargado de procesar y almacenar todos los datos provenientes de los sensores tales como LVDTs, strain gages y celda de carga, los cuales no participan en el control del ensayo y son un dato de salida de éste. El listado de instrumentos de medición se detalla a continuación y se muestra esquemáticamente en la figura 2.16:

- Se dispone de dos LVDTs, marca Schaevitz Sensors Hampton, VA. DC-SE 2000, en cada extremo de la probeta con el objetivo de medir el desplazamiento relativo entre la camisa de confinamiento y la conexión del arriostamiento, es decir un total de cuatro LVDTs.
- Se dispone de un LVDT, marca Schaevitz Sensors Hampton, VA. DC-SE 2000 en el centro de cada probeta para registrar el desplazamiento fuera del plano (cara lateral)
- Se dispone de un LVDTs, marca Schaevitz Sensors Hampton, VA. DC-SE 1000 en el centro de cada probeta para registrar el desplazamiento fuera del plano de la probeta durante el ensayo (cara inferior).

- Se dispone de dos LVDTs, marca Macro Sensors Pennsauken, NJ. DC 750 1000, los cuales registran el desplazamiento relativo entre los extremos de cada probeta. Este último parámetro se grafica en las curvas de fuerza versus desplazamiento que se exigen como requisito mínimo para cada ensayo.
- Se dispone de strain gages, marca Vishay Micro-Measurements & SR-4, ubicados en los cuartos de cada probeta para registrar la deformación en la camisa de confinamiento. En cada cuarto de la camisa de confinamiento de la probeta se dispone de un strain gage en cada cara, lo que hace un total de 12 strain gages por cada probeta ensayada. En el primer y último cuarto se disponen dos strain gages transversales (caras laterales) y dos strain gage longitudinales (cara superior e inferior).
- Finalmente la celda de carga se dispone en el émbolo del actuador hidráulico para registrar la fuerza axial aplicada en cada instante del ensayo.

Las modificaciones realizadas a la instrumentación durante el desarrollo de las pruebas se detallan en la sección 4.4 Instrumentación.

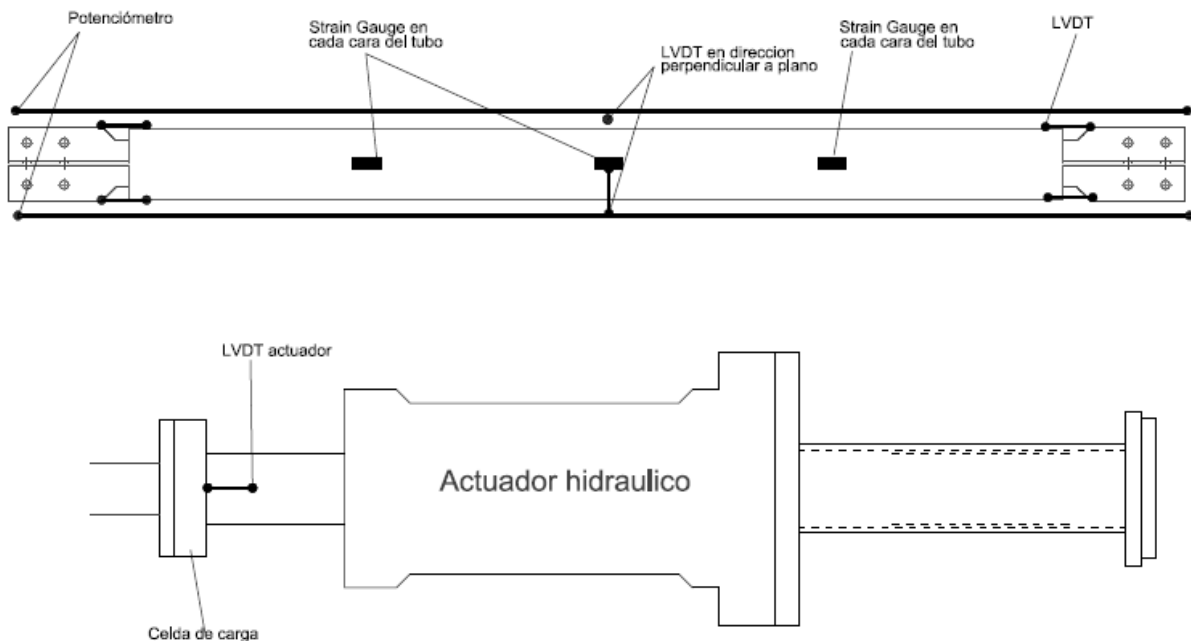


Figura 2.16: Esquema instrumentación (Espinoza, 2016).

3 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES.

En el presente capítulo se presentan los resultados de la caracterización de los materiales base del arriostramiento con pandeo restringido, con el fin de conocer las propiedades mecánicas tanto del material confinante, neopreno, como del núcleo de acero utilizado en la confección de los prototipos.

3.1 Propiedades del material confinante.

En este trabajo el elastómero cumple un rol fundamental debido a que corresponde al material confinante y tiene por finalidad restringir el pandeo del núcleo de acero cuando éste es sometido a compresión. Es por estos motivos que se determinan las propiedades mecánicas tanto estáticas como dinámicas del elastómero.

El material confinante utilizado corresponde a un neopreno de 70°ShA, color negro, de alto módulo de elasticidad y bajo coeficiente de amortiguamiento

Las propiedades a estudiar corresponden a:

- Módulo de corte.
- Coeficiente de amortiguamiento.
- Curva de tensión en función de la elongación.

3.1.1 Ensayo de tracción del elastómero.

Se confeccionan 3 planchas de elastómero 200x200x3 [mm], las cuales son troqueladas para obtener 5 muestras por cada una de éstas, es decir un total de 15 muestras para ensayo. En primera instancia se identifican las planchas con los números 1, 2 y 3, luego se procede a numerar cada muestra de la siguiente forma 1-1, 1-2 y así sucesivamente hasta completar la tercera plancha con la identificación 3-5 (Figura 3.1).



Figura 3.1: Probetas de elastómero – Ensayo de tracción.

Las dimensiones de las probetas se especifican en la norma ASTM D412-06a (2013), corresponden a las mostradas en la figura 3.2 y listadas en la tabla 3.1:

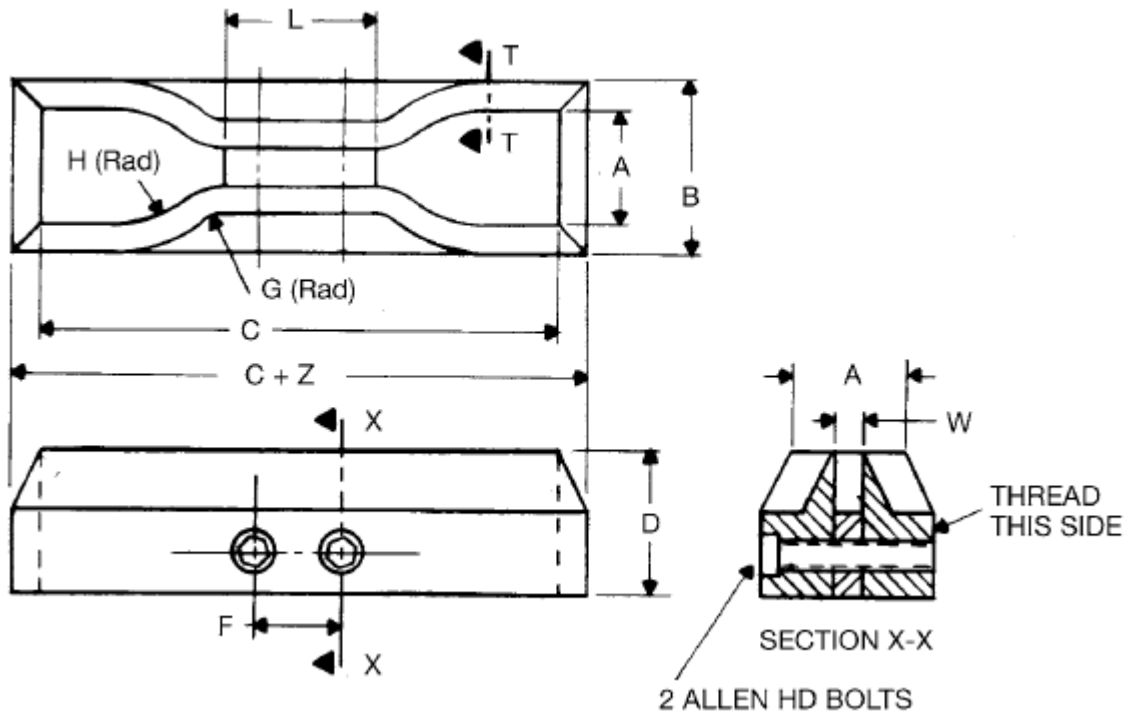


Figura 3.2: Pieza estándar para cortar probetas de elastómero (ASTM D412-06a).

En la norma se especifican seis probetas para cortar denotadas desde la letra A a la F, en este trabajo se utiliza la pieza C para troquelar las probetas del elastómero, cuyas dimensiones son:

Tabla 3.1: Dimensiones pieza C (ASTM D412-06a).

Dimensiones	Unidad	Pieza C
A	mm	25
B	mm	40
C	mm	115
D	mm	32
D-E	mm	13
F	mm	19
G	mm	14
H	mm	25
K	mm	33
W	mm	6
Z	mm	13

Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio de materiales poliméricos de IDIEM. La metodología de ensayo utilizada corresponde a la proporcionada por la norma internacional ASTM D412-06a (2013).

La norma requiere ensayar cinco probetas de elastómero, por lo cual el resultado final corresponde al promedio de cinco especímenes.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.2, 3.3 y 3.4, y en las figura 3.3 a 3.6:

Tabla 3.2: Resultados tensión-elongación probetas - Serie 1

Muestra	Dimensiones [mm]		Distancia [mm]		Carga [N]	Tensión [MPa]	Elongación [%]	
	Espesor	Ancho	Inicial	Final				
M1	1	2,34	6,31	25	130	252	17,07	420
	2	2,30	6,39	25	130	266	18,10	420
	3	2,23	6,31	25	125	244	17,34	400
	4	2,20	6,28	25	130	244	17,66	420
	5	2,31	5,88	25	110	210	15,46	340
Promedio	2,28	6,23	25	125	243	17,54	415	
Desviación Estándar	0,06	0,20	0	9	21	0,44	10	

Tabla 3.3: Resultados tensión-elongación probetas - Serie 2

Muestra	Dimensiones [mm]		Distancia [mm]		Carga [N]	Tensión [MPa]	Elongación [%]	
	Espesor	Ancho	Inicial	Final				
M2	1	2,25	6,24	25	125	240	17,09	400
	2	2,36	6,30	25	120	236	15,87	380
	3	2,20	6,34	25	125	242	17,35	400
	4	2,34	6,37	25	125	252	16,91	400
	5	2,25	5,95	25	120	240	17,93	380
Promedio	2,28	6,24	25	123	242	17,03	392	
Desviación Estándar	0,07	0,17	0	3	6	0,75	11	

Tabla 3.4: Resultados tensión-elongación probetas - Serie 3

Muestra	Dimensiones [mm]		Distancia [mm]		Carga [N]	Tensión [MPa]	Elongación [%]	
	Espesor	Ancho	Inicial	Final				
M3	1	2,32	6,23	25	120	244	16,88	380
	2	2,26	6,23	25	120	234	16,62	380
	3	2,17	5,90	25	120	204	15,93	380
	4	2,35	6,14	25	120	184	12,75	380
	5	2,17	5,90	25	120	204	15,93	380
Promedio	2,27	6,14	25	119	216	15,52	376	
Desviación Estándar	0,07	0,14	0	2	24	1,65	9	

Los datos para la quinta probeta de cada serie no fueron registrados por la máquina de ensayo, por lo que no es posible obtener dicha curva.

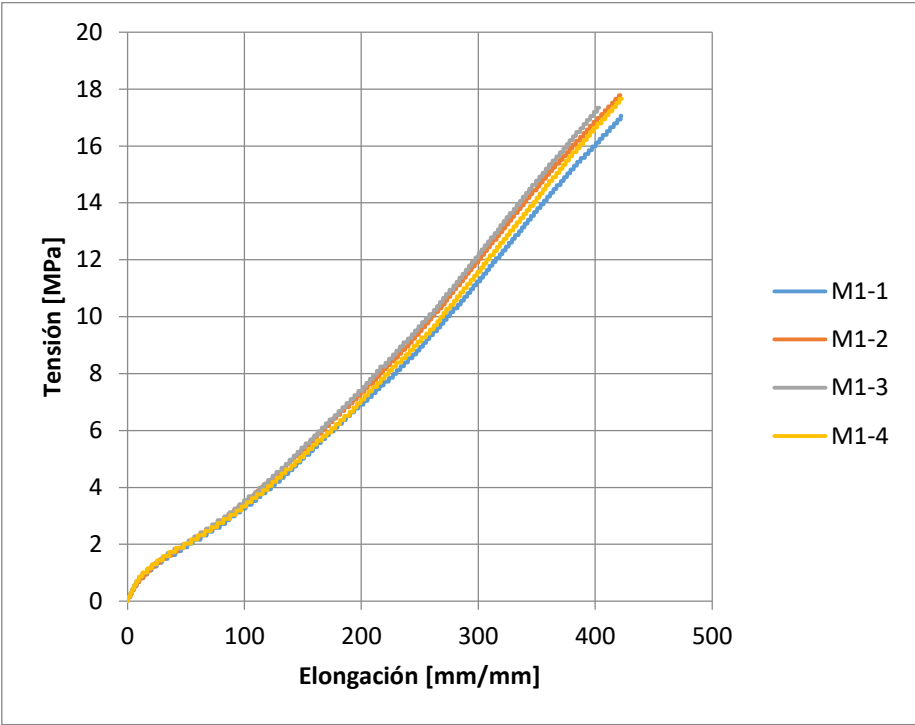


Figura 3.3: Curva tensión – elongación probetas Serie 1

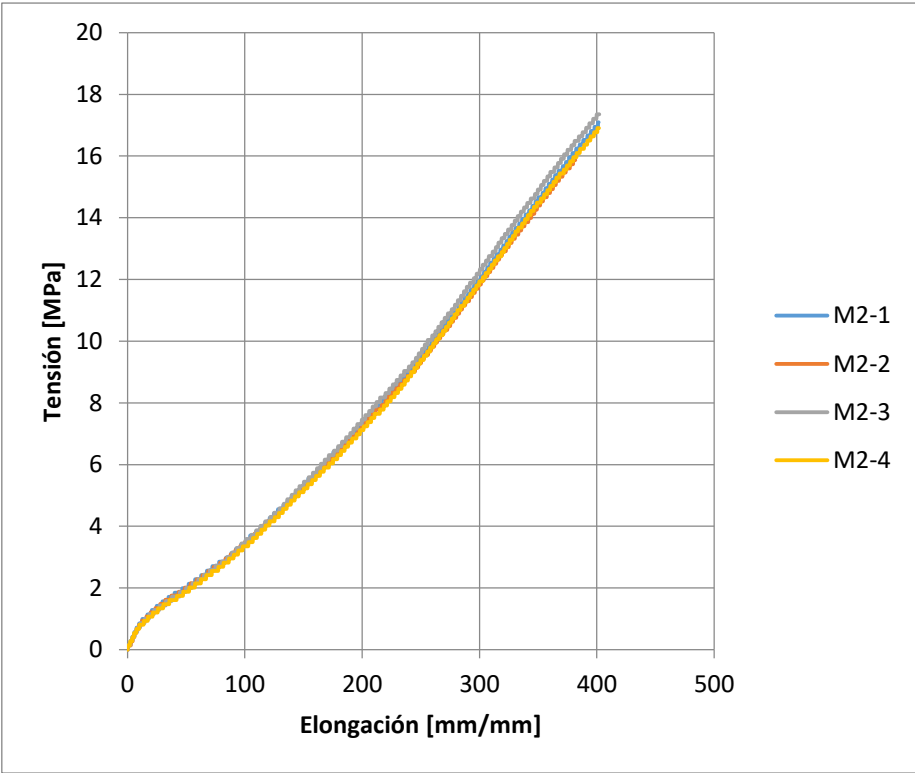


Figura 3.4: Curva tensión – elongación probetas Serie 2

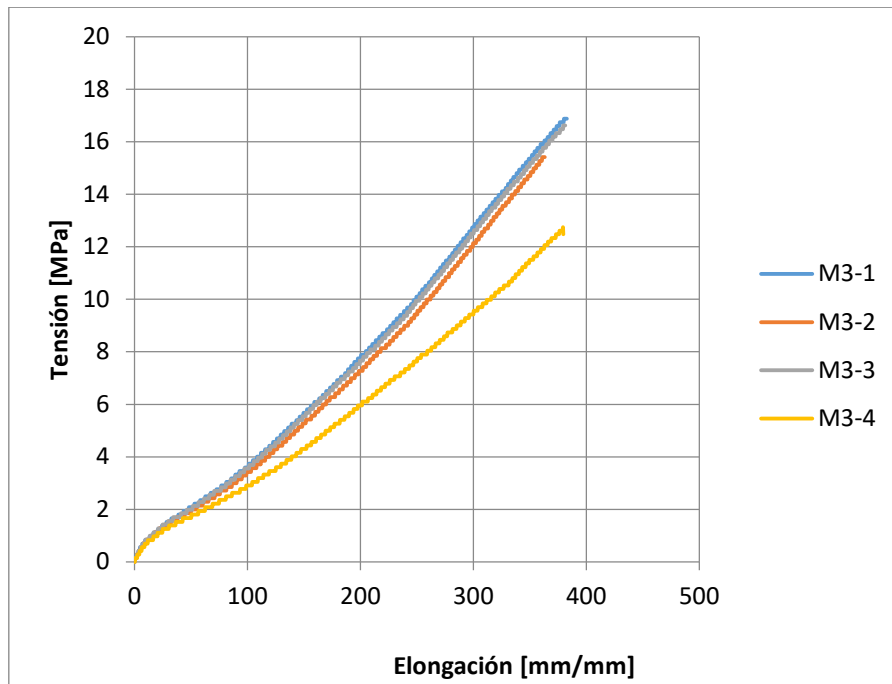


Figura 3.5: Curva tensión – elongación probetas Serie 3

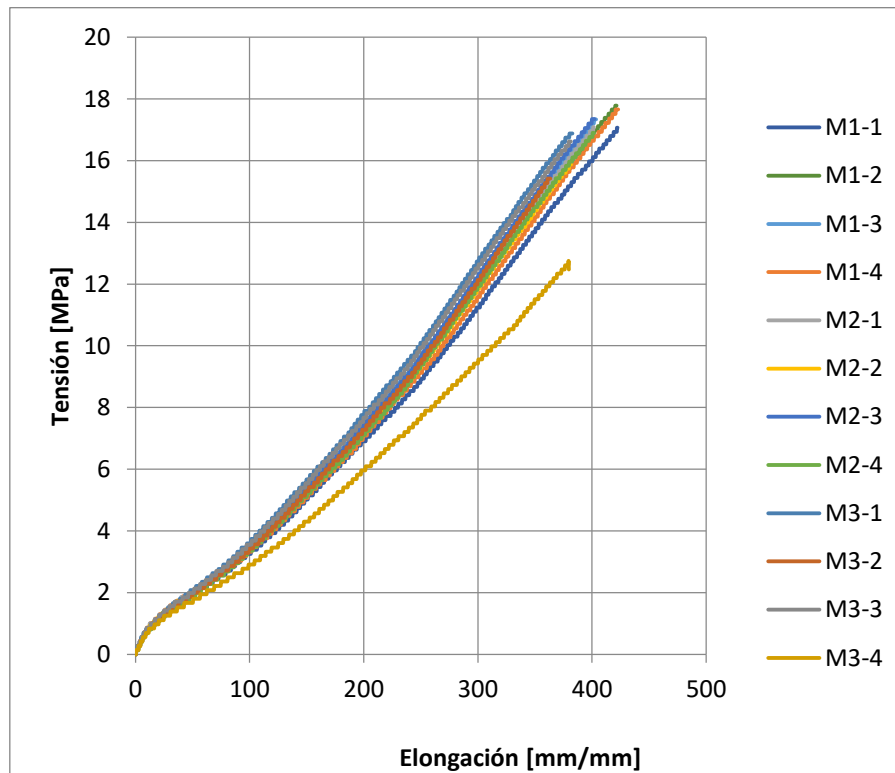


Figura 3.6: Resumen curva tensión – elongación.

De acuerdo a la figura 3.6, en términos globales se aprecia que el comportamiento del elastómero es uniforme en tracción salvo por la probeta denominada 3-4, la cual difiere de las curvas obtenidas por las demás probetas, esta diferencia puede ser producida por un mal ajuste en el ensayo o bien la probeta fue mal confeccionada. Se observa un comportamiento bilineal siendo más rígido en deformaciones pequeñas.

3.1.2 Ensayo de corte directo.

Este ensayo permite determinar las propiedades mecánicas, módulo de corte y amortiguamiento del material confinante.

Estos ensayos fueron realizados en el laboratorio experimental de estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, en una máquina diseñada para someter las probetas a esfuerzos de corte directo a diferentes frecuencias y a un desplazamiento controlado, Herrera (1998), la que se muestra en la figura 3.7.

