



UNIVERSIDAD LATINA DE COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA DE LA INFORMACIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo final de graduación para optar por el grado académico de Licenciatura en
Ingeniería Civil

Modalidad Tesis

**DESARROLLO DE DISIPADOR EXTERNO DE ENERGÍA A BASE DE ACERO
A706 PARA ESTRUCTURAS DE CONCRETO PREFABRICADAS DE ALTA
DUCTILIDAD EN COSTA RICA**

Autor: Justin Josué Mora Salazar

Tutor: Ing. Andrés Reyes Bonilla M. Sc

San Pedro, 05 de mayo de 2023



TRIBUNAL EXAMINADOR

Este proyecto titulado: Desarrollo de disipador externo de energía a base de acero A706 para estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en Costa Rica, por el (la) estudiante: Justin Josué Mora Salazar, fue aprobado por el Tribunal Examinador de la carrera de Ingeniería Civil de la Universidad Latina, Sede San Pedro, como requisito para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Civil:

ANDRES
REYES
BONILLA
(FIRMA)

Firmado digitalmente por
ANDRES REYES
BONILLA (FIRMA)
Fecha: 2023.05.12
16:09:27 -06'00'

Ing. Andrés Reyes Bonilla, M.Sc
Tutor

WILSON
ALBERTO
GONZÁLEZ
ARROYO

Firmado digitalmente
por WILSON ALBERTO
GONZÁLEZ ARROYO
Fecha: 2023.05.12
11:35:12 -06'00'

Ing. Wilson González Arroyo
Lector

DANILO
ALBERTO
HERNANDEZ
GUERRERO
(FIRMA)

Firmado digitalmente
por DANILO ALBERTO
HERNANDEZ
GUERRERO (FIRMA)
Fecha: 2023.05.13
16:04:05 -06'00'

Ing. Danilo Hernández Guerrero, M.Sc
Lector

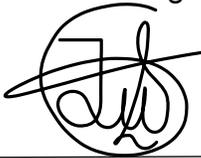
DECLARACIÓN JURADA

Yo, Justin Josué Mora Salazar estudiante de la Universidad Latina de Costa Rica, declaro bajo la fe de juramento y consciente de las responsabilidades penales de este acto, que soy Autor Intelectual del Tesis titulado:

Desarrollo de disipador externo de energía a base de acero A706 para estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en Costa Rica

Por lo que libero a la Universidad de cualquier responsabilidad en caso de que mi declaración sea falsa.

Firmo en Cartago, 05/05/2023



Justin Josué Mora Salazar

Licencia De Distribución No Exclusiva (carta de la persona autora para uso didáctico)

Universidad Latina de Costa Rica

Yo (Nosotros):	Justin Josué Mora Salazar
De la Carrera / Programa:	Ingeniería Civil Licenciatura
Modalidad de TFG:	Tesis
Titulado:	Desarrollo de disipador externo de energía a base de acero A706 para estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en Costa Rica

Al firmar y enviar esta licencia, usted, el autor (es) y/o propietario (en adelante el “**AUTOR**”), declara lo siguiente: **PRIMERO:** Ser titular de todos los derechos patrimoniales de autor, o contar con todas las autorizaciones pertinentes de los titulares de los derechos patrimoniales de autor, en su caso, necesarias para la cesión del trabajo original del presente TFG (en adelante la “**OBRA**”). **SEGUNDO:** El **AUTOR** autoriza y cede a favor de la **UNIVERSIDAD U LATINA S.R.L.** con cédula jurídica número 3-102-177510 (en adelante la “**UNIVERSIDAD**”), quien adquiere la totalidad de los derechos patrimoniales de la **OBRA** necesarios para usar y reusar, publicar y republicar y modificar o alterar la **OBRA** con el propósito de divulgar de manera digital, de forma perpetua en la comunidad universitaria. **TERCERO:** El **AUTOR** acepta que la cesión se realiza a título gratuito, por lo que la **UNIVERSIDAD** no deberá abonar al autor retribución económica y/o patrimonial de ninguna especie. **CUARTO:** El **AUTOR** garantiza la originalidad de la **OBRA**, así como el hecho de que goza de la libre disponibilidad de los derechos que cede. En caso de impugnación de los derechos autorales o reclamaciones instadas por terceros relacionadas con el contenido o la autoría de la **OBRA**, la responsabilidad que pudiera derivarse será exclusivamente de cargo del **AUTOR** y este garantiza mantener indemne a la **UNIVERSIDAD** ante cualquier reclamo de algún tercero. **QUINTO:** El **AUTOR** se compromete a guardar confidencialidad sobre los alcances de la presente cesión, incluyendo todos aquellos temas que sean de orden meramente institucional o de organización interna de la **UNIVERSIDAD**. **SEXTO:** La presente autorización y cesión se regirá por las leyes de la República de Costa Rica. Todas las controversias, diferencias, disputas o reclamos que pudieran derivarse de la presente cesión y la materia a la que este se refiere, su ejecución, incumplimiento, liquidación, interpretación o validez, se resolverán por medio de los Tribunales de Justicia de la República de Costa Rica, a cuyas normas se someten el **AUTOR** y la **UNIVERSIDAD**, en forma voluntaria e incondicional. **SÉPTIMO:** El **AUTOR** acepta que la **UNIVERSIDAD**, no se hace responsable del uso, reproducciones, venta y distribuciones de todo tipo de fotografías, audios, imágenes, grabaciones, o cualquier otro tipo de

presentación relacionado con la **OBRA**, y el **AUTOR**, está consciente de que no recibirá ningún tipo de compensación económica por parte de la **UNIVERSIDAD**, por lo que el **AUTOR** haya realizado antes de la firma de la presente autorización y cesión. **OCTAVO**: El **AUTOR** concede a **UNIVERSIDAD.**, el derecho no exclusivo de reproducción, traducción y/o distribuir su envío (incluyendo el resumen) en todo el mundo en formato impreso y electrónico y en cualquier medio, incluyendo, pero no limitado a audio o video. El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD.** puede, sin cambiar el contenido, traducir la **OBRA** a cualquier lenguaje, medio o formato con fines de conservación. **NOVENO**: El **AUTOR** acepta que **UNIVERSIDAD** puede conservar más de una copia de este envío de la **OBRA** por fines de seguridad, respaldo y preservación. El **AUTOR** declara que el envío de la **OBRA** es su trabajo original y que tiene el derecho a otorgar los derechos contenidos en esta licencia. **DÉCIMO**: El **AUTOR** manifiesta que la **OBRA** y/o trabajo original no infringe derechos de autor de cualquier persona. Si el envío de la **OBRA** contiene material del que no posee los derechos de autor, el **AUTOR** declara que ha obtenido el permiso irrestricto del propietario de los derechos de autor para otorgar a **UNIVERSIDAD** los derechos requeridos por esta licencia, y que dicho material de propiedad de terceros está claramente identificado y reconocido dentro del texto o contenido de la presentación. Asimismo, el **AUTOR** autoriza a que en caso de que no sea posible, en algunos casos la **UNIVERSIDAD** utiliza la **OBRA** sin incluir algunos o todos los derechos morales de autor de esta. **SI AL ENVÍO DE LA OBRA SE BASA EN UN TRABAJO QUE HA SIDO PATROCINADO O APOYADO POR UNA AGENCIA U ORGANIZACIÓN QUE NO SEA UNIVERSIDAD U LATINA, S.R.L., EL AUTOR DECLARA QUE HA CUMPLIDO CUALQUIER DERECHO DE REVISIÓN U OTRAS OBLIGACIONES REQUERIDAS POR DICHO CONTRATO O ACUERDO.** La presente autorización se extiende el día 05 de Mayo de 2023 a las 17:00

Firma del estudiante(s):



Dedicatoria

El presente trabajo final de graduación se lo dedico a Dios por guiarme en estos años de estudio y darme fuerzas para seguir adelante permitiendo finalizar con éxito este proceso de mi vida.

A mis padres, familiares y amigos que me motivaron en todo momento para cumplir mi sueño de ser ingeniero civil y por su apoyo incondicional en este proceso educativo.

Finalmente, a todos los profesores que aportaron conocimiento, criterio y disciplina durante estos años de estudio.

Agradecimientos

Inicialmente, quiero agradecer a Dios por haberme guiado y acompañado a lo largo de la carrera, permitiendo concluir con éxito esta etapa de mi vida.

Agradezco a mis padres Ronald Mora y Marjorie Salazar por el constante apoyo y esfuerzo realizado, por ser un ejemplo de superación, trabajo, disciplina y humildad, además por haberme dado la oportunidad y confianza para finalizar con éxito la carrera universitaria.

Le doy gracias al Ing. Andrés Reyes y al Ing. Wilson González por darme la oportunidad de realizar este trabajo final de graduación, por todo el conocimiento, criterio, consejos, apoyo y enseñanzas que me brindaron.

Por último, agradezco al Ing. Minor Murillo y al Ing. Luis Meseguer por la ayuda dada para realizar las pruebas en el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME).

Resumen

Costa Rica se encuentra en una zona altamente sísmica, donde las estructuras sufren daños e incluso el colapso producto de los sismos de gran y pequeña magnitud. Por esta razón, las edificaciones en el país cada día presentan más evolución con instrumentos antisísmicos, creando estructuras de concreto prefabricado más seguras y económicas que sean capaces de resistir estos eventos sísmicos.

En el presente trabajo de investigación se desarrollará un disipador externo de energía a base de acero A706 que reduzca el daño estructural producido por los eventos sísmicos en los elementos estructurales prefabricados de alta ductilidad. Este dispositivo de disipación de energía se ha implementado en estructuras de Nueva Zelanda, donde ha sido una solución efectiva para reducir los daños estructurales con un menor costo de reparación que facilita el reemplazo del disipador externo de energía.

Además, se realiza un ensayo de tracción con la máquina de ensayo universal y un extensómetro utilizando una varilla #5 A706 que se instrumenta con galgas extensiométricas para obtener las propiedades mecánicas (diagrama esfuerzo-deformación), y añadirlas en el modelo virtual del Software. Posteriormente se crea un modelo virtual en el Software ANSYS Workbench del dispositivo utilizando el método de elemento finito para realizar la comprobación que el dispositivo cumple su función disipando energía. Seguidamente se elabora en el taller el disipador externo de energía a base de acero A706 con sus respectivos componentes; varilla #5 grado 60, tubo A33 y mortero Eucofast, esto para realizar la prueba experimental en el laboratorio de LANAMME utilizando la máquina de ensayo universal, con el fin de analizar el comportamiento histerético generado por el protocolo de desplazamiento que se basa en aplicar ciclos de carga y descarga (ciclos de tensión y compresión) que ocasionan desplazamientos producto de la fuerza axial aplicada.

Finalmente, se realiza una comprobación en Microsoft Excel con gráficos comparativos de los resultados obtenidos en el laboratorio del disipador externo versus valores alcanzados del método de elemento finito (modelo virtual del disipador), esto para demostrar que el disipador externo de energía a base de acero A706 reduce el daño en estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en Costa Rica.

Palabras clave: disipador, varilla, acero A706, tubo A33, mortero, sismo, ductilidad, estructuras de concreto prefabricadas, daño estructural y curvas de histéresis.

Abstract

Costa Rica is located in a highly seismic area, where structures suffer damage and even collapse as a result of large and small earthquakes. For this reason, buildings in the country every day present more evolution with seismic instruments, creating safer and cheaper prefabricated concrete structures that are able to withstand these seismic events.

In the present research work, an external energy sink based on A706 steel will be developed to reduce the structural damage produced by seismic events in high ductility prefabricated structural elements. This energy dissipation device has been implemented in structures in New Zealand, where it has been an effective solution to reduce structural damage with a lower repair cost that facilitates the replacement of the external energy sink.

In addition, a tensile test is performed with the universal test machine and a strain gauge using a #5 A706 rod that is instrumented with strain gauges to obtain mechanical properties (stress-strain diagram) and add them in the Software virtual model. A virtual model is then created in the device's ANSYS Workbench software using the finite element method to perform the check that the device performs its function by dissipating energy. Then the external energy dissipater based on steel A706 with its respective components is elaborated in the workshop; rod #5 grade 60, tube A33 and mortar Eucofast, this to perform the experimental test in the LANAMME laboratory using the universal test machine, in order to analyze the hysterical behavior generated by the displacement protocol that is based on applying loading and unloading cycles (stress and compression cycles) which cause displacement as a result of the axial force applied.

Finally, a check is performed in Microsoft Excel with comparative graphs of the results obtained in the laboratory of the external heatsink versus values achieved from the finite element method (virtual model of the heatsink), this to demonstrate that the A706 steel-based external energy sink reduces damage to high ductility prefabricated concrete structures in Costa Rica.

Keywords: dissipater, rebar, A706 steel, tube A33, mortar, earthquake, ductility, precast concrete structures, structural damage and hysteresis curves.

Índice de contenido

1	Capítulo I. Introducción.....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.1.1	Nacionales	1
1.1.2	Internacionales.....	1
1.2	Planteamiento del problema	2
1.3	Objetivo general	4
1.4	Objetivos específicos.....	4
1.5	Justificación.....	4
1.6	Alcances y limitaciones.....	6
1.6.1	Alcances.....	6
1.6.2	Limitaciones	6
1.7	Impacto	7
1.8	Hipótesis.....	8
2	Capítulo II. Fundamentación teórica.....	9
2.1	Acero A706	9
2.1.1	Ensayos en laboratorio.....	10
2.1.1.1	Máquina de ensayo universal	10
2.1.1.2	Extensómetro láser	11
2.1.1.2.1	Ensayo de tensión	12
2.1.1.2.2	Ensayo de compresión	13
2.1.1.2.3	Esfuerzo axial	14
2.1.1.2.4	Deformación normal bajo carga axial.....	15
2.1.1.2.5	Relación de Poisson	17
2.1.2	Diagrama esfuerzo versus deformación	18
2.1.2.1	Comportamiento elástico.....	19
2.1.2.1.1	Ley de Hooke.....	19
2.1.2.1.2	Módulo de elasticidad o módulo de Young	20
2.1.2.2	Zona de cedencia.....	20
2.1.2.2.1	Plasticidad.....	21
2.1.2.3	Zona de endurecimiento por deformación	21
2.1.2.4	Zona de estricción	22
2.1.2.5	Diagrama real de esfuerzo-deformación unitaria	23

2.1.3	Ductilidad en el acero	23
2.1.4	Tenacidad.....	24
2.1.5	Resiliencia	24
2.1.6	Rigidez.....	25
2.1.7	Fatiga por deformación.....	25
2.1.8	Máquina torno paralelo.....	25
2.2	Histéresis	26
2.3	Comportamiento elástico versus plástico de un material	27
2.3.1	Efecto Bauschinger.....	31
2.4	Núcleo de acero	34
2.4.1	Tubo externo circular.....	34
2.4.2	Mortero expansivo.....	34
2.4.3	Materiales antiadherentes	35
2.4.3.1	Cintas de vinilo o teipe rojo	35
2.4.3.2	Grasa multipropósito.....	35
2.4.3.3	Espuma de polietileno	36
2.4.3.4	Parafina.....	36
2.4.4	Galgas extensiométricas	36
2.4.4.1	Puente de Wheatstone	39
2.5	Método elementos finitos	40
2.5.1	Principio de Saint-Venant.....	42
2.5.2	Hipótesis de Navier-Bernoulli.....	44
2.5.3	Criterios de fluencia para materiales dúctiles bajo esfuerzo plano	44
2.5.3.1	Criterio de Tresca	45
2.5.3.2	Criterio de Von-Mises.....	45
2.6	Funcionalidad del disipador externo de energía	47
3	Capítulo III. Marco metodológico	51
3.1	Paradigma, enfoque metodológico y métodos de investigación.....	51
3.2	Categorías de análisis de la investigación	52
3.3	Población y muestra, Técnicas de muestreo	53
3.4	Técnicas e instrumentos para la recolección de datos	54
3.4.1	Ensayo de tracción de la varilla #5 A706.....	54
3.4.2	Software ANSYS Workbench.....	60

3.4.2.1	Flujo de trabajo del Software ANSYS Workbench	60
3.4.2.2	Datos de ingeniería-materiales	62
3.4.2.2.1	Datos de experimentos hiperelásticos	63
3.4.2.2.2	Plasticidad	67
3.4.2.2.3	Parámetros de vida por deformación	69
3.4.2.2.4	Curva S-N	71
3.4.2.2.5	Geometría	72
3.4.2.3	Modelo	77
3.4.2.3.1	Interfaz de trabajo del Modelo	77
3.4.2.3.2	Configuración de la geometría en el modelo	78
3.4.2.3.3	Configuración del sistema de coordenadas	79
3.4.2.3.4	Configuración de los contactos	79
3.4.2.3.5	Configuración del mallado	79
3.4.2.3.6	Configuración del análisis estático estructural	80
3.4.2.3.7	Solución del análisis estático estructural	82
3.4.2.3.8	Gráfico	83
3.4.3	Elaboración del dissipador externo de energía a base de acero A706	83
3.5	Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de los datos	97
4	Capítulo IV. Resultados y Análisis de Resultados	98
4.1	Resultados del ensayo de la tracción de la varilla #5	99
4.1.1	Resultados de Región elástica	99
4.1.2	Resultados de Zona de cedencia	101
4.1.3	Resultados Zona de endurecimiento por deformación	102
4.1.4	Resultados de la Zona de estricción	103
4.1.5	Comparación de la máquina de ensayo universal y el extensómetro	106
4.1.6	Comparación de las galgas extensiométricas con la máquina de ensayo Universal	107
4.1.7	Comparación del extensómetro con las galgas extensiométricas	108
4.2	Resultados del modelo virtual del dissipador externo de energía en el Software ANSYS	110
4.2.1	Resultados de la deformación total	110
4.2.2	Resultados de la deformación elástica equivalente	112
4.2.3	Resultados de la deformación plástica equivalente	113

4.2.4	Resultados del esfuerzo equivalente.....	114
4.2.5	Resultados del gráfico fuerza versus desplazamiento (curvas de histéresis)	115
4.3	Resultados del disipador externo de energía ensayado en el laboratorio	117
4.3.1	Resultados de las galgas extensiométricas en las curvas de histéresis.....	123
4.4	Comparación de las curvas de histéresis del modelo virtual versus el ensayo del laboratorio.....	125
	Conclusiones.....	129
	Recomendaciones	132
	Referencias	133
	Anexos.....	139
	Glosario	143

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Variables independientes y dependientes</i>	52
Tabla 2	<i>Esfuerzo-deformación acero A706</i>	64
Tabla 3	<i>Esfuerzo-deformación acero A33</i>	65
Tabla 4	<i>Endurecimiento por deformación acero A706</i>	68
Tabla 5	<i>Endurecimiento por deformación acero A33</i>	69
Tabla 6	<i>Cantidad de ciclos versus desplazamiento total.....</i>	81
Tabla 7	<i>Programa de pruebas de los disipadores de tipo fusionado con refuerzo de pandeo (BFF) (dimensiones en mm)</i>	84
Tabla 8	<i>Cantidad de ciclos versus desplazamiento total.....</i>	96
Tabla 9	<i>Resumen de propiedades mecánicas de la varilla #5 A706</i>	105

Índice de figuras

Figura 1	<i>Identificación de una barra grado 420 [60]</i>	10
Figura 2	<i>Ensayos de tracción</i>	11
Figura 3	<i>Esquema de montaje de extensómetro láser</i>	12
Figura 4	<i>Materiales dúctiles y frágiles</i>	13
Figura 5	<i>Miembros de acero sometidos a compresión</i>	14
Figura 6	<i>Elemento con una carga axial</i>	15
Figura 7	<i>Barra cargada axialmente no deformada y deformada.....</i>	16

Figura 8 <i>Efecto de la relación de Poisson</i>	17
Figura 9 <i>Diagrama de esfuerzo-deformación unitaria</i>	18
Figura 10 <i>Región elástica</i>	19
Figura 11 <i>Zona de cedencia (fluencia)</i>	21
Figura 12 <i>Zona de endurecimiento por deformación</i>	22
Figura 13 <i>Zona de estricción</i>	23
Figura 14 <i>Módulo de tenacidad</i>	24
Figura 15 <i>Módulo de resiliencia</i>	25
Figura 16 <i>Torno Paralelo</i>	26
Figura 17 <i>Ciclo de histéresis en un sistema estructural, energía elástica e inelástica</i>	27
Figura 18 <i>Diagrama de esfuerzo-deformación unitaria</i>	28
Figura 19 <i>Diagrama de esfuerzo-deformación unitaria</i>	29
Figura 20 <i>Respuesta de esfuerzo-deformación de un material dúctil recargado después de una cedencia y una descarga previas</i>	30
Figura 21 <i>Respuesta de esfuerzo-deformación para el acero dulce sometido a dos casos de carga inversa</i>	31
Figura 22 <i>Relación de cíclica de esfuerzo-deformación en el acero estructural</i>	32
Figura 23 <i>Energía histerética del acero estructural</i>	33
Figura 24 <i>Partes del disipador externo de energía</i>	33
Figura 25 <i>Galga extensiométrica</i>	37
Figura 26 <i>Barra instrumentada con galgas extensiométricas</i>	38
Figura 27 <i>Función en compresión y tensión de las galgas</i>	39
Figura 28 <i>Puente de Wheatstone - Cuarto de puente, medio puente, puente completo</i>	40
Figura 29 <i>Barra simple analizada por el método de elementos finitos</i>	41
Figura 30 <i>Carga axial aplicada mediante placas rígidas</i>	42
Figura 31 <i>Carga axial aplicada sobre un modelo de caucho mediante placas rígidas</i>	43
Figura 32 <i>Carga axial concentrada sobre un modelo de caucho</i>	44
Figura 33 <i>Hexágono de Tresca para el criterio del esfuerzo cortante máximo</i>	45
Figura 34 <i>Superficie de Von Mises basada en el criterio de la energía de distorsión máxima</i>	46
Figura 35 <i>Comparación de los criterios Tresca y Von Mises</i>	46

Figura 36 <i>Esquema y símbolos del dissipador de tipo fundido con restricción de pandeo (BRF)</i>	47
Figura 37 <i>Fotos de diferentes tamaños de componentes de dispositivos Plug&Play antes del montaje y pruebas del laboratorio de control de calidad</i>	48
Figura 38 <i>Gráfico de fuerza versus desplazamientos normalizado de los dissipadores probados</i>	49
Figura 39 <i>Disipadores reemplazables internos versus externos en la conexión column-base</i>	50
Figura 40 <i>Varilla #5 A706 de 45 cm</i>	54
Figura 41 <i>Esmeriladora de banco</i>	55
Figura 42 <i>Galgas extensiométricas</i>	56
Figura 43 <i>Instalación de galgas extensiométricas</i>	57
Figura 44 <i>Soldadura de la galga extensiométrica</i>	57
Figura 45 <i>Indicador de tensión y registrador</i>	58
Figura 46 <i>Máquina de ensayo universal y extensómetro</i>	59
Figura 47 <i>Medición del extensómetro</i>	60
Figura 48 <i>Interfaz de trabajo del Software ANSYS Workbenck</i>	61
Figura 49 <i>Lista de células</i>	62
Figura 50 <i>Interfaz de los materiales</i>	63
Figura 51 <i>Datos de experimentos hiperelásticos</i>	64
Figura 52 <i>Diagrama esfuerzo-deformación acero A706</i>	65
Figura 53 <i>Diagrama esfuerzo-deformación acero A33</i>	66
Figura 54 <i>Propiedades mecánicas del mortero Eucofast</i>	66
Figura 55 <i>Plasticidad</i>	67
Figura 56 <i>Diagrama endurecimiento por deformación acero A706</i>	68
Figura 57 <i>Diagrama endurecimiento por deformación acero A33</i>	69
Figura 58 <i>Parámetros de vida por deformación</i>	70
Figura 59 <i>Gráfico de propiedades</i>	70
Figura 60 <i>Tabla de propiedades curva S-N</i>	71
Figura 61 <i>Gráfica de las propiedades de la curva S-N</i>	71
Figura 62 <i>Creación de geometría</i>	72

Figura 63 <i>Herramientas para geometría</i>	72
Figura 64 <i>Sistemas de coordenadas cartesianas</i>	73
Figura 65 <i>Herramienta "Circle"</i>	73
Figura 66 <i>Herramienta "Pull"</i>	74
Figura 67 <i>Probeta de la varilla #5 A706</i>	75
Figura 68 <i>Tubo A33</i>	75
Figura 69 <i>Mortero Eucofast</i>	76
Figura 70 <i>Disipador externo de energía a base de acero A706</i>	76
Figura 71 <i>Creación del modelo</i>	77
Figura 72 <i>Interfaz de trabajo del modelo</i>	78
Figura 73 <i>Mallado del disipador externo de energía</i>	80
Figura 74 <i>Soporte fijo y desplazamiento en el disipador</i>	81
Figura 75 <i>Protocolo de desplazamiento para el disipador externo de energía (Modelo virtual)</i>	82
Figura 76 <i>Reducción del diámetro (fusible)</i>	85
Figura 77 <i>Corte con Esmeriladora</i>	86
Figura 78 <i>Instalación de galgas extensiométricas en el disipador externo</i>	87
Figura 79 <i>Parafina para recubrir las galgas extensiométricas</i>	88
Figura 80 <i>Parafina totalmente seca</i>	88
Figura 81 <i>Tubo A33 sección circular</i>	89
Figura 82 <i>Instalación del tubo A33 en la varilla #5 con la reducción</i>	90
Figura 83 <i>Instalación de masking en el disipador externo de energía</i>	90
Figura 84 <i>Lechada de mortero Eucofast</i>	91
Figura 85 <i>Añadir lechada de mortero Eucofast</i>	92
Figura 86 <i>Proceso de curado del mortero Eucofast en el disipador</i>	93
Figura 87 <i>Indicador de tensión</i>	94
Figura 88 <i>Máquina de ensayo universal con disipador externo de energía</i>	94
Figura 89 <i>Instalación del disipador en mordazas</i>	95
Figura 90 <i>Protocolo de desplazamiento para el disipador externo de energía</i>	96
Figura 91 <i>Diagrama esfuerzo-deformación unitaria</i>	99
Figura 92 <i>Resultados de la Región elástica</i>	101

Figura 93 <i>Resultados de la Zona de cedencia</i>	102
Figura 94 <i>Resultados de la Zona de endurecimiento por deformación</i>	103
Figura 95 <i>Resultados de la zona de estricción</i>	104
Figura 96 <i>Falla por fractura de la varilla #5 A706</i>	105
Figura 97 <i>Comparación del Diagrama esfuerzo-deformación de la máquina de ensayo universal versus el extensómetro</i>	107
Figura 98 <i>Comparación del Diagrama esfuerzo-deformación de las galgas extensiométricas versus la máquina de ensayo universal</i>	108
Figura 99 <i>Comparación del Diagrama esfuerzo-deformación del extensómetro versus las galgas extensiométricas</i>	109
Figura 100 <i>Falla de la galga 2 extensiométrica y láser</i>	110
Figura 101 <i>Deformación total del disipador externo de energía</i>	111
Figura 102 <i>Deformación total de la varilla #5 con reducción A706</i>	111
Figura 103 <i>Deformación elástica equivalente del tubo A33</i>	112
Figura 104 <i>Deformación elástica equivalente del mortero Eucofast</i>	112
Figura 105 <i>Deformaciones elásticas equivalentes en la varilla #5 con la reducción</i>	113
Figura 106 <i>Deformaciones plásticas equivalentes en la varilla #5 con la reducción</i>	114
Figura 107 <i>Esfuerzo equivalente de la probeta de la varilla #5</i>	115
Figura 108 <i>Curvas de histéresis del modelo virtual de ANSYS</i>	115
Figura 109 <i>Curvas de histéresis del modelo virtual del disipador externo</i>	116
Figura 110 <i>Protocolo de desplazamiento del ciclo 0-3</i>	117
Figura 111 <i>Resultados de las curvas de histéresis del ciclo 0-3</i>	118
Figura 112 <i>Curvas de histéresis del disipador externo</i>	119
Figura 113 <i>Alargamiento final del disipador externo de energía</i>	120
Figura 114 <i>Mortero Eucofast con fuerza axial en tensión</i>	121
Figura 115 <i>Falla del tubo A33</i>	122
Figura 116 <i>Falla principal del disipador externo de energía</i>	123
Figura 117 <i>Curvas de histéresis obtenidas con las galgas extensiométricas</i>	124
Figura 118 <i>Curvas de histéresis del ciclo 0-3 de la prueba de laboratorio versus modelo virtual ANSYS</i>	125

Figura 119 <i>Curvas de histéresis de la prueba de laboratorio versus modelo virtual ANSYS</i>	127
Figura 120 <i>Comparación de fallas de la prueba de laboratorio y el modelo virtual ANSYS</i>	128

1 Capítulo I. Introducción

1.1 Antecedentes

1.1.1 Nacionales

Según Sanabria (2019), expresa que “Costa Rica está ubicada en una zona de alta sismicidad” (p. 5), esto genera que el país implemente estrategias o instrumentos para prevenir los riesgos ocasionados por los eventos sísmicos, la idea principal de la investigación es analizar y evaluar la estructura post-sismo utilizando una guía para observar los daños producidos por los eventos sísmicos, para establecer de forma rápida y concisa los daños causados a la estructura y prevenir a las personas de los defectos estructurales provocados por la acción sísmica, realizando una valoración visual para indicar si la estructura es adecuada o no para el establecimiento de las personas en dicha edificación.

El Código Sísmico de Costa Rica (2010), establece el siguiente objetivo “proteger la vida humana, la integridad física de las personas, reducir daños estructurales y pérdidas económicas ocasionadas por los sismos” (p. 1/2), por esta razón se emplea el diseño sismorresistente en Costa Rica, este diseño se basa en deformaciones internas y desplazamientos ocasionados por los eventos sísmicos en los elementos y uniones estructurales, dicho diseño busca disipar o reducir la energía (ductilidad) producida en el sistema por las fuerzas sísmicas, esto mediante el daño estructural controlado y asegurar la estabilidad de la estructura. Lo anterior es una forma económica y factible para proteger las estructuras de los eventos sísmicos. Cuando la estructura es dañada por una acción sísmica esta debe ser reparada para restablecer la funcionalidad de la edificación y si es obligatorio se debe aumentar la capacidad resistente a eventos sísmicos.

1.1.2 Internacionales

Las investigaciones internacionales relacionados con los disipadores externos de energía han sido considerablemente analizados y estudiados numéricamente, así como experimentalmente:

Según Pampanin (2005), establece que “la solución original para las conexiones híbridas propuesta en el programa US-PRESSS se basaba en el uso de barras de refuerzo de acero con mortero, insertadas en conductos metálicos corrugados” (p. 5). Los disipadores internos de energía (barras de refuerzo con mortero) que se colocan en las conexiones de la estructura presentan una desventaja que no son de fácil acceso y si es necesario reemplazarlos

después de un evento sísmico severo esto genera mayor costo en reparaciones e incluso interfiere en la funcionalidad de la edificación. Por las desventajas mencionadas anteriormente, surge la idea de crear un disipador externo de energía “dispositivo externo Plug&Play” que sea fácil de desmontar y reemplazar en las conexiones si es necesario después de evento sísmico, disminuyendo los costos de reparación producto del sismo y el tiempo de la inactividad de la estructura, este dispositivo fue aprobado en la Universidad de Canterbury.

Según Cattanach & Pampanin (2008) indican que “El primer edificio PRESSS con dispositivos externos Plug&Play se localizada en Nueva Zelanda está destinado al Edificio de la Enseñanza e Investigación de la Universidad de Victoria en Wellington” (p. 9).

Analizando lo establecido por Boehm (2022) “revisión del estado de arte sobre el uso de disipadores de energía sísmica, las pruebas experimentales realizadas al disipador de energía sísmica denominado Dampo 1505” (p. 7), dicha investigación se desarrolló e inscribió en México, realizando pruebas experimentales y modelos no lineales utilizando variaciones en el espesor y longitud del disipador de energía sísmica.

El autor Boehm (2022) indica que este dispositivo de protección sísmica presenta como objetivo “desarrollar un modelo de elementos finitos de un disipador de energía sísmica para evaluar el efecto que tiene la variación de diferentes propiedades físicas en su comportamiento” (p. 9). Las conclusiones obtenidas con respecto a las pruebas experimentales y el modelo no lineal del disipador Dampo 1505, se instalan fácilmente en las estructuras, absorbe correctamente la capacidad de disipación de energía, presenta un comportamiento inelástico estable, dicho modelo de elementos finitos tuvo como función principal estudiar el comportamiento del disipador de energía sísmica y examinar las variaciones de la deformación plástica, finalmente se realiza una comparación del modelo experimental y el numérico indicando un comportamiento adecuado en el intervalo elástico e inelástico.

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente en Costa Rica las estructuras son diseñadas con los requerimientos necesarios para salvaguardar la vida y soportar eventos sísmicos mediante el daño estructural controlado utilizando normas y códigos de diseño sismorresistente establecidos. En el país se requiere implementar tecnología avanzada para perfeccionar el desarrollo de la ingeniería

sismorresistente utilizando disipadores externos de energía que sean económicamente viables, fáciles de instalar o reemplazar y que eliminen los costos de reparación en los elementos estructurales, esto para implementarlos en nuestras edificaciones, además, que reduzcan la respuesta sísmica de la estructura, con el fin de mejorar la protección y seguridad de edificaciones existentes o futuras que se localizan en zonas de alta sismicidad en Costa Rica.

Interpretando las ideas de Segovia (2016) “La ideología de la mayoría de las normas de diseño sismorresistente es que frente a un sismo con gran magnitud la edificación no colapse y frente a sismos moderados sufran daños reparables” (p. 12), pero en ocasiones los sismos con menor magnitud causan daños estructurales significativos que generan costos elevados en reparación, y con eventos sísmicos de mayor magnitud puede colapsar totalmente la edificación producto de los grandes daños originados a los elementos estructurales.

Según Cancelado (2012), establece que “se deben considerar alternativas de reforzamiento estructural, que tengan un buen desempeño sísmico y que su implementación sea técnica y económicamente viable en nuestras ciudades” (p. 11). En varios países se han implementado los disipadores externos de energía, por ejemplo: Nueva Zelanda, ya que son una buena alternativa para mejorar el reforzamiento de la estructura y evitar daños estructurales, esto causado por eventos sísmicos de gran y pequeña magnitud. Además, se tiene la idea que los disipadores externos de energía tienen precios elevados, pero son económicamente viables para implementarlos o reemplazarlos en caso de ser necesarios en las edificaciones existentes o futuras.

En consecuencia, de lo mencionado anteriormente, se dispone a desarrollar un disipador externo de energía a base de acero A706 que reduzcan el daño estructural producto de los sismos de gran o pequeña magnitud que afectan directamente las estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en nuestro país. Posteriormente se plantea la siguiente incógnita: ¿El desarrollo del disipador externo de energía a base de acero A706 es una buena alternativa para reducir el daño en los elementos estructurales causados por eventos sísmicos que en ocasiones afectan las estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en Costa Rica?

