



UNIVERSIDAD TÉCNICA  
FEDERICO SANTA MARÍA

Departamento de Obras Civiles

**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DEL  
COMPORTAMIENTO CÍCLICO DE UN SISTEMA  
DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA  
MULTIDIRECCIONAL EN BASE A ELEMENTOS U-  
SHAPED**

Memoria de Título presentada por

**Jorge Ignacio González Galleguillos**

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

**Ingeniería Civil**

y el grado de

**Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil**

Profesor Guía

Ramiro Andrés Gabriel Bazález Gallardo

Diciembre del 2022

TITULO DE LA TESIS:

**DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DEL COMPORTAMIENTO  
CÍCLICO DE UN SISTEMA DE DISIPACIÓN DE ENERGÍA  
MULTIDIRECCIONAL EN BASE A ELEMENTOS U-SHAPED**

AUTOR:

**JORGE IGNACIO GONZÁLEZ GALLEGUILLOS**

TRABAJO DE TESIS, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el **Grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería** Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Ramiro Bazáez Gallardo .....

René Tobar Ramos .....

Álvaro López Ibaceta .....

Valparaíso, Chile, Diciembre del 2022

# AGRADECIMIENTOS

Poder escribir estas palabras no sería posible sin toda la ayuda que recibí en el proceso. En primer lugar, agradecer a mi familia, a mis papás Carlos González y María René Galleguillos por darme todo el apoyo emocional y financiero que pudieron darme. Estudiar una carrera sin tus papás a tu lado definitivamente añade una carga de trabajo considerable a todo el estudio y desempeño que uno debe tener. A mi hermano Francisco González, que me apoyó en varios de los ramos y en actividades extracurriculares que participamos.

Este trabajo de tesis claramente no lo hice solo, y es por esto que agradezco a mi profesor guía Ramiro Bazález, al cual considero uno de los profesores más comprometidos con el aprendizaje de los estudiantes para los que trabaja. A mi compañero de carrera y laboratorio Fernando Barriuso, con quien comenzamos el camino del magíster y tuvimos que soportar todos los percances de realizar un trabajo experimental entremedio de una pandemia. A los funcionarios Paul Gálvez y Alejandra Zamora quienes apoyaron en los ensayos de manera técnica, pero también compartiendo buenas conversaciones mientras se realizaban los ensayos. Agradezco también a la ANID por brindarme el apoyo de la beca de magister.

Durante mi estadía en la universidad conocí varias personas que me ayudaron a crecer y ser quien soy ahora. Primero agradezco a mis amigas Ornella, Gabriela y Jocelyn, con quienes compartí en esta gran cantidad de años en la casa de estudios. Agradezco a la JIM y a todas las personas que conocí ahí, quienes me ayudaron a perder la confianza, a ser quien soy de una manera más real y honesta conmigo mismo. De acá destaco a la Fanny, quien desde que nos conocimos siempre fue una persona apañadora en cualquier ámbito de la vida. También destaco a la Yess, con quien me llevé bien desde el primer momento, desde que la escuché reír dije “Con ella no voy a parar de reirme”, y así seguimos, alegrándonos nuestros días. Agradezco a mis compañeros de carrera, con quienes compartí todo el sufrimiento y apoyo mutuo de estudiar esta carrera. Destacó a la Gianina y a la Arlette, a quienes considero unas grandes amigas, con un corazón tremendo, siempre dispuestas a ayudar y dar una mano.

En el transcurso no todo fue bonito, tuve periodos en los que quise renunciar a la vida, no quería ir a la casa. Y en esos momentos mi refugio fue la pensión de la Joce (actualmente CasaBeta), donde pude conocer a la Andrea, al Seba, la Conny, la Fran, el Emilio, el Benito, y así muchas personas con las que podía tomar once, conversar y despejarme de mis problemas aunque fuera un momento. En este sentido, también agradezco a mis compañeros de colegio, el Pong, Pando, Iva, Diego, Kevin, Mono, Maca, Cristóbal, Paula, con quien tengo la suerte de seguir compartiendo aun luego de que hayan pasado muchos años desde que salimos del colegio. Ellos son una segunda familia para mí.

En este texto no puedo dejar de lado a mis compañeros del PPI, con quienes también he seguido en contacto y también fueron un apoyo en la biblioteca cuando teníamos algún ramo en común. La Maca,

el Diego, el Olave, el Edgardo, el Diego, y otros con quien agradezco de haber compartido y conocido. Por el Diego tuve la oportunidad de conocer a la Vanessa, una de las mejores amigas que pude conocer en la universidad. Conocí también a la Sandra y la Javi gracias a esta interacción.

Agradezco también las oportunidades de trabajo que tuve, como fotógrafo, donde pude conocer a Scarlet, una de las mejores personas que existen en ese mundo, quien siempre me recibía con una sonrisa y un tecito en la oficina de punto de encuentro. Como ayudante, donde pude conocer a los chicos que ahora les queda tan poco para terminar. Chicos de los que estoy muy orgulloso de poder llamar amigos, la Cami, la Anto, la Javi, el Maxi, la Fran, la Kari, y muchos otros con quienes compartí y tuve oportunidades de enseñarles algo.

Hubo muchas otras personas que conocí a lo largo de mi estadía, en el Concurso de Estructuras, en la biblioteca, en la carrera tomando ramos, distintos profesores, honestamente me extendería muchas páginas si es que las mencionara a todas. Solo queda decir que cada persona es un mundo, cada persona tiene muchas cosas que contar, de cada persona se puede aprender y cada persona merece ser escuchada. Si bien estoy acá agradeciendo el terminar mi carrera, lo que más agradezco es a todas las personas a las que pude escuchar y de las que pude aprender.

# RESUMEN

Posterior al mega terremoto de Maule 2010 (8.8 Mw), se evidenciaron graves deficiencias en algunos puentes viales chilenos, especialmente en aquellos que presentan un ángulo de esviaje. Debido a esto, y con el fin de disminuir la vulnerabilidad sísmica de dichas estructuras, nuevos criterios de diseño sísmico fueron plasmados en el Manual de Carreteras. A pesar de lo anterior, estudios recientes han planteado que estos criterios no apuntan a que los puentes permanezcan operacionales luego de un evento sísmico severo, lo cual podría afectar la resiliencia de la red vial nacional.

Este trabajo se enmarca en un proyecto FONDECYT que tiene por objetivo mejorar la resiliencia de los puentes esviados chilenos mediante la incorporación de sistemas de disipación de energía. En particular, en esta tesis se presenta el desarrollo y evaluación de un sistema de disipación de energía multidireccional en base a elementos con forma de U (U-Shaped) que pueda ser implementado en puentes viales.

Con tal objetivo, en este trabajo se llevó a cabo una campaña experimental donde se ensayaron probetas de acero tipo U-Shaped, las cuales fueron sometidas a varios protocolos de carga cíclicos de amplitud constante y de amplitud creciente. El fin de estos ensayos es poder caracterizar el comportamiento de un elemento U-Shaped cuando es solicitado en dos direcciones de carga. Lo anterior, se llevó a cabo mediante registros visuales de los daños experimentados por los especímenes, identificando los patrones para las grietas observadas, y más importante aún, registrando las fuerzas y desplazamientos de cada espécimen. Los resultados de la campaña experimental evidenciaron que las curvas de histéresis de los elementos U-Shaped presentan un comportamiento estable a medida que los ciclos de desplazamiento transcurrieron, sin que existiera una notoria degradación de la resistencia. De las curvas fuerza-desplazamiento se pudo observar su propiedad de simetría con respecto al sentido de la carga. Adicionalmente, los resultados experimentales se contrastaron con fórmulas analíticas encontradas en la literatura, de la cual se pudieron obtener factores para poder estimar de mejor manera los valores importantes para el diseño.

De manera paralela al trabajo de laboratorio, se realizaron estudios numéricos mediante el desarrollo de modelos de elementos finitos para su posterior calibración y comparación con los resultados experimentales. En este contexto, en primer lugar, se realizó una cantidad importante de modelos para poder calibrar los parámetros del material utilizado. A partir de esta calibración, se pudo evidenciar que el software es capaz de representar de manera adecuada el comportamiento cíclico que experimentan los elementos U-Shaped. Posterior a esto, se realizaron más simulaciones que permitieron establecer relaciones entre las propiedades de estos elementos cuando son cargados en  $0^\circ$  y cuando son cargados en  $90^\circ$ . Estas relaciones permitieron establecer un factor  $C_K$ , el cual permite calcular la rigidez de un

elemento U-Shaped cargado en  $90^\circ$  a partir de su rigidez cuando es cargado en  $0^\circ$ . De la misma forma se estableció un factor  $C_{Fy}$  que permite relacionar la fuerza de fluencia del elemento cargado en  $90^\circ$  y  $0^\circ$ .

A partir de las simulaciones de los elementos U-Shaped, se realizaron modelos a nivel de sistema, es decir, del sistema multidireccional. Para ello, se definieron cuatro configuraciones distintas, donde se contrastaron las curvas de histéresis entre los resultados obtenidos. De estos análisis se determinó que el comportamiento de un sistema multidireccional de elementos U-Shaped queda completamente determinado si es que se conoce el comportamiento de un solo elemento cargado en  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . Además, gracias a esto y los coeficientes anteriores se pudo establecer una ecuación que permite calcular la rigidez y fuerza de fluencia de un sistema de disipación de energía en base a elementos U-Shaped, lo cual se prevé será de mucha utilidad para el diseño e implementación de este sistema.

# ABSTRACT

After the 2010 Maule mega-earthquake (8.8 Mw), serious deficiencies were found in some Chilean highway bridges, especially those with a skew angle. Due to this, and to reduce the seismic vulnerability of these structures, new seismic design criteria were included in the Bridge Design Manual (Manual de Carreteras). Despite the above, recent studies have stated that these criteria do not indicate that the bridges remain operational after a severe seismic event, which could affect the resilience of the national road network.

This work is part of a FONDECYT project that aims to improve the resilience of Chilean skewed bridges by incorporating energy dissipation systems. This thesis presents the development and evaluation of a multidirectional energy dissipation system based on U-shaped elements that can be implemented on highway bridges.

With this objective, in this work an experimental campaign was carried out where U-Shaped steel specimens were tested, which were subjected to various cyclical load protocols of constant amplitude and increasing amplitude. The purpose of these tests is to be able to characterize the behavior of a U-Shaped element when it is requested in two load directions. This was done by visually recording the damage experienced by the specimens, identifying the patterns for the observed cracks, and more importantly, recording the forces and displacements of each specimen. The results of the experimental campaign showed that the hysteresis curves of the U-Shaped elements present a stable behavior as the displacement cycles elapsed, without there being a noticeable degradation of resistance. From the force-displacement curves it was possible to observe its property of symmetry with respect to the direction of the load. Additionally, the experimental results were contrasted with analytical formulas found in the literature, from which factors could be obtained to better estimate the important values for the design.

Parallel to the laboratory work, numerical studies were carried out through the development of finite element models for their subsequent calibration and comparison with the experimental results. In this context, first of all, a significant number of models were made in order to calibrate the parameters of the material used. From this calibration, it was possible to show that the software is capable of adequately represent the cyclical behavior experienced by the U-Shaped elements. After this, more simulations were carried out that allowed establishing relationships between the properties of these elements when they are loaded at  $0^\circ$  and when they are loaded at  $90^\circ$ . These relations allowed establishing a  $C_K$  factor, which allows to calculate the stiffness of a U-Shaped element loaded at  $90^\circ$  from its stiffness when loaded at  $0^\circ$ . In the same way, a  $C_{Fy}$  factor was established that allows the yield force of the loaded element at  $90^\circ$  and  $0^\circ$  to be related.

From the simulations of the U-Shaped elements, models were made at a system level, that is, in the multidirectional system. For this, four different configurations were defined, where the hysteresis curves between the results obtained were contrasted. From these analyzes it was determined that the behavior of a multidirectional system of U-Shaped elements is completely determined if the behavior of a single element loaded at  $0^\circ$  and  $90^\circ$  is known. In addition, thanks to this and the previous coefficients, it was possible to establish an equation that allows calculating the stiffness and yield strength of an energy dissipation system based on U-Shaped elements, which is expected to be very useful for the design and implementation of this system.

# CONTENIDO

Agradecimientos.....	3
Resumen.....	5
Abstract .....	7
Contenido .....	9
Índice de Figuras .....	11
Índice de Tablas .....	15
Introducción .....	16
Motivación .....	16
Relevancia en la Investigación .....	18
Objetivos .....	19
Objetivo General .....	19
Objetivos Específicos .....	19
Metodología de Trabajo .....	19
Estructura de la Tesis .....	22
1. Estado del Arte .....	24
1.1 Dispositivos de Protección Sísmica.....	24
1.1.1 Según el tipo de Control .....	24
1.1.2 Según la Dirección de Respuesta .....	27
1.2 Dispositivos U-Shaped.....	30
1.2.1 Elementos U-Shaped tipo Crawler .....	31
1.2.2 Elementos U-Shaped de Nippon Steel .....	32
2. Ensayos Experimentales.....	34
2.1 Programa Experimental.....	34
2.1.1 Descripción general de los ensayos.....	34
2.1.2 Matriz de ensayos.....	35

2.1.3	Protocolo de carga .....	36
2.1.4	Equipamiento, Instrumentación y Mediciones .....	37
2.2	Resultados, Análisis y Discusión .....	40
2.2.1	Modo de deformación, Daños y Falla .....	40
2.2.2	Curvas de Histéresis .....	47
2.2.3	Fuerza Máxima.....	53
2.2.4	Fluencia .....	57
2.2.5	Ductilidad .....	64
2.2.6	Fatiga.....	65
2.2.7	Rigidez.....	69
2.2.8	Energía.....	71
3.	Modelación Numérica .....	74
3.1	Simulación de Ensayos Experimentales .....	74
3.1.1	Descripción del Modelo .....	74
3.1.2	Calibración .....	77
3.1.3	Resultados y Discusión .....	80
3.2	Influencia de la Dirección de Carga y de Relaciones Geométricas en la Rigidez y Fluencia	83
3.2.1	Descripción del Procedimiento.....	83
3.2.2	Análisis de Resultados.....	85
3.3	Análisis Numérico del Sistema Multidireccional.....	87
3.3.1	Descripción del Sistema Multidireccional.....	87
3.3.2	Descripción del Modelo de Elementos Finitos.....	88
3.3.3	Análisis de Resultados.....	89
4.	Conclusiones .....	96
4.1	Resumen y Conclusiones.....	96
4.2	Recomendaciones y Futuros Trabajos.....	98
	Referencias .....	99
	Anexos.....	103

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de rotación del tablero .....	16
Figura 2. Caída del tablero del puente Hospital .....	17
Figura 3. Caída de los vanos del paso superior Miraflores .....	17
Figura 4. Corte transversal de un puente con un sistema de disipación de energía.....	18
Figura 5. Sistema de disipación de energía en base a elementos U-Shaped .....	18
Figura 6. Diagrama de la metodología de trabajo .....	22
Figura 7. Edificio Titanium y los dispositivos de energía tipo U-Shaped que posee.....	26
Figura 8. Dispositivos unidireccionales (a) Buckling Restrained Braces (BRB) (b) Amortiguador magneto-reológico.....	27
Figura 9. Amortiguadores histeréticos (a) U-Shaped (b) ADAS (c) SSD (d) DPD .....	29
Figura 10. Dispositivos Multidireccionales (a) Multi-directional Torsional Hysteretic Damper (MTDH) (b) Multi-level Spring Restrainer (MLSR) (c) Multidirectional Cable Restrainer (MDCR) .....	30
Figura 11. Disipadores U-Shaped (a) Nippon Steel (b) Tipo Crawler .....	31
Figura 12. Sistema de carga (a) en el laboratorio (b) esquemático .....	34
Figura 13. Protocolos de carga utilizados.....	37
Figura 14. Equipo MTS (a) Prensa hidráulica (b) Controlador (c) Mordaza (d) Bomba hidráulica .....	38
Figura 15. Disposición de la instrumentación utilizada .....	38
Figura 16. Ubicación de strain gauges en ensayos a (a) 0° y (b) 90° .....	39
Figura 17. Captura de pantalla de una de las pestañas del programa LabVIEW.....	40
Figura 18. Deformación del elemento U-Shaped. (a) Carga en 0°. (b) Carga en 90° con relación B/t cercana a 1. (c) Carga en 90° con relación alta de B/t.....	41
Figura 19. Modo de deformación en el ensayo A5720GFati1. ....	42
Figura 20. Grietas en de las probetas del ensayo A572t10AmpCrec .....	43
Figura 21. Grietas de las probetas A572B100 (a) Fatiga 1 (b) Fatiga 2 (c) Fatiga 3 .....	43
Figura 22. Falla del ensayo A5720GFati2. (a) UD 1, (b) UD 2 .....	44
Figura 23. Falla del ensayo A572B150Fati1. (a) UD 1, (b) UD 2 .....	44
Figura 24. Modo de deformación en el ensayo A572B4090GFati1 .....	45
Figura 25. Deformación fuera del plano del ensayo A36B4090GFati1 .....	45
Figura 26. Grietas presentes en los ensayos (a) A36B4090GFati1 y (b) A36B4090GFati2.....	46
Figura 27. Fracturas de ensayos (a) A36B4090GFati1 y (b) A36B4090GFati2 .....	46

Figura 28. Curva de histéresis para el ensayo A5720GFati1 .....	48
Figura 29. Fuerza máxima a través de los ciclos en el ensayo A5720GFati1 .....	48
Figura 30. Ciclos de histéresis para el ensayo A5720GAmpCrec.....	49
Figura 31. Curvas de histéresis al variar la altura (H). (a) Acero A572, (b) Acero A36.....	50
Figura 32. Curvas de histéresis al variar el espesor (t). (a) Acero A572, (b) Acero A36.....	51
Figura 33. Curvas de histéresis al variar el ancho (B).....	52
Figura 34. Ciclos de histéresis cuando al variar la dirección de carga.....	53
Figura 35. Mecanismo de deformación con carga a 90° .....	53
Figura 36. Fuerzas máximas por espécimen.....	54
Figura 37. Razón entre la fuerza máxima y la calculada con la ecuación (2) .....	56
Figura 38. Razón entre la fuerza máxima y la calculada con la ecuación (3) .....	56
Figura 39. Relación fuerza-desplazamiento [29].....	57
Figura 40. Primer cuarto de ciclo del ensayo A5720GFati1 .....	58
Figura 41. Varianzas del desplazamiento de fluencia por método utilizado .....	59
Figura 42. Razón entre el desplazamiento obtenido por R&O y el calculado con la ecuación (10) ....	62
Figura 43. Razón entre la fuerza de fluencia obtenida por R&G y la calculada con la ecuación (9) ...	63
Figura 44. Razón entre la fuerza de fluencia según strain gauges y la calculada con la ecuación (9) .	64
Figura 45. Número de ciclos a la falla versus la ductilidad alcanzada.....	66
Figura 46. Número de ciclos a la falla versus la ductilidad alcanzada con la relación H/t .....	66
Figura 47. Cantidad de ciclos a la falla versus la ductilidad alcanzada.....	67
Figura 48. Deformación plástica acumulada.....	68
Figura 49. Razón entre la rigidez experimental y la calculada con la ecuación (17) .....	71
Figura 50. Razón de la rigidez experimental con los tres métodos y la rigidez teórica .....	71
Figura 51. Energía disipada en el ensayo A360GAmpCrec.....	72
Figura 52. Amortiguamiento histerético .....	73
Figura 53. Geometría del modelo de elementos finitos.....	74
Figura 54. Captura de pantalla de las superficies seleccionadas para el contacto friccional.....	76
Figura 55. Mallado utilizado para los modelos de elementos finitos .....	77
Figura 56. Comparación del primer ciclo del ensayo A5720GFati1 .....	79
Figura 57. Comparación del primer ciclo del ensayo A36B400GFati1 .....	79
Figura 58. Comparación de ciclos de histéresis en ensayo A572H75Fati1.....	80
Figura 59. Comparación de ciclos de histéresis en ensayo A572H125AmpCrec .....	81
Figura 60. Comparación de ciclos de histéresis en ensayo A36B4090GFati1 .....	82
Figura 61. Comparación de ciclos de histéresis en ensayo A36B4090GFati2.....	82
Figura 62. Comparación entre la deformada del ensayo a 90°. (a) Experimental (b) Ansys .....	83
Figura 63. Factor $C_K$ para los distintos valores de las relaciones geométricas.....	85

Figura 64. Factor $C_{Fy}$ para los distintos valores de las relaciones geométricas.....	86
Figura 65. Ubicación del sistema de disipación de energía.....	88
Figura 66. Configuraciones geométricas de elementos U-Shaped propuestos para el sistema multidireccional.....	89
Figura 67. Curva fuerza desplazamiento de 1 elemento cargado en $0^\circ$ y $90^\circ$ , y de la disposición 8U normalizada.....	90
Figura 68. Curvas fuerza-desplazamiento normalizadas para las distintas disposiciones cargadas en la dirección A.....	91
Figura 69. Curva fuerza desplazamiento en dirección A y B.....	91
Figura 70. Diagrama de flujo para obtención de rigidez y fuerza de fluencia del dispositivo.....	93
Figura 71. Modelo de elementos finitos del sistema de verificación.....	95
Figura 72. Ensayo A5720GFati1.....	103
Figura 73. Ensayo A5720GFati2.....	103
Figura 74. Ensayo A5720GFati3.....	103
Figura 75. Ensayo A5720GAmpCrec.....	103
Figura 76. Ensayo A572t10Fati1.....	104
Figura 77. Ensayo A572t10Fati2.....	104
Figura 78. Ensayo A572t10Fati3.....	104
Figura 79. Ensayo A572t10AmpCrec.....	104
Figura 80. Ensayo A572t12Fati1.....	104
Figura 81. Ensayo A572t12Fati2.....	104
Figura 82. Ensayo A572t12Fati3.....	105
Figura 83. Ensayo A572t12AmpCrec.....	105
Figura 84. Ensayo A572H75Fati1.....	105
Figura 85. Ensayo A572H75Fati2.....	105
Figura 86. Ensayo A572H75Fati3.....	105
Figura 87. Ensayo A572H75AmpCrec.....	105
Figura 88. Ensayo A572H125Fati1.....	106
Figura 89. Ensayo A572H125Fati2.....	106
Figura 90. Ensayo A572H125Fati3.....	106
Figura 91. Ensayo A572H125AmpCrec.....	106
Figura 92. Ensayo A572B100Fati1.....	106
Figura 93. Ensayo A572B100Fati2.....	106
Figura 94. Ensayo A572B100Fati3.....	107
Figura 95. Ensayo A572B100AmpCrec.....	107
Figura 96. Ensayo A572B150Fati1.....	107

Figura 97. Ensayo A572B150Fati2.....	107
Figura 98. Ensayo A572B150Fati3.....	107
Figura 99. Ensayo A572B150AmpCrec.....	107
Figura 100. Ensayo A360GFati1.....	108
Figura 101. Ensayo A360GFati2.....	108
Figura 102. Ensayo A360GFati3.....	108
Figura 103. Ensayo A360GAmpCrec.....	108
Figura 104. Ensayo A36H125Fati1.....	108
Figura 105. Ensayo A36H125Fati2.....	108
Figura 106. Ensayo A36H125Fati3.....	109
Figura 107. Ensayo A36H125AmpCrec.....	109
Figura 108. Ensayo A36t10Fati1.....	109
Figura 109. Ensayo A36t10Fati2.....	109
Figura 110. Ensayo A36t10Fati3.....	109
Figura 111. Ensayo A36t10AmpCrec.....	109
Figura 112. Ensayo A36B400GFati1.....	110
Figura 113. Ensayo A36B400GFati2.....	110
Figura 114. Ensayo A36B400GFati3.....	110
Figura 115. Ensayo A36B4090GFati1.....	110
Figura 116. Ensayo A36B4090GFati2.....	110
Figura 117. Ensayo A36B4090GFati3.....	110

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de ensayos.....	35
Tabla 2. Esfuerzo de fluencia y último para los distintos aceros .....	36
Tabla 3. Fuerza máxima y mínima alcanzada por espécimen .....	54
Tabla 4. Valores de desplazamiento de fluencia experimentales .....	60
Tabla 5. Valores de fuerza de fluencia experimentales .....	61
Tabla 6. Ductilidad experimentada por cada probeta.....	65
Tabla 7. Grupos en base a $H/t$ .....	68
Tabla 8. Rigidez por espécimen .....	70
Tabla 9. Parámetros luego de la calibración.....	79
Tabla 10. Rangos de las variables geométricas utilizadas.....	84
Tabla 11. Valores de coeficientes para las ecuaciones que describen $C_K$ .....	87
Tabla 12. Valores de coeficientes para las ecuaciones que describen $C_{Fy}$ .....	87
Tabla 13. Diferencia de fuerza máxima bajo carga en dirección A y B.....	92
Tabla 14. Parámetros geométricos del disipador.....	93
Tabla 15. Valores de $C_K$ y $C_{Fy}$ para las relaciones $L/B$ y $B/t$ conocidas .....	94
Tabla 16. Valores de rigidez y fuerza de fluencia del sistema de verificación .....	95

# INTRODUCCIÓN

## MOTIVACIÓN

Este proyecto de tesis nace del proyecto FONDECYT #11180882 a cargo del profesor Ramiro Bazález. Este proyecto busca evaluar el comportamiento de puentes esviados equipados con sistemas de disipación de energía ante solicitaciones sísmicas. Para definir la motivación del trabajo de tesis, es necesario hablar de la motivación del proyecto. Esta comienza con el evento del año 2010 en Chile, el devastador terremoto del Maule del 27 de febrero, con una magnitud de momento de 8.8 Mw. La zona afectada por dicho evento se extendió 700 km y 200 km en dirección Norte-Sur y Este-Oeste, respectivamente. El principal problema, dentro de los muchos que este evento generó, es el daño y caída de puentes producto del movimiento sísmico, principalmente en puentes esviados [1]. Los puentes esviados se caracterizan por tener su eje longitudinal orientado en un ángulo distinto de  $90^\circ$ , respecto a la orientación de cepas y estribos, ocasionando que el tablero posea forma romboidal y no rectangular.

Dadas las características geométricas del tablero en este tipo de puentes, al momento de ocurrir un movimiento sísmico, el tablero sufre una rotación de cuerpo rígido en torno a una de las esquinas obtusas, en la Figura 1 correspondería a la esquina D, provocando que en las esquinas opuestas (A y B) se genere un impacto entre éste y el estribo, lo que favorece a la caída del tablero y colapso del puente [1]. En la Figura 2 y Figura 3 se pueden ver las caídas de los vanos del puente Hospital, ubicado cerca de Rancagua, y del paso superior Miraflores, el cual es parte de la autopista Américo Vespucio en Santiago.

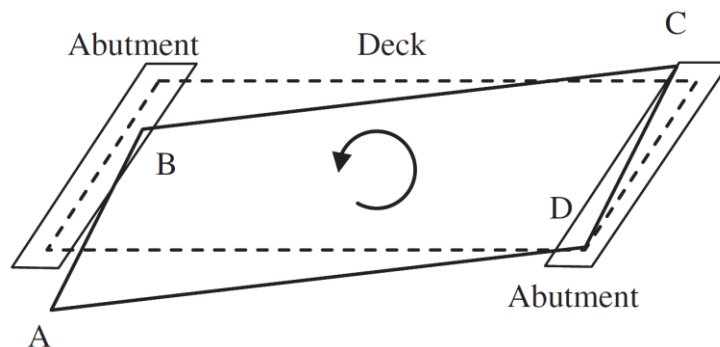


Figura 1. Esquema de rotación del tablero [1]



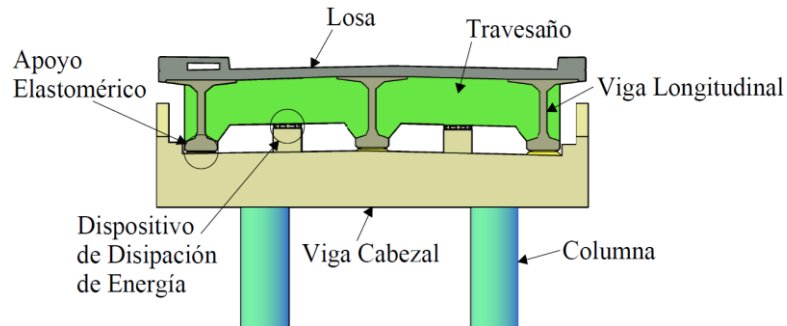
**Figura 2. Caída del tablero del puente Hospital [1]**



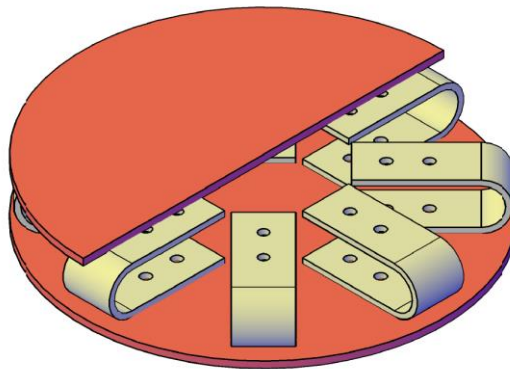
**Figura 3. Caída de los vanos del paso superior Miraflores [1]**

La solución que se plantea a este problema es la incorporación de un sistema de disipación de energía multidireccional para que éste disminuya la magnitud del desplazamiento del tablero, pudiendo así evitar el impacto que se genera entre los estribos y el tablero, y entre las vigas longitudinales con los topes sísmicos. En la Figura 4 se puede apreciar que el sistema se planea ubicar en la interfaz entre el diafragma y las vigas cabezales de las cepas. Estará compuesto por elementos U-Shaped (UD), como el mostrado en la Figura 5, el cual es preferible a otros debido a varios aspectos que permiten que este tipo de disipadores sean una buena alternativa. En el económico, es más barato manufacturar piezas metálicas que comprar disipadores de energía de tipo viscoso, los cuales poseen un alto costo inicial [2]. En el aspecto de mantenimiento y reparación, se prefiere usar un disipador considerándolo como un fusible estructural, lo cual se traduce en que los elementos que componen el sistema de disipación pueden ser fácilmente inspeccionados y reemplazados. Por último, en el aspecto funcional, se ideó pensando en que el disipador pueda soportar demandas bidireccionales, de manera que el sistema pueda funcionar cuando se produzcan desplazamientos en ambas direcciones.

Uno de los objetivos del proyecto FONDECYT es poder desarrollar este disipador y determinar su comportamiento bajo demandas cíclicas, para luego crear una caracterización de esta curva que pueda ser usada en la evaluación del desempeño sísmico del puente. La evaluación se hará a través de modelos en OpenSees llevados a cabo por otro estudiante, Fernando Barriuso [3]. En el trabajo de Barriuso se evalúan distintas respuestas estructurales y se comparan las respuestas de los modelos con y sin el disipador incluido, con el fin de evaluar su influencia en el desempeño del puente ante sollicitaciones sísmicas.



**Figura 4. Corte transversal de un puente con un sistema de disipación de energía**



**Figura 5. Sistema de disipación de energía en base a elementos U-Shaped**

## **RELEVANCIA EN LA INVESTIGACIÓN**

Este trabajo es parte un proyecto que estudia el comportamiento de puentes chilenos ante eventos sísmicos, dado el daño que han sufrido estas estructuras ante los últimos terremotos. El proyecto como tal es parte de una línea de investigación cuya finalidad es mejorar el desempeño de los puentes dentro de la red vial chilena. Esta tesis, en específico, provee resultados experimentales de sistemas de disipación de energía (pasivos) en forma de U (U-Shaped o UD), que permitan su caracterización mediante ecuaciones, y que también permitan la calibración de modelos de elementos finitos. Por otro lado, este trabajo también es un aporte a la evaluación a la vida de fatiga de este tipo de disipadores de energía, dado que no es mucha la información que existe en la literatura con respecto a este tema. Por otro lado, este trabajo provee ecuaciones y expresiones a ser utilizadas en el diseño de estos disipadores.

## **OBJETIVOS**

### Objetivo General

Desarrollar un sistema de disipación de energía multidireccional en base a elementos U-Shaped y caracterizar su comportamiento cíclico en base a resultados experimentales y numéricos. A partir de lo anterior se proponen expresiones que faciliten el diseño de este sistema de disipación de energía.

### Objetivos Específicos

Los objetivos específicos se separaron en dos grupos, donde los primeros tres consisten en estudiar y analizar la información y comportamiento de los elementos U-Shaped como unidad. Mientras que los otros cuatro consisten en estudiar y analizar el comportamiento de un sistema de disipación de energía multidireccional formado en base a estos elementos. A continuación, se presentan:

#### Componente:

1. Analizar y caracterizar el comportamiento cíclico de elementos U-Shaped sometidos a solicitaciones en diferentes direcciones con respecto al eje principal del elemento ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) de manera analítica, numérica y experimental.
2. Generar modelos no lineales de elementos finitos en el programa ANSYS de los elementos U-Shaped.
3. Comparar y calibrar los modelos numéricos con los resultados experimentales.

#### Sistema:

4. Desarrollar un sistema de disipación de energía multidireccional en base a elementos U-Shaped.
5. Realizar un modelo de elementos finitos en el programa ANSYS del sistema de disipación de energía.
6. Evaluar el comportamiento del sistema de disipación multidireccional en base a los análisis que se desarrollan en el programa ANSYS.
7. Proponer ecuaciones que permitan estimar propiedades de un sistema de disipación de energía en base a elementos U-Shaped.

## **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

Este estudio utiliza metodologías experimentales y numéricas para el logro de los objetivos planteados en la sección anterior, como se observa en la Figura 6.

### Objetivo Específico 1

Para llevar a cabo el primer objetivo específico, es necesario realizar ensayos de laboratorio de elementos U-Shaped sometidos a demandas de desplazamiento en distintas direcciones. Estos ensayos se realizaron en el Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras (LEMCO) del Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Como primer paso, se realiza una matriz de dimensiones de las probetas a ensayar. Las dimensiones son definidas de manera que la máxima fuerza restitutiva del elemento U-Shaped no sobrepase la capacidad de fuerza de la máquina en la que serán cargadas las probetas. La estimación de las fuerzas se realiza en base a las fórmulas analíticas existentes en la literatura sobre los elementos U-Shaped. Dado que la mayoría de estas fórmulas están referidas a cuando se somete al elemento a un desplazamiento de  $0^\circ$ , para poder estimar la fuerza que se genera al demandar un desplazamiento en  $90^\circ$  se utilizará el software ANSYS.

Posteriormente, se debe diseñar el sistema de carga con el que serán aplicados los desplazamientos en los elementos U-Shaped. El sistema debe ser diseñado de tal manera que pueda ser instalado en la máquina de ensayos MTS 810 que posee el LEMCO, que los elementos disipadores puedan ser instalados de manera fácil, y que las fuerzas resistidas por este sistema se mantengan en el rango elástico. Esto último con el fin de que el sistema no se dañe a medida que se ensayan las probetas y que sea capaz de resistir la gran cantidad de ensayos a realizar.

Luego de haber realizado el dimensionamiento de las probetas y del sistema de carga a utilizar, todos estos elementos metálicos deben ser mandados a manufacturar a una maestranza. En paralelo, se debe preparar la planificación de los ensayos en conjunto con el LEMCO, sobre todo, para coordinar la disponibilidad de espacios y de equipos. Además, también se debe definir cuál será la instrumentación requerida para los ensayos.

Luego de tener toda la logística definida y los elementos metálicos manufacturados, se deben realizar los ensayos correspondientes y registrar los datos experimentales, los cuales son: el desplazamiento relativo que sufren los especímenes, la fuerza restitutiva que genera el espécimen, y la deformación que se genere en ciertos puntos de la probeta. Finalmente, se deben analizar estos datos para obtener los parámetros que interesan a esta investigación, que son, la rigidez inicial, el punto de fluencia, la fuerza máxima, la energía disipada y la cantidad de ciclos hasta la falla.

### Objetivo Específico 2

Para el segundo objetivo, el primer paso consiste en investigar e interiorizarse acerca del programa de elementos finitos a utilizar, el cuál será ANSYS. En específico, se debe aprender a generar las propiedades adecuadas para el material a utilizar, generar la geometría de los especímenes, establecer la

relación de contacto entre distintos elementos, generar un mallado adecuado, definir la demanda y las condiciones necesarias, extraer los datos necesarios para analizar. Con el fin de optimizar el tiempo de procesamiento de estas simulaciones numéricas, se debe analizar la influencia del nivel de mallado y del intervalo de tiempo utilizado por el solucionador. Con todo esto, se deben generar modelos de los especímenes de laboratorio y someterlos a las mismas demandas que en el laboratorio.

### Objetivo Específico 3

Para el tercer objetivo, se realiza una comparación entre los resultados experimentales y los resultados numéricos. Al realizar esta comparación se debe evaluar la similitud de los resultados para poder validar los resultados de los modelos numéricos. En caso de presentar diferencias significativas, se procederá a calibrar los parámetros, con tal de hacer el modelo más fidedigno a la realidad.

### Objetivo Específico 4

El cuarto objetivo, trata del desarrollo del sistema de disipación de energía, por ende, consiste en definir en base a la literatura el diseño de este, lo que involucra definir el número de unidades U-Shaped que poseerá y la disposición de estos.

### Objetivo Específico 5

Para el quinto objetivo, el primer paso es la elaboración de modelos en el programa ANSYS del sistema completo, el cual fue definido en el objetivo específico anterior. De estos modelos se extraerán curvas fuerza - desplazamiento en base a distintas trayectorias impuestas en los protocolos de carga. Para luego analizar estos resultados y estudiar el comportamiento del sistema en su totalidad.

### Objetivo Específico 6

Para realizar el sexto objetivo, se relacionarán los resultados obtenidos en los objetivos específicos 3 y 5. Se establecerán relaciones entre las propiedades del elemento U-Shaped como unidad y cuando este conforma un sistema de disipación con más unidades. Se realizarán análisis acerca de cómo afecta el número de unidades que se utilicen, la disposición de estos y su geometría.

### Objetivo Específico 7

Para el séptimo objetivo, se utilizan las relaciones y expresiones encontradas en el objetivo anterior para poder generar ecuaciones que permitan determinar las propiedades del sistema de disipación de energía en base a las propiedades geométricas de las unidades U-Shaped que se vayan a utilizar.