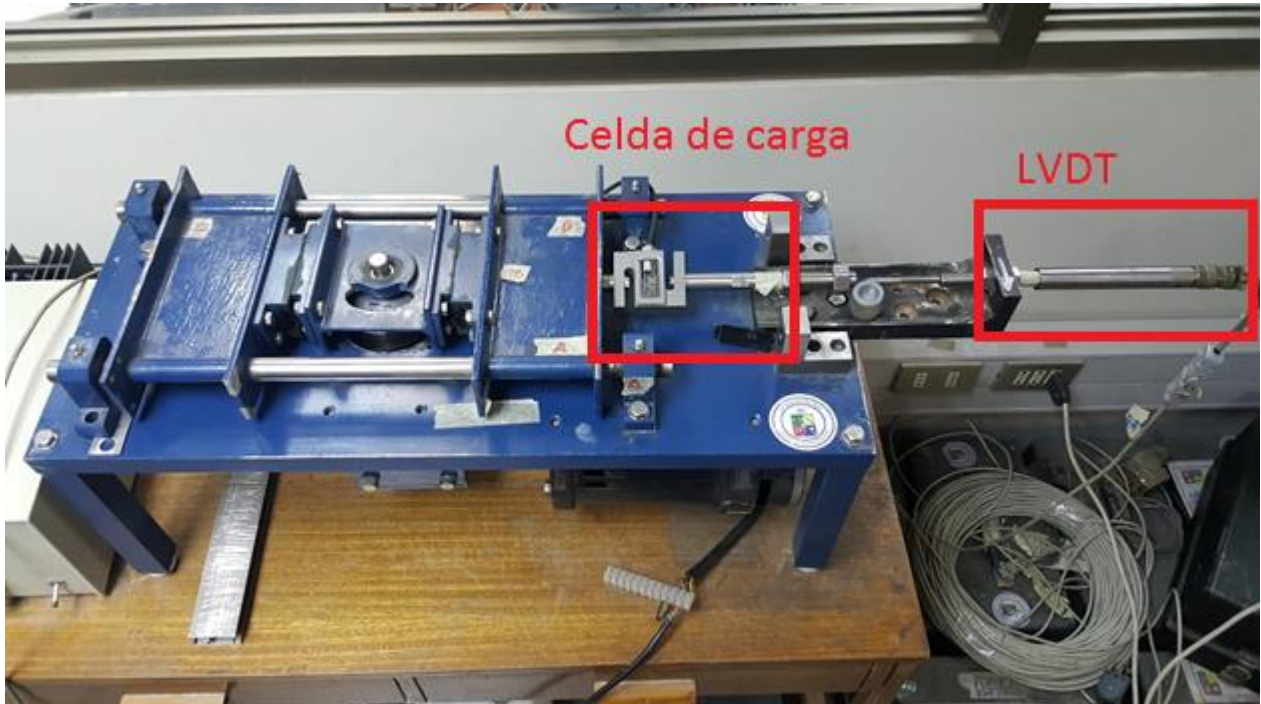


Figura 3.7: Máquina de ensayo de corte directo.

Para realizar los ensayos la máquina se configura para imponer ciclos de carga a la frecuencia de 1 Hz y deformaciones nominales relativas de 50%, 75%, 100% y 115% con respecto al espesor del elástomero. Para medir la carga se utiliza una celda de carga con capacidad máxima de 900 [kg] y para registrar el desplazamiento se utiliza un transformador diferencial de variación lineal (LVDT) ubicado a continuación de la parte de la probeta que es sometida a deformación. Los sensores entregan los datos como medidas de voltaje las cuales se registra en el programa LabVIEW, el cual controla la frecuencia de muestreo y el tiempo de registro de datos. Las curvas de calibración de los elementos de medición fueron obtenidas a partir de registrar cargas y desplazamientos conocidos.

Se confeccionan tres probetas, las cuales constan de tres secciones de acero 30x30x50 [mm] separadas por dos secciones de elástomero 30x30x6 [mm] (Figura 3.8). Estas probetas se identifican desde la 1 a la 3 como se aprecia en la figura 3.9.

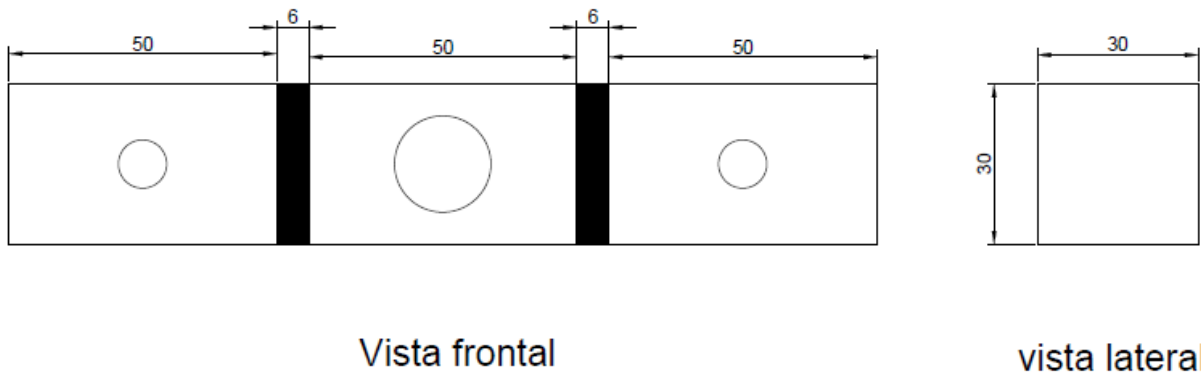


Figura 3.8: Dimensiones probetas de corte directo.

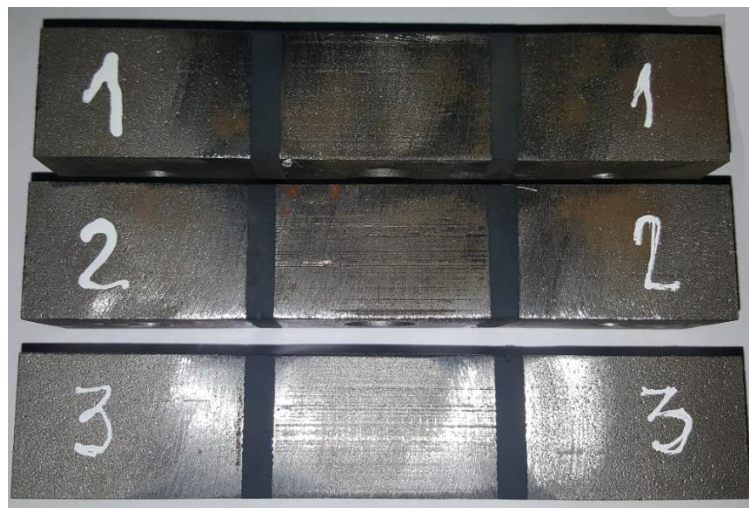


Figura 3.9: Probetas de elastómero para ensayo de corte directo.

El orden de los ensayos se realiza de menor a mayor desplazamiento, siempre incrementando la deformación aplicada. Esto se debe a la resiliencia del material que exhiben comportamientos diferentes si las probetas se ensayan a un desplazamiento dado y luego a un desplazamiento menor. Si tal caso llegase a ocurrir para ensayar las probetas a un desplazamiento más bajo se debe esperar un determinado número de días (3 días según detalles del fabricante) para que las probetas presenten un comportamiento normal. De esta forma se ensayan primero todas las probetas a un 50% de desplazamiento nominal y luego a 75%, incrementando sucesivamente la deformación.

Es necesario registrar el espesor del elastómero de cada probeta, en todas sus caras, obteniendo así 8 registros de espesor por cada probeta. Esto permite obtener un espesor promedio para normalizar por el desplazamiento y así obtener la deformación relativa real aplicada. Para la medición del espesor del elastómero se utilizó un pie de metro.

También se registró las dimensiones laterales de la probeta por ambos extremos, con el objetivo de obtener una medida más exacta del área transversal. Este dato es importante ya que se debe obtener la tensión de corte la cual corresponde a la fuerza aplicada dividida por el área total del material resistente.

Antes de ensayar una probeta es necesario realizar una inspección y verificar que no existan signos de despegue de material, lo cual en caso de ocurrir genera errores en los cálculos de tensión ya que existe pérdida de área.

Posteriormente se debe colocar la probeta en la máquina ubicada manualmente en la posición de desplazamiento cero (Figura 3.10). El ajuste y apriete de pernos y prensas que mantienen fija la probeta también se debe realizar verificando que la probeta no tenga un desplazamiento inicial.

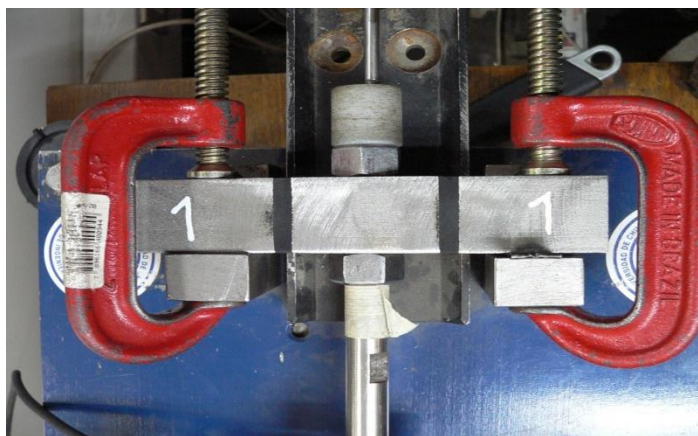


Figura 3.10: Posición inicial probeta de corte directo.

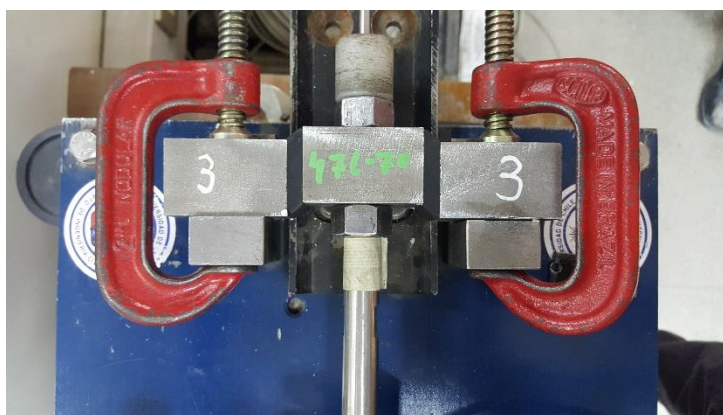


Figura 3.11: Posición deformada probeta de corte directo.

Una vez que la probeta se encuentra en la posición neutra y fija se debe balancear la celda de carga. Lo anterior se realiza en el acondicionador de señal de la celda. Luego la máquina comienza a funcionar, se aplica un mínimo de 5 ciclos, descartando el primero, ya que debido a las propiedades del elastómero ejerce una carga mayor en el primer ciclo pero en los siguientes ciclos se estabiliza. La figura 3.11 muestra uno de los ensayos a 100% de deformación.

El objetivo es determinar que el elastómero utilizado cumpla con los parámetros mencionado por el fabricante, un módulo de corte entre 13 y 14 [kgf/cm²] y amortiguamiento entre 5 y 6 [%] para una deformación de 100%.

Los resultados obtenidos, consideran tres ciclos y se detallan en las tablas 3.5 a 3.8:

Tabla 3.5: Módulo de corte y amortiguamiento – Deformación 50%

	Neo 1	Neo 2	Neo 3	
G [kgf/cm ²]	15,70	15,20	15,35	
	15,60	15,13	15,35	
	15,52	15,09	15,30	
Promedio	15,61	15,14	15,33	15,36

	Neo 1	Neo 2	Neo 3	
β [%]	6,14	5,86	5,90	
	6,14	5,85	5,90	
	6,11	5,87	5,78	
Promedio	6,13	5,86	5,86	5,95

Tabla 3.6: Módulo de corte y amortiguamiento – Deformación 75%

	Neo 1	Neo 2	Neo 3	
G [kgf/cm ²]	14,33	14,38	14,85	
	14,32	14,36	14,78	
	14,29	14,29	14,76	
Promedio	14,31	14,34	14,80	14,48

	Neo 1	Neo 2	Neo 3	
β [%]	5,82	5,54	5,56	
	5,87	5,50	5,55	
	5,83	5,54	5,62	
Promedio	5,84	5,53	5,58	5,65

Tabla 3.7: Módulo de corte y amortiguamiento – Deformación 100%

	Neo 1	Neo 2	Neo 3	
G [kgf/cm ²]	13,84	13,49	14,00	
	13,82	13,43	13,96	
	13,77	13,37	13,88	
Promedio	13,81	13,43	13,95	13,73

	Neo 1	Neo 2	Neo 3	
β [%]	5,81	5,64	5,48	
	5,81	5,63	5,47	
	5,80	5,66	5,45	
Promedio	5,80	5,64	5,47	5,64

Tabla 3.8: Módulo de corte y amortiguamiento – Deformación 115%

	Neo 1	Neo 2	Neo 3	
G [kgf/cm ²]	12,77	12,98	13,08	
	12,71	12,91	13,04	
	12,66	12,88	13,01	
Promedio	12,71	12,92	13,04	12,89

	Neo 1	Neo 2	Neo 3	
β [%]	5,64	5,44	5,43	
	5,65	5,38	5,39	
	5,66	5,42	5,45	
Promedio	5,65	5,41	5,42	5,50

En la tabla 3.9 se muestra el promedio de las tres probetas para cada deformación, valores que corresponden con lo entregado por el fabricante. En efecto, el módulo de corte es 13,73 [kgf/cm²] y el amortiguamiento es 5,50 [%] para una deformación de un 100%.

Tabla 3.9: Resumen de módulo de corte y amortiguamiento

Deformación [%]	G [kgf/cm ²]	β [%]
50	15,36	5,95
75	14,48	5,65
100	13,73	5,64
115	12,89	5,50

En la figura 3.12 y 3.13 se muestran el comportamiento del módulo de corte y del amortiguamiento en función de la deformación. En ambos casos se observa que a medida que se aumenta la deformación impuesta disminuye el parámetro determinado. Este comportamiento corresponde a los obtenidos por Herrera (1998).

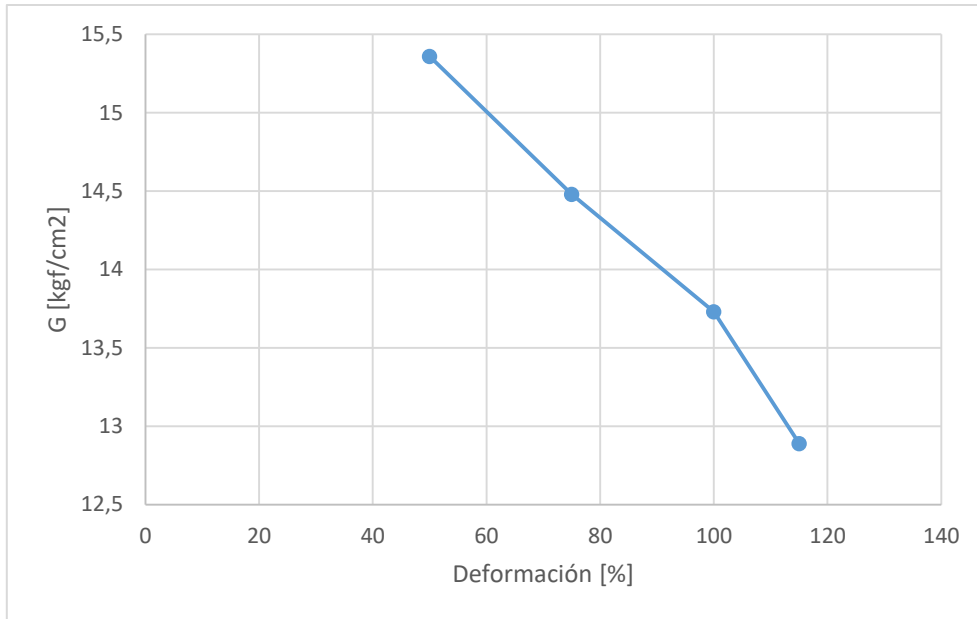


Figura 3.12: Módulo de corte en función de la deformación

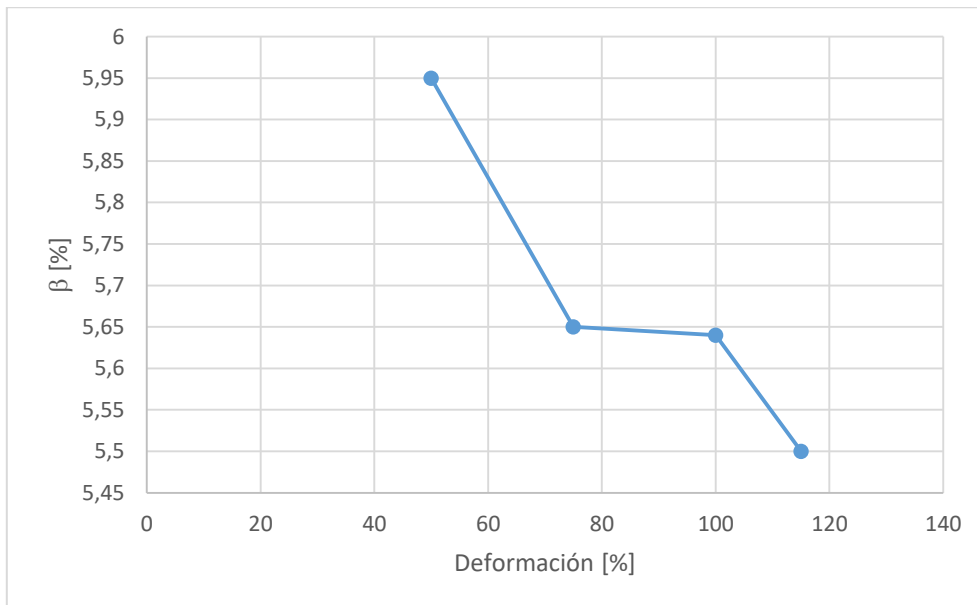


Figura 3.13: Amortiguamiento en función de la deformación.

3.2 Propiedades del núcleo acero.

El núcleo de acero transmite los esfuerzos axiales, y se puede pandear cuando es sometido a compresión. Es por estos motivos que se determinan sus propiedades mecánicas.

El acero utilizado corresponde a un acero ASTM A36, las propiedades a estudiar corresponden a:

- Módulo de elasticidad.
- Tensión de fluencia.
- Tensión máxima.
- Elongación

3.2.1 Ensayo de tracción del acero.

Se extraen cuatro planchas planas de 450x50 [mm] con el espesor del núcleo de acero del arriostramiento equivalente a 10 [mm].

La metodología de ensayo corresponde a la proporcionada por la norma internacional ASTM E8/E8M – 15a (2015). Estos ensayos fueron realizados en el Laboratorio Experimental de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

Las planchas son mecanizadas para cumplir con las dimensiones especificadas en la norma, las cuales se detallan en la figura 3.14.

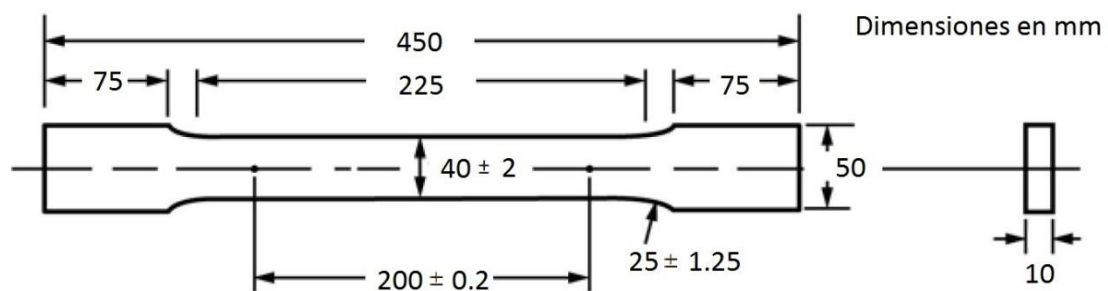


Figura 3.14: Dimensiones probeta para ensayo de tracción (ASTM E8/E8M-15a).

Las probetas ya mecanizadas se identifican mediante números del 1 al 4 tal como se aprecia en la figura 3.15.



Figura 3.15: Probetas para ensayo de tracción.

Previo a la realización del ensayo se registran las dimensiones de cada una de las probetas, las cuales se presentan en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Dimensiones probetas planas de acero ASTM A36

Probeta	Dimensiones globales		Dimensiones zona rebajada		
	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Área [mm ²]
1	48,90	9,86	39,76	9,87	392,43
2	48,80	9,92	39,74	9,92	394,22
3	48,73	9,82	39,67	9,84	390,35
4	48,70	9,91	39,84	9,91	394,81

Los ensayos se realizan sólo a tracción como establece la norma en una máquina universal de carga INSTRON (Figura 3.16), además se utiliza un extensómetro ubicado en la zona central de la probeta para obtener redundancia en los datos y corroborar los datos entregados por la máquina universal. El extensómetro se retira cuando el acero entra en la zona de endurecimiento, por precaución, ya que al momento de la fractura se puede producir daño en el instrumento.