1.3 Objetivo general

- Desarrollar un disipador externo de energía a base de acero A706 para estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en Costa Rica que reduzcan el daño estructural producto de las fuerzas sísmicas y que sean reemplazables.

1.4 Objetivos específicos

1. Efectuar un ensayo de tracción a la varilla #5 A706 en el laboratorio, utilizando la máquina de ensayo universal, extensómetro y galgas extensiométricas, para obtener las propiedades mecánicas.
2. Crear un modelo virtual en el Software ANSYS del disipador externo de energía utilizando el método de elementos finitos para realizar una comprobación que el dispositivo cumple su función disipando energía.
3. Elaborar el disipador externo de energía utilizando los materiales varilla #5 A706, tubo A33 circular y mortero Eucofast, para comprobar en pruebas de laboratorio su funcionalidad.
4. Evaluar mediante pruebas de laboratorio el compartimento histerético del disipador externo de energía aplicando carga y descarga (protocolo de desplazamiento) para demostrar la relación de fuerza-desplazamiento o esfuerzo-deformación unitaria.
5. Comparar los resultados experimentales del laboratorio con valores del modelo virtual utilizando el método de elemento finito para demostrar que la implementación de disipadores externos de energía reduce el daño estructural ocasionado por las fuerzas sísmicas.

1.5 Justificación

Las estructuras en Costa Rica han sido sacudidas por diferentes eventos sísmicos de gran y pequeña magnitud que ocasionaron daños estructurales, reparaciones costosas y pérdida de vidas humanas, por dicha razón se busca desarrollar un dispositivo de protección sísmica (disipador externo de energía a base de acero A706) que reduzcan los desplazamientos laterales de la edificación generados por las fuerzas sísmicas, esto sin alcanzar los rangos inelásticos y mantenerse en los rangos elásticos establecidos para disminuir los daños ocasionados a la estructura, reparaciones en los elementos estructurales y pérdida de vidas humanas producto del fenómeno natural mencionado anteriormente. El

disipador externo de energía a base de acero A706 se puede implementar en edificaciones existentes o nuevas del país.

Analizando lo mencionado por Solórzano (2005) “la situación sísmica actual es semejante a la que se ha observado históricamente en este país, por lo que es probable que sismos fuertes del pasado se repitan en el futuro” (p. 4), lo anterior expresa que existe una probabilidad alta de que ocurra un evento sísmico con gran magnitud en el futuro en Costa Rica, por ese motivo se busca implementar medidas antisísmicas como los disipadores externos de energía a base de acero A706 que prevengan los daños estructurales, además que sean reemplazables si es necesario después de un sismo.

Interpretando la investigación de Segovia (2016), establece que “durante la ocurrencia de sismos fuertes las estructuras resisten disipando energía en sus elementos principales (vigas, columnas y placas) alcanzando deformaciones superiores a su límite elástico, sufriendo daño estructural” (p. 7), lo anterior hace referencia al objetivo principal del diseño sismorresistente que busca disipar la energía ocasionada por los eventos sísmicos por medio del daño estructural controlado en los elementos estructurales y conexiones, pero si implementamos disipadores externos de energía a base de acero A706 en la estructura estos logran reducir los daños en las columnas, vigas y placas para que no alcancen los límites inelásticos, lo que representa una mejor funcionalidad de la estructura post-sismo.

Según Jiménez (2015), indica que “los estudios que se han realizado sobre disipación de energía en estructuras, es un campo muy amplio y con mucho potencial, el cual está actualmente en uso en países como Japón, Estados Unidos, Turquía, Nueva Zelanda entre otros” (p. 6). El desarrollo del disipador externo de energía a base de acero A706 es un dispositivo con tecnología antisísmica, esto genera una tesis de investigación significativa para el país en temas estructurales relacionados con el diseño sismorresistente, ya que implementar el disipador externo de energía a base de acero A706 en las estructuras mejora el comportamiento, desempeño y durabilidad de los elementos estructurales que componen la edificación.

1.6 Alcances y limitaciones

1.6.1 Alcances

Se realiza un ensayo de tracción en la máquina universal del laboratorio para obtener las propiedades mecánicas de la varilla #5 A706, estas propiedades se insertan en el modelo virtual realizado en el Software ANSYS.

Se debe realizar un modelo virtual del disipador externo de energía a base de acero A706, utilizando un mortero Eucofas, un tubo A33 en el núcleo y una varilla #5 con reducción, el método de elemento finito con el Software ANSYS comprueba si el dispositivo sísmico cumple con el correcto comportamiento histerético.

El disipador externo de energía a base de acero A706 se construye en el taller utilizando una varilla #5 que lleva una reducción de diámetro en la parte central (fusible) quedando totalmente lisa y en los extremos corrugada, el núcleo lleva un tubo A33 de sección circular con seis tornillos ajustables en los extremos para mantenerlo centrado cuando se agrega el mortero Eucofast.

En el laboratorio de LANAMME se realiza una prueba utilizando la máquina de ensayo universal para evaluar el comportamiento histerético que genera el dispositivo cuando le aplican ciclos de carga y descarga (ciclos de tensión y compresión), con estos resultados se demuestra la relación de fuerza-desplazamiento que presenta el disipador externo de energía.

Se realiza una comprobación en Microsoft Excel con gráficos comparativos de los resultados obtenidos en el laboratorio versus el modelo virtual del método de elemento finito, esto para demostrar que la implementación del disipador externo de energía reduce el daño estructural.

1.6.2 Limitaciones

El disipador externo de energía no se elabora con acero grado 40, solamente grado 60, lo que conlleva a una deficiencia en la prueba de laboratorio por la variación del grado en el material.

El diseño de la conexión entre el disipador externo de energía a base de acero A706 y la columna o viga se desprecia por temas de tiempo en el trabajo de investigación.

Solamente se realiza una prueba en el laboratorio, esto quiere decir que sólo se falla un disipador externo de energía. Generando que no se realicen experimentos con otro tipo diámetros de varilla, grado de varilla, tubo circular, mortero y materiales antiadherentes.

El modelo virtual del disipador de energía solamente se realiza en el Software ANSYS, y no se construye en otro Software para comparar resultados finales del comportamiento histérico.

En Costa Rica no existen normas e investigaciones para la utilización, construcción e implementación de los disipadores externos de energía a base de acero A706.

1.7 Impacto

El trabajo de investigación presenta varios impactos que se desarrollaran ampliamente más adelante: ambiental, económico y social, esto referente al desarrollo del disipador externo de energía a base de acero A706 para estructuras de concreto prefabricas de alta ductilidad en Costa Rica, el dispositivo funciona para disminuir el daño estructural en los elementos que componen la edificación e incluso prevenir el colapso de esta.

En el aspecto ambiental si una edificación es afectada por un evento sísmico de gran magnitud, los elementos estructurales como vigas, columnas y placas obtienen daños estructurales que generan diferentes tipos de contaminaciones en el agua y suelo y aire, por ejemplo: los escombros, que afectan el medio ambiente y la salud de las personas, por esta razón se deben implementar disipadores externos de energía a base de acero A706 para que eviten el daño estructural, reduciendo los desplazamientos laterales de la edificación generados por las fuerzas sísmicas, esto para disminuir o eliminar totalmente la contaminación generada por los escombros a las diferentes partes que componen el ambiente.

Para el impacto económico los disipadores externos de energía a base de acero A706 buscan reducir el daño estructural antes, durante y después del sismo, generando costos de reparaciones nulos, ya que los elementos estructurales como las columnas, vigas y placas no van a presentar daños y la estructura no pierde su funcionalidad. Además, reemplazar el dispositivo dañado si es necesario después de un evento sísmico representa un costo relativamente bajo en comparación de reparar los elementos que componen la estructura antes mencionados, mejorando el comportamiento, desempeño y durabilidad de los elementos que conforman la edificación.

En el tema social las estructuras que contengan la implementación de disipadores externos de energía a base de acero A706 se verán beneficiadas, ya que, estos dispositivos tienen como finalidad reducir el daño estructural, lo que conlleva a eliminar la pérdida de vidas humanas y salvaguardar la vida de las personas que se encuentran en la edificación cuando ocurre un evento sísmico. Además, estos dispositivos antisísmicos generan una confianza alta a las personas que se encuentran en las edificaciones con la implementación de los disipadores externos de energía, ya que, las personas se sienten seguras.

1.8 Hipótesis

El disipador externo de energía a base de acero A706 presenta un comportamiento histerético correcto (disipa energía), esto genera una reducción del daño estructural producto de los eventos sísmicos que afectan las estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en Costa Rica y permite el reemplazo.

2 Capítulo II. Fundamentación teórica

En este capítulo se proporcionará los fundamentos teóricos para desarrollar el disipador externo de energía a base de acero A706 para estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en Costa Rica, este apartado se divide en cinco partes: la primera trata sobre las consideraciones teóricas-experimentales del acero A706 (varilla #5 grado 60) y los equipos utilizados en el laboratorio y taller, seguidamente en la segunda se analizará el comportamiento elástico versus plástico de un material y el efecto Bauschinger. En la tercera se explica el núcleo y sus componentes (Tubo circular, mortero expansivo, material antiadherente y galgas extensiométricas). La cuarta parte se analiza teóricamente el método de elementos finitos y como quinta la funcionalidad del disipador externo de energía.

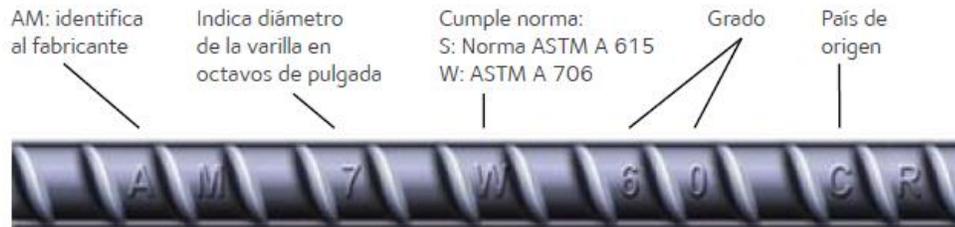
2.1 Acero A706

El acero A706 grado 60 tiene una capacidad de disipar energía mayor, esto debido a las altas elongaciones y ductilidad que presenta, resistiendo mayores deformaciones. Este tipo de acero se suele utilizar como refuerzo en las estructuras sismorresistentes (Parada, 2013).

Según Sanabria (2016) establece que los “aceros de baja aleación fabricados según la norma ASTM A706 contienen otros elementos además de carbono que permiten modificar sus propiedades mecánicas. Al añadir cantidades limitadas de elementos de aleación es posible generar una resistencia específica a la fluencia” (p. 4). En la figura 1 se observa como identificar las barras de acero o varillas corrugadas según la normativa ASTM A706 que representa el acero de baja aleación. En la construcción de Costa Rica se suele utilizar este tipo de acero A706 para asegurar la ductilidad local óptima, en pruebas de laboratorio se demuestra que este tipo de acero es capaz de resistir deformaciones cíclicas altas.

Figura 1

Identificación de una barra grado 420 [60]



Nota. Tomado de Catálogo de productos ArcelorMittal Costa Rica Aceros Largos, ArcelorMittal, s.f. (<https://docplayer.es/25773008-Catalogo-de-productos-arcelormittal-costa-rica-aceros-largos.html>)

Cuando las varillas A706 (grado 60) se someten a cargas axiales de tensión o compresión en el laboratorio estas reaccionan generando un comportamiento en las propiedades mecánicas del material, que se analizarán detenidamente en las siguientes secciones:

2.1.1 Ensayos en laboratorio

Es importante reconocer que un ensayo significa, pruebas que se realizan en el ámbito de laboratorio, con el fin de llegar a conclusiones. Además, un ensayo correcto debe ser confiable, preciso y significativo. El procedimiento del objeto analizado en el ensayo debe ser controlado para no generar errores significativos en la prueba (González, 2015, p. 9).

La capacidad de un material es variable de acuerdo con la resistencia de este cuando se le aplica una carga y no presenta ningún tipo de falla o deformación. La prueba de tensión y compresión en una varilla es importante, ya que se obtienen las propiedades mecánicas del material en términos de esfuerzos y deformaciones unitarias o equivalentes, lo anterior es importante para conocer la resistencia del material en este caso la varilla #5 A706 (Hibbeler, 2006, p. 85).

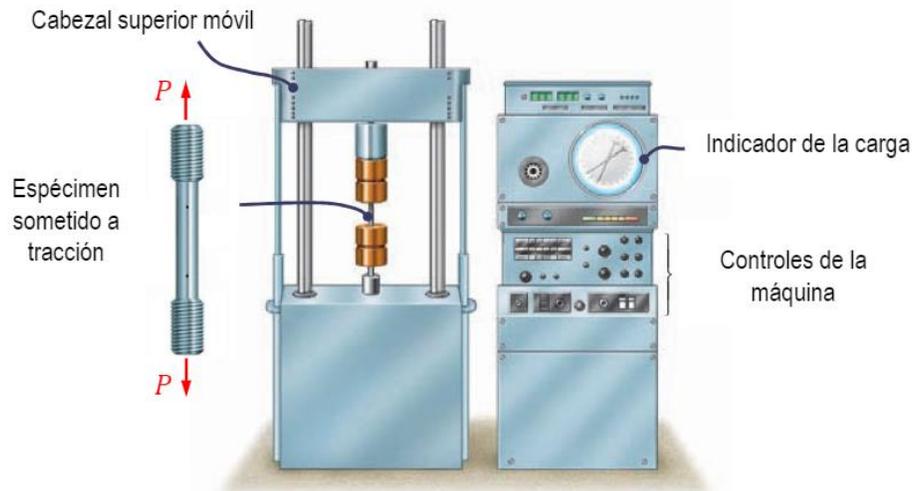
2.1.1.1 Máquina de ensayo universal

El autor González (2015) indica que “una máquina universal, es una máquina semejante a una prensa, con facultades para someter materiales a ensayos de tracción y compresión para medir sus propiedades” (p. 2), la función principal de este equipo es medir las resistencias de los materiales, aplicando cargas que son controladas sobre la probeta,

además miden de manera gráfica el diagrama de esfuerzo versus deformación unitaria hasta llegar a la fractura.

Figura 2

Ensayos de tracción



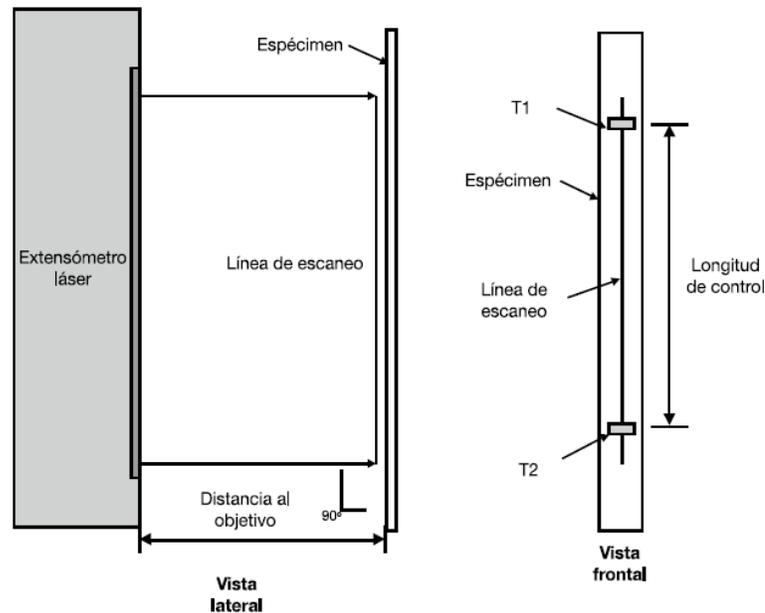
Nota. Tomado de Resistencia de materiales, H. Yépez, 2014. (<https://docplayer.es/77090890-Resistencia-de-materiales-1a-profesor-herbert-yepéz-castillo.html>)

2.1.1.2 Extensómetro láser

Según Guirao (2020) establece que “un extensómetro es un instrumento que mide la deformación en un material a partir del cambio en las dimensiones del mismo” (p. 7), este instrumento de medición se utiliza en las pruebas de laboratorio para medir las deformaciones unitarias o equivalentes de las varillas (usualmente), también permite determinar las propiedades mecánicas del material relacionadas al desplazamiento.

Los autores Monge y Abarca (2013) indican que los extensómetros láser “permiten que la toma de datos se realice mediante la medición del rebote de un haz de luz por lo que no existe contacto físico entre el aparato de medición y el espécimen” (p. 5). Lo anterior indica que el extensómetro láser mide la deformación entre dos puntos establecidos (200 mm) hasta alcanzar la falla. Además, la separación de los dos puntos donde se desea medir la deformación se colocan dos líneas de material retro-flectivos para que el láser mida una longitud de control.

La figura 3 representa lo mencionado anteriormente sobre la longitud de control del láser (200 mm).

Figura 3*Esquema de montaje de extensómetro láser*

Nota. Tomado de Comparación de determinación de propiedades mecánicas en barras de refuerzo para concreto con extensómetros axial convencional y extensómetro láser, A. Monge y A. Abarca, 2013.

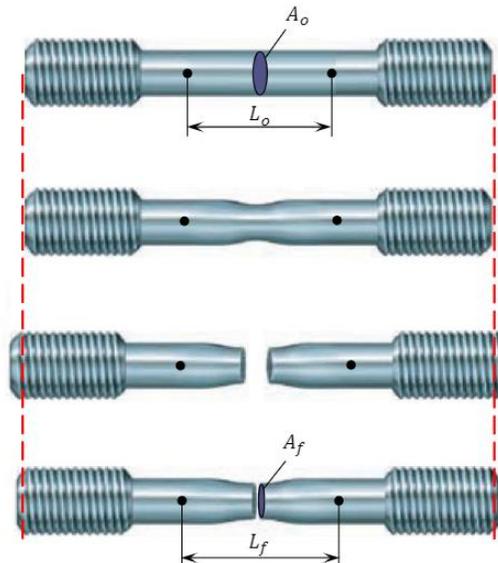
2.1.1.2.1 Ensayo de tensión

El ensayo de tracción o tensión es importante para determinar las cuatro propiedades más significativas del acero, entre ellas: la ductilidad, resistencia, rigidez y tenacidad. La prueba consiste en sujetar una probeta de acero de los agarres o mordazas en la máquina universal que es sometida a esfuerzos axiales de tensión o tracción hasta llegar al esfuerzo de fractura. Después de realizar este ensayo se obtiene un diagrama esfuerzo versus deformación unitaria del cual se derivan varios subtemas del comportamiento del material analizado (González, 2015, p. 18).

En la figura 4 se observa una probeta de acero que se falla en la máquina de ensayo universal, presentando un estiramiento o alargamiento conforme le aplican fuerzas axiales en tracción hasta alcanzar la fractura (estricción).

Figura 4

Materiales dúctiles y frágiles



Nota. Tomado de Resistencia de materiales, H. Yépez, 2014. (<https://docplayer.es/77090890-Resistencia-de-materiales-1a-profesor-herbert-yepéz-castillo.html>)

2.1.1.2.2 Ensayo de compresión

Interpretando el Ensayo a compresión de una varilla maciza de sección circular (2017) indica que el “esfuerzo de compresión es la resultante de las tensiones o presiones que existen dentro de un sólido deformable o medio continuo, caracterizada porque tiende a una reducción de volumen del cuerpo, y a un acortamiento del cuerpo en determinada dirección”. La prueba o ensayo de compresión se utiliza para analizar el comportamiento de los materiales bajo cargas aplastantes, esto quiere decir que la probeta se comprime. Además, este tipo de cargas en compresión generan un pandeo en las probetas que son lo suficientemente esbeltas.

Es importante considerar que este ensayo en compresión se lleva a cabo en la máquina universal con el fin de obtener el diagrama esfuerzo versus deformación unitaria, para determinar el límite elástico, proporcional, resistencia a la compresión, esfuerzo de fluencia, entre otros (Ensayo a compresión de una varilla maciza de sección circular, 2017).

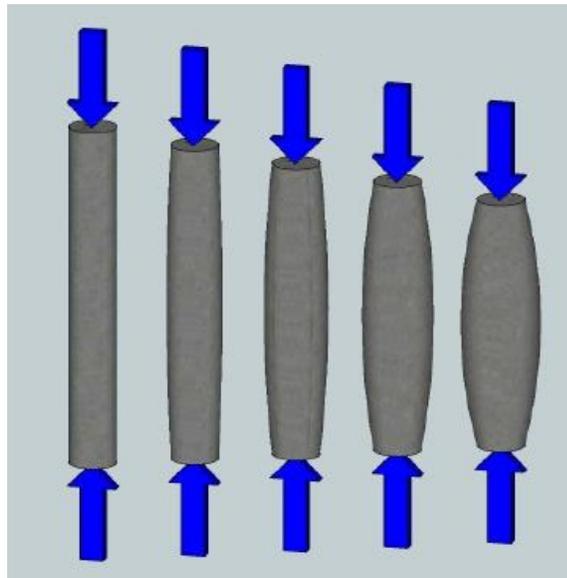
Según Mariaca (2013) establece que “los materiales dúctiles presentan los mismos valores en sus características tanto en tensión como en compresión” (p. 38). Esto quiere decir que si una varilla o probeta se carga en compresión en lugar de tensión la representación

gráfica del diagrama esfuerzo-deformación sería la misma, la resistencia a la cedencia es la misma en ambos sentidos. Es importante recalcar que en el sentido de la compresión no puede ocurrir estricción.

En la figura 5 se observa el comportamiento que presenta un material cuando es sometido a cargas axiales en el sentido de la compresión.

Figura 5

Miembros de acero sometidos a compresión



Nota. Tomado de Scribd, C. Cusme, 2020. (<https://es.scribd.com/presentation/463749971/Capitulo-4-Miembros-a-Compresion-ACERO-ESTRUCTURAL>)

2.1.1.2.3 Esfuerzo axial

Según Beer, et al., (2017), establecen que el esfuerzo axial es “la fuerza por unidad de área, o la intensidad de las fuerzas distribuidas a través de una sección dada” (p. 6), lo anterior indica que es una razón entre la carga o fuerza axial aplicada sobre el área del material en estudio. El signo positivo se utiliza para indicar el esfuerzo en tensión y el signo negativo el esfuerzo en compresión. Para obtener el esfuerzo se utiliza la ecuación 1:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

Donde:

σ = Esfuerzo nominal

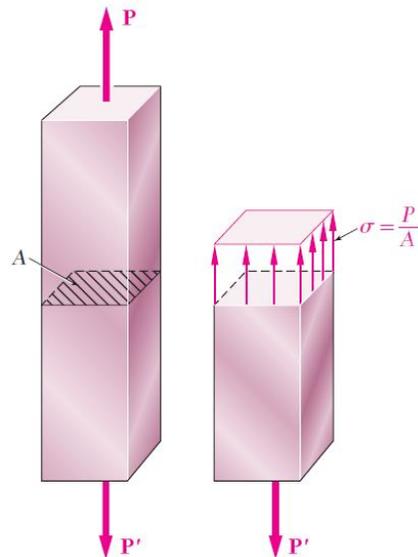
P = Carga-fuerza axial

A = Área de la sección transversal original

En la figura 6 se observa la sección de un material que se utiliza para determinar su fuerza interna y su esfuerzo normal bajo una carga axial.

Figura 6

Elemento con una carga axial



Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

2.1.1.2.4 Deformación normal bajo carga axial

El autor Beer, et al., (2017), enseñan que la deformación unitaria la “se define como la deformación unitaria normal en una varilla bajo carga axial como la deformación por unidad de longitud de dicha varilla” (p. 51). Con la ecuación 2 se obtiene el resultado de la deformación unitaria que presente el material:

$$\epsilon = \frac{\delta}{L} \quad (2)$$

Donde:

ϵ = Deformación nominal-unitaria

δ = Deformación o alargamiento

L = Longitud calibrada

Existe otra ecuación para obtener la deformación unitaria del material, como la ecuación 3:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3)$$

Donde:

ε = Deformación nominal-unitaria

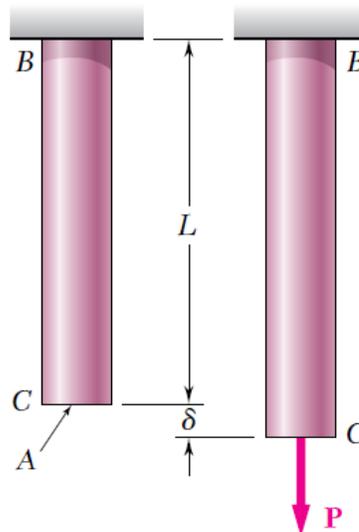
ΔL = Cambio de longitud

L_0 = Longitud inicial

La figura 7 representa una barra sin cargar axialmente y otra cargada con una fuerza P, esto permite observar la deformación o alargamiento que presenta la barra producto de la carga axial P aplicada.

Figura 7

Barra cargada axialmente no deformada y deformada



Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

Con la ecuación 4 se obtiene la deformación o alargamiento que causa una carga axial P:

$$\delta = \frac{P \cdot L}{A \cdot E} \quad (4)$$

Donde:

δ = Deformación o alargamiento

P = Carga-fuerza axial

L = Longitud inicial

A = Área de la sección transversal original

E = Módulo de elasticidad o Young

2.1.1.2.5 Relación de Poisson

Según Hibbeler (2006), indica que “cuando un cuerpo se deforma está sometido a una fuerza axial de tensión, no sólo se alarga sino que también se contrae lateralmente” (p. 107). Las fuerzas en compresión también generan este comportamiento en el material, ya que el material al comprimirse crece o se hincha lateralmente. Para el disipador externo de energía al aplicar ciclos de carga y descarga, el fusible y el tubo de la parte central se deforma, por lo tanto crece lateralmente su sección de área.

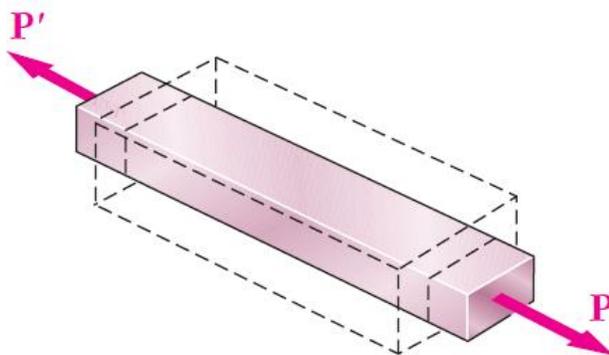
En pruebas experimentales se analizó que las deformaciones unitarias laterales presentan una relación constante con las deformaciones unitarias axiales producidas por las cargas o fuerzas axiales aplicadas al material, esta relación de Poisson solamente se puede aplicar cuando el material permanezca en el rango elástico (Popov, 2000, p. 70).

La ecuación 5 se utiliza para obtener la relación de Poisson:

$$\nu = - \frac{\text{Deformación unitaria lateral}}{\text{Deformación unitaria axial}} \quad (5)$$

Figura 8

Efecto de la relación de Poisson



Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

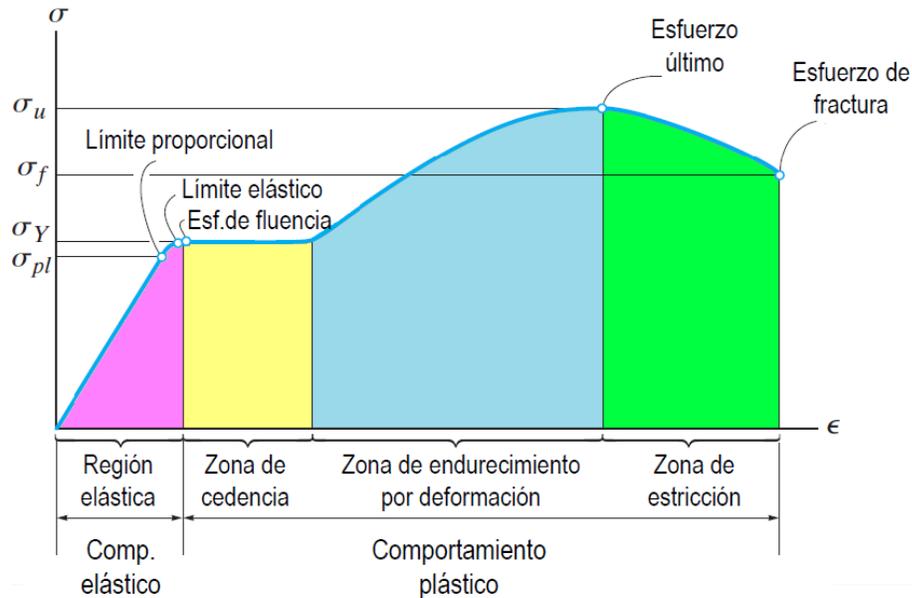
2.1.2 Diagrama esfuerzo versus deformación

El diagrama analiza el comportamiento entre el esfuerzo versus deformación equivalente del material (varilla #5) producto de la carga aplicada al elemento, es importante mencionar que dos diagramas para un mismo material pueden ser muy similares pero no iguales debido a la fabricación del material, también en ocasiones presentan imperfecciones, la temperatura del laboratorio donde se realiza la prueba es variable e incluso la forma de aplicar la carga para medir la relación esfuerzo versus deformación unitaria no es similar en ambas pruebas. El esfuerzo es la relación entre la carga o fuerza aplicada y el área a la que está sometida la varilla, y la deformación es un cambio que presenta el material cuando se somete a esfuerzos producto de la carga (Hibbeler, 2006, p. 87).

La figura 9 representa teóricamente el diagrama de esfuerzo-deformación unitaria o equivalente que presenta una varilla #5 A706 cuando es sometido al ensayo de tracción en la máquina de ensayo universal.

Figura 9

Diagrama de esfuerzo-deformación unitaria



Nota. Adaptada de Resistencia de materiales, H. Yépez, 2014. (<https://docplayer.es/77090890-Resistencia-de-materiales-1a-profesor-herbert-yepcz-castillo.html>)

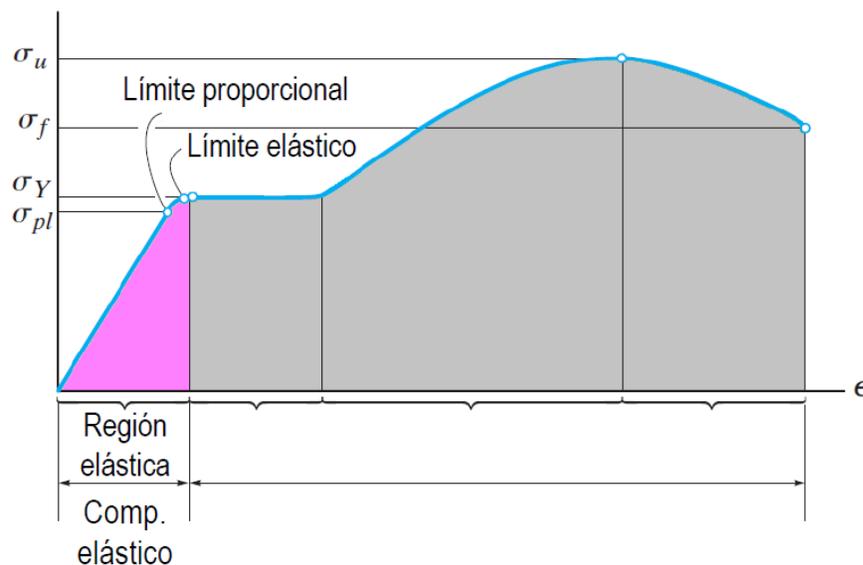
2.1.2.1 Comportamiento elástico

El material (varilla #5) presenta un comportamiento elástico cuando las deformaciones de este se encuentran dentro de la región elástica o triangular, en este punto se observa una línea recta en la mayoría de la región esto indica que el esfuerzo aplicado es proporcional a la deformación, el material (varilla #5) en este punto se localiza en la región elástica lineal, donde el límite proporcional se nombra límite superior del esfuerzo. Cuando el esfuerzo aumenta sobrepasa el límite proporcional, generando que la curva realice un doblez y se aplane llegando al límite elástico, en este punto si la carga aplicada se retira el material regresa a la forma original. El límite elástico de la varilla es difícil de establecer o detectar, ya que se encuentra muy cerca del límite proporcional (Hibbeler, 2006, p. 88).

En la figura 10 se observa teóricamente la región elástica que presenta un material (varilla #5 A706) cuando se aplica una fuerza o carga axial desde la posición inicial de cero deformación hasta llegar al límite elástico.

Figura 10

Región elástica



Nota. Tomado de Resistencia de materiales, H. Yépez, 2014. (<https://docplayer.es/77090890-Resistencia-de-materiales-1a-profesor-herbert-yepez-castillo.html>)

2.1.2.1.1 Ley de Hooke

Los autores Beer, et al., (2017), indican que “la mayor parte de las estructuras de ingeniería se diseñan para sufrir deformaciones relativamente pequeñas, que involucran sólo

la parte recta del diagrama esfuerzo-deformación” (p. 56), esto quiere decir que la deformación que sufre un cuerpo en el rango elástico es directamente proporcional a la carga o fuerza aplicada e inversamente proporcional a su sección, por esta razón surge la ecuación 6 que se utiliza para calcular la relación de la ley de Hooke:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (6)$$

Donde:

σ = Esfuerzo nominal

E = Módulo de elasticidad o Young

ε = Deformación nominal-unitaria

2.1.2.1.2 Módulo de elasticidad o módulo de Young

Según Idrovo Urgiles & Quintanilla Molina (2010), establecen que “se define módulo de elasticidad a la razón entre el incremento de esfuerzo y el cambio correspondiente a la deformación unitaria” (p. 4). Es importante considerar que el esfuerzo en compresión y tensión tiene el mismo valor de módulo de elasticidad o Young. Con la ecuación 7 se calcula el módulo de elasticidad en la zona elástica del material:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (7)$$

Donde:

E = Módulo de elasticidad o Young

σ = Esfuerzo nominal

ε = Deformación nominal-unitaria

2.1.2.2 Zona de cedencia

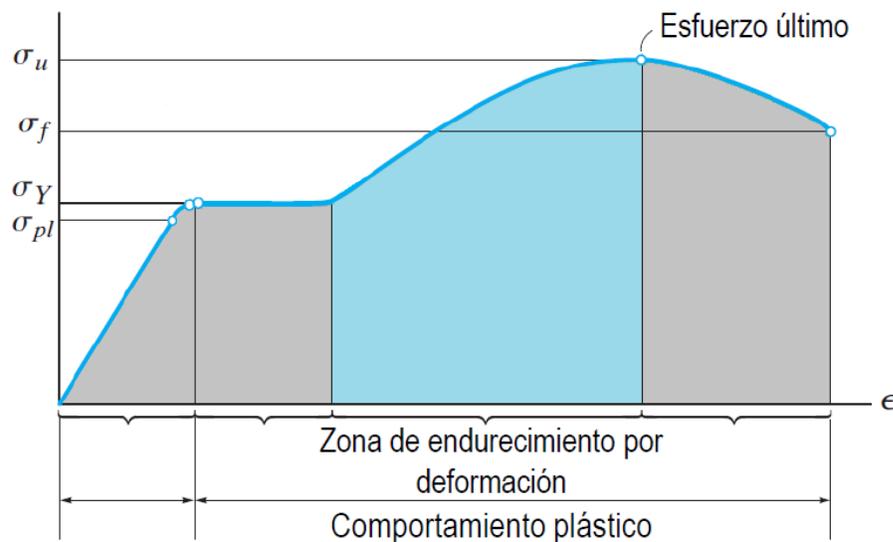
La cedencia o punto de cedencia se genera cuando se produce un aumento del esfuerzo de fluencia que está por encima del límite elástico, esto provoca que el material presente un rompimiento, ocasionando una deformación permanente. La zona de cedencia se localiza en la región rectangular presente en la deformación plástica. Cuando se obtiene el punto de cedencia, la varilla se alarga presentando una deformación sin ningún aumento en la carga, en este punto se dice que el material es perfectamente plástico (Hibbeler, 2006, p. 88).