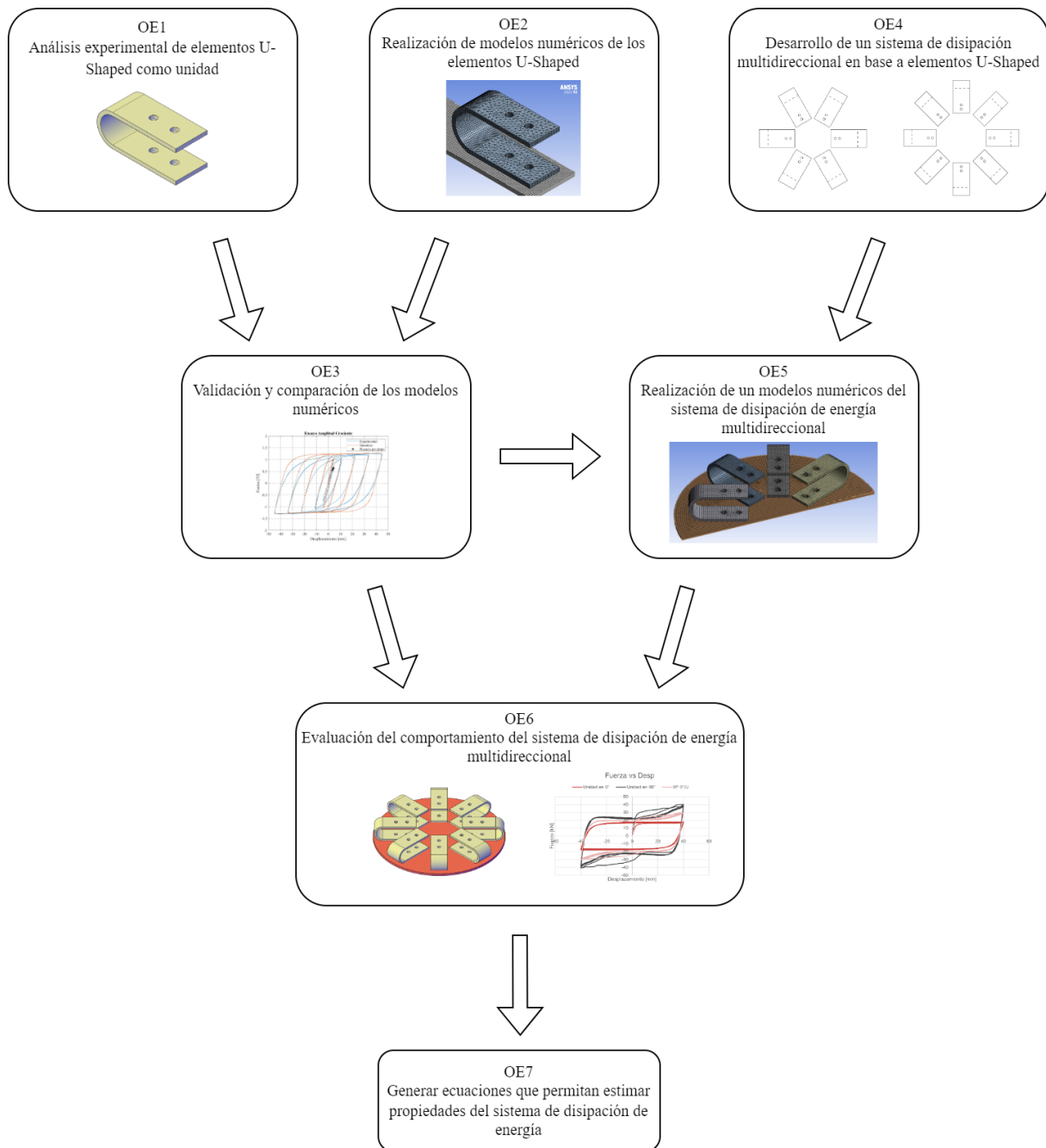


Figura 6. Diagrama de la metodología de trabajo

## ESTRUCTURA DE LA TESIS

### Capítulo 1: Estado del Arte

En el capítulo 1, se hace una revisión en la literatura en el estado de arte acerca de los sistemas de disipación de energía existentes. En particular, se revisa en detalle los disipadores de energía tipo U-Shaped, y también se investiga acerca del estado del arte en el diseño de protección sísmica para puentes.

## Capítulo 2: Ensayos Experimentales

En el capítulo 2, se describe el programa experimental, el cual consiste en la descripción de las probetas ensayadas, el protocolo de carga, y los equipos y la instrumentación utilizadas. Además, luego se presentan los resultados de las curvas fuerza vs desplazamiento, donde se realiza un análisis acerca de las distintas propiedades de los elementos U-Shaped, tales como la rigidez, punto de fluencia, energía, vida a fatiga, entre otros.

## Capítulo 3: Modelación Numérica

En el capítulo 3, se habla sobre todos los aspectos relacionados con las simulaciones hechas en el programa de elementos finitos ANSYS. Desde la descripción del modelo, las condiciones de borde ingresadas y los resultados con sus respectivos análisis. Este se separa en 3 subsecciones, donde la primera consiste en la comparación entre los resultados de los ensayos experimentales versus la modelación numérica. La segunda trata sobre uso de modelos numéricos para establecer relaciones entre las propiedades de los elementos U-Shaped sometido a una demanda de desplazamiento en  $0^\circ$  vs cuando esta está en  $90^\circ$ . La tercera y última trata de un análisis numérico en el cual el sistema de disipación de energía multidireccional basado en elementos U-Shaped es modelado.

## Capítulo 4: Conclusiones

En el capítulo 4, se presentan las conclusiones obtenidas, y comentarios adicionales sobre recomendaciones para trabajos a futuro y autocríticas al trabajo realizado.

# 1. ESTADO DEL ARTE

## 1.1 DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN SÍSMICA

La principal razón por la que existen los dispositivos de protección sísmica es para proteger las obras civiles (i.e. edificios, puentes, otros) ante eventos sísmicos de gran intensidad. El daño que generan los terremotos se debe a las sollicitaciones que se inducen en la base de la estructura, que se traduce en desplazamientos, velocidades y aceleraciones en distintos puntos de esta, lo que a su vez genera fuerzas y momentos en el sistema. En consecuencia, se generan esfuerzos y deformaciones, las cuales al exceder algún estado de daño generan grietas o el colapso parcial o total de la estructura. Es por esto, que en distintas partes del mundo y en Chile se cuenta con sistemas de protección sísmica, algunos ejemplos en Chile son el Hospital Militar, el Hospital San Carlos de Apoquindo o el Edificio Titanium [4, 5, 6]. Además, se sabe que esta práctica data de hace mucho tiempo, siendo el primer caso registrado la tumba de Ciro el Grande de Persia, en el 528 a.C. en Pasargada, Iran [7].

Dentro de todos los sistemas de protección sísmica que existen, para efectos de este trabajo importan dos tipos de clasificaciones. La primera, es según el mecanismo o tipo de control que utiliza el dispositivo para proteger a la estructura de los efectos del movimiento sísmico. La segunda, es según la capacidad del dispositivo de funcionar frente a la direccionalidad de la demanda. En cuanto a esto, a los dispositivos que se activan solo cuando la demanda de desplazamiento viene en una dirección específica, se les llamará “Dispositivos Unidireccionales”, mientras que cuando el dispositivo se active sin importar la dirección de la demanda se les llamará “Dispositivos Multidireccionales”.

### 1.1.1 Clasificación según el tipo de Control

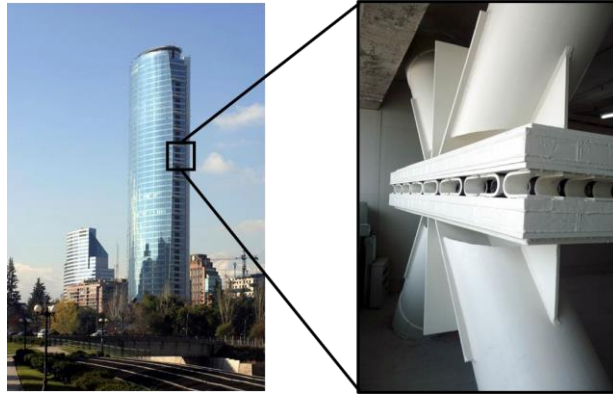
#### Dispositivos Pasivos

Estos sistemas de protección sísmica no requieren de una fuente de energía externa para funcionar, además de que, para proteger la estructura, modifican la respuesta de esta sin la necesidad de aplicar fuerzas externas ni de modificar las propiedades inherentes al dispositivo. Dentro de estos, existen los aisladores sísmicos y los disipadores de energía.

En los aisladores sísmicos el principal objetivo es aislar la estructura de los movimientos del suelo. Esto se logra generando una interfaz de baja rigidez entre el suelo y la estructura, permitiendo grandes desplazamientos sin que haya un traspaso elevado de fuerzas. Esto genera una independencia entre la estructura y el suelo, haciendo que el sistema estructural se comporte como un cuerpo rígido sin que haya desplazamientos relativos entre los componentes. Este comportamiento es deseable debido a que limita la generación de fuerzas internas en los elementos estructurales producto del terremoto. Por otro

lado, una consecuencia a la que se debe estar atento es que se generan grandes desplazamientos en la interfaz suelo-estructura, para lo cual se debe estar preparado y se debe realizar un buen diseño del sistema de aislación. Como ejemplo de estructuras en Chile con estos sistemas de protección está el Hospital San Carlos de Apoquindo mencionado anteriormente, y otro es el Viaducto El Salto (ex Marga Marga) en la Región de Valparaíso, el cual fue el primer viaducto chileno con contar con un sistema de aislación [5, 8].

En los disipadores de energía el principal objetivo es disipar la energía ingresada por el terremoto en forma de calor o en daño en los disipadores. El funcionamiento depende de los distintos tipos de disipadores que existen, pero en general, lo que hacen es disipar la energía producto de desplazamientos relativos que se encuentren en la estructura. Los distintos tipos de disipadores que existen son los friccionales, los viscosos y los histeréticos. El funcionamiento en los disipadores friccionales se produce cuando hay un desplazamiento relativo en la interfaz donde fueron colocados. Al existir este movimiento se genera una fuerza de roce en el sentido opuesto, la cual es proporcional a la fuerza normal en la interfaz. En los disipadores viscosos se genera una fuerza contraria al movimiento cuando hay un desplazamiento relativo, esta fuerza es proporcional a la velocidad relativa que exista. En estos dos casos, la energía se disipa en forma de calor. En el caso de los disipadores histeréticos (metálicos) el funcionamiento está dominado por el metal base, comenzando con una rigidez inicial, para luego dar paso a la fluencia y endurecimiento por deformación. Esto genera que la fuerza deje de aumentar con la misma rigidez inicial e incremente a una razón, que en general es, bastante menor que la rigidez elástica, mientras el desplazamiento relativo puede seguir creciendo. En este caso, la energía se transforma en deformaciones plásticas y daño. La inclusión de estos dispositivos genera una disminución en la magnitud de los desplazamientos relativos que exista entre los distintos componentes debido a la disipación de energía y al aumento de rigidez que genera la inclusión del sistema, esto genera que el daño y las fuerzas se concentren en estos elementos y se protegen los demás elementos estructurales. Además, se disminuye el tiempo de oscilación de la estructura, lo que genera una menor cantidad de ciclos de carga y descarga para los elementos estructurales, lo que ayuda considerablemente a evitar alguna falla por fatiga de bajo ciclaje. A modo de ejemplo, hay estructuras que cuentan con estos sistemas de protección sísmica en Chile. Dentro de estos, está el Edificio Titanium en Santiago, Chile, que cuenta con disipadores histeréticos con forma de U (U-Shaped). En la Figura 7 se puede ver que los elementos están dispuestos en el centro de diagonales, las cuales se repiten cada 3 pisos a lo largo de la altura del edificio. Otro ejemplo es el Puente Amolanas ubicado en el norte de Santiago, el cual cuenta con disipadores viscosos ubicados en la interfaz entre los estribos y el tablero del puente [6, 8].



**Figura 7. Edificio Titanium y los dispositivos de energía tipo U-Shaped que posee**

### Dispositivos Activos

Estos sistemas de protección sísmica se diferencian de los otros en que estos modifican la respuesta sísmica de la estructura a través del monitoreo del comportamiento en tiempo real y la aplicación de fuerzas externas que permitan disminuir la respuesta del sistema. Estos dispositivos se componen por sensores de movimiento, sistemas de control y procesamiento de datos, y actuadores dinámicos, además de contar con una fuente de energía para el funcionamiento de estos componentes. El actuar de los sistemas activos se resume de la siguiente forma: las excitaciones externas y la respuesta de la estructura son medidas mediante sensores, principalmente acelerómetros, instalados en puntos estratégicos de la estructura. Un algoritmo de control procesa la información obtenida por los instrumentos y determina las fuerzas necesarias que deben aplicar los actuadores para estabilizar la estructura. Una ventaja que posee este tipo de dispositivo es que permite ir modificando el comportamiento de la estructura en tiempo real durante el sismo, lo que genera un mejor comportamiento de la estructura. Sin embargo, una desventaja de estos dispositivos es que necesitan una alimentación de energía constante para hacer funcionar todas sus componentes. A modo de ejemplo, una estructura que posee este sistema de protección es el Kyobayashi Center en Tokyo, Japón, la cual posee dos AMDs para reducir los movimientos transversales y torsionales del edificio [9].

### Dispositivos Híbridos

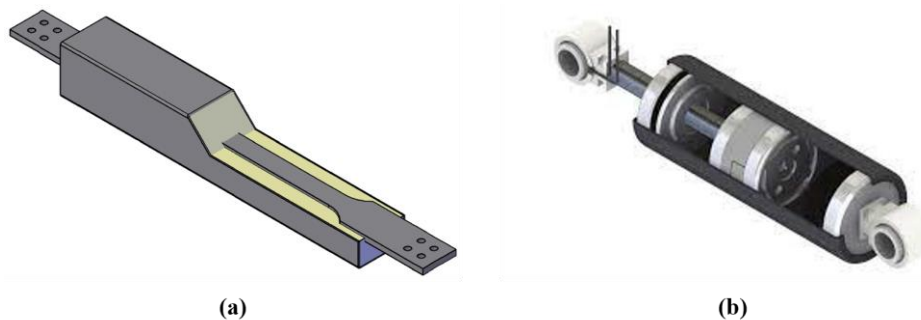
Estos sistemas de protección sísmica se diferencian de los otros en que los híbridos monitorean la respuesta de la estructura ante el terremoto y, en base a esta, se va modificando las propiedades mecánicas del dispositivo para que la estructura genere una mejor respuesta. La modificación se logra mediante un sistema de monitoreo y un dispositivo que permite cambiar sus propiedades en base a una señal eléctrica. Algunos modelos son los amortiguadores de masa semiactivos, los dispositivos de fricción con fricción controlable, y los disipadores con fluidos electro- o magneto-reológicos. La principal ventaja de este tipo de dispositivos es que no requieren de una fuente de energía tan potente como los sistemas activos. Pueden ser alimentados con una batería, lo que es ideal en caso de que el

mismo terremoto haga que falle la principal fuente de alimentación de energía de una estructura. Estos sistemas han sido ampliamente utilizados en edificios y puentes en Japón [10].

### 1.1.2 Clasificación según la Dirección de Respuesta

#### Unidireccional

Como se mencionó antes, estos dispositivos funcionan cuando la demanda de desplazamiento impuesta tiene una dirección específica. Esta dirección viene determinada por la geometría y el mecanismo del dispositivo, donde las restricciones de movimiento permiten un desplazamiento relativo en determinada dirección, pero lo impiden en cualquier otra. En caso de que el desplazamiento no vaya en tal dirección, entonces la componente que va en la dirección del dispositivo es la que ejercerá algún efecto. Esto se debe principalmente a que, en general, estos dispositivos poseen rótulas, o están diseñados para tener una baja resistencia ante un desplazamiento fuera de esta dirección, o, los dispositivos son dispuestos de forma en que se sabe que el desplazamiento solo ocurrirá en una dirección. Algunos ejemplos de disipadores unidireccionales son los Buckling Restrained Braces (BRB) o los amortiguadores magneto-reológicos, los cuales se ilustran en la Figura 8.



**Figura 8. Dispositivos unidireccionales (a) Buckling Restrained Braces (BRB) (b) Amortiguador magneto-reológico**

A continuación, dado que este trabajo trata sobre disipadores de energía en base a la fluencia de un material, se hablará del estado del arte acerca de este tipo de disipadores. De la revisión de la literatura se encontraron varios estudios acerca de este tipo de dispositivos. Se mencionan solamente los necesarios para cubrir la variedad de dispositivos que existen. Luego, en el siguiente subcapítulo, se revisa en detalle la literatura concerniente a los dispositivos U-Shaped.

En 1972 Kelly et al [11] propuso introducir en las estructuras dispositivos que permitieran disipar la energía cinética introducida por el terremoto. En este estudio se mencionaron por primera vez los dispositivos U-Shaped (Figura 9.a) como tal, junto con otros dispositivos que lograban disipar energía en base a deformación por torsión y flexión.

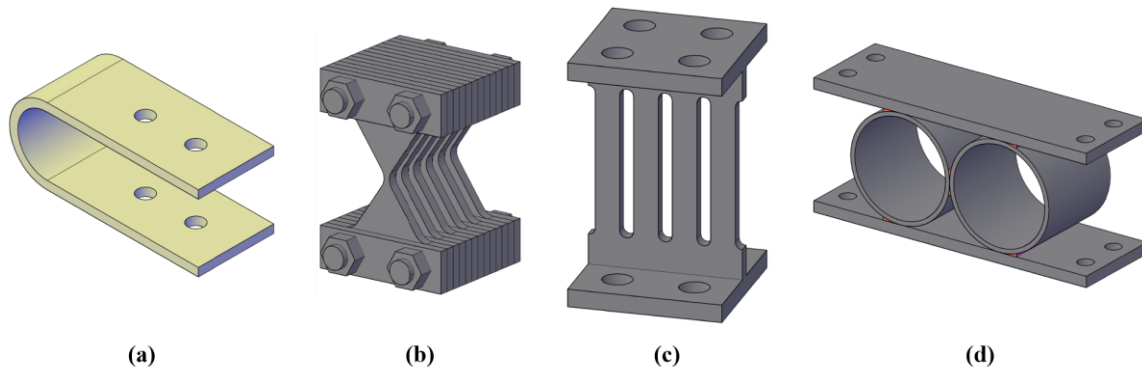
Whittaker 1989 [12] llevó a cabo estudios sobre los elementos Added Damping and Stiffness (ADAS), los cuales son elementos formados por placas metálicas en forma de X (Figura 9b). Estos elementos, al

ser sometidos a una demanda de desplazamiento, desarrollan esfuerzos de flexión, por lo que disipan energía de esta manera luego de fluir. La principal característica es que la forma de X optimiza el material utilizado en el elemento, ya que tiene la misma forma que el diagrama de momento del elemento. Luego, como una evolución del dispositivo ADAS, Tsai et al en 1993 [13] desarrollaron los elementos Triangular Added Damping and Stiffness (TADAS), los cuales poseen la característica de ser triangulares en vez de la forma de X de los ADAS. Debido a la forma triangular, uno de los extremos del elemento posee una conexión rotulada mientras la otra sigue estando empotrada. En este estudio se corrige también la pérdida de rigidez debido a la conexión por pernos de los dispositivos ADAS, ya que en el TADAS la conexión es soldada.

En el año 2008, Chan y Albermani [14] desarrollaron el dispositivo Steel Slit Damper (SSD), el cual tiene como característica ser una placa de acero con agujeros elípticos para formar una rejilla (Figura 9.c). El concepto es bastante similar al de ADAS o TADAS, solo que, en vez de ocupar varias placas de acero, se utiliza solo una, cargada en una dirección paralela al plano que la contiene. De esta forma se pueden abaratar costos sin perder las propiedades de rigidez, fuerza y capacidad de disipación de energía. Luego, el año 2015, Lee et al [15] realizó una optimización en la forma del dispositivo SSD, con el fin de mejorar el desempeño cíclico y de fatiga.

El año 2010 Maleki y Bagheri [16] investigaron acerca de la aplicabilidad de tubos de acero como disipadores histeréticos. En dicho estudio se llevaron a cabo ensayos experimentales donde los tubos fueron sometidos a deformaciones por corte. Las probetas utilizadas consistieron en tubos de acero sin relleno y tubos de acero rellenos con hormigón. Además, se realizaron modelos de elementos finitos en el programa ANSYS para simular el comportamiento a corte de estos elementos. Luego, siguiendo con este tipo de disipador, el 2013 Maleki y Mahjoubi [17] propusieron el Dual Pipe Damper (DPD), que consiste en dos tubos adyacentes soldados en el punto de contacto (Figura 9.d). El dispositivo agrega fuerza y rigidez a las estructuras además de capacidad de disipación de energía. Además, este disipador de energía logra aumentar su rigidez cuando se llega a desplazamientos de gran amplitud, lo que resulta útil cuando hay un terremoto considerado severo.

El año 2018 Aghlara y Tahir [18] desarrollaron el Bar-Fused Damper (BFD) para usarse en estructuras de marcos. El dispositivo se compone de distintas piezas metálicas, como perfiles canal, placas y barras de acero. La característica principal de este disipador es que disipa energía en base a la flexión de barras de acero de sección circular, que, además, son de fácil reemplazo, por lo que actúan como fusibles estructurales.



**Figura 9. Amortiguadores histéricos (a) U-Shaped (b) ADAS (c) SSD (d) DPD**

### Multidireccional

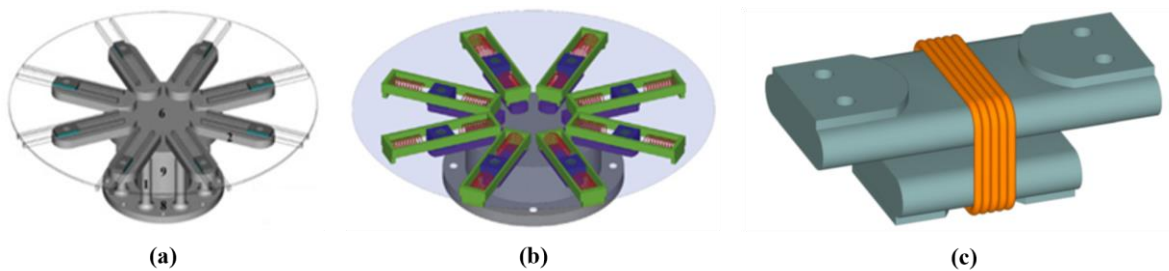
Ahora, por el lado de los dispositivos multidireccionales, recordando que estos se caracterizan por tener la capacidad de funcionar sin importar la dirección en la que se imponga el desplazamiento. En base a la revisión de la literatura, el primer artículo encontrado es el de una patente de Scalfati [19], donde propone un sistema de disipación de energía en base a elementos metálicos con forma de C, pensado para las conexiones de estructuras ubicadas en zonas de alta sismicidad. Este se componía de un conjunto de elementos U-Shaped restringidos por dos planos horizontales donde cada elemento estaba unido hacia una placa con una conexión rígida, y hacia la otra con una conexión rotulada, con el eje de giro en posición vertical. Esta conexión rotulada le permitía a uno de los brazos del elemento rotar y adquirir un grado de inclinación. Si bien esta patente menciona los aspectos teóricos con respecto a la disipación de energía involucrada y la mejora que podía generar en las estructuras instaladas, no se presentan datos experimentales ni cantidades de energía disipada por el sistema.

Posteriormente, Ene et al. [20] investigaron acerca de la capacidad de deformación bidireccional inelástica de los elementos U-Shaped para estructuras con base aislada. Este estudio permitió analizar de forma más detallada cuál es el comportamiento ante demandas bidireccionales de sistemas basados en elementos U-Shaped. Más adelante en el texto se hablará con más detalle.

El mismo año, Milani et al. [21] desarrollaron un nuevo sistema de protección sísmica multidireccional, el MTDH (Multi-directional Torsional Hysteretic Damper) mostrado en la Figura 10.a. En este caso, la disipación se logra a través de la fluencia del acero producto de la torsión de cilindros metálicos. Este arreglo simétrico de cilindros de acero permite que la estructura pueda experimentar movimientos planares debido al terremoto mientras los cilindros experimentan rotaciones en su propio eje. En los estudios analíticos se pudo identificar que este sistema poseía una buena curva de histéresis para demandas de desplazamiento multidireccionales y buena capacidad de disipación de energía.

Posteriormente, Guo et al. [22] realizaron estudios acerca de la influencia de un sistema de restricción de movimiento en base a múltiples resortes dispuestos en un arreglo radial (MLSR), mostrado en la

Figura 10.b. Estos resortes contaban con un espaciamiento inicial que permitía cierto grado de desplazamiento sin que actué el resorte. Este sistema fue incluido numéricamente en modelos no lineales de un puente curvo, sometido a registros sísmicos mediante un análisis tiempo-historia. Se compararon los resultados del puente con y sin el dissipador, donde los resultados corresponden a curvas fuerza-deformación de componentes, el movimiento relativo de las vigas y la máxima curvatura de las cepas. Los resultados demostraron que la aplicación del MLSR prevenía los efectos del impacto entre el tablero y los estribos, y la caída del tablero, además de mitigar los daños en las cepas.



**Figura 10. Dispositivos Multidireccionales (a) Multi-directional Torsional Hysteretic Damper (MTDH) (b) Multi-level Spring Restrainer (MLSR) (c) Multidirectional Cable Restrainer (MDCR)**

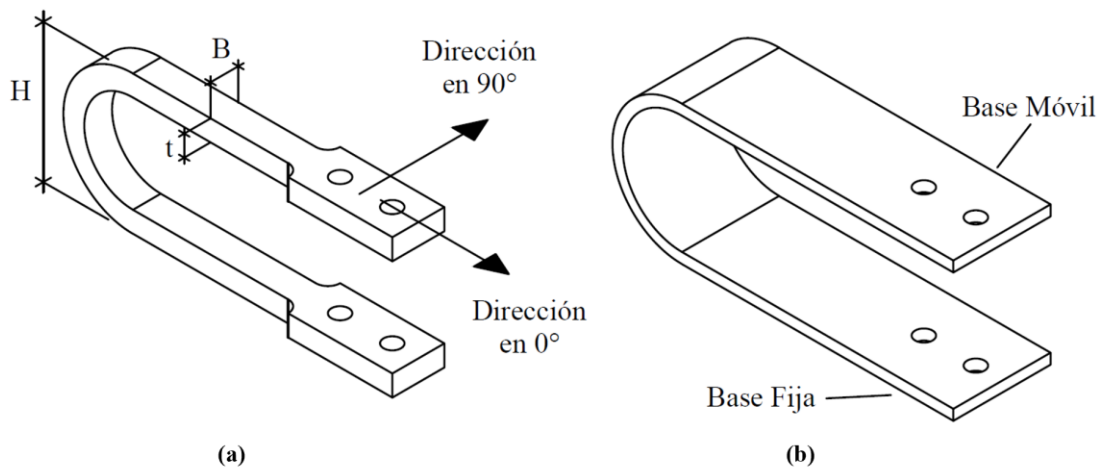
Luego, Guo et al. [23] realizaron estudios acerca de un nuevo sistema de protección sísmica, un sistema de restricción de movimiento en base a cables (MDCR), mostrado en la Figura 10.c. Este sistema consiste en envolver las dos partes conectadas con un cierto número de cables, los cuales pueden actuar en cualquiera de las dos direcciones. El estudio en cuestión consistió en evaluar la influencia de este sistema de protección en las curvas de fragilidad para distintos componentes de un puente.

## 1.2 DISPOSITIVOS U-SHAPED

La principal característica de estos elementos es que poseen una forma de “U” y pueden deformarse de forma tal que por un lado la parte curva se vuelve plana mientras que en el otro la parte plana se vuelve curva, generando deformaciones por flexión que logran disipar energía. Para visualizarlo de mejor manera, en la Figura 11 se presenta la denominación de las direcciones ortogonales en la que son cargados estos elementos. Además, en la Figura se presentan los parámetros  $B$ ,  $t$  y  $H$  que corresponden al ancho, espesor y altura del elemento.

Estos dissipadores han sido ampliamente utilizados en diversos sistemas de control sísmico y en diversas estructuras. Suzuki et al. [24] desarrollaron miembros UD como componentes de un sistema de aislación sísmica y reportaron que los UD tienen características histeréticas estables bajo diferentes direcciones de carga. Tagawa et al. [25] propusieron otra disposición para los UD donde se insertan en un marco de un edificio en conjunto con miembros de riostras que solo exhiben deformaciones en tensión. En general, sobre estos elementos se ha investigado sobre el comportamiento histerético, la resistencia a la fatiga de

bajo ciclaje, el comportamiento bajo una demanda bidireccional, entre otras características. Sin embargo, la mayoría de estos estudios han sido efectuados para los disipadores fabricados por la compañía Nippon Steel, los cuales tienen una relación  $B/t$  cercana a 1, y donde, además, no siempre está restringido el movimiento vertical. Esto es importante, ya que cuando la razón  $B/t$  crece, y además se restringe el movimiento vertical, el comportamiento puede ser distinto. Como ejemplo, Deng et al. [26] en un estudio concluyó que al restringir el movimiento vertical se mejoraba la vida a fatiga, ya que la distribución de esfuerzos y deformaciones se distribuía de mejor manera en todo el dispositivo. Además, en los experimentos de Wang et al. [27] se evidenció que cuando estos disipadores se cargaban en 90 grados se producían más deformaciones por torsión que por flexión en las partes rectas del elemento. Es por todo eso, que a continuación se dividirá la revisión de literatura entre la que corresponde a elementos de Nippon Steel y los denominados tipo Crawler (llamados así a partir del artículo de Deng et al. [26]). Además, en la Figura 11 se puede ver la diferencia entre la razón  $B/t$ .



**Figura 11. Disipadores U-Shaped (a) Nippon Steel (b) Tipo Crawler**

Sobre la procedencia de estas investigaciones, el principal avance está dado por los investigadores de Asia. Principalmente por Japón, pero también hay estudios de China, Corea, Turquía y Nueva Zelanda. Es entendible que el avance se produzca en estas zonas dado que son países afectados a terremotos. Además, la razón de que en Japón se realicen la mayoría de los estudios es porque la empresa de donde se obtienen los disipadores de energía más comunes, Nippon Steel, es una maestranza ubicada en Japón.

### 1.2.1 Elementos U-Shaped tipo Crawler

En la línea de investigación de los disipadores tipo crawler, uno de los primeros estudios es el de Kato et al. [28], denominado el disipador J-shaped, donde se realizaron simulaciones en un programa de elementos finitos para predecir el comportamiento de los disipadores bajo solicitaciones cíclicas en la dirección del espécimen. De los resultados obtenidos se pudo establecer que el modelo de elementos

finitos, con los datos geométricos y del material es capaz de predecir bastante bien las curvas de histéresis del disipador.

Luego Kato y Kim [29] realizaron un estudio paramétrico de las propiedades mecánicas del disipador J-shaped mediante modelos de elementos finitos. Para la modelación se utilizó un material con una curva esfuerzo-deformación tri-lineal. Dentro de las conclusiones determinaron que el comportamiento está influenciado por su espesor, radio interno y el esfuerzo de fluencia del material. También se lograron desarrollar fórmulas que permiten determinar la rigidez elástica, fuerza de fluencia y razón de endurecimiento tomando en cuenta los efectos de endurecimiento por deformación.

Después, Deng et al. [26] propusieron el amortiguador tipo crawler, pensando en desarrollarlo para ocuparlo en puentes. Como se mencionó antes, este se caracteriza por los planos horizontales que restringen la deformación. En este estudio se realizó una campaña experimental, donde dados los resultados de los strain gauges, se pudo ver que al controlar el campo de desplazamientos los esfuerzos se distribuyeron de mejor manera en todo el disipador, evitando las concentraciones que se producían en los disipadores UD y mejorando así el desempeño ante fatiga de bajo ciclaje. Dentro del estudio también se realizó un modelo de elementos finitos en el programa ABAQUS, usando un material que considera el endurecimiento cinemático e isotrópico del acero. Los resultados indicaron que el modelo era efectivo para predecir el comportamiento de la curva de histéresis, por lo que se podrían hacer más estudios usando modelos de elementos finitos. También se encontró una fórmula que permite estimar la fuerza última del disipador considerando los parámetros de endurecimiento del material, además de una correlación que permite estimar la vida para fatiga de bajo ciclaje. Todo esto solo para un desplazamiento en el mismo eje del disipador.

Luego, Baird et al. [30] realizaron estudios experimentales y numéricos acerca de los disipadores U-shaped restringidos, principalmente para estimar la rigidez antes y después de la fluencia. Para eso se realizaron ensayos experimentales y modelos de elementos finitos en ABAQUS. Por último, se derivaron ecuaciones que permiten estimar la rigidez en base a los parámetros geométricos del disipador.

Finalmente, Wang et al. [27] propusieron un aislador sísmico con capacidad de recentreo en base a elementos U-Shaped hecho con SMA (Shape memory alloy). Para este dispositivo se mezclaron elementos UD de alta razón B/t hechos de SMA junto con UD de razón B/t cercana a 1 hechos de acero. En este estudio se evidenció que las propiedades del SMA permitieron reducir los desplazamientos residuales luego de un terremoto, lo que ayuda a mejorar la resiliencia de la estructura.

### 1.2.2 Elementos U-Shaped de Nippon Steel

Dentro del estado del estado de los UD de Nippon Steel, luego de la investigación de Suzuki et al. [24], Jiao et al. [31] realizaron estudios experimentales para determinar el comportamiento a la fatiga de bajo ciclaje y el comportamiento de las curvas de histéresis de los disipadores utilizados en estructuras con

aislación sísmica. En base a los resultados de deformación de los disipadores, bajo un desplazamiento en dirección del eje del disipador ( $0^\circ$ ), se pudo observar que las deformaciones y esfuerzos se concentraban en las partes rectas del espécimen. Además, se producen desplazamientos verticales considerables. Cuando se cargan en  $90^\circ$  se puede ver que los esfuerzos se distribuyen a lo largo de todo el elemento en forma de torsión y tensión. En consecuencia, provoca que la vida a la fatiga de bajo ciclaje sea menor para el caso de la carga en  $0^\circ$ . En base a estos resultados, establecieron ecuaciones tipo Mason-Coffin [31] para estimar la vida de fatiga en función del ángulo de corte que soportan los disipadores.

Luego, Ene et al. [20] realizaron estudios acerca de la capacidad de deformación bidireccional inelástica de los disipadores UD para estructuras con base aislada. Los especímenes utilizados para los ensayos realizados constaban de dos disipadores UD posicionados de manera ortogonal. Estos fueron sometidos a historias de carga con trayectorias bidireccionales, con las cuales se pudo ver que los disipadores sufrían deformaciones fuera del plano producto de la bidireccionalidad de la trayectoria. En base a esto, se establecieron dos parámetros, uno es el ángulo que abarca la trayectoria con respecto al centro del dispositivo mientras que el otro es el radio de la trayectoria con respecto al centro del dispositivo. Luego, se estableció una relación entre estos para determinar el momento en que uno de los elementos se deformaba lo suficiente para chocar con una parte de la estructura. En base a esto se pudo estimar una relación entre el ángulo de avance con respecto al centro de la sollicitación y el radio de amplitud de esta trayectoria, al momento de que estas deformaciones ocasionaban que el elemento chocaba con la estructura. Con los datos de fractura también se pudo establecer un estimador del daño acumulado en base a la cantidad de ciclos a los que se somete el espécimen. También se definió un índice que considera la deformación fuera del plano del disipador, que reduce la cantidad de daño que puede acumular. Finalmente, se estableció una curva entre estos dos índices que indica el daño que puede acumular un disipador en base al desplazamiento horizontal que sufra.

A continuación, Ene et al. [32] investigaron acerca de este tipo de disipadores sometidos a excitaciones biaxiales. Para esto, los autores realizaron estudios analíticos representando el disipador como un conjunto de resortes no lineales en distintas direcciones. Además, se definieron estados límites para la relación entre los parámetros, establecido en el estudio anterior [20], para la curva de interacción desarrollada por los mismos investigadores el año anterior. En conjunto con lo anterior se pudieron establecer curvas de fragilidad para los distintos estados de daño.

## 2. ENSAYOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se presenta el programa experimental desarrollado para caracterizar el comportamiento de los elementos U-Shaped. En este contexto, se realizaron ensayos donde se someten las probetas a demandas de desplazamiento en una dirección paralela al espécimen (dirección a  $0^\circ$ ), y otros con una demanda perpendicular al espécimen (dirección a  $90^\circ$ ). De estos ensayos se obtuvo curvas fuerza-desplazamiento junto con otras propiedades de los elementos U-Shaped.

### 2.1 PROGRAMA EXPERIMENTAL

En esta sección se describen las dimensiones de las probetas a ensayar, el protocolo de carga, los equipos e instrumentos y las variables a medir.

#### 2.1.1 Descripción general de los ensayos

Para la realización del ensayo se utilizó una máquina de ensayo MTS 810 unidireccional, en la cual se instaló una estructura de acero que contiene a los dispositivos U-Shaped. En la Figura 12 se puede ver como luce este sistema en el laboratorio junto con un esquema que indica las partes de las que se compone. Este sistema está adaptado para que se puedan instalar los elementos en 3 orientaciones distintas ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ). Este sistema funciona de forma que las mordazas de la prensa MTS agarren las placas soldadas a las piezas del sistema. De esta forma el cajón inferior comienza a desplazarse verticalmente mientras que el marco superior se mantiene estático, generando un desplazamiento

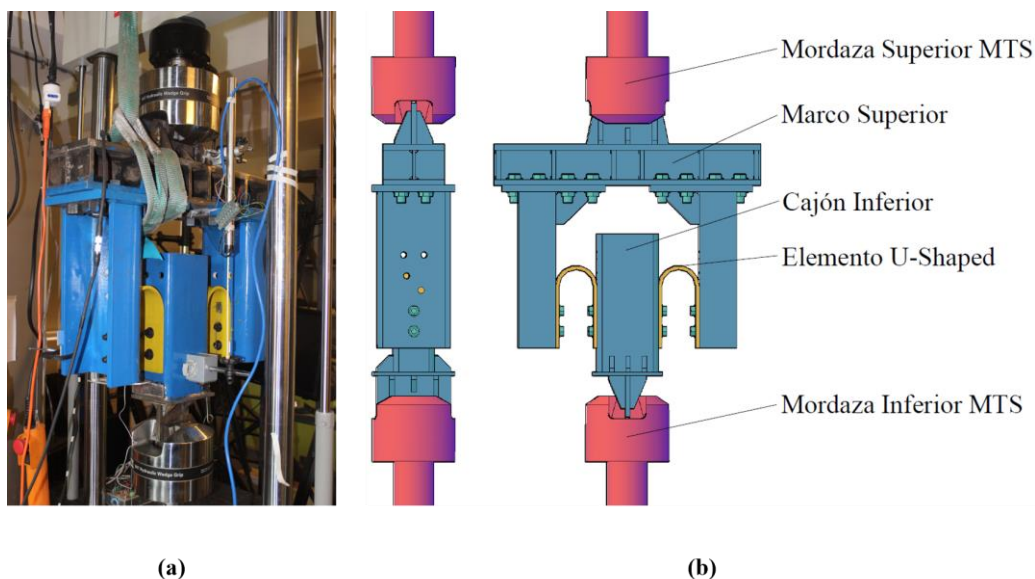


Figura 12. Sistema de carga (a) en el laboratorio (b) esquemático

relativo entre las bases de los elementos UD. Este sistema fue pensado de forma que la fuerza de reacción ejercida en la prensa fuera paralela al desplazamiento. Además, dado que los elementos U-Shaped al deformarse tienden a abrirse, generan una fuerza fuera del plano, por lo que se decidió diseñar un sistema simétrico con tal de que las fuerzas fuera del plano se anulen. Así, en los ensayos de 0° se utilizaron 2 elementos UD, mientras que en los de 90° se utilizaron 4.

### 2.1.2 Matriz de ensayos

En primer lugar, se definen las variables a estudiar en base al estado del arte presentado en el capítulo anterior. En este contexto, las variables en análisis son la altura del elemento (H), el ancho (B), el espesor (t), y el tipo de acero utilizado. De manera adicional, se realizan ensayos donde se hizo variar la dirección de la demanda de desplazamientos. Luego, se definieron dimensiones tales de que la fuerza generada en el ensayo no supere la capacidad máxima del equipo utilizado, la cual es de 10 [Tonf]. Es por esto, que en el caso del ensayo a 0° la fuerza límite es la mitad de la capacidad del equipo, y en el caso del ensayo a 90° la fuerza límite es un cuarto de la capacidad del equipo. A partir de dichas consideraciones, la matriz de ensayos es la presentada en la Tabla 1. La nomenclatura utilizada es la siguiente.

$$A_{XXX} - \{t \text{ o } B \text{ o } H\} - \{0G \text{ o } 90G\}$$

Donde, A representa acero al carbono, XXX son caracteres numéricos que representan el esfuerzo de fluencia nominal del acero. En algunos casos se utiliza la letra t, B o H, para representar el valor del espesor, ancho o altura utilizada, respectivamente. Finalmente, para distinguir la dirección de carga se emplea la designación “0G” o “90G”. En total, se realizaron 46 ensayos, ya que de cada espécimen se fabricó más de un par de probetas, con el fin de que sean sometidos a distintos protocolos de carga.