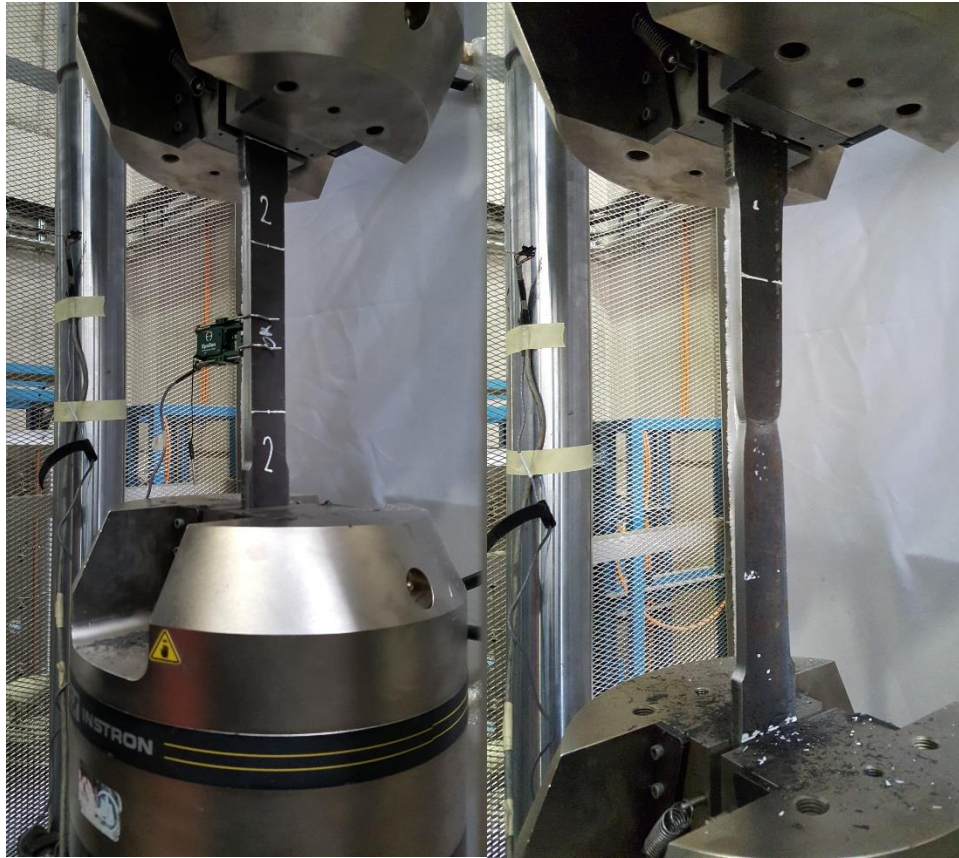


Figura 3.16: Máquina universal INSTRON y extensómetro (Izquierda), instante previo a la fractura sin extensómetro (Derecha)

Previo a analizar los resultados finales, se realizó una comparación entre los desplazamientos obtenidos por la máquina universal y por el extensómetro, pues los datos proporcionados por la primera no se correspondían con los valores esperados para el módulo de elasticidad dando un material más flexible. Por lo tanto para el cálculo de módulo de elasticidad y la tensión de fluencia del acero se utilizaron los datos obtenidos con el extensómetro. La comparación se aprecia en las figuras 3.17 a 3.20 y en la tabla 3.11.

Tabla 3.11: Comparación módulo de Young entre máquina universal y extensómetro.

	E [MPa] Máquina universal	E [MPa] Extensómetro
Probeta 1	84.265	211.215
Probeta 2	84.150	231.605
Probeta 3	85.799	220.167
Probeta 4	81.567	223.417
Promedio	83.945	221.601

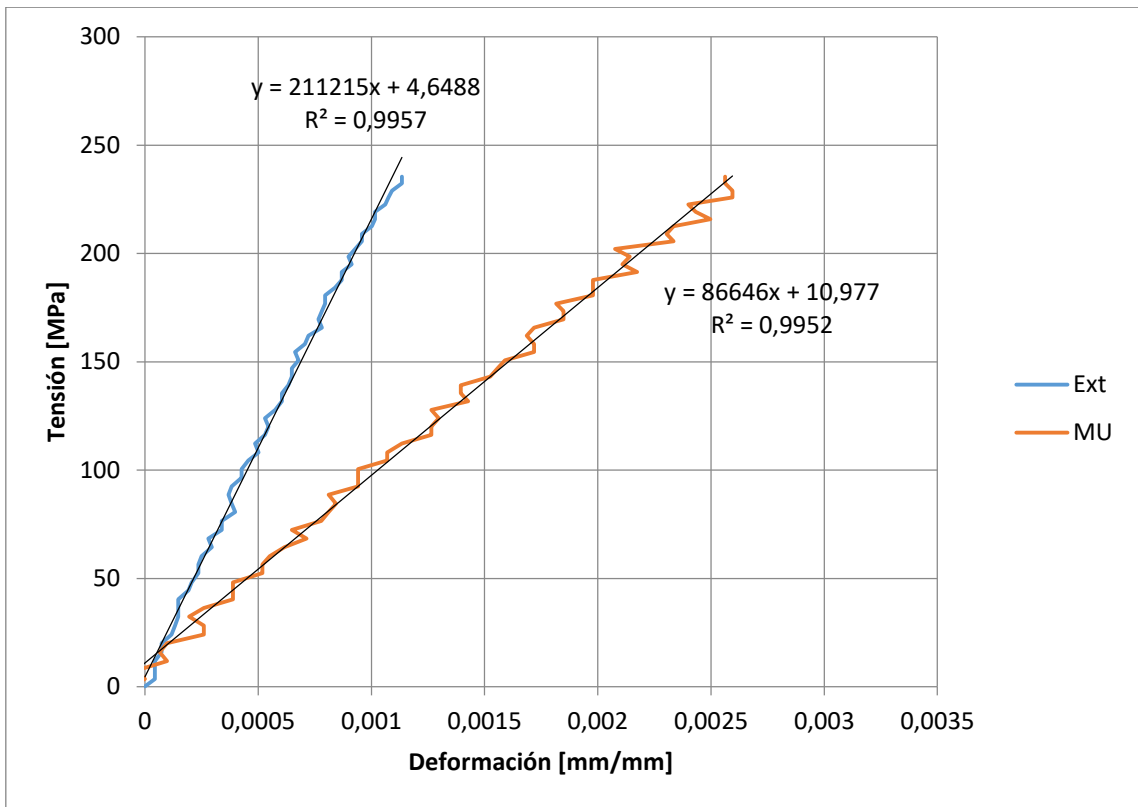


Figura 3.17: Comparación máquina universal (MU) y extensómetro (Ext) – Probeta 1.

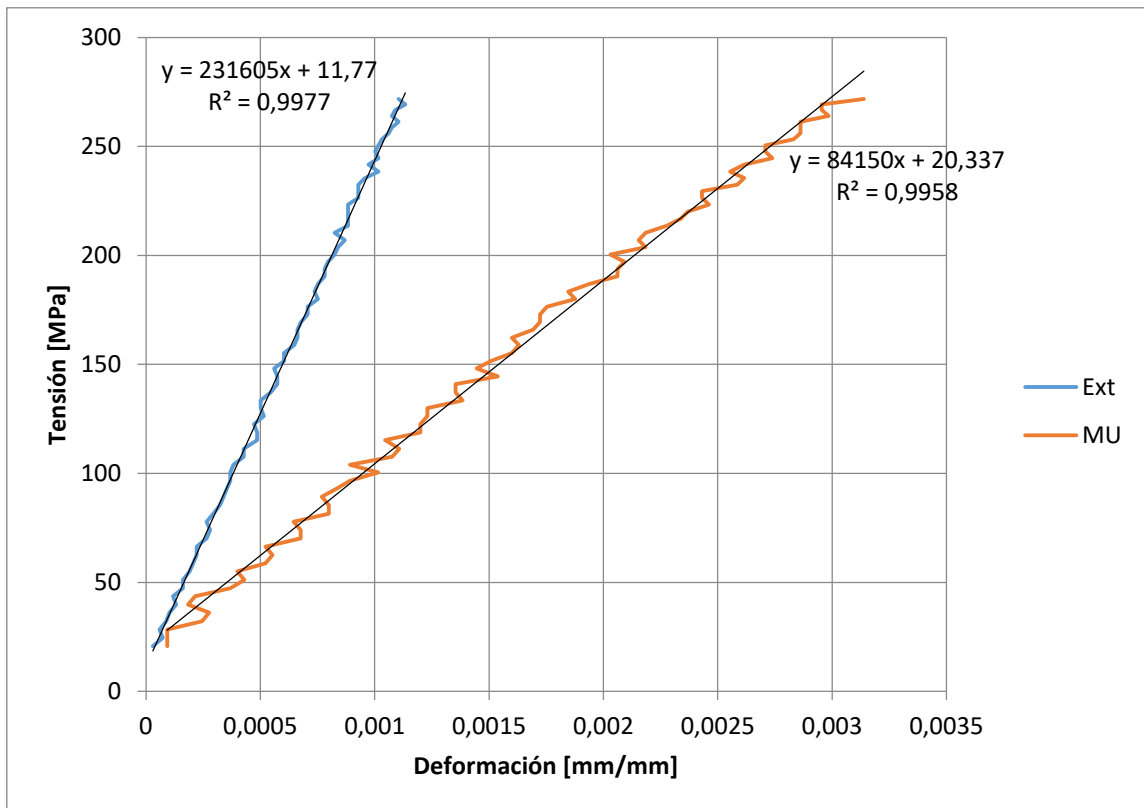


Figura 3.18: Comparación máquina universal (MU) y extensómetro (Ext) – Probeta 2.

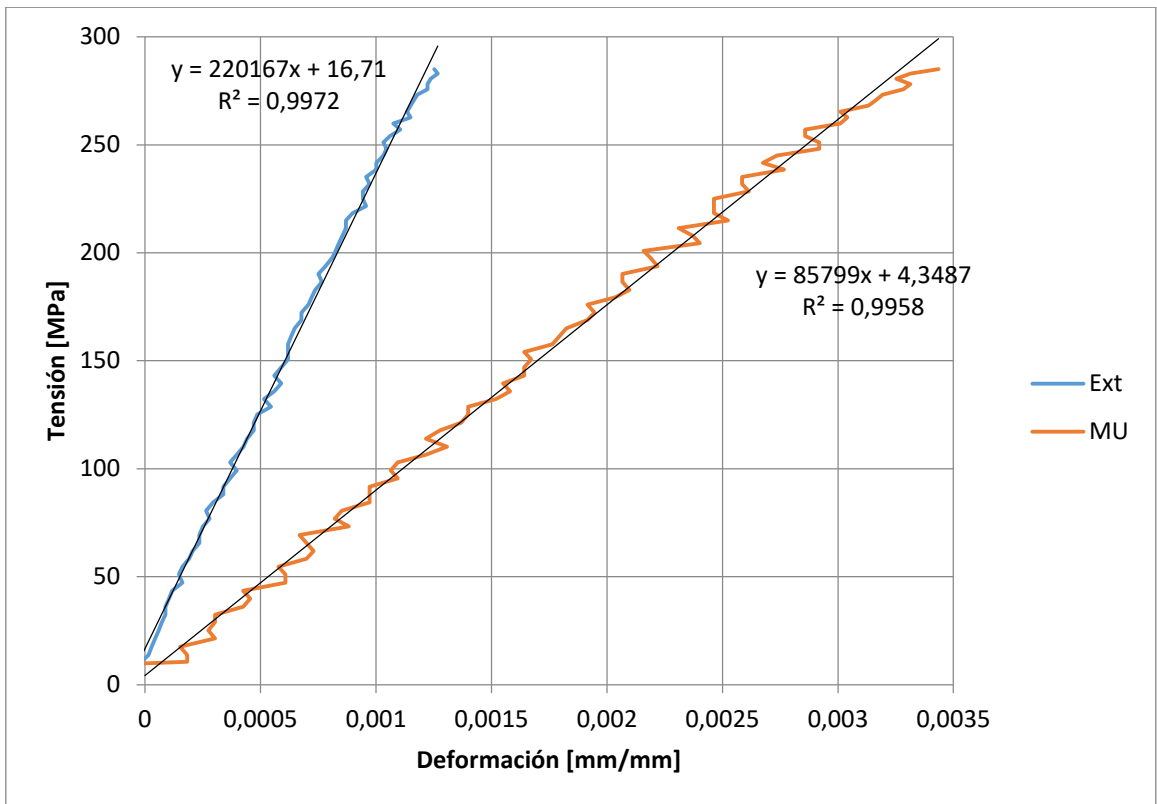


Figura 3.19: Comparación máquina universal (MU) y extensómetro (Ext) – Probeta 3.

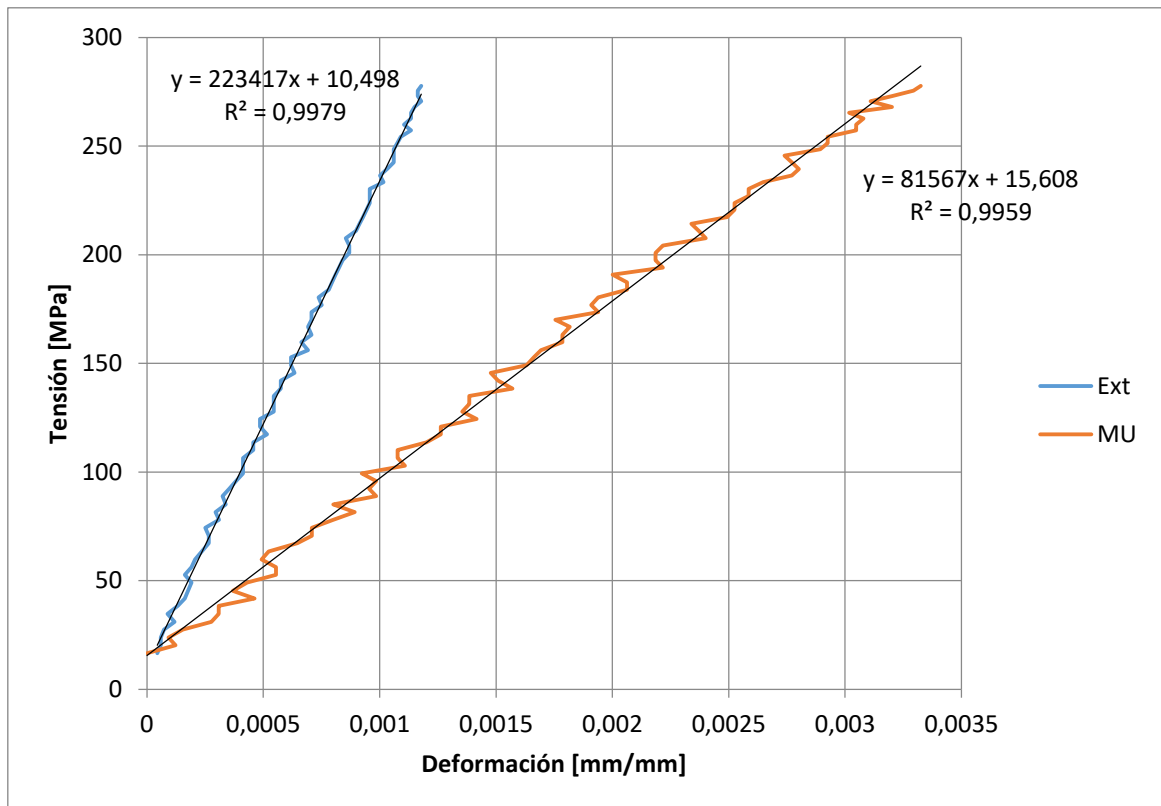


Figura 3.20: Comparación máquina universal (MU) y extensómetro (Ext) – Probeta 4.

En la figura 3.21 se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados a las probetas planas con la información proporcionada por la máquina universal ya que el extensómetro se utilizó sólo al comienzo del ensayo.

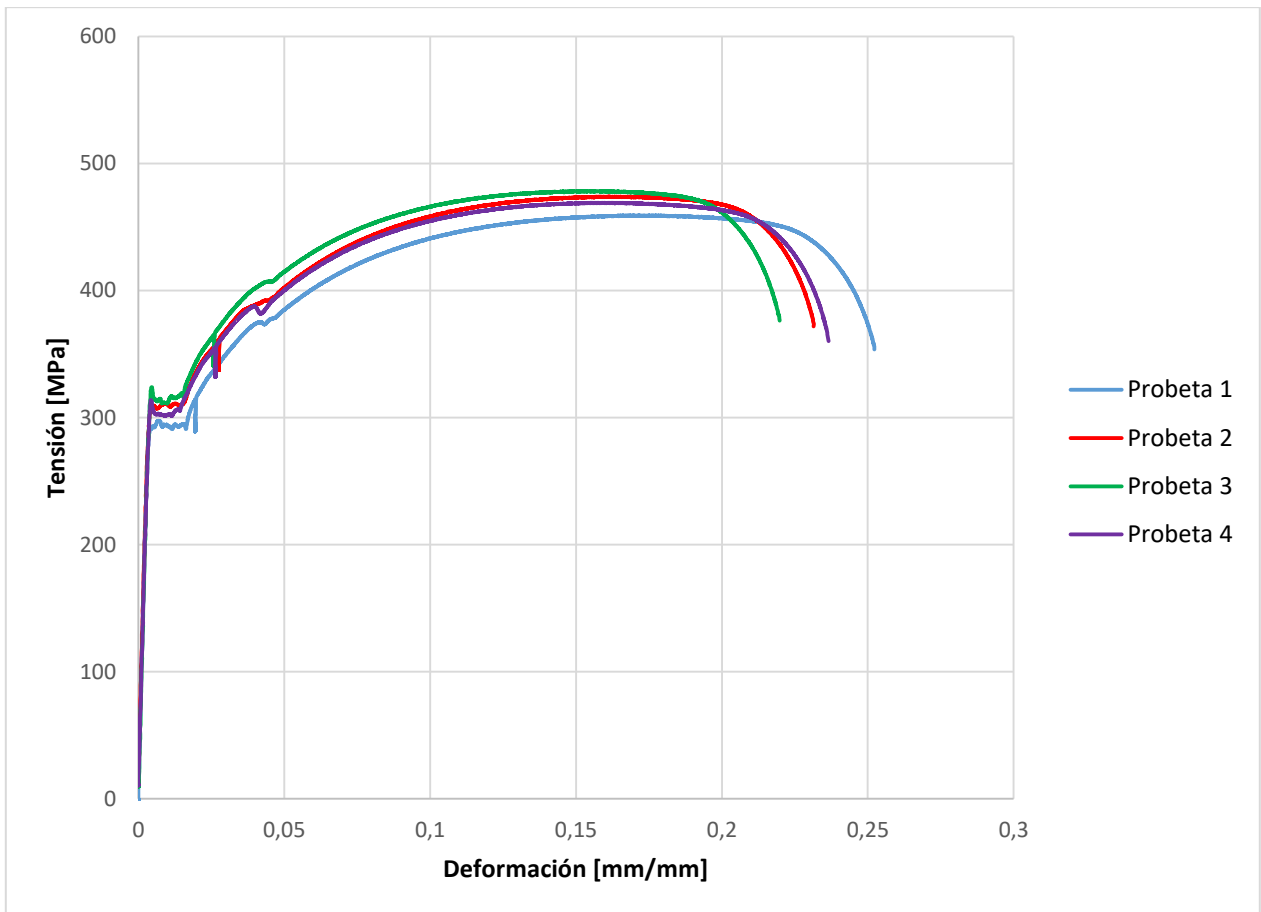


Figura 3.21: Curva tensión deformación de probeta plana de acero.

El promedio de los resultados está dentro de lo exigido por la norma, la cual demanda una tensión de fluencia mínima de 250 [MPa], un rango de tensión última entre 450 y 550 [MPa], módulo de elasticidad de 210.000 [MPa] \pm 10.

Tabla 3.12: Resumen propiedades de las probetas de acero.

	f_y [Mpa]	f_u [Mpa]	ϵ [%]	E [MPa]
Probeta 1	293	459	25	211.215
Probeta 2	309	474	23	231.605
Probeta 3	315	478	22	220.167
Probeta 4	304	469	24	223.417
Promedio	305	470	23	221.601

Finalmente, en la figura 3.22 se observan las 4 probetas ya ensayadas.



Figura 3.22: Fractura probetas planas de acero.

4 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LOS ARRIOSTRAMIENTOS CON PANDEO RESTRINGIDO.

En este capítulo se detallan las características y la fabricación de 4 prototipos de arriostramientos con pandeo restringido.

4.1 Componentes.

Un arriostramiento consta de 4 elementos fundamentales, núcleo de acero, material confinante, camisa exterior e interfaz entre el núcleo y el material confinante.

4.1.1 Núcleo del arriostramiento.

El núcleo del arriostramiento es de acero ASTM A36 de sección 100x10 [mm], y 2520 [mm] de largo. La tensión de fluencia nominal de $f_y = 250 \text{ MPa}$, fue corroborada mediante el ensayo de 4 probetas planas obtenidas de material sobrante de la confección de los núcleos, capítulo 3. La función de este elemento es transmitir los esfuerzos axiales.

Como en el extremo se conecta a una placa Gusset cruciforme, el núcleo también consta de dos pares de atiesadores en sus extremos. Por requerimientos de construcción se incluyen dos topos cilíndricos de 25 [mm] en el medio de éste.

Las dimensiones del núcleo de acero y de los atiesadores en los cuatro prototipos son idénticas, las cuales se detallan en la figura 4.1.