área de la sección transversal disminuye cuando la probeta o varilla se alarga, generando una disminución uniforme del área en toda la distancia del material e incluso se debe considerar la deformación unitaria que pertenece al esfuerzo último σ_u .

Lo anterior hace referencia a la figura 12 donde se visualiza de forma representativa la zona de endurecimiento por deformación.

Figura 12

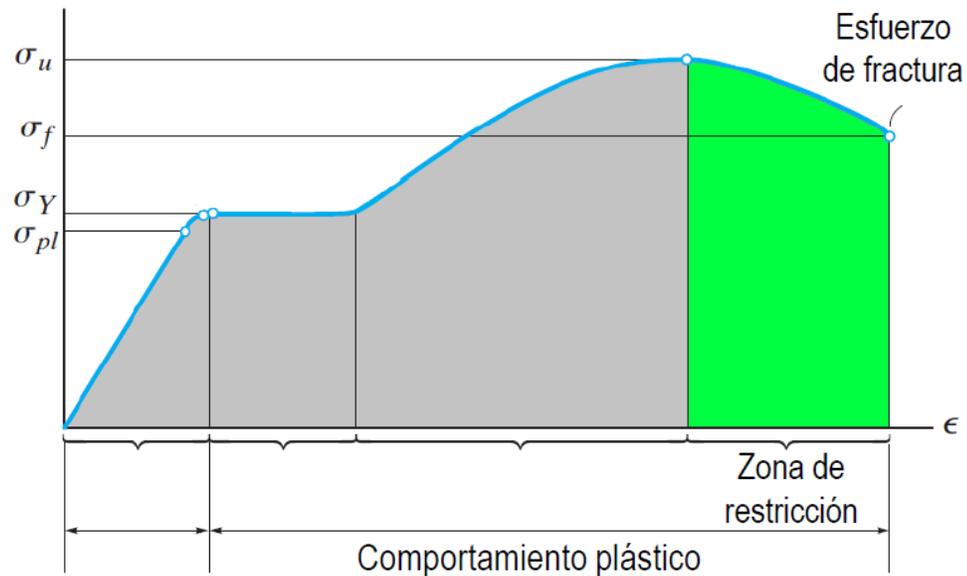
Zona de endurecimiento por deformación



Nota. Tomado de Resistencia de materiales, H. Yépez, 2014. (<https://docplayer.es/77090890-Resistencia-de-materiales-1a-profesor-herbert-yepcz-castillo.html>)

2.1.2.4 Zona de estricción

El material (varilla #5) después de alcanzar el esfuerzo último, se presenta una reducción en la sección transversal del área de la varilla, esto indica que conforme aumenta la carga axial se forma un cuello o constricción en el área de la varilla que produce un alargamiento, finalmente se presenta una curva decreciente hasta conseguir que el material se rompa en el esfuerzo de fractura, obteniendo la resistencia y rigidez del material (Hibbeler, 2006, p. 89).

Figura 13*Zona de estricción*

Nota. Tomado de Resistencia de materiales, H. Yépez, 2014. (<https://docplayer.es/77090890-Resistencia-de-materiales-1a-profesor-herbert-yepcz-castillo.html>)

2.1.2.5 Diagrama real de esfuerzo-deformación unitaria

El autor Hibbeler (2006) establece que “la mayor parte del diseño de ingeniería se hace para que el material soporte un esfuerzo dentro del rango elástico” (p. 90), esto indica que el material no debe presentar una deformación unitaria o nominal mayor al rango elástico y se recupere al quitar la carga aplicada, manteniéndose en el comportamiento elástico sin alcanzar el comportamiento plástico.

2.1.3 Ductilidad en el acero

Los materiales como la varilla corrugada poseen una ductilidad que está compuesta de propiedades mecánicas, estos pueden estar sometidos a grandes deformaciones antes de llegar a la falla. Lo anterior indica que el material tiene un valor de ductilidad cuando resiste las cargas aplicadas y soporta las deformaciones plásticas. Entre más dúctil el material tiene mayor capacidad de deformarse debido a la carga aplicada. En el diseño sísmico la ductilidad tiene una gran importancia, ya que los materiales disipan o absorben la energía con grandes deformaciones antes de presentar la falla (capacidad elástica) (Briceño, 2022).

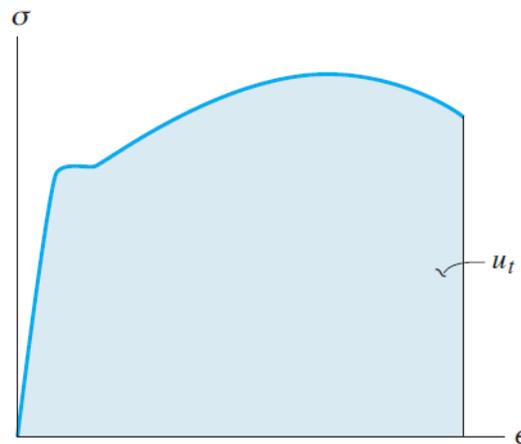
El Código Sísmico de Costa Rica (2010), indica que la ductilidad es la “capacidad de los materiales, de los componentes y de los sistemas sismorresistentes para deformarse más allá del límite elástico sin pérdida sustancial de la resistencia” (p. C/4).

2.1.4 Tenacidad

Según Popov (2000), establece que “la tenacidad define la capacidad del material para absorber energía antes de fracturarse” (p. 74), lo anterior indica que el área bajo la curva que se encuentra en el diagrama monotónico de esfuerzo-deformación representa la energía absorbida de deformación que tiene el material antes de facturarse o romperse.

Figura 14

Módulo de tenacidad



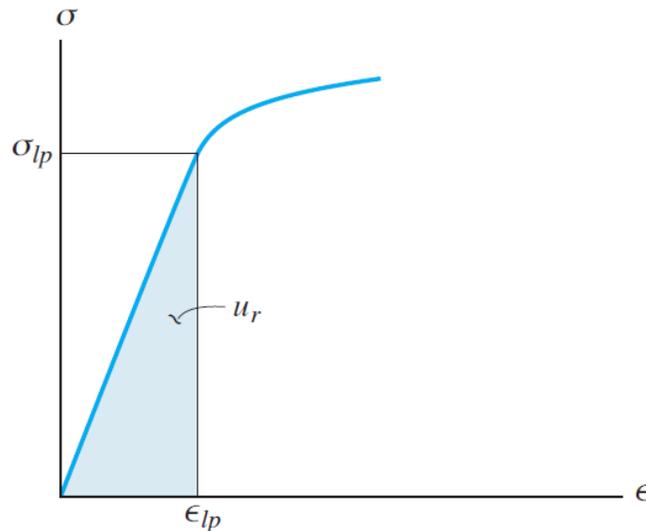
Nota. Tomada de Mecánica de materiales, R. Hibbeler, 2018, Pearson.

2.1.5 Resiliencia

El material es capaz de absorber la energía sin alcanzar las deformaciones unitarias plásticas, en otras palabras, es el área bajo la línea recta de la figura 15 que se ubica en la región elástica donde el material no absorbe energía de la deformación plástica (Popov, 2000, p. 74).

Figura 15

Módulo de resiliencia



Nota. Tomada de Mecánica de materiales, R. Hibbeler, 2018, Pearson.

2.1.6 Rigidez

La rigidez se define como la capacidad que presenta un material para resistir una deformación cuando este sujeta a cargas o fuerzas externas. Si eliminamos la carga externa y el material se encuentra en el rango elástico este vuelve al estado original, pero si la fuerza externa supera el rango elástico pasando hasta la zona de cedencia o zona de endurecimiento por deformación este material obtiene una deformación residual que no permite el regreso al estado original.

2.1.7 Fatiga por deformación

El autor Hibbeler (2006) establece que “cuando un material se somete a ciclos de esfuerzo o de deformación repetidos, ello ocasiona que su estructura se colapse, y, finalmente se fracture” (p. 113), lo anterior se conoce como fatiga, ya que el material (acero) se rompe creando una fractura. Es importante considerar que una falla por fatiga es de naturaleza frágil, esto también se presenta en materiales dúctiles.

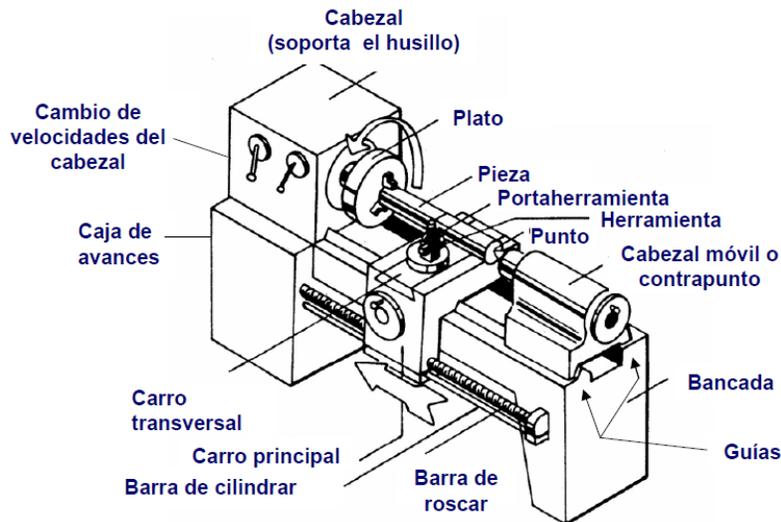
2.1.8 Máquina torno paralelo

El autor Bavaresco (s.f), establece que “el torno es una máquina giratoria en la cual se sujeta una pieza de metal o de madera y la hace girar mientras un útil de corte da forma al objeto” (p. 1). Es importante considerar que la herramienta de corte (útil) puede moverse perpendicular y paralelamente al eje giratorio, generando un desgaste en la pieza.

Además, se pueden utilizar útiles o accesorios especiales para dar un acabado liso a la superficie que se desgasta. En la figura 16 se observa el torno paralelo con las respectivas partes que lo componen.

Figura 16

Torno Paralelo



Nota. Adaptado de Tema 9: Torneado (II) - Máquinas (p. 4), Universidad del País Vasco.

(<https://docplayer.es/19981521-Tema-9-torneado-ii-maquinas.html>)

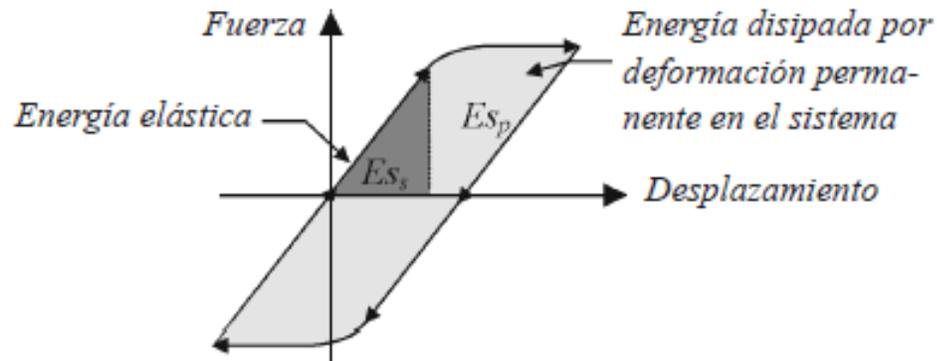
2.2 Histéresis

Según León (2016) indica que la histéresis es el “fenómeno por medio del cual dos, o más, propiedades físicas se relacionan de una manera que depende de la historia de su comportamiento previo” (p. 27). Lo anterior se relaciona al comportamiento que presentan los materiales estructurales cuando se someten a esfuerzos o deformaciones que están fuera del rango elástico o lineal, además una gran parte de la energía disipada por el material estructural en el rango inelástico se puede asociar al área dentro de los ciclos de histéresis. Cuando el acero es llevado más allá del límite elástico e incursionando en el rango plástico se observan varios fenómenos durante estos ciclos de carga y descarga (diagrama de fuerza versus desplazamientos).

La figura 17 muestra la disipación de energía en el rango elástico y deformación permanente, generando desplazamientos en el eje x producto de las fuerzas externas aplicadas en el eje y:

Figura 17

Ciclo de histéresis en un sistema estructural, energía elástica e inelástica



Nota. Tomada de Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones, A. Oviedo et al., 2006. (http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200010#fig2)

2.3 Comportamiento elástico versus plástico de un material

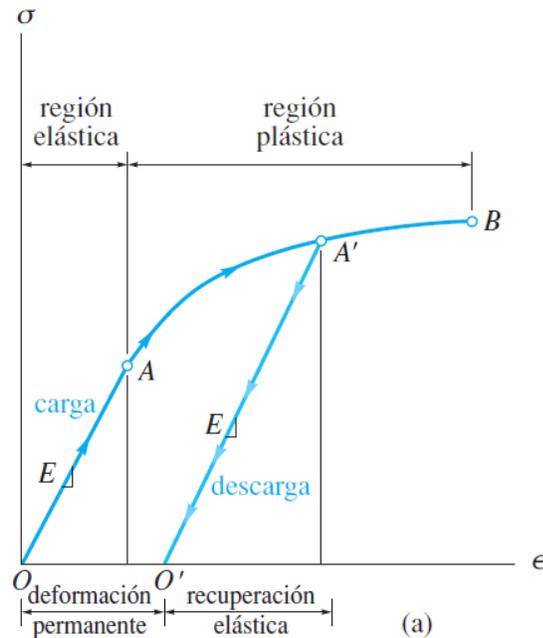
Cuando aplicamos carga en la zona elástica al material dúctil y posteriormente se descarga, se genera una deformación elástica que se recupera y provoca que el material vuelva al estado de equilibrio, pero si la deformación unitaria del material no vuelve a la posición original después de retirar la carga significa que ocurrió una deformación permanente o plástica en el material analizado (Hibbeler, 2006, p. 95).

Los autores Beer et al., (2017), expresan que “para la mayor parte de los materiales, la deformación plástica depende no tan solo del máximo valor alcanzado por el esfuerzo, sino también del tiempo que pasa antes de que se retire la carga” (p. 58), lo anterior indica que el desplazamiento depende del esfuerzo de la deformación plástica.

Según Hibbeler (2006), establece “que las fuerzas interatómicas tienen que vencerse para alargar al espécimen elásticamente, entonces estas mismas fuerzas hacen que los átomos permanezcan juntos cuando se retira la carga” (p. 95), en la figura 18 se observa el diagrama esfuerzo-deformación unitaria, donde el material se carga sobrepasando el punto o zona de cedencia A hasta llegar al punto A', el módulo de Young o elasticidad E es igual tanto en la pendiente de carga (puntos OA) y descarga (puntos O'A').

Figura 18

Diagrama de esfuerzo-deformación unitaria

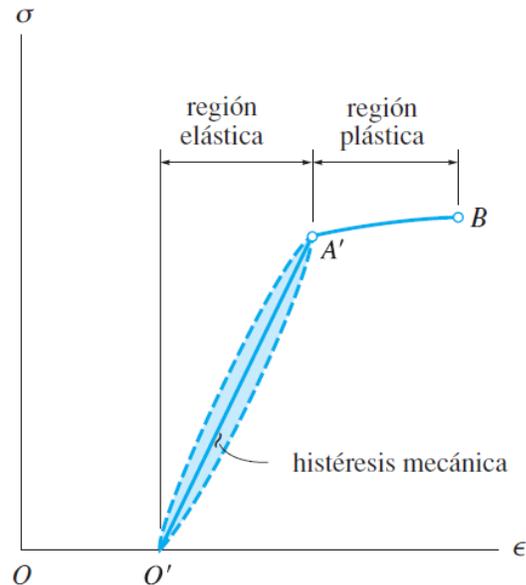


Nota. Tomada de Mecánica de materiales, R. Hibbeler, 2018, Pearson.

En la figura 19 Hibbeler (2006) indica “si se aplica de nuevo la carga, los átomos del material serán nuevamente desplazados hasta que ocurra la fluencia en o cerca del esfuerzo A' ” (p. 95), en este punto el diagrama presenta la misma trayectoria analizada anteriormente. En este diagrama el punto de cedencia es mayor ($O'A'B$), debido al endurecimiento por deformación, el material tiene menor ductilidad, pero mayor región elástica y una región plástica pequeña en comparación con su estado original. La histéresis mecánica es la energía pérdida del área sombreada entre las curvas.

Figura 19

Diagrama de esfuerzo-deformación unitaria

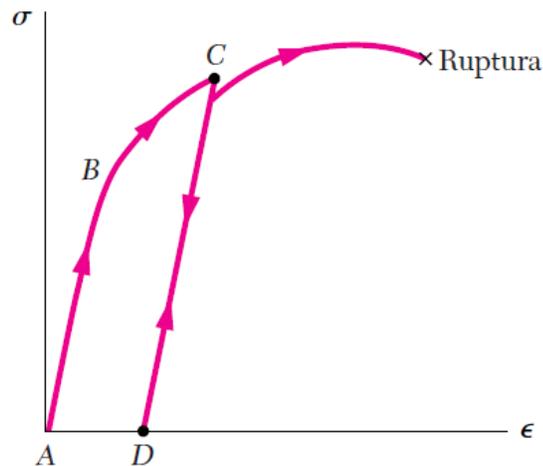


Nota. Tomada de Mecánica de materiales, R. Hibbeler, 2018, Pearson.

Después de cargar y descargar el material (figura 18), este se vuelve a cargar formando el desarrollo de otra curva de carga que pasa muy cerca de la primera, casi alcanzando el punto C doblándose hacia la derecha para conectarse con la continuidad del diagrama de esfuerzo-deformación unitaria. La curva que se volvió a cargar presenta un mayor alargamiento que la curva del comienzo, esto debido a los límites elásticos y de proporcionalidad que aumentaron el resultado del endurecimiento por deformación que ocurrió en la carga del material anterior. Seguidamente se debe calcular la ductilidad del material (varilla) desde el punto D (Beer, et al., 2017, p. 58).

Figura 20

Respuesta de esfuerzo-deformación de un material dúctil recargado después de una cedencia y una descarga previas

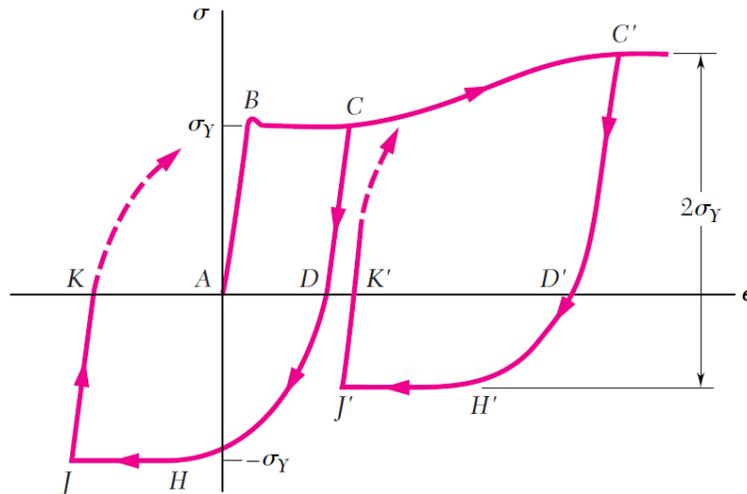


Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

En la figura 21 la carga se aplica en la dirección de la tensión y compresión, se supone que el material analizado es acero dulce donde el punto de cedencia es igual para ambos sentidos (tensión-compresión). Inicialmente se carga en el sentido de la tensión hasta llegar al punto C y posteriormente se descarga hasta el punto D, después se aplica una carga en el sentido de la compresión que provoca que el material (acero dulce) llegue al punto H. Es importante considerar que la forma de unir los puntos DH en el diagrama esfuerzo-deformación es curva y no se observa un punto de cedencia claro o bien definido, esto se conoce como efecto Bauschinger. Manteniendo la carga en compresión se llega a los puntos HJ y retirando la carga después de alcanzar el punto J se llega a un esfuerzo de 0 entre los puntos JK, la pendiente JK es igual al módulo de elasticidad. Finalmente, si aplicamos nuevamente la carga al material en el sentido de la tensión el diagrama esfuerzo-deformación genera una curva creciente hacia la derecha llegando al esfuerzo de cedencia (σ_y) (Beer, et al., 2017, p. 58).

Figura 21

Respuesta de esfuerzo-deformación para el acero dulce sometido a dos casos de carga inversa



Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

2.3.1 Efecto Bauschinger

Según Lorenzo, et al., (2009) “la respuesta de un material a una acción mecánica no sólo depende del estado actual de tensión que soporta, sino también de la historia de deformaciones plásticas que ha sufrido” (p. 319).

Este fenómeno lo descubrió Bauschinger en 1881 observando que los materiales (acero dulce) cuando se cargan en tracción o tensión sobrepasan el límite elástico, pero si el material se vuelve a descargar y cargar en la misma trayectoria el límite elástico presenta un crecimiento. Por el contrario, cuando se aplica la carga en el sentido opuesto de la carga inicial se provoca una pérdida o disminución del límite elástico e incluso puede desaparecer el comportamiento elástico (Molina, 2009, p.3).

Después que el acero sobrepasa el límite elástico e incursiona en el rango plástico, se observan una serie de fenómenos cuando se realizan los ciclos repetitivos de carga y descarga. Primero se descarga el esfuerzo a cero y se vuelve a cargar alcanzando el esfuerzo $+\sigma_y$, seguidamente se observa un comportamiento elástico que presenta una rigidez equivalente al módulo de elasticidad o Young E (Bruneau, et al., 2011, p. 29).

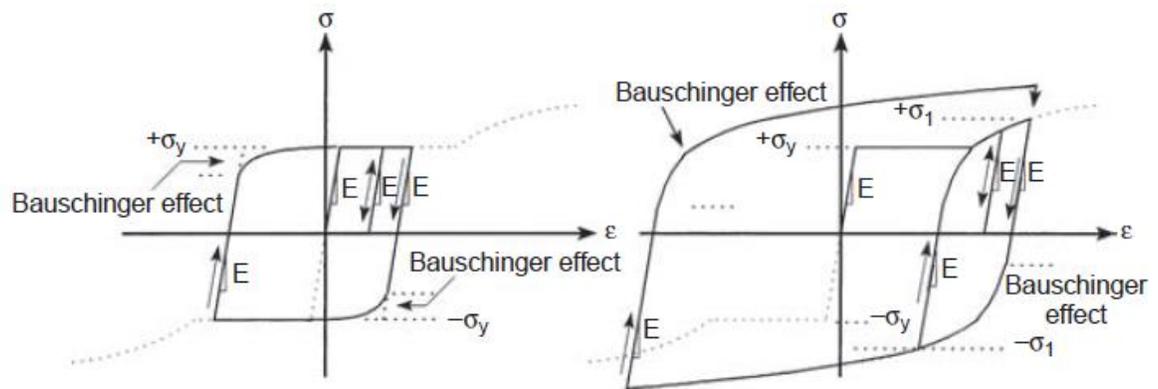
Posteriormente al cambiar el esfuerzo al sentido opuesto ($-\sigma_y$) en la esquina de la curva de la compresión la fluencia desaparece, anteriormente se indicó que ese

comportamiento es el efecto de Bauschinger, en este punto la degradación de la rigidez ocurre gradualmente, esto es una propiedad natural que presenta el acero (Bruneau, et al., 2011, p. 29).

Por consiguiente, si la reversión del esfuerzo es iniciada antes de alcanzar el rango de endurecimiento por deformación, este alcanzará una meseta plástica que se encuentra en la dirección de carga inversa. Sin embargo, una vez que se ha obtenido el rango de endurecimiento por deformación independientemente de la dirección de carga, la meseta desaparece en ambas trayectorias o sentidos de carga (Bruneau, et al., 2011, p. 29).

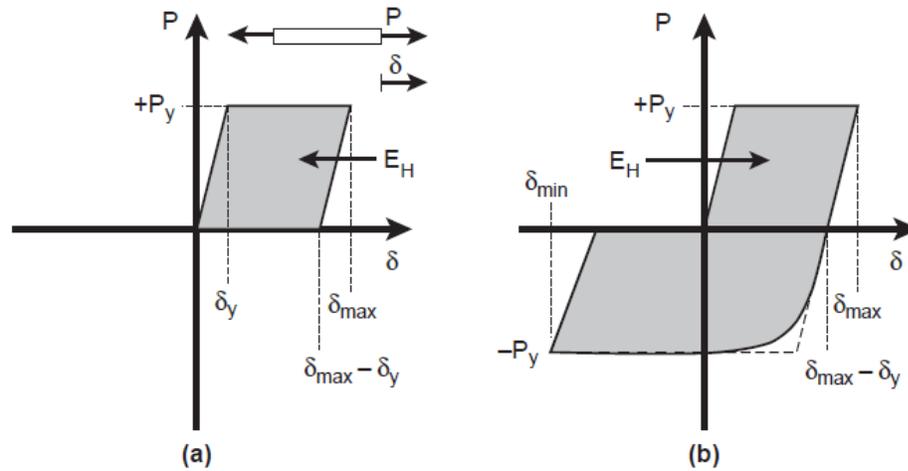
Figura 22

Relación de cíclica de esfuerzo-deformación en el acero estructural



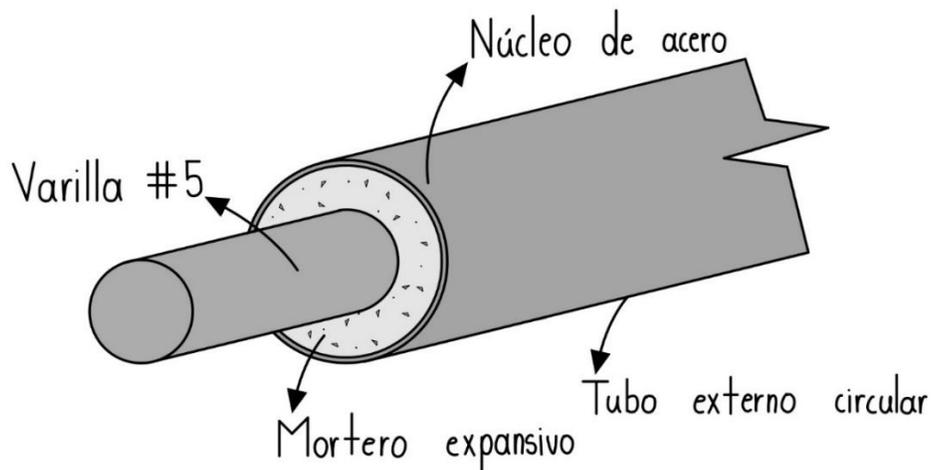
Nota. Tomada de Ductile desing of Steel Structures, M. Bruneau, et al., 2011, McGraw-Hill Education.

Una propiedad muy importante del acero es cuando se somete a grandes cambios cíclicos de carga inelástica, este presenta una capacidad para disipar energía histerética, lo anterior indica que es la energía requerida para deformar plásticamente la muestra de acero (varilla). En la figura 23 el área sombreada E_H es la energía disipada por la muestra de acero, producto de una fuerza que genera un desplazamiento al material (acero) (Bruneau, et al., 2011, p. 29).

Figura 23*Energía histerética del acero estructural*

Nota. Tomada de Ductile design of Steel Structures, M. Bruneau, et al., 2011, McGraw-Hill Education.

El disipador externo de energía se construye con las partes que se observan en la figura 24.

Figura 24*Partes del disipador externo de energía*

Nota. Elaboración propia, 2023.

2.4 Núcleo de acero

El núcleo de acero es la parte más importante del disipador externo de energía, ya que restringe el pandeo lateral con la implementación del tubo externo circular de acero, mortero expansivo y el material antiadherente. El núcleo debe ser capaz de resistir las fuerzas sísmicas de tensión y compresión que se ejercen sobre el disipador externo. La función principal del mortero expansivo es suministrar la suficiente rigidez al dispositivo para impedir el pandeo global cuando se somete a carga de compresión, seguidamente el material antiadherente elimina la transferencia de esfuerzos que se generan durante los desplazamientos y encogimientos del disipador externo de energía. Posteriormente, la idea primordial es eliminar o evitar el pandeo, ya que el disipador externo se degrada de forma rápida al momento de recibir las cargas de compresión. Cuando un tubo circular vacío (sin mortero expansivo) se somete a carga de compresión puede colapsar antes de llegar al límite elástico, esto se debe al pandeo local, ya que se genera una inestabilidad en alguna de sus caras (Dunn, 2021, p. 28).

2.4.1 Tubo externo circular

El autor Cancelado (2012), establece que “la finalidad de la camisa o tubo de confinamiento es precisamente para evitar el pandeo del núcleo” (p. 54), el mortero expansivo junto con el tubo circular limita el pandeo local del núcleo cuando se aplican cargas cíclicas que afectan las propiedades mecánicas del dispositivo.

Según Metalco (2022), indica que “la tubería industrial redonda en Acero Negro es utilizada generalmente en la industria metalmecánica en obras de diversos tipos” (p. 3), este tubo redondo presenta alta resistencia a la tracción, así como un esfuerzo a la fluencia. Lo anterior se debe a la aleación de carbón y hierro que componen este tubo, generando propiedades de alta calidad.

2.4.2 Mortero expansivo

El mortero expansivo es una mezcla preparada con arena, aditivos y cemento, que posteriormente se agrega agua para crear una mezcla cementicia producto de la reacción química y formar una pasta que une todos los materiales. La expansión del mortero comienza a producirse con los aditivos expansores que reaccionan con el agua implementada en la muestra, también la consistencia del mortero expansivo es más fluida en comparación con un mortero normal que tiene una consistencia más firme, la consistencia se prepara en plástica

y semifluida. Este material se determina por tener resistencias a la compresión altas que rondan los 40 y 70 MPa a los 28 días. (INTACO, Morteros expansivos y de inyección, 2020)

Según Euclid Chemical (2023), establece que Eucofast “es un mortero de fraguado y endurecimiento rápido, diseñado para hacer reparaciones y reparcheos en superficies de concreto” (p. 1). Una ventaja del mortero Eucofast son las altas resistencias que alcanza después de 3 horas.

El mortero se utiliza como material para relleno que evita o frena el pandeo en el núcleo de acero debido a las deformaciones que se producen cuando interactúa la carga axial, evitando la falla del disipador (Avecillas, 2015, p. 25).

2.4.3 Materiales antiadherentes

La idea principal de utilizar un material antiadherente o aislante es para crear un recubrimiento y formar un deslizamiento entre el mortero y la varilla #5, esto se realiza con el fin de evitar que los esfuerzos cortantes se transfieran al núcleo del disipador (Avecillas, 2015, p. 24).

En varios estudios sean implementado los siguientes materiales, pero no existe evidencia que indique cual de estos presenta mejor rendimiento en el núcleo del disipador, sin embargo, para el ensayo del disipador externo se utiliza la parafina y cinta de vinilo o teipe rojo:

2.4.3.1 Cintas de vinilo o teipe rojo

Esta cinta o teipe tiene un diseño especial que evita la humedad y el desgaste, generando una mayor duración en la superficie aplicada. Se puede utilizar en temperaturas que rondan los 4 °C y 77 °C, conservando el calor. Al aplicar la cinta o teipe la superficie debe estar limpia sin residuos de grasa, aceite, polvo e incluso humedad. Finalmente es recomendable pasar un rodillo sobre la cinta aplicada a la superficie (varilla) para tener una mayor adherencia. La cinta de vinilo permite un estiramiento que se adapta a superficies irregulares (flexible) que no permite un levantamiento de esta, es anticorrosiva, resistente al desgaste, abrasión, humedad y es de fácil aplicación (3M, s.f, p. 1).

2.4.3.2 Grasa multipropósito

Según SINOPEC (2012) indica que la “la grasa multipropósito con una excelente estabilidad mecánica y estructural, larga vida útil de servicio, buena adherencia y una excelente resistencia a corrosión y oxidación” (p. 1), este material resiste altas temperaturas

desde los $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ y también lubrica correctamente cuando se aplican altas cargas. La idea principal con la grasa es crear una superficie libre de adherencia entre el núcleo (varilla lisa) y el mortero expansivo.

2.4.3.3 Espuma de polietileno

El autor INTACO (2021) establece que la “espuma de polietileno moldeada en forma de cordón cilíndrico, diseñada para actuar como material de respaldo en juntas donde se colocarán selladores autonivelantes o pastosos” (p. 1), este material evita la adherencia con tres capas y es altamente resistente a la humedad. Por último, para aplicarlo se debe limpiar la superficie eliminando la grasa, el polvo y aceites.

2.4.3.4 Parafina

La parafina es un sólido blanco que se compone de una mezcla de hidrocarburos, esto quiere decir que se extrae del petróleo. Cuando la parafina se calienta se forma una cera líquida, en ese instante se debe aplicar a la muestra (disipador externo), después de unos minutos la dureza de este material es alta. Además, la parafina es un excelente aislante eléctrico y funciona para almacenar calor.

2.4.4 Galgas extensiométricas

Según la concepción Alzate, et al., (2007) en el año “1856 Lord Kelvin descubrió que al aplicar una fuerza sobre un hilo conductor o un semiconductor se presenta una variación en su resistencia eléctrica. Este principio permite realizar mediciones de fuerzas muy tenues que provoquen pequeñas deformaciones en el conductor” (p. 7). Lo anterior expresa que las galgas extensiométricas miden la deformación que presenta el dispositivo (disipador externo o varilla #5) cuando se le aplica una fuerza en tracción, compresión, entre otras. Además, se utilizan en mediciones estáticas donde se somete el dispositivo a cargas fijas.

Los autores Rodríguez, et al., (2016), establecen que “la galga extensiométrica metálica fue inventada por los ingenieros Edward E. Simmons y Arthur C. Ruge en 1938” (p. 80). Estos sensores se colocan (pegan) en los materiales sólidos, realizando una lectura directa del promedio de la deformación producida por la fuerza externa aplicada al dispositivo analizado, el esfuerzo que deforma la galga extensiométrica produce un cambio o variación de la resistencia eléctrica. La variación se debe al cambio de longitud o área de sección transversal que presenta el dispositivo cuando incrementan las cargas o fuerzas externas aplicadas.

Rober Hooke estudio las deformaciones mecánicas, que presentaban una relación entre las cargas o fuerzas externas que recibe el material y las deformaciones que sufren estos (Rodríguez, et al., 2016, p. 80).

Es importante considerar que las galgas extensiométricas miden desplazamientos, para efectos del diagrama esfuerzo-deformación unitaria se realiza el calculo para obtener deformaciones unitarias que se grafican con los esfuerzos producidos por la carga axial aplicada al material o elemento.