**Tabla 1. Matriz de ensayos**

Espécimen	Tipo de Acero	# Colada	H [mm]	B [mm]	t [mm]	Cantidad de ensayos
A572-0G	A572 Gr 50	1	100	75	8	4
A572-t10		2	100	75	10	4
A572-t12		3	100	75	12	4
A572-H75		1	75	75	8	4
A572-H125		1	125	75	8	4
A572-B100		1	100	100	8	4
A572-B150		1	100	150	8	4
A36-0G	A36	4	100	75	8	4
A36-H125		4	125	75	8	4
A36-t10		5	100	75	10	4
A36-B40-0G		6	120	40	5	3
A36-B40-90G		6	120	40	5	3
					TOTAL	46

Los especímenes fueron manufacturados por la empresa AMCS ubicada en la comuna de Viña del Mar. Los aceros con los que se realizaron las probetas fueron distintos dependiendo del espesor utilizado, es decir, las probetas A5720G y A572t10 son de acero A572, pero no provienen de la misma colada, por lo que las propiedades que poseen cambian ligeramente. En la Tabla 1 se presenta la colada asociada a cada espécimen. Las propiedades de las coladas fueron provistas por la maestranza junto con la entrega de los especímenes. En la Tabla 2 se presentan las propiedades de esfuerzo de fluencia y esfuerzo último para cada colada. Los certificados no presentaban el módulo de elasticidad, por lo que en cálculos posteriores se utilizó un módulo de elasticidad nominal igual a 200,000 [MPa].

**Tabla 2. Esfuerzo de fluencia y último para los distintos aceros**

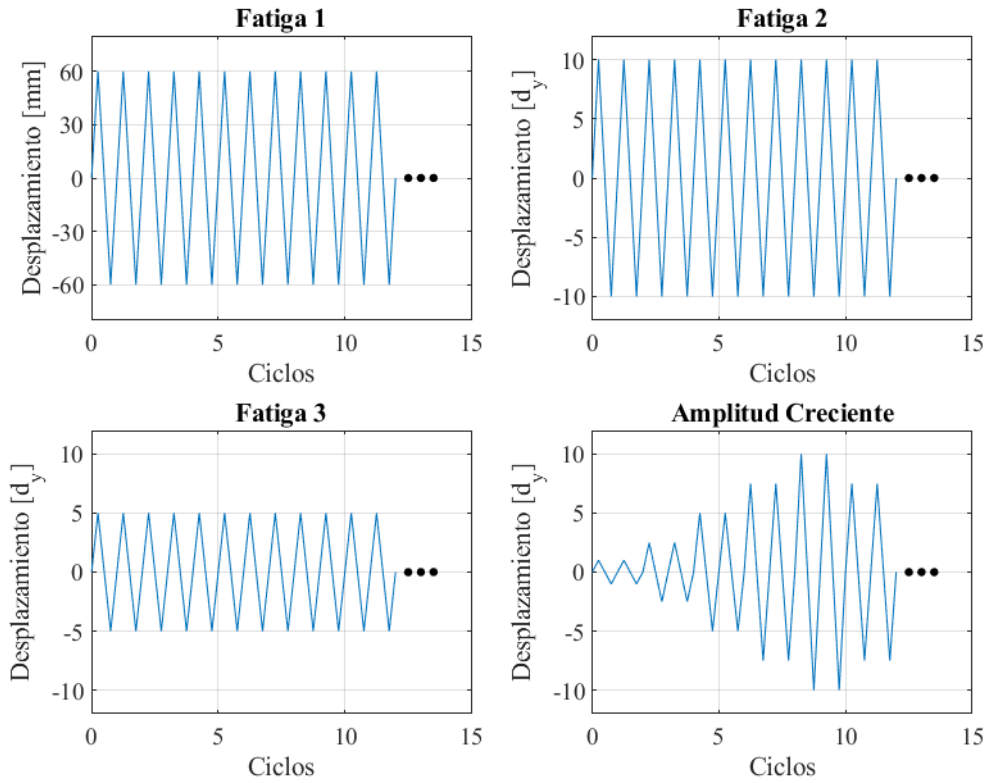
# Colada	$f_y$ [MPa]	$f_u$ [MPa]
1	415	565
3	356	541
2	388	553
4	288	433
5	322	479
6	260	420

### 2.1.3 Protocolo de carga

En esta sección se detallan los protocolos de carga utilizados en los ensayos. Se definieron cuatro protocolos de carga para cada espécimen especificado en la Tabla 1. Una de las razones para hacer varios protocolos de carga para especímenes de las mismas dimensiones era obtener más datos relacionados con la vida a fatiga de los elementos U-Shaped. La segunda razón fue para ver si es que estos disipadores cumplen con el criterio de cualificación de la AISC [33] para funcionar como dispositivo de disipación de energía. El primer protocolo se denominó Fatiga 1 (Fati1), el cual consistió en ciclos de amplitud constante hasta la falla por fatiga del espécimen. La amplitud seleccionada para este ensayo fue de 60 [mm], la cual corresponde al máximo desplazamiento que se podía aplicar sin que fuera perjudicial para el ensayo o el equipamiento. El segundo y tercer protocolo se denominaron Fatiga 2 (Fati2) y Fatiga 3 (Fati3), los cuales también constan de ciclos de amplitud constante hasta la falla. La amplitud de estos ensayos corresponde a 10 y 5 veces, respectivamente, el desplazamiento de fluencia ( $d_y$ ) de la probeta en cuestión. Cabe mencionar que el desplazamiento de fluencia utilizado para la definición del protocolo fue una estimación con la ecuación (1) planteada por Baird et al. [30]. Finalmente, el cuarto ensayo corresponde al de Amplitud Creciente (AmpCrec), el cual está basado en el protocolo de carga para la cualificación de BRBs de la AISC [33]. En este caso, se definió el desplazamiento de diseño como 5 veces el desplazamiento de fluencia, como se muestra en la Figura 13. Como se mencionó antes, se decidió usar este protocolo por su aplicación a un sistema de disipación de energía, los cuales son los

BRBs, y la definición clara de cuando estos son aceptados para usarse en una estructura metálica, que es cuando se superan 200 veces la deformación de fluencia ( $d_y$ ) en las incursiones del rango plástico.

$$d_y = \frac{27\pi F_y D^3}{16Ebt^3} \quad (1)$$



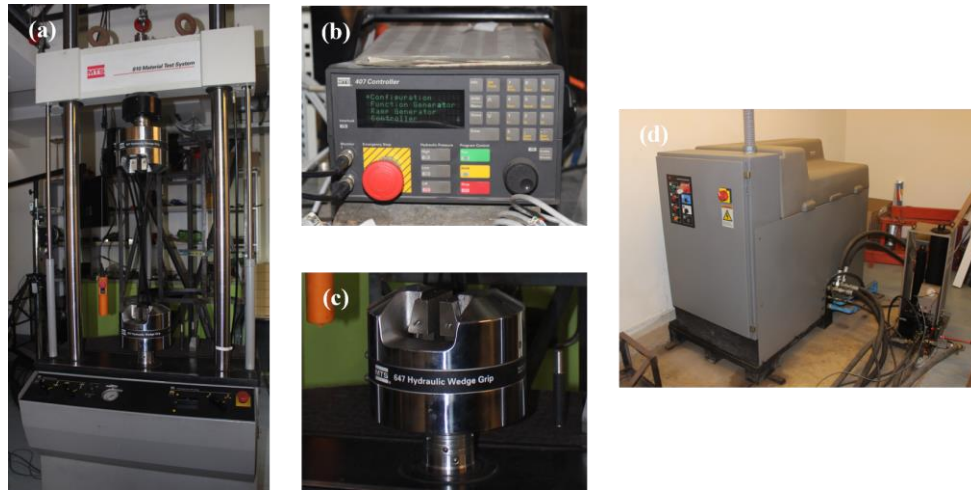
**Figura 13. Protocolos de carga utilizados**

Finalmente, para mejorar el entendimiento del lector, la denominación de los ensayos se compone de la nomenclatura para la probeta, más el protocolo de carga utilizado, que puede ser “Fati1”, “Fati2”, “Fati3” o “AmpCrec”, donde cada uno corresponde a los protocolos mencionados anteriormente.

#### 2.1.4 Equipamiento, Instrumentación y Mediciones

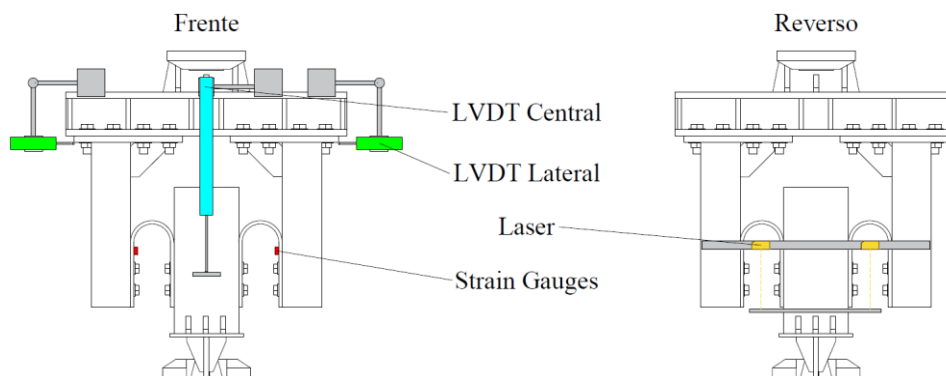
En esta sección se presentan las especificaciones de los equipos e instrumentos utilizados para llevar a cabo los ensayos y la toma de datos correspondiente. Para llevar a cabo los ensayos se utilizó una máquina de ensayos MTS de la serie 810, modelo 318.10, la cual se muestra en la Figura 14(a). Algunas de las características de este equipo es que posee una celda de carga que permite registrar la fuerza hasta 100 kN, y tiene integrado un sensor LVDT que permite registrar el desplazamiento de la mordaza inferior con un rango de  $\pm 80$  mm. Este equipo se utilizó con las mordazas hidráulicas modelo 647.10 para la sujeción del sistema de carga, las que se muestran en la Figura 14(c). Para manejar este equipo, se utilizó un controlador MTS modelo 410, el cual se muestra en la Figura 14(b). La máquina de ensayos

MTS 810 es alimentada por una bomba hidráulica MTS modelo 505.30, la que se presenta en la Figura 14(d). Esta bomba tiene una capacidad para llegar a una presión de 3,000 psi. Sin embargo, la presión máxima utilizada fue de 2,500 psi. Estos equipos están ubicados en LEMCO (Laboratorio de Ensaye de Materiales y Control de Obras), pertenecientes al Departamento de Obras Civiles de la Universidad Técnica Federico Santa María en la Casa Central, Valparaíso.



**Figura 14. Equipo MTS (a) Prensa hidráulica (b) Controlador (c) Mordaza (d) Bomba hidráulica**

En estos ensayos los parámetros a medir son el desplazamiento relativo entre las bases de cada probeta, la fuerza de reacción que generó cada espécimen, y la deformación alcanzada en un punto específico del elemento. Además, dado el sistema utilizado para ensayar los especímenes, se midieron desplazamientos relativos entre los perfiles canal y el perfil superior para asegurar que no existieran deslizamientos. En la Figura 15 se puede ver la disposición de la instrumentación utilizada.



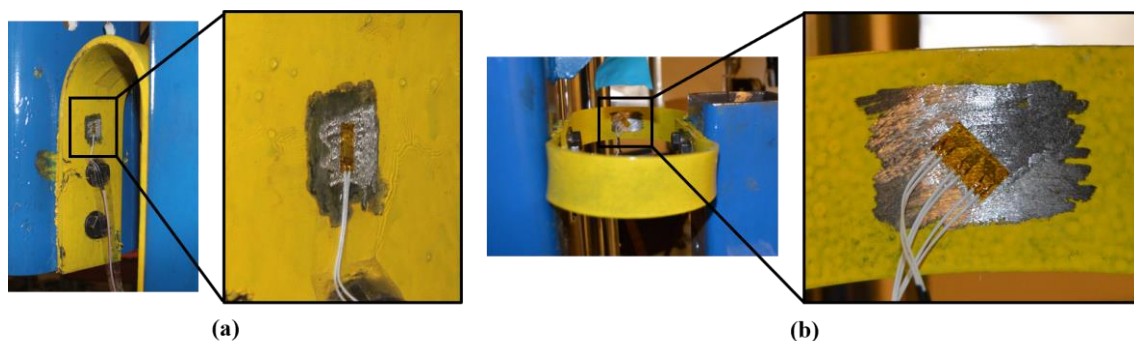
**Figura 15. Disposición de la instrumentación utilizada**

El desplazamiento relativo entre los extremos del dispositivo se midió con un sensor LVDT de rango  $\pm 100$  mm. Este fue instalado entre la parte superior e inferior del marco, con tal de medir de manera directa el desplazamiento relativo entre las bases del dissipador. Este parámetro también quedó capturado con el LVDT incluido en la prensa hidráulica. Sin embargo, se decidió agregar un LVDT externo para evitar influencias debido a la deformación del sistema o a un posible deslizamiento de las mordazas.

Además, para mayor redundancia y control, se instalaron 2 sensores láser que permiten medir desplazamiento relativo, los cuales miden la distancia a una altura que coincide con el centro de los elementos U-Shaped. Se decidió instalar estos sensores láser para verificar que el desplazamiento es totalmente traslacional y que no haya algún tipo de rotación afectando el ensayo.

El otro parámetro igual de importante extraído de estos ensayos es la fuerza de reacción generada por los disipadores. Este parámetro fue medido por la celda de carga de la prensa hidráulica, que se encuentra en la parte superior, entre la mordaza superior y el yugo del equipo MTS.

Otro parámetro medido fue la deformación unitaria en un punto específico del U-Shaped. Este se midió gracias a la instalación de strain gauges. Para el caso de los ensayos a  $0^\circ$ , se utilizaron strain gauges uniaxiales marca Omega, los cuales se ubicaron en el punto entre el fin de la parte recta y el inicio de la parte curva del espécimen. Se eligió este lugar porque es la zona donde se espera que se produzca la fluencia debido al mecanismo de deformación del elemento. En el caso de los ensayos a  $90^\circ$ , se instaló un strain gauge tipo roseta en el centro de la parte curva del espécimen. Se eligió este lugar porque se esperaba que en este punto se produjera la fluencia debido al momento torsor según el mecanismo de deformación esperado. En la Figura 16 se presenta la ubicación de los strain gauges para los distintos ensayos.



**Figura 16. Ubicación de strain gauges en ensayos a (a)  $0^\circ$  y (b)  $90^\circ$**

Finalmente, otro parámetro que fue considerado por tema de seguridad fue el desplazamiento relativo horizontal entre la viga superior y los perfiles canal laterales. Esto se midió debido a la incertidumbre de que la fuerza fuera del plano de los disipadores pudiera abrir el marco y causar daño en el equipamiento. Este desplazamiento relativo horizontal se midió con dos sensores LVDT (uno por lado) de  $\pm 5$  mm ubicados en los extremos de la viga superior como se muestra en la Figura 15.

Con el objetivo de registrar los datos medidos por cada uno de los sensores, se utilizó un adquirente de datos (DAQ – Data acquisition system) de la marca National Instruments, en conjunto con el programa LabVIEW. Este programa permite transformar los valores de corriente y voltaje que llegan al adquirente de datos y los transforma a los valores de los parámetros que uno está interesado en medir. Este programa también permite visualizar los datos y generar gráficos en tiempo real, lo cual facilita la comprensión

de los resultados obtenidos durante y al finalizar el ensayo. En la Figura 17 se presenta una de las pestañas del programa LabVIEW, donde se puede apreciar que era posible observar en tiempo real la curva fuerza-desplazamiento, y el registro de desplazamiento y fuerza a través del tiempo. Cabe mencionar que toda la instrumentación y la ejecución del programa LabVIEW no hubiera sido posible sin la colaboración del Sr. Paul Gálvez, encargado del área de instrumentación del laboratorio LEMCO.

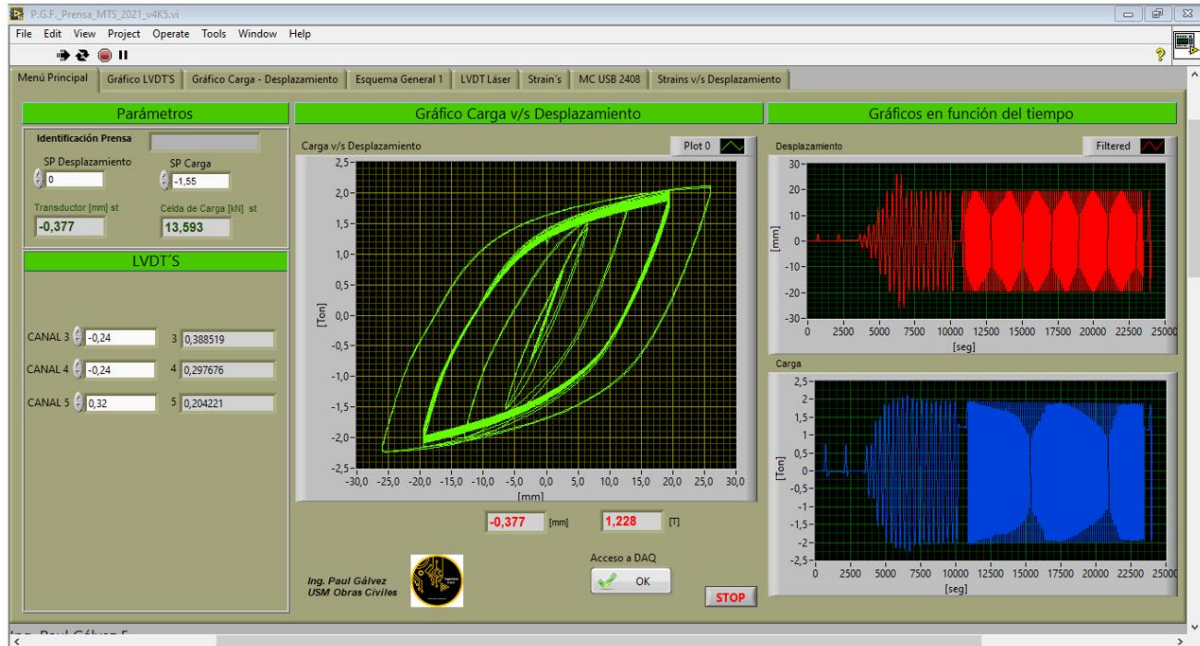


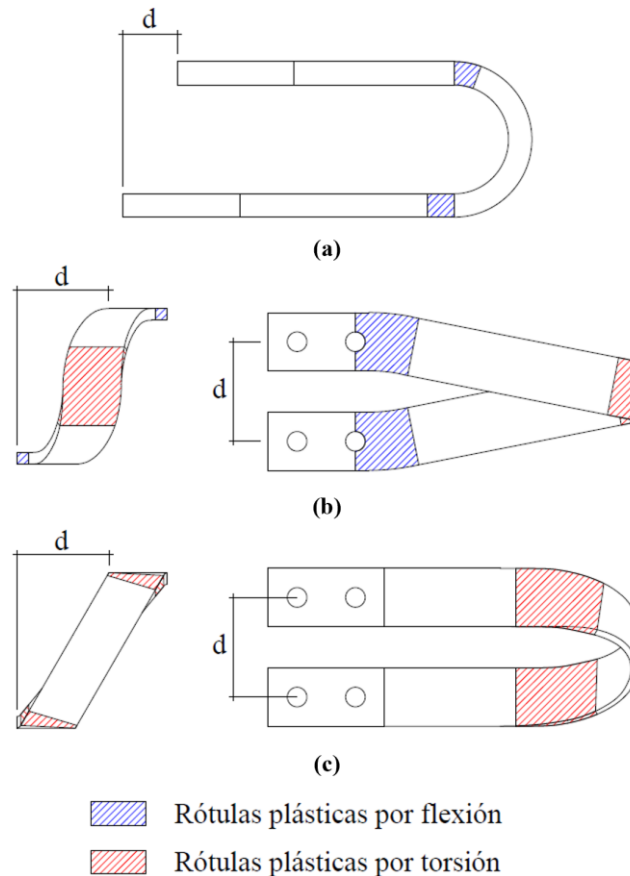
Figura 17. Captura de pantalla de una de las pestañas del programa LabVIEW

## 2.2 RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

### 2.2.1 Modo de deformación, Daños y Falla

Con el objetivo de interpretar las curvas fuerza-desplazamiento de los especímenes, en esta sección se describen los modos de deformación de los ensayos, los daños observados y los mecanismos de falla. En primer lugar, el modo de deformación de los elementos U-Shaped viene dado por la dirección de la carga. En la Figura 18 se presenta la forma en que se deforman los elementos dependiendo de la dirección en la que son cargados y de la relación  $B/t$  que posean. En la Figura 18(a) se presenta la deformación y el mecanismo de rótulas plásticas cuando la dirección de la carga se aplica en  $0^\circ$ . En dicha dirección se producen dos rótulas plásticas por flexión debido a las demandas de curvatura en la interfaz de la zona recta y curva del espécimen. En la Figura 18(b) se presenta la deformación del espécimen cuando la dirección de la carga es en  $90^\circ$  y la relación  $B/t$  tiene un valor cercano a 1. En este caso, se forman dos rótulas plásticas por flexión cerca de las conexiones apernadas, mientras que se produce una rótula plástica por torsión en el centro de la zona curva del elemento. Finalmente, en la Figura 18(c) se presenta el modo de deformación cuando la carga tiene una dirección de  $90^\circ$  y la relación

$B/t$  es alta. En este caso lo que ocurre es que en las zonas entre la parte recta y curva del elemento se producen rótulas plásticas por efecto de la torsión. Cabe mencionar que, en todos estos modos de deformación, se hace la suposición de que estos elementos están restringidos por dos planos paralelos infinitos.



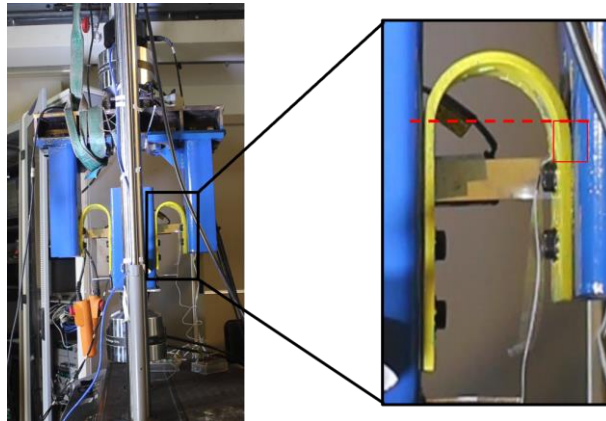
**Figura 18. Deformación del elemento U-Shaped. (a) Carga en  $0^\circ$ . (b) Carga en  $90^\circ$  con relación  $B/t$  cercana a 1. (c) Carga en  $90^\circ$  con relación alta de  $B/t$ .**

En cuanto a los daños, se espera que a medida que transcurran los ciclos de desplazamiento comiencen a aparecer grietas por fatiga en las zonas donde se produzcan rótulas plásticas. Posteriormente, la falla se producirá cuando una de estas grietas crezca lo suficiente para producir la fractura del espécimen o una disminución de la fuerza de reacción considerable.

### **Ensayos a $0^\circ$**

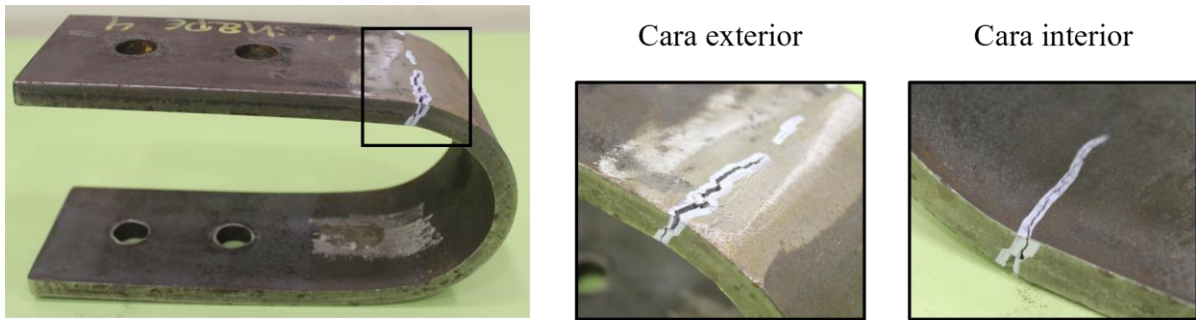
A medida que transcurrió el ensayo se observó que el modo de deformación era el esperado de acuerdo con la Figura 18(a). En la Figura 19 se puede apreciar una vista de ambos especímenes donde se observa claramente la demanda de curvatura, es decir, como una zona que era plana pasa a ser curva y viceversa.

Una diferencia con respecto al modo de deformación teórico (Figura 18), es que en teoría la sección que empieza a curvarse debiese permanecer en contacto perfecto con la superficie de apoyo. Sin embargo, se observó en los ensayos que dicha sección tiende a separarse del punto de apoyo debido al momento interno que posee. Esto se observa claramente en la Figura 19 al trazar una línea horizontal desde el inicio de la curvatura del lado izquierdo hasta el lado opuesto, el cual no está en contacto a la misma altura, si no que está más abajo, ya que el momento interno trata de separar el elemento hasta la conexión apernada.

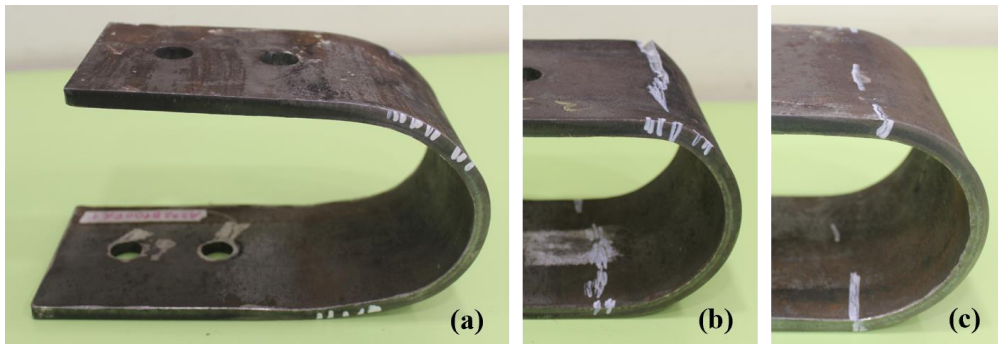


**Figura 19. Modo de deformación en el ensayo A5720GFat1.**

A medida que transcurrió el ensayo se observó la aparición de grietas en el elemento. Estas grietas comenzaron a aparecer en las zonas esperadas de rotulación plástica. No hubo un lugar específico donde aparecieran con respecto al ancho  $B$  del elemento, ya que en algunos casos las grietas se generaban inicialmente en el centro del espécimen, y en otros casos, en el borde. Posteriormente, estas grietas se fueron propagando hasta cubrir todo el ancho del elemento, al mismo tiempo que se profundizaban a través del espesor de la probeta. Hubo casos en que cuando había grietas en una cara, también se producían en la misma ubicación por la cara opuesta, las que al propagarse se juntaban y se producía la fractura del espécimen. En la Figura 20 se presenta la formación de grietas por ambas caras y cómo se van propagando por el ancho del espécimen. Al identificar las grietas en cada ensayo se pudo observar un patrón con respecto al protocolo de carga. Cuando el protocolo contenía ciclos de baja amplitud (i.e. Fati3) las zonas y cantidad de grietas eran mucho menores que cuando el protocolo contenía ciclos de grandes amplitudes (i.e. Fati1). Esto se puede ver en la Figura 21, donde el área y cantidad de grietas disminuye a medida que el protocolo de carga presenta menores demandas de deformación. La razón de que ocurra esto se explica por el modo de deformación mostrado en la Figura 18(a), donde se observa que, si el desplazamiento demandado aumenta, entonces las zonas plastificadas crecen, distribuyendo la formación de grietas en el espécimen.



**Figura 20. Grietas en de las probetas del ensayo A572t10AmpCrec**



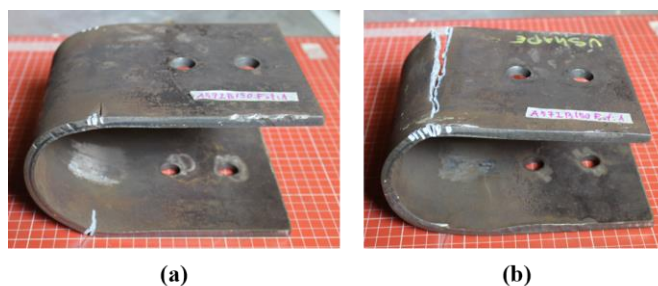
**Figura 21. Grietas de las probetas A572B100 (a) Fatiga 1 (b) Fatiga 2 (c) Fatiga 3**

A medida que las grietas se propagaron en todo el ancho del elemento, finalmente se produce la fractura y falla del elemento. Cabe destacar que esta falla se produjo siempre en solo uno de los dos especímenes ensayados, y nunca en ambas probetas del mismo ensayo. En la Figura 22 se puede apreciar que una de las probetas llegó a fracturarse por fatiga mientras que la otra poseía una baja cantidad de grietas.

Desde el momento en que se notaba una degradación importante de la resistencia, el número de ciclos hasta la falla dependía del área de sección que debía ser fracturada. Es decir, cuando el espesor ( $t$ ) o el ancho ( $B$ ) aumentaron o disminuyeron, la cantidad de ciclos desde la aparición de las grietas hasta la falla tuvo la misma tendencia. Este fenómeno da pequeñas luces acerca de los ciclos de vida remanentes que quedan luego de que comienza la degradación de la resistencia. Cabe mencionar que no todas las probetas lograron la fractura del elemento, debido a temas de seguridad del equipo MTS. La razón de esto es que cuando una de las probetas comenzaba a experimentar una degradación de la resistencia se desestabilizaba el sistema de carga debido a la diferencia de fuerzas, en consecuencia, se generan momentos flectores en la viga superior que luego se transmiten a las mordazas del equipo MTS. Por esta razón, en algunos casos se tomó la decisión de finalizar los ensayos en el momento en que la fuerza total disminuyera aproximadamente a un 50% de la carga máxima obtenida. En la Figura 23 se presenta un ejemplo de esto, donde la grieta no atravesó el espécimen por completo, sino que llegó a cubrir un 90% del ancho aproximadamente.



**Figura 22. Falla del ensayo A5720GFati2. (a) UD 1, (b) UD 2**



**Figura 23. Falla del ensayo A572B150Fati1. (a) UD 1, (b) UD 2**

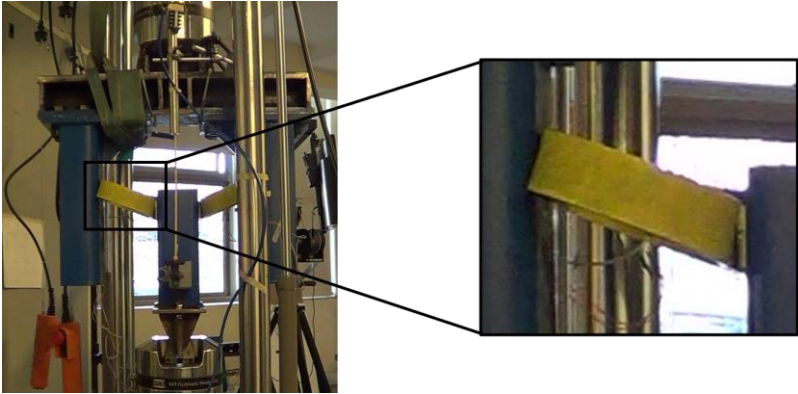
### **Ensayos a 90°**

A medida que transcurrió el ensayo, la deformación de las probetas ocurrió como se muestra en la Figura 18.(c), lo que se puede apreciar en la Figura 24. Lo que indica que la deformación se concentró en las zonas rectas del elemento debido a un momento torsor interno. Por otro lado, en la Figura 25 se muestra que se produjo una deformación fuera del plano, tal que los especímenes rodearon el perfil cajón inferior. Esto no estaba reflejado en los modos de deformación planteados anteriormente por el supuesto de los planos infinitos que contienen los elementos U-Shaped. Lo que sucedió en este ensayo es que los planos que restringen este movimiento (i.e. las caras del perfil canal y del perfil cajón) al no ser infinitos, permiten que ocurran estas deformaciones fuera del plano.

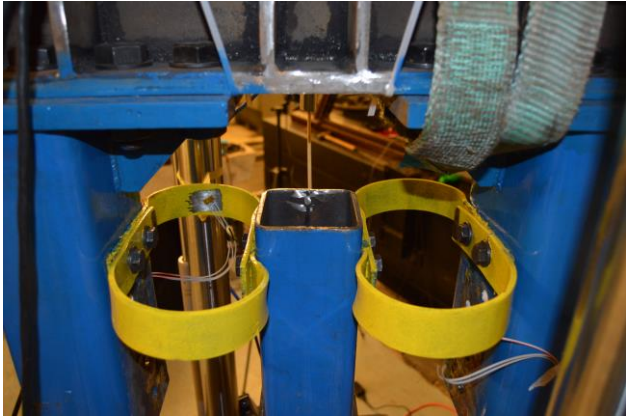
Luego de una cierta cantidad de ciclos efectuados, comenzaron a aparecer grietas en las zonas de rótulas plásticas definidas en el modo de deformación presentado en la Figura 18.(c). En la Figura 26 se presenta la formación de grietas en una de las cuatro probetas del ensayo A36B4090GFati1. Estas grietas se presentaron de la misma forma en las cuatro probetas de los tres ensayos realizados en 90°.

En estos ensayos se observaron 2 tipos de fracturas. La primera fue una fractura de la conexión apernada, la cual se puede apreciar en la Figura 27(a). Esta falla se originó debido a un mal apriete de los pernos en la conexión al perfil canal. Esto generó que hubiera un deslizamiento entre los especímenes y el perfil canal, generando una concentración de esfuerzos en la conexión apernada (como los mostrados en la Figura 18.(b)). Finalmente, estos esfuerzos generaron una grieta por fatiga al costado del perno que derivó en una fractura del elemento. El segundo tipo de falla es el mostrado en la Figura 27(b), la cual está relacionada con el modo de deformación de la Figura 18(c). Se puede notar que, debido a la forma

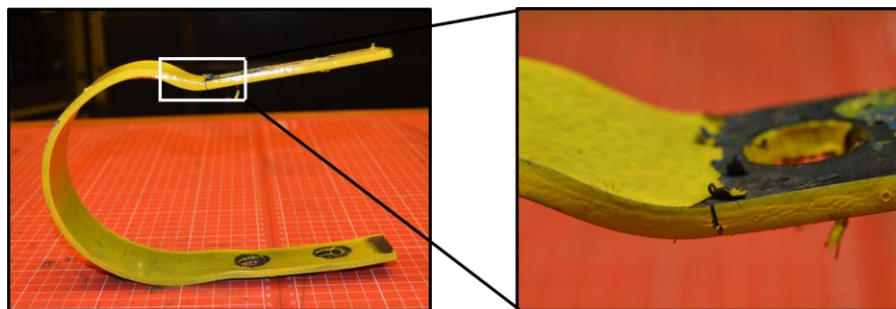
de la fractura, la cual no presenta un área perpendicular al eje del elemento, que esta no se ocasionó debido a un momento flector interno sino a un momento torsor interno. Esto confirma de la existencia y posición de la rótula plástica debido a un momento torsor en la probeta.



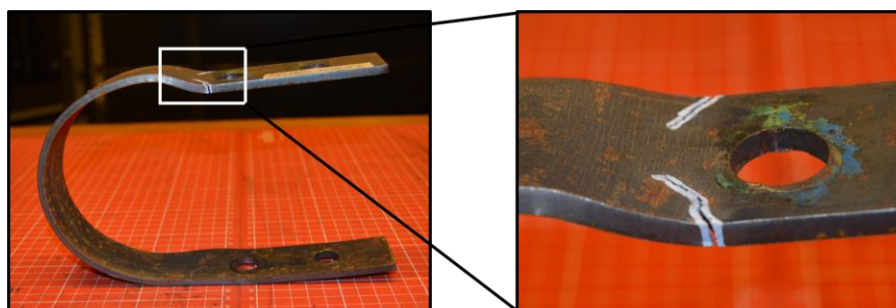
**Figura 24. Modo de deformación en el ensayo A572B4090GFati1**



**Figura 25. Deformación fuera del plano del ensayo A36B4090GFati1**

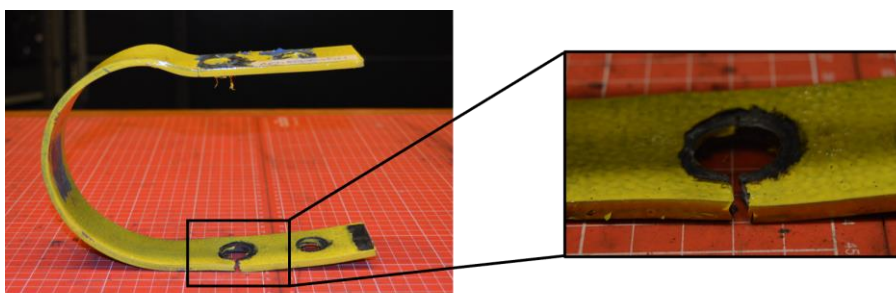


(a)

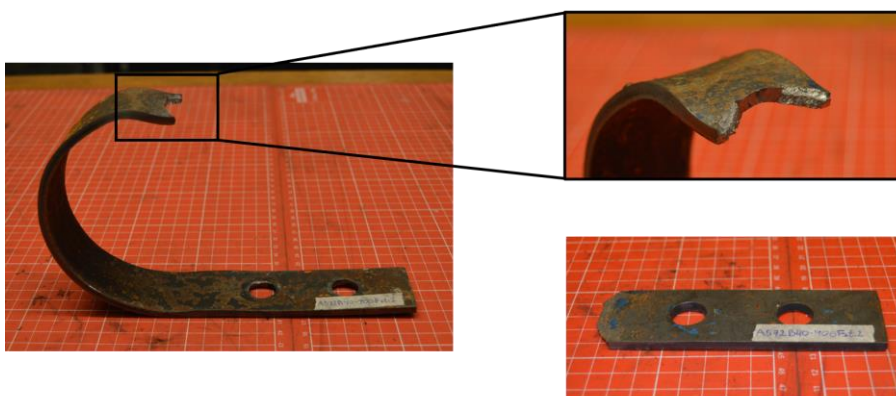


(b)

Figura 26. Grietas presentes en los ensayos (a) A36B4090GFati1 y (b) A36B4090GFati2



(a)



(b)

Figura 27. Fracturas de ensayos (a) A36B4090GFati1 y (b) A36B4090GFati2

### 2.2.2 Curvas de Histéresis

En esta sección se realiza una descripción de las curvas de histéresis obtenidas durante los ensayos. Se describirán las curvas de manera visual, y se analizará la influencia de los distintos parámetros geométricos y de la dirección de carga. En esta sección se presentan solo las curvas para los ensayos de Fatiga 1, ya que tener una amplitud de desplazamiento constante igual a 60 [mm] en todos los casos, permite observar y comparar de mejor manera las variables en estudio, es decir, la influencia de las dimensiones de los especímenes, el tipo de acero y la dirección de carga. Respecto a las curvas fuerza-desplazamiento asociadas al protocolo de Amplitud Creciente solo se presenta una en esta sección, de manera tal de observar la estabilidad de los ciclos de histéresis de los elementos U-Shaped. El resto de las curvas fuerza-desplazamiento se presentan en el Anexo A.

En la Figura 28 se presenta el resultado de la curva fuerza-desplazamiento para la probeta A5720G bajo el protocolo de carga Fatiga 1. En dicha curva se identifica el estado de primera fluencia, el cual fue medido mediante el uso de strain gauges instalados en cada probeta. De esta curva se puede observar que este tipo de disipador de energía presenta un comportamiento estable cuando es sometido a ciclos de carga y descarga. En la figura también se observa que se produce un deterioro de resistencia entre cada ciclo, para posteriormente llegar a la fractura y falla del espécimen. En la Figura 29 se presenta la variación de la fuerza máxima del espécimen ciclo a ciclo. Se puede apreciar que inicialmente hay un leve aumento de la fuerza máxima, lo cual se puede atribuir al endurecimiento por deformación del acero. A medida que aumenta el número de ciclos, la fuerza disminuye levemente, hasta llegar a un punto en que la tasa de degradación de resistencia aumenta significativamente, lo cual implica que el espécimen está próximo a la falla. En este trabajo la falla teórica del espécimen se definió como el punto en que la fuerza disminuye un 20% con respecto al valor máximo alcanzado. Este criterio sigue la definición de lo que es un estado límite último, lo cual implica que si el dispositivo presenta una degradación de resistencia significativa no cumple la función para la que fue previsto, por ende, se considera que ha fallado.