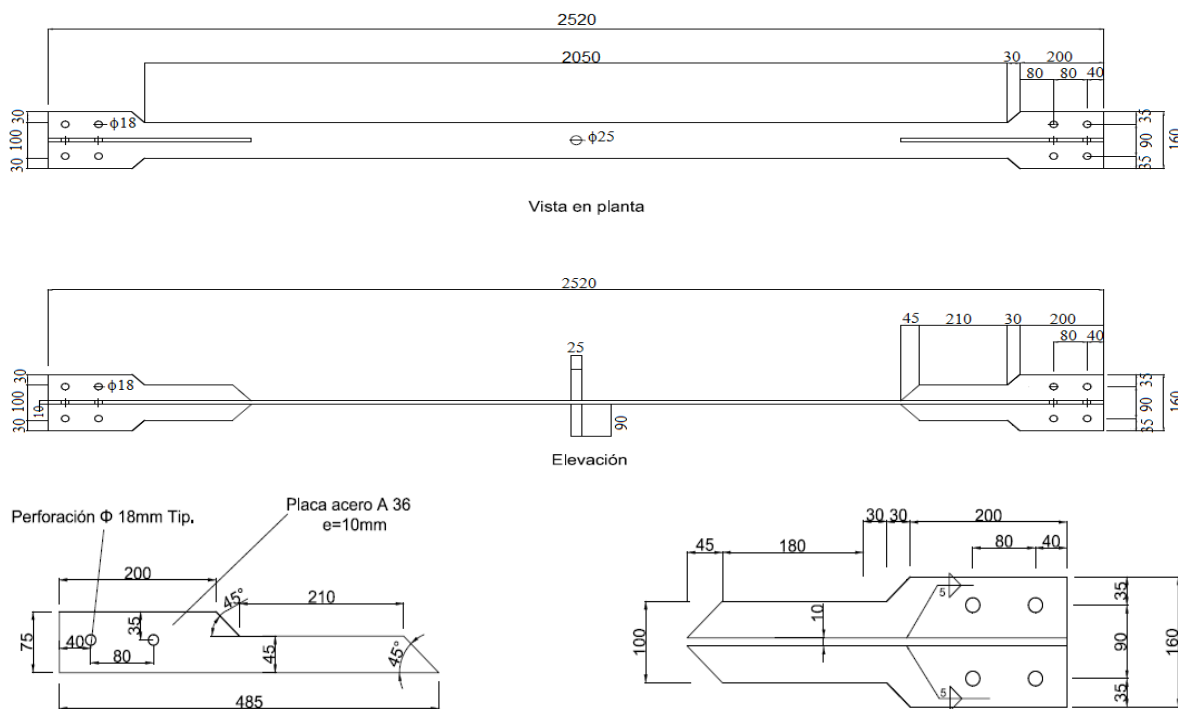


Figura 4.1: Dimensiones núcleo y atiesador de acero.

4.1.2 Material confinante.

El material confinante utilizado es un neopreno de dureza 70°ShA, color negro, de módulo de elasticidad, entre 13 – 14 [kgf/cm²] y coeficiente de amortiguamiento, entre 5 y 6 %. Al igual que el acero del núcleo, las propiedades del material confinante se verificaron y el detalle se encuentra en el capítulo 3.

Este material se utiliza en forma de planchas o bien en rollos durante el proceso de fabricación detallado en la sección 4.2 de este capítulo. La figura 4.2 muestra ambas formas de uso.



Figura 4.2: Formas de uso del elastómero.

4.1.3 Camisa exterior.

La camisa exterior corresponde a un tubo de acero ASTM A500 grado B de dimensiones 200x200x5 [mm] de un largo de 2000 [mm]. La finalidad de este elemento es confinar el material de relleno.

Además, este tubo tiene 6 perforaciones alternadas de diámetro 50 [mm] en una de las caras para facilitar la inyección final del elastómero.

Las dimensiones y características de la camisa exterior se muestran en la figura 4.3.

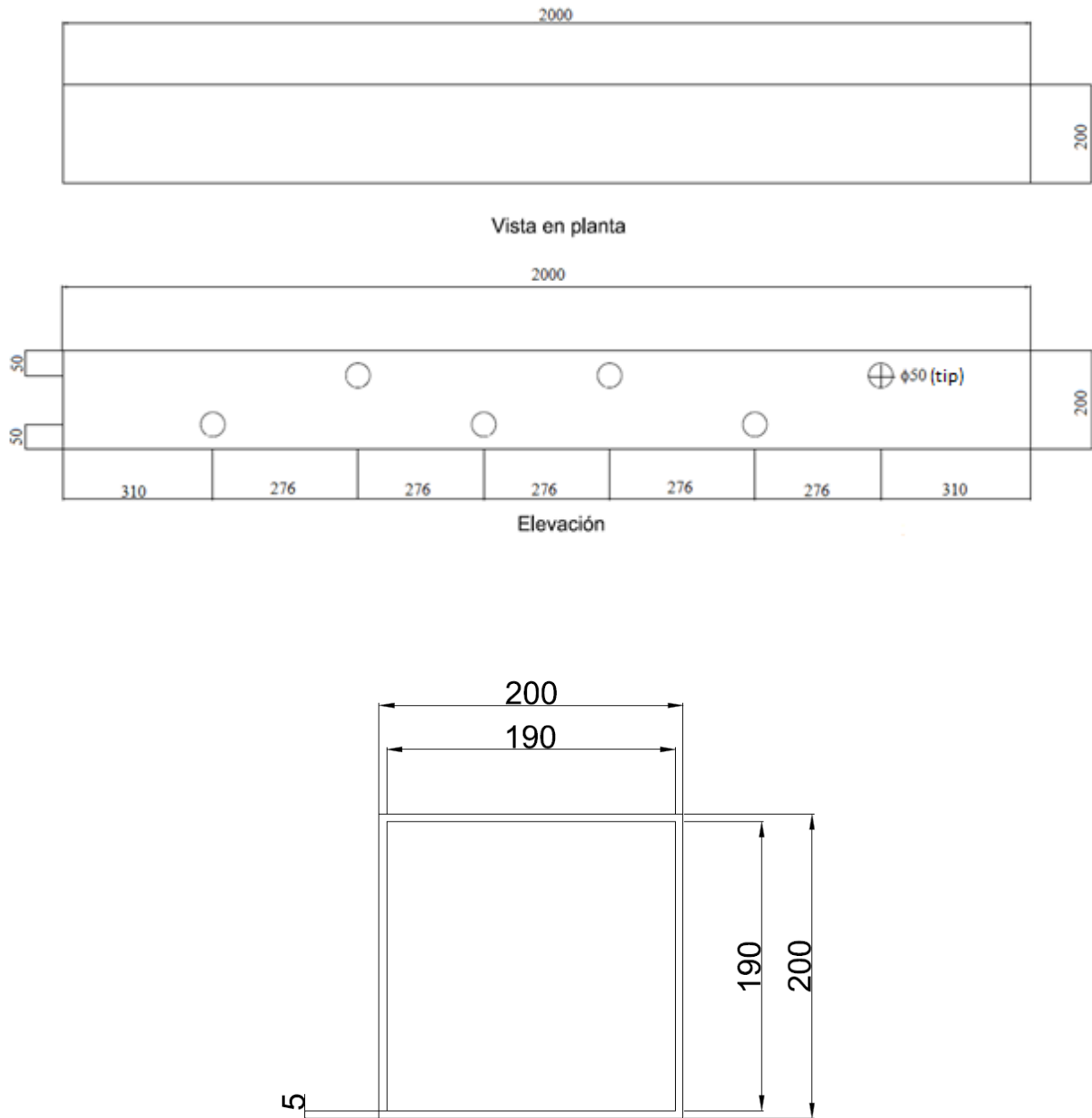


Figura 4.3: Dimensiones tubo de acero.

4.1.4 Interfaz núcleo de acero y material confinante.

Entre el núcleo y el material confinante existe una interfaz adherida y no adherida. La interfaz no adherida permite eliminar las transferencias de corte y la concentración de deformaciones localizadas, permitiendo la contracción lateral y dilatación del núcleo de acero al ser sometido a esfuerzos axiales.

Para lograr una interfaz bondada, se aplica una pintura arenada a la camisa o al núcleo de acero con el fin de asegurar una adherencia total entre ambos componentes. En el caso de una interfaz unbondada se utiliza una pintura que no permite adherencia entre ambas partes.

En la figura 4.4 se observa la superficie arenada (bondada) aplicada a la camisa exterior.



Figura 4.4: Superficie arenada – interfaz bondada.

4.2 Fabricación.

En la fabricación de los arriostramientos, lo primero que se realiza es cortar tanto el núcleo de acero como los atiesadores extremos a partir de planchas de acero de espesor 10 [mm], de acuerdo a las dimensiones detalladas anteriormente. Estas piezas se muestran en las figuras 4.5 y 4.6.



Figura 4.5: Núcleo de acero sin atiesador.



Figura 4.6: Atiesador para núcleo de acero.

Con estas piezas disponibles, se procede a perforar y soldar los atiesadores en los extremos del núcleo, aplicando una soldadura con electrodo E70XX según la clasificación AWS, también, se sueldan los topes centrales. Esto se muestra en las figuras 4.7 y 4.8.



Figura 4.7: Perforado y soldadura núcleo de acero y atiesador.



Figura 4.8: Soldadura núcleo de acero y tope central.

Por otra parte el tubo cuadrado de acero se perfora según las indicaciones sugeridas para así facilitar la fabricación de los arriostramientos y luego se le aplica el tratamiento de pintado arenado en la superficie interna, lo cual se muestra en la figura 4.9.



Figura 4.9: Perforaciones camisa exterior.

Con ambos componentes ya terminados (núcleo y camisa exterior), el siguiente paso es el relleno con el material confinante. En primera instancia se cubre el núcleo de acero con planchas de elastómero ubicadas superior e inferiormente en forma paralela a éste como se muestra en las figuras 4.10 y 4.11.



Figura 4.10: Relleno con planchas de elastómero zona extrema.

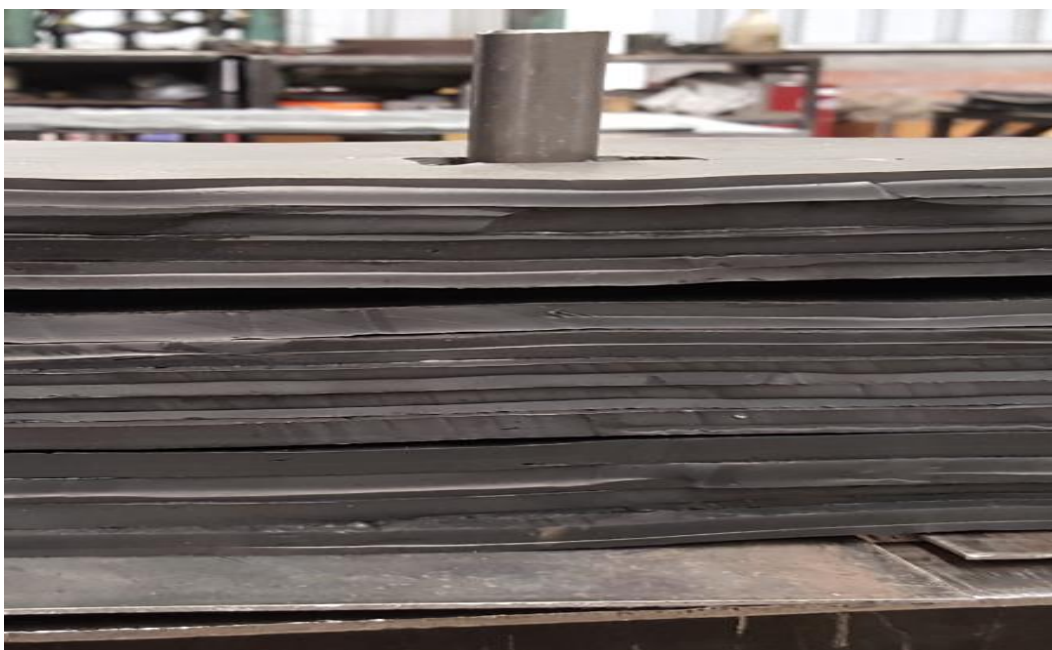


Figura 4.11: Relleno con planchas de elastómero zona central.

Posteriormente, culminada la cubierta con el material confinante, se procede a introducir este conjunto (núcleo – elastómero) en el tubo cuadrado, para lo cual se suelda un gancho guía (Figura 4.13) en uno de los extremos del núcleo con el objetivo de tirar el núcleo al interior de la camisa.



Figura 4.12: Gancho guía en extremo del núcleo.

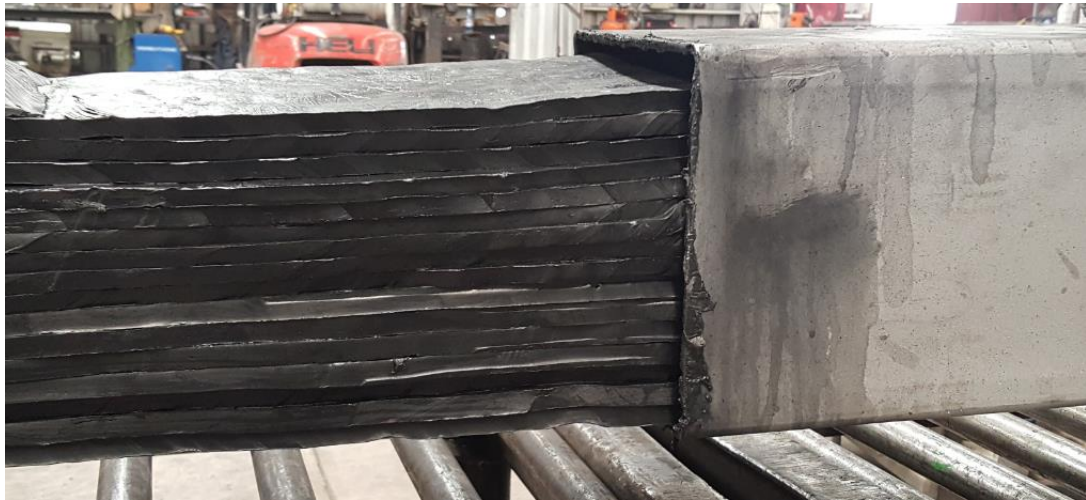


Figura 4.13: Incorporación núcleo-elastómero a la camisa exterior.

Luego, se procede a instalar una matriz diseñada por el fabricante, en la cual se fija el arriostamiento en su posición final y se incorpora el elastómero mediante inyección por las perforaciones realizadas al tubo cuadrado. El relleno inicial con planchas de elastómero alcanza a 95 [kg], por lo cual es necesario introducir unos 3 [kg] de material faltante para garantizar el completo llenado del arriostamiento.

El proceso de inyección del elastómero consiste en: incorporar el material en rollos en las perforaciones de la camisa exterior, presionarlo por medio del uso de pivotes, y posteriormente prensar el prototipo para incorporar el material de manera homogénea. Lo último se repite hasta completar el total del elastómero.

Las consideraciones para la inyección del elastómero, con el fin de no dañar el núcleo y evitar deformaciones no deseadas en éste, son las siguientes:

- Perforaciones en la camisa exterior ubicadas en la cara superior.
- Núcleo de acero paralelo a las perforaciones.
- Fijación de los extremos.

En las figuras 4.14 a 4.18, se muestra el proceso final de inyección del elastómero.



Figura 4.14: Matriz del arriostramiento.

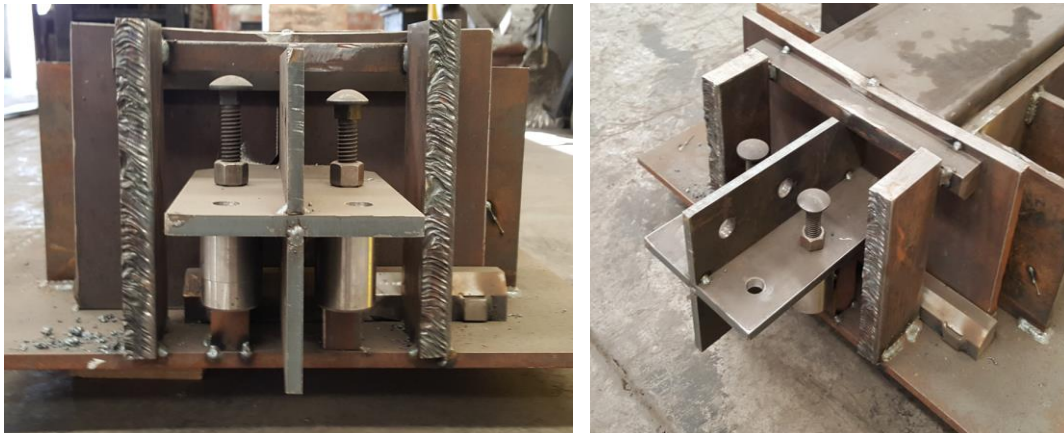


Figura 4.15: Fijación en el extremo del núcleo.



Figura 4.16: Inyección elastómero por perforaciones.



Figura 4.17: Matriz de pivotes para prensado.



Figura 4.18: Prensado de elastómero.

Uno de los prototipos contiene tapas en los extremos de la camisa exterior, las cuales consisten en dos piezas similares de 95x190 [mm] que son soldadas al tubo cuadrado como se muestra en la figura 4.19.



Figura 4.19: Tapas extremas.

Finalmente, ya incorporado todo el material confinante, se procede a vulcanizar el elastómero durante 9 horas a 120 °C para que adquiera rigidez y resistencia según los parámetros solicitados. El curado del elastómero requiere de 28 días para alcanzar una resistencia del 98%.

4.3 Prototipos a ensayar.

La fabricación de los 4 prototipos es similar, sin embargo las características de cada uno de ellos se detallan a continuación

- Prototipo A (BRB1): El primer prototipo consiste en un arriostramiento con tubo exterior cuadrado, interfaz núcleo-material confinante unbonded, ensayo con carga monotónica y cíclica.
- Prototipo B (BRB2): El segundo prototipo consiste en un arriostramiento con tubo exterior cuadrado, interfaz núcleo-material confinante unbonded ensayo con carga cíclica.
- Prototipo C (BRB3): El tercer prototipo consiste en un arriostramiento con tubo exterior cuadrado, interfaz núcleo-material confinante bonded, ensayo con carga cíclica.
- Prototipo D (BRB4): El cuarto prototipo consiste en un arriostramiento con tubo exterior cuadrado con tapas en sus terminaciones, interfaz núcleo-material confinante unbonded, ensayo con carga cíclica.

5 METODOLOGÍA DE MONTAJE, INSTRUMENTACIÓN Y ENSAYO DE LOS PROTOTIPOS.

En este capítulo se describen las distintas etapas de montaje previas a realizar el ensayo, y la instrumentación de los prototipos.

5.1 Metodología de montaje.

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, utilizando el sistema de ensayo diseñado por Espinoza (2016).

El montaje de los elementos se realiza mediante el uso de un puente grúa de 3 toneladas de capacidad, el cual cumple con los requisitos para realizar un montaje seguro.

El primer paso en el montaje estructural es la instalación del actuador hidráulico, el cual en un extremo se une al apoyo fijo por medio de 8 pernos A325 de diámetro 3/4" con sus respectivas golillas y tuercas, a los cuales se les aplica un torque de 150 [lb*ft], y en el otro extremo se une al sistema móvil mediante un pasador cilíndrico. En las figuras 5.1 a 5.3 se muestra el detalle del montaje del actuador.



Figura 5.1: Instalación actuador hidráulico.



Figura 5.2: Unión apernada actuador hidráulico y apoyo fijo.



Figura 5.3: Unión actuador hidráulico y sistema móvil con pasador.

Luego de instalado el actuador hidráulico, se procede a ubicar el brazo de éste en la posición definitiva mediante el uso de la servo válvula MOOG en conjunto con el LVDT del actuador como sistema de control. Esto debido a que por dimensiones y ubicación del sistema de ensayo en el laboratorio es necesario que el brazo del actuador se encuentre totalmente retraído para una correcta instalación del mismo.

Posteriormente, se procede a montar el arriostramiento en su posición final utilizando el puente grúa, conectando en ambos extremos a las placas Gusset por medio de 16 pernos A325 de diámetro 5/8" (32 pernos en total) pretensados con un torque de 150 [lb*ft]. La figura 5.4 muestra el detalle de la conexión.

Finalmente, se procede a instalar los sensores que registran las distintas variables a medir. Esto se describe en la sección 5.2 Metodología de instrumentación.



Figura 5.4: Unión apernada arriostramiento y placa Gusset.

5.2 Metodología de instrumentación.

Los instrumentos utilizados se detallaron en la sección 2.4.2 Sistema de adquisición. La metodología de instrumentación se divide en dos partes: la primera corresponde a la instalación de sensores que permiten medir la deformación de la camisa exterior de acero, es decir, a los strain gages. Por otro lado, la segunda parte consiste en la instalación de sensores que miden los desplazamientos relativos del núcleo de acero y de la camisa exterior, donde se utilizan LVDTs.

5.2.1 Instalación de strain gages.

En cada prototipo se instalaron 12 strain gages (salvo en el prototipo B donde se utilizaron 8 strain gages), dispuestos en cada cuarto de la probeta y en cada cara del tubo cuadrado exterior.

La instalación de los sensores de deformación requirió pulir la superficie utilizando un disco de pulido y posteriormente una lija al agua fina. Con la superficie pulida, se procedió a limpiar ésta con el uso de gasa y alcohol 95% hasta que la gasa no presentara manchas de suciedad. Finalmente, se pegó el strain gages al tubo exterior por medio de un adhesivo industrial (Loctite 495). La figura 5.5 muestra la instalación de estos sensores.

Los strain gages en el primer y en el último cuarto se disponen de la siguiente manera: dos en dirección longitudinal (cara superior e inferior) y dos en dirección transversal (caras laterales). Además, se verificó su correcta instalación y funcionamiento, midiendo con un multímetro la resistencia del strain gage que debe ser 120 [Ohms].

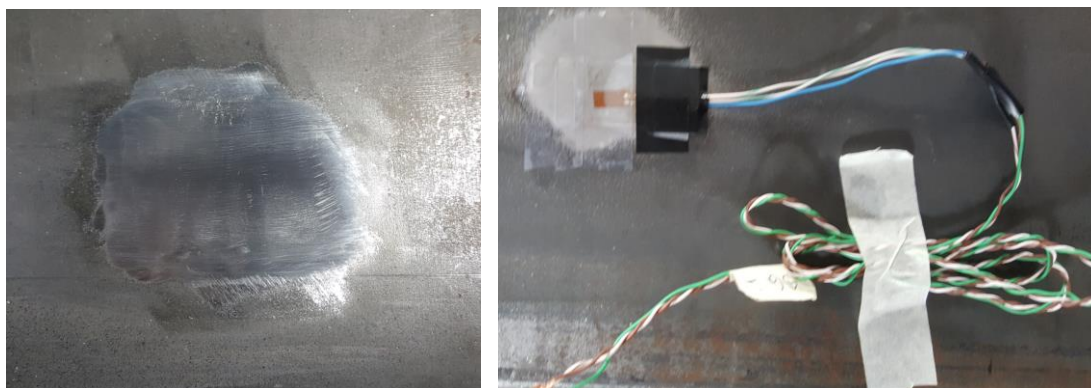


Figura 5.5: Instalación de strain gages.