Con la ecuación 8 se obtiene la deformación unitaria debido al cambio de longitud que presenta el material cuando se somete a cargas axiales en tensión o compresión.

$$\varepsilon = \frac{l_f - l_o}{l_o} = \frac{\Delta l}{l_o} \quad (8)$$

ε = Deformación nominal-unitaria

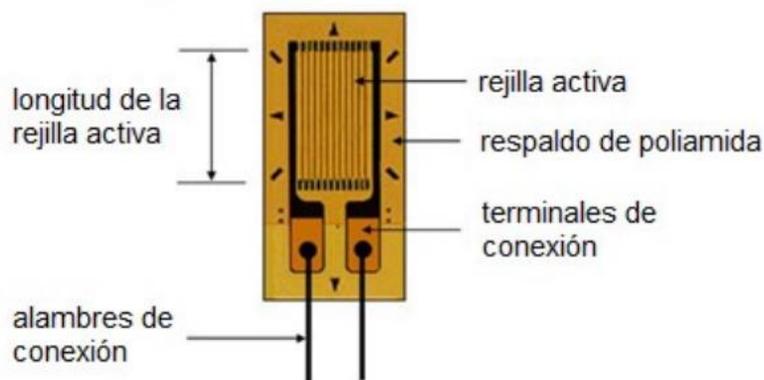
l_f = Longitud final

l_o = Longitud inicial

En la figura 25 se observan las partes que componen la galga extensiométrica uniaxial, es importante identificar los componentes de las galgas para realizar una adecuada instalación en la varilla #5 y el dissipador externo.

Figura 25

Galga extensiométrica



Nota. Tomada de Manual de prácticas del laboratorio de análisis experimental de esfuerzos, E. Ramos et al., 2017.

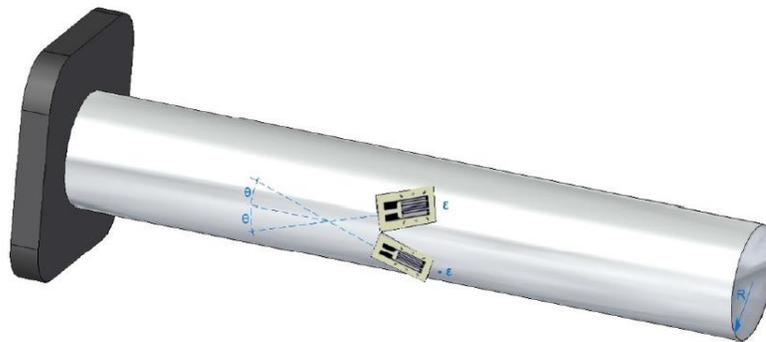
(<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/12009/1/Map1.pdf>)

En la figura 26 se puede visualizar una barra con la medición de galgas extensiométricas.

Es importante considerar que la ubicación de las galgas extensiométricas debe estar asociada con la dirección principal de la deformación, esto quiere decir, que es preferible fijar varias galgas en el material cuando se le aplique la prueba para no perder los datos de las deformaciones en ambos sentidos (tensión y compresión) (Ramos et al., 2017, p .34).

Figura 26

Barra instrumentada con galgas extensiométricas



Nota. Tomada de Manual de prácticas del laboratorio de análisis experimental de esfuerzos, E. Ramos et al., 2017.

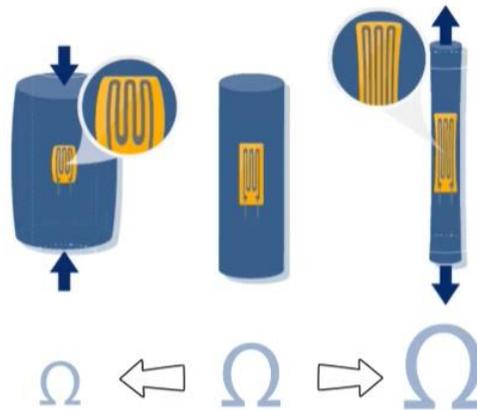
(<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/jspui/bitstream/132.248.52.100/12009/1/Map1.pdf>)

Según establece HBM (2020) “cuando la galga extensiométrica se comprime, su resistencia eléctrica se reduce y cuando se estira, su resistencia aumenta” (p. 5). Es importante considerar que la deformación positiva significa que el material se estira, y cuando se comprime se obtiene un valor de la deformación negativo.

En la figura 27 se observan los comportamientos de la galga relacionados a la resistencia eléctrica cuando el material se somete a carga axial y tracción.

Figura 27

Función en compresión y tensión de las galgas



Nota. Tomada de ¿Cómo funciona una galga extensométrica eléctrica?, EMB, 2020. (<https://www.hbm.com/es/7328/como-funciona-una-galga-extensometrica-electrica/>)

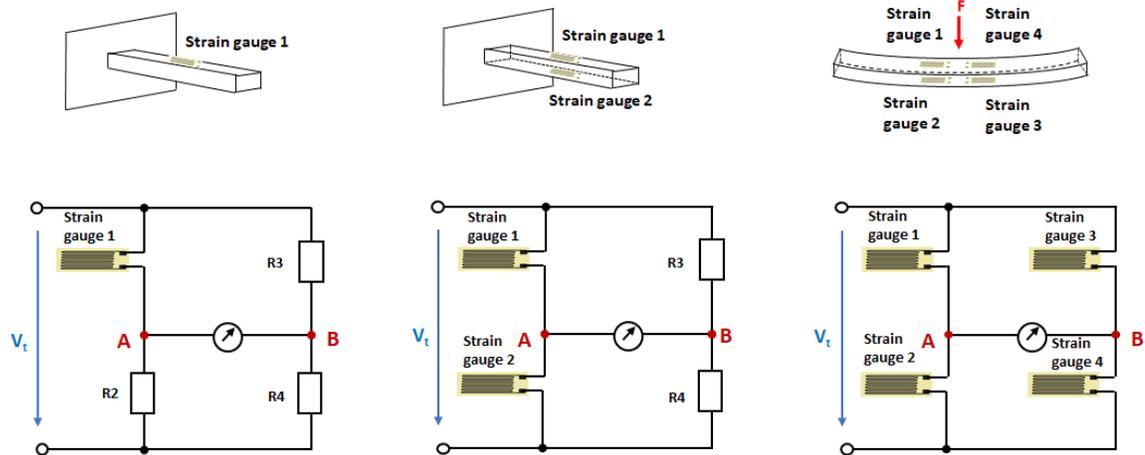
2.4.4.1 Puente de Wheatstone

El puente de Wheatstone es un circuito que se utiliza para medir la resistencia eléctrica en condición estática, donde las mediciones de carga deben detectar cambios pequeños en la resistencia. Todas las galgas utilizadas en la prueba deben estar conectadas (activas) en este circuito para obtener los datos de las deformaciones, además estos dispositivos de medición requieren estar en lados opuestos para medir correctamente las deformaciones en tensión y compresión que presenta el disipador externo (Alzate, et al., 2007, p. 9).

La figura 28 representa de forma adecuada como debe conectarse el circuito de las galgas extensiométricas y los puntos estratégicos para realizar las mediciones de las deformaciones en tensión o compresión, utilizando 1, 2 o 4 galgas.

Figura 28

Puente de Wheatstone - Cuarto de puente, medio puente, puente completo



Nota. Tomada de Puente de Wheatstone con galga extensométrica, Learnchannel-TV.com, 2022. (<https://learnchannel-tv.com/es/tecnologia-de-sensores/puente-de-wheatstone/puente-de-wheatstone-con-galga-extensometrica/>)

2.5 Método elementos finitos

Según Ferrari (2018) indica que “el análisis por elementos finitos es una técnica de simulación por computador usada en ingeniería. Usa una técnica numérica llamada método de los elementos finitos” (p. 5), el método de elemento finito (MEF) está pensado para utilizarlo en computadoras y permitir resolver la aproximación de ecuaciones diferenciales que están asociadas a problemas físicos sobre geometrías complejas, permitiendo conseguir una solución numérica aproximada sobre una estructura o dominio que están determinadas ciertas ecuaciones diferenciales, ya sea en forma débil o integral que describen el comportamiento físico del problema analizado, este se divide en varios subdominios llamados elementos finitos. La discretización es un conjunto de elementos finitos que establecen una partición del dominio y los nodos son una serie de puntos característicos dentro de cada elemento. La malla es un conjunto de nodos que consideran las relaciones adyacentes. En otras palabras, los cálculos realizados sobre una malla de puntos establecidos conocidos como nodos, que funcionan para la discretización del dominio en elementos finitos, generando una malla que garantiza una compatibilidad de deformaciones en los elementos adyacentes conectados entre sí.

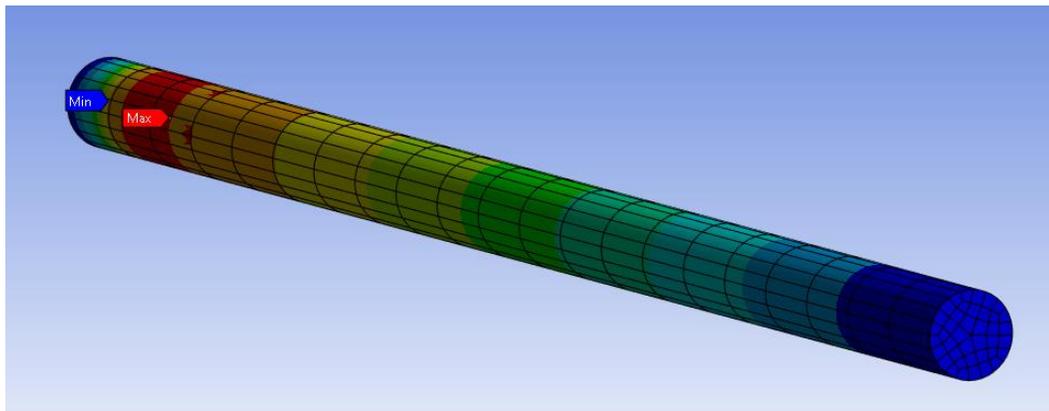
El autor Ferrari (2018) establece “el análisis de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones” (p. 10), para resolver problemas relacionados a la mecánica de sólidos deformables, el método de elementos finitos (MEF) presenta una utilidad importante que facilita introducir dominios de cálculos con alta complejidad ya sea en dos o tres dimensiones.

Por otro lado, el método de elemento finito permite analizar la deformación de una pieza mecánica, en el caso de los disipadores externos de energía cuando se aplican cargas o fuerzas axiales externas estos generan desplazamientos que provocan deformaciones unitarias en el dispositivo, por esto es esencial utilizar el método de elemento finito que se basa en la discretización de la forma geométrica del dispositivo en diversos elementos finitos con una geometría sencilla. En el interior se forman funciones de interpolación de baja complejidad que se relacionan con los desplazamientos de cada punto del elemento finito con puntos característicos del desplazamiento de una serie (nodos). Es importante considerar que la exactitud del método de elementos finitos depende de varios factores como el tamaño del elemento finito analizado y las funciones de interpolación (Roda, 2022).

En la figura 29 se observa lo mencionado anteriormente, ya que la varilla #5 está discretizada en geometrías simples para estimar las deformaciones producidas por la carga axial en tensión aplicada.

Figura 29

Barra simple analizada por el método de elementos finitos



Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

Según establece Ferrari (2018) “diversos softwares permiten el análisis por elemento finito con mayor felicidad, sin embargo, es necesario para la utilización de estos softwares conocer los principios del FEM y las características de los materiales que intervienen en los análisis” (p. 11-12).

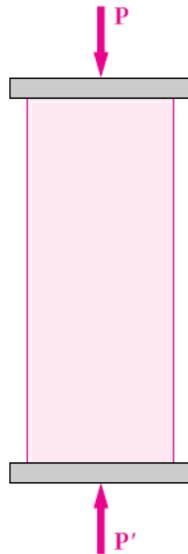
Después de establecer una discretización del conjunto de elementos que forman un dominio. Es importante decidir el tipo, cantidad, tamaño y una disposición de los elementos. Para la discretización del modelo se utilizan las teorías de Saint-venant y Navier Bernoulli.

2.5.1 Principio de Saint-Venant

Los autores Beer, et al., (2010), indican que las “limitadas herramientas matemáticas que se tienen a la disposición, el análisis de esfuerzos se restringirá al caso particular de dos placas rígidas que se empelan para transmitir las cargas a un elemento elaborado de un material isotrópico homogéneo” (p. 104). La figura 30 representa lo mencionado anteriormente.

Figura 30

Carga axial aplicada mediante placas rígidas



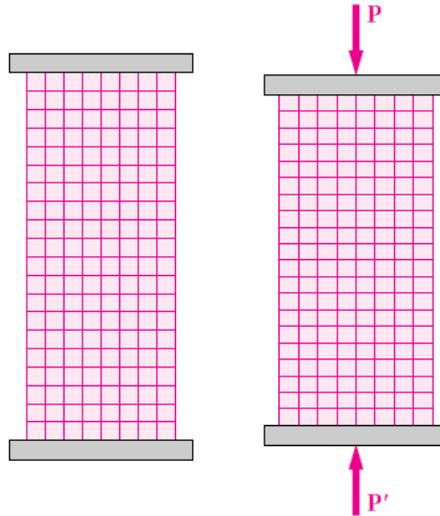
Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

Si aplicamos la carga axial en compresión en la parte central de cada placa el elemento esta aumenta el espesor y ancho formando un elemento recto, además las secciones planas permanecen planas, esto indica que los elementos finitos se deforman igual y las

deformaciones unitarias del elemento son uniformes. En la figura 31 se observa el elemento antes y después de aplicar una carga axial en compresión obteniendo un elemento deformado de manera uniforme aumentando el ancho y espesor (Beer, et al., 2010, p. 105).

Figura 31

Carga axial aplicada sobre un modelo de caucho mediante placas rígidas

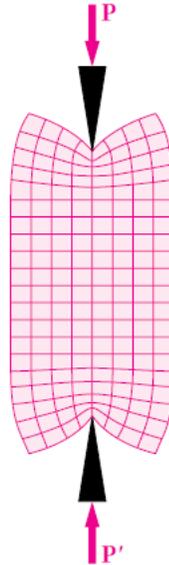


Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

Si la carga axial en compresión se concentra cerca de los elementos, los puntos donde se aplica la carga se someten a esfuerzos grandes y los extremos no se ven afectados por la carga aplicada en zona central generando menores esfuerzos. En la figura 32 se observa que los elementos que se localizan en el extremo se genera una igualdad de las deformaciones, creando una distribución casi uniforme en el elemento (Beer, et al., 2010, p. 105).

Figura 32

Carga axial concentrada sobre un modelo de caucho



Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

En resumen, el Principio de Saint-Venant establece que los puntos donde se aplica la carga axial al elemento omitiendo los puntos cercanos a la aplicación de la carga, la distribución de esfuerzos se supone independiente del lugar o modo donde se ejecute la carga axial al elemento.

2.5.2 Hipótesis de Navier-Bernoulli

Según Limas (2018), indica que el principio de la hipótesis afirma que “dos secciones transversales inicialmente planas y paralelas siguen siendo planas aunque no paralelas a lo largo del proceso de deformación, incluso en la región plástica” (p. 15).

2.5.3 Criterios de fluencia para materiales dúctiles bajo esfuerzo plano

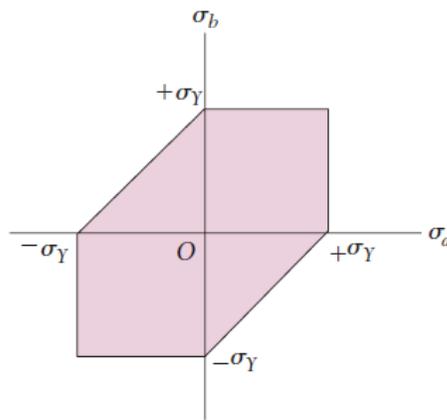
Según Beer, et al., (2010), indica que “los elementos estructurales y los componentes de máquinas elaboradas de un material dúctil se diseñan de manera que el material no fluya bajo condiciones esperadas de carga” (p. 451). Esto quiere decir que cuando un elemento se someta a esfuerzo uniaxial, el valor del esfuerzo normal genera que el material fluya, este puede obtener fácilmente con la prueba o ensayo de tracción.

2.5.3.1 Criterio de Tresca

Según indica Beer, et al., (2010), el criterio del esfuerzo cortante máximo o criterio de Tresca “se basa en la observación que sitúa la fluencia de materiales dúctiles como resultado del deslizamiento del material, a lo largo de superficies oblicuas, debido a esfuerzos cortantes” (p. 451). Analizando lo anterior la cedencia se presenta cuando el esfuerzo cortante máximo tiene el mismo valor de esfuerzo cortante de fluencia, esto relacionado a la prueba uniaxial, por ejemplo: una varilla en tracción.

Figura 33

Hexágono de Tresca para el criterio del esfuerzo cortante máximo



Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

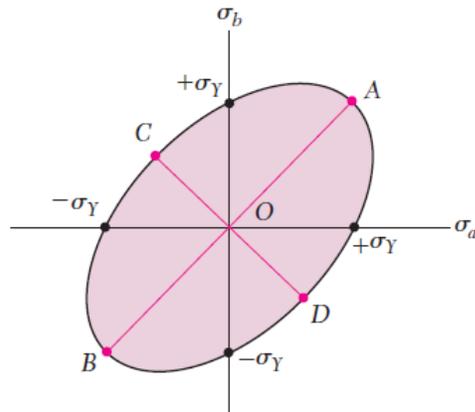
2.5.3.2 Criterio de Von-Mises

Los autores Beer, et al., (2010), establecen que el criterio de la máxima energía de distorsión “se basa en el cálculo de la energía de distorsión en un material dado, es decir, de la energía asociada con cambios en la forma del material” (p. 452). Se debe mencionar que esta energía es distinta a la asociada con el cambio de volumen que presenta el material.

La figura 34 representa el criterio de Von Mises para la condición esfuerzo plano.

Figura 34

Superficie de Von Mises basada en el criterio de la energía de distorsión máxima

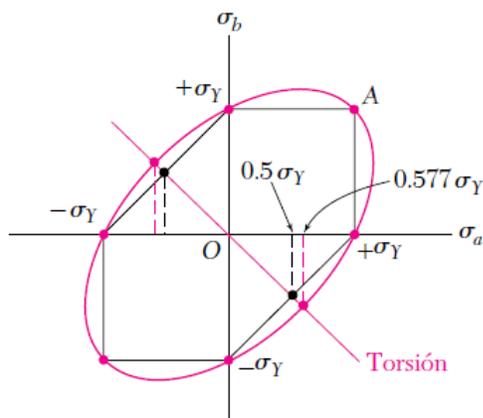


Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

En la figura 35 se comparan los dos criterios mencionados anteriormente. Se observa que el criterio de Tresca queda dentro de la superficie de cendencia del criterio de Von Mises, esto indica que el criterio de Tresca presenta más conservación. Es importante mencionar que el criterio de Von Mises se utiliza más, ya que concuerda con los resultados experimentales.

Figura 35

Comparación de los criterios Tresca y Von Mises



Nota. Tomada de Mecánica de materiales, F. Beer, et al., 2010, McGraw-Hill Education.

2.6 Funcionalidad del disipador externo de energía

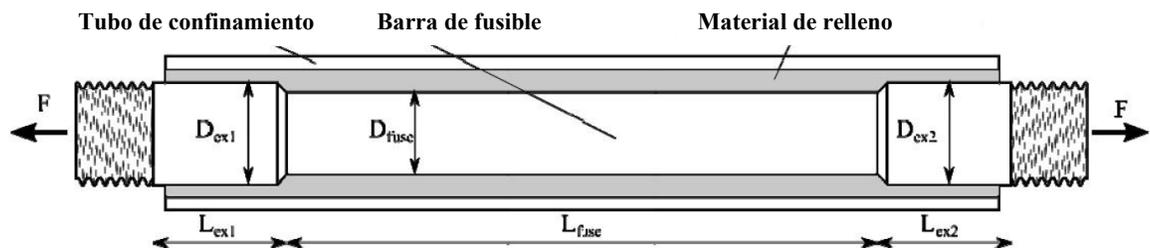
La función principal de los disipadores de energía es evitar el daño o las deformaciones inelásticas de los elementos estructurales mediante la disipación de las acumulaciones de energía sísmica, lo que conlleva a un aumento de la amortiguación a la edificación (León, 2016, p. 27).

Posteriormente, el disipador externo de energía se compone de una varilla #5 con una reducción en la parte central, también se debe utilizar un tubo circular con un diámetro mayor a la varilla lisa en el cual se debe agregar un mortero expansivo (Eucofast). El núcleo es la parte más importante del disipador externo, ya que este disipa la energía producida por las fuerzas sísmicas (ciclos de descarga) que generan desplazamientos laterales a las estructuras, además evita el pandeo global del dispositivo sin permitir que presente fallas y cumpla su función principal (disipar energía).

El disipador lleva un diseño preciso de la geometría, longitud del fusible, una adecuada relación entre el diámetro exterior e interior, tamaño y rigidez del tubo de confinamiento, además se debe considerar el espesor del mortero expansivo. Considerando lo anterior se crea un dispositivo que ofrece un mejor rendimiento en temas de desplazamientos, deformaciones, número de ciclos y capacidad de disipación. En la figura 36 se observan las partes que conforman el dispositivo externo de energía (Pampanin, 2005, p. 7).

Figura 36

Esquema y símbolos del disipador de tipo fundido con restricción de pandeo (BRF)



Nota. Adaptado de “Estudio experimental y analítico de un disipador reemplazable de acero dulce de tipo fusible con restricción de pandeo (BRF)” (p. 2), F. Sarti, et al., 2013, NZSEE Conference.

En pruebas experimentales se han variado parámetros geométricos entre ellos diámetros del fusible, la esbeltez de la barra y los materiales de confinamiento para proporcionar un conjunto de resultados experimentales a partir de los cuales se pueden

desarrollar consideraciones para el diseño del disipador externo de energía (Sarti, et al., 2013, p. 3).

La respuesta cíclica de un disipador típico es muy estable y robusto, lo que permite muchos ciclos disipativos antes de llegar a la falla, esto producto de la fatiga de ciclo bajo. El disipador externo de energía tiene la capacidad de oscilar entre 10 kN y 250 kN, utilizando diámetros de fusibles en el rango de 8-32 mm y una longitud total del disipador entre 250 mm y 1 m, además se pueden diseñar para 400 kN o más (Pampanin, 2005, p. 7).

La figura 37 muestra diferentes diámetros tanto exterior como interior, longitudes de varilla con reducción y diámetros de tubo.

Figura 37

Fotos de diferentes tamaños de componentes de dispositivos Plug&Play antes del montaje y pruebas del laboratorio de control de calidad



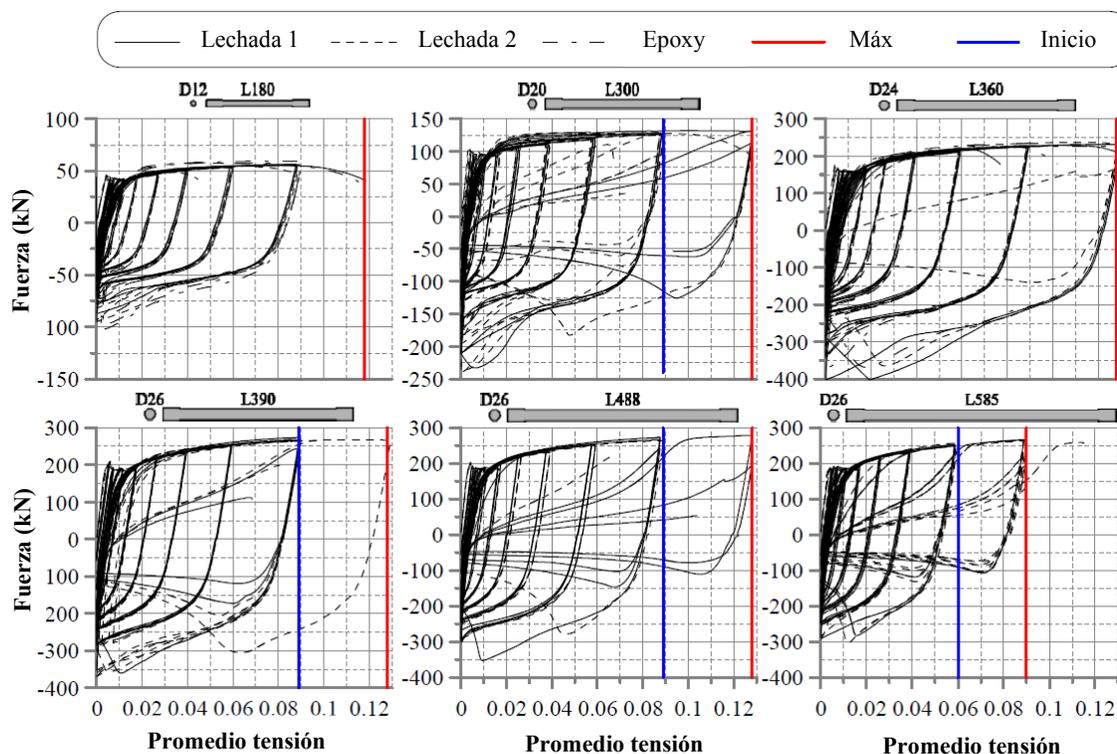
Nota. Tomado de “El disipador Plug & Play” (p .8), S. Pampanin, 2005, New Zealand Society For Easthquake Engineering.

En la figura 38 se analiza gráficamente los resultados obtenidos del comportamiento fuerza vs desplazamiento, se utiliza diferente material de relleno para analizar las ventajas y desventajas que causa el mismo al momento de disipar la energía. Es importante considerar que los desplazamientos en compresión no se han tenido en cuenta porque, en general los

desplazamientos de compresión no son significativos en comparación con los de tensión o tracción (Sarti, et al., 2013, p. 4).

Figura 38

Gráfico de fuerza versus desplazamientos normalizado de los disipadores probados



Nota. Adaptado de “Estudio experimental y analítico de un disipador reemplazable de acero dulce de tipo fusible con restricción de pandeo (BRF)” (p. 5), F. Sarti, et al., 2013, NZSEE Conference.

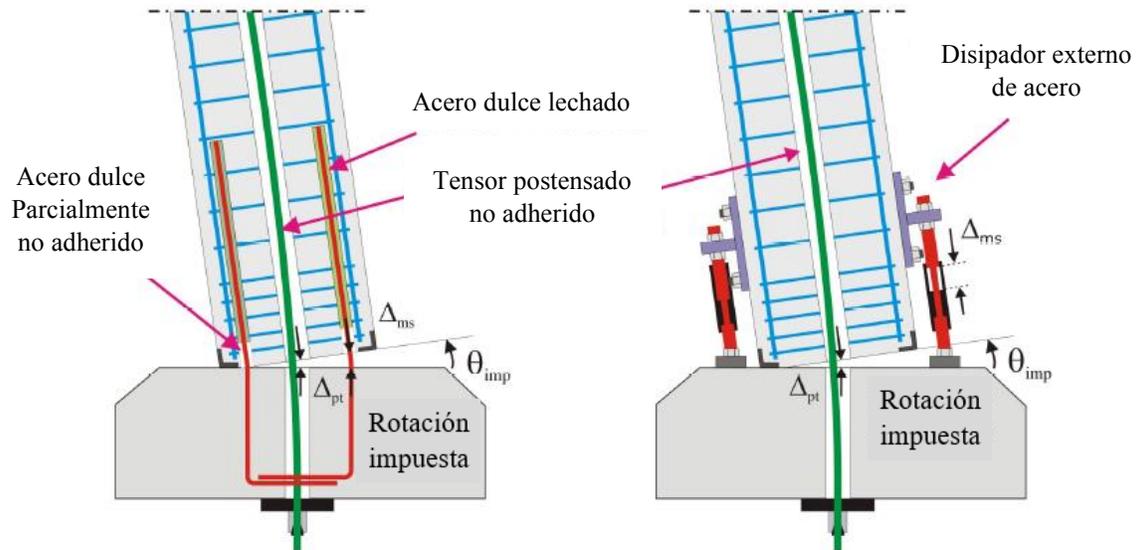
Como se observa en la figura 38 con respecto a los gráficos de fuerza versus desplazamientos, no se observó mayor diferencia entre los diferentes materiales de relleno para el tubo de confinamiento o anti-pandeo, es importante recalcar que los disipadores se sometieron a los mismos desplazamientos y cargas (protocolo de carga y descarga) (Sarti, et al., 2013, p. 5).

Anteriormente se explicó que los disipadores internos observados en la figura 39 están instalados dentro de los elementos estructurales (vigas, columnas o placas), pero cuando ocurre un evento sísmico de gran magnitud estos quedan completamente dañados y no son fácilmente accesibles ni reemplazables. Por lo anterior nace la idea de crear disipadores externos de energía que son de fácil acceso para reemplazarlos cuando sufren daños

considerables producto de los sismos. En la figura 39 se puede observar los disipadores internos vs externos (Pampanin, 2005, p. 5).

Figura 39

Disipadores reemplazables internos versus externos en la conexión columna-base



Nota. Adaptado de “El disipador Plug & Play” (p. 5), S. Pampanin, 2005, New Zealand Society For Earthquake Engineering.

3 Capítulo III. Marco metodológico

3.1 Paradigma, enfoque metodológico y métodos de investigación

En el presente trabajo de investigación se plantea un paradigma positivista:

Según Ramos (2015) establece que “el paradigma positivista sustentará a la investigación que tenga como objetivo comprobar una hipótesis por medios estadísticos o determinar los parámetros de una determinada variable mediante la expresión numérica” (p. 10). Este trabajo de investigación parte de una hipótesis que busca la verificación teórica-experimental para desarrollar un disipador externo de energía a base de acero A706 que reduzca el daño estructural producto de los eventos sísmicos que afectan las estructuras de concreto prefabricado de alta ductilidad en Costa Rica.

Además, este trabajo de investigación ostenta un enfoque cuantitativo, ya que:

El autor Hernández, et al., (2018) establece que el enfoque cuantitativo “se vincula a conteos numéricos y métodos matemáticos. Actualmente representa un conjunto de procesos organizado de manera secuencial para comprobar ciertas suposiciones. Cada fase precede a la siguiente y no podemos eludir pasos, el orden es riguroso” (p. 6). Anteriormente se menciona que el trabajo de investigación parte de una hipótesis, para este caso se recolectan datos numéricos de las pruebas de laboratorio y el modelo virtual utilizando el método del elemento finito, esto para probar la hipótesis. Además, el desarrollo de disipadores externos de energía a base de acero A706 para estructuras de concreto prefabricado de alta ductilidad, el avance del dispositivo se realiza en un conjunto de etapas o procesos que dependen de lo obtenido en la fase anterior, los procesos se deben realizar de forma ordenada para no perder la secuencia de los objetivos específicos establecidos en el presente trabajo de investigación.

Por consiguiente, el método de investigación o diseño utilizado en el trabajo es experimental o experimento puro, ya que:

El autor Hernández, et al., (2018) indica que el diseño o método de investigación experimental o experimentos puros son “grupos de comparación (manipulación de la variable independiente) y equivalencia de los grupos” (p. 163), en el presente trabajo de investigación se realiza una comprobación del modelo virtual del disipador externo utilizando el método de elementos finitos y las pruebas realizadas en el laboratorio sobre el disipador externo de energía a base de acero A706 y la varilla #5.

3.2 Categorías de análisis de la investigación

Tabla 1

Variables independientes y dependientes

Objetivos específicos	Variables independientes	Herramientas por utilizar	Variables dependientes
Efectuar un ensayo de tracción a la varilla #5 A706 en el laboratorio, utilizando la máquina de ensayo universal, extensómetro y galgas extensiométricas, para obtener las propiedades mecánicas.	Propiedades mecánicas de la varilla #5 A706, medición del extensómetro y galgas extensiométricas.	Máquina de ensayo universal, extensómetro, galgas extensiométricas y varilla #5 A706.	Comprobar en el laboratorio las propiedades mecánicas de la varilla #5 A706.
Crear un modelo virtual en el Software ANSYS del disipador externo de energía utilizando el método de elementos finitos para realizar una comprobación que el dispositivo cumple su función disipando energía.	Modelo virtual.	Software ANSYS Workbench.	Comprobar que el modelo virtual disipa energía por medio de las curvas de histéresis.
Elaborar el disipador externo de energía utilizando los materiales varilla #5 A706, tubo A33 circular y mortero Eucofast, para comprobar en pruebas de laboratorio su funcionalidad.	Varilla #5 A706, tubo circular A33 y mortero Eucofast.	Taller para la elaboración del disipador.	Construir el disipador externo de energía correctamente con los materiales que lo componen.
Evaluar mediante pruebas de laboratorio el compartimento histerético del disipador externo de energía aplicando carga y descarga (protocolo de desplazamiento) para	Aplicación de ciclos de carga y descarga al disipador externo de energía.	Ensayo en laboratorio (máquina de ensayo universal).	Cumplir con la funcionalidad experimental del disipador externo de energía.

demostrar la relación de fuerza-desplazamiento o esfuerzo-deformación unitaria.

Comparar los resultados experimentales del laboratorio con valores del modelo virtual utilizando el método de elemento finito para demostrar que la implementación de disipadores externos de energía reduce el daño estructural ocasionado por las fuerzas sísmicas.	Comportamiento histerético teórico-experimental.	Microsoft Excel (gráficos comparativos).	Demostrar que los disipadores externos de energía a base de acero A706 reducen el daño en estructuras de concreto prefabricado de alta ductilidad en Costa Rica.
---	--	--	--

Nota. Elaboración propia, 2023.

3.3 Población y muestra, Técnicas de muestreo

Según Hernández, et al., (2018) establece que la población es el “conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones” (p. 198), para este trabajo de investigación la población son los disipadores de energía, ya que estos presentan una o varias características en común.

El autor Hernández, et al., (2018) indica que la muestra se define como “un subgrupo de la población o universo que te interesa, sobre la cual se recolectarán los datos pertinentes, y deberá ser representativa de dicha población” (p.186), por lo tanto, al establecer la población surge una muestra para el trabajo de investigación que corresponde al disipador externo de energía a base de acero A706 para estructuras de concreto prefabricadas de alta ductilidad en Costa Rica que reduzcan el daño estructural producto de las fuerzas sísmicas.

Además, la técnica de muestreo seleccionada para el presente trabajo de investigación es la no probabilística o dirigida, ya que:

Según Hernández, et al., (2018) establece que las muestras no probabilísticas “depende del proceso de toma de decisiones de un investigador o de un grupo de investigadores. Elegir una muestra no probabilística depende del planteamiento del problema” (p. 200).