En la Figura 30 se presenta el comportamiento del espécimen A5720G bajo el protocolo de carga Amplitud Creciente. De esta figura se puede apreciar cómo el endurecimiento del acero genera que la fuerza aumente en cada ciclo. Además, se observa que los ciclos son estables durante todo el protocolo de carga. Además, se presenta el punto en que el strain gauge de cada probeta superó el punto de fluencia para el acero.

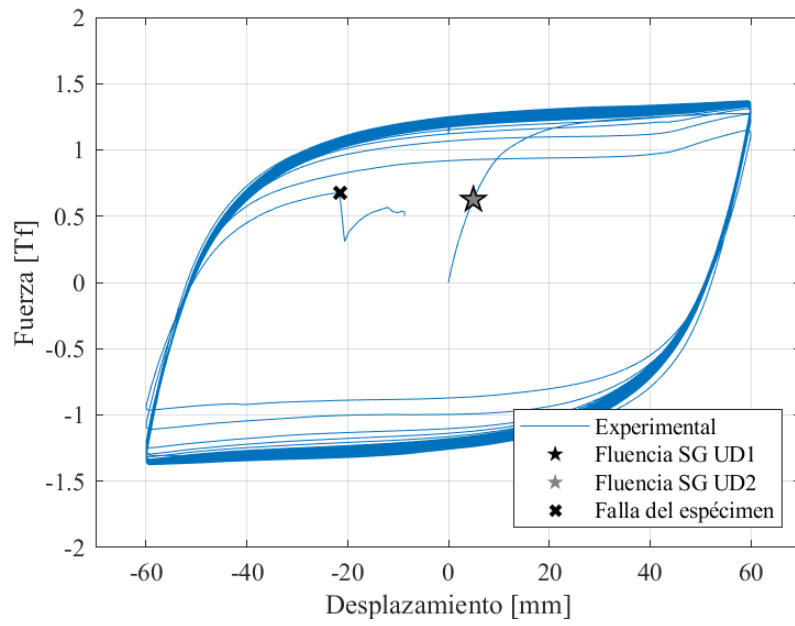


Figura 28. Curva de histéresis para el ensayo A5720GFati1

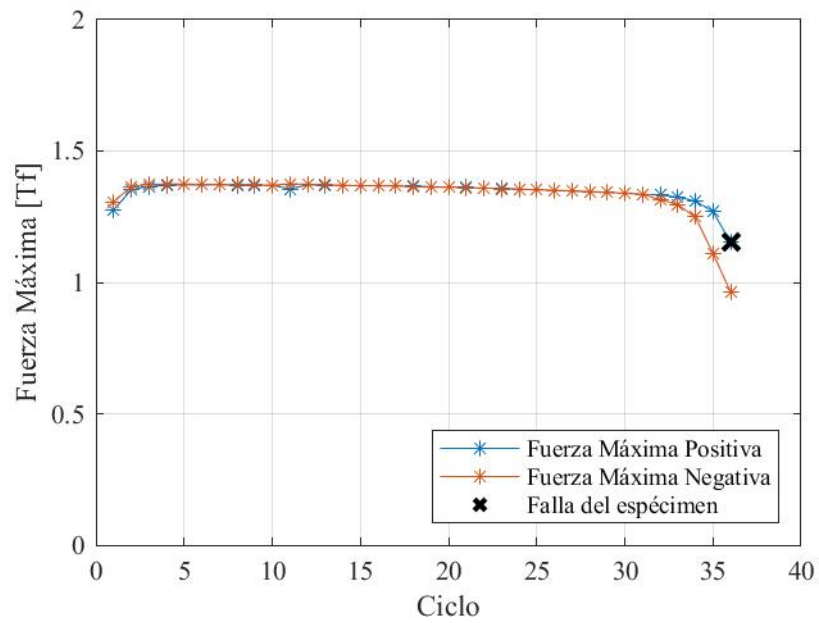
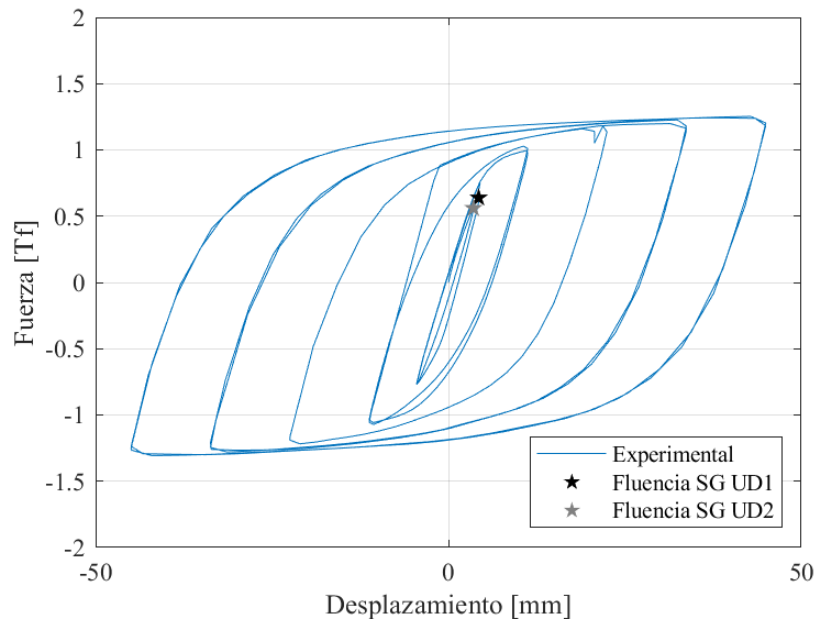


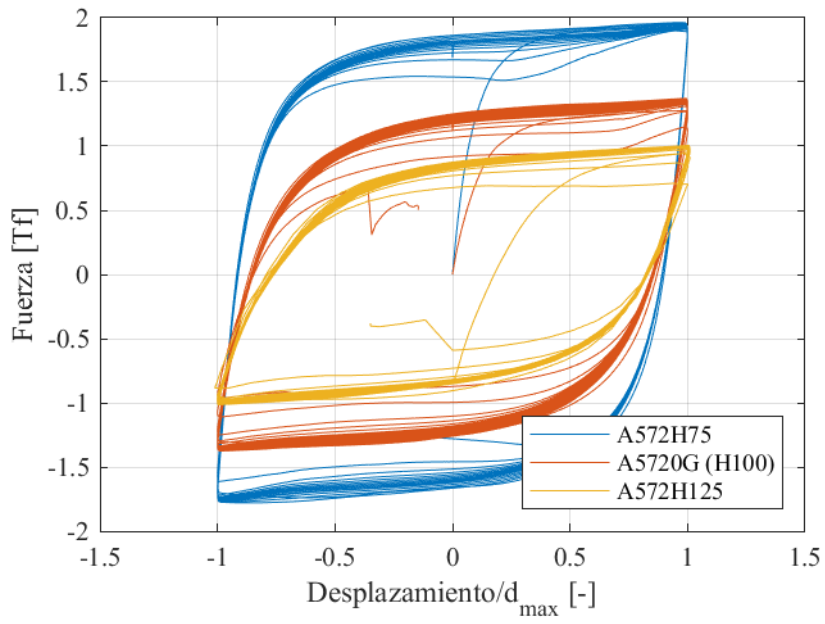
Figura 29. Fuerza máxima a través de los ciclos en el ensayo A5720GFati1



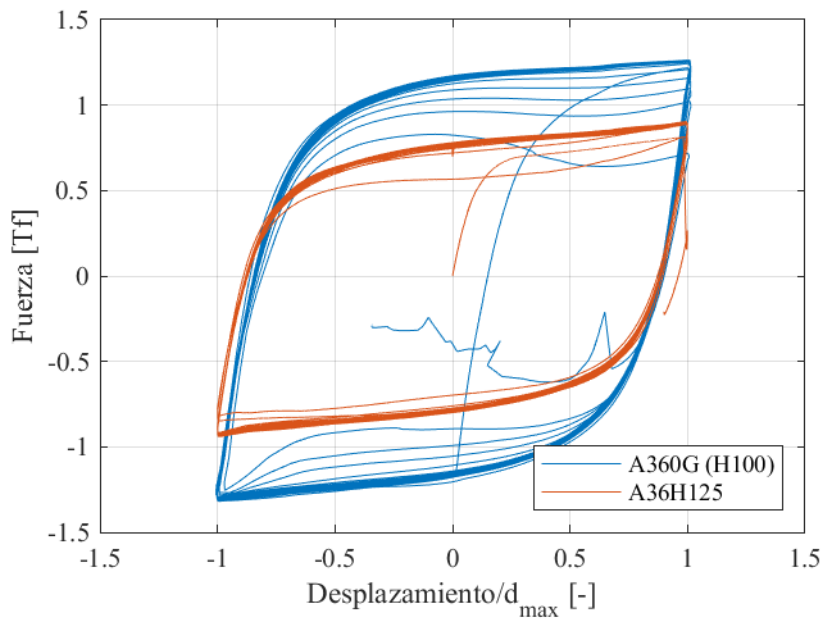
**Figura 30. Ciclos de histéresis para el ensayo A5720GampCrec**

Desde la Figura 31 a la Figura 33 se presenta la influencia de los parámetros geométricos del elemento U-Shaped en las características de la curva de histéresis. En todas estas figuras se muestra la curva de histéresis ocasionada por el protocolo de carga Fatiga 1. En estas, el eje de las abscisas está normalizado por el desplazamiento máximo del ensayo, con el objetivo de facilitar las comparaciones. De estas figuras se puede observar que todas presentan una zona inicial lineal-elástica, para luego pasar a una zona plástica con una fuerza bien definida y constante. A medida que transcurren los ciclos, se puede apreciar que los especímenes son capaces de mantener su resistencia sin mucha degradación por una cantidad específica de ciclos. Y que finalmente, cuando comienza el deterioro evidente, rápidamente se llega a la falla del espécimen.

A pesar de las similitudes indicadas anteriormente, las curvas presentan diferencias significativas en los valores de rigidez y fuerza máxima que se alcanza en el ensayo. En la Figura 31 se puede observar cómo varía la curva cuando se hace variar la altura (H) del dissipador, en la que se aprecia que cuando la altura aumenta, la fuerza y la rigidez disminuyen. En la Figura 32 se puede observar cómo varía la curva cuando se hace variar el espesor (t) del espécimen, donde se ve que a medida que aumenta el espesor, la fuerza que genera el espécimen aumenta. Finalmente, en la Figura 33 se ve cómo cambian las curvas de histéresis cuando se hace variar el ancho B, donde se ve que al igual que con el espesor, a medida que aumenta el ancho también lo hace la rigidez y la fuerza.

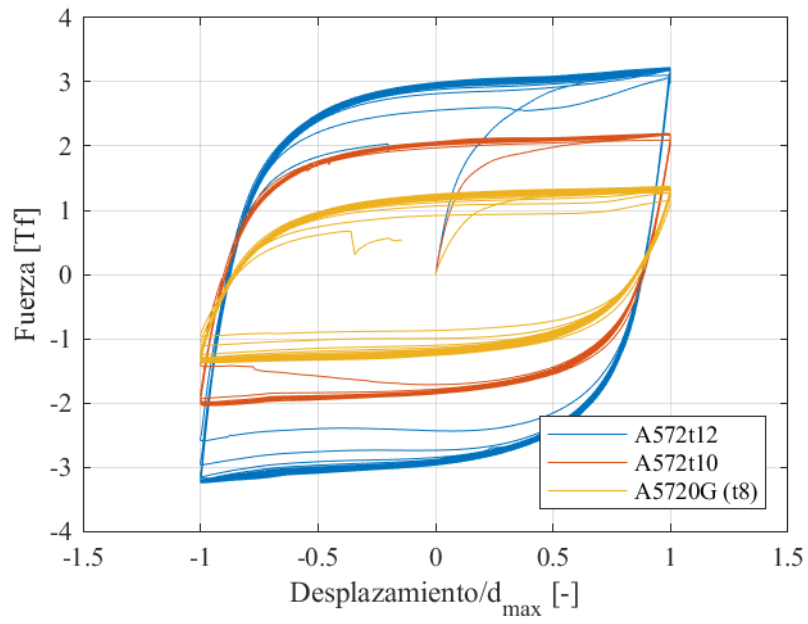


(a)

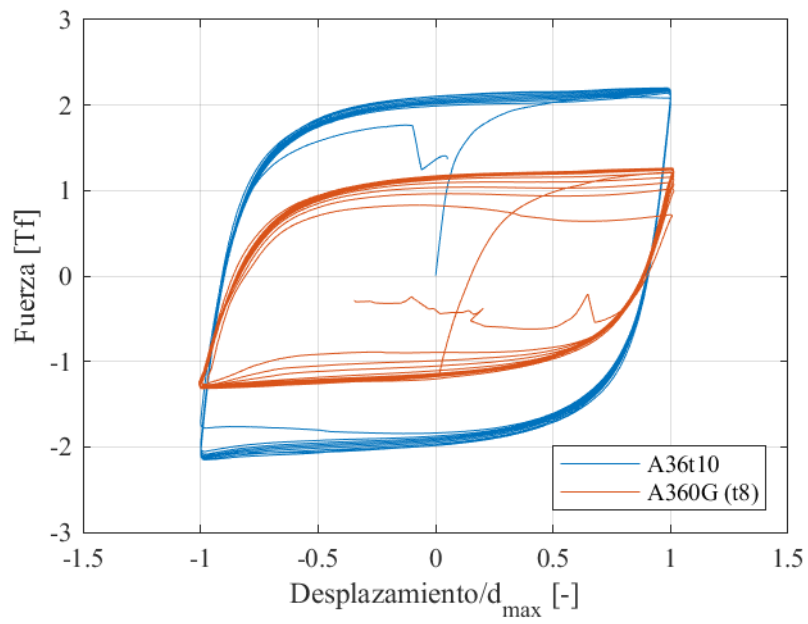


(b)

Figura 31. Curvas de histéresis al variar la altura (H). (a) Acero A572, (b) Acero A36.

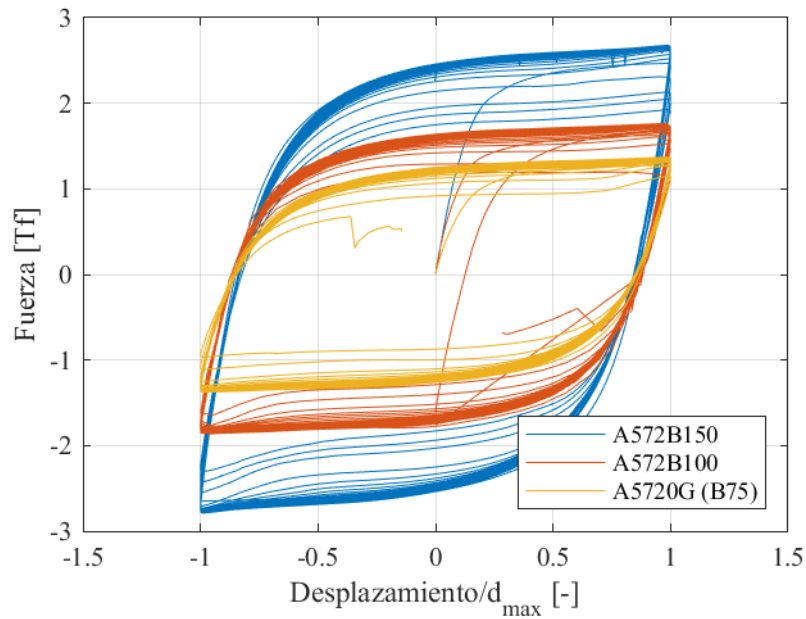


(a)



(b)

Figura 32. Curvas de histéresis al variar el espesor (t). (a) Acero A572, (b) Acero A36.



**Figura 33. Curvas de histéresis al variar el ancho (B)**

En la Figura 34 se puede observar cómo varía la curva fuerza-desplazamiento cuando la dirección de la carga cambia de una dirección de  $0^\circ$  a una de  $90^\circ$ , para la probeta A572-B40. Esta figura muestra que cuando se cambia la dirección de la carga, la curva de histéresis no mantiene la misma forma. En este contexto, se puede observar que luego de la fluencia del material, disminuye la pendiente por un rango de desplazamiento, para luego volver a subir de valor. Este aumento de rigidez se debe a que, luego de formarse las rótulas plásticas por torsión de la Figura 18.(c), la sección central de la zona curva comienza a estirarse, indicada en la Figura 35. Por geometría, se puede ver que a medida que aumente el desplazamiento, la distancia entre el comienzo y final de la parte curva aumenta. Esto genera que la zona curva comience a aplanarse y posteriormente a estirarse, provocando un aumento de la rigidez por esfuerzos de flexión y axiales.

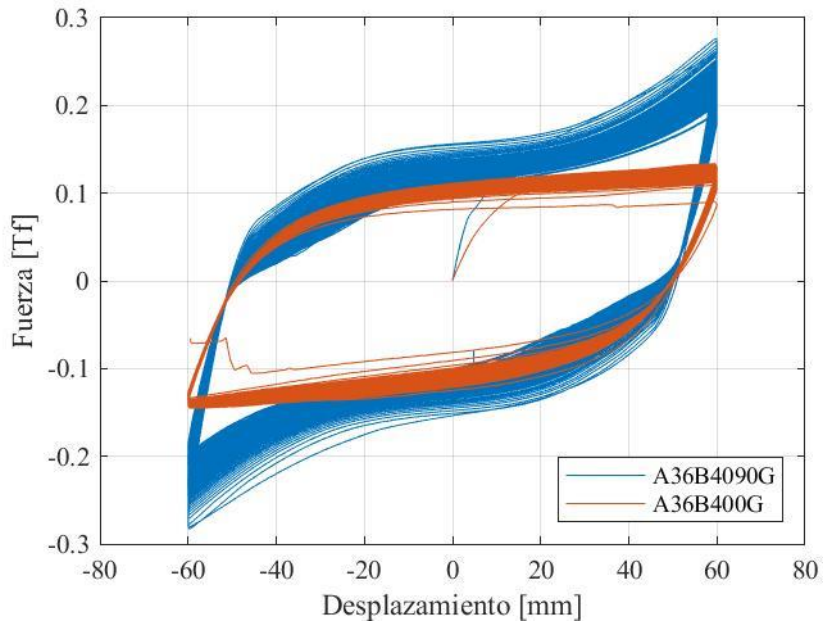


Figura 34. Ciclos de histéresis cuando al variar la dirección de carga

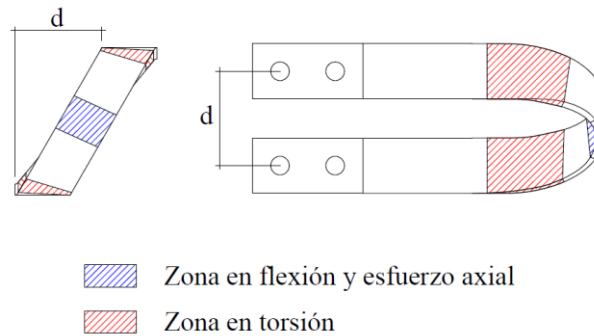


Figura 35. Mecanismo de deformación con carga a 90°

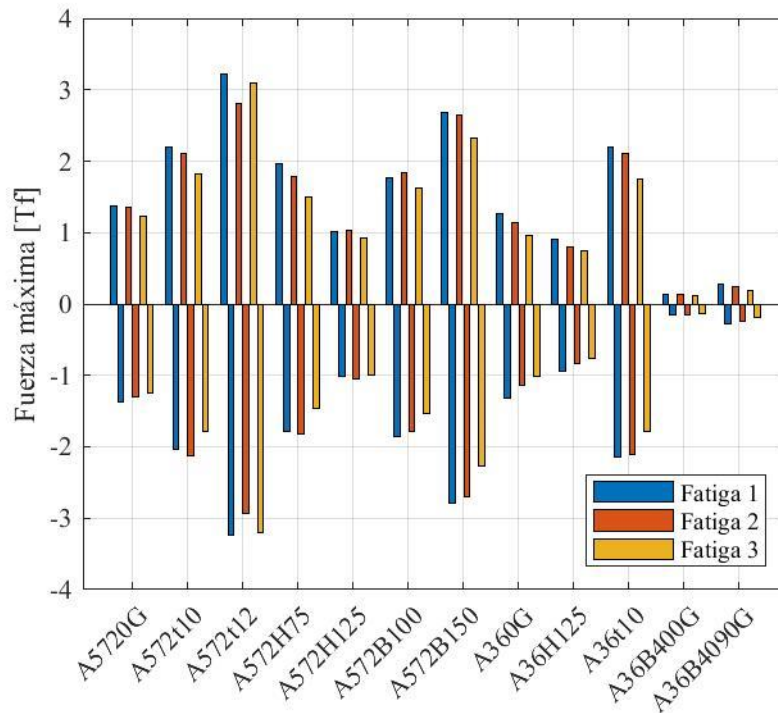
### 2.2.3 Fuerza Máxima

En esta sección se analizan los datos asociados a la fuerza máxima alcanzada por las distintas probetas. En la Tabla 3 se presentan las fuerzas máxima y mínima de cada espécimen en cada ensayo, junto con la variación porcentual de la resistencia máxima en el protocolo Fatiga 1 con respecto al de Fatiga 3. De estos datos se puede corroborar el mismo comportamiento que fue descrito en la sección anterior con respecto a cómo las dimensiones geométricas del dispositivo afectan la resistencia del disipador. Con estos datos también queda en evidencia la simetría de las curvas de histéresis, al poseer valores similares entre la fuerza máxima y la mínima, como se muestra en la Figura 36. De estos valores también se puede notar que la magnitud de la fuerza disminuye al disminuir la amplitud del protocolo de carga. Esto nos indica que cuando el espécimen llega a la amplitud de Fatiga 3, no llega a la máxima resistencia que es capaz de soportar. En magnitud, para algunas probetas es bajo el 10%, pero en general se está bajo el 20%. Esta aseveración es válida para los ensayos realizados con una carga en dirección a 0°, ya que en

la probeta A36B4090G se puede ver que el aumento de fuerza es considerable, lo cual se confirma con lo visto antes en la forma de su curva de histéresis.

**Tabla 3. Fuerza máxima y mínima alcanzada por espécimen**

	F <sub>max</sub> [Tf]			Disminución [%]	F <sub>min</sub> [Tf]			Disminución [%]
	Fati1	Fati2	Fati3		Fati1	Fati2	Fati3	
A5720G	1.37	1.36	1.23	10.3	1.38	1.31	1.25	9.3
A572t10	2.20	2.10	1.83	16.9	2.04	2.13	1.79	12.2
A572t12	3.22	2.81	3.09	4.2	3.24	2.93	3.20	1.5
A572H75	1.96	1.78	1.49	24.1	1.78	1.81	1.47	17.5
A572H125	1.01	1.03	0.92	8.1	1.01	1.05	1.00	1.9
A572B100	1.76	1.83	1.63	7.7	1.86	1.78	1.54	17.2
A572B150	2.68	2.65	2.32	13.2	2.79	2.71	2.27	18.7
A360G	1.26	1.15	0.96	23.7	1.32	1.15	1.02	22.9
A36H125	0.90	0.79	0.74	18.6	0.94	0.83	0.77	18.0
A36t10	2.20	2.11	1.75	20.4	2.15	2.10	1.78	17.0
A36B400G	0.13	0.14	0.11	17.3	0.14	0.15	0.13	12.0
A36B4090G	0.28	0.24	0.18	34.4	0.28	0.24	0.19	32.2



**Figura 36. Fuerzas máximas por espécimen**

Otro análisis que se realizó en este trabajo fue comparar los valores experimentales con valores teóricos obtenidos de expresiones planteadas en la literatura, en particular, de las ecuaciones (2) y (3) propuestas

en Deng et al. [26]. La ecuación (2) corresponde a la fuerza máxima resistente del disipador cuando es cargado en 0°. Esta ecuación considera que el acero solo puede llegar a un esfuerzo máximo igual a la fluencia ( $f_y$ ). Por otro lado, la ecuación (3) considera el endurecimiento del acero producto de las deformaciones plásticas que se producen en el material. En esta ecuación,  $\sigma_h$  y  $\nu$  son parámetros que deben estimarse a través de una caracterización de una curva esfuerzo-deformación del material utilizado. Por otro lado, el parámetro  $\lambda$  debe ser estimado a través de la minimización de la ecuación (4). Donde,  $F_{u,FEM}$  es la fuerza máxima obtenida a través de un modelo de elementos finitos, por lo que se necesita realizar una muestra considerable de estos modelos para luego estimar el parámetro  $\lambda$ . En este caso, los valores que se utilizaron fueron los siguientes:

- $\sigma_h$  : se utilizó la diferencia entre el esfuerzo último y el esfuerzo de fluencia, dependiendo del acero utilizado según las propiedades de la Tabla 2.
- $\nu$  : se utilizó un valor igual a 8, el cual corresponde al valor utilizado por Deng et al. [26]
- $\lambda$  : se utilizó un valor igual a 5.025, de acuerdo con Deng et al. [26]

$$F_u = f_y \frac{bt^2}{2(H-t)} \quad (2)$$

$$F_{u,mod} = \left( f_y + \sigma_h (1 - e^{-\nu\lambda t/H}) \right) \frac{bt^2}{2(H-t)} \quad (3)$$

$$\min \sum \left( F_{u,FEM} - \left( f_y + \sigma_h (1 - e^{-\nu\lambda t/H}) \right) \frac{bt^2}{2(H-t)} \right) \quad (4)$$

Cabe mencionar que para los disipadores cargados en 90°, Deng et al [34] proponen la ecuación (5). Esta ecuación está planteada en base a las rótulas plásticas formadas según el modo de deformación de la Figura 18.(b), pero, como se detalló en la sección 2.2.1, el modo de deformación obtenido en los ensayos a 90° se asemeja más al descrito en la Figura 18.(c).

$$F_{out} = \frac{f_u (tB^2/2 + Q/\sqrt{3})}{(l+R)\sqrt{4 - D_{out}^2/(l+R)^2}} \quad (5)$$

Donde,  $f_u$  es el esfuerzo último del acero utilizado,  $Q$  es el coeficiente de resistencia a torsión de la sección del disipador,  $l$  es el largo que hay entre la conexión apernada hasta el inicio de la zona circular y  $D_{out}$  es el desplazamiento demandado.

La Figura 37 presenta la razón entre la fuerza máxima alcanzada por cada probeta bajo los distintos protocolos de carga y la fuerza máxima teórica planteada por la ecuación (2). En esta figura se puede observar que los valores de la fuerza máxima son en promedio un 29% mayores que los calculados con la ecuación (2). Esta diferencia se debe al supuesto de que el acero no experimenta un esfuerzo mayor

que el de fluencia  $f_y$ . A pesar de esto, se considera que esta ecuación provee un límite inferior para estimar la fuerza que puede llegar a experimentar el elemento U-Shaped.

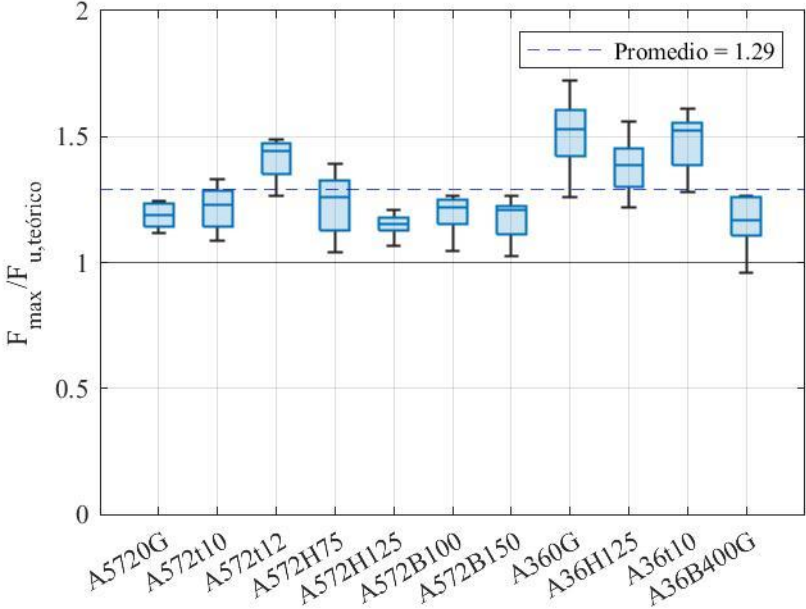


Figura 37. Razón entre la fuerza máxima y la calculada con la ecuación (2)

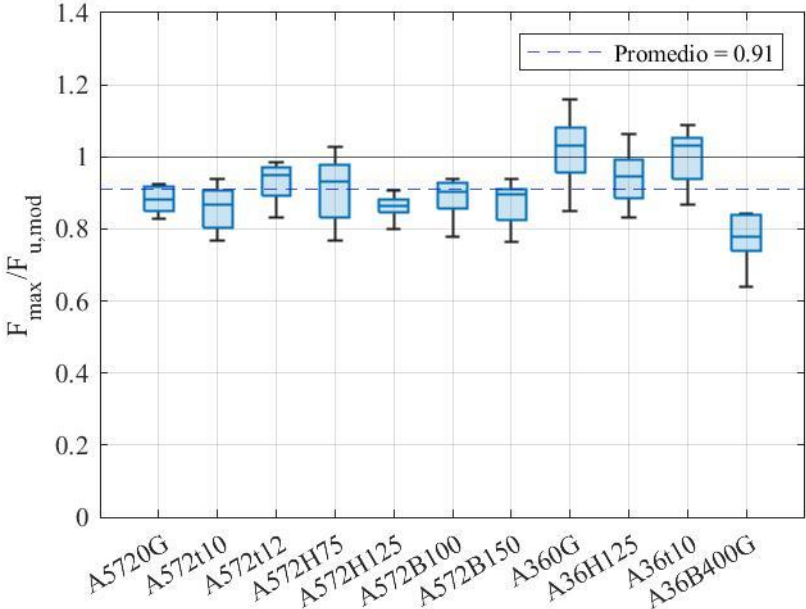


Figura 38. Razón entre la fuerza máxima y la calculada con la ecuación (3)

La Figura 38 presenta la razón entre la fuerza máxima experimentada por los especímenes y la fuerza calculada con la ecuación (3). De esta figura se puede observar que los valores experimentales son en promedio un 9% menores que los analíticos, lo cual representa una mejora respecto a los valores obtenidos con la ecuación (2). Una posible razón para esta diferencia es que el valor de  $\nu$  y  $\lambda$  no sean

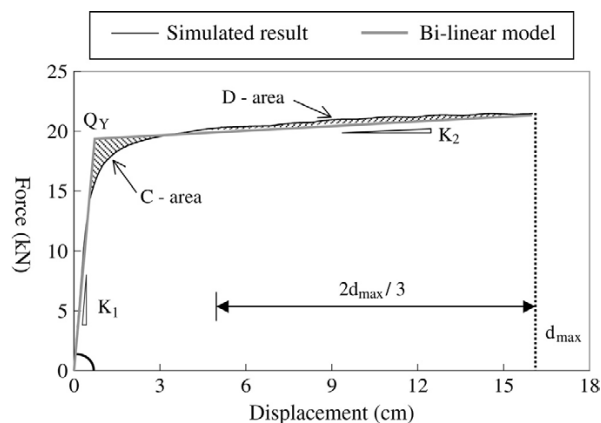
apropiados para este caso. Sin embargo, el uso de esta ecuación sirve para estimar un límite superior de la fuerza a la que puede llegar el elemento. A partir de estos resultados, se recomienda usar ambas ecuaciones para estimar un rango en el que pueda estar la fuerza máxima de un cierto elemento U-Shaped.

#### 2.2.4 Fluencia

El punto de fluencia delimita el comportamiento elástico del comportamiento plástico. La importancia de este punto radica en que su identificación es de mucha ayuda para posteriores procesos de diseño y para determinar la ductilidad que llegó a experimentar el dispositivo.

Diversos autores a lo largo de la literatura han planteado y usado diversas formas de calcular el punto de fluencia. En este trabajo se calculó el punto de fluencia con 4 métodos distintos, para luego evaluar el método con menor variabilidad dentro del mismo espécimen.

El primer método utilizado fue el empleado por Kato y Kim [29], el cual consiste en establecer un modelo bilineal a partir de dos rigideces y una igualación de áreas. La primera rigidez corresponde a la parte elástica. La segunda corresponde a la rigidez de la parte plástica, para la cual se utilizan todos los puntos en los últimos dos tercios del desplazamiento alcanzado. Luego, la intersección de estas rectas se ubica en un punto, de tal manera que el área bajo la curva bilineal sea la misma área bajo la curva experimental. En la Figura 39 se puede ver gráficamente la ubicación de este punto.



**Figura 39. Relación fuerza-desplazamiento [29]**

El segundo método utilizado fue el planteado por Ramberg y Osgood [35], el cual indica que el punto de fluencia se encuentra en la intersección entre una recta y la curva experimental. Esta recta debe pasar por el origen y poseer una pendiente igual al 70% de la rigidez experimental. El tercer método también fue planteado por Ramberg y Osgood [35], el cual consiste en realizar un ajuste de la ecuación (6). Donde  $d$  es el desplazamiento,  $H$  es la fuerza correspondiente al desplazamiento  $d$ ,  $E$  es la rigidez de la zona elástica, y  $K$  y  $n$  son los parámetros a encontrar a través del ajuste lineal. Esta ecuación luego puede reescribirse como la ecuación (7), en donde el término  $EK^{-1/(n-1)}$  corresponde a la fuerza de

fluencia que se está buscando. Luego, el desplazamiento de fluencia se encuentra al hallar la abscisa correspondiente a la fuerza de fluencia en la recta elástica. En este método el punto de fluencia se considera un punto de fluencia efectivo, ya que no es un punto que pertenezca a la curva fuerza desplazamiento.

$$d = \frac{H}{E} + K \left( \frac{H}{E} \right)^n \quad (6)$$

$$d = \frac{H}{E} + \left( 1 + \left( \frac{H}{EK^{n-1}} \right)^{n-1} \right) \quad (7)$$

Finalmente, el cuarto método utilizado para encontrar la fluencia es el utilizado por Jiao et al [31], donde plantean que la fluencia es el punto en la curva fuerza-deformación tal que la rigidez tangencial en ese punto equivale a un 20% de la rigidez inicial del espécimen.

En la Figura 40 se presenta el primer cuarto de ciclo para la probeta A5720G bajo el protocolo de carga Fatiga 1. En esta figura, se pueden identificar los puntos de fluencia calculados según cada método. También, se presenta un ajuste de la recta elástica que permite identificar la ubicación de los puntos

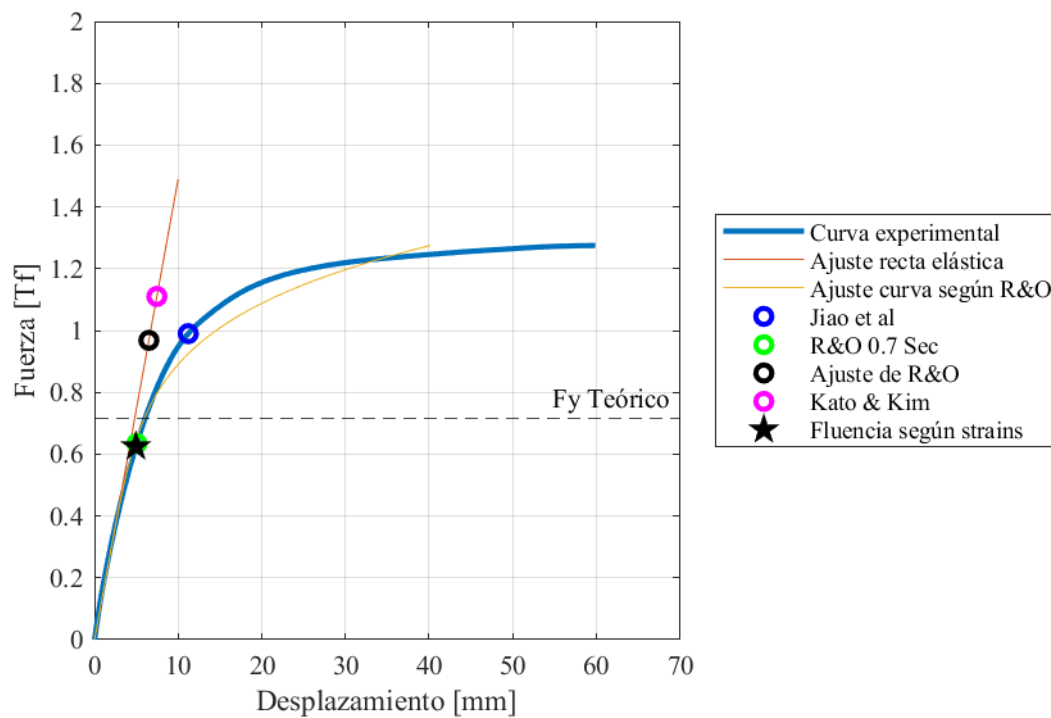


Figura 40. Primer cuarto de ciclo del ensayo A5720GFat1

calculados según Kato & Kim y el ajuste de Ramberg & Osgood. Además, se presenta la curva encontrada según el ajuste de Ramberg & Osgood, y el punto en el que los strain gauges alcanzan la deformación de fluencia del acero.

El proceso para seleccionar uno de los cuatro métodos se describe a continuación. En primer lugar, se calculó el punto de fluencia con los 4 métodos para cada probeta bajo todos los protocolos de carga a los que estuvo sujeta. En el caso de las curvas obtenidas de los protocolos Fatiga 1, Fatiga 2 y Fatiga 3, se utilizó la curva del primer cuarto de ciclo, ya que corresponde a un desplazamiento monótonico desde el origen hasta la amplitud máxima, lo cual es necesario para poder identificar el punto de fluencia con los métodos mencionados. Por otro lado, con la curva obtenida del protocolo de Amplitud Creciente, se utilizó una curva envolvente para poder aplicar los métodos mencionados. Luego, bajo el supuesto de que el punto de fluencia no debiera depender del protocolo de carga, se calculó la varianza del desplazamiento de fluencia según los cuatro métodos para cada espécimen. En la Figura 41 se presenta la varianza que se obtuvo por método para cada espécimen. La varianza se calculó según la ecuación (8), donde  $x_i$  corresponde al valor del desplazamiento de fluencia bajo un protocolo de carga,  $\bar{x}$  es el promedio de los desplazamientos de fluencia calculados para un espécimen y  $n$  es el total de datos, que

$$S^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \tag{8}$$

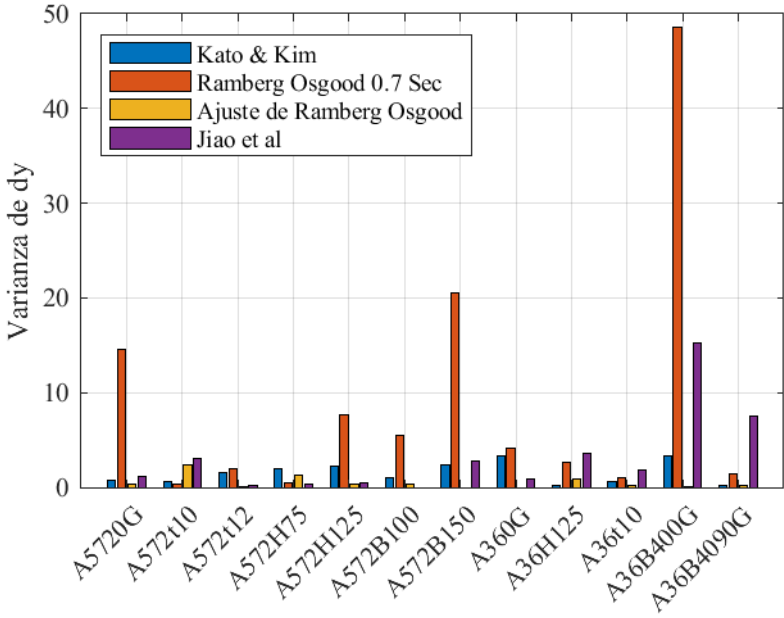


Figura 41. Varianzas del desplazamiento de fluencia por método utilizado

equivale a 3 por ser tres los protocolos de carga utilizados para estimar el punto de fluencia. De la Figura 41 se puede concluir que el mejor que el mejor método para estimar el punto de fluencia es el ajuste de Ramberg y Osgood, ya que se puede apreciar que en general es el método que tiene menos varianza en

comparación con los otros. Por ende, hace que el valor del desplazamiento de fluencia varíe menos al cambiar el protocolo de carga. Para tomar una decisión de qué método es el mejor, se sumaron las varianzas de cada espécimen por método utilizado, al comparar la varianza de los distintos métodos, se puede ver que la menor es la del ajuste de Ramberg y Osgood con 6.37 (comparado con los otros que dieron 18.33 (Kato y Kim), 109.04 (Ramberg y Osgood 0.7 Sec) y 37.4 (Jiao et al)). Es por esto, que en los cálculos posteriores en que se refiera al punto de fluencia, se referirá al calculado según este método.