Los 12 strain gages ya instalados, se conectaron al sistema de adquisición detallado por Espinoza (2016) a través de una caja de conexión que se muestra en la figura 5.6.



Figura 5.6: Conexión strain gages al sistema de adquisición.

Finalmente, para identificar los resultados presentados en el capítulo 6, se usa la numeración indicada en la tabla 5.1 (donde – indica sentido longitudinal y I transversal).

Tabla 5.1: Numeración de strain gages.

Ubicación (cara)	Zona		
	Apoyo fijo	Central	Apoyo móvil
Superior	SG1 -	SG5 -	SG9 -
Lateral derecha	SG2 I	SG6 -	SG10 I
Inferior	SG3 -	SG7 -	SG11 -
Lateral izquierda	SG4 I	SG8 -	SG12 I

5.2.2 Instalación de LVDTs.

En cada ensayo se instalaron 8 sensores de desplazamiento (salvo en los ensayos de los prototipos C y D donde se incorporó un sensor más). De estos instrumentos dos permiten medir el desplazamiento del núcleo de acero (uno ubicado en la cara superior y otro en la cara inferior), cuatro permiten medir el desplazamiento relativo entre el núcleo y la camisa exterior (dos ubicados en la cara superior y dos ubicados en la cara inferior). También, se instalan dos sensores en la zona central del arriostramiento para medir el desplazamiento fuera del plano, uno en la cara lateral y otro vertical en la cara inferior (en los prototipos C y D se añadió un sensor vertical en el extremo del tubo cercano al actuador).

Los primeros sensores en instalarse son los ubicados en la dirección longitudinal, en el extremo del núcleo de acero. Durante los ensayos de los prototipos A y B, los sensores que miden el desplazamiento del núcleo de acero se saturaron ya que constan con un rango de medición de 2 pulgadas. Por este motivo se cambiaron por sensores con mayor rango de medición (4 pulgadas) en los ensayos de los prototipos C y D.

En la figura 5.7 (a) se muestra la instalación de los sensores longitudinales en la cara superior cercanos al apoyo fijo; en cambio, en la figura 5.7 (b) se muestran los sensores de la cara inferior cercanos al actuador.

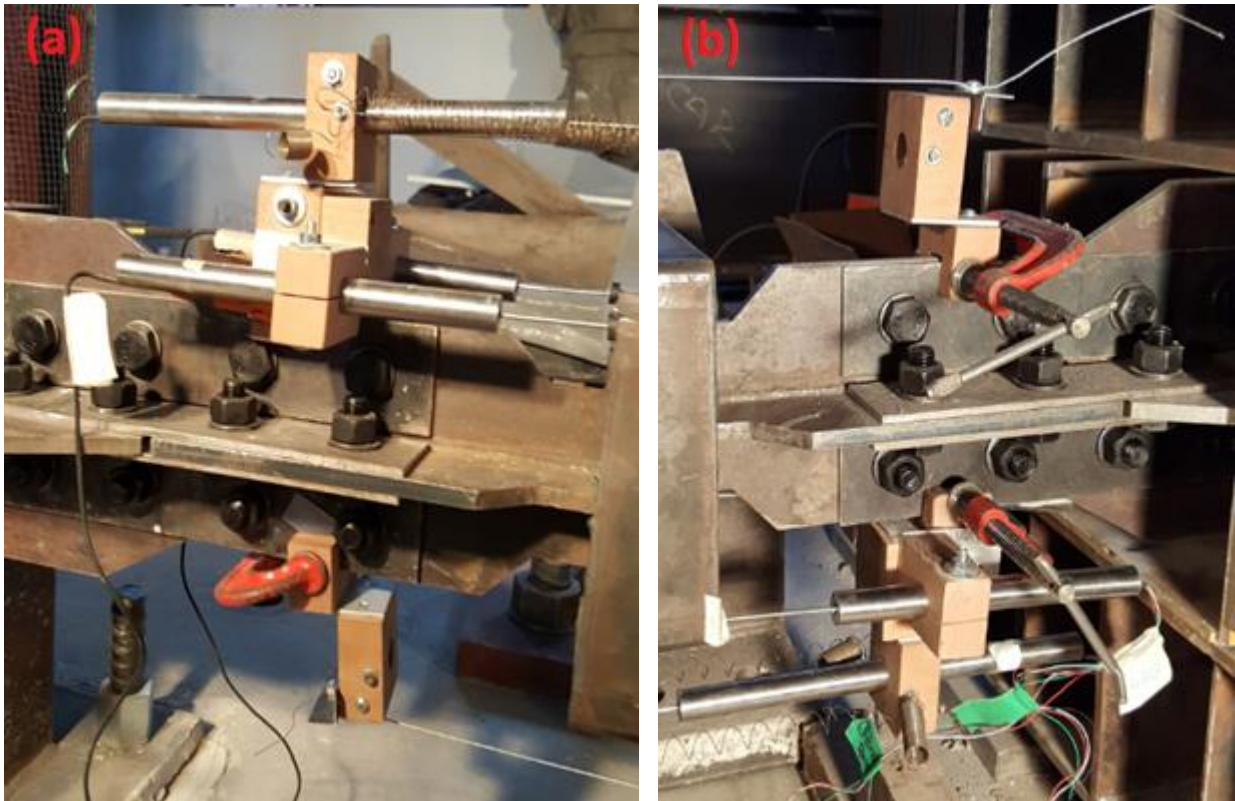


Figura 5.7: Instalación sensores de desplazamiento longitudinal.

Luego se instalaron los sensores que miden el desplazamiento fuera del plano, tanto lateral como verticalmente utilizando bases magnéticas que permiten ubicar estos instrumentos de manera adecuada y en su posición correspondiente. Al realizar los ensayos de los prototipos A y B, se observó movimiento fuera del plano en el extremo de la camisa exterior, por lo cual se decidió instalar un LVDT extra en dicha posición con el fin de registrar ese desplazamiento. Sin embargo, cuando se realizó el tercer ensayo (prototipo C) se apreció que los sensores verticales ubicados en el medio y en el extremo se despegaban de la camisa exterior sin registrar mediciones. Por ese motivo en el último ensayo (prototipo D) los sensores verticales se ubicaron en la cara superior. Estas consideraciones se muestran en las figuras 5.8 a 5.10.

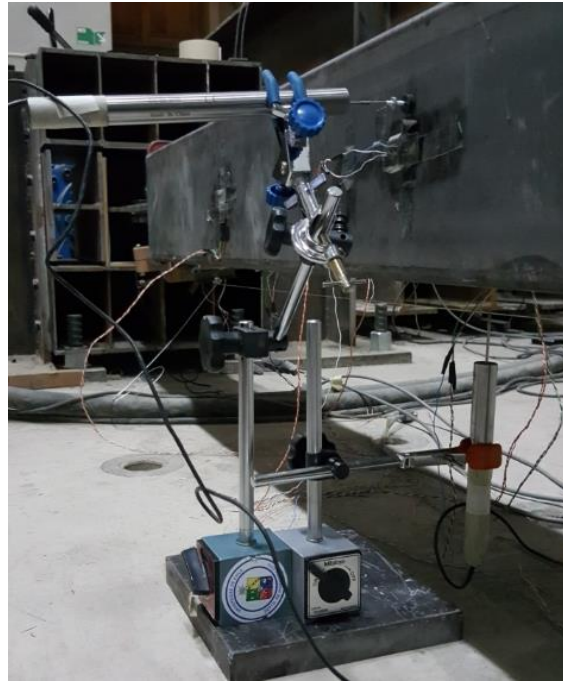


Figura 5.8: Instalación sensores de desplazamiento fuera del plano.



Figura 5.9: Incorporación sensor de desplazamiento fuera del plano.



Figura 5.10: Instalación sensores de desplazamiento fuera del plano cara superior.

Al igual que los strain gages, los 8 sensores de desplazamiento (9 en los prototipos C y D) se conectan al sistema de adquisición detallado por Espinoza (2016), como se muestra en la figura 5.11.



Figura 5.11: Conexión LVDTs al sistema de adquisición.

Finalmente la figura 5.12 muestra el arriostramiento completamente instrumentado.

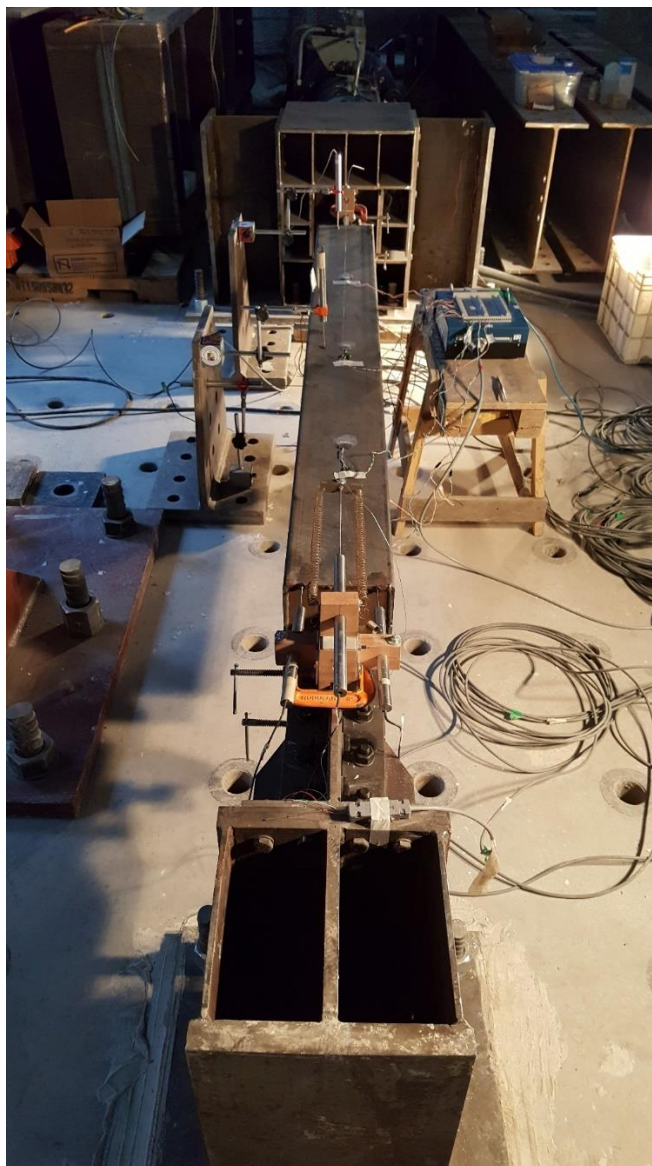


Figura 5.12: Instrumentación arriostramiento.

Los sensores de desplazamiento tienen la notación que se detalla en la tabla 5.2.

Tabla 5.2: Notación de LVDTs.

Variable a medir	Zona		
	Apoyo Fijo	Apoyo Móvil	Centro
Tubo derecha	LVDT1	LVDT4	-
Núcleo	LVDT2	LVDT5	-
Tubo izquierda	LVDT3	LVDT6	-
Lateral	-	-	LVDT7
Vertical	-	LVDT9	LVDT8

5.3 Metodología de ensayo.

Con el sistema de ensayo, el actuador hidráulico, el arriostramiento y los instrumentos de medición instalados, se procedió a realizar el ensayo de los 4 prototipos.

Para realizar el ensayo era necesario verificar el correcto funcionamiento del sistema de medición, lo cual se realizó con el programa del sistema de adquisición y se corrobora que todos los sensores medían correctamente (strain gages, LVDTs y celda de carga).

Luego, se ingresó el protocolo de carga en el sistema de control, el cual está controlado por el sensor de desplazamiento del actuador. La teoría respecto al funcionamiento del sistema de control lo detalló Espinoza (2016). En todos los casos se aplica compresión en primer lugar.

El prototipo A se ensayó primero monotónicamente considerando los máximos desplazamientos del protocolo de carga, ya concluido esto se llevó a carga nula quedando con una deformación remanente de 24 [mm]. Luego a partir de ese punto se ensayó en ciclos de compresión y tracción a desplazamiento máximo hasta la falla del prototipo. El historial de desplazamiento impuesto en el primer prototipo se muestra en la figura 5.13, donde las zonas de desplazamiento constante corresponden al tiempo en que el controlador cambia manualmente de dirección. La velocidad de ensayo es 7,5 [mm/min].

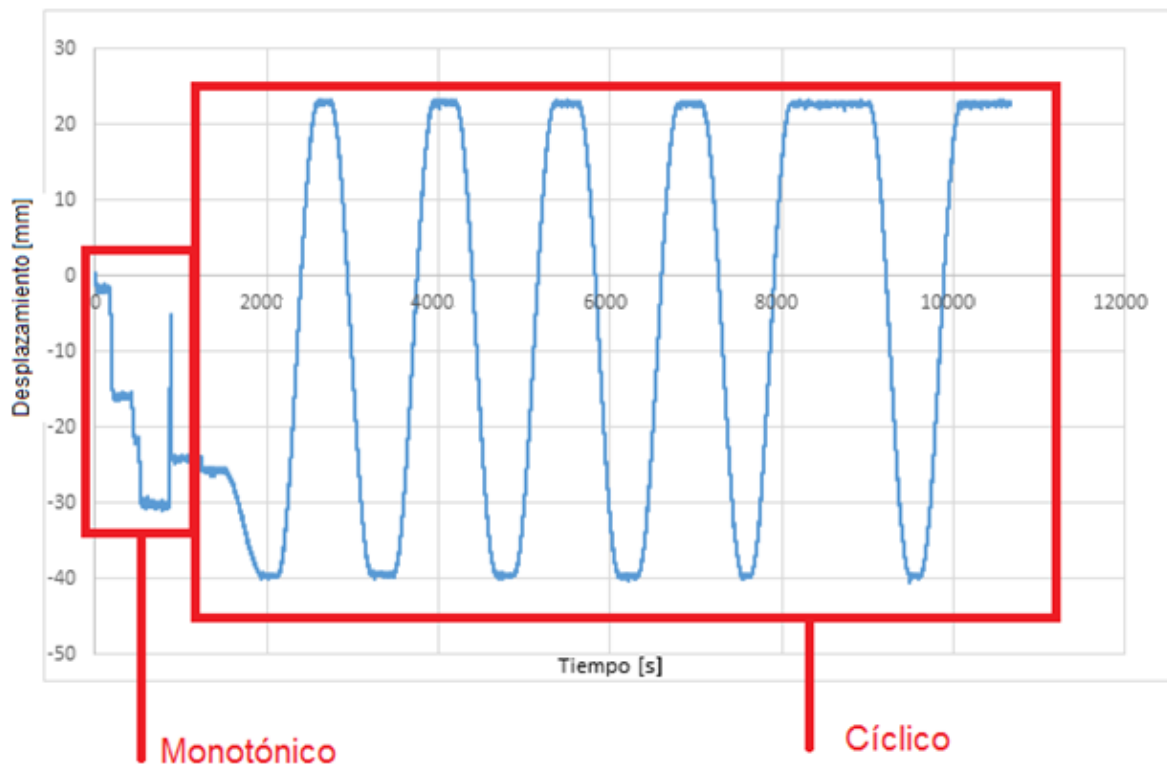


Figura 5.13: Historial de desplazamiento – Prototipo A.

El prototipo B se ensayó cíclicamente, cumpliendo el protocolo de carga, y posteriormente se cicló a desplazamiento máximo durante 8 ciclos adicionales. Para este historial de desplazamientos, el prototipo B falló. El historial de desplazamiento impuesto en el prototipo B se muestra en la figura 5.14.

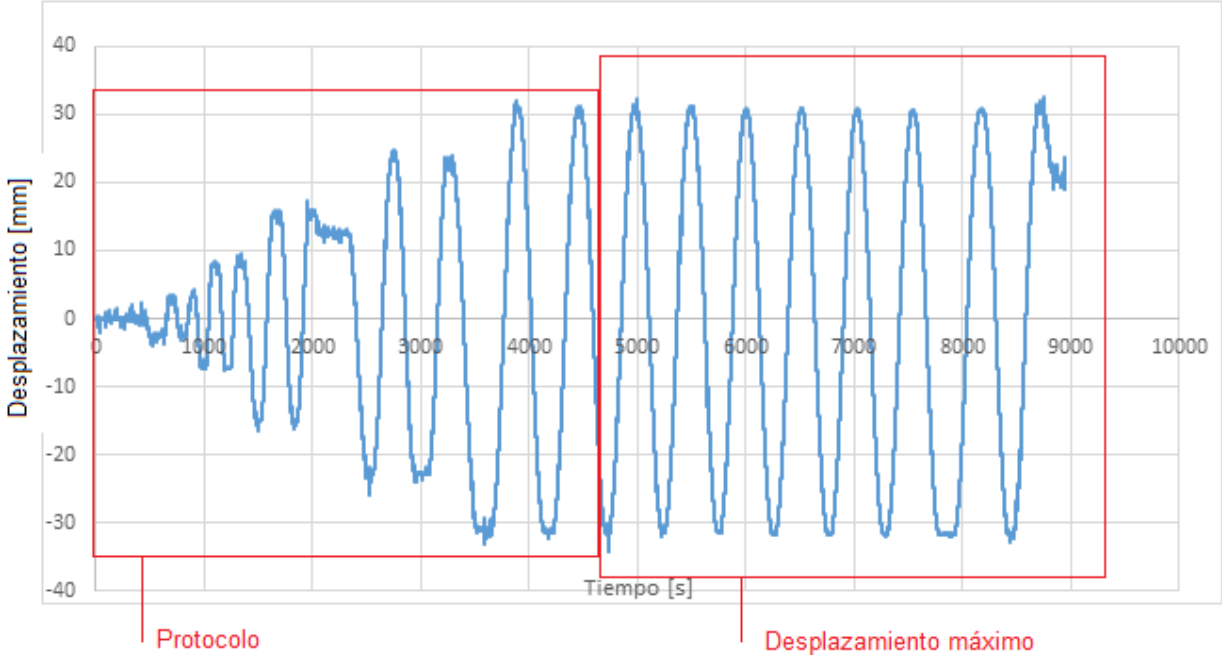


Figura 5.14: Historial de desplazamiento – Prototipos B.

En el caso de los prototipos C y D, al completar los 8 ciclos adicionales se aumentó en forma gradual el desplazamiento máximo hasta que el prototipo fallara. El historial de desplazamiento impuesto en los prototipos C y D se muestra en la figura 5.15.

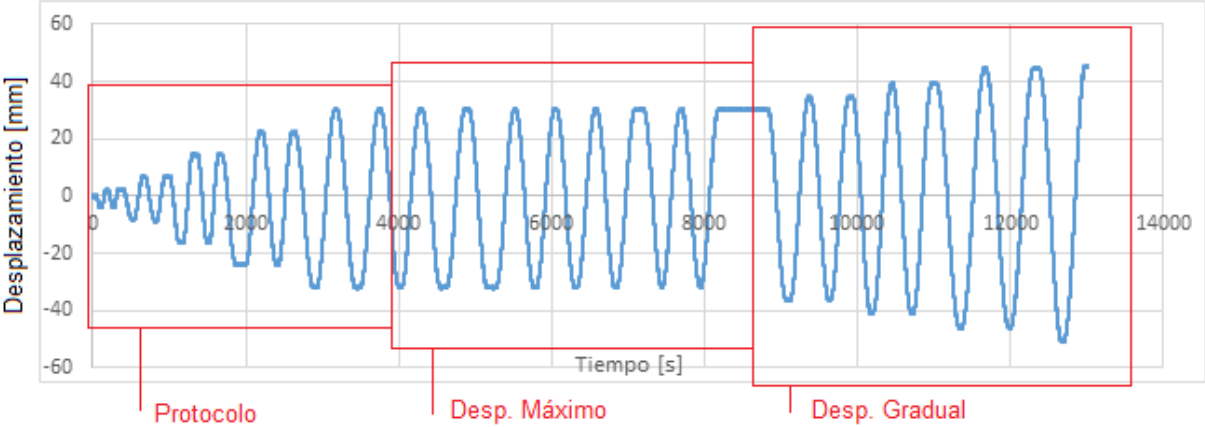


Figura 5.15: Historial de desplazamiento – Prototipo C y D.

Los ensayos finalizan en el momento en que el arriostamiento falla. Luego se debe asegurar que el actuador hidráulico quede sin carga, chequeando el valor medido de ésta en el sistema de adquisición y se procede a despresurizar la bomba que le entrega la potencia al actuador.

Finalmente, en los casos en que era factible retirar el núcleo fracturado se realizó esto mediante el uso de un teclé de capacidad 3 toneladas, de lo contrario la probeta se mantuvo en la posición al momento de fallar.

5.4 Metodología de desmontaje.

Al finalizar cada ensayo, se debía desmontar la probeta ensayada y los elementos de medición utilizados.

A continuación se enumeran los pasos seguidos para realizar el desmontaje de los prototipos:

1. Desconectar los instrumentos de medición del sistema de adquisición.
2. Retirar los LVDTs y los soportes utilizados.
3. Armar una cuña de soporte en el extremo de la camisa exterior ubicado en el sector del apoyo móvil.
4. Desconectar los pernos entre la conexión del núcleo de acero y la placa Gusset.
5. Retraer el actuador completamente.
6. En el caso de realizar un nuevo ensayo en un plazo cercano, mantener el actuador conectado. Por el contrario, si éste era requerido para otras funciones debía quitarse el pasador cilíndrico y desconectar los pernos entre el actuador y el apoyo fijo.
7. Retirar el actuador hidráulico utilizando el puente grúa.
8. Sostener el prototipo con el puente grúa y desconectar los pernos entre el núcleo de acero y el apoyo fijo.
9. Retirar el arriostamiento ya ensayado.