3.4 Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

Las técnicas o instrumentos utilizadas para recolectar los datos del desarrollo del disipador externo de energía a base de acero A706 para estructuras de concreto prefabricado de alta ductilidad en Costa Rica, son las siguientes:

El primer instrumento para recolectar datos es el ensayo de tracción de la varilla #5 A706 realizado en laboratorio utilizando la máquina de ensayo universal, el extensómetro y las galgas extensométricas. Como segunda herramienta para recolectar datos se utiliza el Software ANSYS Workbench, este se utiliza para la creación de un modelo virtual del disipador externo de energía a base de acero A706. La tercera técnica recolecta datos por medio de la elaboración en el taller del disipador externo de energía, utilizando los respectivos materiales para su construcción. El último instrumento para obtener datos son las pruebas en el laboratorio utilizando la máquina de ensayo universal la cual se evalúa el comportamiento histerético aplicando ciclos de carga y descarga (protocolo de desplazamiento), demostrando los resultados o datos de la relación fuerza-desplazamiento que presenta disipador externo de energía elaborado en el taller.

3.4.1 Ensayo de tracción de la varilla #5 A706

Para este ensayo se utiliza una varilla #5 A706 con una longitud de 45 cm. Es importante mencionar que esta varilla es procedente de Turquía. Esta prueba se realiza para obtener las propiedades mecánicas (diagrama esfuerzo-deformación unitaria) e ingresarlas en el Software ANSYS específicamente en los datos de experimentos hiperelásticos. En la figura 40 se observa la varilla #5 utilizada para recolectar los datos del ensayo en tracción.

Figura 40

Varilla #5 A706 de 45 cm



Nota. Elaboración propia, 2023.

Se utiliza una esmeriladora de banco para reducir dos áreas de la corrugación de la parte central sentidos opuestos de la varilla #5 A706 donde se colocan las dos galgas extensiométricas, cada área de reducción es el doble del área de las galgas extensiométricas tanto largo como ancho, además las reducciones de la corrugación deben llegar hasta el núcleo de la varilla. La figura 41 muestra la esmeriladora de banco utilizada para reducir la corrugación en la parte central sentidos opuestos de la varilla #5 A706.

Figura 41

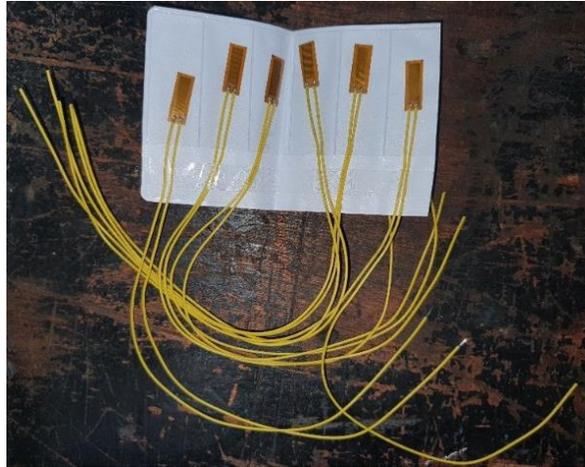
Esmeriladora de banco



Nota. Elaboración propia, 2023.

Las galgas extensiométricas de la marca Culler utilizadas en el ensayo de tracción presentan las siguientes especificaciones técnicas:

- Resistencia: 120 ohmios.
- Coeficiente de sensibilidad: 2,08.
- Tamaño base: 0,571 x 0,177 in.
- Tamaño de rejilla: 0,394 x 0,079 in.
- Terminal aislado y un cable: 7,9 in.
- Mide: Deformaciones en estado estático o dinámico.
- Se utiliza en experimentos mecánicos para materiales.

Figura 42*Galgas extensiométricas*

Nota. Elaboración propia, 2023.

Después de realizar las reducciones de áreas con la esmeriladora de banco, se utiliza una lija agua grano 220 para que el área de pegado este lo más lisa posible. Seguidamente, se procede a limpiar la superficie de cualquier agente extraño como la grasa que afecte la medición de las galgas extensiométricas instaladas en la varilla #5. Ambas galgas extensiométricas se instalan en dos puntos específicos de la parte central sentidos opuestos de la varilla, donde se proceden a pegar con super bonder para mantener la firmeza de este instrumento de medición con el núcleo de la varilla, también se utiliza cinta adhesiva para mantener las galgas en un contacto estable mientras el super bonder realiza la función de pegar este instrumento de medición con las áreas reducidas de la varilla #5.

Figura 43*Instalación de galgas extensiométricas*

Nota. Elaboración propia, 2023.

La conexión soldada entre las terminales de las galgas extensiométricas y los cables (extensiones) que van hasta el instrumento de medición, llevan una soldadura que no debe estar en contacto con la varilla, en la figura 44 se observa la utilización de teipe rojo para eliminar este contacto entre la soldadura y la varilla #5 para que no interfiera al momento de medir el desplazamiento producido por la fuerza axial aplicada en el ensayo de tracción.

Figura 44*Soldadura de la galga extensiométrica*

Nota. Elaboración propia, 2023.

El instrumento que mide los desplazamientos de las galgas extensiométricas se observa en la figura 45, es importante mencionar que se deben colocar los cables (extensiones) soldados a las galgas hasta las bases del indicador de tensión, para obtener los desplazamientos producidos por la fuerza aplicada a la varilla #5. Este instrumento de medición es proporcionado por el Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME).

Figura 45

Indicador de tensión y registrador



Nota. Elaboración propia, 2023.

Para realizar el ensayo de tracción de la varilla #5 A706 se utiliza la máquina de ensayo universal y el extensómetro del Laboratorio Nacional de Materiales y Modelos Estructurales (LANAMME). La máquina de ensayo universal permite obtener las propiedades mecánicas (diagrama esfuerzo-deformación unitaria) de la varilla ensayada. El extensómetro se utiliza para medir el desplazamiento en el rango de 200 mm. Además, ambos instrumentos de medición los rige la normativa ASTM A370 para realizar el ensayo de tracción.

La función principal del extensómetro en el ensayo de tracción de la varilla #5 A706 es comparar las deformaciones o desplazamientos obtenidas en el rango de 200 mm con las

galgas extensiométricas. Esto se realiza para verificar la funcionalidad, calidad y precisión de las galgas cuando miden las deformaciones producidas por una fuerza axial.

Figura 46

Máquina de ensayo universal y extensómetro



Nota. Elaboración propia, 2023.

Anteriormente se indica que el extensómetro mide 200 mm para la deformación o desplazamientos, la figura 47 muestra dos líneas del material retro-flectivo colocado en el rango de 200 mm para medir el desplazamiento producido por el ensayo de tracción utilizando la norma ASTM A370.

Figura 47

Medición del extensómetro



Nota. Elaboración propia, 2023.

3.4.2 Software ANSYS Workbench

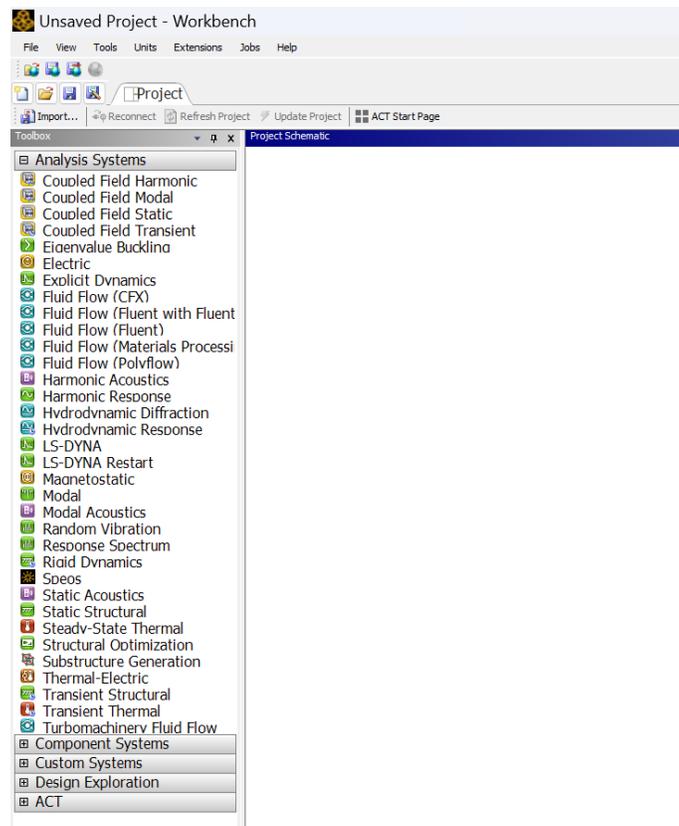
Para la creación del modelo virtual del disipador externo de energía a base de acero A706 se utiliza el Software ANSYS Workbench, en el cual se comprueba y analiza la disipación de energía que presenta el dispositivo, esto mediante curvas de histéresis. Este Software es sumamente utilizado en el área de la ingeniería del análisis estructural, ya que permite resolver mediante la simulación modelos matemáticos más precisos y eficientes utilizando el método de elemento finito, además se predice el comportamiento que presentan los sólidos finitos.

3.4.2.1 Flujo de trabajo del Software ANSYS Workbench

La interfaz de trabajo Workbench está organizada en dos partes principales: la primera se localiza a la izquierda y dentro de esta se obtienen los sistemas de análisis que se utilizan para crear un proyecto, la segunda se encuentra a la derecha, ahí se controlan, editan y crean los proyectos que se estén desarrollando y analizado. Es importante considerar que los diferentes sistemas de análisis en la ventana izquierda se pueden arrastrar o presionar con “doble clic” hacía el área derecha para editar el proyecto (esquema de proyecto). Las barras de herramientas y menú se encuentran en la parte superior. En la figura 48 se observa la interfaz de trabajo descrita anteriormente:

Figura 48

Interfaz de trabajo del Software ANSYS Workbench



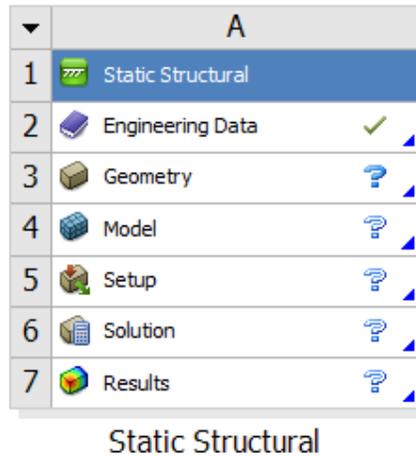
Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

Después de crear el sistema de análisis en el área derecha (esquema de trabajo), se observa un bloque que posee diferentes componentes nombrados células, estos están enumerados y se deben editar o completar siguiendo el orden numérico para llevar a cabo el análisis. Es importante considerar que el “check” significa que se completó de forma correcta la célula, pero si presenta un signo de interrogación no se completó correctamente o no se ingresó ningún tipo de dato a la célula. La figura 49 muestra las diferentes células que componen el análisis estático estructural:

Para el caso del disipador externo de energía se utiliza un análisis estático estructural, ya que se compara con la prueba efectuada en el laboratorio por medio de la máquina de ensayo universal.

Figura 49

Lista de células



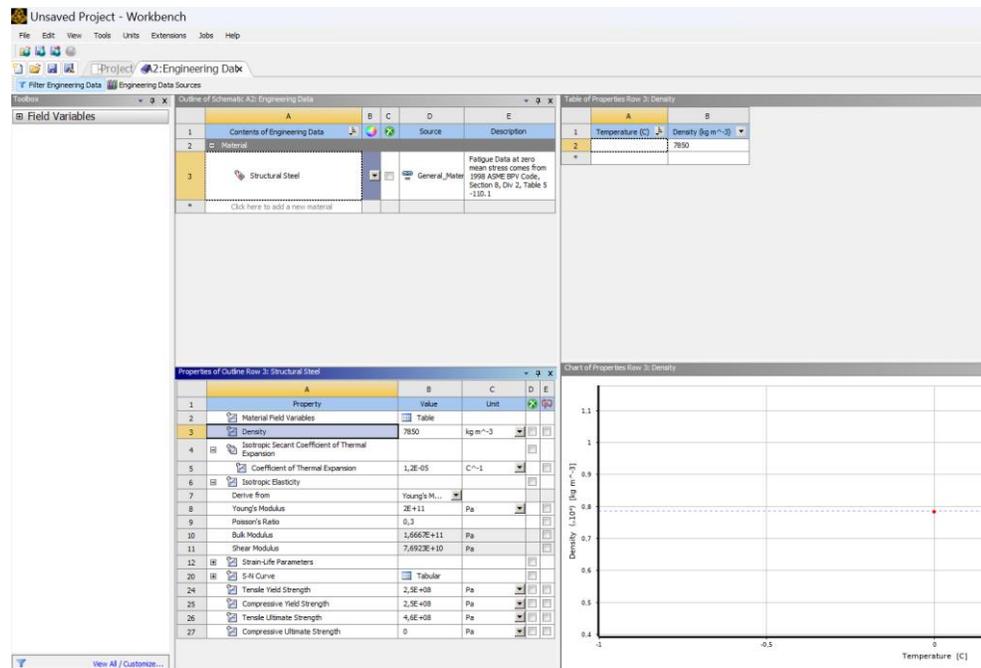
Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

3.4.2.2 Datos de ingeniería-materiales

La célula con la numeración 2 se utiliza para agregar las propiedades mecánicas de cada material a utilizar en el modelo, además en esta célula ya existen materiales establecidos que solamente se deben modificar las propiedades para adaptarlo al modelo por desarrollar, también se pueden añadir materiales que no están establecidos por el Software. En este apartado se pueden añadir la densidad, coeficiente térmico de expansión, módulo de Young, relación de Poisson, módulo de volumen, módulo de cortante, curva S-N, límite elástico en tensión, compresión, fuerza última en tensión y compresión, etcétera. Estas propiedades mecánicas están establecidas para el acero estructural, para otros tipos de materiales como el concreto se debe añadir nuevo material para realizar los cambios de sus propiedades mecánicas. En la figura 50 se observa la interfaz para añadir, modificar o editar las propiedades del material:

Figura 50

Interfaz de los materiales



Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

Los siguientes valores de las propiedades mecánicas para el tubo A33 (acero A33) se obtuvieron del programa SAP2000 versión 24.

- Para la densidad se considera el valor de 7850 kg/cm^3 , esta propiedad se utiliza en la varilla #5 con la reducción (acero A706) y el tubo A33.
- El módulo de Young para la varilla #5 A706 se obtiene en la prueba de laboratorio: $174789,85 \text{ MPa}$.
- El módulo de Young para el acero A33 es de 200000 MPa .
- La relación de Poisson se mantiene en $0,3$ para ambos aceros.
- Para el módulo de volumen se considera 167000 MPa , el programa ya tiene preestablecido este valor.
- El valor del módulo de cortante utilizado es de 77000 MPa , este valor se asocia a la relación de Poisson de $0,3$.

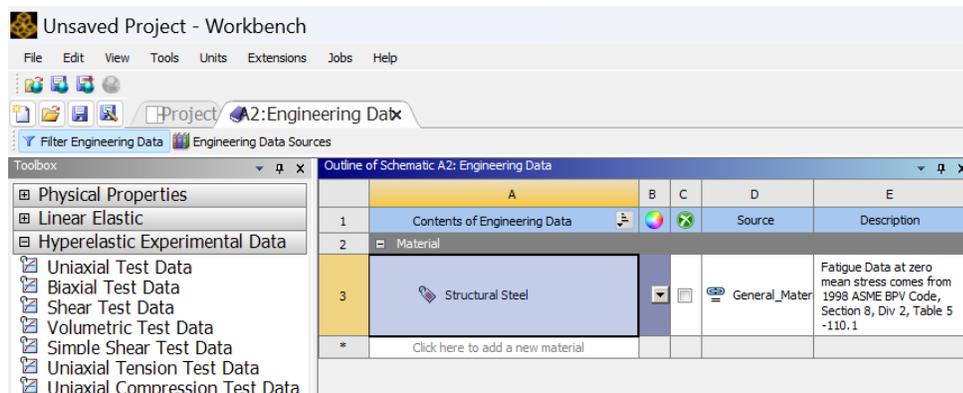
3.4.2.2.1 Datos de experimentos hiperelásticos

Este aparatado se encuentra en la parte izquierda de la célula 2, dentro del mismo se observan los datos de la prueba uniaxial donde se ingresan los valores del gráfico esfuerzo-

deformación y la temperatura, esto para que el Software considere la ductilidad del acero. La figura 51 muestra la ubicación de lo mencionado anteriormente:

Figura 51

Datos de experimentos hiperelásticos



Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

Los datos utilizados para la varilla #5 con la reducción en el diagrama de esfuerzo-deformación unitaria se observan en la tabla 2, además, es importante considerar que no todos los datos obtenidos del ensayo de la varilla #5 A706 se ingresan en el Software ANSYS, ya que son 2075 datos, se utilizan los resultados más representativos para el diagrama.

Tabla 2

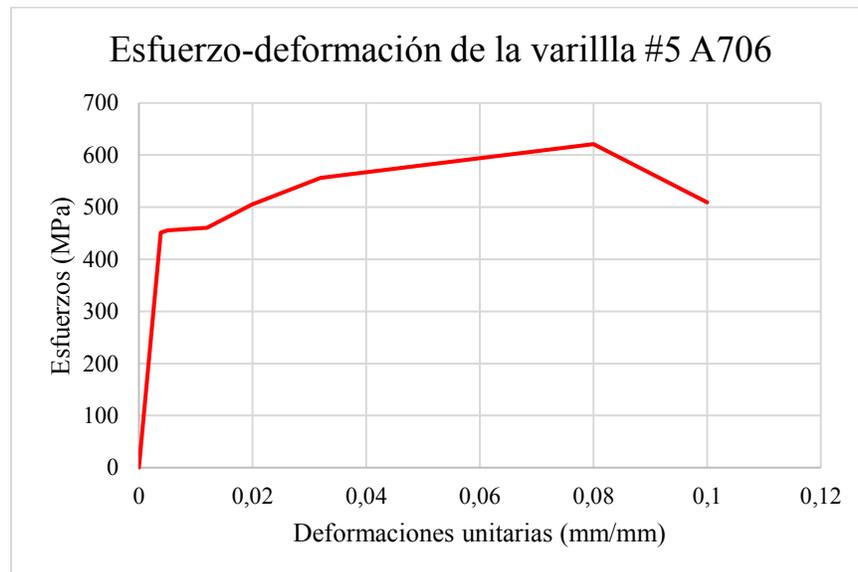
Esfuerzo-deformación acero A706

Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzos (MPa)
0	0
0,00387	451,27
0,00506	455,27
0,012	460,25
0,02	505,62
0,032	556,18
0,080	621,00
0,10	509,06

Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 52

Diagrama esfuerzo-deformación acero A706



Nota. Elaboración propia, 2023.

- El límite elástico en tensión y compresión utilizado es de 451,27 MPa
- La fuerza última en tensión y compresión: 621,00 MPa

En el caso del acero A33 para el tubo circular se utilizan los siguientes valores de la tabla 3 para la creación del diagrama esfuerzo-deformación, es importante mencionar que estos valores de las propiedades mecánicas se obtienen del programa SAP2000 versión 24:

Tabla 3

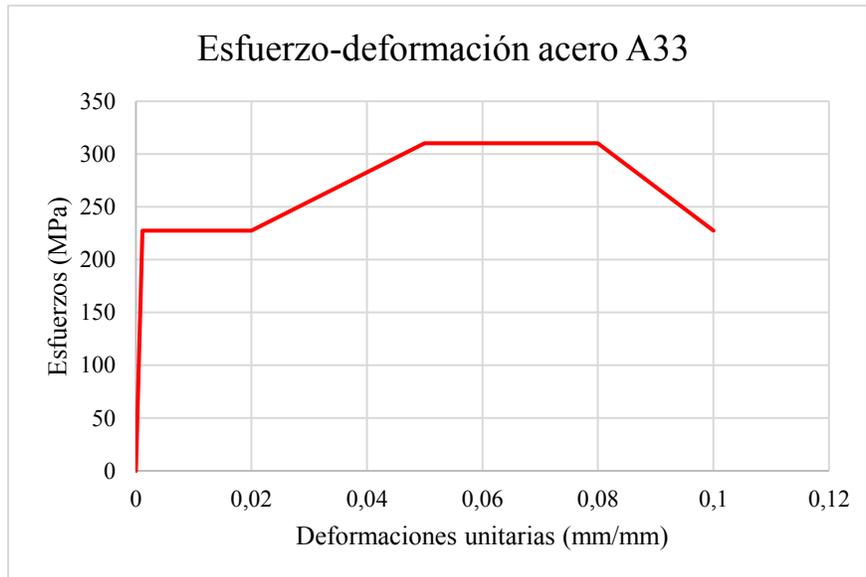
Esfuerzo-deformación acero A33

Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzos (MPa)
0	0
0,00112	227,53
0,02	227,53
0,05	310,26
0,08	310,26
0,1	227,53

Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 53

Diagrama esfuerzo-deformación acero A33



Nota. Elaboración propia, 2023.

- El límite elástico en tensión y compresión utilizado es de: 227,53 MPa
- La fuerza última en tensión y compresión: 310,26 MPa

En el caso del mortero se agrega un nuevo material, ya que el Software no presenta un material similar preestablecido. En la figura 54 se observan las propiedades mecánicas del mortero Eucofast:

Figura 54

Propiedades mecánicas del mortero Eucofast

Properties of Outline Row 4: Mortero Eucofast				
	A	B	C	D E
1	Property	Value	Unit	
2	Material Field Variables	Table		
3	Density	2300	kg m ⁻³	
4	Isotropic Elasticity			
5	Derive from	Young's Modulus and Poi...		
6	Young's Modulus	30000	MPa	
7	Poisson's Ratio	0,18		
8	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa	
9	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa	
10	Compressive Yield Strength	58	MPa	

Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

Propiedades del mortero Eucofast añadidas al Software en la célula 2:

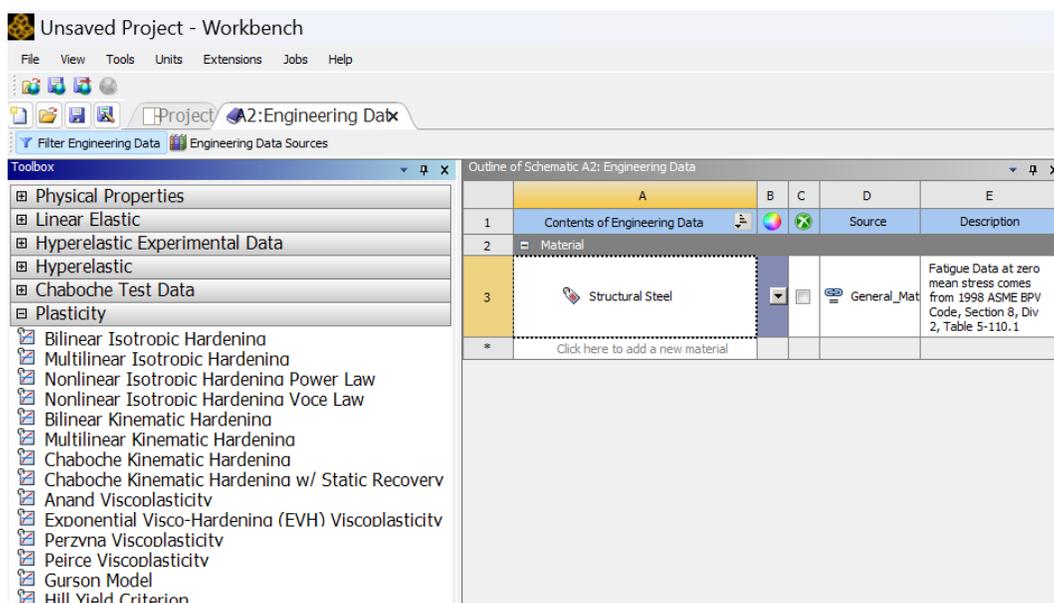
- Para la densidad se considera el valor de 2300 kg/cm³.
- El módulo de Young 30000 MPa.
- La relación de Poisson se mantiene en 0,18.
- Para el módulo de volumen se considera 15625 MPa, el programa ya tiene preestablecido este valor.
- El valor del módulo de cortante utilizado es de 12712 MPa, este valor se asocia a la relación de Poisson de 0,18.
- El valor a la resistencia de compresión es de 58 MPa.

3.4.2.2.2 Plasticidad

El apartado de la plasticidad se encuentra a la izquierda, realizando el desglose de este se debe seleccionar el endurecimiento cinemático multilínea que se observa en la figura 55, ahí se agregan los valores de la curva de endurecimiento por deformación de los materiales utilizados para el modelo virtual:

Figura 55

Plasticidad

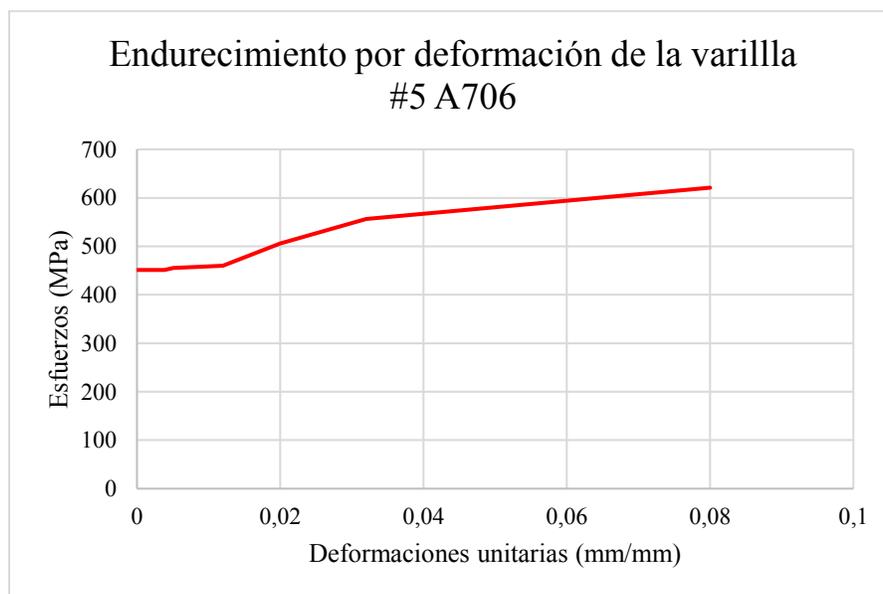


Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

Con la tabla 4 y la figura 56 se muestran los valores del endurecimiento por deformación de la varilla #5 A706 con la reducción:

Tabla 4*Endurecimiento por deformación acero A706*

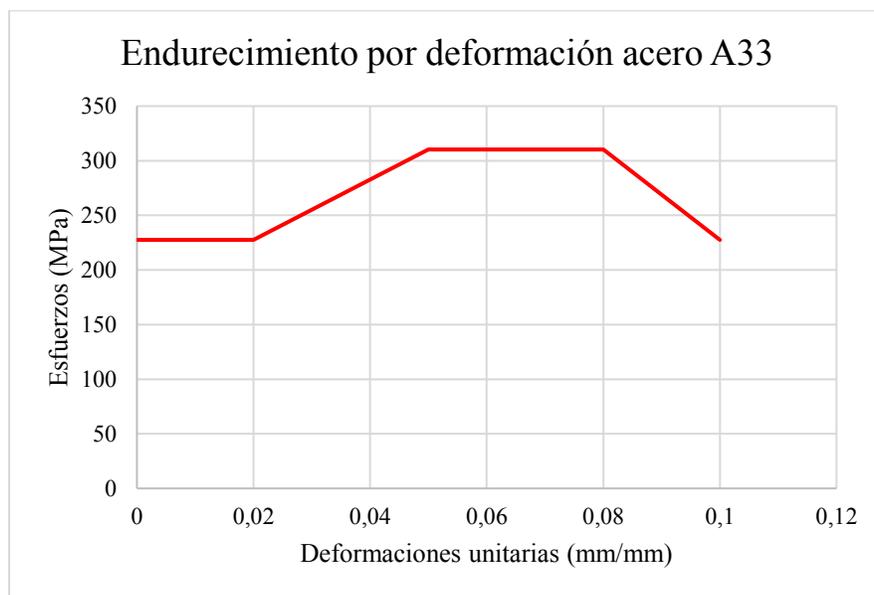
Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzos (MPa)
0	451,27
0,00387	451,27
0,00506	455,27
0,012	460,25
0,02	505,62
0,032	556,18
0,080	621,00

Nota. Elaboración propia, 2023.**Figura 56***Diagrama endurecimiento por deformación acero A706**Nota.* Elaboración propia, 2023.

Para el endurecimiento por deformación del acero A33 del tubo circular se utilizan los siguientes valores de la tabla 5 y figura 57, estos datos se obtienen del programa SAP2000 versión 24:

Tabla 5*Endurecimiento por deformación acero A33*

Deformación unitaria (mm/mm)	Esfuerzos (MPa)
0	227,53
0,00112	227,53
0,02	227,53
0,05	310,26
0,08	310,26
0,1	227,53

Nota. Elaboración propia, 2023**Figura 57***Diagrama endurecimiento por deformación acero A33**Nota.* Elaboración propia, 2023.

3.4.2.2.3 Parámetros de vida por deformación

La vida útil de los materiales se compone de 6 propiedades fundamentales cuando este se somete a esfuerzos cíclicos, esto en el caso del acero. Dentro de la pestaña datos de ingeniería-materiales se encuentra la propiedad “Strain-Life Parameters”, seleccionando esta se visualiza la tabla de propiedades de la figura 58, estas propiedades son las siguientes:

- Coeficiente de resistencia.
- Exponente de resistencia.
- Coeficiente de ductilidad.
- Exponente de ductilidad.
- Coeficiente de resistencia cíclico.
- Exponente de endurecimiento por deformación cíclica.

Figura 58

Parámetros de vida por deformación

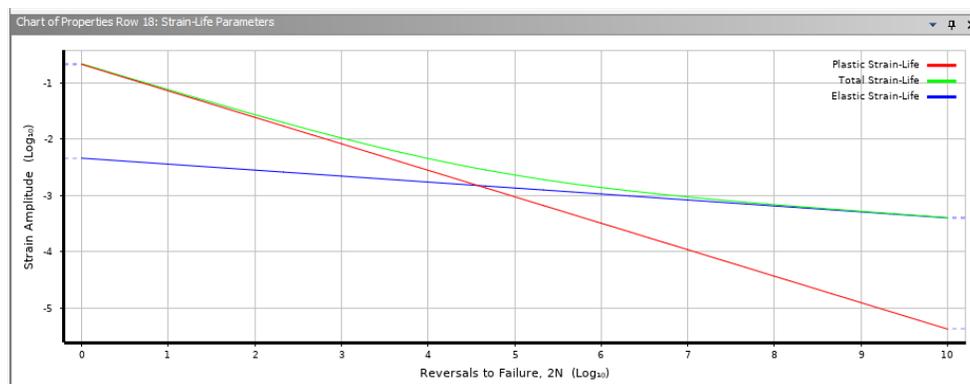
Table of Properties Row: 18: Strain-Life Parameters						
	A	B	C	D	E	F
1	Strength Coefficient (MPa)	Strength Exponent	Ductility Coefficient	Ductility Exponent	Cyclic Strength Coefficient (MPa)	Cyclic Strain Hardening Exponent
2	920	-0,106	0,213	-0,47	1000	0,2

Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

En la figura 59 se observa el gráfico de las 6 propiedades mencionadas anteriormente, es importante indicar que estos datos no fueron modificados, se utilizan los valores del acero proporcionados por el Software.

Figura 59

Gráfico de propiedades



Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

3.4.2.2.4 Curva S-N

La gráfica de la curva S-N muestra una amplitud de carga de la tensión alternada con respecto a la cantidad de ciclos. La figura 60 muestra la tabla de propiedades asignadas por el Software con respecto al material acero:

Figura 60

Tabla de propiedades curva S-N

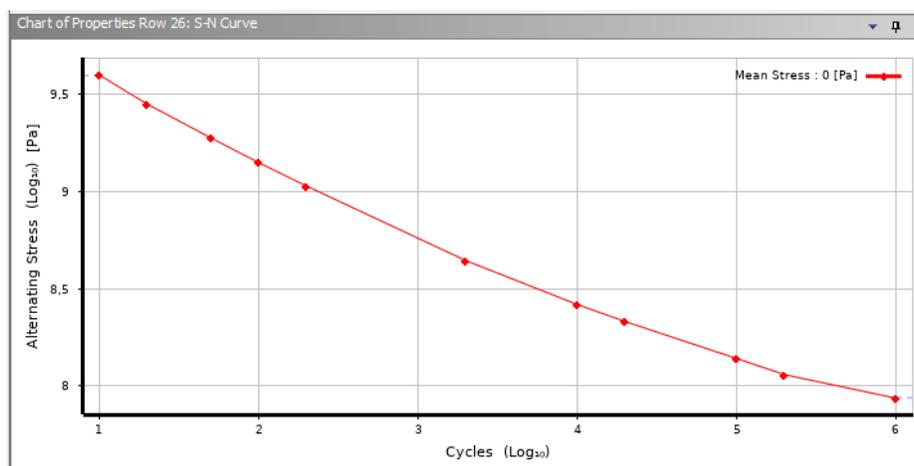
A		B	C
1	Mean Stress (Pa)	1	Cycles
2	0	2	10
*		3	20
		4	50
		5	100
		6	200
		7	2000
		8	10000
		9	20000
		10	1E+05
		11	2E+05
		12	1E+06
		*	
			Alternating Stress (Pa)
			3,999E+09
			2,827E+09
			1,896E+09
			1,413E+09
			1,069E+09
			4,41E+08
			2,62E+08
			2,14E+08
			1,38E+08
			1,14E+08
			8,62E+07

Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

En la figura 61 se visualiza la gráfica de los ciclos con respecto a la tensión alternada, esta gráfica se obtiene a partir de las propiedades observadas en la figura 61:

Figura 61

Gráfica de las propiedades de la curva S-N



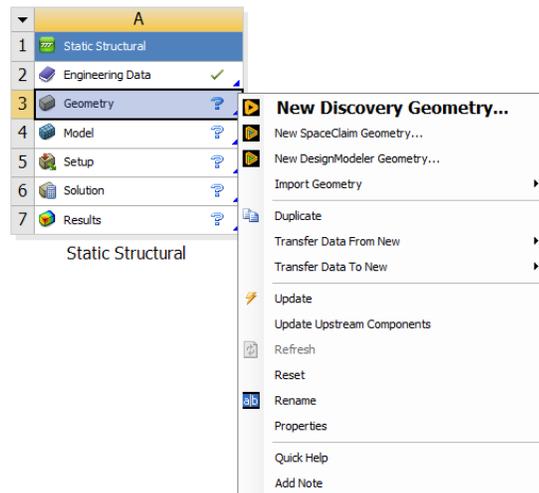
Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

3.4.2.2.5 Geometría

Después de realizar la edición de las propiedades del material se debe crear la geometría del modelo (disipador externo de energía a base de acero A706). Dentro del flujo de trabajo de Workbench se encuentra “Geometry” o geometría donde seleccionando con clic derecho se obtienen las siguientes opciones para importar, editar, crear, renombrar, entre otras, la geometría del modelo. La forma más habitual para ingresar a “Geometry” es presionando sobre esta con doble clic.