Con estas consideraciones, los valores para el desplazamiento y fuerza de fluencia se presentan en la Tabla 4 y Tabla 5, respectivamente, junto con el promedio para cada probeta. De estos valores se puede observar la influencia de los parámetros geométricos en el desplazamiento y fuerza de fluencia. En particular, los resultados muestran que en promedio el desplazamiento de fluencia disminuye cuando el valor del espesor (t) aumenta. Por el contrario, un aumento del espesor genera un aumento de la fuerza de fluencia. Respecto a la altura (H), se observa que un aumento de este parámetro provoca un aumento

**Tabla 4. Valores de desplazamiento de fluencia experimentales**

Probeta	d <sub>y</sub> [mm]				Promedio
	Fati1	Fati2	Fati3	AmpCrec	
Variación del espesor (t)					
A5720G (t8)	6.50	7.23	7.59	5.58	6.73
A572t10	4.94	7.32	7.85	6.14	6.56
A572t12	5.73	5.04	5.24	4.79	5.20
A360G (t8)	6.04	5.97	6.16	6.35	6.13
A36t10	4.32	5.08	5.10	5.05	4.88
Variación de la altura (H)					
A572H75	4.80	5.86	7.09	5.95	5.93
A5720G (H100)	6.50	7.23	7.59	5.58	6.73
A572H125	10.14	8.95	9.44	13.25	10.45
A360G (H100)	6.04	5.97	6.16	6.35	6.13
A36H125	7.33	7.90	9.20	7.51	7.99
Variación del ancho (B)					
A5720G (B75)	6.50	7.23	7.59	5.58	6.73
A572B100	5.54	6.49	6.70	6.01	6.18
A572B150	7.85	7.93	8.04	8.44	8.06
A36B400G (B40)	9.41	9.16	9.87	-	9.48
A360G (B75)	6.04	5.97	6.16	6.35	6.13
Variación de la Dirección de Carga					
A36B400G	9.41	9.16	9.87	-	9.48
A36B4090G	5.54	6.44	5.83	-	5.94

**Tabla 5. Valores de fuerza de fluencia experimentales**

Probeta	F <sub>y</sub> [Tf]				Promedio
	Fati1	Fati2	Fati3	AmpCrec	
Variación del espesor (t)					
A5720G (t8)	0.97	1.01	1.08	0.97	1.01
A572t10	1.52	1.68	1.77	1.60	1.64
A572t12	2.04	2.15	2.06	2.10	2.09
A360G (t8)	0.85	0.92	0.87	0.95	0.90
A36t10	1.55	1.50	1.49	1.48	1.51
Variación de la altura (H)					
A572H75	1.37	1.42	1.58	1.60	1.49
A5720G (H100)	0.97	1.01	1.08	0.97	1.01
A572H125	0.76	0.80	0.79	0.90	0.81
A360G (H100)	0.85	0.92	0.87	0.95	0.90
A36H125	0.59	0.64	0.66	0.69	0.65
Variación del ancho (B)					
A5720G (B75)	0.97	1.01	1.08	0.97	1.01
A572B100	1.20	1.36	1.44	1.37	1.34
A572B150	1.99	2.07	2.15	2.13	2.08
A36B400G (B40)	0.10	0.12	0.11	-	0.11
A360G (B75)	0.85	0.92	0.87	0.95	0.90
Variación de la Dirección de Carga					
A36B400G	0.10	0.12	0.11	-	0.11
A36B4090G	0.13	0.16	0.15	-	0.14

en el desplazamiento de fluencia, pero una disminución de la fuerza de fluencia. Finalmente, con respecto al ancho (B) del elemento no se puede establecer una relación clara para el desplazamiento de fluencia, ya que cuando aumenta B de 75 a 100 [mm] el d<sub>y</sub> disminuye, pero cuando B aumenta a 150 el d<sub>y</sub> aumenta. Sin embargo, sí se observa un aumento de la fuerza de fluencia al aumentar el ancho B.

En la literatura hay dos autores que plantean ecuaciones para estimar la fuerza y el desplazamiento de fluencia cuando la demanda de desplazamiento es aplicada es 0°. La ecuación para estimar la fuerza de fluencia propuesta por Deng et al [26] se presenta en la ecuación (9), donde F<sub>y</sub> es la fuerza de fluencia del elemento U-Shaped, f<sub>y</sub> es el esfuerzo de fluencia del acero utilizado, B es el ancho del elemento, t es el espesor del elemento, y R es el radio de la zona curva medida hasta el centro del espesor. Luego, en la ecuación (10) se presenta una ecuación que permite estimar el desplazamiento de fluencia, la cual fue planteada por Baird et al [30]. Donde, D es el diámetro de la parte curva medido desde los centros de los espesores, y E es el módulo de Young del acero utilizado.

$$F_y = f_y \frac{Bt^2}{6R + t} \quad (9)$$

$$d_y = \frac{27\pi F_y D^3}{16EBt^3} \quad (10)$$

En la Figura 42 se presenta la relación entre el desplazamiento de fluencia obtenido por el ajuste de R&O y el desplazamiento de fluencia calculado con la ecuación (10). Los resultados muestran que los valores experimentales difieren considerablemente del valor teórico, teniendo una razón en promedio de 2.07. Una razón para esta diferencia es que el desplazamiento calculado con la ecuación (10) está

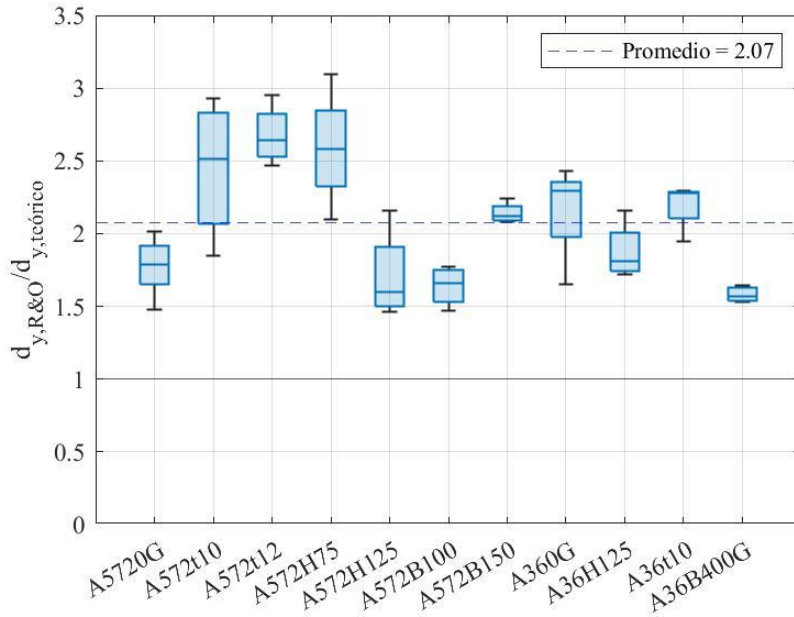


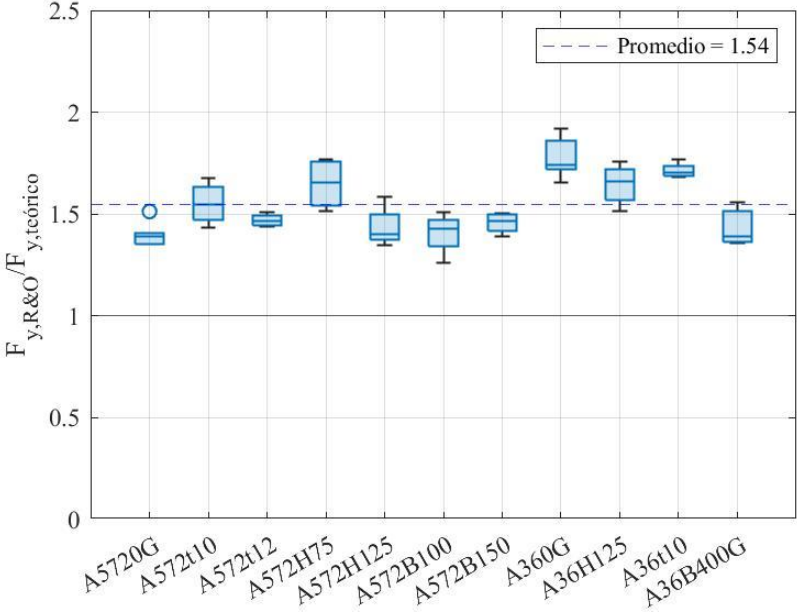
Figura 42. Razón entre el desplazamiento obtenido por R&O y el calculado con la ecuación (10)

directamente relacionado con la fuerza de fluencia  $F_y$  que se utilice, y esta fuerza de fluencia está asociada al momento en que la primera fibra del elemento alcanza a fluir (i.e., el final del rango lineal). En cambio, el desplazamiento obtenido con el método de Ramberg y Osgood está asociado a un punto de fluencia efectivo, el cual se encuentra más alejado del origen con respecto al punto de la primera fluencia. Este punto, en general, se utiliza para establecer modelos (ej., bilineal, de R&O, etc.) que permitan aproximar el comportamiento real de la curva fuerza-desplazamiento. Este valor tiene una utilidad especial en el diseño, ya que es este valor es más adecuado al momento de calcular una fluencia efectiva del dispositivo. A partir de estos resultados, se puede establecer que para los elementos UD es posible calcular el desplazamiento de fluencia efectivo de R&O, multiplicando el desplazamiento teórico por un factor de 2, como se presenta en la ecuación (11).

$$d_{y,RG} = \frac{27\pi F_y D^3}{16EBt^3} \cdot 2 = \frac{27\pi F_y D^3}{8EBt^3} \quad (11)$$

La Figura 43 presenta la relación entre la fuerza de fluencia calculada con el método de Ramberg y Osgood con la calculada con la ecuación (9). Al igual que en la figura anterior, se observa que los

valores comparados difieren entre sí. Sin embargo, en el caso de las fuerzas de fluencia se observa que en promedio los valores experimentales tienden a ser 1.54 veces mayor al valor teórico. El motivo de esta diferencia se atribuye a que la fuerza calculada con la ecuación (9) está asociada a la primera fluencia del acero. Mientras que la fuerza de fluencia calculada con el método de R&O corresponde a una fluencia efectiva.



**Figura 43. Razón entre la fuerza de fluencia obtenida por R&G y la calculada con la ecuación (9)**

Con el objetivo de verificar que la fuerza teórica se relaciona de mejor manera con la fuerza que genera la primera fluencia, en la Figura 44 se presenta la razón entre la fuerza de fluencia experimental obtenida a partir de las mediciones de los strain gauges y la fuerza teórica calculada con la ecuación (9). Esta figura muestra que, en promedio, la fuerza de primera fluencia teórica es prácticamente igual a la fuerza obtenida experimentalmente.

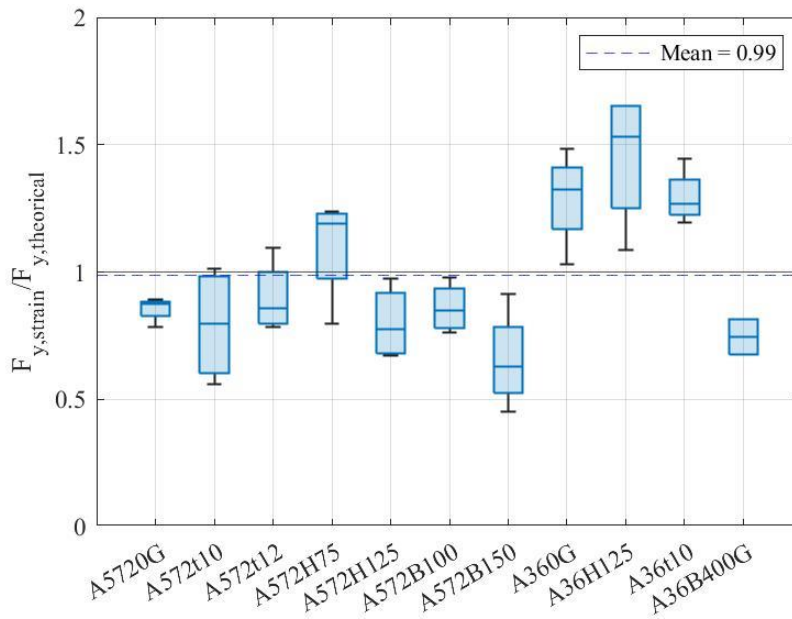


Figura 44. Razón entre la fuerza de fluencia según strain gauges y la calculada con la ecuación (9)

### 2.2.5 Ductilidad

En la siguiente sección se discuten y analizan los datos correspondientes a la ductilidad de los elementos UD. La ductilidad se define como el desplazamiento que experimenta un elemento normalizado por el desplazamiento de fluencia correspondiente al elemento. Con los datos de fluencia efectiva (método Ramberg-Osgood) es posible determinar la ductilidad alcanzada en las probetas para cada uno de los tres protocolos de carga en los que se calculó el desplazamiento de fluencia efectivo. En este contexto, la ductilidad se determinó a partir de la ecuación (12).

$$\mu_{exp} = \frac{d_{m\acute{a}x}}{d_{y,RO}} \quad (12)$$

En la Tabla 6 se presentan los valores de ductilidad alcanzados por cada probeta. Los resultados muestran que la ductilidad varía en cada probeta al cambiar de protocolo, lo cual era esperable, ya que es lo que se buscó al definir los protocolos de carga de esa manera. Sin embargo, cabe destacar que la ductilidad esperada para el ensayo de Fatiga 2 era igual a 10, y en el de Fatiga 3 igual a 5. La diferencia entre la ductilidad esperada y la experimental radica en que el desplazamiento de fluencia utilizado para determinar la amplitud de los protocolos se basó en la fluencia teórica calculada con la ecuación (10), la cual, como se indicó anteriormente, difiere del calculado con el ajuste de Ramberg y Osgood.

Además, cabe mencionar que en ninguno de los ensayos se logró determinar el desplazamiento último ( $d_u$ ) de los elementos UD, debido a las limitaciones de desplazamiento máximo del equipamiento utilizado. Es por esto que no fue posible estimar la ductilidad máxima que puede alcanzar este tipo de

disipadores. A pesar de lo anterior, se observa que algunos especímenes fueron demandados a ductilidades superiores a 10, presentando un comportamiento estable.

**Tabla 6. Ductilidad experimentada por cada probeta**

	$\mu$ [-]			
	Fati1	Fati2	Fati3	AmpCrec
A5720G	9.23	6.23	2.96	8.06
A572t10	12.14	3.69	1.72	4.39
A572t12	10.48	3.97	5.44	11.87
A572H75	13.53	3.92	1.62	3.87
A572H125	6.41	6.70	3.18	3.40
A572B100	11.74	5.70	2.76	6.15
A572B150	7.65	4.66	2.30	4.37
A360G	10.75	4.35	2.11	4.05
A36H125	10.91	5.06	2.72	7.91
A36t10	15.05	5.32	2.65	5.57
A36B400G	7.80	4.20	2.25	-
A36B4090G	8.55	5.39	2.99	-

## 2.2.6 Fatiga

La capacidad a la fatiga está referida a la cantidad de ciclos que resiste un determinado espécimen hasta la falla. La importancia de obtener información de fatiga es que se puede identificar el comportamiento del elemento ante sollicitaciones sísmicas. Poder identificar este comportamiento permite realizar diseños más adecuados ante este tipo de demandas. En este contexto, el criterio para definir la falla se consideró como aquel ciclo en que la probeta no logra superar el 80% de la resistencia máxima alcanzada. La Figura 45 presenta la cantidad de ciclos experimentales hasta alcanzar la falla versus la ductilidad alcanzada en cada ensayo. Por otro lado, la Figura 46 presenta la misma información, pero con un indicador que permite establecer la influencia de la relación entre la altura y el espesor (H/t) de cada espécimen con la resistencia a la fatiga.

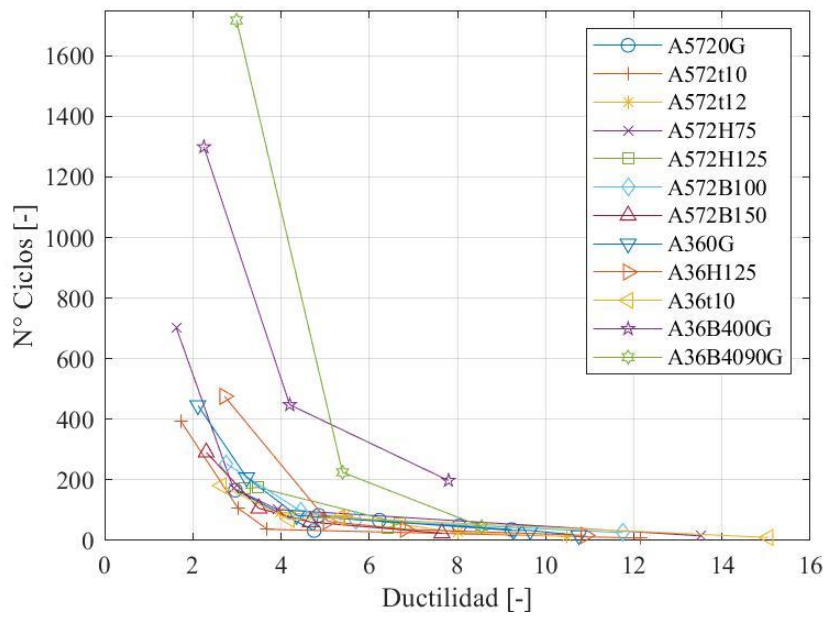


Figura 45. Número de ciclos a la falla versus la ductilidad alcanzada

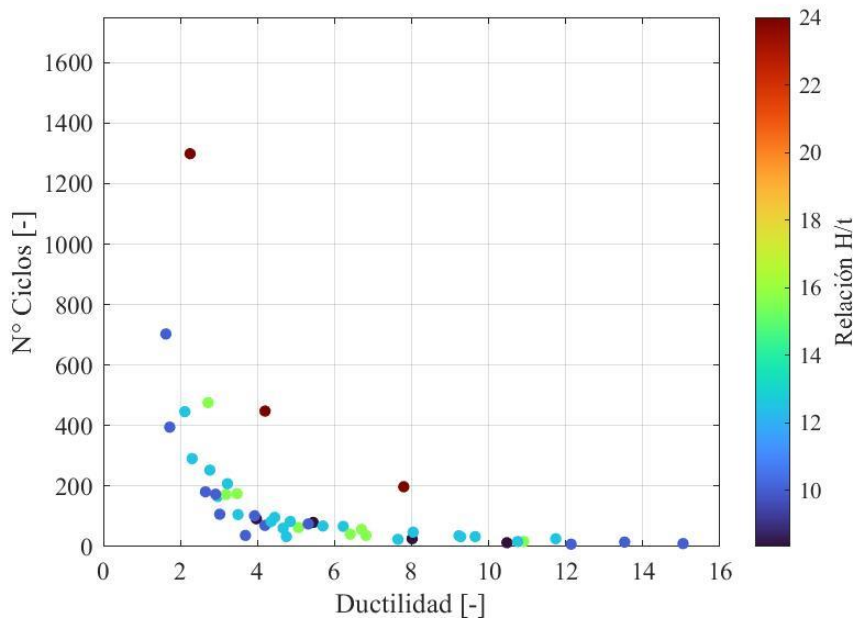
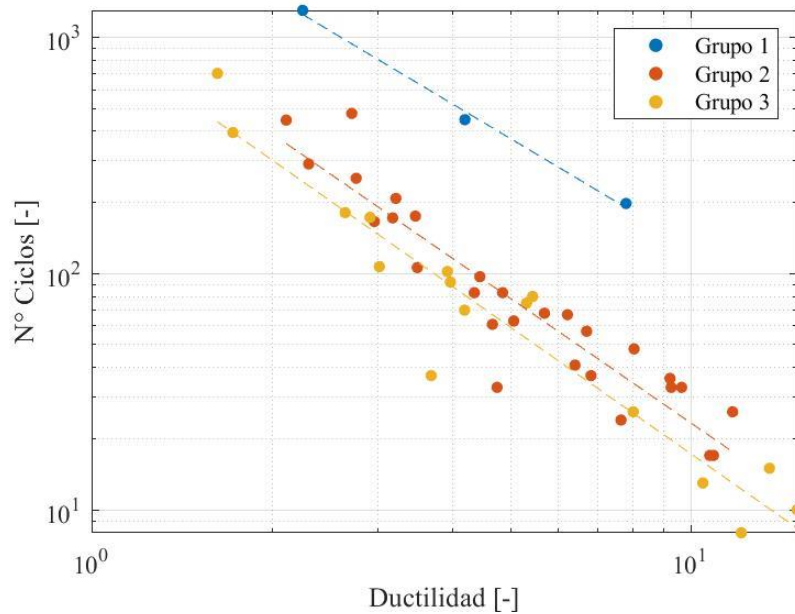


Figura 46. Número de ciclos a la falla versus la ductilidad alcanzada con la relación H/t



**Figura 47. Cantidad de ciclos a la falla versus la ductilidad alcanzada**

Los resultados muestran una clara relación entre la cantidad de ciclos a la falla y la ductilidad alcanzada por el espécimen, la cual queda reflejada en que a medida que aumenta la demanda de ductilidad, la cantidad de ciclos que es capaz de resistir la probeta disminuye de manera exponencial. Por otro lado, la Figura 47 muestra que a medida que la relación  $H/t$  aumenta, también lo hace la cantidad de ciclos a la falla. Esto se condice con lo planteado en el trabajo de Deng et al. [26], donde, según la ecuación (13), a medida que la relación  $H/t$  crece también lo hace la cantidad de ciclos que resiste el elemento ante esta demanda. Sin embargo, esta ecuación planteada por Deng et al. no relaciona la fatiga a la ductilidad, lo que se considera una limitante. La razón por la que existe esta relación con la ductilidad es por el mecanismo de deformación asociado. Una mayor ductilidad implica un mayor desplazamiento y, este a su vez, implica un aumento de las zonas que incurren en el rango plástico, generando más daño. Por otro lado, a medida que la relación  $H/t$  aumenta, disminuye la deformación experimentada por la fibra más demandada, lo que favorece a la vida de fatiga.

$$\frac{H}{t} = 4.35Num^{0.53} \quad (Deng \text{ et al [26].}) \quad (13)$$

A partir de los resultados obtenidos, se puede establecer una relación entre la ductilidad y la cantidad de ciclos antes de la falla. Adicionalmente, en esta tesis se propone separar la influencia del parámetro  $H/t$  en 3 grupos representativos de los ensayos realizados. La Tabla 7 presenta el rango de valores de  $H/t$  que abarca cada Grupo. Luego, se ajustaron curvas exponenciales para cada grupo, las cuales quedan establecidas por las ecuaciones (14), (15) y (16), correspondientes a los grupos 1, 2 y 3,

respectivamente. En dichas ecuaciones,  $N_c$  corresponde al número de ciclos a la falla y  $\mu$  corresponde a la ductilidad alcanzada.

**Tabla 7. Grupos en base a H/t**

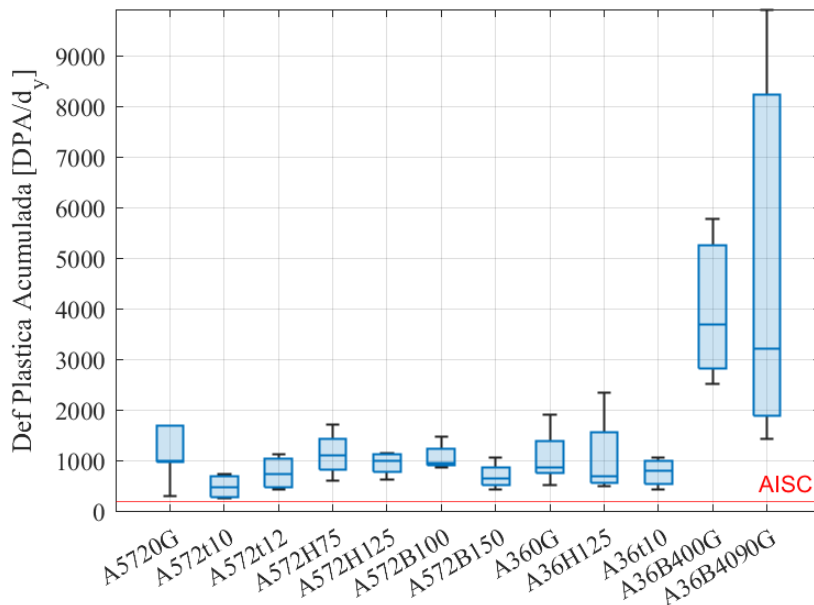
Grupo	Valores de H/t
1	] 20, +∞ [
2	]10,20]
3	]0, 10]

$$N_c = 4399\mu^{-1.63} \quad (14)$$

$$N_c = 1217\mu^{-1.71} \quad (15)$$

$$N_c = 1041\mu^{-1.77} \quad (16)$$

Adicionalmente, los resultados demuestran que este tipo de disipadores cumple con el criterio impuesto por la AISC para disipadores metálicos. Dicho criterio consiste en que el espécimen debe superar 200 veces el desplazamiento de fluencia durante las incursiones en el rango plástico. Los resultados se presentan en la Figura 48, donde se observa que en todos los ensayos se cumple el criterio establecido por la AISC. De esta figura también se observa que las probetas A36B400G y A36B4090G tienen una deformación plástica acumulada significativamente superior a las otras probetas. Este comportamiento puede estar asociado a la alta relación de H/t que tienen dichas probetas, ya que como se mencionó en los resultados de fatiga, esta relación hace que el número de ciclos a la falla aumenten.



**Figura 48. Deformación plástica acumulada**

### 2.2.7 Rigidez

La rigidez corresponde a la resistencia generada por un cuerpo cuando este sufre una deformación o desplazamiento relativo entre alguna de sus partes. La cuantificación de esta propiedad es importante para el diseño, ya que permite estimar las fuerzas del sistema bajo diferentes niveles de desplazamiento. En general, existen varios tipos de rigidez, como es la rigidez en el rango elástico o el plástico, o las rigideces secante y tangente. En este caso, interesan los datos correspondientes a la rigidez inicial correspondiente a la zona lineal-elástica, la cual se puede obtener como la pendiente de la zona lineal en la curva Fuerza-Desplazamiento. El proceso para encontrar la rigidez consistió en realizar un ajuste lineal utilizando puntos dentro de la zona lineal-elástica, donde luego la rigidez se identifica como la pendiente de esta regresión. Los puntos seleccionados para esta regresión fueron aquellos en que el desplazamiento fuera menor a un 90% del desplazamiento de fluencia teórico (i.e. el calculado con la ecuación (10)). En primer lugar, se observó que el desplazamiento de fluencia teórico tiene buena correlación con la primera fluencia registrada por los strain gauges, por lo que es un buen indicador para identificar el fin de la zona lineal de la curva fuerza-desplazamiento. Luego, se eligió un 90% de este valor para asegurar que los puntos seleccionados se encontraran en la zona lineal de la curva.

En este contexto, Baird et al [30] plantearon una fórmula para estimar la rigidez inicial que debiera tener un elemento U-Shaped cuando es cargado en  $0^\circ$ . Esta fórmula se presenta en la ecuación (17), donde  $E$  es el módulo de elasticidad del acero,  $b$  es el ancho del espécimen,  $t$  es el espesor del espécimen y  $D$  es el diámetro de la parte curva medido desde los centros del espesor. Por otro lado, actualmente, no existe una fórmula para estimar la rigidez cuando el elemento es cargado en  $90^\circ$ .

$$k_0 = \frac{16EB}{27\pi} \left(\frac{t}{D}\right)^3 \quad (17)$$

La rigidez elástica obtenida experimentalmente se presenta en la Tabla 8 para cada probeta junto con la calculada mediante el uso de la ecuación (17). Al observar estos datos se concluye que la rigidez es directamente proporcional al espesor ( $t$ ) y al ancho ( $B$ ) e inversamente proporcional a la altura  $H$ . Es decir, la rigidez inicial aumenta a medida que aumenta el espesor o el ancho, o bien, disminuye la altura. Este resultado experimental es concordante con la ecuación (17), donde se observa que la rigidez está relacionada con la relación de aspecto  $t/D$ , por ende, si esta aumenta, entonces lo hace también la rigidez. Por otro lado, es lógico que si se aumenta el ancho ( $B$ ) del dissipador, manteniendo los demás parámetros constantes, se aumenta la rigidez de manera lineal. De estos resultados también se observa que la rigidez aumenta cuando la dirección de carga va en  $90^\circ$ . Sin embargo, debido a que solo se tiene una configuración geométrica que fue cargada en  $90^\circ$ , no se considera apropiado considerar una tendencia en este caso.

**Tabla 8. Rigidez por espécimen**

	Rigidez [Tf/mm]			
	Fati1	Fati2	Fati3	Teórico (Ec.(17))
A5720G	0.149	0.139	0.142	0.190
A572t10	0.307	0.230	0.226	0.396
A572t12	0.357	0.426	0.393	0.731
A572H75	0.286	0.243	0.223	0.396
A572H125	0.075	0.089	0.084	0.092
A572B100	0.217	0.209	0.215	0.253
A572B150	0.253	0.261	0.268	0.379
A360G	0.141	0.154	0.142	0.190
A36H125	0.081	0.081	0.072	0.092
A36t10	0.360	0.296	0.293	0.396
A36B400G	0.010	0.012	0.010	0.013
A36B4090G	0.020	0.022	0.023	-

En la Figura 49 se observa la razón que hay entre la rigidez experimental y la rigidez teórica. De esta figura se aprecia que, en promedio, la rigidez experimental es un 24% menor que la estimada por la ecuación (17). Una de las razones por explicar esta diferencia se atribuye al ajuste lineal realizado para estimar la rigidez experimental. Para descartar esta posibilidad se calculó la rigidez con distintos ajustes. La primera selección consistió en utilizar los 10 primeros puntos de la curva, mientras que la segunda selección consistió en usar los 5 primeros puntos. En la Figura 50 se puede ver la razón entre la rigidez experimental calculada con las distintas selecciones de puntos y la rigidez teórica. De esta figura se observa que al usar una menor cantidad de puntos la razón entre la rigidez experimental y la teórica tiende a un valor igual a 1. Sin embargo, en promedio los valores de rigidez experimental siguen siendo menores al valor teórico. Otra razón que puede existir para explicar la diferencia en rigidez está relacionada a la manufactura de estos elementos. Los elementos U-Shaped deben ser doblados con rodillos para poder tener su característica zona circular, y es en este proceso que se pueden inducir esfuerzos residuales y deformaciones remanentes que afecten la rigidez del elemento.

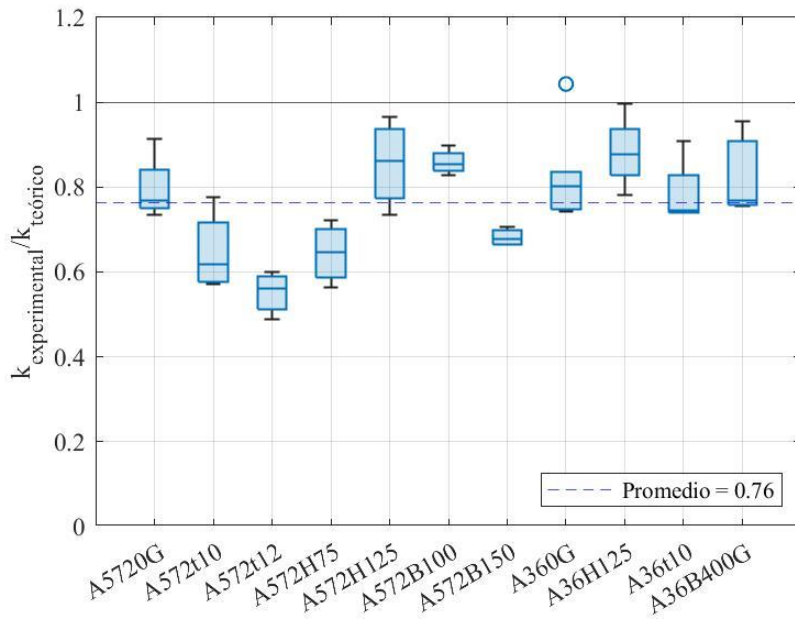


Figura 49. Razón entre la rigidez experimental y la calculada con la ecuación (17)

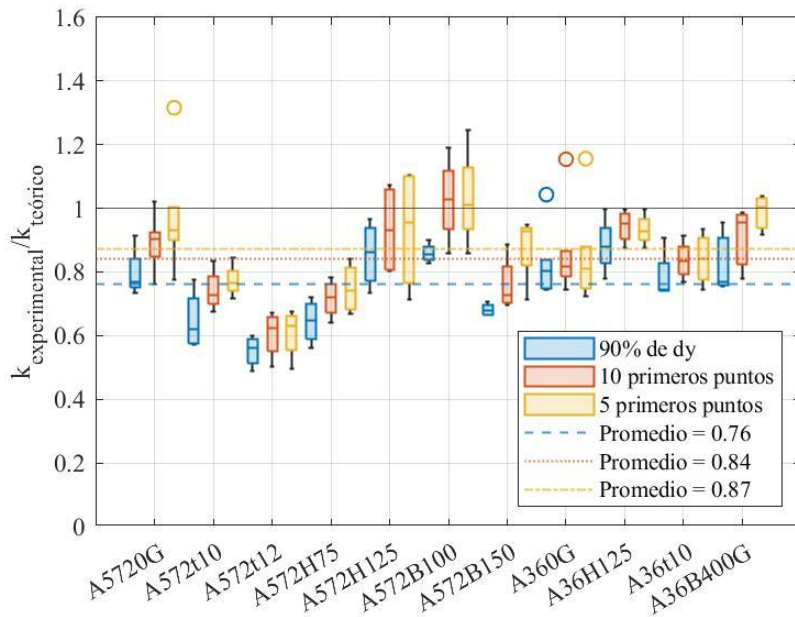
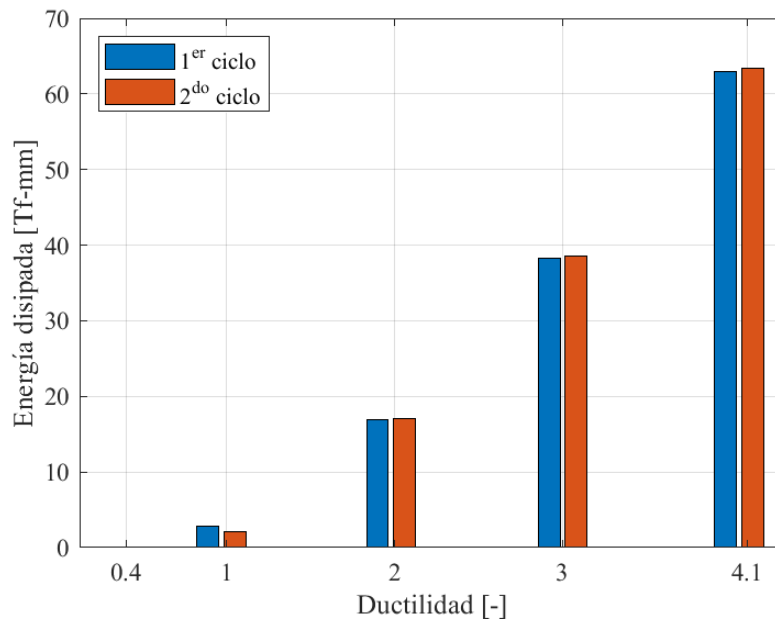


Figura 50. Razón de la rigidez experimental con los tres métodos y la rigidez teórica

### 2.2.8 Energía

Dado que en este trabajo se presenta un dispositivo de disipación de energía, como su nombre lo indica, es importante cuantificar la energía que disipa este dispositivo. En los elementos U-Shaped, la energía se disipa en forma de deformación plástica y de daños. La cuantificación es importante dado que permite estimar cuánta energía inyectada a la estructura por un sismo es capaz de ser disipada por estos

elementos. En esta sección se describen las características de la capacidad de energía disipada de los elementos U-Shaped. La energía disipada por el elemento metálico se calculó como el área encerrada por la curva fuerza-desplazamiento. En la Figura 51 se observa la energía disipada por la probeta A360G en los 10 primeros ciclos del protocolo Amplitud Creciente. Se presenta este protocolo de carga, ya que permite comparar la cantidad de disipación de energía de una misma probeta sometida a distintos niveles de ductilidad. De esta figura se observa que a medida que aumenta la ductilidad aumenta la energía disipada. También, se observa que la energía disipada en el segundo ciclo no varía significativamente con respecto a la del primer ciclo. Esto es un indicador de que el endurecimiento isotrópico del acero no afecta en gran medida la disipación del elemento. Por otro lado, se observa que en algunos especímenes o niveles de ductilidad ocurre el caso de que la energía del segundo ciclo disminuye con respecto a la del primero, como se muestra en la Figura 51 para el nivel de ductilidad 1. Esto indica que hay casos en que comienza a haber degradación de los especímenes desde un comienzo del ensayo.



**Figura 51. Energía disipada en el ensayo A360GAmpCrec**

Por otro lado, también se realizó el cálculo del amortiguamiento histerético. El amortiguamiento histerético corresponde a un factor de amortiguamiento utilizado para representar la disipación de energía efectuada por el comportamiento no lineal de una estructura o sistema. La importancia de calcularlo radica en que con este valor se puede estimar de manera más simple la respuesta de un sistema que posea cierto nivel de amortiguamiento. Este se calcula mediante el uso de la Ecuación (18), donde  $A_d$  equivale a la energía disipada por un ciclo,  $F_{max,ciclo}$  es la fuerza máxima alcanzada en un ciclo y  $\delta_{ciclo}$  es el desplazamiento asociado a ese ciclo [36]. En la Figura 52 se presenta el amortiguamiento histerético alcanzado por los distintos especímenes para distintas demandas de ductilidad. En esta figura se observa que el elemento U-Shaped alcanza valores superiores al 45% a medida que aumenta la

ductilidad experimentada por el dispositivo. También, se observa que para ductilidades mayores a 5 se alcanza un amortiguamiento que supera el 40%, lo cual es considerado un valor apropiado para los niveles de ductilidad que experimenta el disipador de energía. Además, se ajustó una curva racional para poder estimar el nivel de amortiguamiento hysterético según el nivel de ductilidad. La importancia de esta curva está en que permite estimar el nivel de amortiguamiento hysterético suministrado por disipadores U-Shaped a diferentes niveles de ductilidad. La expresión se presenta en la ecuación (19). Esta ecuación se puede utilizar para estimar el nivel de amortiguamiento añadido por estos dispositivos al momento de estar realizando un diseño sísmico basado en desplazamiento o por desempeño.

$$\xi_{hyst} = \frac{1}{2\pi} \frac{A_d}{F_{max,ciclo} \cdot \delta_{ciclo}} \quad (18)$$

$$\xi_{hyst} = \frac{(62.94\mu - 21.42)}{\mu + 2.57} \quad (19)$$

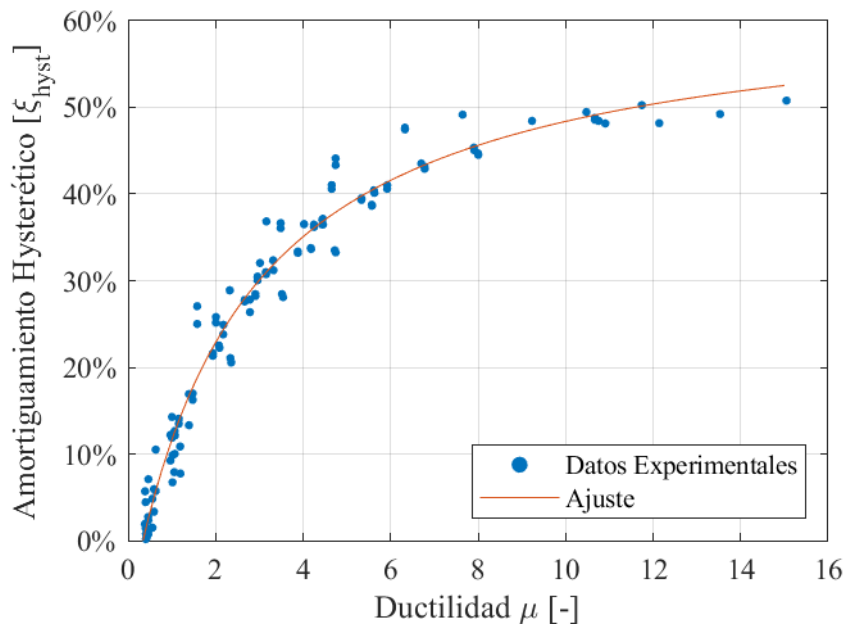


Figura 52. Amortiguamiento hysterético

# 3. MODELACIÓN NUMÉRICA

En este capítulo se describen los modelos de elementos finitos desarrollados en este trabajo. Estos modelos fueron realizados en el programa ANSYS [37], el cual fue facilitado por el Departamento de Ingeniería Mecánica de la USM. El objetivo con que se realizaron estos modelos es obtener más información acerca del comportamiento de los elementos U-Shaped cuando estos están sujetos a un desplazamiento de demanda en la dirección de  $90^\circ$ . Además, se busca obtener información acerca del comportamiento histerético de un disipador compuesto por elementos U-Shaped orientados en distintos ángulos, por lo que también se realizan simulaciones de estos dispositivos.