Finalmente, para realizar otro ensayo se debe seguir los pasos mencionados en la sección 5.1 Metodología de montaje.

6 PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de los cuatro prototipos, para el protocolo de carga, los ciclos adicionales y los ciclos con aumento gradual del desplazamiento máximo. Además, se detalla la realización de cada ensayo y sus observaciones durante éste. En particular se expone:

- Curva de carga en función del desplazamiento.
- Curva de energía disipada en función del desplazamiento.
- Historial de desplazamiento de los LVDTs.
- Historial de deformación de los strain gages.
- Cargas máximas en los distintos ciclos.
- Degradación de la rigidez.

Durante el desarrollo de los cuatro ensayos, al momento de llegar al desplazamiento correspondiente a $\Delta b = 0,5\Delta b_m = 7,75 [mm]$ se escuchó un ruido asociado al deslizamiento y/o ajuste del apoyo fijo conectado a un extremo del arriostramiento. A pesar de esto el ensayo continuó sin mayores dificultades. Por otro lado, los prototipos se fracturaron en tracción, instante en que se escucha un ruido característico de la falla del acero en tracción.

Finalmente, se realiza una comparación entre los prototipos ensayados y los arriostramientos fabricados con materiales tradicionales.

6.1 Ensayo prototipo A (BRB1).

El prototipo A se ensayó dos veces, primero se le aplicó una carga de compresión monótonicamente creciente y posteriormente se cicló en compresión y tracción, a desplazamiento nominal máximo hasta la falla de éste.

Este prototipo se comportó bien en el ensayo monótonico, alcanzando una carga máxima de 29,12 [tf] en compresión, sin presentar inconvenientes durante el desarrollo del ensayo. Posteriormente, el espécimen se cicló a desplazamiento nominal máximo de acuerdo al protocolo de carga, y al alcanzar el ciclo 6 en tracción el prototipo falló. Durante estos ciclos se obtuvo una carga de compresión máxima de 14,02 [tf] y tracción máxima de 25,97 [tf]. Los valores máximos por ciclo se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1: Carga máxima en ciclos para el prototipo A.

Ensayo	Ciclo	Desp. Nominal [mm]	Compresión [tf]	Tracción [tf]
Ciclos	1	31	14,02	25,97
	2		13,85	23,17
	3		13,50	21,17
	4		13,08	19,84
	5		12,79	18,44
	6		12,33	11,32

En este prototipo fue posible retirar el núcleo de acero, el cual se fracturó a un cuarto del extremo unido al apoyo móvil. Esta pieza presenta evidencias de que el acero fluyó y se pandeó. La figura 6.1 muestra el núcleo fracturado, cuya forma de pandeo corresponde a un modo superior, se observan al menos 3 ondas.



Figura 6.1: Fractura núcleo de acero prototipo A.

6.2 Ensayo prototipo B (BRB2).

El prototipo B se ensayó según el protocolo de y luego se cicló a desplazamiento nominal máximo hasta que falló al llegar al último ciclo 8.

En este caso se obtuvo una carga de compresión máxima de 17,94 [tf] y tracción máxima de 28,24 [tf]. Los valores máximos por ciclo se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2: Carga máxima en ciclos para el prototipo B.

Ensayo	Ciclo	Desp.Nominal [mm]	Compresión [tf]	Tracción [tf]
Protocolo	1	3,10	10,80	0,59
	2		10,39	1,68
	3	7,75	14,46	18,21
	4		15,05	18,41
	5	15,50	17,04	21,79
	6		17,94	22,04
	7	23,25	16,24	27,82
	8		16,44	24,73
	9	31,00	17,04	28,24
	10		16,69	27,05
Desp. Máx.	1	31,00	16,10	25,4
	2		14,94	23,63
	3		14,15	25,66
	4		13,64	24,25
	5		13,29	21,56
	6		12,71	17,47
	7		8,73	2,85
	8		7,79	2,22

En este prototipo se observó una disminución en su capacidad tanto en compresión como en tracción. Sin embargo este arriostamiento no se fracturó completamente por lo cual no pudo retirarse el núcleo de acero para observar dicha fractura. Además en este caso, la fractura parece producirse en el cuarto cercano al apoyo fijo. En la figura 6.2 se muestra la configuración final de la zona donde se fractura el núcleo.



Figura 6.2: Configuración final prototipo B.

6.3 Ensayo prototipo C (BRB3).

El prototipo C se ensayó según el protocolo de carga y luego se cicló a desplazamiento nominal máximo durante 8 ciclos sin presentar pérdida de capacidad ni indicios de fractura, se continuó el ensayo aumentando los desplazamientos de manera gradual hasta su fractura.

En este caso se obtuvo una carga de compresión máxima de 23,70 [tf] y tracción máxima de 35,73 [tf]. Los valores máximos por ciclo se muestran en la tabla 6.3.

Tabla 6.3: Carga máxima en ciclos para el prototipo C.

Ensayo	Ciclo	Desp. Nominal [mm]	Compresión [tf]	Tracción [tf]
Protocolo	1	3,1	6,30	8,00
	2		6,00	7,85
	3	7,75	18,56	25,55
	4		17,99	25,6
	5	15,5	18,44	29,02
	6		18,68	29,57
	7	23,25	22,89	32,71
	8		19,00	31,93
	9	31	20,78	34,21
	10		23,70	33,83
Desp. Máx.	1	31	21,85	33,51
	2		20,94	33,24
	3		20,43	32,73
	4		19,58	32,73
	5		19,38	32,22
	6		18,81	32,15
	7		18,97	32,10
	8		18,68	31,99
Desp. Gra.	1	35	19,91	27,36
	2		20,08	26,67
	1	40	20,82	35,65
	2		20,44	31,08
	1	45	20,34	35,73
	2		20,25	18,19
	3		17,06	12,83
	4	50	16,51	10,61
	1		16,27	10,15
	2		15,87	9,42
	3		15,25	8,38
	4		14,72	7,65

En este ensayo, al momento en que se produjo el ajuste del apoyo fijo, los LVDTs cercanos al apoyo móvil se salieron de su posición por lo que las mediciones realizadas por estos sensores presentaron un desfase en los datos registrados, el cual fue corregido.

6.4 Ensayo prototipo D (BRB4).

El prototipo D se ensayó según el protocolo de carga y luego se cicló 8 veces a desplazamiento nominal máximo y como no presentó pérdida de capacidad se continuó el ensayo aumentando los desplazamientos de manera gradual hasta su fractura.

En este caso se obtuvo una carga de compresión máxima de 20,27 [tf] y tracción máxima de 35,07 [tf]. Los valores máximos por ciclo se muestran en la tabla 6.5.

Tabla 6.4: Carga máxima en ciclos para el prototipo D.

Ensayo	Ciclo	Desp. Nominal [mm]	Compresión [tf]	Tracción [tf]
Protocolo	1	3,10	9,51	4,60
	2		8,90	4,42
	3	7,75	16,72	25,16
	4		15,68	26,47
	5	15,50	15,91	32,43
	6		15,67	32,07
	7	23,25	18,08	34,76
	8		17,70	33,48
	9	31,00	17,32	34,65
	10		20,18	33,39
Desp. Máx.	1	31,00	20,27	33,12
	2		19,51	33,11
	3		19,18	32,94
	4		18,80	32,67
	5		18,96	32,61
	6		18,13	32,44
	7		18,64	32,04
	8		18,54	31,85
Desp. Gra.	1	35,00	18,62	34,64
	2		17,68	33,43
	1	40,00	17,59	34,25
	2		16,18	33,41
	1	45,00	15,87	35,07
	2		15,22	32,67
	1	50,00	14,80	27,62
	2		-	-

Al igual que el prototipo A, éste se fracturó en el cuarto del extremo cercano al apoyo móvil. También fue posible retirar el núcleo de acero. Esta pieza presenta evidencias de que el acero fluyó y se pandeó. La figura 6.3 muestra el núcleo fracturado, cuya forma de pandeo corresponde a un modo superior, se observan al menos 3 ondas.



Figura 6.3: Fractura núcleo de acero prototipo C.

6.5 Análisis de resultados.

Para estudiar el comportamiento de los prototipos ensayados, se grafican las curvas de histéresis con la carga registrada en el actuador y el desplazamiento del medido por los sensores (Figura 6.4 y 6.5).

El área contenida dentro de la curva de histéresis representa la energía disipada en un ciclo, de donde se infiere que para que exista disipación el elemento debe trabajar más allá de su rango elástico (Figura 6.6).

En la figura 6.7, se observa la degradación de la rigidez del núcleo de acero a medida que se aumenta el desplazamiento impuesto.

En la figura 6.8 se muestra el historial de desplazamiento del núcleo de acero medido por los sensores longitudinales (LVDT 2 y 5) y en la figura 6.9 el desplazamiento entre el núcleo y la camisa exterior (LVDT 1, 3, 4y 6). Por otro lado los desplazamientos máximos fuera del plano se muestran en la tabla 6.5.

En la figura 6.10 se presenta el historial de deformación longitudinal en la zona central, en la figura 6.11 los longitudinales inferior, en la figura 6.12 los longitudinales inferior, y en la figura 6.13 las deformaciones transversales. Los strain gages fuera de rango o que no registran mediciones no se incluyen en estas figuras.

Finalmente, los gráficos se presentan en la misma escala para facilitar la comparación salvo para los strain gages debido a que las deformaciones registradas son muy pequeñas.

6.5.1 Ciclos de histéresis.

En estas curvas (Figura 6.4 y 6.5) se observa que el comportamiento de los prototipos en compresión presenta una meseta estable en 12 [tf] para el prototipo A y 16 [tf] para los otros tres, y si bien existe pérdida de capacidad debido a que el material confinante evita solo parcialmente el pandeo, esta pérdida es mínima en comparación con los arriostramientos convencionales. Sin embargo, se aprecia una diferencia en los desplazamiento medidos producto que el sensor del actuador contiene los desplazamiento originados por el deslizamiento de los apoyos fijos, siendo menores los registrados por el sensor del núcleo de acero.

La fluencia del núcleo de acero, cuya tensión promedio de 305 [N/mm²] fue obtenida del ensayo de tracción del acero, debiese ocurrir a una carga de 31,12 [tf] representada por una línea roja en los gráficos. En los prototipos A y B se observa que esta carga está sobre la obtenida experimentalmente, en cambio para los prototipos C y D, se encuentra por debajo.

La rigidez elástica del núcleo de acero cuyo valor es 8,97 [tf/mm] y está graficada por medio de una línea morada. Se observa que la rigidez obtenida en el experimento es menor que la teórica, lo cual se explica porque parte del desplazamiento registrado por el LVDT del actuador incluye desplazamientos y/o ajustes de los apoyos fijos durante el ensayo. Por otro lado, en tracción se aprecia un aumento de rigidez cercano a las 15 [tf], lo cual está asociado a un comportamiento no lineal que se refleja en una variabilidad en la matriz de rigidez ya sea por propiedades del material o por geometría. En este caso las propiedades del material no afectan debido a que la fluencia del acero ocurre a una carga de 31,12 [tf], en cambio sí sucede producto del pandeo del núcleo ya que se tiene una configuración deformada y las pequeñas deformaciones no son válidas. En efecto, este aumento de rigidez se produce por el estado de carga axial a la cual está sometido el núcleo de acero en tracción.

Por otro lado, en la figura 6.8 se muestra la degradación de la rigidez a medida que se aumenta el desplazamiento producto del pandeo del núcleo de acero. En los prototipos C y D es menor la degradación debido a que éstos constan de mayor restricción, el primero con interfaz adherida y el último con tapas en los extremos.

Finalmente, si se considera la carga crítica de pandeo de Euler del núcleo de acero equivalente a 0,597 [tf] representada por una línea de color verde, se observa un incremento significativo en comparación a la carga de pandeo del arriostramiento.

6.5.2 Curva de energía disipada en función del desplazamiento.

A partir de los ciclos de histéresis, se evalúa la capacidad de disipación de energía de los arriostramientos.

Esta energía es calculada por la suma de las áreas comprendidas por los rectángulos formados por dos registros de desplazamiento sucesivos y sus respectivos valores de carga.

$$\text{Área} = \sum_{i=1}^N f_i * \Delta x_i$$

Donde f_i corresponde a la carga y Δx_i a la diferencia de desplazamientos.

Para realizar la comparación entre prototipos se calcula la energía disipada en cada uno de los ciclos descritos en la sección 5.2, y se grafica la energía disipada acumulada en función de cada ciclo. En los resultados (Figura 6.6), los prototipos C y D disipan bastante más energía que A y B, lo cual podría servir para recomendar estas soluciones, bonded o con tapa.

6.5.3 Historial de desplazamientos de sensores (LVDT).

El historial de desplazamiento de los LVDTs (Figura 6.8 y 6.9) permite observar el comportamiento del núcleo de acero y de la camisa exterior. En estos casos se usa dos instrumentos por variable a medir para tener redundancia en los datos, de acuerdo a esto en los gráficos se aprecia que cada par de sensores mide desplazamientos similares.

Los sensores ubicados en el núcleo de acero en general presentan un comportamiento equivalente en todos los ensayos. Sin embargo, en el prototipo B uno de los instrumentos (LVDT 5) no registra medición ya que se desconectó durante el ensayo sin ser detectado y el otro (LVDT 2) se saturó en -25 [mm] debido a que el rango de medición era de una pulgada. En el prototipo C, al momento del deslizamiento del apoyo fijo el soporte del sensor se cayó (LVDT 5) y esto se aprecia en el gráfico en el tiempo 2000 segundos (Figura 6.8). Finalmente en el prototipo D, ambos sensores se saturaron en 50 [mm] ya que el rango de medición correspondía a dos pulgadas.

Para los sensores que miden el desplazamiento entre el núcleo de acero y el tubo exterior (Figura 6.9), el comportamiento es similar para cada par. En el prototipo A y C,

el LVDT 3 se despegó del soporte, por lo que dejó de registrar. En el prototipo C, se observó el efecto del ruido eléctrico distorsionando la señal registrada puesto que presenta mucha variación en las medidas.

6.5.4 Historial de deformaciones de sensores (strain gage).

El historial de deformaciones de los strain gage (Figura 6.10 a 6.13) permite observar el comportamiento a lo largo de la camisa exterior y tener registro de cuan afectado se ve éste por los esfuerzos a los cuales es sometido el arriostamiento.

En los registros se aprecia que las deformaciones en el tubo cuadrado son prácticamente nulas, lo que indica que esta camisa no está siendo afectada por los esfuerzos axiales transmitidos al núcleo. A pesar de que las mediciones son de pequeña magnitud, si es posible detectar variaciones a lo largo del tubo las cuales ocurren principalmente en el sector de la fractura del núcleo. En el prototipo A, se ven afectados los strain gages cercanos al apoyo móvil (SG9, SG10, SG11 y SG12) y los centrales (SG5, SG6, SG7 y SG8). En el prototipo B, no se dispuso de sensores cercanos al apoyo fijo, pero la fractura ocurrió en esta zona por lo cual los strain gages afectados son los centrales. El prototipo C, no se fracturó por lo que no se observa mayores variaciones en las mediciones. Finalmente el prototipo D presenta la misma falla que el A, y los strain gages afectados son los mismos.

6.5.5 Desplazamientos fuera del plano.

La instrumentación para la medición de los desplazamientos fuera del plano en todos los ensayos presentó problemas ya que el sensor lateral (LVDT 7) se despegó y se perdió la continuidad en el registro de datos. Lo mismo ocurre con los instrumentos que miden el desplazamiento vertical (LVDT 8 y 9) por debajo de la probeta, salvo en el ensayo del prototipo D en el cual se ubicaron en la zona superior. A pesar de los inconvenientes, se registran los desplazamientos máximos fuera del plano, los que se detallan en la tabla 6.5.

Tabla 6.5: Desplazamientos máximos fuera del plano.

Prototipo	Desplazamiento máximo [mm]		
	LVDT 7	LVDT 8	LVDT 9
A	8,35	13,87	-
B	2,13	8,89	-
C	4,32	9,47	13,48
D	6,05	9,52	15,58

Se observa que el desplazamiento vertical en el centro (LVDT 8) es menor que el registrado en el extremo de la camisa exterior cercano al apoyo móvil (LVDT 9). En los prototipos C y D se aprecia que el valor en el extremo es del orden de la mitad del valor nominal del desplazamiento aplicado axialmente. Durante los ensayos, los movimientos fuera del plano eran visibles a simple vista, y los LVDT se inclinaban, lo cual influye en las mediciones.

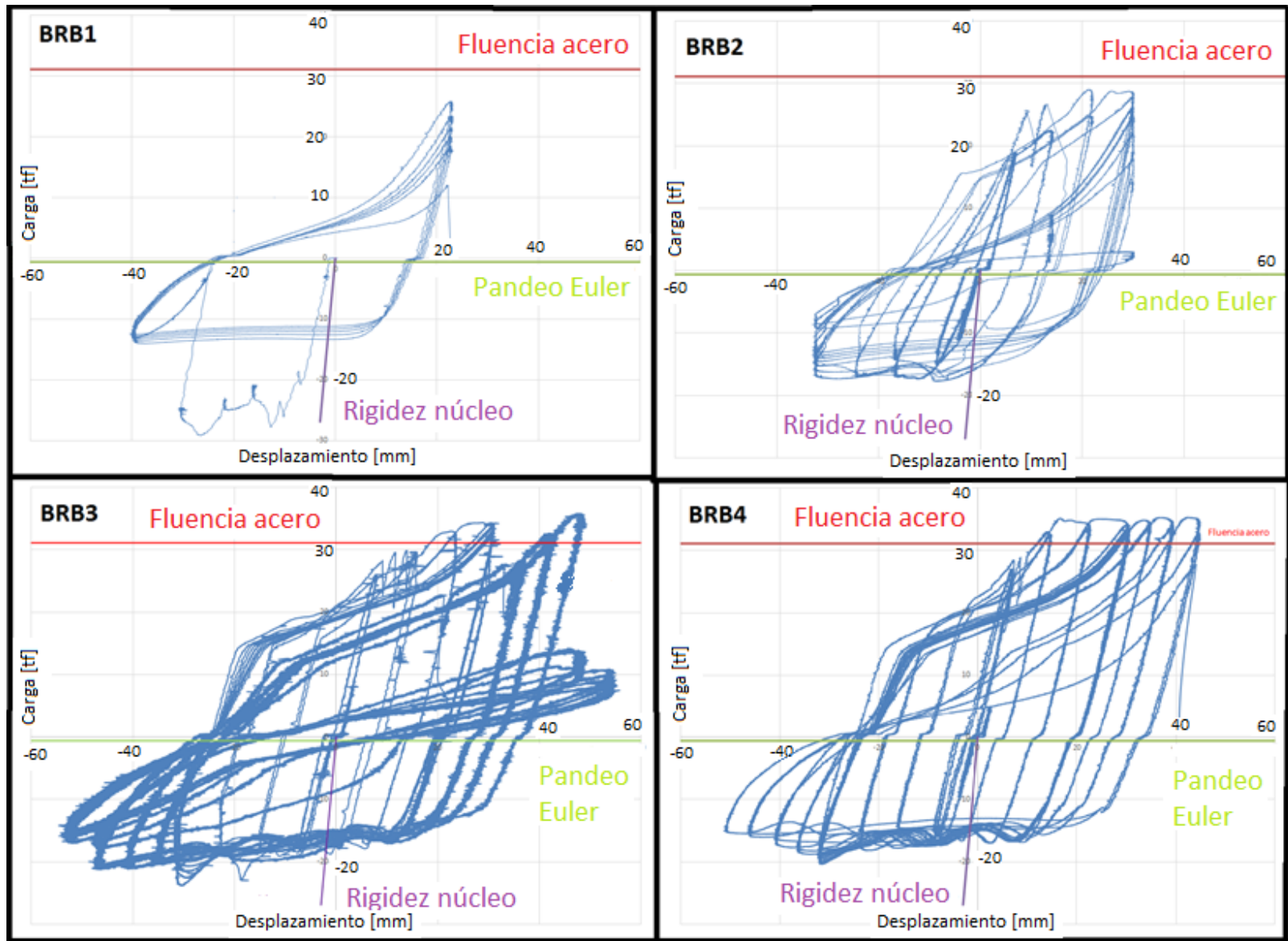


Figura 6.4: Curva carga en función del desplazamiento del actuador.