Figura 62

Creación de geometría

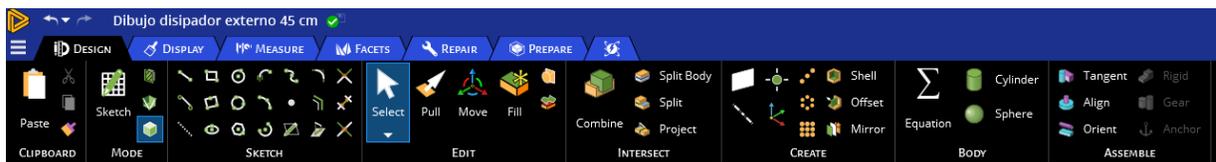


Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

La figura 63 muestra las diferentes herramientas que se utilizan para la creación de la geometría del modelo:

Figura 63

Herramientas para geometría

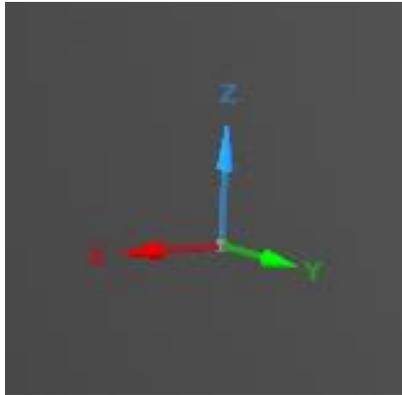


Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

El sistema de coordenadas cartesianas se utiliza para establecer un punto de origen. Este Software establece tres planos de los ejes (ZX, XY y YZ), es importante considerar que para cambiar la visualización del plano en dos coordenadas se debe dar clic en Z, X o Y.

Figura 64

Sistemas de coordenadas cartesianas

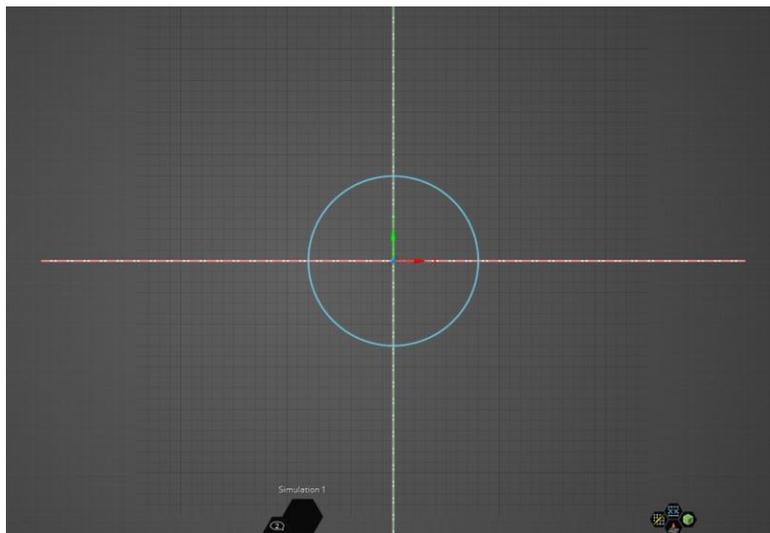


Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

Seleccionando la herramienta de dibujo “Circle” o círculo se crea el diámetro de la varilla #5 en los extremos sobre el plano XY.

Figura 65

Herramienta "Circle"

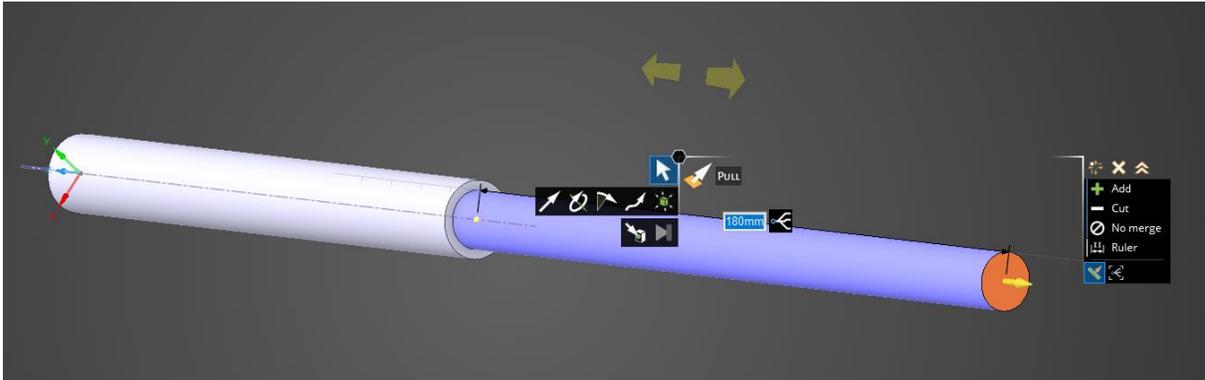


Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

Se debe seleccionar con la herramienta “Pull” el círculo para crear el material sólido con su respectiva longitud, obteniendo la forma geometría de los materiales que conforman el disipador externo de energía a base de acero A706. En la figura 66 se observa lo mencionado anteriormente:

Figura 66

Herramienta "Pull"



Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

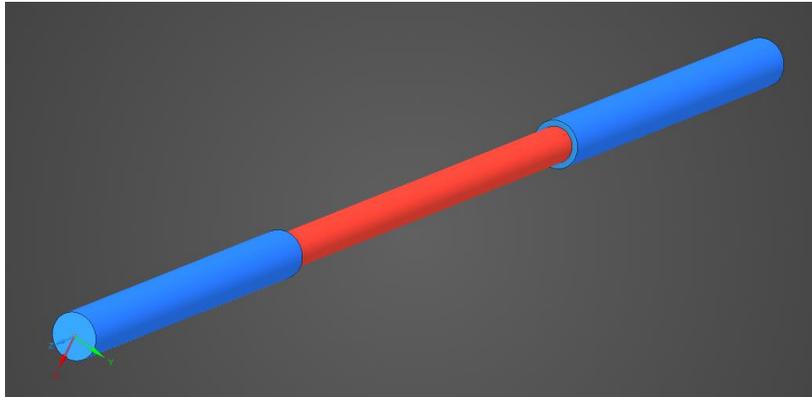
El disipador externo de energía a base de acero A706 se compone de 3 materiales que presentan diferentes diámetros y longitudes:

En la figura 67 se observa la probeta de la varilla #5 con la reducción en la parte central, es importante mencionar que los extremos son de color azul y la parte central roja, los dimensionamientos de la probeta son los siguientes:

- Diámetro de la varilla #5 A706 en los extremos: 16 mm.
- Longitud de la varilla #5 A706 en los extremos: 135 mm.
- Diámetro de la varilla #5 A706 en la parte central: 12 mm.
- Longitud de la varilla #5 A706 en la parte central: 180 mm.

Figura 67

Probeta de la varilla #5 A706



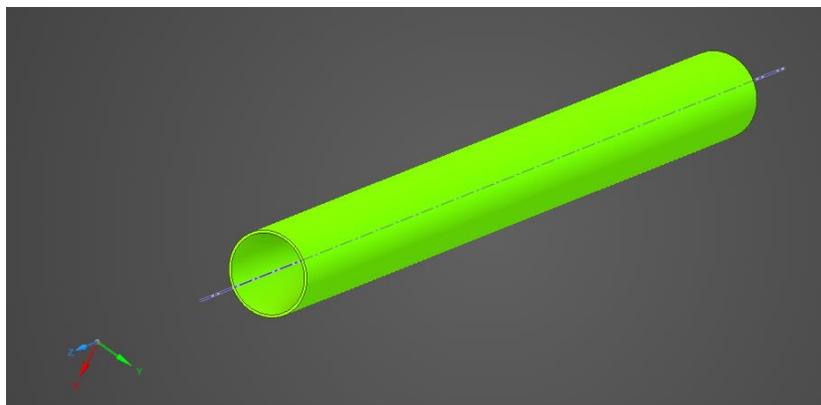
Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

La figura 68 muestra el tubo A33 que se utiliza para la camisa del disipador externo de energía a base de acero A706, las dimensiones utilizadas en el modelo son las siguientes:

- Diámetro del tubo A33: 25 mm.
- Espesor del tubo A33: 0,80 mm.
- Longitud del tubo A33: 256 mm.

Figura 68

Tubo A33



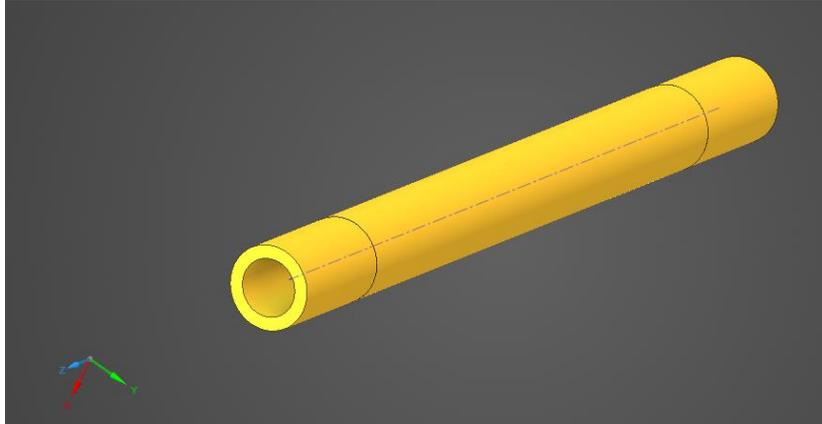
Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

El mortero Eucofast se utiliza dentro del tubo A33, cubriendo toda la parte central que presenta la reducción de la probeta (12 mm) con una longitud de 180 mm, además cubre

parte de los extremos con una longitud de 38 mm en ambos lados. El mortero Eucofast se agrega dentro de toda la longitud (256 mm) del tubo A33.

Figura 69

Mortero Eucofast

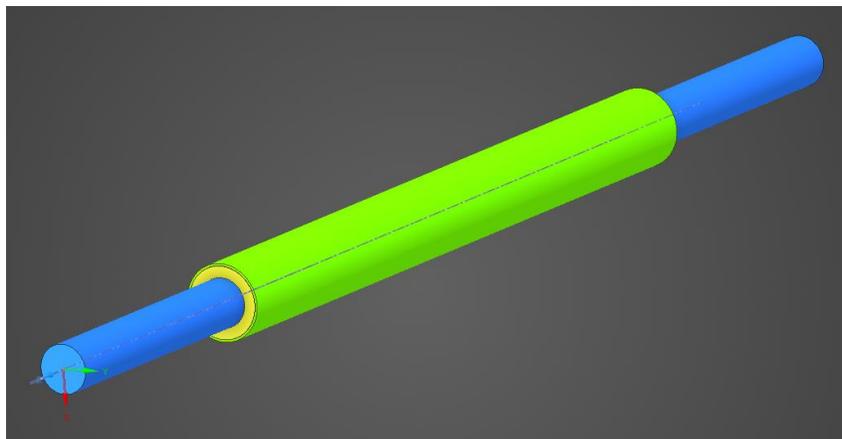


Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

En la figura 70 se observa la geometría final de los tres materiales que desarrollan el disipador externo de energía a base de acero A706.

Figura 70

Disipador externo de energía a base de acero A706



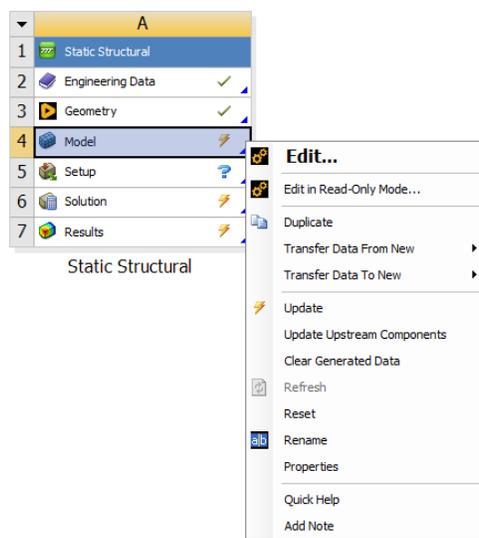
Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

3.4.2.3 Modelo

Después de asignar las propiedades mecánicas de los materiales y crear la geometría del modelo virtual en este caso el disipador externo de energía se procede a crear el modelo mecánico que importa automáticamente la geometría del disipador. Esta célula 4 es la más utilizada para el análisis estructural estático. En la figura 71 se observa donde editar el modelo creado:

Figura 71

Creación del modelo



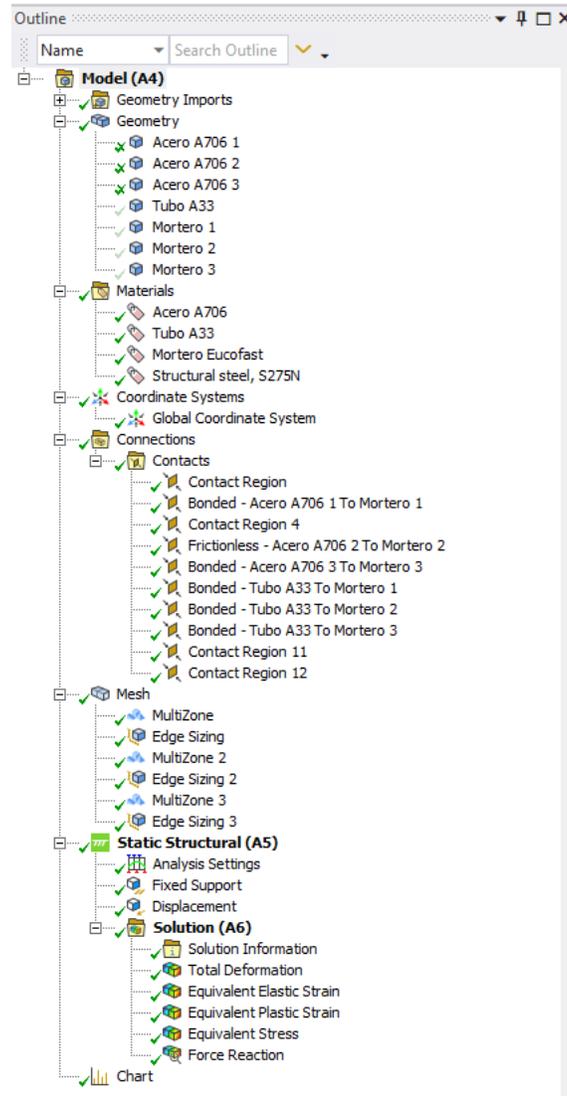
Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

3.4.2.3.1 Interfaz de trabajo del Modelo

Una vez dentro de la célula 4 del modelo se visualiza en la figura 72 las diferentes opciones (árbol esquemático) que se deben configurar, editar o crear para realizar el análisis estructural estático final del modelo mecánico (disipador externo de energía).

Figura 72

Interfaz de trabajo del modelo



Nota. Tomada de ANSYS Workbench, 2023.

A continuación, se explica las configuraciones o ediciones asignadas a cada una de estas opciones en el orden que se encuentran en la figura 72:

3.4.2.3.2 Configuración de la geometría en el modelo

Primeramente, se encuentra la pestaña geometría que se utiliza para la edición o configuración del modelo mecánico (disipador externo de energía), en esta se localizan las partes del disipador que fueron creadas en la célula “Geometry” o geometría. Se asigna el

material para cada parte que compone el disipador, ya que el Software preestablece un solo material “Structural steel, S275N” para todo el modelo mecánico. Además, dentro de esta pestaña se observan los materiales que fueron creados en “Materials” o materiales con su respectivo resumen de propiedades mecánicas acero A706, tubo A33 y mortero Eucofast.

3.4.2.3.3 Configuración del sistema de coordenadas

El Software por defecto preestablece un sistema global cartesiano de coordenadas que se utiliza para localizar el modelo mecánico dentro de un espacio en los ejes X, Y y Z. Es importante considerar que en función del modelo se opta por sistemas globales de coordenadas esféricas o cilíndricos. Para el caso del disipador externo de energía se utiliza el sistema cartesiano preestablecido por ANSYS.

3.4.2.3.4 Configuración de los contactos

En esta pestaña se localizan los contactos entre las áreas que forman el disipador externo de energía, para esto se utilizan dos tipos de comandos para editar el contacto entre los materiales asignados. El primer comando es “Bonded” o pegado que se utiliza para mantener los aristas o caras sin ninguna separación, tampoco que se deslicen entre ellos, este comando se utiliza para unir toda la probeta de acero A706 y el tubo A33 con el mortero Eucofast. El segundo comando es “Frictionless” o sin fricción que se implementa para que el coeficiente de fricción entre los materiales sea igual a cero, esto quiere decir que los materiales no van a presentar fricción entre ellos, las área de contacto entre los materiales que contiene este comando es el acero A706 en la reducción central (fusible) y el mortero Eucofast, ya que simula la parafina utilizada en la prueba experimental realizada en el laboratorio, además el acero A706 con el mortero Eucofast en los extremos de la parte con mayor diámetro este no simula la parafina.

3.4.2.3.5 Configuración del mallado

La geometría del disipador externo de energía o el modelo mecánico está formada por nodos y elementos que generan un mallado, el Software ANSYS por defecto establece un mallado automático de la geometría creada. Seleccionando la pestaña “Mesh” o malla es posible editar o crear los detalles de mallado, entre estos se visualizan:

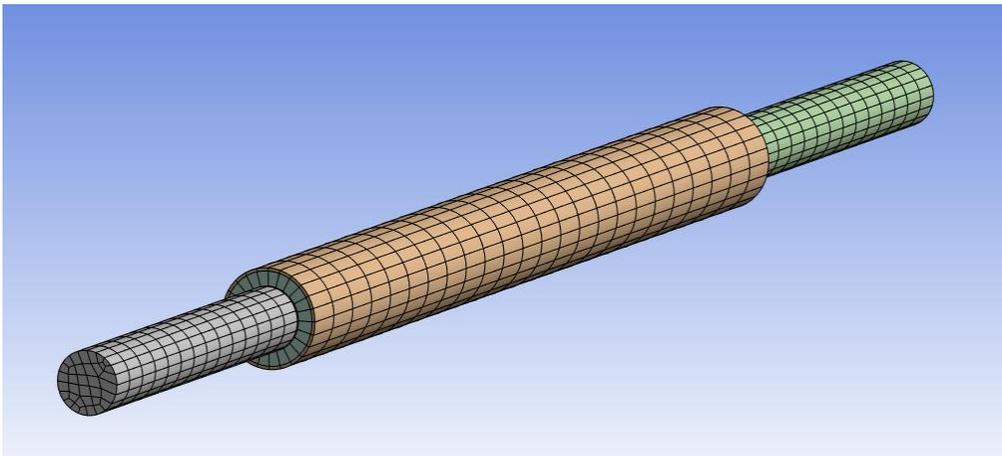
- Preferencia física: En este apartado se debe especificar el tipo de simulación, en el caso del disipador externo de energía se utiliza mecánica no lineal, ya

que el modelo mecánico presenta condiciones de plastificación en los extremos de la varilla #5 con la reducción.

- Método de mallado: Se utiliza el método “Multizone” o multizona para todos los elementos (materiales) que componen el disipador, es importante mencionar que este método se asigna seleccionando los cuerpos por aparte del acero A706 (varilla #5 con la reducción), el tubo A33 y el mortero Eucofast. Después seleccionamos los bordes de cada elemento para insertar un “Edge Sizing” o tamaño de borde con un número de divisiones igual a 20 para cada material que compone el disipador. El valor promedio de “Skewness” u oblicuidad es de 0,16 esto indica que la calidad de la malla es buena.

Figura 73

Mallado del disipador externo de energía



Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

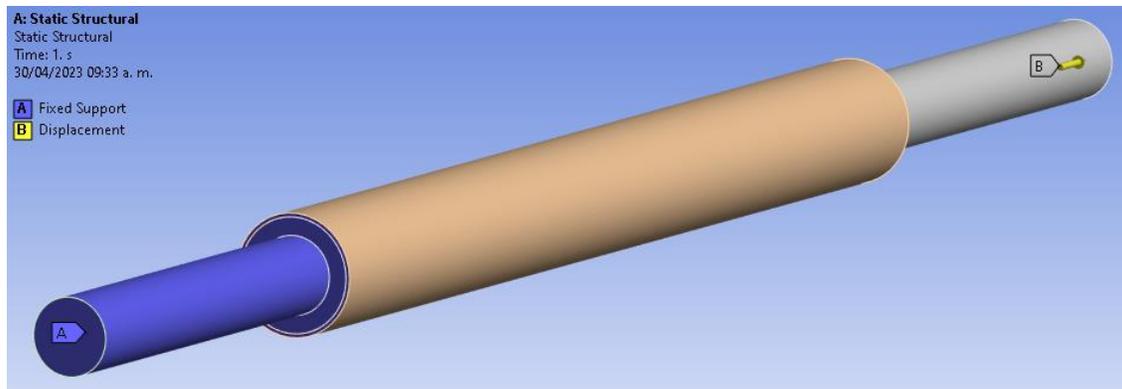
3.4.2.3.6 Configuración del análisis estático estructural

Dentro de esta pestaña se encuentra la configuración de análisis que se utiliza para cambiar o editar el “Number of step” o número de pasos que se requieren para aplicar el protocolo de desplazamiento. Posteriormente se agrega un “Fixed support” o soporte fijo que restringe el movimiento en los ejes X, Y y Z de la geometría (disipador) creando un empotramiento que simula la mordaza de la máquina de ensayo universal. Este soporte fijo se coloca en el área A visto en la figura 74 del extremo del disipador. Además, en el área B se agrega un desplazamiento que se utiliza para desplazar el disipador externo de energía en

la componente Z con un protocolo que simula ciclos de carga y descarga, este protocolo de desplazamiento se ingresa con datos tabulados, en la figura 75 se observa el protocolo aplicado al disipador para evaluar el comportamiento histérico o curvas de histéresis.

Figura 74

Soporte fijo y desplazamiento en el disipador



Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

Tabla 6

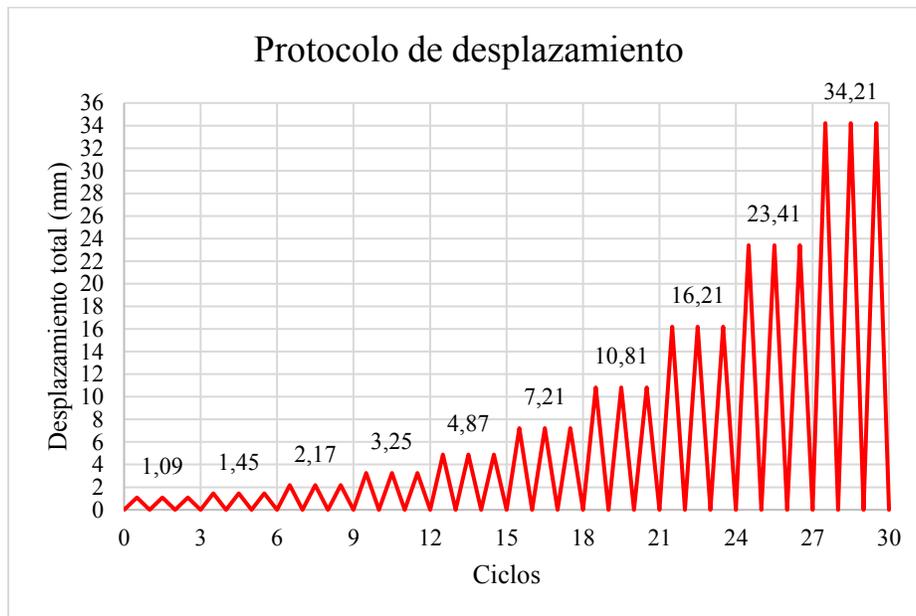
Cantidad de ciclos versus desplazamiento total

Ciclos	Desplazamiento total (mm)
0-3	1,09
3-6	1,45
6-9	2,17
9-12	3,25
12-15	4,87
15-18	7,21
18-21	10,81
21-24	16,21
24-27	23,41
27-30	34,21

Nota. Elaboración propia, 2023.

Figura 75

Protocolo de desplazamiento para el disipador externo de energía (Modelo virtual)



Nota. Elaboración propia, 2023.

3.4.2.3.7 Solución del análisis estático estructural

El Software ANSYS en esta pestaña permite obtener los resultados del análisis estático estructural realizado al modelo mecánico del disipador externo de energía. Para este modelo se obtienen 5 soluciones:

- Deformación total: Esta solución muestra las deformaciones totales globales del modelo que se generan por el protocolo de desplazamientos aplicado al disipador.
- Deformación elástica equivalente: Esta solución permite obtener y visualizar las deformaciones elásticas equivalentes globales del modelo mecánico cuando es sometido al protocolo de desplazamientos, la importancia de estas deformaciones elásticas equivalentes parte de la idea que el material al ceder la fuerza o el desplazamiento vuelve a la posición inicial sin presentar una deformación significativa.
- Deformación plástica equivalente: La solución muestra las deformaciones plásticas equivalentes globales en las diferentes partes del disipador. ANSYS permite observar por medio de una diferencia de colores donde ocurrió la

plastificación, además la plastificación en el modelo es de suma importancia, ya que el disipador se construye para que se plastifique en la parte central (fusible).

- Esfuerzo equivalente: Esta solución permite visualizar y obtener los esfuerzos equivalentes de Von-Mises en el disipador, ayudando a observar cuales son los puntos del modelo mecánico más o menos esforzados producto de los desplazamientos aplicados.
- Fuerza de reacción: La fuerza de reacción se ubica en el área B de la componente Z donde se aplicó el desplazamiento, ya que en ese punto se obtienen las fuerzas de reacción que se producen por el protocolo de desplazamientos.

3.4.2.3.8 Gráfico

ANSYS presenta esta opción de solución para graficar dos objetos, para la prueba del disipador externo de energía se utiliza la deformación total máxima en el eje X y la fuerza de reacción en el eje Y. Esto genera un diagrama de histéresis entre la deformación total máxima (X) versus la fuerza de reacción (eje Y). Es importante considerar que los resultados de la fuerza de reacción se deben obtener en la componente Z donde se aplicó el protocolo de desplazamientos.

3.4.3 Elaboración del disipador externo de energía a base de acero A706

La construcción del disipador externo de energía a base de acero A706 parte de la tabla 7, donde se especifican los diámetros, longitudes de la varilla y tubo. Los datos de las geometrías del disipador parten de un programa de pruebas que se realizaron en Nueva Zelanda, donde se implementaron en edificaciones.

Tabla 7

Programa de pruebas de los disipadores de tipo fusionado con refuerzo de pandeo (BFF)

(dimensiones en mm)

No.	Diámetro simple (D_{ext1})	Diámetro fusible (D_{fusi})	Longitud simple (L_{ext})	Longitud fusible (L_{fusi})	Diámetro de tubo interno	Diámetro de tubo externo	Longitud del tubo
D12L180	16	12	40	180	21,7	26,9	256
D20L300	24	20	40	300	36	42,4	377
D25L360	32	24	40	360	40,3	48,3	440
D26L390	32	26	40	390	40,3	48,3	468
D26L488	32	26	40	488	40,3	48,3	566
D26L585	32	26	40	585	40,3	48,3	665

Nota. Adaptado de “Estudio experimental y analítico de un disipador reemplazable de acero dulce de tipo fusible con restricción de pandeo (BRF)” (p. 3), F. Sarti, et al., 2013, NZSEE Conference.

Primeramente, es importante considerar que se utiliza una varilla #5 A706 para la elaboración del disipador externo, donde se realiza una reducción del diámetro de 12 mm a lo largo de 180 mm en la parte central (fusible) de la varilla, esta disminución de área se realiza con una máquina conocida como torno paralelo que elimina parte de una pieza con una herramienta de corte, la varilla #5 se prensa en el plato del equipo para que genere un movimiento rotacional y se desgaste la parte central (fusible), eliminando la zona corrugada e incluso parte del núcleo de la varilla, la técnica utilizada se nombra cilindrada externo e interno. En la figura 76 se observa el proceso realizado para disminuir el diámetro en la parte central a lo largo de 180 mm.

Para el desarrollo del disipador externo de energía se utiliza el No. D12L180 de la tabla 7, ya que el valor del diámetro simple (16 mm) cumple con la varilla #5.

Figura 76

Reducción del diámetro (fusible)



Nota. Elaboración propia, 2023.

Seguidamente, después de realizar la reducción de la parte central se ajusta la longitud total del disipador externo a 45 cm, se utiliza una esmeriladora para realizar el corte de la varilla #5 a la distancia total. Además, anteriormente se mencionó que la parte central con la reducción de área tiene 180 mm o 18 cm, por lo tanto, los extremos del disipador van a tener 135 mm o 13,5 cm. Las dimensiones utilizadas para el disipador externo en el caso de la varilla #5 son las siguientes:

- Diámetro de la varilla #5 A706 en los extremos: 16 mm.
- Longitud de la varilla #5 A706 en los extremos: 135 mm.
- Diámetro de la varilla #5 A706 en la parte central: 12 mm.
- Longitud de la varilla #5 A706 en la parte central: 180 mm.

Figura 77

Corte con Esmeriladora



Nota. Elaboración propia, 2023.

Posteriormente se realiza el mismo proceso mencionado en el ensayo de tracción de la varilla #5 para la implementación de las galgas extensiométricas, es importante considerar que se utilizan los mismos materiales para colocar las galgas (teipe, cinta adhesiva y super bonder), en este caso no se utiliza la lija agua grano 220, ya que la parte central (fusible) del disipador esta lisa por el desgaste que se realizó con el torno.

El disipador externo se instrumenta con cuatro galgas y cuatro cables (extensiones) en la parte central donde se localiza la reducción de 12 mm a lo largo de 180 mm, dos galgas en la parte central y dos en los extremos, en sentidos opuestos. La figura 78 muestra la instalación de las galgas extensiométricas en la parte central (fusible) del disipador de energía.

Las galgas utilizadas en el ensayo del disipador externo de energía presentan la misma marca y especificaciones técnicas del ensayo de tracción de la varilla #5.

Figura 78

Instalación de galgas extensiométricas en el disipador externo



Nota. Elaboración propia, 2023.

Después de realizar la instalación de las galgas extensiométricas y envolverlas con teipe se añade parafina para evitar el ingreso de agua, humedad o cualquier agente que dañe las galgas. La parafina también se utiliza como material antiadherente para que el mortero y la parte central del disipador (fusible) no tengan fricción y puedan desplazarse libremente, además la parafina se implementa para evitar que los esfuerzos cortantes se transfieran al núcleo del disipador.

Figura 79

Parafina para recubrir las galgas extensiométricas

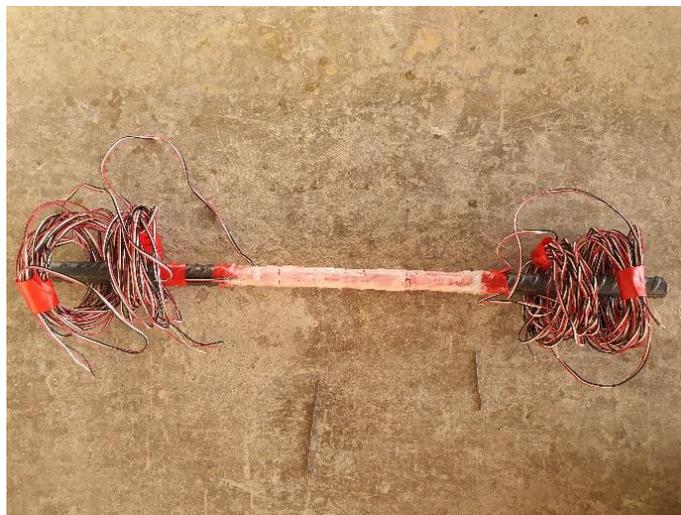


Nota. Elaboración propia, 2023.

En la figura 80 se observa la parafina totalmente seca en la parte central (fusible) del disipador externo de energía, es importante considerar que el tiempo de secado de este material antiadherente es sumamente rápido.

Figura 80

Parafina totalmente seca



Nota. Elaboración propia, 2023.

La figura 81 muestra el tubo de sección circular A33 utilizado en la camisa del disipador externo de energía, este se implementa para evitar el pandeo de la parte central cuando ocurre el ciclo en el sentido de la descarga (compresión). El tubo presenta las siguientes dimensiones:

- Diámetro del tubo A33: 25 mm.
- Espesor del tubo A33: 0,80 mm.
- Longitud del tubo A33: 256 mm.

Se debe considerar que los seis tornillos instalados en el tubo se utilizan para centrarlo al momento de añadir el mortero y no perder el eje central de la varilla #5 con la reducción.

Figura 81

Tubo A33 sección circular



Nota. Elaboración propia, 2023.

Después se instala el tubo circular en la varilla #5 con la reducción, claramente se debe centrar con los seis tornillos, la figura 82 muestra la implementación del tubo en la varilla #5 con la reducción en la parte central.

Figura 82

Instalación del tubo A33 en la varilla #5 con la reducción



Nota. Elaboración propia, 2023.

Se utiliza la técnica de instalar masking en el extremo del tubo A33, esto se realiza para verter el mortero Eucofast y evitar que pase libremente.

Figura 83

Instalación de masking en el disipador externo de energía



Nota. Elaboración propia, 2023.

Se añade agua para producir una reacción química con el mortero Eucofast creando una lechada que sea lo suficientemente fluida semilíquida para ingresarla en el espacio que divide el tubo A33 y la varilla #5 con la reducción más la parafina y el teipe rojo. El mortero

Eucofast se utiliza para que evite el pandeo en el núcleo del dissipador externo de energía, esto debido a las deformaciones que se producen cuando interactúan los ciclos de descarga (compresión).

Figura 84

Lechada de mortero Eucofast



Nota. Elaboración propia, 2023.

Después de realizar la mezcla de agua y mortero Eucofast creando una lechada, esta se debe verter en el núcleo del dissipador. La figura 85 muestra lo mencionado anteriormente.

Figura 85

Añadir lechada de mortero Eucofast



Nota. Elaboración propia, 2023.

La figura 86 muestra el disipador externo de energía con el mortero Eucofast curado. Este proceso indica que el mortero endurece y madura en el transcurso del tiempo establecido. Para el disipador el mortero se curó durante 13 días. Es importante mencionar que el mortero Eucofast alcanza una resistencia a la compresión de 58 MPa a los 7 días.

Figura 86

Proceso de curado del mortero Eucofast en el disipador



Nota. Elaboración propia, 2023.

El equipo utilizado para llevar a cabo el ensayo del disipador externo de energía se muestra en las figuras 87 y 88:

- Indicadores de tensión: Se utilizan 4 indicadores para conectar las galgas extensiométricas mediante extensiones o cables. Estos se implementan para medir los desplazamientos de las galgas.

Figura 87

Indicador de tensión



Nota. Elaboración propia, 2023.

- Máquina de ensayo universal: Se utiliza para aplicar fuerzas axiales en el sentido de la tracción y compresión (ciclos de carga y descarga).

Figura 88

Máquina de ensayo universal con disipador externo de energía



Nota. Elaboración propia, 2023.

En la figura 89 se observa el disipador externo instalado en la máquina de ensayo universal. Se debe mencionar que este ensayo se realiza prensando ambos extremos del disipador, pero solamente la mordaza superior genera fuerza axial en compresión y tensión (ciclos de carga y descarga), mientras la mordaza inferior permanece estática.