## 3.1 SIMULACIÓN DE ENSAYOS EXPERIMENTALES

### 3.1.1 Descripción del Modelo

El modelo de elementos finitos fue construido en el software ANSYS, considerando solo algunos de los especímenes utilizados en los ensayos experimentales. Los modelos fueron desarrollados considerando las dimensiones de los especímenes y el tipo de acero utilizado. Además, los modelos incorporan las conexiones entre cuerpos, condiciones de borde y demandas de desplazamiento generadas en el programa experimental. Todos los análisis fueron de tipo Estático Estructural. Mayores detalles se indican a continuación:

#### 3.1.1.1 Geometría

El modelo está formado por tres volúmenes (elementos). Un volumen considera el elemento U-Shaped, el cual se definió como un cuerpo deformable. Mientras que los otros dos cuerpos corresponden a las placas de conexión, modeladas como cuerpos rígidos. Las dimensiones del elemento U-Shaped varían de acuerdo con las probetas ensayadas. Las placas de conexión están modeladas como prismas

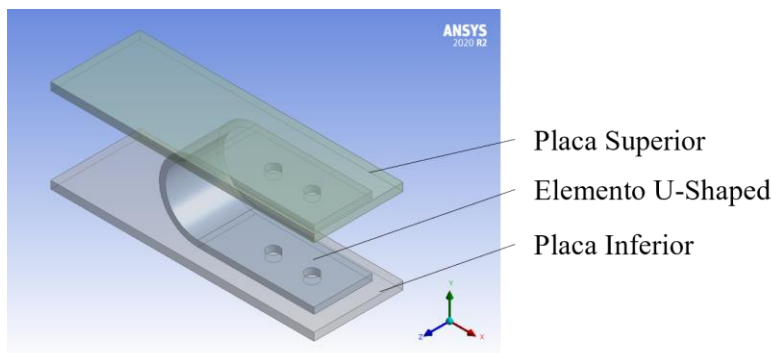


Figura 53. Geometría del modelo de elementos finitos

rectangulares, con dimensiones tales de que cualquier deformación que sufra el elemento U-Shaped no pase a través de los planos formados por las placas. En la Figura 53 se muestra la geometría generada para los modelos de elementos finitos realizados, junto con la denominación de cada volumen.

### 3.1.1.2 Material

El material utilizado debe ser capaz de caracterizar el comportamiento del acero utilizado en los ensayos de laboratorio (i.e. acero A572 o A36). Es por esto, que el material utilizado posee una elasticidad isotrópica, donde se definió un valor para el módulo de elasticidad y un módulo de poisson. Para el valor del módulo de poisson se utilizó un valor de 0.3, mientras que el módulo de elasticidad es uno de los parámetros a variar en la calibración. Otra propiedad que se asignó a este material fue el modelo de endurecimiento cinemático de Chaboche [38], el cual se define según la ecuación (20) donde,  $\alpha$  corresponde al desplazamiento de la superficie de fluencia del material,  $n$  corresponde al número de curvas que se utilizarán para caracterizar el material,  $C_k$  y  $\gamma_k$  son parámetros del modelo, y  $\bar{\epsilon}^{pl}$  es la deformación plástica equivalente. En este modelo, se utilizó un valor de  $n$  igual a 1 por simplicidad, dado que no se tiene una curva de Coupon a la cual ajustar la curva del programa. Por otro lado, los valores de  $C_k$  y  $\gamma_k$  fueron variando en la parametrización realizada. Asumiendo que la curva esfuerzo deformación debiera llegar al valor del esfuerzo último, se mantuvo la relación  $C_k/\gamma_k$  igual a la diferencia entre los  $f_u$  y  $f_y$  presentados en la Tabla 2. Adicionalmente, el modelo incorpora la ley de endurecimiento isotrópico de Voce [39], la cual queda definida con la ecuación (21). Donde,  $\sigma^0$  indica el valor actualizado del esfuerzo de fluencia debido al endurecimiento,  $\sigma|_0$  indica el esfuerzo de fluencia inicial,  $Q_l$  y  $Q_\infty$  indican el coeficiente lineal y exponencial de endurecimiento, respectivamente,  $\nu$  es el parámetro de saturación y  $\bar{\epsilon}^{pl}$  es la deformación plástica equivalente. En este modelo, se asumió que el esfuerzo se satura a un valor constante, por lo que el valor de  $Q_l$  se tomó como 0. El parámetro  $Q_\infty$  se tomó como la diferencia entre  $f_u$  y  $f_y$ , y el parámetro  $\nu$  se hizo variar en la calibración.

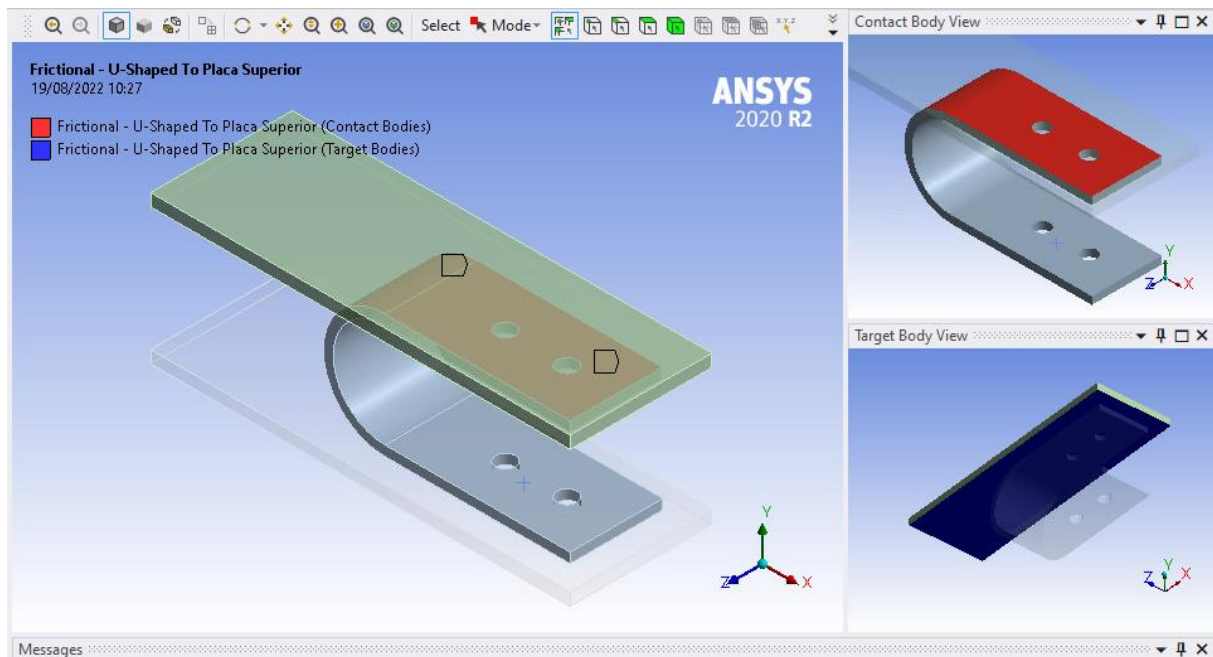
$$\alpha = \sum_{k=1}^n \frac{C_k}{\gamma_k} \left(1 - e^{-\gamma_k \bar{\epsilon}^{pl}}\right) \quad (20)$$

$$\sigma^0 = \sigma|_0 + Q_l \bar{\epsilon}^{pl} + Q_\infty \left(1 - e^{-\nu \bar{\epsilon}^{pl}}\right) \quad (21)$$

### 3.1.1.3 Conexiones entre cuerpos y Condiciones de Borde

En el modelo se realizaron conexiones entre cuerpos y se impusieron condiciones de borde, ya que existe interacción entre los elementos. Las condiciones de borde se impusieron a las placas de conexión. A la placa de conexión inferior se le impuso una restricción de movimiento en todos los puntos de la cara inferior, mientras que a la conexión superior se le impuso una serie de desplazamientos para simular el protocolo de carga utilizado en los ensayos. Las conexiones que se impusieron en el modelo son entre el elemento U-Shaped y las placas de conexión. Se estableció que el desplazamiento de los puntos en la

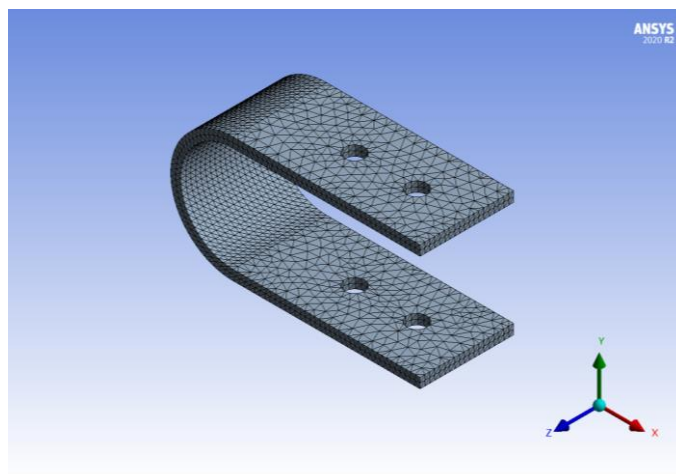
superficie de los agujeros del disipador fuera el mismo desplazamiento de la placa de conexión adyacente. De esta forma el movimiento queda condicionado a la conexión apertada. Además, se establecieron superficies de contacto, las que están referidas a la cara exterior del disipador y a las de las placas en contacto con el elemento U-Shaped. En la Figura 54 se presentan las caras que están afectas a este tipo de contacto. La interacción de los elementos se definió como un contacto con fricción, donde se asumió un coeficiente de fricción de 0.3.



**Figura 54. Captura de pantalla de las superficies seleccionadas para el contacto friccional**

#### 3.1.1.4 Mallado

El mallado en los modelos de elementos finitos se refiere a la subdivisión de un volumen en elementos más pequeños para poder ejecutar el método de elementos finitos, y mejorar la precisión y exactitud de los resultados. El tamaño general de los elementos se determinó igual a 4 mm. Este valor se determinó de tal manera de minimizar el tiempo de cálculo sin perder mucha precisión en los cálculos y logrando una convergencia apropiada. El tipo de elemento utilizado son tetraedros de segundo orden (Tet10). Además, se definió que el espesor quedara definido por al menos dos elementos, tal como se muestra en la Figura 55.



**Figura 55. Mallado utilizado para los modelos de elementos finitos**

### 3.1.1.5 Protocolo de desplazamiento

El protocolo de carga fue en base a desplazamientos. Esto se ejecutó mediante una tabla que contiene los datos de tiempo y desplazamientos correspondientes. Este desplazamiento, como se mencionó anteriormente, fue impuesto en la cara superior de la placa de conexión superior. En las simulaciones solo se impuso un desplazamiento en la dirección X (carga a  $0^\circ$ ), dejando los otros desplazamientos y giros con un valor de cero a lo largo de todo el protocolo.

### 3.1.1.6 Consideraciones Adicionales

A continuación, se mencionan otras consideraciones que se aplicaron a los modelos de elementos finitos.

- Se utilizó la opción de “Large Deflection”, la cual toma en cuenta que los puntos pueden desplazarse grandes distancias y llegar a cambiar la geometría del elemento.
- El paso de tiempo (delta tiempo) de los análisis quedó definido de la siguiente manera: en cada paso la primera iteración se realizó a 0.015 s; el máximo paso de tiempo por iteración se definió en 0.04 s y el mínimo en 0.001 s. Estos pasos de tiempo se definieron con un análisis previo donde se minimizaba el tiempo de cálculo sin perder precisión en los resultados.

### 3.1.2 Calibración

Con el objetivo de ajustar los resultados de las simulaciones numéricas con los resultados experimentales, se realizó una calibración de ciertos parámetros del modelo de elementos finitos. Los parámetros considerados son el módulo de elasticidad del acero ( $E_S$ ), los valores de  $C_k$  y  $\gamma_k$  del modelo de endurecimiento cinemático, y el parámetro  $\nu$  del modelo de endurecimiento isotrópico. Dada la variedad de coladas usadas en los ensayos experimentales, se eligieron muestras de solo dos coladas. El primer acero considerado es el A572 de la colada 1. Se eligió este acero porque fue el utilizado en la fabricación de gran cantidad de probetas. El segundo acero considerado es el A36 de la colada 6. Se eligió este acero, ya que se utilizó en el único espécimen que fue cargado en dos direcciones de carga

(i.e.  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ), por lo que se puede evaluar la validez del modelo cuando se cambia el tipo de demanda luego de haber calibrado el material.

Cabe destacar que la razón para modificar el módulo de elasticidad del acero es que no hay certeza de cuanto es este valor en los aceros utilizados en los ensayos experimentales, ya que ensayos a tracción uniaxial de cupones obtenidos de la colada 6 entregaron valores de 73,567 y 78,737 [MPa], los cuales son claramente inferiores al valor nominal de 200,000 MPa. También, está el hecho de que en los resultados experimentales se ve una clara diferencia entre los valores de rigidez teóricos y experimentales. La razón para calibrar los otros dos parámetros es que estos deben ser calibrados debido a la variabilidad que puede haber entre una colada y otra.

Para las calibraciones, se utilizó la curva fuerza desplazamiento de la probeta A5720G bajo el protocolo de carga Fatiga 1 para el acero de la colada 1. Mientras que para el acero de la colada 6, se utilizó la curva generada por el protocolo de carga Fatiga 1 en la probeta A36B400G. A partir de estas curvas, lo primero que se hizo fue calibrar el módulo de elasticidad, para lo cual se utilizó como valor comparativo la rigidez elástica presentada en la Tabla 8. En el espécimen simulado se calculó la rigidez como la pendiente de la zona lineal del ensayo, para luego introducirla en la ecuación (22) y minimizarla. Posteriormente, se calibraron de manera simultánea los parámetros  $\gamma_1$  y  $\nu$ . Para esto, se comparó punto a punto la curva fuerza desplazamiento generada por un ciclo del protocolo de carga. La función objetivo a minimizar en este caso se presenta en la ecuación (23).

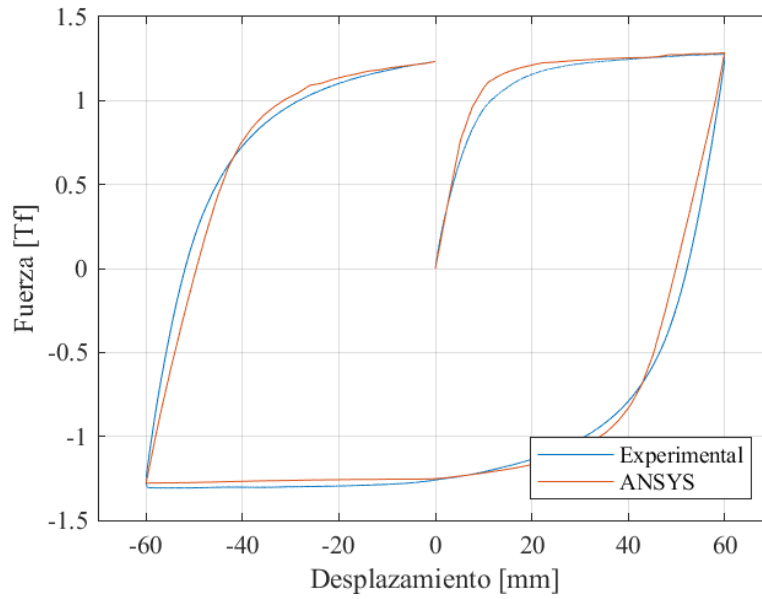
$$DIF = \frac{|k_{sim} - k_{exp}|}{k_{sim}} \quad (22)$$

$$RMSE = \frac{\sqrt{\frac{\sum (F_{sim} - F_{exp})^2}{n}}}{\sqrt{\frac{\sum F_{sim}^2}{n}}} \quad (23)$$

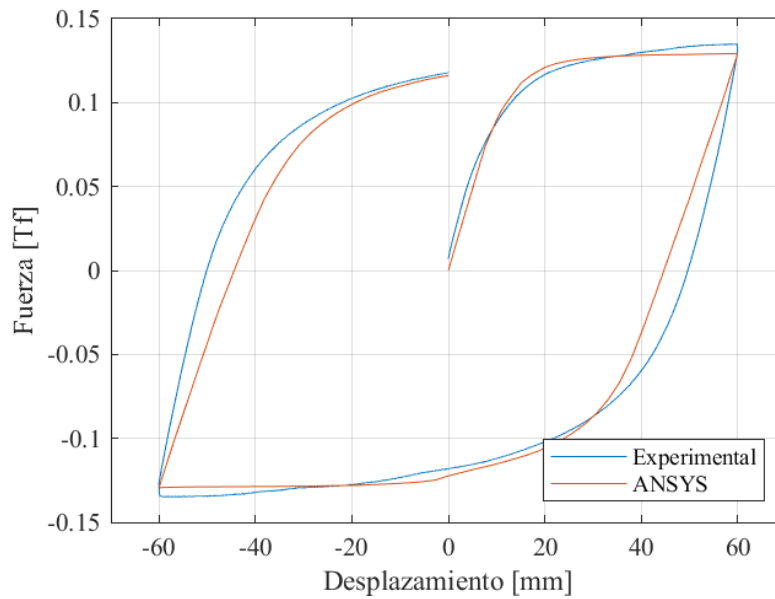
Los resultados de los parámetros calibrados se presentan en la Tabla 9. El valor de *DIF* para la calibración de la Colada 1 y 6 fue de 0.73% y 0.74%, respectivamente, luego de haber seleccionado el valor del módulo de elasticidad E. En el caso de los parámetros  $C_1$ ,  $\gamma_1$  y  $\nu$ , el valor obtenido de RMSE fue 7.6% y 13.8% para las coladas 1 y 6, respectivamente. Además, en la Figura 56 y Figura 57 se presenta la comparación entre el primer ciclo experimental y numérico luego de haber realizado la calibración para dichos ensayos.

**Tabla 9. Parámetros luego de la calibración**

	Acero 572 Colada 1	Acero 36 Colada 6
$E$ [MPa]	105,000	97,500
$\gamma_1$ [-]	0.4	1
$C_1$ [Mpa]	60	160
$\nu$ [-]	1	1



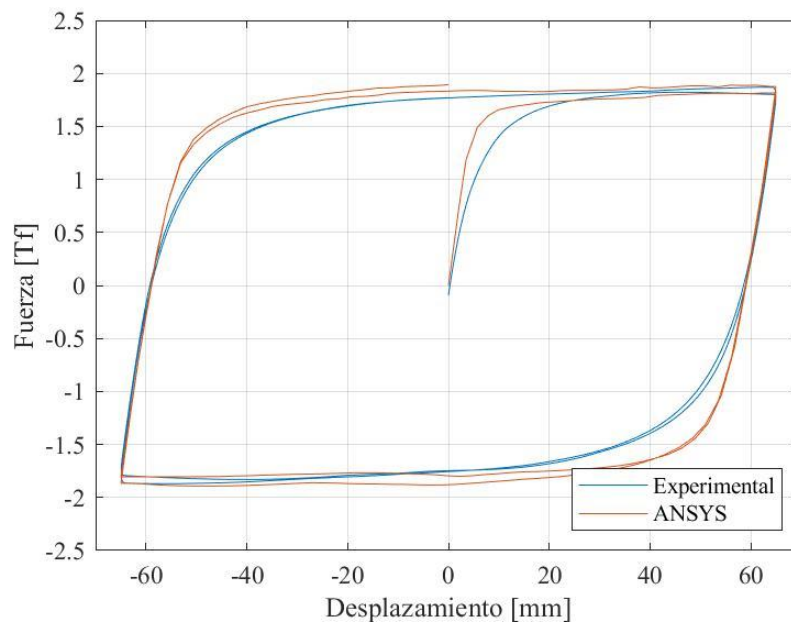
**Figura 56. Comparación del primer ciclo del ensayo A5720GFati1**



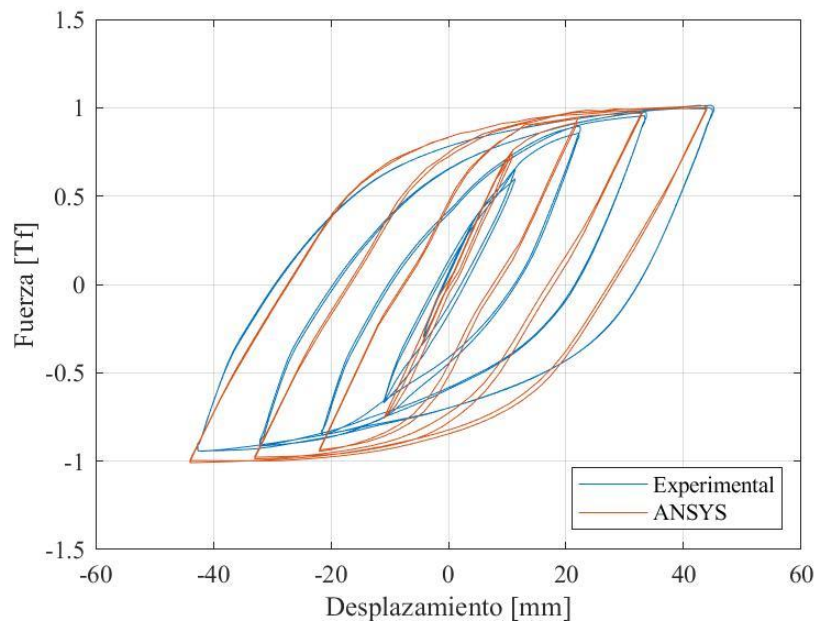
**Figura 57. Comparación del primer ciclo del ensayo A36B400GFati1**

### 3.1.3 Resultados y Discusión

Luego de haber calibrado los parámetros, se decidió construir un modelo de probetas distintas a las utilizadas en el proceso de calibración con el objetivo de comprobar que los parámetros obtenidos fueran aplicables para los otros casos. Con ese objetivo, se seleccionaron las probetas A572H75 y A572H125. El modelo de la probeta A572H75 fue sometido al protocolo de carga Fatiga 1, y en la Figura 58 se muestra la comparación entre las dos primeras curvas del protocolo de carga. Por otro lado, el modelo de la probeta A572H125 fue sometido al protocolo de Amplitud Creciente, y en la Figura 59 se muestra la comparación de las dos curvas en los 10 primeros ciclos. De estas figuras se observa que las curvas generadas por ANSYS se ajustan apropiadamente a las curvas obtenidas experimentalmente, obteniendo valores de RMSE igual a 8.97% para el ensayo A572H75Fati1, y 16.5% para el ensayo A572H125AmpCrec. Las mayores diferencias se observaron para el espécimen A572H125, Figura 59, debido a una sobrestimación de la rigidez de las probetas, lo cual genera leves diferencias en los valores máximos de fuerza de cada ciclo, sobre todo, en los primeros ciclos. A pesar de esto, el modelo es capaz de representar de manera adecuada, en términos de fuerza máxima, el comportamiento de los elementos U-Shaped.

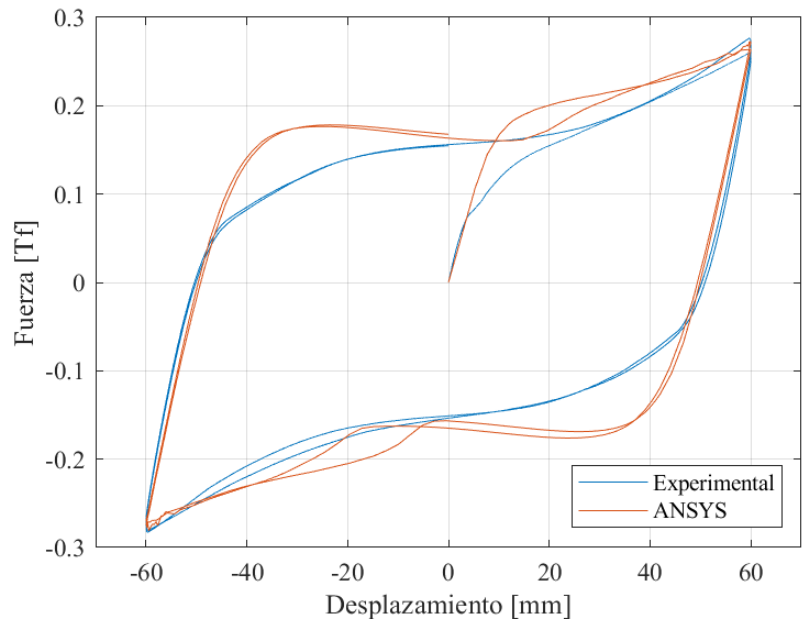


**Figura 58. Comparación de ciclos de histéresis en ensayo A572H75Fati1**

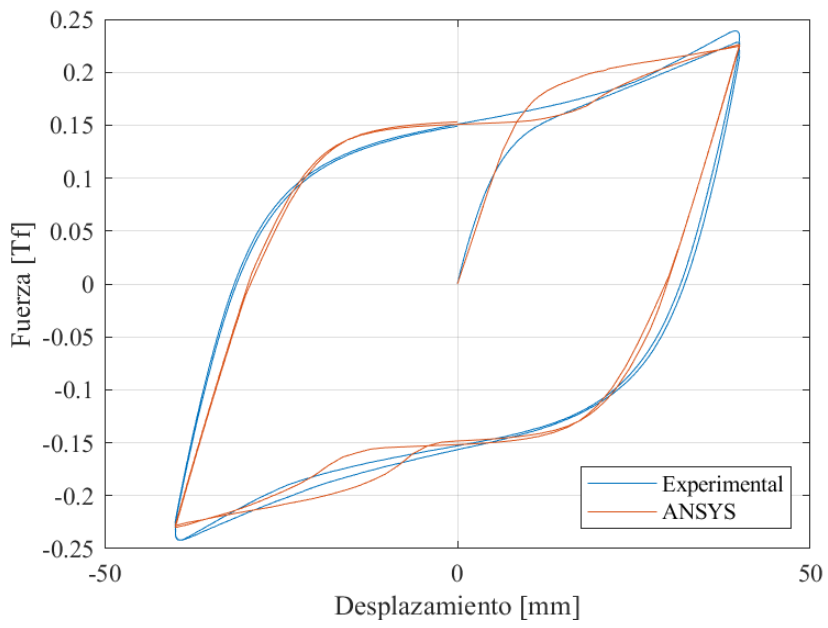


**Figura 59. Comparación de ciclos de histéresis en ensayo A572H125AmpCrec**

De la misma forma, luego de haber calibrado un material para representar el acero de la colada 6, se realizó un modelo donde la dirección del desplazamiento de demanda fue de  $90^\circ$ . En la Figura 60 se presenta la comparación de los resultados numéricos y experimentales, considerando los 2 primeros ciclos de histéresis bajo el protocolo Fatiga 1. Se puede notar una diferencia al momento de llegar a la fluencia en cada ciclo, lo cual puede explicarse, en parte, por el insuficiente apriete de los pernos, lo cual durante los ensayos resultó en deslizamientos de las probetas (ver sección 2.2.1). Sin embargo, se puede notar que la rigidez y el aumento de la fuerza post fluencia queda bien representada por el modelo de elementos finitos. De igual manera, se compararon los 2 primeros ciclos de la misma probeta sometida al protocolo Fatiga 2, ensayo en el cual el apriete de los pernos fue adecuado. En la Figura 61 se presenta la comparación de estas curvas, y se observa que los resultados numéricos logran representar adecuadamente el comportamiento del elemento U-Shaped cuando la carga es aplicada en  $90^\circ$ . En términos cuantitativos, los valores de RMSE fueron de 16.7% y 11.3% para los ensayos A36B4090GFati1 y A36B4090GFati2, respectivamente. Valores relativamente cercanos a los obtenidos en la calibración. De manera adicional, en la Figura 62 se presenta una comparación entre la deformada de la probeta para la carga en  $90^\circ$ . En esta se observa que la deformada generada por el software representa de buena manera lo ocurrido en el ensayo experimental.



**Figura 60. Comparación de ciclos de histéresis en ensayo A36B4090GFat1**



**Figura 61. Comparación de ciclos de histéresis en ensayo A36B4090GFat2**

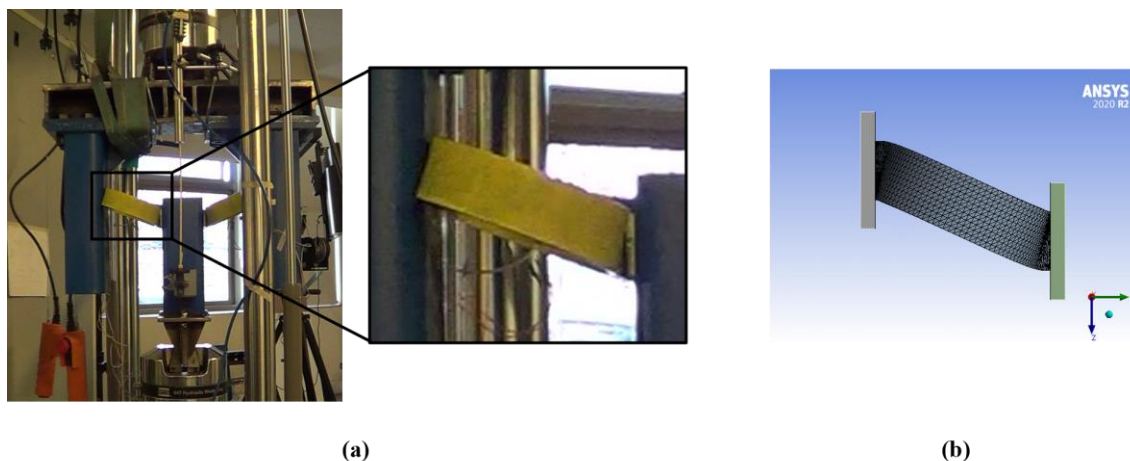


Figura 62. Comparación entre la deformada del ensayo a 90°. (a) Experimental (b) Ansys

### 3.2 INFLUENCIA DE LA DIRECCIÓN DE CARGA Y DE RELACIONES GEOMÉTRICAS EN LA RIGIDEZ Y FLUENCIA

En esta sección se describe el proceso utilizado para obtener, mediante el uso de modelos de elementos finitos, relaciones entre las propiedades de rigidez y fluencia cuando un elemento U-Shaped está cargado en dirección de 0° y cuando está cargado en 90°. Encontrar una relación entre estos parámetros tiene un valor significativo, ya que en la literatura no existen muchas fórmulas analíticas para encontrar propiedades de los elementos U-Shaped cuando estos son cargados en 90°. Establecer estas relaciones permite tener más herramientas para realizar un diseño adecuado de estos elementos ante cargas bidireccionales.

#### 3.2.1 Descripción del Procedimiento

En primer lugar, se propone que la relación entre las propiedades sea a través de un coeficiente tal que al multiplicar dicho coeficiente por la propiedad obtenida en 0° permita estimar la propiedad de interés en 90°. Esta relación se presenta en las ecuaciones (24) y (25), donde el subíndice 90° indica que es la propiedad cuando la carga se aplica en 90°, el subíndice 0° indica que es la propiedad cuando la carga se aplica en 0°, y el factor  $C_X$  es el factor que relaciona las variables anteriores para la propiedad  $X$ , la cual puede ser la rigidez  $K$  o la fuerza de fluencia  $F_y$ .

$$K_{90^\circ} = C_K K_{0^\circ} \quad (24)$$

$$F_{y_{90^\circ}} = C_{F_y} F_{y_{0^\circ}} \quad (25)$$

Lo que se busca encontrar en esta sección son valores apropiados de las constantes  $C_X$  que estén definidas en función de parámetros geométricos de los elementos U-Shaped. En primer lugar, se definen variables

independientes en base a las cuales se puedan estimar valores de  $C_x$ . Las variables seleccionadas corresponden a: la relación de aspecto alto/espesor ( $H/t$ ), la relación de aspecto ancho/espesor ( $B/t$ ), y la relación de aspecto largo efectivo/ancho ( $L'/B$ ), donde el largo efectivo se mide desde el comienzo de la parte circular hasta el comienzo de la conexión apernada.

La variable  $H/t$  se incluyó debido a que en trabajos anteriores [24, 26, 30] se ha determinado que esta relación tiene una gran influencia en varios parámetros y comportamiento de los elementos U-Shaped. La variable  $B/t$  se incluyó debido a su influencia en el modo de deformación cuando la carga va en dirección de  $90^\circ$  (discutido anteriormente en la sección 2.2.1). La variable  $L'/B$  se incluyó para evaluar la influencia del largo de los brazos del dissipador en relación con el ancho del dissipador. Luego de haber seleccionado las variables, se definió un rango de valores para cada variable, con el fin de limitar los resultados obtenidos a estos rangos de aplicabilidad. Los rangos para cada variable se presentan en la Tabla 10, donde el rango de literatura es el rango en que se encuentra determinada la variable considerando los ensayos de laboratorio de elementos U-Shaped realizados por distintos investigadores, y el rango de trabajo es el rango de cada variable en el cual se enfoca este trabajo. Estos rangos difieren uno del otro, ya que se busca que las relaciones de aspecto de los elementos representen valores que podrían llegar a ser utilizados en el diseño de dissipadores U-Shaped.

**Tabla 10. Rangos de las variables geométricas utilizadas**

Variable	Rango de literatura	Rango de trabajo
$H/t$	[8.33 – 25.00]	[8.00 – 16.00]
$L'/B$	[1.00 – 3.00]	[1.00 – 3.00]
$B/t$	[6.25 – 18.75]	[6.00 – 12.5]

Luego de definir los rangos de trabajo, se comenzaron a construir los modelos de elementos finitos con distintos valores para las relaciones geométricas. Como el objetivo de esta sección es generar tablas con ecuaciones desde las que se pueda estimar los factores  $C_x$ , se discretizaron las variables a trabajar. En primer lugar, dado que la variable  $L'/B$  es la que posee un rango más acotado, se discretizó esta variable en los valores  $L'/B = \{1; 2; 3\}$ . Luego, se continuó con la variable  $B/t$ , la cual también se discretizó en tres valores, que son  $B/t = \{6; 9.25; 12.5\}$ . Finalmente, la variable  $H/t$ , al ser la variable más utilizada en investigaciones anteriores, se discretizó en 33 valores equidistantes entre los límites del rango de trabajo correspondiente. Con los valores a utilizar ya definidos, se realizaron 297 modelos, lo cuales son el resultado de hacer una combinación entre los 3 conjuntos de valores ya mencionados.

La construcción de los modelos de elementos finitos es idéntica a la descrita en la sección anterior (véase sección 3.1.1). Las diferencias radican en el material utilizado y en el protocolo de carga aplicado. El material utilizado en estos modelos corresponde al material obtenido en la calibración para el acero A572 de la colada 1. Por otro lado, en cada uno de los modelos se aplicaron dos protocolos de carga

monotónicos, uno en  $0^\circ$  y otro en  $90^\circ$ . Esto, con el fin de identificar la rigidez y el punto de fluencia en cada una de las dos direcciones. De las curvas fuerza-desplazamiento de estos modelos se obtuvo la rigidez y la fuerza de fluencia con el mismo método utilizado en los resultados de los ensayos experimentales. De esta manera, para cada probeta, se calculó el valor  $C_K$  asociado a las relaciones geométricas correspondientes.

### 3.2.2 Análisis de Resultados

En la Figura 63 y la Figura 64 se muestran los valores obtenidos para  $C_K$  y  $C_{F_y}$  para los distintos valores de las relaciones geométricas del elemento U-Shaped. De estas figuras se pueden identificar distintos comportamientos para los factores  $C_K$  y  $C_{F_y}$  a medida que varían las relaciones geométricas. A medida que el valor de  $L'/B$  aumenta se puede ver que los factores tienden a disminuir, esto se podría explicar debido a que, al existir una mayor longitud, la rigidez y la fuerza de fluencia del elemento en  $90^\circ$  disminuye. Esto también se sustenta en que la relación  $L'/B$  no afecta en gran medida la rigidez y fuerza de fluencia en  $0^\circ$ , ya que, en teoría, no depende del largo efectivo  $L'$ .