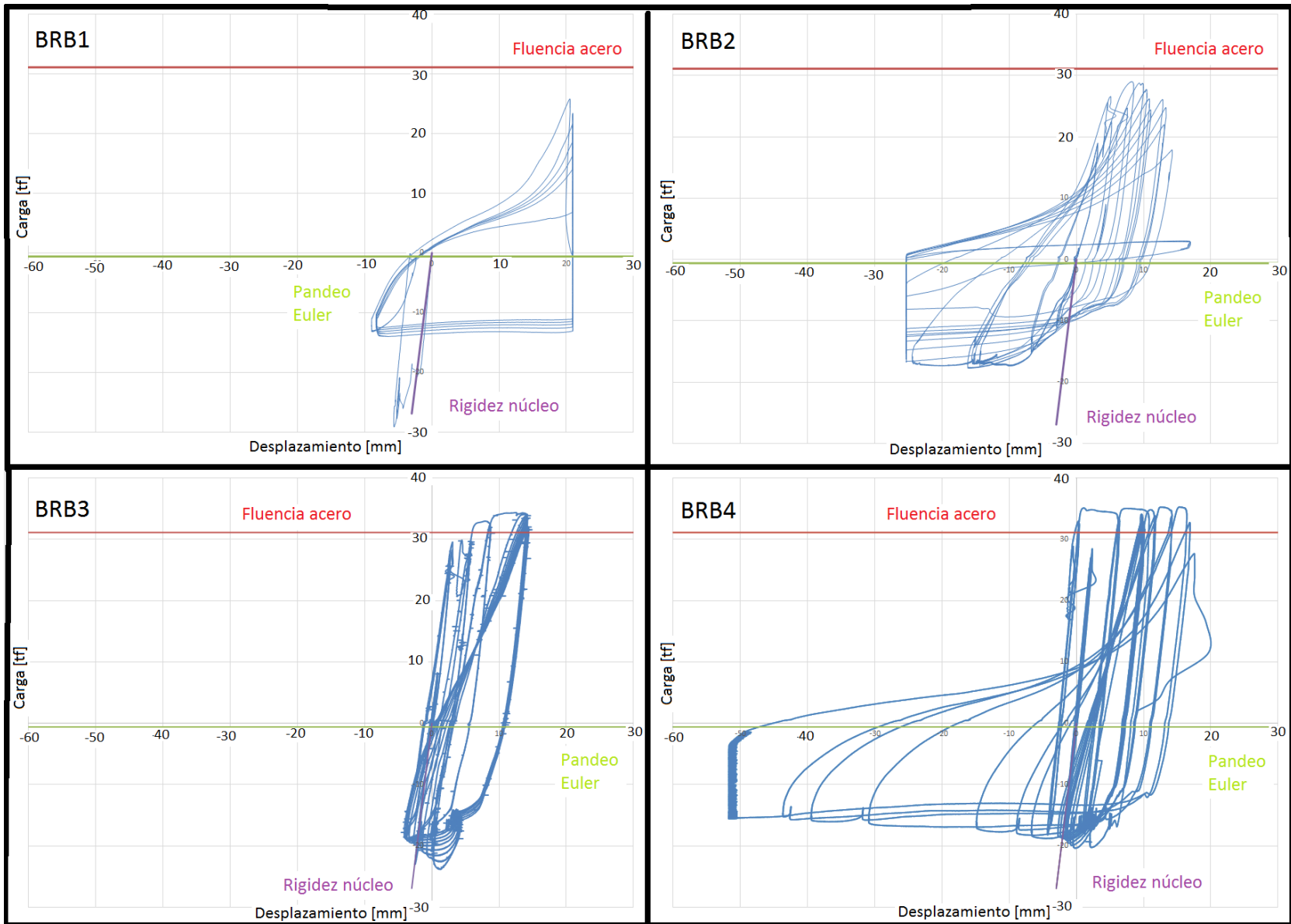


Figura 6.5: Curva carga en función del desplazamiento del núcleo.

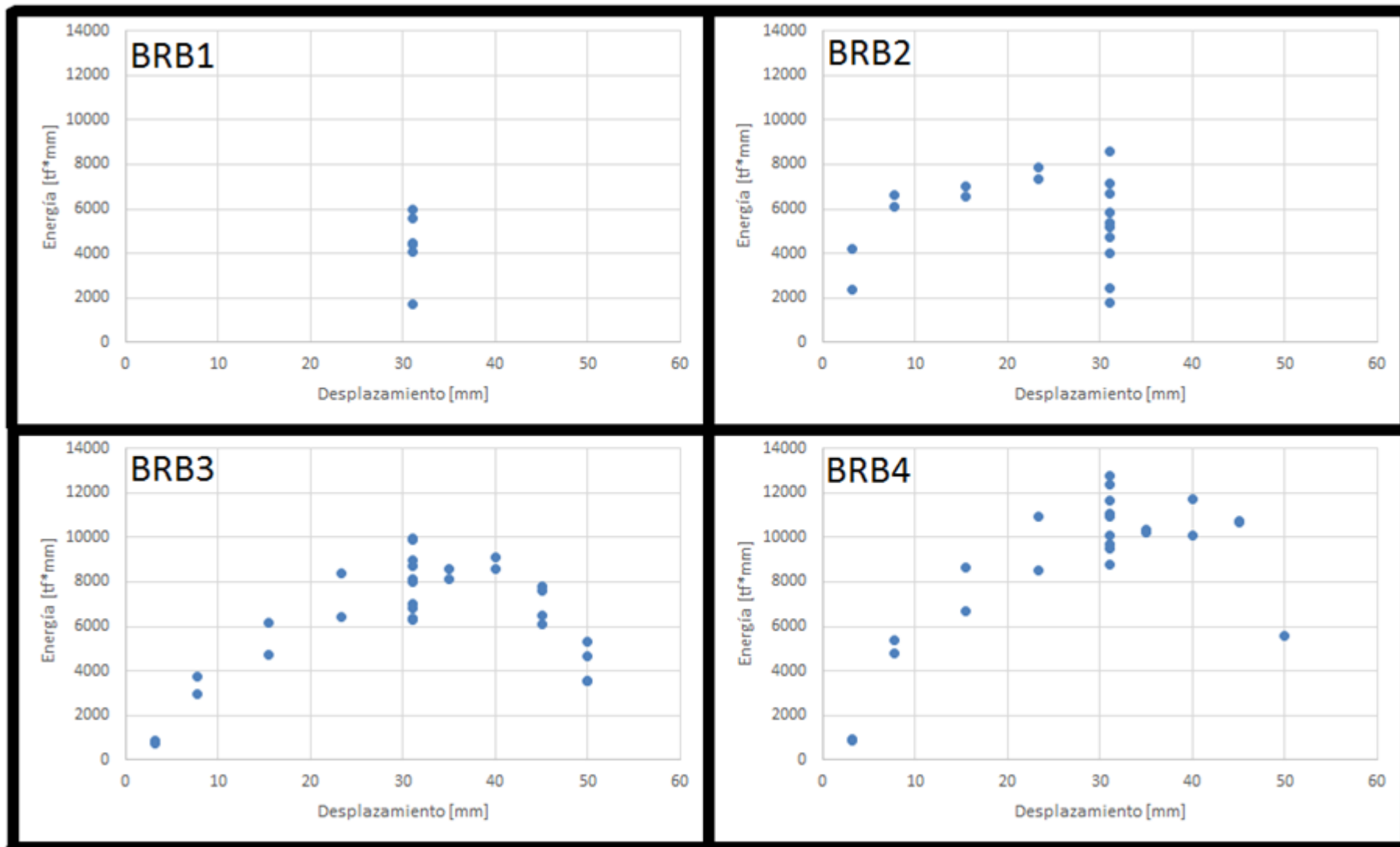


Figura 6.6: Energía disipada en función del desplazamiento.

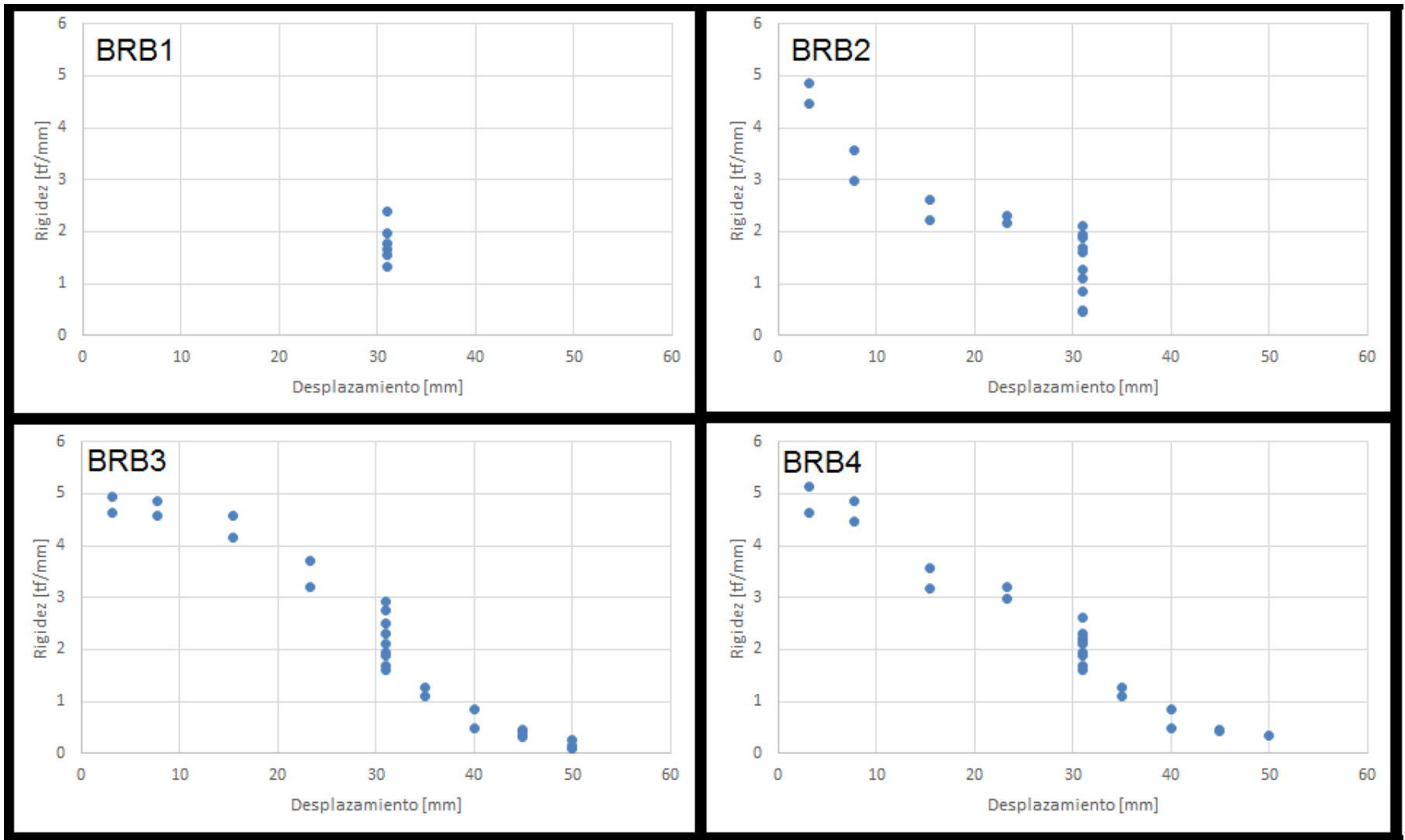


Figura 6.7: Degradación de la rigidez en función del desplazamiento.

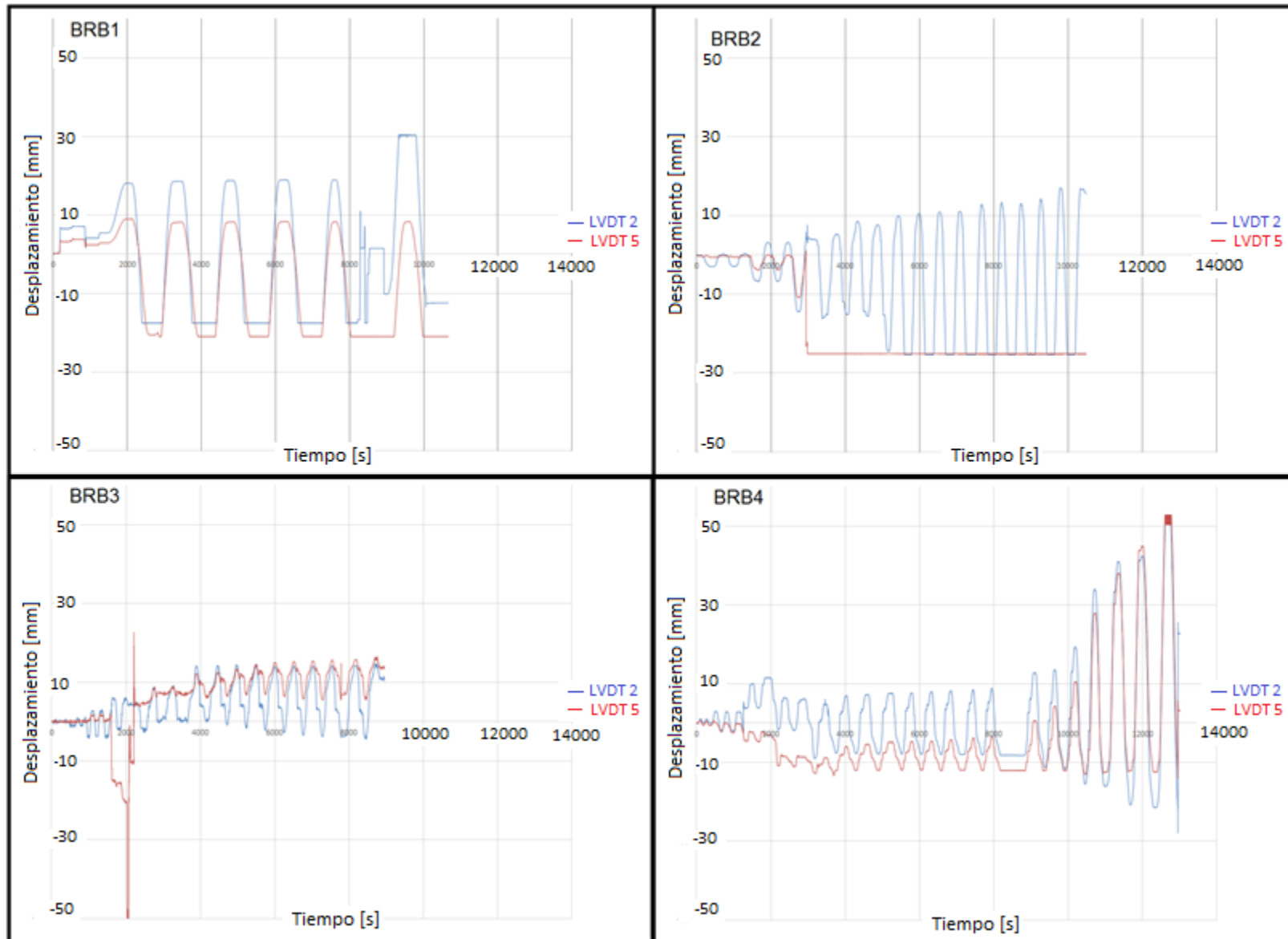


Figura 6.8: Historial de desplazamiento del núcleo de acero.

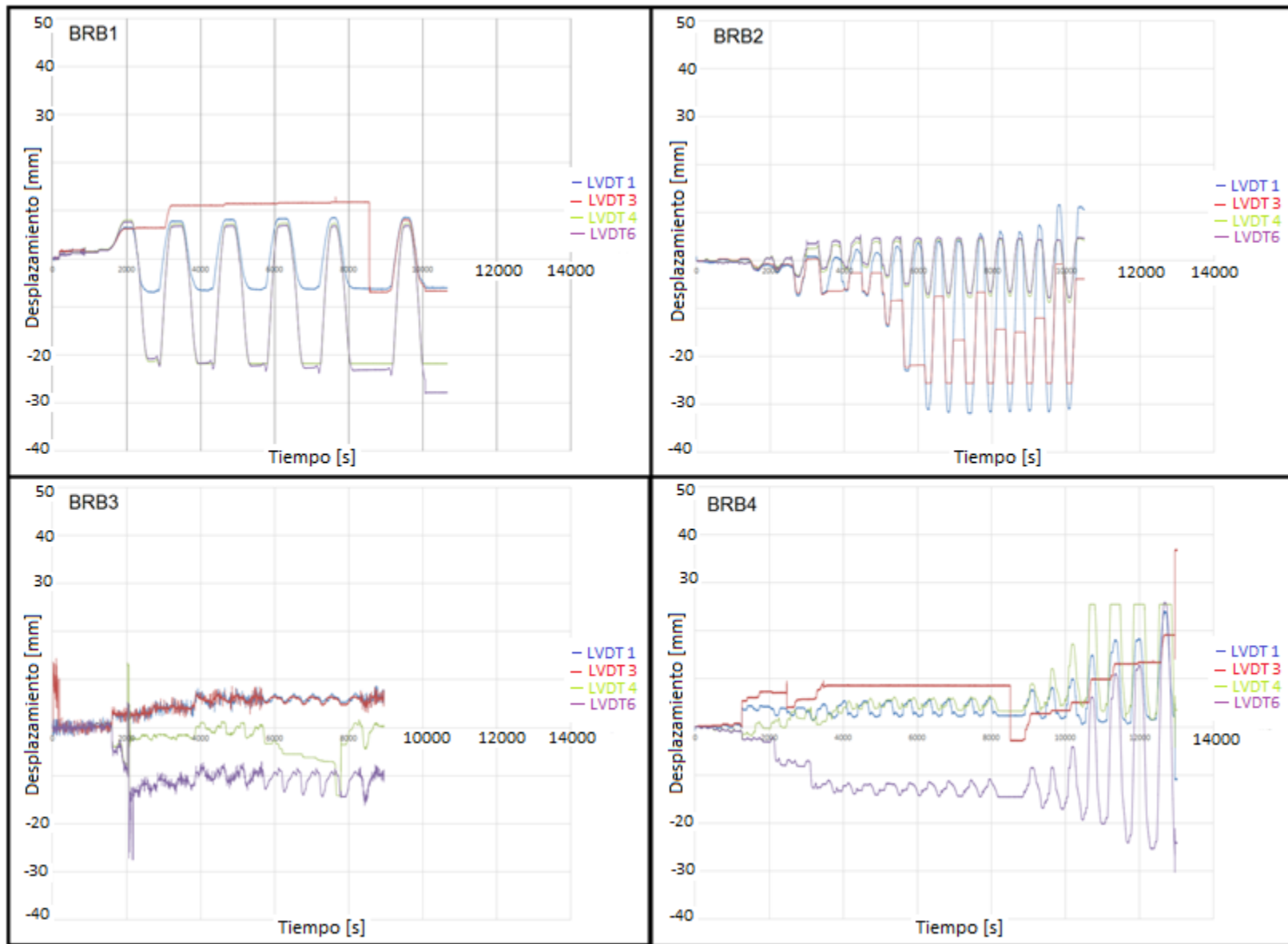


Figura 6.9: Historial de desplazamiento relativo entre núcleo y camisa exterior.

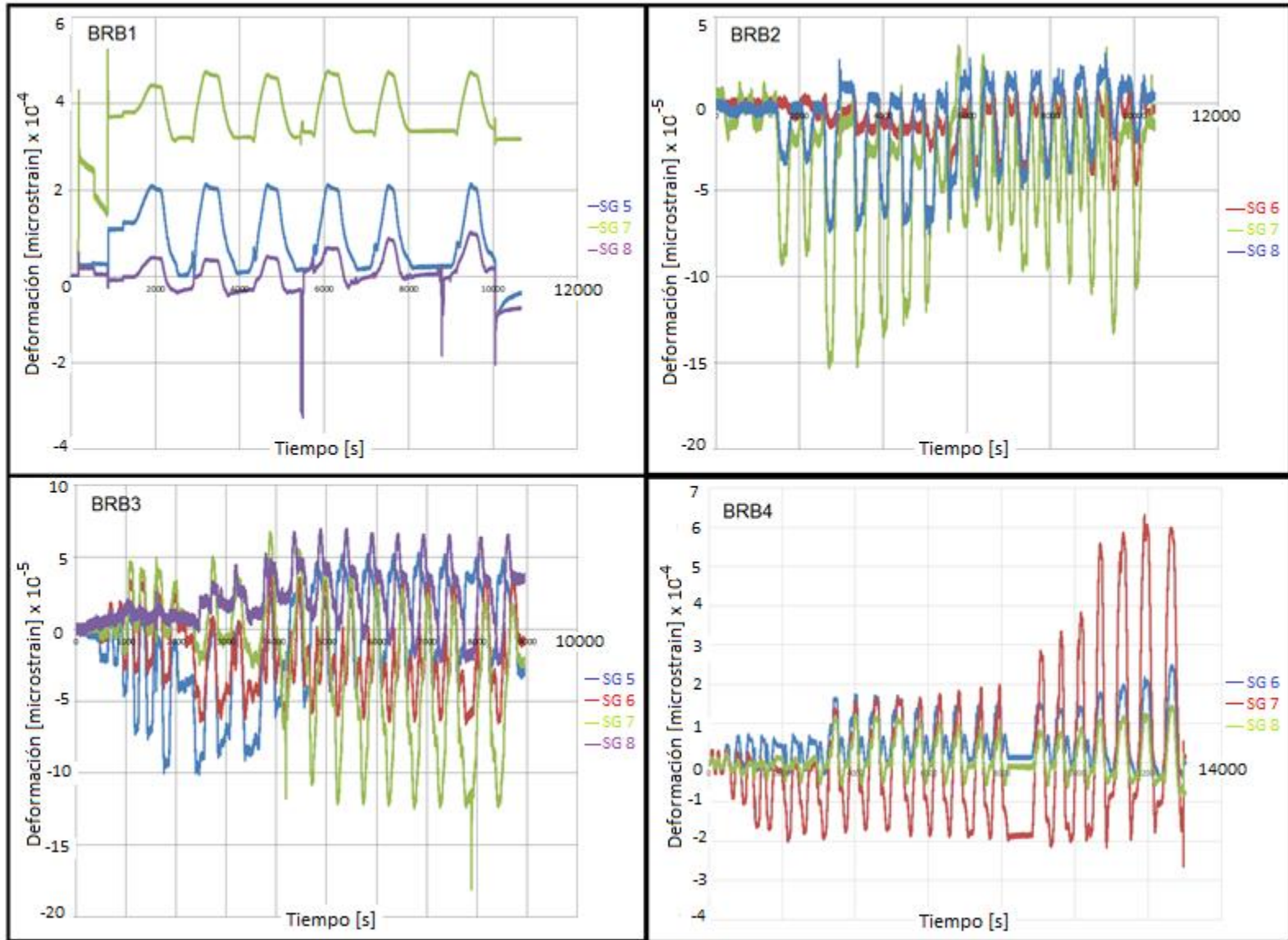


Figura 6.10: Historial de deformación longitudinal zona central.