Figura 89

Instalación del disipador en mordazas

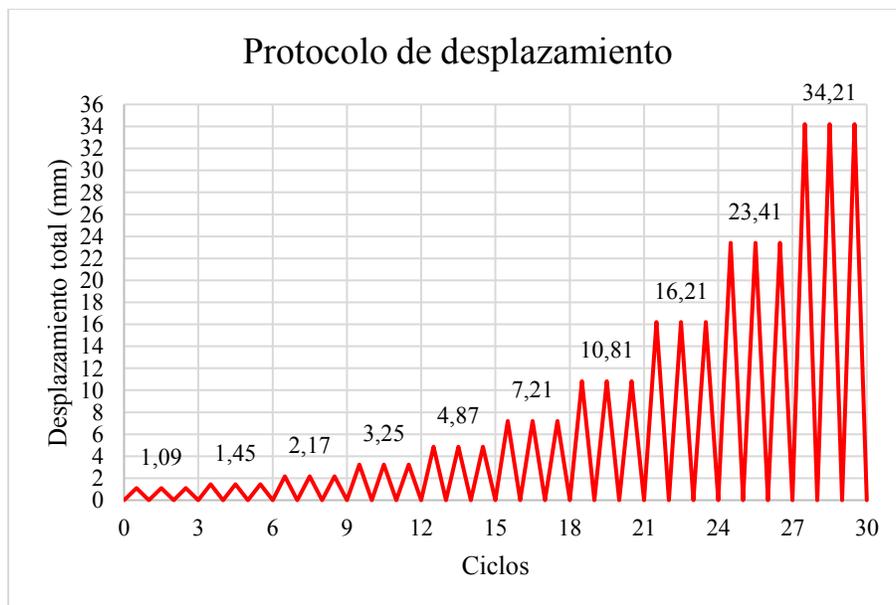


Nota. Elaboración propia, 2023.

Finalmente, para realizar el ensayo del disipador externo se inserta el protocolo de desplazamiento en la máquina de ensayo universal, generando ciclos de carga y descarga o fuerzas axiales en tracción y compresión. Se utiliza el protocolo de desplazamiento de la tabla 8 y figura 90 que se utilizó para el modelo virtual (elemento finito).

Tabla 8*Cantidad de ciclos versus desplazamiento total*

Ciclos	Desplazamiento total (mm)
0-3	1,09
3-6	1,45
6-9	2,17
9-12	3,25
12-15	4,87
15-18	7,21
18-21	10,81
21-24	16,21
24-27	23,41
27-30	34,21

Nota. Elaboración propia, 2023.**Figura 90***Protocolo de desplazamiento para el dissipador externo de energía**Nota.* Elaboración propia, 2023.

3.5 Técnicas e instrumentación para el procesamiento y análisis de los datos

Para el procesamiento y análisis de datos se utilizan las siguientes técnicas e instrumentos. En este inciso se detalla de forma clara y concreta como se analizan estos datos:

La primera técnica o instrumento utilizado para analizar los datos del ensayo de tracción de la varilla #5 A706 y el ensayo del disipador externo de energía es Microsoft Excel, ya que permite transferir los datos obtenidos en el laboratorio para analizarlos por medio de tablas y gráficos, además los datos finales de la prueba en el laboratorio se dan en unidades de Newton para la fuerza axial y milímetros en desplazamiento axial, pero se realiza un cálculo sencillo en las tablas (datos dentro de tablas) para convertir las unidades de fuerza axial a esfuerzo estableciendo (MPa) y en el caso del desplazamiento axial se convierte a deformación unitaria o equivalente utilizando las unidades de (mm/mm). Lo anterior se realiza para analizar el diagrama de esfuerzo versus deformación unitaria. Además, el extensómetro y las galgas extensiométricas se comparan con gráficos para analizar la diferencia de desplazamientos o deformaciones unitarias entre ambos instrumentos de medición, por esta razón se utiliza nuevamente la herramienta de Microsoft Excel.

Después de crear en el Software ANSYS el modelo virtual del disipador externo de energía utilizando el método de elemento finito. Se ingresa el protocolo de desplazamientos en el Software, este genera gran cantidad de datos (valores de fuerza versus desplazamiento) o curvas de histéresis, la ventaja principal de Microsoft Excel es la facilidad para crear gráficos con cantidades grandes de datos para analizarlos y procesarlos. ANSYS genera los resultados finales con las unidades de Newton (fuerza de reacción) y milímetros (deformación total). Antes de crear los gráficos de las curvas de histéresis se deben convertir las unidades de los datos que se encuentran dentro de las tablas creando cálculos sencillos, para obtener MPa para el esfuerzo y mm/mm asociado a la deformación unitaria. Por último, las curvas de histéresis presentan las mismas unidades del gráfico esfuerzo versus deformación unitaria o equivalente del ensayo de tracción de la varilla #5.

Finalmente, se elabora en Microsoft Excel gráficos comparativos de las curvas de histéresis obtenidas del modelo virtual (método de elemento finito) y el ensayo realizado en el laboratorio del disipador externo de energía, esta comparación se realiza para demostrar teórica y experimentalmente que el dispositivo evita el daño de los elementos estructurales (vigas, columnas y placas).

4 Capítulo IV. Resultados y Análisis de Resultados

El primer análisis de resultados consiste en el ensayo de tracción de la varilla #5 A706, el objetivo principal de este ensayo es obtener las propiedades mecánicas del material mencionado anteriormente. Además, en el capítulo 3 se mencionó que las propiedades obtenidas de la varilla #5 A706 ensayada se insertan en las propiedades mecánicas del Software ANSYS. Este ensayo lo rige la normativa ASTM A370.

Para el segundo análisis de resultados se comparan los desplazamientos y deformaciones unitarias del ensayo de tensión de la varilla #5 A706, utilizando las galgas extensiométricas, el extensómetro láser y la máquina de ensayo universal. Esta comparación se realiza para analizar gráficamente las posibles diferencias de los desplazamientos o deformaciones unitarias entre los tres instrumentos de medición, es importante considerar que se utiliza el diagrama esfuerzo versus deformación unitaria o equivalente para analizar los resultados de los instrumentos de medición a lo largo del diagrama de la varilla #5 A706.

El tercer análisis de resultados consiste en el modelo virtual del disipador externo de energía creado en el Software ANSYS, se aplica el protocolo de desplazamiento al modelo, generando la deformación total, deformación elástica y plástica equivalente, el esfuerzo equivalente y por último la gráfica de fuerza versus desplazamiento (curvas de histéresis) que posteriormente se realiza una conversión para calcular esfuerzos versus deformaciones unitarias.

El cuarto análisis de resultados radica en la prueba del disipador externo de energía realizada en el laboratorio, utilizando la máquina de ensayo universal para obtener la relación fuerza versus desplazamiento o curvas de histéresis, esto producto del protocolo de desplazamiento aplicado al disipador, además se utilizan galgas extensiométricas para medir desplazamientos o deformaciones que se comparan con los valores de los desplazamientos obtenidos en la máquina de ensayo universal.

Como último análisis de resultados se realiza una comparación gráfica de las curvas de histéresis de los resultados obtenidos en el laboratorio versus los resultados de la simulación del disipador en el Software ANSYS (modelo virtual). El objetivo principal es demostrar que la implementación de disipadores externos de energía reduce el daño estructural ocasionado por las fuerzas sísmicas.

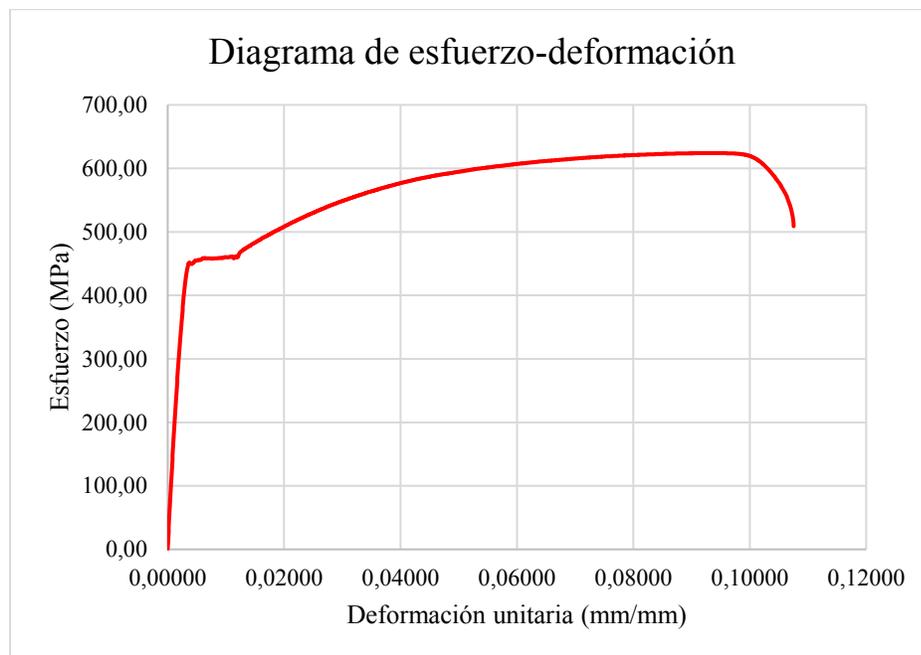
4.1 Resultados del ensayo de la tracción de la varilla #5

A partir de la generación del diagrama esfuerzo versus deformación la máquina de ensayo universal registra los datos obtenidos, en términos de fuerza (N) y desplazamiento (mm), pero se realiza la conversión para obtener el diagrama en términos de esfuerzo (MPa)-deformación unitaria (mm/mm). Los resultados del ensayo se utilizan para analizar las propiedades mecánicas de forma gráfica.

El diagrama de esfuerzo versus deformación unitaria de la varilla #5 A706 obtenido en el laboratorio se observa en la figura 91:

Figura 91

Diagrama esfuerzo-deformación unitaria



Nota. Elaboración propia, 2023.

Los resultados obtenidos del diagrama esfuerzo-deformación por cada zona o región se analiza detalladamente en las siguientes secciones:

4.1.1 Resultados de Región elástica

Para la región elástico se obtienen los resultados de deformación unitaria entre los valores de 0 mm a 0,00276 mm/mm, y para el esfuerzo de 0 MPa a 451,27 MPa. El límite elástico se obtiene con un esfuerzo de $\sigma = 451,27$ MPa y una deformación unitaria esperada de $\varepsilon = 0,00387$ mm/mm, este valor del límite divide la región elástica con la zona de cedencia.

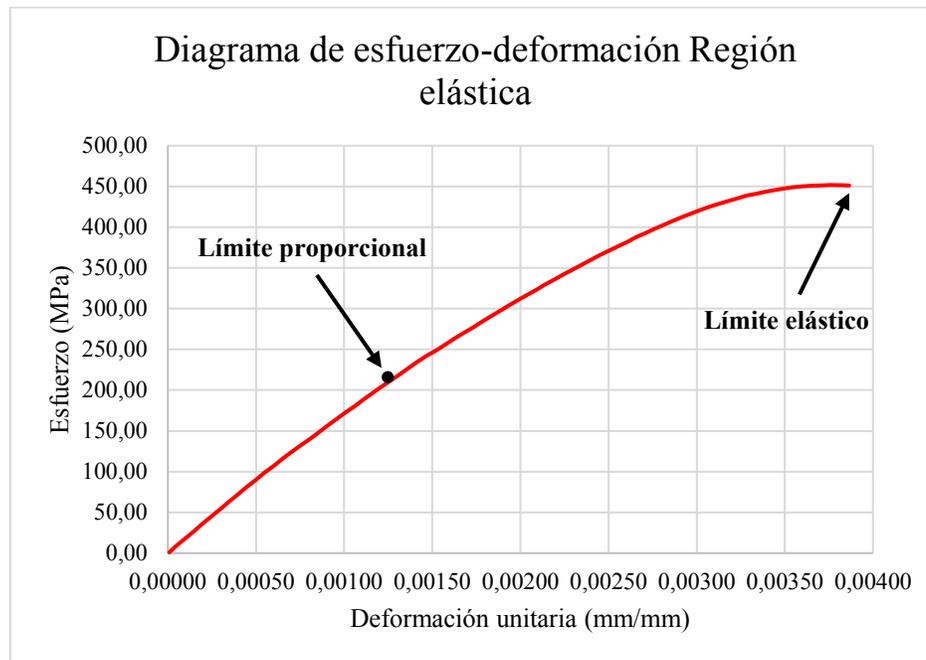
Es importante considerar que dentro del rango elástico se localizan dos propiedades mecánicas del material; Ley de Hooke y módulo de elasticidad. La varilla #5 es capaz de absorber la energía sin alcanzar las deformaciones unitarias o equivalentes plásticas.

Con respecto a la Ley de Hooke la varilla #5 presenta una deformación equivalente en el rango elástico que es directamente proporcional a la carga o fuerza axial aplicada en el ensayo. Lo anterior indica que la Ley de Hooke solamente se define en la parte recta del rango elástico, por lo tanto, se puede definir entre los intervalos del diagrama esfuerzo-deformación con los valores 0,00 mm/mm a 0,00121 mm/mm con un esfuerzo de 204,14 MPa, finalizando en el límite proporcional del material (varilla #5 A706).

Además, el límite proporcional es difícil establecerlo, ya que se encuentra en la región lineal del rango elástico, el límite aproximadamente se encuentra en el punto 204,14 MPa y 0,00121 mm/mm. En la figura 92 se indica la ubicación del límite proporcional en el diagrama esfuerzo-deformación.

Conociendo el valor de la deformación equivalente y el esfuerzo se calcula el módulo de elasticidad en la zona elástica del diagrama esfuerzo versus deformación, por medio de la ecuación 7 vista en el capítulo 2.

Se demuestra gráficamente que conforme el esfuerzo aumenta sobrepasa el límite proporcional, generando que la curva realice un doblez y se aplane llegando al límite elástico, en este punto si la carga aplicada se retira la varilla #5 A706 regresa a la forma original. La figura 93 muestra la diferencia entre estos dos límites.

Figura 92*Resultados de la Región elástica*

Nota. Elaboración propia, 2023.

4.1.2 Resultados de Zona de cedencia

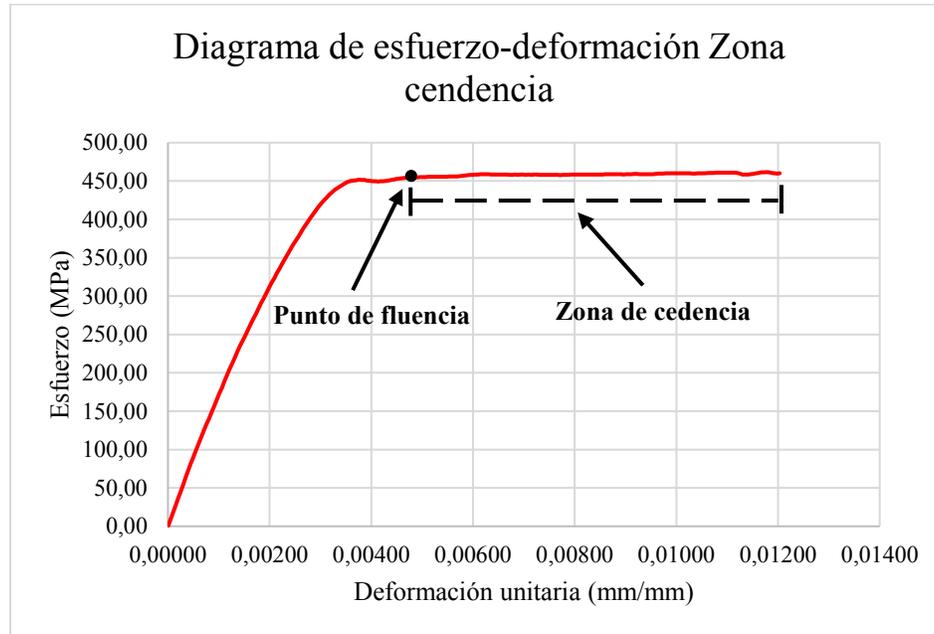
La propiedad mecánica más relevante en la zona de cedencia es el punto de fluencia que se presenta después del límite elástico. El valor obtenido para el punto de fluencia o esfuerzo de fluencia es $f_y = \sigma_y = 455,27$ MPa y $\epsilon_y = 0,00506$ mm/mm.

En la figura 93 se observa la zona de cedencia después de obtener el punto de fluencia, en esta zona el material (varilla #5) alcanza el valor de 460,25 MPa con una deformación equivalente de 0,012 mm/mm. La varilla #5 A706 en esta zona es perfectamente plástica, ya que se alarga presentando una deformación unitaria sin ningún aumento de carga o fuerza axial aplicada.

La varilla en la zona de cedencia presenta un esfuerzo constante con una deformación permanente plástica. Esto indica que retirando la carga o fuerza axial la varilla #5 A706 no regresa al estado inicial, si no que presenta una deformación permanente o residual significativa para la varilla #5 A706.

Figura 93

Resultados de la Zona de cedencia



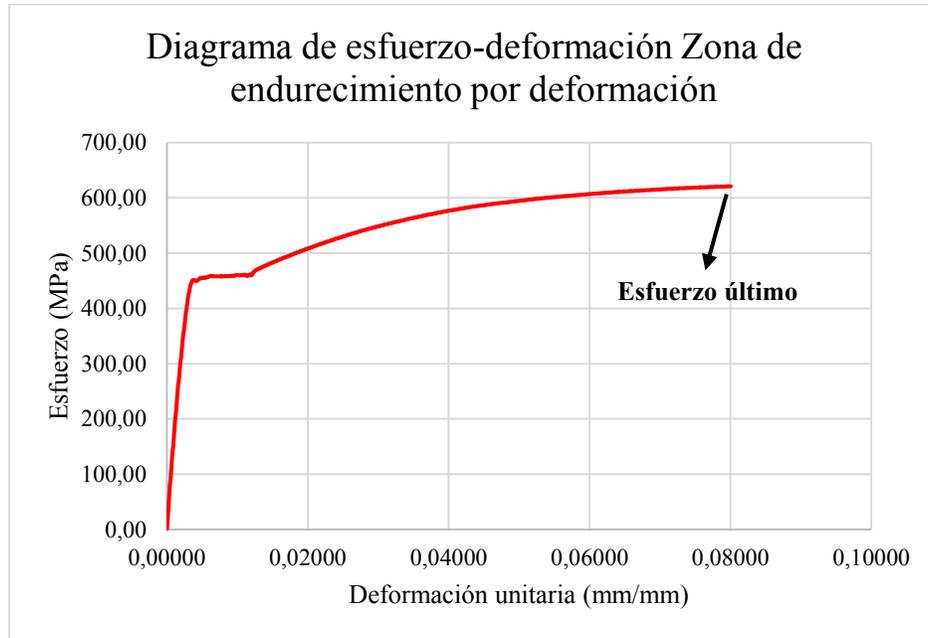
Nota. Elaboración propia, 2023.

4.1.3 Resultados Zona de endurecimiento por deformación

La varilla #5 A706 después de la zona de cedencia soporta un aumento de carga o fuerza axial hasta alcanzar el esfuerzo último, en este ensayo se obtiene el valor del esfuerzo último $f_u = \sigma_u = 621,00$ MPa con una deformación unitaria última reducida $\epsilon_u = 0,080$ mm/mm. En esta zona el área de la sección transversal presenta una disminución generando un alargamiento mayor en comparación a la zona elástica y de cedencia, por esta razón la curva del diagrama esfuerzo-deformación crece. En la figura 94 se visualiza el aumento de la curva del diagrama esfuerzo-deformación, hasta alcanzar el esfuerzo máximo o último de la varilla #5 A706.

Figura 94

Resultados de la Zona de endurecimiento por deformación



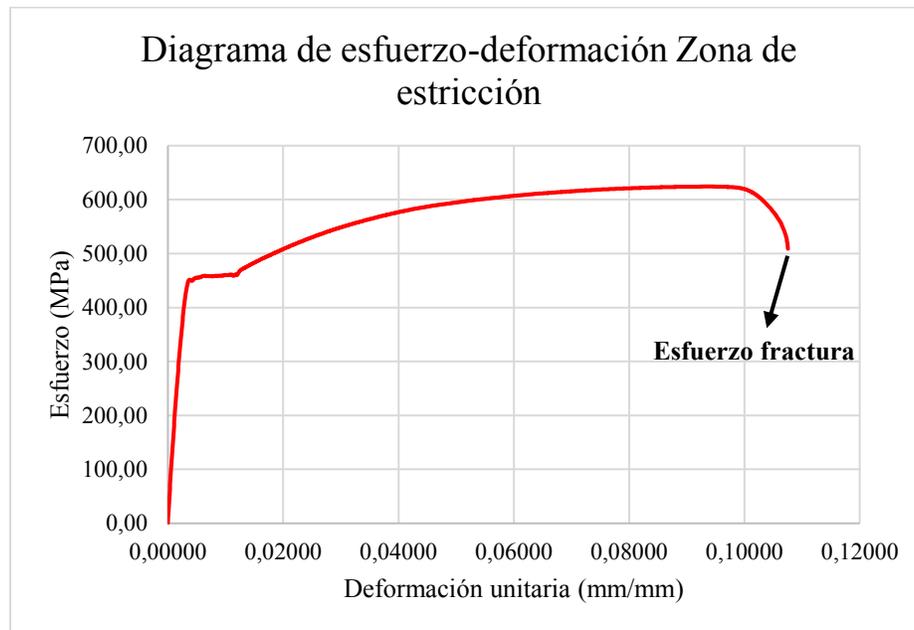
Nota. Elaboración propia, 2023.

4.1.4 Resultados de la Zona de estricción

Después de obtener el esfuerzo último o máximo la varilla #5 presenta una reducción en la sección transversal, por esta razón la curva del diagrama esfuerzo-deformación empieza a disminuir hasta finalizar en el esfuerzo de fractura con un resultado de $f_f = \sigma_f = 509,06$ MPa con una deformación unitaria $\epsilon_f = 0,10$ mm/mm. El área bajo la curva del diagrama esfuerzo-deformación unitaria de la figura 95 es toda la energía que absorbe la varilla #5 A706 antes de fracturarse, lo anterior hace referencia a la tenacidad.

Figura 95

Resultados de la zona de estricción



Nota. Elaboración propia, 2023.

Conforme aumenta la carga o fuerza axial aplicada a la varilla #5 grado 60 durante todo el proceso del ensayo, finalmente se forma un cuello o constricción en el área de la varilla que produce un alargamiento hasta obtener la falla por fractura. La figura 96 muestra la falla por fractura dúctil de la varilla #5 A706.

En el capítulo 3 se detalló que la varilla #5 A706 tiene una longitud de 45 cm o 450 mm, la falla por fractura dúctil ocurre en el punto donde se realizó la reducción de la corrugación hasta llegar al núcleo del acero, esto para instalar la galga extensiométrica. Lo anterior indica que conforme se lleva a cabo el ensayo de tracción la varilla falla donde presente menor área transversal.

Figura 96

Falla por fractura de la varilla #5 A706



Nota. Elaboración propia, 2023.

Las propiedades mecánicas de la varilla #5 A706 analizadas anteriormente en el diagrama esfuerzo-deformación se resumen en la tabla 9:

Tabla 9

Resumen de propiedades mecánicas de la varilla #5 A706

Propiedad mecánica	Notación	Resultado	Símbolo de la unidad
Límite proporcional	-	(204,14 y 0,00121)	MPa y mm/mm
Esfuerzo de fluencia	$f_y-\sigma_y$	451,27	MPa
Deformación unitaria esperada	ϵ_y	0,00387	mm/mm
Punto de fluencia	-	(455,27 y 0,00506)	MPa y mm/mm
Esfuerzo último	$f_{uR}-\sigma_{uR}$	621,00	MPa
Deformación unitaria última	ϵ_{uR}	0,080	mm/mm
Esfuerzo de fractura	$f_u-\sigma_u$	509,06	MPa
Deformación unitaria de fractura	ϵ_u	0,10	mm/mm

Nota. Elaboración propia, 2023.

4.1.5 Comparación de la máquina de ensayo universal y el extensómetro

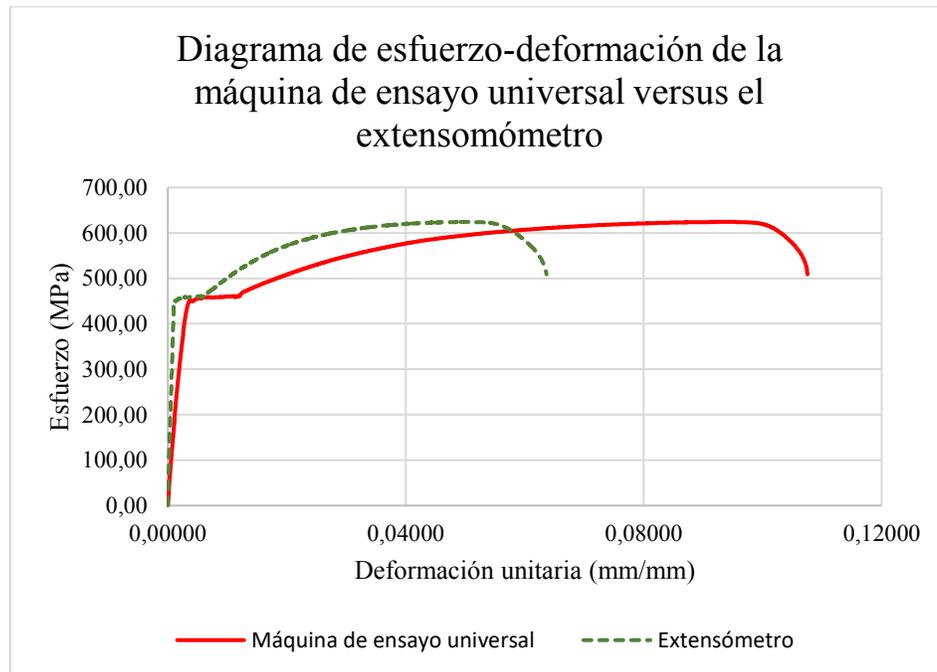
La máquina de ensayo universal genera los resultados del diagrama esfuerzo-deformación de la varilla #5 A706 y el extensómetro láser mide desplazamientos conforme incrementa la carga axial. Los desplazamientos obtenidos por el medidor láser se dividen entre la longitud total (45 cm o 450 mm) de la varilla #5, esto se realiza para calcular deformaciones unitarias que se grafican con los esfuerzos de la varilla #5 obtenidos en el diagrama que se analizó anteriormente hasta alcanzar la fractura. El cálculo realizado para convertir desplazamientos en deformaciones unitarias se elabora para visualizar los diferentes comportamientos que presentan los equipos de laboratorio comparando los diagramas de esfuerzo-deformación unitaria, este análisis se observa en la figura 97.

El extensómetro láser en el rango de medición registra menores desplazamientos que la máquina de ensayo universal, realizando el cálculo para obtener deformaciones unitarias se observa la misma dispersión de puntos en las curvas del ensayo de tracción. Lo anterior se muestra gráficamente en la figura 97 donde la curva discontinua de color verde presenta el mismo esfuerzo que la curva roja, pero el desplazamiento en la curva verde es menor generando una dispersión de puntos significativa entre las dos curvas del diagrama. Además, en el diagrama se analiza que la máquina de ensayo universal aumenta el esfuerzo y la deformación unitaria en la zona elástica en comparación con el extensómetro láser, numéricamente la quinta medición de la deformación unitaria con respecto a la máquina de ensayo universal es de $\varepsilon = 0,00020$ mm/mm, mientras el extensómetro indica un valor $\varepsilon = 0,00002$ mm/mm, estos resultados muestran la diferencia entre ambos instrumentos de medición para obtener los desplazamientos de la varilla #5.

La deformación unitaria última del extensómetro láser es $\varepsilon_u = 0,064$ mm/mm y la máquina de ensayo universal $\varepsilon_u = 0,11$ mm/mm, analizando los datos obtenidos de ambos instrumentos se calcula una diferencia de 0,046 mm/mm, este resultado representa una diferencia de casi el doble de deformación unitaria entre ambos instrumentos. En la figura 97 se observa la diferencia significativa de la deformación última que se obtiene de los dos instrumentos utilizados en el ensayo de tracción.

Figura 97

Comparación del Diagrama esfuerzo-deformación de la máquina de ensayo universal versus el extensómetro



Nota. Elaboración propia, 2023.

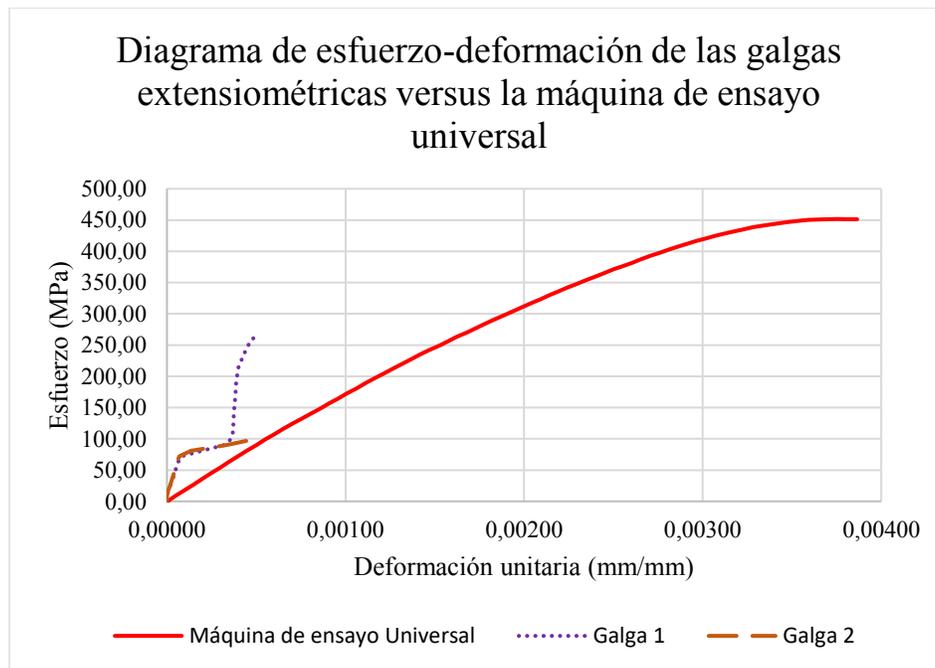
4.1.6 Comparación de las galgas extensiométricas con la máquina de ensayo Universal

La comparación entre las dos galgas extensiométricas y la máquina de ensayo universal solamente se realiza en la zona elástica, ya que las galgas no miden desplazamientos a partir de la plastificación o zona de cedencia de la varilla #5 A706, esto indica que fallan en la zona elástica. Es importante recordar que las galgas extensiométricas miden desplazamientos o deformaciones en mm, estos desplazamientos se dividen entre la longitud total de la varilla #5 (45 cm o 450 mm) para obtener deformaciones unitarias (mm/mm). Como se observa en la figura 98 la galga 1 registra más deformaciones unitarias conforme aumenta el esfuerzo, pero la medición final de la deformación unitaria de ambas galgas es similar. Lo anterior indica que la galga 1 realiza la medición hasta el valor final de $\epsilon = 0,00049$ mm/mm, mientras la galga 2 mide hasta $\epsilon = 0,00048$ mm/mm.

Las galgas extensiométricas miden menores deformaciones unitarias en comparación con la máquina de ensayo universal, la figura 98 representa de forma gráfica la diferencia entre las curvas del diagrama. Los resultados de las galgas 1 y 2 en la tercera medición se obtiene $\varepsilon = 0,0000078$ mm/mm, mientras la máquina de ensayo universal registra un valor de $\varepsilon = 0,00010$ mm/mm.

Figura 98

Comparación del Diagrama esfuerzo-deformación de las galgas extensiométricas versus la máquina de ensayo universal



Nota. Elaboración propia, 2023.

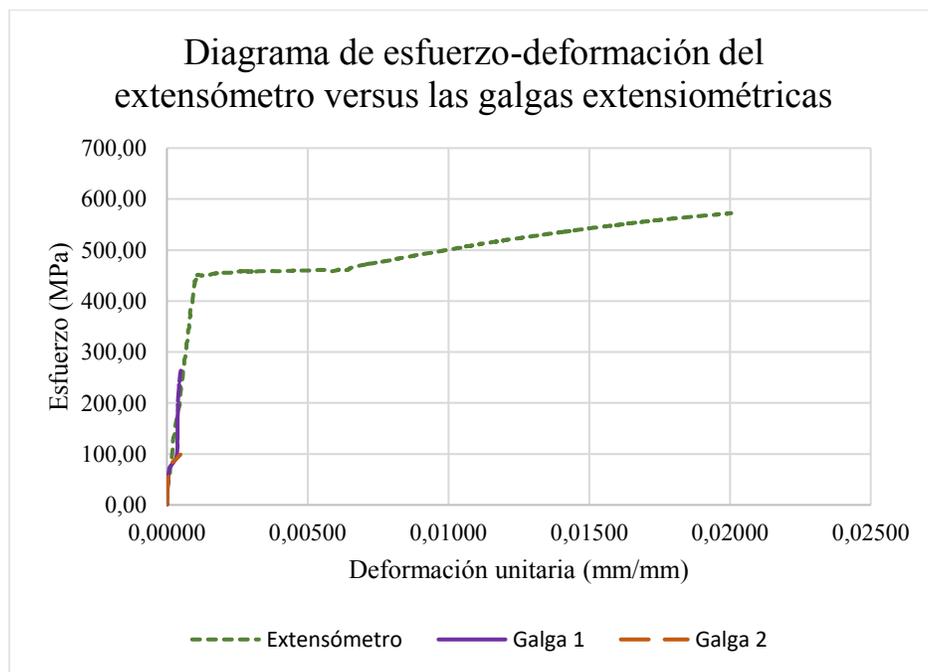
4.1.7 Comparación del extensómetro con las galgas extensiométricas

Anteriormente se menciona que las galgas extensiométricas solamente miden desplazamientos o deformaciones en la región elástica, por esa razón se utiliza el diagrama de esfuerzo-deformación unitaria del extensómetro láser en la región elástica, zona de cedencia y parte de la zona de endurecimiento por deformación, esto se realiza para comprender gráficamente la diferencia entre los instrumentos analizados. Comparando las quintas deformaciones unitarias de la galga 1 $\varepsilon = 0,000032$ mm/mm, galga 2 $\varepsilon = 0,0000296$ mm/mm y el extensómetro láser $\varepsilon = 0,00002$ mm/mm, se observan deformaciones unitarias

con valores muy cercanos. Además, las últimas deformaciones de las galgas y el extensómetro asociado en ese punto presentan valores similares, por esta razón las curvas mantienen un comportamiento similar en la zona elástica del diagrama. Lo mencionado anteriormente establece que las galgas extensiométricas funcional correctamente debido a la similitud de resultados que presentan con el extensómetro.