Con respecto a la relación  $B/t$ , en general, se puede ver que a medida que aumenta esta relación, también

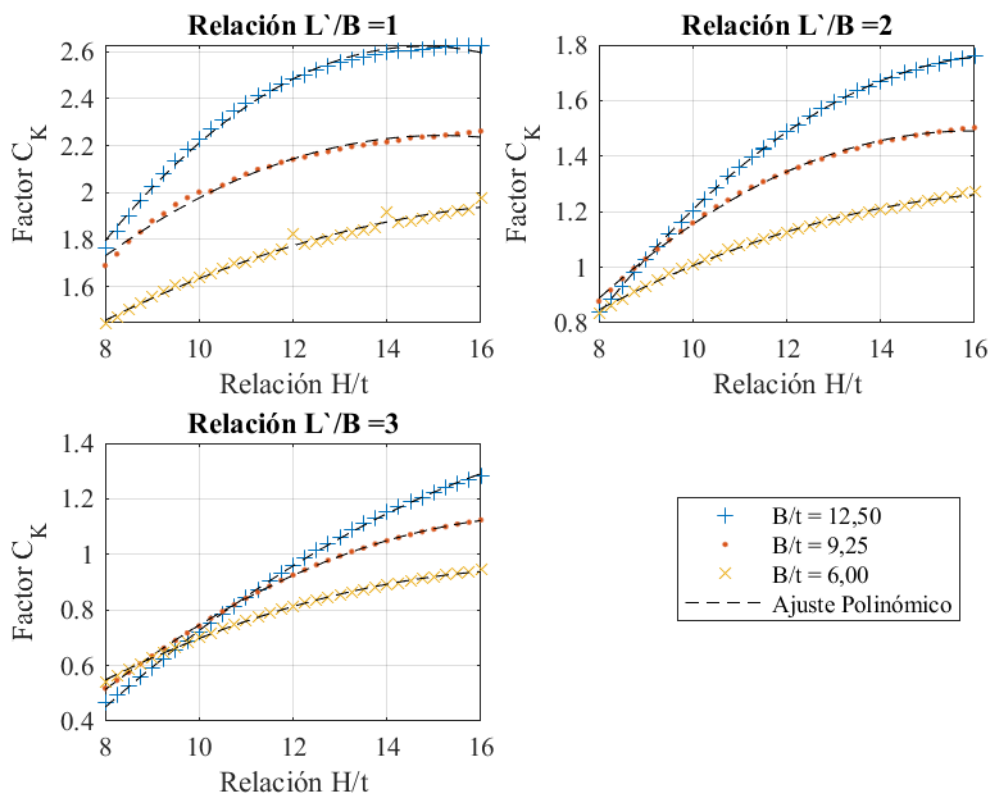


Figura 63. Factor  $C_K$  para los distintos valores de las relaciones geométricas

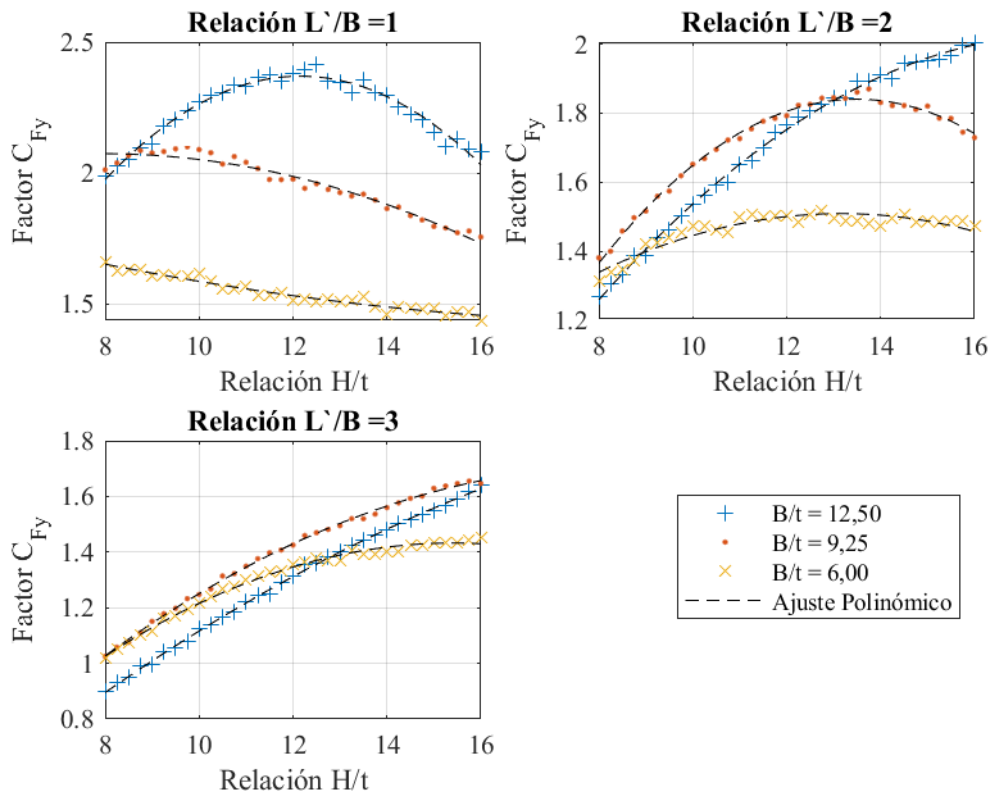


Figura 64. Factor  $C_{Fy}$  para los distintos valores de las relaciones geométricas

lo hacen los factores. El caso en que no ocurre es para el factor  $C_{Fy}$  cuando la relación  $L/B$  es alta. Esto se puede explicar mediante el modo de deformación, ya que a medida que crece el valor del ancho  $B$ , la rigidez en  $0^\circ$  crece de manera lineal. Por otro lado, la rigidez en  $90^\circ$  proviene de la flexión en el otro eje, por lo que el valor de  $B$  influiría de manera cuadrática al estar dentro de la inercia de la sección.

Por último, al variar el valor de  $H/t$  se puede ver que el factor  $C_K$  aumenta para cualquier caso, mientras que en el caso del factor  $C_{Fy}$  el comportamiento varía dependiendo del valor de la relación  $L'/B$ . Por último, se debe tener consideración de que estas conclusiones son solo aplicables para los rangos de trabajo ya definidos.

De manera adicional, se realizaron ajustes polinómicos de segundo grado a los distintos puntos graficados. La forma de estos polinomios queda descrita por la ecuación (26), y los coeficientes se presentan en la Tabla 11 y Tabla 12. Estas ecuaciones se plantean como una solución para poder encontrar valores apropiados de  $C_X$  en base a las relaciones geométricas del disipador. Cabe mencionar que estas ecuaciones se deben utilizar dentro del rango de trabajo definido con anterioridad. Además, en caso de que se requiera encontrar los coeficientes para relaciones  $L'/B$  o  $B/t$  que no se encuentren en las tablas, se sugiere realizar una interpolación lineal, utilizando los valores de  $L'/B$  y  $B/t$  adyacentes.

$$C_X = a_0 + a_1 \frac{H}{t} + a_2 \left(\frac{H}{t}\right)^2 \quad (26)$$

**Tabla 11. Valores de coeficientes para las ecuaciones que describen  $C_K$**

L'/B	B/t	$a_0$	$a_1$	$a_2$
1	12.5	-1.31	0.53	-0.018
	9.25	-0.06	0.30	-0.010
	6.00	0.36	0.17	-0.005
2	12.5	-1.63	0.40	-0.012
	9.25	-0.95	0.31	-0.010
	6.00	-0.15	0.16	-0.005
3	12.5	-1.10	0.24	-0.006
	9.25	-0.95	0.24	-0.007
	6.00	-0.40	0.15	-0.004

**Tabla 12. Valores de coeficientes para las ecuaciones que describen  $C_{Fy}$**

L'/B	B/t	$a_0$	$a_1$	$a_2$
1	12.5	-1.01	0.56	-0.023
	9.25	1.74	0.08	-0.005
	6.00	2.03	-0.06	0.001
2	12.5	-0.47	0.28	-0.008
	9.25	-1.03	0.43	-0.016
	6.00	0.40	0.17	-0.006
3	12.5	-0.24	0.17	-0.003
	9.25	-0.30	0.21	-0.005
	6.00	-0.32	0.23	-0.007

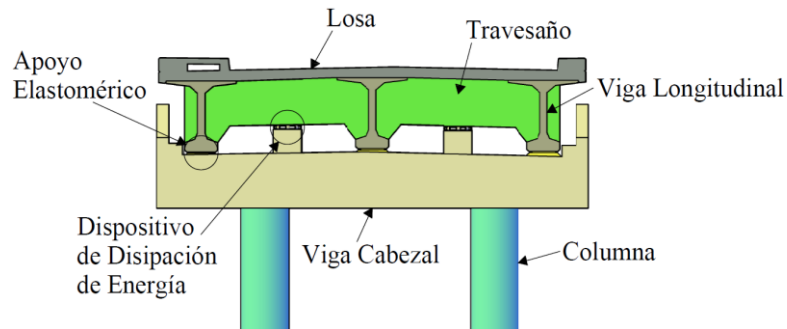
### 3.3 ANÁLISIS NUMÉRICO DEL SISTEMA MULTIDIRECCIONAL

En esta sección se evalúan las características geométricas de un sistema multidireccional basado en elementos U-Shaped y cómo éstas influyen en las distintas propiedades mecánicas del sistema.

#### 3.3.1 Descripción del Sistema Multidireccional

El sistema de disipación de energía multidireccional en base a elementos U-Shaped consta de 2 placas de conexión (una superior y otra inferior), y de un número determinado de elementos U-Shaped dispuestos en un arreglo radial o axialmente simétrico. Este sistema está propuesto inicialmente para ser implementado en puentes simplemente apoyados, en específico, en la interfaz entre la superestructura y la subestructura (o infraestructura de acuerdo con el Manual de Carreteras [40]). En la Figura 65 se

presenta un esquema de la potencial aplicación en puentes. En este contexto, el sistema actuaría en paralelo con los apoyos elastoméricos.



**Figura 65. Ubicación del sistema de disipación de energía**

### 3.3.2 Descripción del Modelo de Elementos Finitos

Se realizaron modelos de elementos finitos del sistema de disipación basado en elementos U-Shaped. Se generaron estos modelos para poder identificar y analizar el comportamiento del dispositivo como sistema multidireccional, debido a la influencia que pueda generar el incluir elementos U-Shaped en direcciones distintas ( $30^\circ$  o  $45^\circ$ ) a las analizadas en secciones anteriores de este trabajo ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ). Las características de estos modelos, a modo general, son bastante similares a los modelos realizados anteriormente. Las diferencias radican en la geometría utilizada en el modelo y el protocolo de carga utilizado. La geometría de estos modelos se diferencia que ya no es solo un elemento U-Shaped, sino un arreglo de distintas disposiciones para los elementos U-Shaped. El elemento U-Shaped elegido en este caso es el espécimen A5720G. En la Figura 66 se presenta la vista en planta de los distintos arreglos geométricos propuestos y analizados para el sistema. Además, cabe destacar que, debido a la simetría de los arreglos, se consideró solo la mitad del sistema en la modelación con el fin de hacerlos más eficientes y reducir los tiempos de ejecución de las simulaciones.

Los protocolos de carga utilizados consistieron en 2 ciclos de  $\pm 40$  mm en una dirección determinada. Para cada una de las geometrías se aplicó el desplazamiento en 2 direcciones, A y B, presentadas en la Figura 66. La dirección A se aplicó de tal manera de que la dirección longitudinal de al menos un elemento U-Shaped sea paralela a la dirección de la carga. Por otro lado, la dirección B es aquella cuyo ángulo de dirección es la mitad del ángulo entre dos elementos UD adyacentes. Se analizaron estas dos direcciones para evaluar si es que, efectivamente, el disipador tendrá el mismo comportamiento en todas las direcciones de carga, ya que la multidireccionalidad es lo que se espera de este dispositivo.

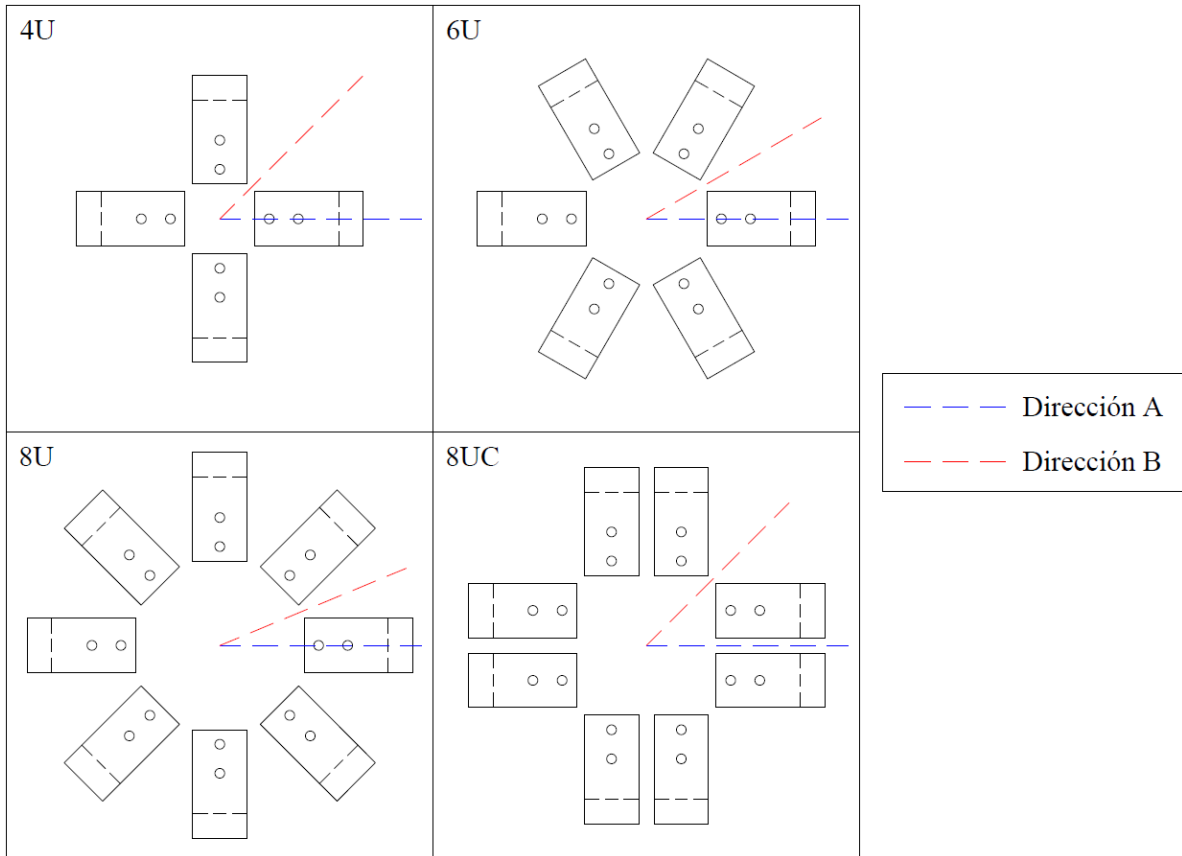
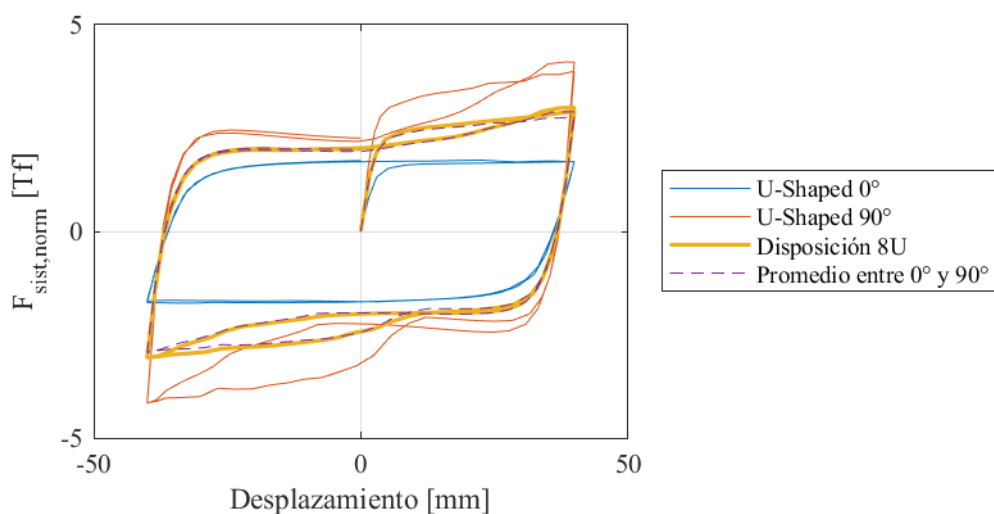


Figura 66. Configuraciones geométricas de elementos U-Shaped propuestos para el sistema multidireccional

### 3.3.3 Análisis de Resultados

Con el objetivo de analizar la influencia de la dirección de los disipadores U-Shaped, se comparó la fuerza del sistema de disipación normalizada por el número de elementos, tal como se indica en la ecuación (27). Donde  $F_{sist,norm}$  corresponde a la fuerza del dispositivo normalizado por el número de elementos,  $F_{sist}$  es la fuerza resistida por el dispositivo, y  $N_u$  es el número de elementos UD utilizados en el dispositivo. La Figura 67 presenta los resultados para la configuración geométrica denominada 8U. En esta figura también se presenta un promedio de la curva generada por las 2 direcciones de carga ( $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) de un elemento U-Shaped. De la figura se observa que el promedio de la respuesta de un elemento en  $0^\circ$  y  $90^\circ$  se ajusta bastante bien a la respuesta de la configuración 8U. En otras palabras, los resultados presentados permiten concluir preliminarmente que el comportamiento de un sistema de disipación de energía basado en elementos U-Shaped puede quedar completamente definido solo por el comportamiento de un elemento U-Shaped cargado en  $0^\circ$  y en  $90^\circ$ .

$$F_{sist,norm} = \frac{F_{sist}}{N_u} \quad (27)$$



**Figura 67. Curva fuerza desplazamiento de 1 elemento cargado en 0° y 90°, y de la disposición 8U normalizada**

De manera adicional, en la Figura 68 se presenta la comparación entre la fuerza normalizada por los distintos arreglos de elementos, donde la dirección considerada es la dirección A, es decir, aquella dirección que se alinea con al menos un elemento U-Shaped. Los resultados muestran que sin importar el número de elementos U-Shaped que posea el dissipador ni el arreglo, la fuerza por unidad de elementos es la misma para todas las configuraciones cuando la dirección de carga va alineada con un elemento U-Shaped.

Por otro lado, en la Figura 69, se observa cómo cambia la curva de histéresis para distintas direcciones de carga (A y B). De esta figura se puede concluir que basta con que el sistema tenga 3 o más elementos U-Shaped (debido a que un sistema con 3 elementos sería simplemente la mitad de un sistema con 6 elementos) para que el comportamiento sea prácticamente el mismo en cualquier dirección en que se aplique un desplazamiento. En términos cuantitativos, los resultados muestran que la máxima diferencia porcentual asociada a la fuerza máxima para las distintas configuraciones y direcciones de carga es apenas un 6.06 %, lo que comprueba lo señalado previamente. Las diferencias porcentuales para las distintas configuraciones y direcciones de carga se presentan en la Tabla 13.

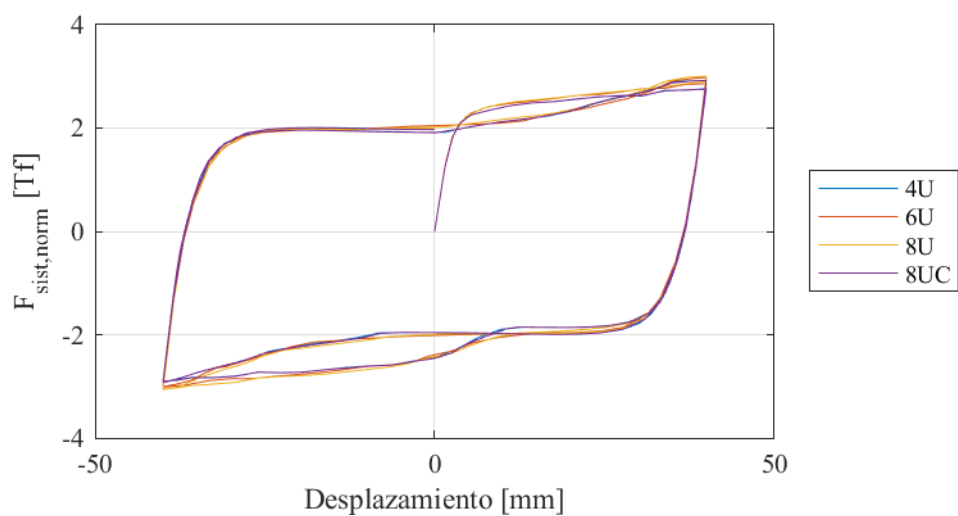


Figura 68. Curvas fuerza-desplazamiento normalizadas para las distintas disposiciones cargadas en la dirección A

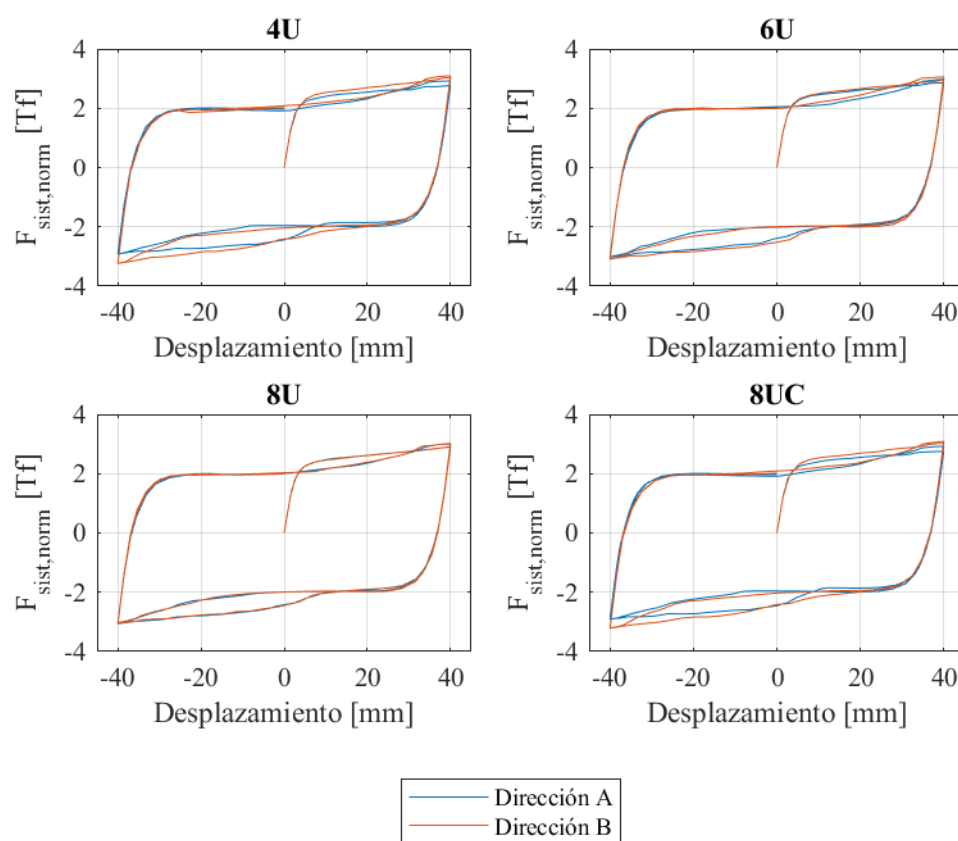


Figura 69. Curva fuerza desplazamiento en dirección A y B

**Tabla 13. Diferencia de fuerza máxima bajo carga en dirección A y B**

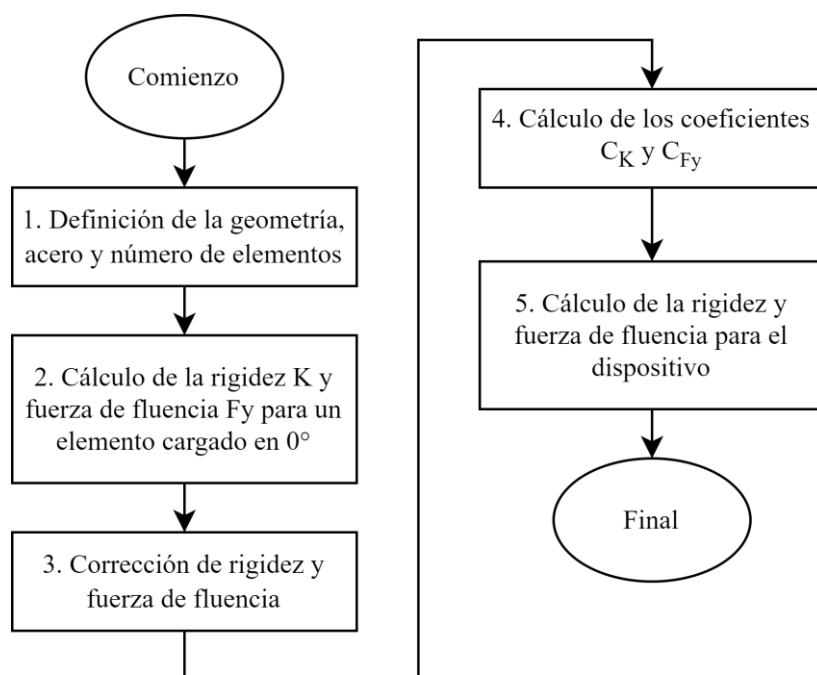
Disposición	Fuerza Máxima [Tf]		Diferencia [%]
	Dirección A	Dirección B	
4U	2.92	3.10	6.06
6U	2.98	3.06	2.66
8U	3.00	3.02	0.59
8UC	2.92	3.09	5.87

A partir de estos resultados, que indican que la curva fuerza desplazamiento de un dispositivo depende solo del comportamiento de un elemento U-Shaped cargado en  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , se propone estimar la rigidez y la fuerza de fluencia mediante el uso de la ecuación (28). Donde,  $K_{sist}$  corresponde a la rigidez de un dispositivo multidireccional en base a elementos U-Shaped,  $F_{y,sist}$  es la fuerza de fluencia del dispositivo multidireccional, y  $N_u$  corresponde al número de elementos U-Shaped con el que cuenta el sistema. Además, como se planteó en la sección anterior (véase la sección 3.2), tanto la rigidez como la fuerza de fluencia de un elemento U-Shaped cargado en  $90^\circ$  se pueden determinar en base a las propiedades del elemento en  $0^\circ$ , por lo que las propiedades del sistema solo son función de las propiedades del elemento en  $0^\circ$ , tal como se presenta en la ecuación (29).

$$K_{sist} = \frac{(K_{0^\circ} + K_{90^\circ})}{2} N_u ; F_{y,sist} = \frac{(F_{y_{0^\circ}} + F_{y_{90^\circ}})}{2} N_u \quad (28)$$

$$K_{sist} = K_{0^\circ} N_u \frac{1 + C_K}{2} ; F_{y,sist} = F_{y_{0^\circ}} N_u \frac{1 + C_{F_y}}{2} \quad (29)$$

Con el objetivo de facilitar la obtención de la rigidez y fuerza de fluencia del dispositivo multidireccional, en la Figura 70 se presenta un diagrama de flujo con los pasos a seguir. Además, en los párrafos posteriores se detalla un ejemplo paso a paso para un dispositivo multidireccional con dimensiones y número de elementos aleatorio:



**Figura 70. Diagrama de flujo para obtención de rigidez y fuerza de fluencia del dispositivo**

1. Se define un número de elementos, la geometría del elemento que involucrará el dispositivo, y el acero a utilizar. La geometría y las relaciones de aspecto para el caso de estudio se presentan en la Tabla 14. Además, el acero considerado fue el de la Colada 1 de los ensayos experimentales.

**Tabla 14. Parámetros geométricos del disipador**

t [mm]	8
H [mm]	104
B [mm]	56
L [mm]	174
L' [mm]	84
N° unidades [-]	6
H/t	13
B/t	7
L'/B	1.5

2. Se calcula la rigidez y la fuerza de fluencia de un elemento cargado en 0° según la ecuación (17) y (9), presentadas en la sección 2.2.4 y 2.2.7. En este caso se ocupa el módulo de elasticidad nominal.

$$K_{0^\circ} = \frac{16Eb}{27\pi} \left(\frac{t}{D}\right)^3 = \frac{16 \cdot 200.000[MPa] \cdot 56[mm]}{27 \cdot \pi} \left(\frac{8[mm]}{96[mm]}\right)^3 = 0.125 \left[\frac{Tf}{mm}\right]$$

$$F_{y,0^\circ} = f_y \frac{bt^2}{6R + t} = 415[MPa] \frac{56[mm] \cdot (8[mm])^2}{6 \cdot 48[mm] + 8[mm]} = 0.512[Tf]$$

3. Se corrige la rigidez y la fuerza de fluencia en  $0^\circ$  con los coeficientes obtenidos en las mismas secciones mencionadas, 0.76 para la rigidez y 1.54 para la fuerza de fluencia.

$$K_{0^\circ} = 0.125 \cdot 0.76 = 0.0947 \left[ \frac{Tf}{mm} \right]$$

$$F_{y,0^\circ} = 0.512 \cdot 1.54 = 0.789 [Tf]$$

4. Se calculan los coeficientes  $C_K$  y  $C_{Fy}$  para las relaciones geométricas del elemento U-Shaped seleccionado. Para esto, se realizan dos interpolaciones con respecto a los coeficientes cercanos para el valor de  $H/t$  en cuestión, debido a que en la Figura 63 y Figura 64 se presentan valores discretos de las relaciones geométricas y no necesariamente serán los valores de las variables que se planteen en un comienzo. Para este ejemplo, en la Tabla 15 se presentan los valores sobre los que se realizará la interpolación. Primero se realiza una interpolación para obtener los coeficientes en función del valor  $L'/B$  que se plantea (en este caso 1.5), para ambos valores de  $B/t$ . Luego, la segunda interpolación se realiza de estos dos valores obtenidos para obtener el valor de los coeficientes en función del valor  $B/t$  que se plantea en un comienzo (en este caso 7).

**Tabla 15. Valores de  $C_K$  y  $C_{Fy}$  para las relaciones  $L/B$  y  $B/t$  conocidas**

	$C_K$		$C_{Fy}$	
	$B/t = 6.00$	$B/t = 9.25$	$B/t = 6.00$	$B/t = 9.25$
$L'/B = 1$	1.725	2.150	1.419	1.935
$L'/B = 2$	1.085	1.390	1.596	1.856

$$C_K \Big|_{\substack{L/B=1.5 \\ B/t=6.0}} = 1.725 + \frac{(1.085 - 1.725)}{(2 - 1)} (1.5 - 2) = 1.405$$

$$C_K \Big|_{\substack{L/B=1.5 \\ B/t=9.25}} = 2.15 + \frac{(1.39 - 2.15)}{(2 - 1)} (1.5 - 2) = 1.77$$

$$C_{Fy} \Big|_{\substack{L/B=1.5 \\ B/t=6.0}} = 1.419 + \frac{(1.596 - 1.419)}{(2 - 1)} (1.5 - 2) = 1.507$$

$$C_{Fy} \Big|_{\substack{L/B=1.5 \\ B/t=9.25}} = 1.935 + \frac{(1.856 - 1.935)}{(2 - 1)} (1.5 - 2) = 1.895$$

$$C_K \Big|_{B/t=7} = 1.405 + \frac{(1.77 - 1.405)}{(9.25 - 6)} (7 - 6) = 1.517$$

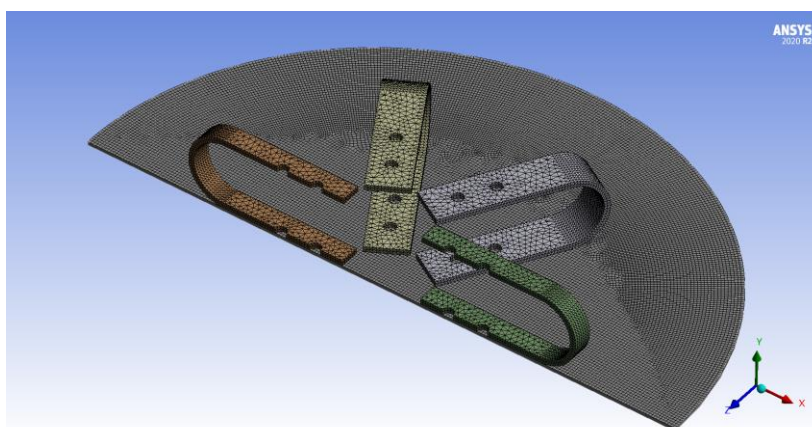
$$C_{Fy}|_{B/t=7} = 1.507 + \frac{(1.895 - 1.507)}{(9.25 - 6)}(7 - 6) = 1.627$$

5. Por último, se calcula la rigidez y la fuerza de fluencia del dispositivo utilizando la ecuación (29).

$$K_{sist} = K_{0^\circ} N_u \frac{1 + C_K}{2} = 0.0947 \cdot 6 \cdot \frac{1 + 1.517}{2} = 0.715 \left[ \frac{Tf}{mm} \right]$$

$$F_{y,sist} = F_{y_{0^\circ}} N_u \frac{1 + C_{Fy}}{2} = 0.789 \cdot 6 \cdot \frac{1 + 1.627}{2} = 6.216 [Tf]$$

De manera de corroborar este resultado, se realizó un modelo de elementos finitos del dissipador de verificación, tal como se muestra en la Figura 71. Cabe mencionar que, si bien en la figura se muestra solo una placa de conexión, este dispositivo posee placas en los dos brazos de los elementos U-Shaped, pero la superior esta oculta para una mejor visualización de los elementos U-Shaped. Además, aprovechando la simetría, se redujo la geometría por la mitad, restringiendo el movimiento en el eje Z. El material utilizado en el modelo es el calibrado para el acero de la Colada 1. El protocolo utilizado fue un desplazamiento de 60 mm en la dirección X, lo suficiente para poder obtener la rigidez y la fuerza de fluencia con los métodos utilizados en los ensayos experimentales.



**Figura 71. Modelo de elementos finitos del sistema de verificación**

Finalmente, en la Tabla 16 se presentan los valores calculados con el proceso analítico y los provenientes del modelo numérico. Los resultados demuestran que la diferencia entre los valores de la simulación numérica y la fórmula analítica es aceptable, lo cual permite señalar que la fórmula planteada entrega valores bastante cercanos a los esperados, y permitiría realizar el prediseño de dispositivos de disipación de energía multidireccional en base a elementos U-Shaped.

**Tabla 16. Valores de rigidez y fuerza de fluencia del sistema de verificación**

	Analítico	Numérico	Diferencia
Rigidez [Tf/mm]	0.715	0.757	5.5 %
Fuerza de Fluencia [Tf]	6.216	6.617	6.1 %

# 4. CONCLUSIONES

## 4.1 RESUMEN Y CONCLUSIONES

En este trabajo se llevó a cabo una campaña experimental donde se ensayaron disipadores de acero tipo U-Shaped, los cuales fueron sometidos a varios protocolos de carga cíclicos de amplitud constante y de amplitud creciente. Se registraron de manera visual los daños experimentados por los especímenes y se identificaron patrones para las grietas observadas. Posterior a esto, se registraron los datos acerca de las fuerzas y desplazamientos para ser analizados en detalle. En este análisis, se pudo obtener una cantidad importante de información acerca de las curvas de histéresis, fuerzas máximas, fluencia, fatiga, rigidez y energía disipada en este tipo de elementos. Con los datos obtenidos, se realizó un contraste entre los valores experimentales y valores obtenidos a través de fórmulas analíticas encontradas en la literatura existente. Así, se definieron factores que permiten corregir los valores obtenidos a partir de estas fórmulas para llegar a valores más cercanos a los valores experimentales.

Adicionalmente al programa experimental, se procedió a realizar una campaña de modelos de elementos finitos. En primer lugar, se realizó una cantidad importante de modelos de elementos finitos para poder calibrar los parámetros del material utilizado en el modelo. A partir de esta calibración, se constató que el programa de elementos finitos es capaz de representar de manera adecuada el comportamiento real que experimentan los elementos U-Shaped. Posterior a esto, se realizaron modelos de elementos finitos que permitieron establecer relaciones entre las propiedades de estos elementos cuando son cargados en  $0^\circ$  y cuando son cargados en  $90^\circ$ . Finalmente, se analizó, con más modelos de elementos finitos, el comportamiento de un sistema de disipación de energía en base a elementos U-Shaped.

En base a todo lo anterior, se llegaron a las siguientes conclusiones:

- Los elementos U-Shaped ensayados presentan curvas de histéresis estables aun cuando la carga de desplazamiento se presenta en una dirección fuera del eje principal de este. Además, queda demostrado que presentan un comportamiento simétrico cuando la carga va en uno u otro sentido. Por otro lado, se pudo observar que la fuerza a la que llegan en cada ciclo no disminuye de manera considerable a medida que pasan los ciclos, por lo que son capaces de mantener una respuesta estable y disipar una buena cantidad de energía a lo largo de su vida útil.
- Respecto a la fuerza máxima de los elementos U-Shaped, se observó que el endurecimiento es un factor importante en la estimación de dicha respuesta. Además, se demostró que la fórmula presente en la literatura para estimar la fuerza máxima (pero que no considera el endurecimiento

del acero) sirve como un límite inferior para el valor real de la fuerza a la que el elemento puede llegar.

- Respecto a la fluencia del elemento U-Shaped, se puede concluir que la fórmula presente en la literatura para estimar el desplazamiento de fluencia está referida a la primera fluencia del elemento. Sin embargo, para estimar una fluencia efectiva del comportamiento general, es decir, que pueda servir para establecer modelos bilineales o de otro tipo, se puede mayorar la fluencia encontrada por esta fórmula con un factor de 2.03 y 1.52 para el desplazamiento y fuerza, respectivamente.
- La vida de fatiga del material depende en gran medida de la demanda de ductilidad (o deformación) a la que son sometidos estos especímenes, además de la relación  $H/t$  que posea el elemento U-Shaped en cuestión. Los resultados también demostraron que todos los especímenes cumplen con el requerimiento de la AISC de superar en 200 veces el desplazamiento de fluencia a través de la acumulación de deformaciones en el rango plástico.
- Respecto a los resultados de energía disipada, se puede concluir que el amortiguamiento histerético que proveen los elementos U-Shaped está directamente relacionado con la ductilidad. Además, se determinó que el amortiguamiento histerético puede llegar a valores de entre 40% a 50% cuando la ductilidad demandada es igual o mayor a 6.
- La simulación de los ensayos experimentales con modelos de elementos finitos, permiten indicar que el programa ANSYS es adecuado para representar fielmente el comportamiento de los elementos U-Shaped. Con una buena caracterización del material a utilizar, se puede lograr representar apropiadamente los ciclos de histéresis junto con todas sus características principales.
- A partir del análisis de los modelos de elementos finitos de elementos U-Shaped cargados en  $90^\circ$ , se pudo establecer relaciones que permiten relacionar la rigidez y la fuerza de fluencia obtenidas cuando un elemento U-Shaped es cargado en  $0^\circ$  y cuando es cargado en  $90^\circ$ . Sin embargo, se debe considerar que estas ecuaciones solo son válidas en los rangos de trabajo indicados en esta tesis.
- Finalmente, sobre los modelos de elementos finitos del sistema multidireccional basado en elementos U-Shaped, se concluyó que el comportamiento del sistema queda caracterizado solo por el comportamiento de un elemento U-Shaped cargado en  $0^\circ$  y  $90^\circ$ . También quedó evidenciado que el número de elementos que se utilicen solo afecta en la magnitud de la fuerza, ya que al normalizar la fuerza del dispositivo por el número de elementos se determinó que la curva fuerza-desplazamiento es independiente del número de elementos. A partir de lo anterior, fue posible establecer una fórmula que permite estimar la rigidez y la fuerza de fluencia de un sistema de disipación de energía multidireccional en base a elementos U-Shaped. Para esto, solo basta conocer la rigidez y la fuerza de fluencia de un elemento U-Shaped cargado en  $0^\circ$ . Se

espera que la fórmula propuesta en esta tesis facilite el diseño de este tipo de sistemas e incentive su implementación.

## **4.2 RECOMENDACIONES Y FUTUROS TRABAJOS**

A continuación, se presenta un número de recomendaciones e ideas de futuros trabajos a realizar:

- Se recomienda realizar una mayor cantidad de ensayos con el objetivo de ampliar la base de datos utilizada para la obtención de las relaciones propuestas en esta tesis. En particular, se debe ampliar la base de datos con ensayos de dispositivos cargados a  $90^\circ$  con el fin de validar o modificar las expresiones propuestas.
- Con el fin de validar las fórmulas propuestas para el sistema multidireccional, se sugiere realizar una campaña experimental que permita ensayar dispositivos a escala real. Idealmente, estos ensayos deben considerar las condiciones de borde y conexiones a elementos de hormigón armado presentes en puentes viales.
- Se recomienda realizar una mayor cantidad de ensayos de tracción uniaxial de cupones con el objetivo de determinar las propiedades mecánicas del tipo de acero utilizado en los dispositivos.
- Se sugiere continuar con una investigación que permita proponer una metodología de diseño sísmico basado en el desempeño de estructuras que posean este tipo de dispositivos multidireccionales.