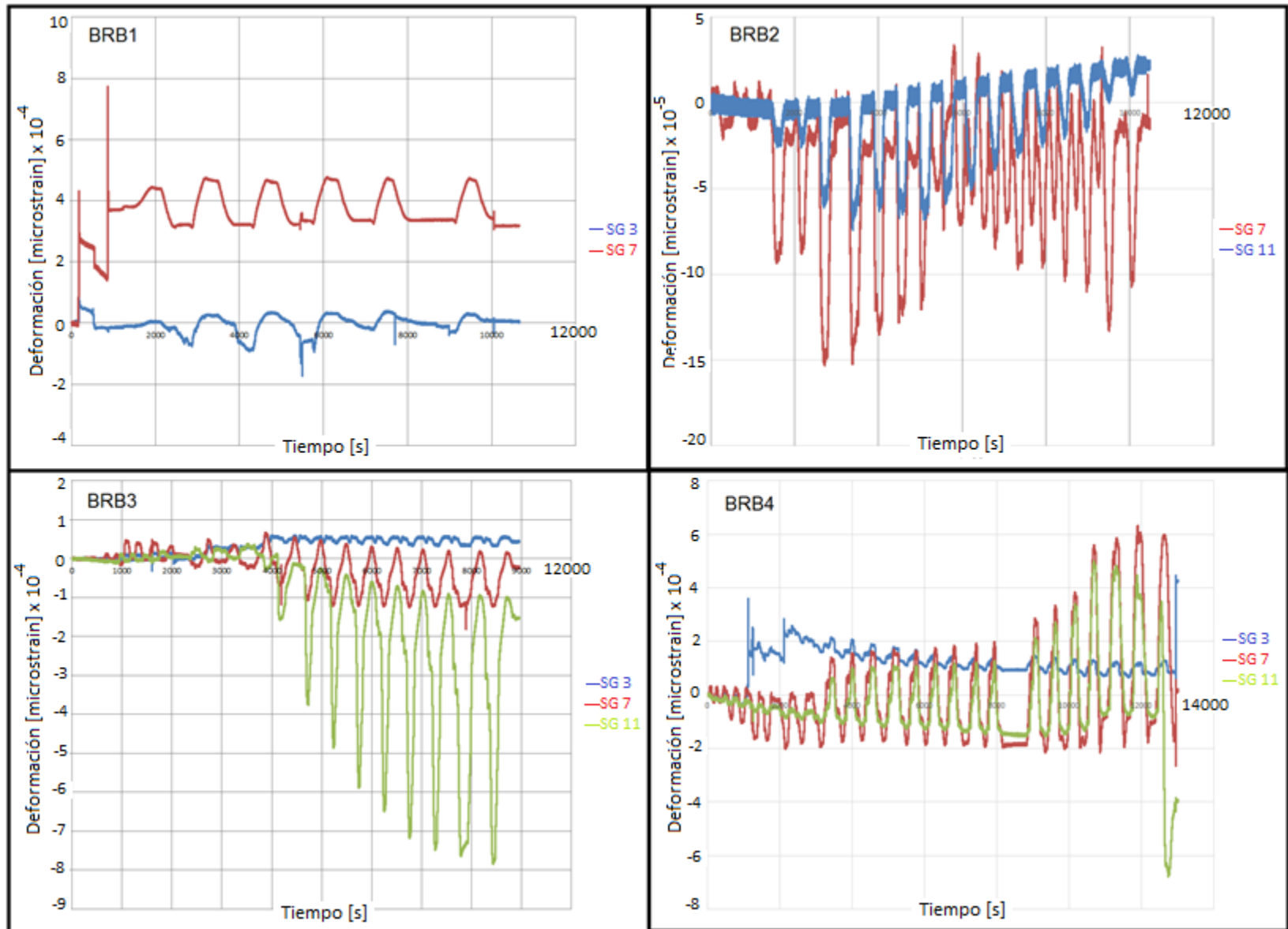


Figura 6.11: Historial de deformación longitudinal cara inferior.

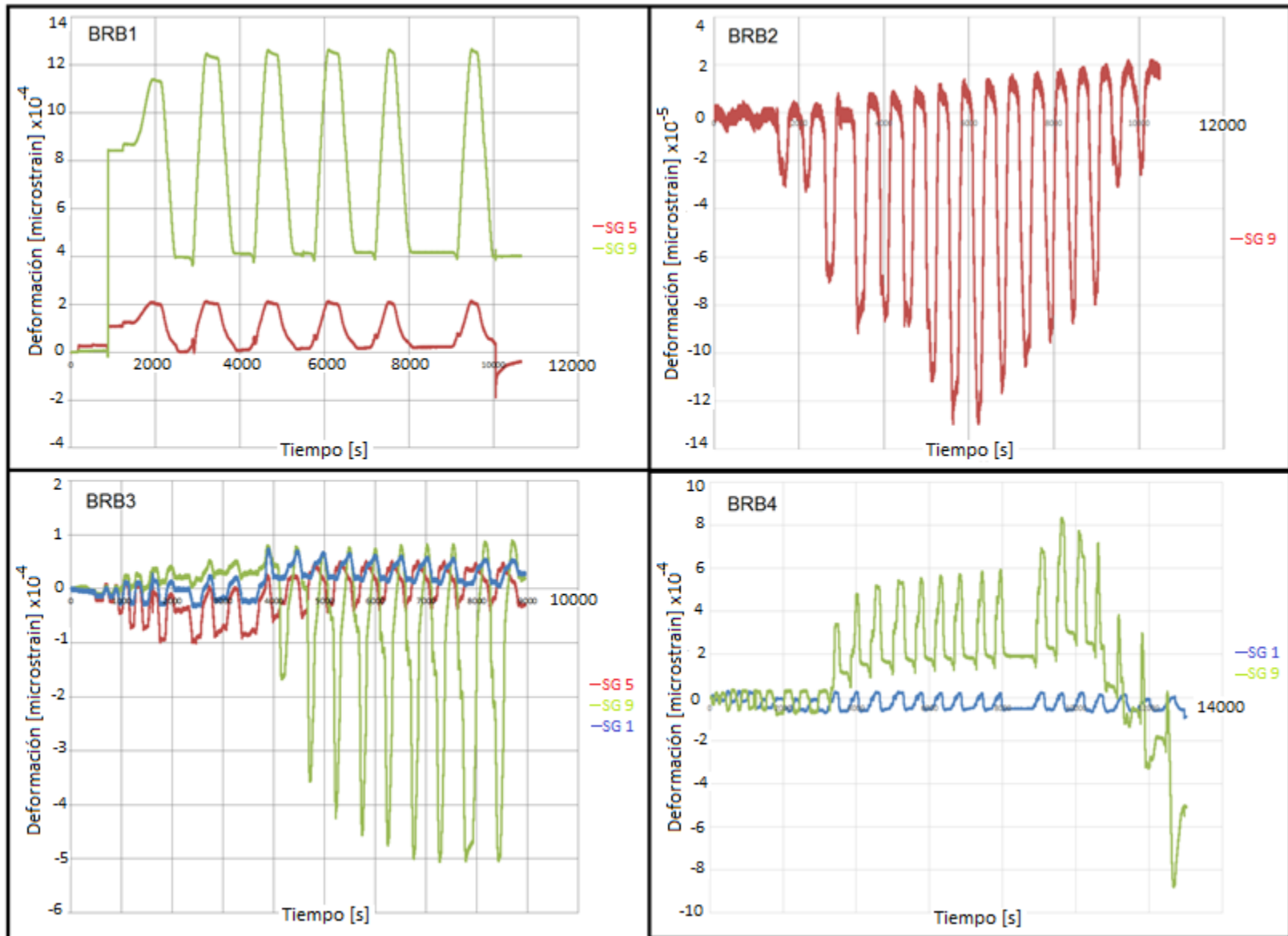


Figura 6.12: Historial de deformación longitudinal cara superior.

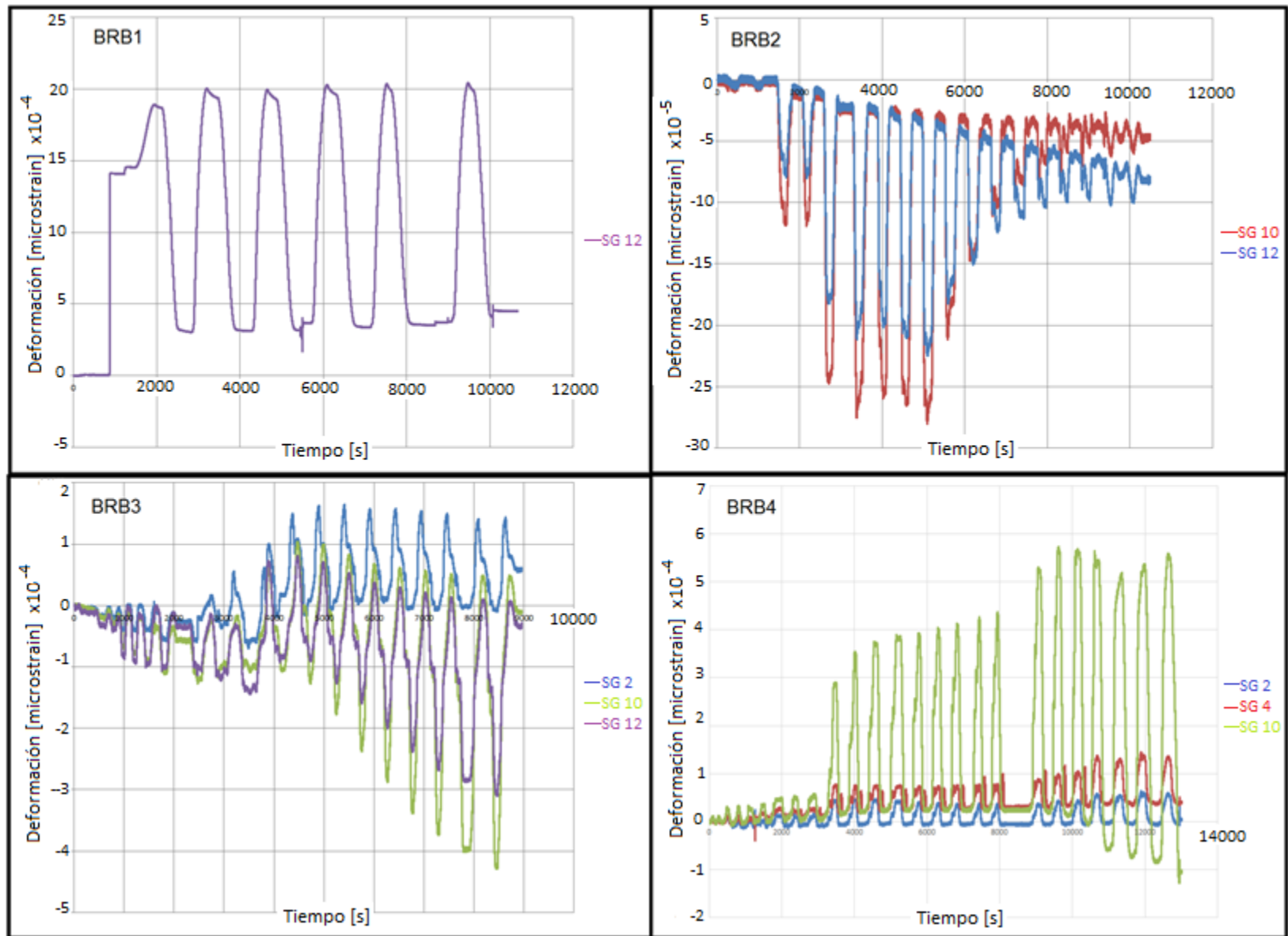


Figura 6.13: Historial de deformación transversal.

6.6 Comparación con arriostramientos con material tradicional.

En esta sección se realiza una comparación económica y en peso entre los prototipos fabricados con el nuevo material y aquellos con materiales tradicionales, particularmente mortero de hormigón.

La comparación en peso del prototipo se realiza considerando dos especímenes idénticos solo variando el material de relleno, por un lado el elastómero y por el otro el mortero de hormigón, lo que se muestra en las tablas 6.6 y 6.7.

Tabla 6.6: Peso arriostramiento con relleno de elastómero.

Pieza	Peso [kg/m]	Longitud [m]	Peso total (kg)	Referencia
Camisa exterior	30,8	2,0	61,6	Catálogo Copromet
Núcleo de acero	7,85	2,0	15,7	Catálogo Gerdau Aza
Atiesador	7,85	0,4	3,2	Catálogo Gerdau Aza
Elastómero	47,39	2,0	94,78	Dato Ferrocrucho
			175,3	

Tabla 6.7: Peso arriostramiento con relleno de mortero.

Pieza	Peso (kg/m)	Longitud (m)	Peso total (kg)	Referencia
Camisa exterior	30,8	2,0	61,6	Catálogo Copromet
Núcleo de acero	7,85	2,0	15,7	Catálogo Gerdau Aza
Atiesador	7,85	0,4	3,2	Catálogo Gerdau Aza
Mortero	84,24	2,0	168,5	Dato
			249,0	

Si se considera sólo el material confinante se obtiene que los prototipos fabricados son un 44% más liviano. En caso de comparar el peso total, se tiene que estos son un 30% más liviano.

En cuanto a la comparación económica, el costo asociado a la fabricación de cada arriostramiento de este trabajo en conjunto con la matriz necesaria para su ejecución es alrededor de 2000 dólares según dato entregado por el fabricante. Por otro lado, el costo de un arriostramiento con mortero según Dasse (2009), oscila entre 900 y 1200 dólares. En efecto el costo de los prototipos con el nuevo material es cercano al doble de los tradicionales. Sin embargo, la influencia del costo de la matriz debiera disminuirá medida que se construyen más elementos.

7 CONCLUSIONES

El objetivo principal de la presente investigación fue estudiar experimentalmente el comportamiento de un arriostramiento de pandeo restringido ante solicitaciones monotónicas y cíclicas. Las solicitaciones impuestas corresponden a ciclos de tracción y compresión.

El estudio de las propiedades de los materiales permitió verificar sus características con respecto a los valores nominales de éstos. En el caso del elastómero, se comprobó que el módulo de corte era de 13,73 [kgf/cm²] y un amortiguamiento de 5,50 [%] para una deformación de un 100%. Por otro lado, en los ensayos de las probetas planas de acero se obtuvo que el promedio de los resultados está dentro de lo exigido por la norma, la cual demanda una tensión de fluencia mínima de 250 [MPa], un rango de tensión última entre 450 y 550 [MPa], módulo de elasticidad de 210.000 [MPa] \pm 10%. Una característica importante que se observó en el ensayo de las probetas del núcleo de acero, fue la diferencia existente en las mediciones de desplazamiento realizadas por la máquina universal y un extensómetro, resultando en un material más flexible al momento de determinar el módulo de elasticidad. La obtención de las propiedades reales de los materiales permite realizar futuras investigación y modelar de mejor manera los prototipos.

El proceso de fabricación y/o construcción de los prototipos fue realizado por la empresa Ferrocacha. Durante el desarrollo de éste fue posible visualizar las distintas fases de confección de las probetas, las cuales se realizaron de manera adecuada y sin mayores inconvenientes. El proceso se perfeccionó para los últimos prototipos.

El ensayo de los arriostramientos se realizó en el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile, y la instalación de los prototipos se hizo mediante el uso de un puente grúa de 3 toneladas de capacidad, siempre considerando los protocolos de seguridad establecidos. Para el montaje, se debió considerar que el apriete de los pernos que conectan el arriostramiento con las placas Gusset, al ser torquados, no excediera el máximo de dos ensayos.

La instrumentación de los prototipos con los sensores de desplazamiento y de deformación cumplió con los requisitos de los ensayos, todos debieron ser chequeados en el momento previo al ensayo con el fin de obtener un registro adecuado de datos y así obtener el historial completo de desplazamiento o deformación según correspondía.

A los cuatro prototipos ensayados se les aplicó el protocolo de carga según las disposiciones sísmicas de la AISC. En los ciclos adicionales los prototipo A y B fallaron, en cambio los prototipos C y D se mantuvieron estables sin pérdida considerable de capacidad. El prototipo C, luego de la falla se comporta como un dissipador de energía producto la interfaz adherida o bonded entre el núcleo y el elastómero.

Se observa que en los prototipos A y B, en los cuales la interfaz núcleo-material confinante es unbonded las cargas máximas tanto en compresión como en tracción son menores que en los prototipos C y D. En el prototipo C la interfaz bonded permite

restringir mejor el núcleo de acero, y en el último prototipo las tapas en los extremos de la camisa exterior también restringen el movimiento del núcleo de acero.

En todos los casos se observa una meseta estable de carga en compresión hasta cierta deformación y carga, también una leve pérdida de capacidad asociada al pandeo del núcleo de acero. En tracción, se aprecia que el arriostramiento fluye cercano a las 30 [tf]. Los prototipos tienen un comportamiento asimétrico, alcanzando mayores valores de carga en tracción que en compresión.

La energía disipada se determinó como el área bajo la curva carga-desplazamiento. Los prototipos A y B, con interfaz unbonded tienen menor disipación de energía, en cambio los prototipos C y D que están más restringidos presentan un mejor comportamiento en términos de disipación de energía.

Respecto al sistema de ensayo, este cumplió su funcionalidad sin presentar deformaciones en sus componentes, ya sea en el apoyo móvil, o en las placas de conexión entre el arriostramiento y la placa Gusset, las cuales no evidencian deformación y fueron reutilizadas en el desarrollo de todos los ensayos. Sin embargo, en los apoyos fijos se observó deslizamiento y flexión para los niveles de carga alcanzados.

En cuanto a la comparación económica, si bien el costo del prototipo con el nuevo material es cercano al doble de los tradicionales con mortero de hormigón, una de las ventajas es que el material de relleno es reutilizable, es decir en caso de haber excedentes de material o que por relleno queden fuera del proceso de fabricación, éste puede ser nuevamente utilizado en la fabricación.

Finalmente, en cuanto al peso de los prototipos fabricados en comparación con los convencionales rellenos de mortero de hormigón, el peso total del arriostramiento es un 30% menor, lo cual representa una gran ventaja.

7.1 Limitaciones y recomendaciones.

El sistema de ensayo tiene como limitación la incapacidad de generar demandas rotacionales en los extremos de cada probeta, la cual existe cuando la diagonal forma parte de un marco. En estudios futuros se puede realizar el ensayo de los arriostramientos en un marco con el fin de evaluar el comportamiento de éstos en su uso habitual. Además, al realizar los ensayos conectando el extremo del actuador contra el muro de reacción se puede evitar los problemas de ajuste y/o deslizamiento de los apoyos.

En la instrumentación, se recomienda mejorar el sistema de soporte de los LVDTs que mide los desplazamientos fuera del plano, instalando los sensores verticales en la cara superior como se realizó en el prototipo D. Para el sensor lateral se recomienda utilizar un LVDT que use un mecanismo de resorte para asegurar el correcto registro de la información.

Realizar ingeniería forense a las probetas con el fin de obtener mayor información respecto a la fractura o falla de éstas.

La fabricación de los prototipos mediante inyección de elastómero por las perforaciones en la camisa exterior es lenta, y dada las deformaciones que ocurrieron en el tubo cuadrado se sugiere tratar de cambiar el método de fabricación para optimizarlo, una sugerencia sería utilizar dos perfiles C en la confección del tubo cuadrado, esto mejora significativamente los tiempos de fabricación.

Finalmente para aumentar la carga en compresión y evitar que el núcleo de acero se pandee, se recomienda utilizar un elastómero con mayor rigidez, traducido en un módulo de corte mayor. También es mejor considerar los prototipos con interfaz bonded.

BIBLIOGRAFÍA

AISC 341-05: Seismic provisions for structural steel buildings. American Institute of Steel Construction Inc, American Institute of Steel Construction, Chicago, IL.

ASTM. D412-06^a, 2013. Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers—tension. ASTM International, West Conshohocken, PA.

ASTM. E8/E8M, 2015. Standard test methods for tension testing of metallic materials. ASTM international, West Conshohocken PA.

Black, C., Makris, N., and Aiken, I., 2002. "Component Testing, Stability Analysis and Characterization of Buckling-Restrained Unbonded Braces," in PEER Report 2002/08, University of California, Berkeley, Berkeley.

DASSE, 2009. Cost Advantages of Buckling Restrained Braced Frame Buildings. Dasse Design Inc. Structural Engineers, San Francisco.

Escandar, A. 2003. Efecto de la temperatura en las propiedades mecánicas de gomas de alto amortiguamiento. Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago, Chile. Universidad de Chile.

Espinoza, J. 2016. Diseño de un sistema de ensayo cíclico de tracción y compresión para diagonales de pandeo restringido. Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago, Chile. Universidad de Chile.

Herrera, R. 1998. Máquina para ensayar probetas de goma a corte directo. Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago, Chile. Universidad de Chile.

Morral, M. 2015. Modelamiento numérico de arriostramientos de acero con pandeo restringido mediante el uso de elastómeros. Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago, Chile. Universidad de Chile.

Newell, J., Uang, C. M., & Benzoni, G., 2006. "Subassemblage Testing of Corebrace Buckling Restrained Braces (G Series)". San Diego: University of California.

Santelices, K., 2014. Aplicación de arriostramientos de pandeo restringido a una estructura industrial. Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil, Santiago, Chile. Universidad de Chile.

Shuhaibar, C., Lopez, W. A., & Sabelli, R. 2002. Buckling-restrained braced frames. In Proceedings (pp. 321-328).

Xie, Q., 2005. State of the art of buckling-restrained braces in Asia. Journal of Constructional Steel Research, 61(6), 727-748.