# REFERENCIAS

- [1] K. Kawashima, S. Unjoh, J.-I. Hoshikuma y I. Kosa, «Damage of Bridges due to the 2010 Maule, Chile, Earthquake,» *Journal of Earthquake Engineering*, vol. 15, n° 7, pp. 1036-1068, 2011.
- [2] Quaketek, «Compare Earthquake Protection Technologies,» Quaketek, 2020. [En línea]. Available: <https://www.quaketek.com/compare-earthquake-protection-technologies-2/#1523994023460-7995d220-1601>. [Último acceso: 11 Noviembre 2020].
- [3] F. Barriuso, «Desempeño Sísmico de Puentes Esviados que Incorporan Sistemas de Disipación Sísmica Multidireccional Basados en Elementos U-Shaped [En revisión],» Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, 2022.
- [4] G. P. Warn y K. L. Ryan, «A review of seismic isolation for buildings: historical development and research needs,» *Buildings*, vol. 2, n° 3, pp. 300-325, 2012.
- [5] R. Boroschek, R. Retamales y W. C. Center, «Base Isolation in Hospitals,» de *Proceedings, Seminar on Design of Health Facilities to Resist Natural Hazards*, Barbados, 2002.
- [6] F. Naeim, M. Lew, L. D. Carpenter, N. F. Youssef, F. Rojas, G. R. Saragoni y M. Schachter Adaron, «Performance of tall buildings in Santiago, Chile during the 27 February 2010 offshore Maule, Chile earthquake,» *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, vol. 20, n° 1, pp. 1-16, 2011.
- [7] M. Botis y C. Harbic, «A brief history upon seismic isolating systems,» *Bulletin of the Transilvania University of Brasov. Engineering Sciences. Series I*, vol. 5, n° 1, p. 93, 2012.
- [8] M. Sarrazin, M. O. Moroni, P. Soto, R. Boroschek y F. Tomaselli, «Applications on seismic isolation and energy dissipation in bridges in Chile and Venezuela,» de *Proc7th International Seminar on Seismic Isolation, Passive Energy Dissipation and Active Control of Vibration of Structures*, Assisi, Italy, 2001.
- [9] T. Kobori, N. Koshika, K. Yamada y Y. Ikeda, «Seismic-response-controlled structure with active mass driver system. Part 1: Design,» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 20, n° 2, pp. 133-149, 1991.
- [10] B. F. Spencer y S. Nagarajaiah, «State of the art of structural control,» *Journal of structural engineering*, vol. 129, n° 7, pp. 845-856, 2003.
- [11] J. M. Kelly, R. I. Skinner y A. J. Heine, «Mechanisms of energy absorption in special devices for use in earthquake resistant structures,» *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, vol. 5, n° 3, pp. 63-88, 1972.

- [12] A. Whittaker, «Earthquake Simulator Testing of Steel Plate Added Damping,» *Earthquake Engineering*, Berkeley, 1989.
- [13] K.-C. Tsai, H.-W. Chen, C.-P. Hong y Y.-F. Su, «Design of steel triangular plate energy absorbers for seismic-resistant construction,» *Earthquake spectra*, vol. 9, n° 3, pp. 505-528, 1993.
- [14] R. W. K. Chan y F. Albermani, «Experimental study of steel damper for passive energy dissipation,» *Engineering Structures*, vol. 30, n° 4, pp. 1058-1066, 2008.
- [15] C.-H. Lee, Y. K. Ju, J.-K. Min, S.-H. Lho y S.-D. Kim, «Non-uniform steel strip dampers subjected to cyclic loadings,» *Engineering Structures*, vol. 99, pp. 192-204, 2015.
- [16] S. Maleki y S. Bagheri, «Pipe damper, Part I: Experimental and analytical study,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 66, n° 8-9, pp. 1088-1095, 2010.
- [17] S. Maleki y S. Mahjoubi, «Dual-pipe damper,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 85, pp. 81-91, 2013.
- [18] R. Aghlari y M. M. Tahir, «A passive metallic damper with replaceable steel bar components for earthquake protection of structures,» *Engineering Structures*, vol. 159, pp. 185-197, 2018.
- [19] D. Scalfati, «Multidirectional mechanical device dissipating energy, particularly for the constraint structures in seismic zones». Washington DC, U.S. Patente 5.509.238, 23 Abril 1996.
- [20] D. Ene, S. Kishiki, S. Yamada, Y. Jiao, Y. Konishi, M. Terashima y N. Kawamura, «Experimental study on the bidirectional inelastic deformation capacity of U-shaped steel dampers for seismic isolated buildings,» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 45, n° 2, pp. 173-192, 2016.
- [21] A. S. Milani y M. Dicleli, «Systematic development of a new hysteretic damper based on torsional yielding: part I - design and development,» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 45, n° 6, pp. 845-867, 2016.
- [22] J.-J. Guo, J. Zhong, X.-z. Dang y W.-C. Yuan, «Seismic performance assessment of a curved bridge equipped with a new type spring restrainer,» *Engineering Structures*, vol. 151, pp. 105-114, 2017.
- [23] J. Guo, J. Zhong, X. Dang y W. Yuan, «Influence of Multidirectional Cable Restrainer on Seismic Fragility of a Curved Bridge,» *Journal of Bridge Engineering*, vol. 24, n° 3, p. 04019001, 2019.
- [24] K. Suzuki, E. Saeki y A. Watanabe, «Development of U-shaped steel damper for seismic isolation system,» *Nippon Steel Technical Report*, vol. 92, pp. 56-61, 2005.

- [25] H. Tagawa y J. Gao, «Evaluation of vibration control system with U-dampers based on quasi-linear motion mechanism,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 70, pp. 213-225, 2012.
- [26] K. Deng, P. Pan y W. Chaoyi, «Development of crawler steel damper for bridges,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 85, pp. 140-150, 2013.
- [27] B. Wang, S. Zhu y F. Casciati, «Experimental Study of Novel Self-Centering Seismic Base Isolators Incorporating Superelastic Shape Memory Alloys,» *Journal of Structural Engineering*, vol. 146, n° 7, p. 04020129, 2020.
- [28] S. Kato, Y.-B. Kim, S. Nakazawa y T. Ohya, «Simulation of the cyclic behavior of J-shaped steel hysteresis devices and study on the efficiency for reducing earthquake responses of space structures,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 61, n° 10, pp. 1457-1473, 2005.
- [29] S. Kato y Y.-B. Kim, «A finite element parametric study on the mechanical properties of J-shaped steel hysteresis devices,» *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 62, n° 8, pp. 802-811, 2006.
- [30] A. Baird, T. Smith, A. Palermo y S. Pampanin, «Experimental and numerical Study of U-Shape Flexural Plate (UFP) dissipators,» de *New Zealand Society for Earthquake Engineering Conference*, Christchurch, New Zealand, 2014.
- [31] Y. Jiao, S. Kishiki, S. Yamada, D. Ene, Y. Konishi, Y. Hoashi y M. Terashima, «Low cyclic fatigue and hysteretic behavior of U-shaped steel dampers for seismically isolated buildings under dynamic cyclic loadings,» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 44, n° 10, pp. 1523-1538, 2015.
- [32] D. Ene, S. Yamada, Y. Jiao, S. Kishiki y Y. Konishi, «Reliability of U-shaped steel dampers used in base-isolated structures subjected to biaxial excitation,» *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, vol. 46, n° 4, pp. 621-639, 2017.
- [33] AISC 341-16, Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, Chicago, Illinois: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [34] K. Deng, P. Pan, Y. Su y Y. Xue, «Shape optimization of U-shaped damper for improving its bi-directional performance under cyclic loading,» *Engineering Structures*, vol. 93, pp. 27-35, 2015.
- [35] W. Ramberg y W. R. Osgood, «Description of stress-strain curves by three parameters,» NACA-TN-902, 1943.
- [36] M. J. N. Priestley, G. M. Calvi y M. J. Kowalsky, «Direct displacement-based seismic design of structures,» de *NZSEE conference*, 2007.

- [37] ANSYS, Inc., *Ansys Academic Research Mechanical 2020R2*.
- [38] J.-L. Chaboche, «Constitutive equations for cyclic plasticity and cyclic viscoplasticity,» *International journal of plasticity*, vol. 5, n° 3, pp. 247-302, 1989.
- [39] M. Jain, D. J. Lloyd y S. R. Macewen, «Hardening laws, surface roughness and biaxial tensile limit strains of sheet aluminium alloys,» *International journal of mechanical sciences*, vol. 38, n° 2, pp. 219-232, 1996.
- [40] MOP, Manual de Carreteras, Volumen 3, Santiago, Chile: Ministerio de Obras Públicas, 2020.
- [41] K. Atasever, O. C. Celik y E. Yuksel, «Development and Cyclic Behavior of U-Shaped Steel Dampers with Perforated and Nonparallel Arm Configurations,» *International Journal of Steel Structures*, vol. 18, n° 5, pp. 1741-1753, 2018.
- [42] T. T. Soong, A. M. Reinhorn, Y. P. Wang y R. C. Lin, «Full-scale implementation of active control. I: Design and simulation,» *Journal of Structural Engineering*, vol. 117, n° 11, pp. 3516-3536, 1991.
- [43] A. M. Reinhorn, T. T. Soong, M. A. Riley, R. C. Lin, S. Aizawa y M. Higashino, «Full-scale implementation of active control. II: installation and performance,» *Journal of Structural Engineering*, vol. 119, n° 6, pp. 1935-1960, 1993.
- [44] B. Wang, S. Zhu, F. Casciati, K. Chen y H. Jiang, «Cyclic behavior and deformation mechanism of superelastic SMA U-shaped dampers under in-plane and out-of-plane loadings,» *Smart Materials and Structures*, vol. 30, n° 5, p. 055009, 2021.

# ANEXOS

## ANEXO A: CURVAS DE HISTÉRESIS

En el presente Anexo se presentan todas las curvas de histéresis obtenidas de los ensayos de laboratorio. Se observa de algunas curvas que presentan las pérdidas de resistencia al momento de ponerse en pausa el equipo MTS, como también se observan saltos dentro de la curva, debido a fallas relacionadas con la recolección de datos. Algunas figuras corresponden a ensayos donde fueron instalados strain gauges, en estas, se indica el momento en que el acero alcanzó el punto de fluencia para cada strain gauge instalado en ambas probetas.

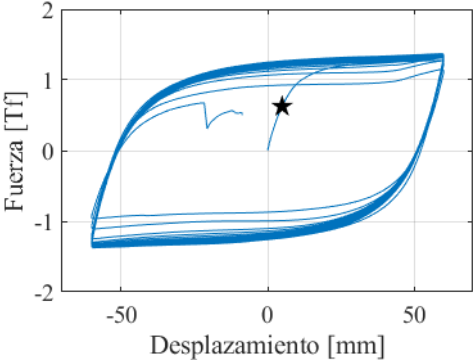


Figura 72. Ensayo A5720GFati1

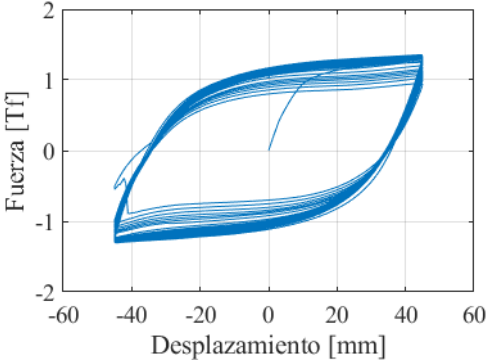


Figura 73. Ensayo A5720GFati2

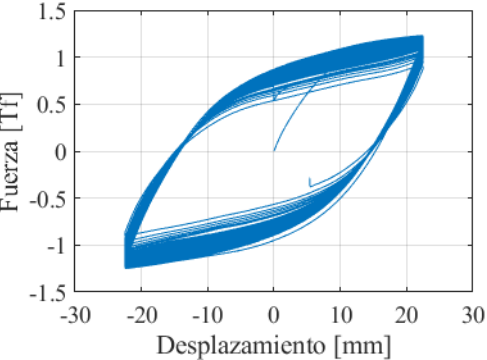


Figura 74. Ensayo A5720GFati3

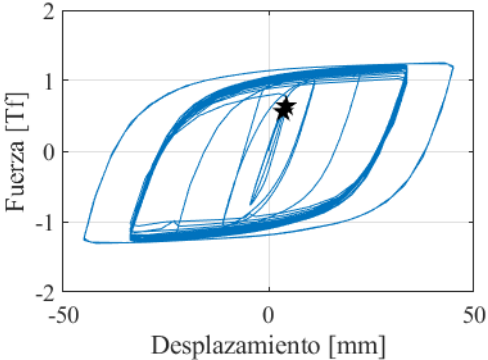
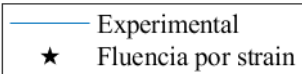


Figura 75. Ensayo A5720GampCrec



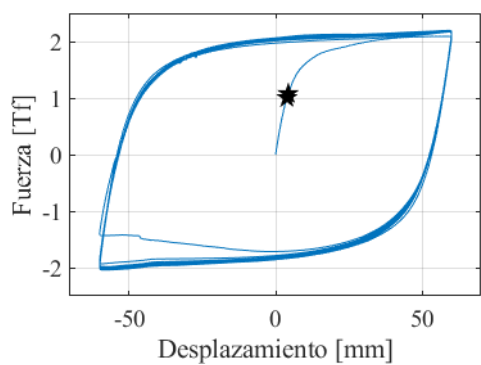


Figura 76. Ensayo A572t10Fati1

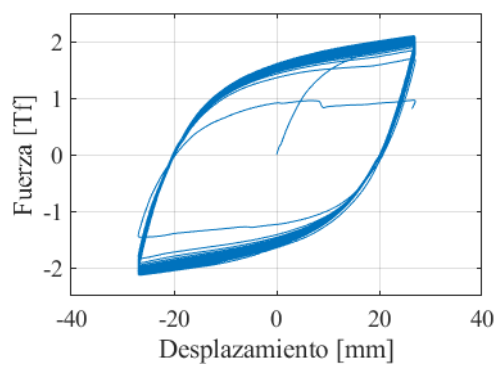


Figura 77. Ensayo A572t10Fati2

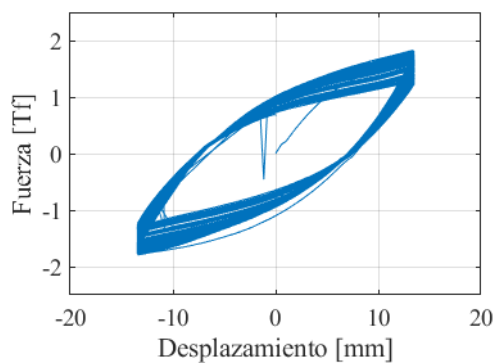


Figura 78. Ensayo A572t10Fati3

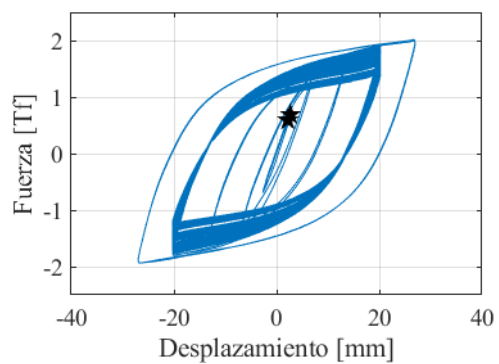


Figura 79. Ensayo A572t10AmpCrec

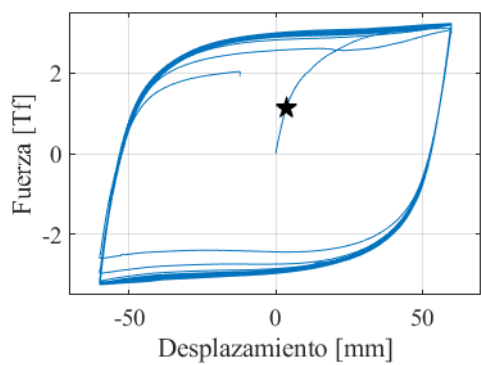


Figura 80. Ensayo A572t12Fati1

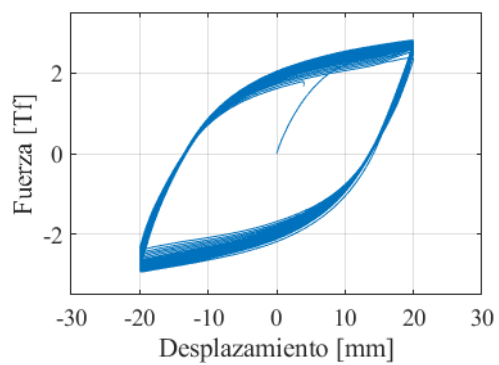
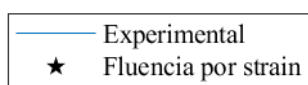


Figura 81. Ensayo A572t12Fati2



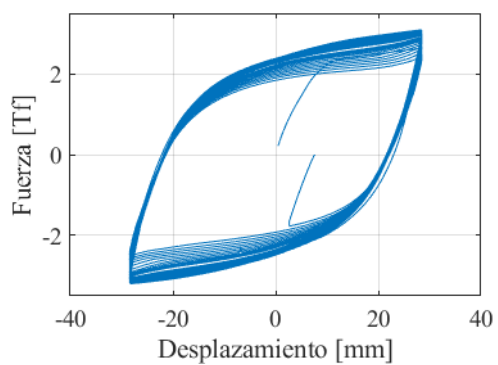


Figura 82. Ensayo A572t12Fati3

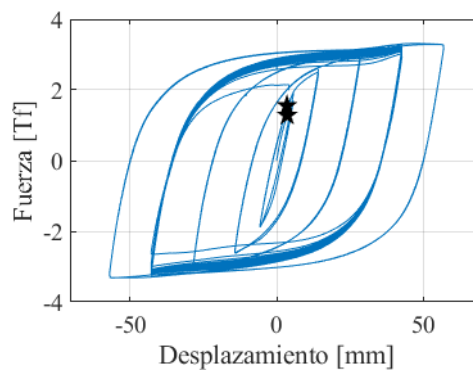


Figura 83. Ensayo A572t12AmpCrec

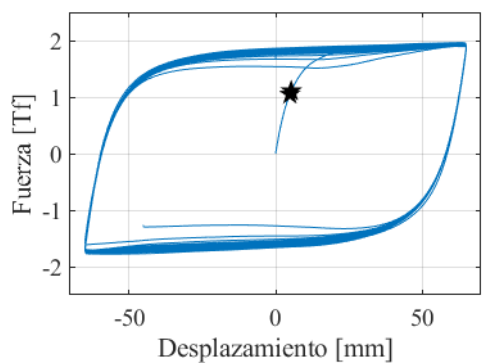


Figura 84. Ensayo A572H75Fati1

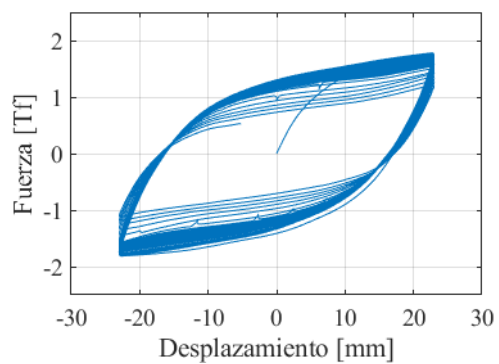


Figura 85. Ensayo A572H75Fati2

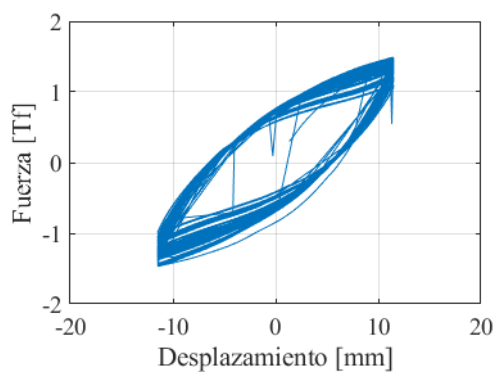


Figura 86. Ensayo A572H75Fati3

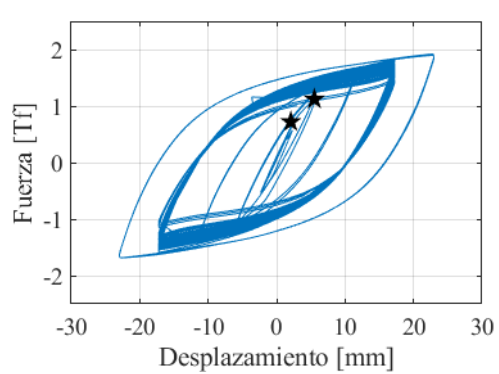
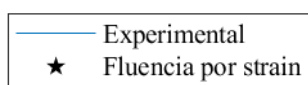


Figura 87. Ensayo A572H75AmpCrec



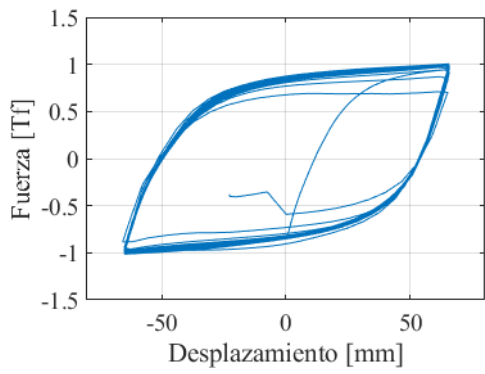


Figura 88. Ensayo A572H125Fati1

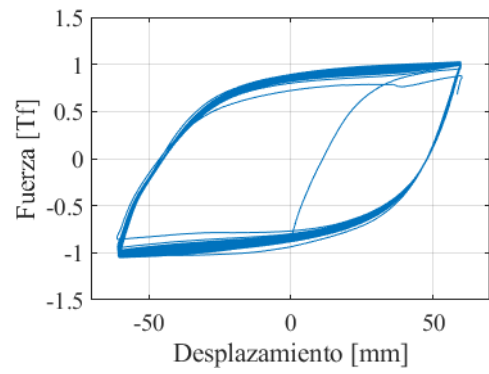


Figura 89. Ensayo A572H125Fati2

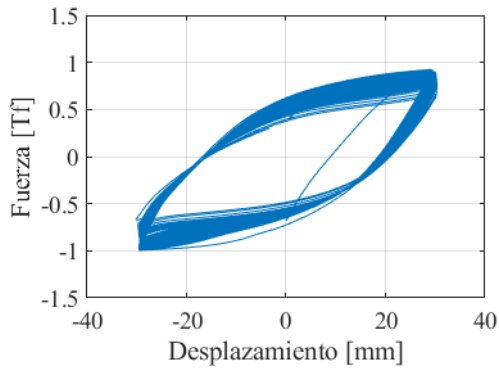


Figura 90. Ensayo A572H125Fati3

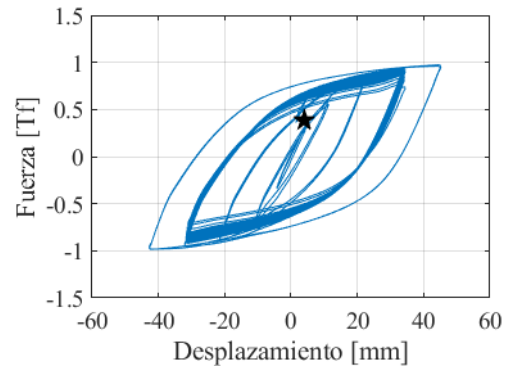


Figura 91. Ensayo A572H125AmpCrec

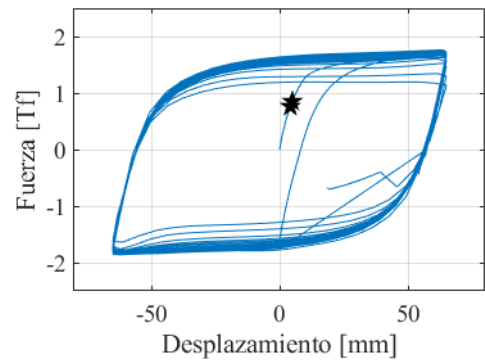


Figura 92. Ensayo A572B100Fati1

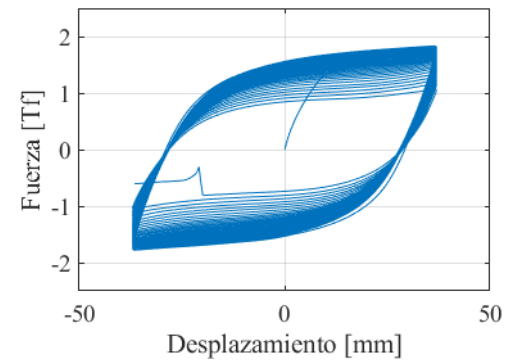
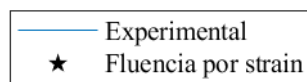


Figura 93. Ensayo A572B100Fati2



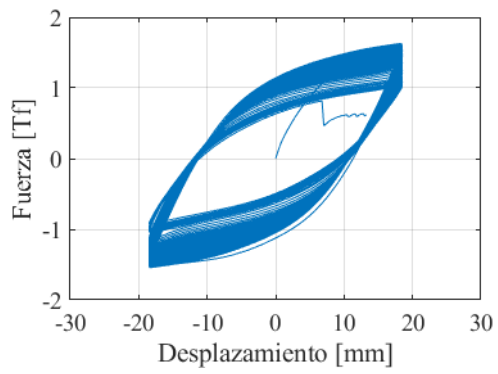


Figura 94. Ensayo A572B100Fati3

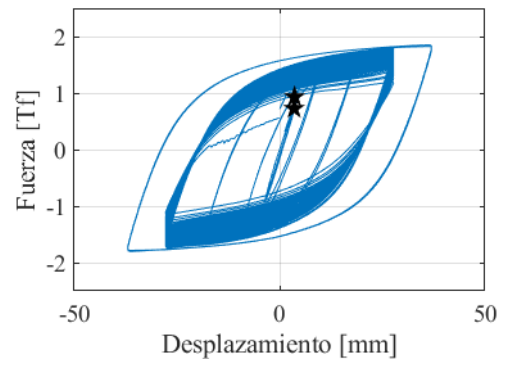


Figura 95. Ensayo A572B100AmpCrec

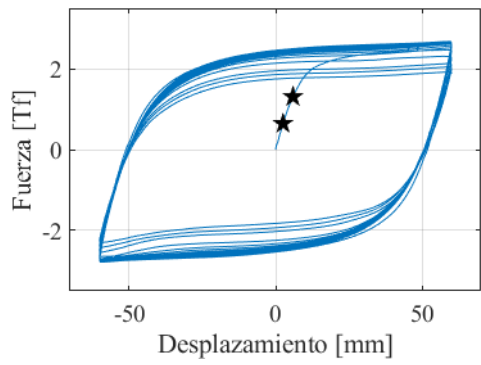


Figura 96. Ensayo A572B150Fati1

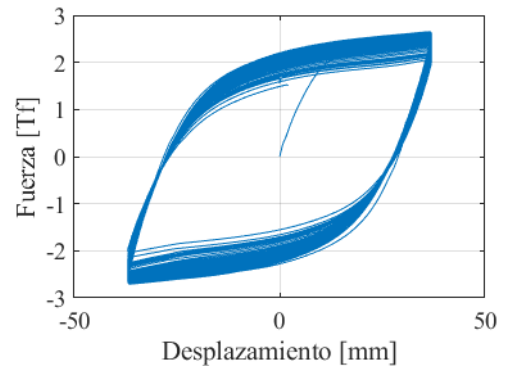


Figura 97. Ensayo A572B150Fati2

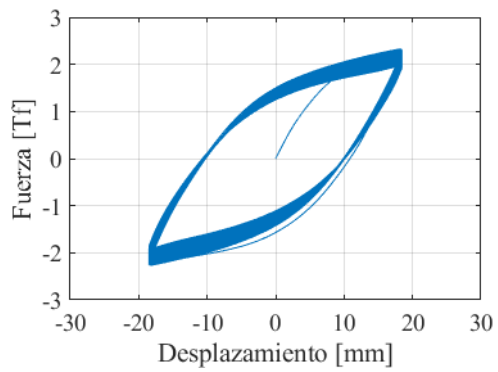


Figura 98. Ensayo A572B150Fati3

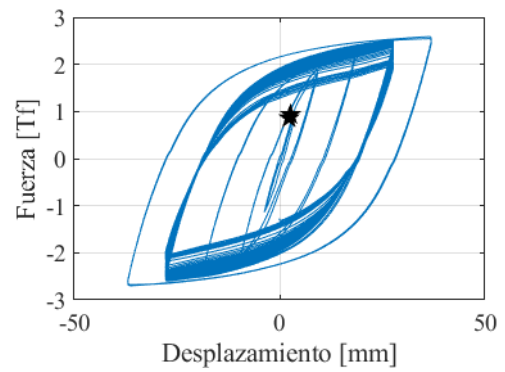
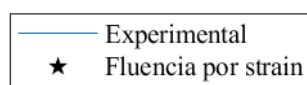


Figura 99. Ensayo A572B150AmpCrec



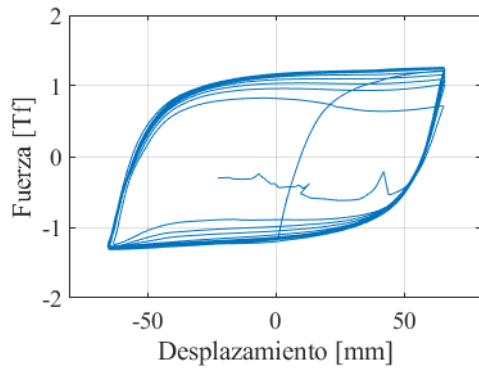


Figura 100. Ensayo A360GFati1

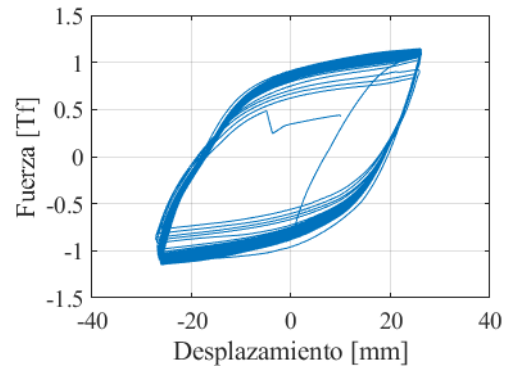


Figura 101. Ensayo A360GFati2

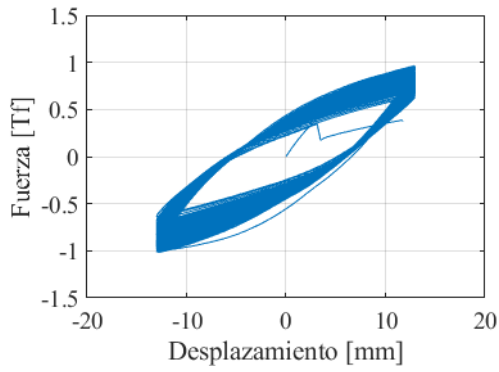


Figura 102. Ensayo A360GFati3

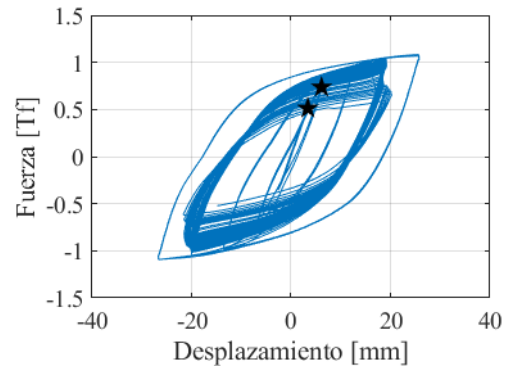


Figura 103. Ensayo A360GampCrec

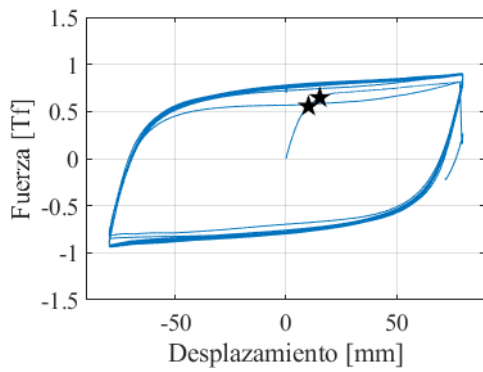


Figura 104. Ensayo A36H125Fati1

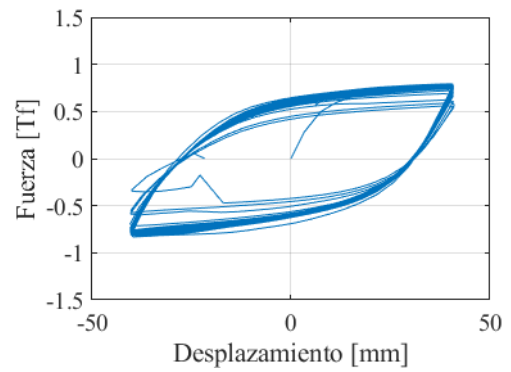
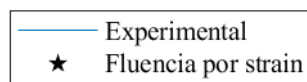


Figura 105. Ensayo A36H125Fati2



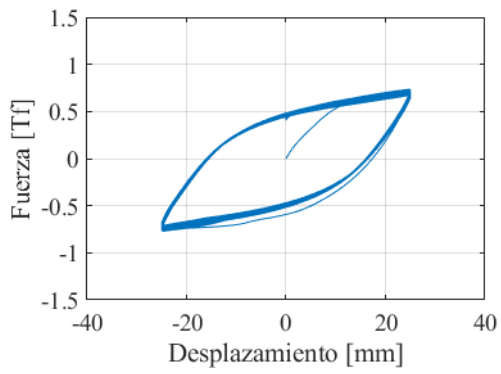


Figura 106. Ensayo A36H125Fati3

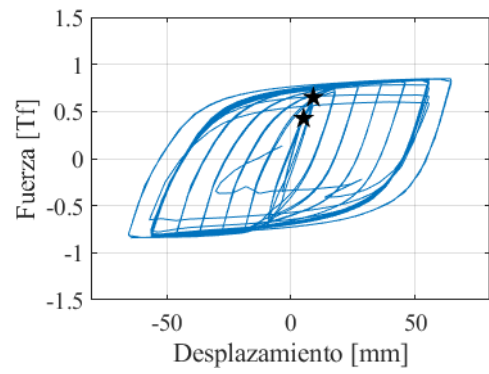


Figura 107. Ensayo A36H125AmpCrec

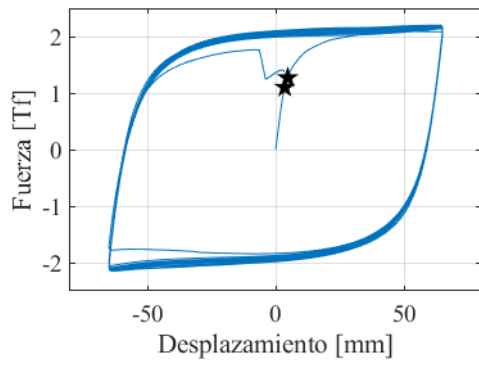


Figura 108. Ensayo A36t10Fati1

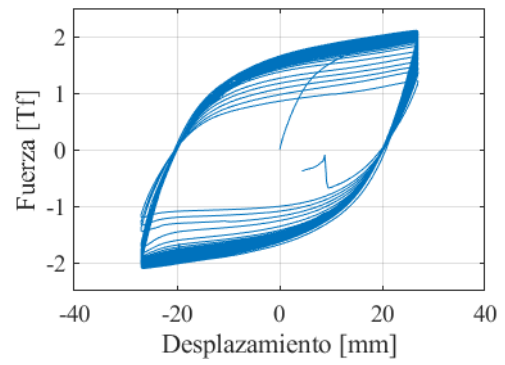


Figura 109. Ensayo A36t10Fati2

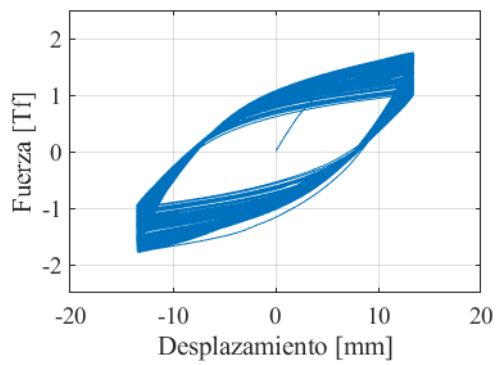


Figura 110. Ensayo A36t10Fati3

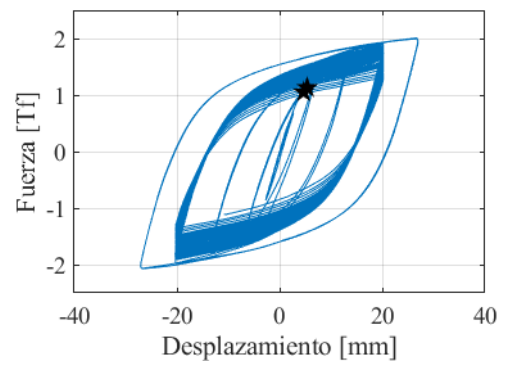
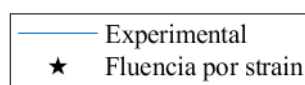


Figura 111. Ensayo A36t10AmpCrec



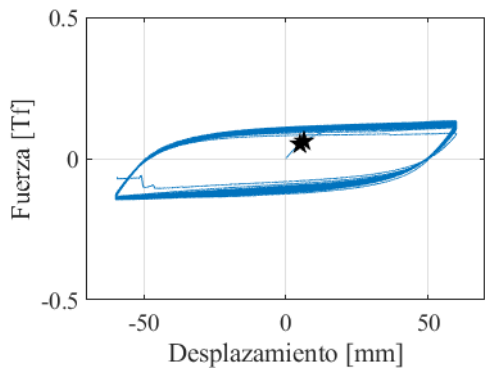


Figura 112. Ensayo A36B400GFati1

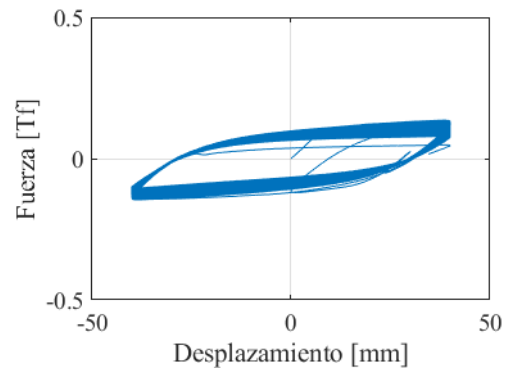


Figura 113. Ensayo A36B400GFati2

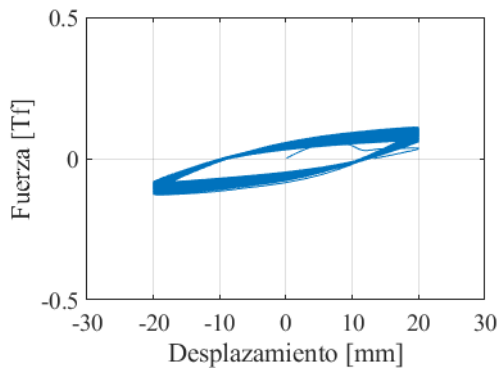


Figura 114. Ensayo A36B400GFati3

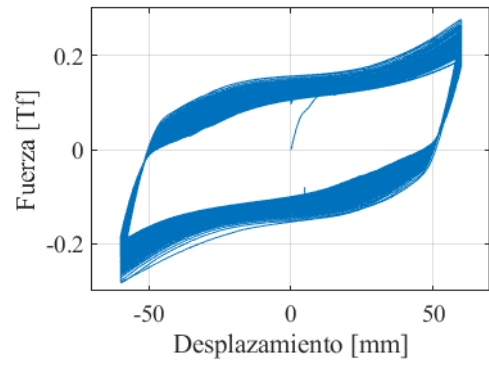


Figura 115. Ensayo A36B4090GFati1

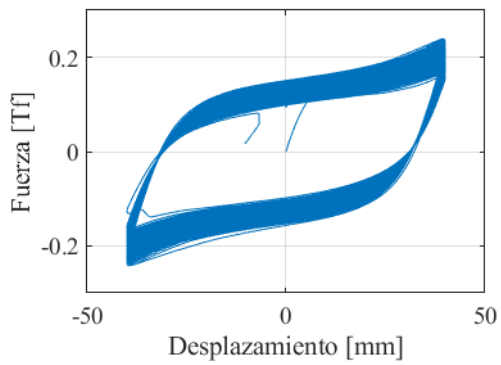


Figura 116. Ensayo A36B4090GFati2

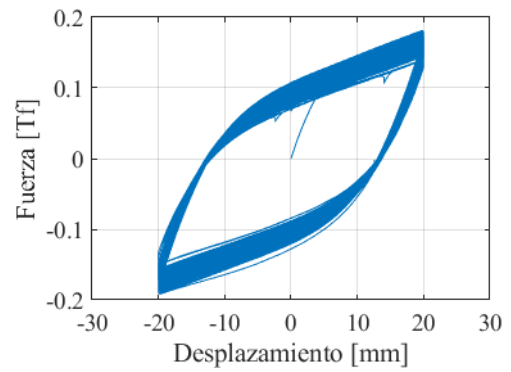


Figura 117. Ensayo A36B4090GFati3