Figura 99

Comparación del Diagrama esfuerzo-deformación del extensómetro versus las galgas extensiométricas

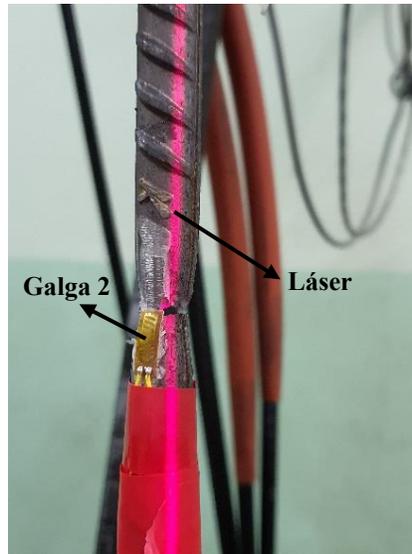


Nota. Elaboración propia, 2023.

La figura 100 muestra la falla de la galga extensiométrica 2 junto al láser del extensómetro midiendo los desplazamientos del ensayo de tracción. Se debe recordar que la varilla #5 falla en el área donde se instala la galga 2, ya que se eliminó la corrugación de la varilla hasta llegar al núcleo, por esa razón la figura 99 muestra la curva de color naranja con menos mediciones de deformaciones unitarias.

Figura 100

Falla de la galga 2 extensiométrica y láser



Nota. Elaboración propia, 2023.

4.2 Resultados del modelo virtual del disipador externo de energía en el Software ANSYS

El modelo virtual del disipador externo de energía genera una serie de resultados, a partir de la aplicación del protocolo de desplazamiento.

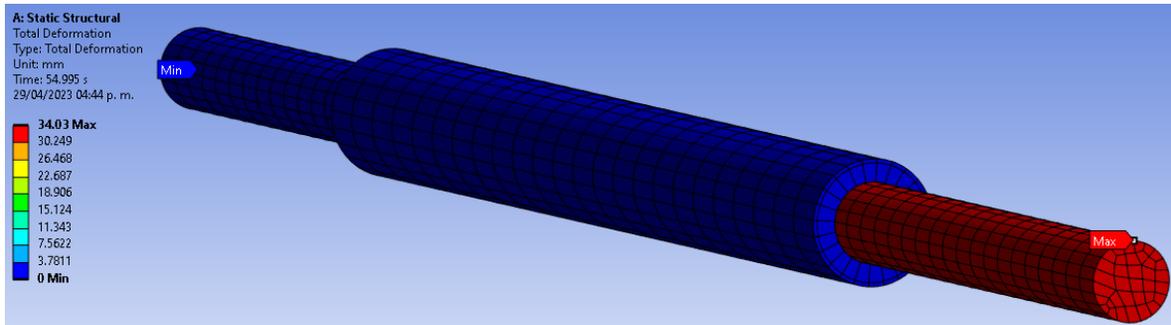
4.2.1 Resultados de la deformación total

Esta es la primera opción para obtener resultados del modelo virtual utilizando el método de elemento finito. El programa crea la deformación que presenta el modelo cuando se aplica una carga axial en tensión o compresión.

El tubo A33 y el mortero Eucofast en este apartado son insignificantes, ya que no presenta deformación en ninguno de sus puntos. En la figura 101 se observa lo mencionado anteriormente, además la deformación mínima se produce en el extremo donde se establece el soporte fijo que simula un empotramiento.

Figura 101

Deformación total del dissipador externo de energía



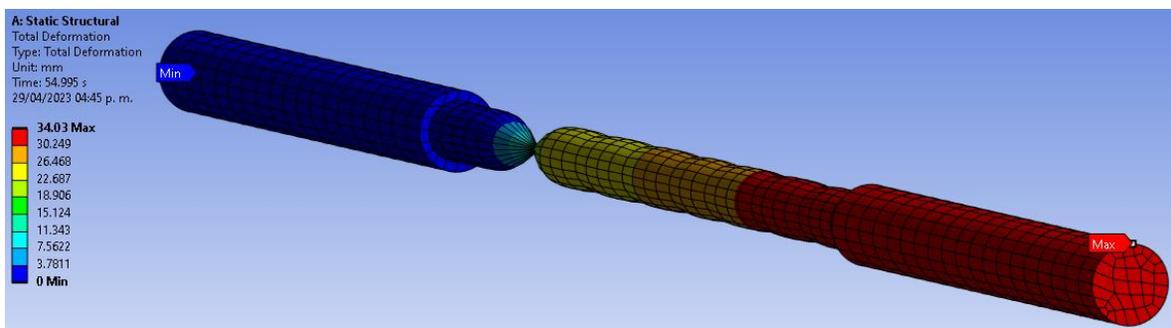
Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

Para la deformación total de la varilla #5 con la reducción se debe recordar que se aplica el protocolo de desplazamiento en el extremo donde se produce deformación máxima. En la figura 102 se observa que las deformaciones máximas ocurren en el extremo y parte de la reducción.

Al aplicar la carga axial en tensión de 60380 N se genera una deformación máxima con un valor de 23,41 mm o 2,341 cm, además se calcula la deformación unitaria en ese punto con un valor de 0,13 mm/mm y un esfuerzo de 534,34 MPa. Los ciclos de carga y descarga producen un alargamiento final (2,341 cm), en la figura 103 se observa la reducción en la sección transversal del área de la reducción de la varilla #5, esto indica que conforme aumenta la carga axial se forma un cuello hasta alcanzar la estricción o fractura.

Figura 102

Deformación total de la varilla #5 con reducción A706



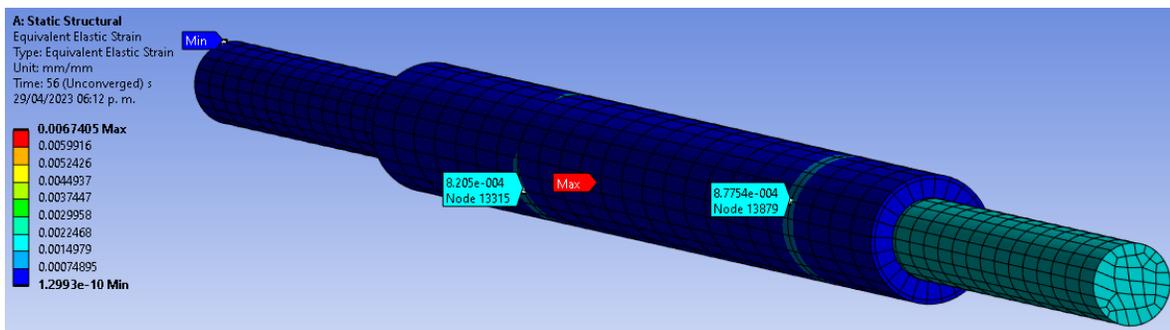
Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

4.2.2 Resultados de la deformación elástica equivalente

Es importante recordar que estas deformaciones se encuentran la región elástica, por ende, si aplicamos una carga y no excede el límite elástico el disipador regresa al estado original. El tubo A33 presenta deformaciones unitarias en el rango elástico con valores de 0,0000 mm/mm hasta 0,00088 mm/mm, en la figura 103 se observan las zonas del tubo A33 donde presenta variaciones de la deformación elástica equivalente.

Figura 103

Deformación elástica equivalente del tubo A33

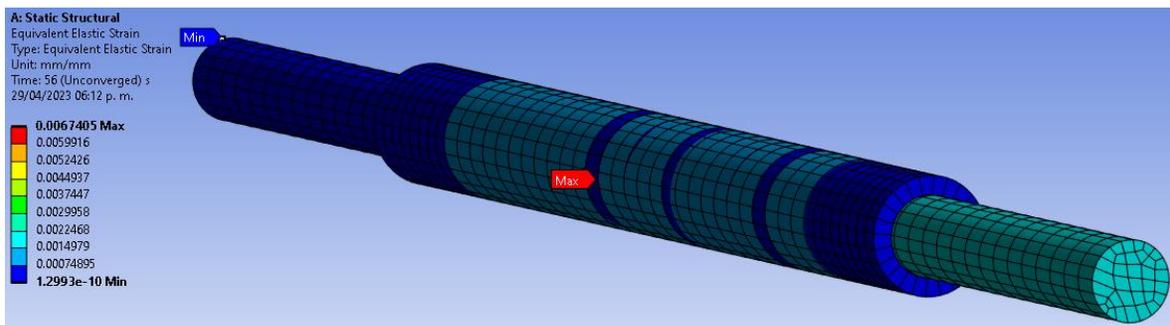


Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

El mortero Eucofast en el modelo virtual del disipador externo de energía considera deformaciones elásticas equivalentes, debido a las cargas en tensión y compresión que alargan y encogen el tubo A33. Esto representa la rigidez de este mortero cuando se somete a las cargas que genera el protocolo de desplazamiento. La figura 104 representa los valores con zonas de cero deformaciones elásticas equivalentes hasta 0,00088 mm/mm.

Figura 104

Deformación elástica equivalente del mortero Eucofast

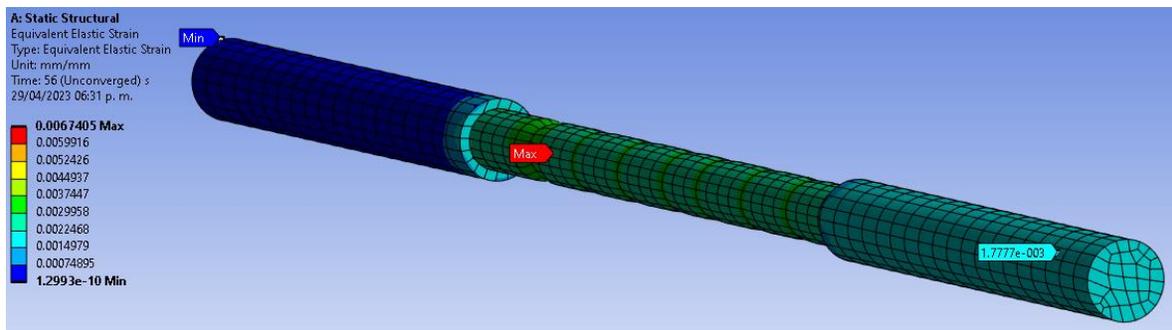


Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

Las mayores deformaciones elásticas equivalentes o unitarias se obtienen en la parte central (reducción) de la varilla #5 donde se establece una menor área, en el extremo que se aplican los desplazamientos se producen deformaciones elásticas equivalentes con valores de 0,00177 mm/mm. La deformación elástica equivalente máxima se encuentra en la parte central de la probeta con un valor de 0,0022 mm/mm hasta 0,0037 mm/mm. El extremo donde se localiza el soporte fijo del dissipador no calcula deformaciones elásticas equivalentes debido a la restricción que presenta para desplazarse o alargarse con las fuerzas axiales de tensión.

Figura 105

Deformaciones elásticas equivalentes en la varilla #5 con la reducción



Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

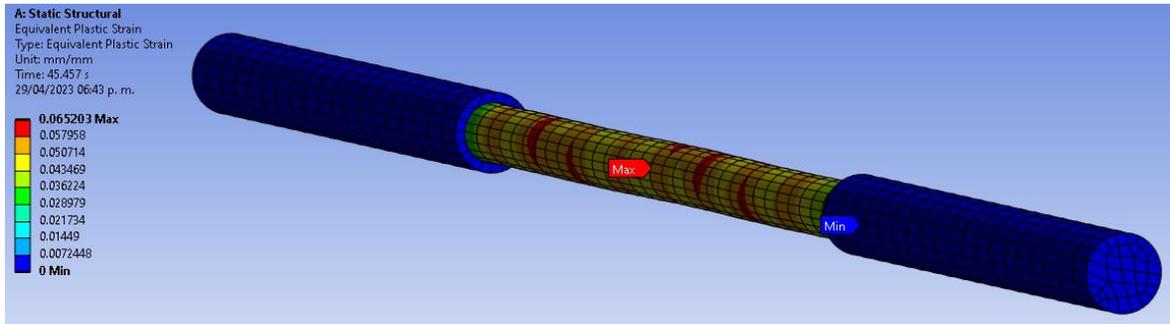
4.2.3 Resultados de la deformación plástica equivalente

El dissipador externo de energía se construye con una reducción en la parte central para crear un modelo elastoplástico, al tener menor área en la reducción los esfuerzos se concentran en esta zona. En la zona central el dissipador externo disipa la mayor energía producida por el protocolo de desplazamiento que genera cargas axiales en tensión y compresión. Las curvas de histéresis se concentran en la parte central del dissipador, ya que permite formar varios ciclos disipativos antes de llegar a la falla. La figura 106 muestra lo mencionado anteriormente los extremos no presentan valores de deformación plástica equivalente solamente la parte central, el valor máximo de la deformación plástica equivalente en la zona central es de 0,065 mm/mm.

El mortero Eucofast no plastifica por esta razón presenta un valor de cero en la deformación plástica equivalente, además el tubo A33 al estar pegado con el mortero Eucofast tampoco plastifica.

Figura 106

Deformaciones plásticas equivalentes en la varilla #5 con la reducción



Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

4.2.4 Resultados del esfuerzo equivalente

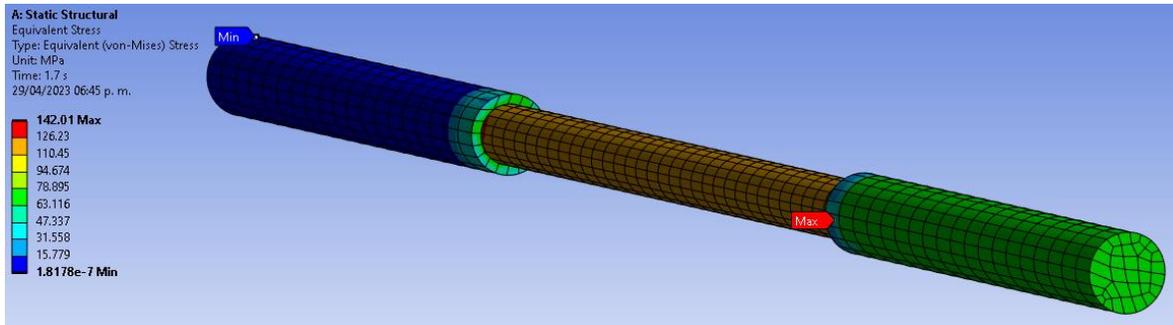
El esfuerzo equivalente se establece como una fuerza o carga axial que se aplica por unidad de área, esto indica que los esfuerzos con mayor determinación en el dissipador externo de energía se concentran en la zona central (reducción) y el extremo donde se aplican el protocolo de desplazamiento. Para obtener los esfuerzos equivalentes se utiliza el criterio de Von-Mises visto en el capítulo 2 del presente trabajo de investigación.

El tubo A33 y el mortero Eucofast no consideran esfuerzos equivalentes, se obtienen valores de 0,0000 MPa.

El valor del esfuerzo equivalente para la zona central de la varilla #5 es de 126,23 MPa y el extremo donde se aplica el protocolo de desplazamiento presenta un rango entre 15,78 MPa y 63,12 MPa. Además, el esfuerzo máximo equivalente se genera entre la reducción y los extremos con un valor de 142,01 MPa, esto se debe al cambio de sección transversal o diferencia de diámetros que presenta la geometría de la varilla #5 del dissipador externo de energía. En el extremo donde se coloca el soporte fijo (color azul) que se visualiza en la figura 107 el valor es cero, pero entre ese extremo (soporte fijo) y la reducción se concentran esfuerzos equivalentes con el rango de valores del otro extremo donde se aplican los desplazamientos. En la figura 107 se visualiza la mayor cantidad de esfuerzos en la zona central de la varilla #5 con la reducción.

Figura 107

Esfuerzo equivalente de la probeta de la varilla #5



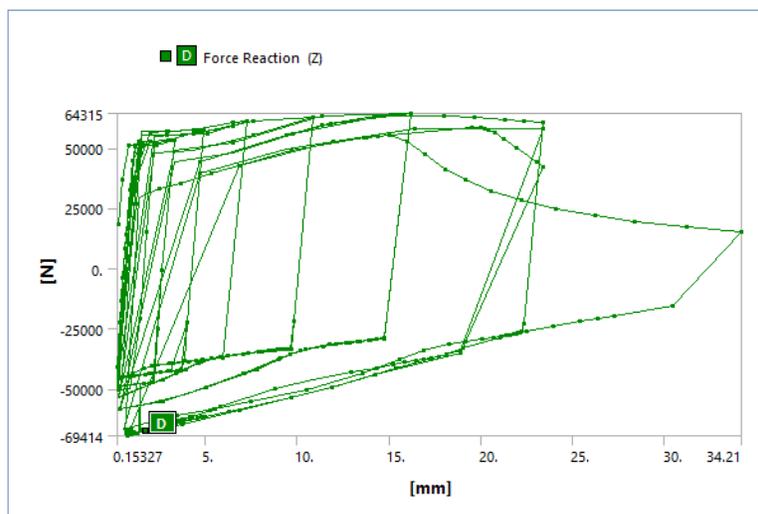
Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

4.2.5 Resultados del gráfico fuerza versus desplazamiento (curvas de histéresis)

En el Software ANSYS se configuran los resultados de la deformación total versus la fuerza de reacción para crear el gráfico de la figura 108, esto genera las curvas de histéresis. El disipador externo de energía después de fallar en tensión el Software ANSYS considera fuerzas en el sentido de la compresión, esto se debe al choque de las dos partes de la varilla #5 con la reducción que fallan. Lo anterior indica que el Software trata de unir las dos reducciones donde se presentó la estricción o falla, además el núcleo (tubo A33 y el mortero Eucofast) considera estas fuerzas negativas, ya que no presenta ninguna restricción.

Figura 108

Curvas de histéresis del modelo virtual de ANSYS



Nota. Elaboración propia en el Software ANSYS Workbench, 2023.

Se realiza la conversión de fuerza a esfuerzo y deformación total a deformación unitaria. Para mantener las curvas de histéresis como esfuerzo versus deformación unitaria.

Analizando los resultados obtenidos del protocolo de desplazamiento en tensión de la figura 110 del disipador externo (modelo virtual), se obtiene un valor máximo del esfuerzo 569,16 MPa con una deformación unitaria de 0,13 mm/mm.

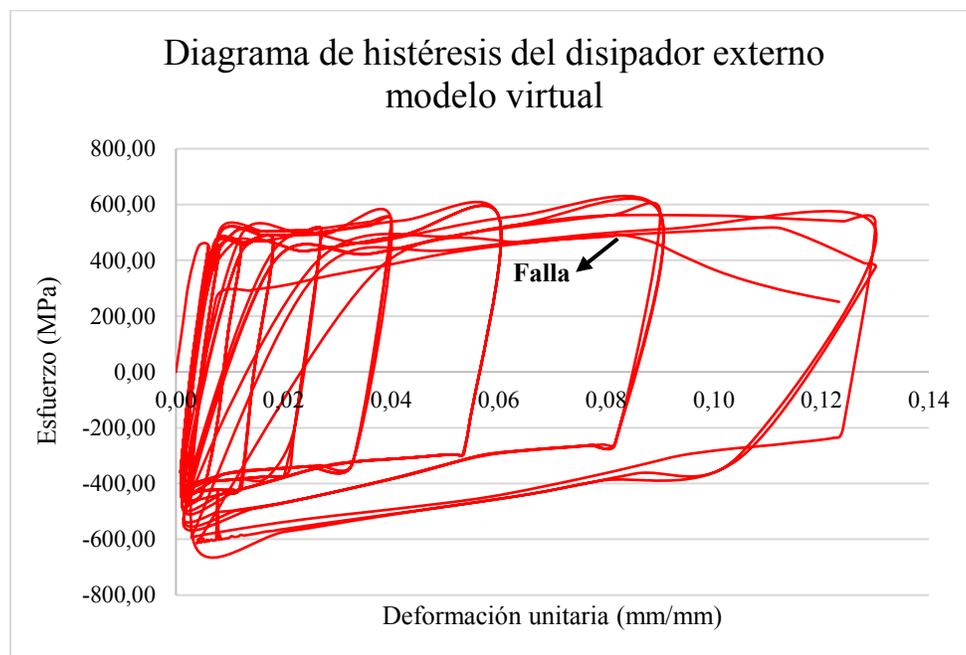
El modelo virtual en la descarga o fuerzas axiales en compresión presenta un valor de -609,82 MPa y una deformación unitaria mínima de 0,0009 mm/mm.

Anteriormente se explica que el modelo virtual del disipador externo de energía considera fuerzas en compresión después de ocurrir la falla en tensión, en la figura 109 no se consideran las fuerzas después de ocurrir la estricción. Para representar la falla se utilizan ciertos puntos que forman la curva decreciente.

La falla del modelo virtual se presenta en el esfuerzo de 516,19 MPa y con una deformación unitaria de 0,11 mm/mm. Es importante analizar que la falla se presenta en el sentido de la tracción o tensión.

Figura 109

Curvas de histéresis del modelo virtual del disipador externo



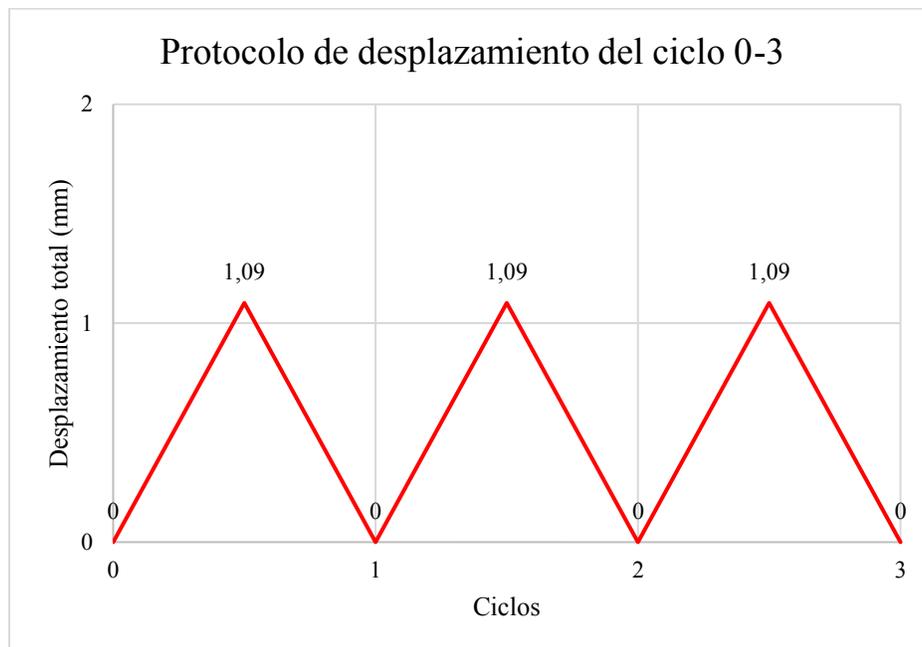
Nota. Elaboración propia, 2023.

4.3 Resultados del disipador externo de energía ensayado en el laboratorio

Para el ensayo del disipador externo de energía en los primeros 3 ciclos de carga y descarga que se observan en la figura 110 se aplica el desplazamiento de 1,09 mm, esto genera las curvas de histéresis de la figura 103. Se debe analizar la parte de la reducción de 180 mm o 18 cm de longitud con el área de 113 mm² o 1,13 cm².

Figura 110

Protocolo de desplazamiento del ciclo 0-3



Nota. Elaboración propia, 2023.

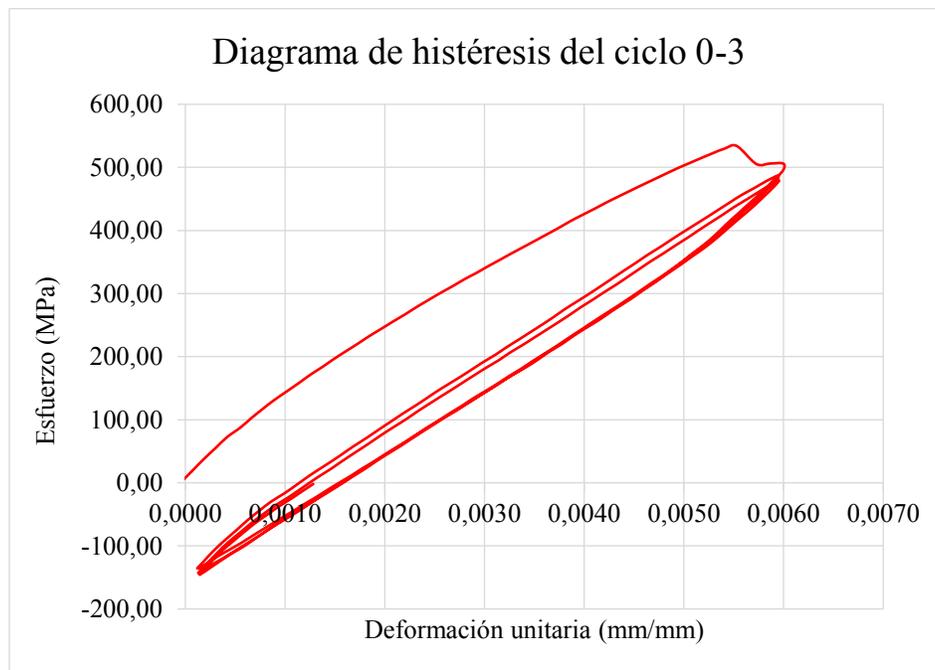
En el primer ciclo se reporta una carga máxima en tensión de 60331,95 N con un desplazamiento de 1,00 mm, dividiendo la fuerza máxima entre el área de la reducción se obtiene el esfuerzo máximo en tracción del ciclo 1 con un valor de 533,91 MPa, y dividiendo el desplazamiento entre la longitud de la reducción se calcula la deformación unitaria asociada al esfuerzo máximo con 0,0055 mm/mm. A partir del primer ciclo el disipador externo se encuentra en la zona de cedencia, esto quiere decir que presenta una deformación residual o permanente y no regresa al estado original (Región elástica).

Para el ciclo 1 en la descarga se obtiene una carga máxima en compresión con el valor de -15347,46 N y un desplazamiento de 0,02 mm. Realizando la conversión vista anteriormente se obtiene un esfuerzo máximo de -135,82 MPa y una deformación unitaria de

0,0001 mm/mm. Además, analizando la figura 111 se observa que los primeros 3 ciclos en compresión no llegan a la deformación unitaria de cero, pero se mantienen cerca de este valor. Esto se debe a la deformación residual generada en la carga (tensión), ya que al comprimirse el disipador la deformación unitaria se localiza en la zona de cendencia, por lo tanto, no regresa a la deformación unitaria de cero en la región elástica.

Figura 111

Resultados de las curvas de histéresis del ciclo 0-3



Nota. Elaboración propia, 2023.

Las curvas de histéresis finales generadas por el protocolo de desplazamiento al disipador de energía se observan en la figura 112, el esfuerzo máxima en tensión aplicado al disipador externo de energía muestra un valor de 631,82 MPa con una deformación unitaria máxima de 0,13 mm/mm, además el esfuerzo máximo obtenido en el sentido de la compresión es de -737,40 MPa con una deformación unitaria de 0,0001 mm/mm.

Analizando los resultados de las curvas de histerésis se observa que la curva que se volvió a cargar presenta un mayor alargamiento que la curva del comienzo, en este caso se visualiza en la figura 112 el alargamiento que presenta el disipador conforme incrementa el desplazamiento y la deformación residual acumulada por cada ciclo. Lo anterior es

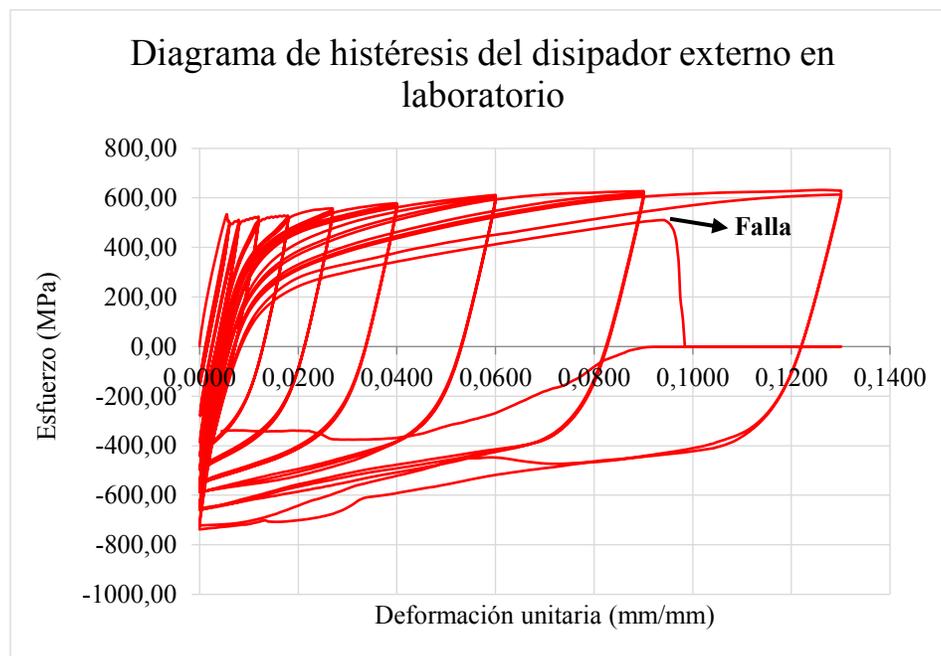
ocasionado por el aumento de carga axial que sobrepasa la región elástica hasta alcanzar la zona de cedencia o la zona de endurecimiento por deformación del disipador externo.

La falla del disipador externo de energía se presenta entre los ciclos 26 y 26,5 vistos en el protocolo de desplazamiento, el último desplazamiento registrado antes que ocurra la falla en el sentido de la tensión es de 23,41 mm o 2,341 cm. Para la curva de histéresis decreciente donde ocurre la falla el esfuerzo último en tracción es de 510,30 MPa con una deformación unitaria de 0,0940 mm/mm. La máquina de ensayo universal registra un desplazamiento de 16,93 mm y una fuerza axial de 57663,90 N en el punto de falla.

El disipador externo de energía al estar sometido a grandes cambios cíclicos de carga creando la deformación plástica, este presenta una capacidad para disipar energía alta.

Figura 112

Curvas de histéresis del disipador externo



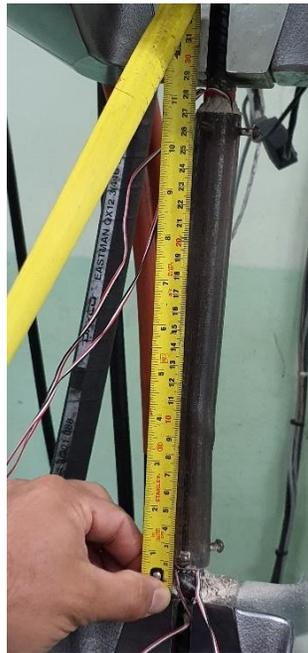
Nota. Elaboración propia, 2023.

Se debe recordar que la longitud inicial del disipador externo de energía es 45 cm, sin embargo, las mordazas de la máquina de ensayo universal presan el disipador en los extremos eliminando 9 cm de cada extremo. En total la longitud inicial del disipador es 27 cm.

En la figura 113 se observa el alargamiento final producido por los ciclos de tensión (desplazamientos) que recibe el dissipador con un valor de 29,3 cm. Por lo tanto, el dissipador se alarga 2,3 cm producto de los desplazamientos aplicados. Además, la máquina de ensayo universal registra en el último ciclo un desplazamiento de 23,42 mm o 2,342 cm.

Figura 113

Alargamiento final del dissipador externo de energía



Nota. Elaboración propia, 2023.

El mortero Eucofast genera la suficiente rigidez al núcleo, pero este se desprende del tubo A33 de sección circular, esto se debe a la tensión aplicada en los ciclos de carga realizados al dissipador externo. La parafina cumple la función de eliminar la transferencia de esfuerzos creando una fricción con un coeficiente menor entre materiales, debido a esto parte del mortero Eucofast sale del núcleo, y la reducción de la varilla #5 se desliza fácilmente con el mortero y el tubo cuando se somete a tracción. En la figura 114 se visualiza el mortero Eucofast sobre la mordaza de la máquina de ensayo universal, además se observa el dissipador externo desplazado debido a la fuerza axial en tensión.

Figura 114

Mortero Eucofast con fuerza axial en tensión



Nota. Elaboración propia, 2023.

El tubo A33 de sección circular al ser uno de los materiales más importante del disipador externo cumple la función principal de evitar el pandeo lateral cuando se somete a ciclos de descarga o fuerzas axiales en compresión, es importante mencionar que el núcleo al estar conformado por el tubo A33 y mortero Eucofast generan más capacidad para resistir el pandeo local y no permitir que falle por pandeo global todo el disipador externo.

En la figura 115 se observa la falla por compresión (aplastamiento), lo anterior genera que el tubo A33 se “hinche” o aumente el volumen lateralmente. Esta falla del tubo ocurre cerca de la morzada que esta fija y no genera ningún tipo de fuerza axial. Para el caso del tubo se cumple la relación de Poisson, este se deforma con la fuerza axial en tensión, pero no sólo se alarga sino que se contrae o hincha lateralmente al comprimirse por los ciclos de descarga. Lo anterior se observa en el círculo de color rojo que indica la falla del tubo al recibir las fuerzas axiales de compresión.

Las curvas de histéresis en el sentido de la compresión o ciclos de descarga se analiza un efecto Bauschinger, este indica que no se observa un punto de cedencia claro o bien definido.

Figura 115

Falla del tubo A33



Nota. Elaboración propia, 2023.

La falla que presenta el disipador externo de energía en la reducción de la parte central se debe a la cantidad de ciclos en tracción y compresión aplicados, esto se nombra como fatiga. Anteriormente se menciona que el disipador acumula una deformación residual hasta alcanzar la falla o fractura en la parte central.

En la figura 116 se observa la falla debido al desplazamiento en tracción que presenta el disipador externo de energía, además se visualiza la deformación total en compresión y tensión ejercida. Es importante mencionar que la varilla #5 con la reducción presenta una deformación por compresión significativa, por lo tanto, el tubo A33 y el mortero Eucofast ayudan a evitar el pandeo local de la reducción.

El disipador externo de energía plastifica la reducción de la varilla #5, debido a que presenta una menor área, generando un modelo elastoplástico en ese punto. Analizando la

figura 116 se observa que los extremos presentan una deformación relativamente pequeña en comparación con la parte central del disipador externo (reducción de varilla #5). La reducción de la varilla #5 se desplazó 2,341 cm, por esta razón la deformación de la figura 117 es notable.

Figura 116

Falla principal del disipador externo de energía



Nota. Elaboración propia, 2023.

4.3.1 Resultados de las galgas extensiométricas en las curvas de histéresis

En el capítulo 3 se menciona que se instalan cuatro galgas extensiométricas en la parte central sentidos opuestos del disipador externo de energía (reducción). Después de verter el mortero Eucofast dentro del tubo A33 la galga 4 se daña debido a la humedad que presenta dentro del núcleo. Además, la galga 2 crea registros del desplazamiento, pero los datos no generan una curva de histéresis experimental, por esta razón no se añade en la figura 117.

Las galgas extensiométricas 1 y 3 registran desplazamientos, esto se debe al protocolo de desplazamiento aplicado que genera carga axial en tensión y compresión. Además, las galgas presentan poca lectura de las curvas de histéresis. La galga 3 registra deformaciones

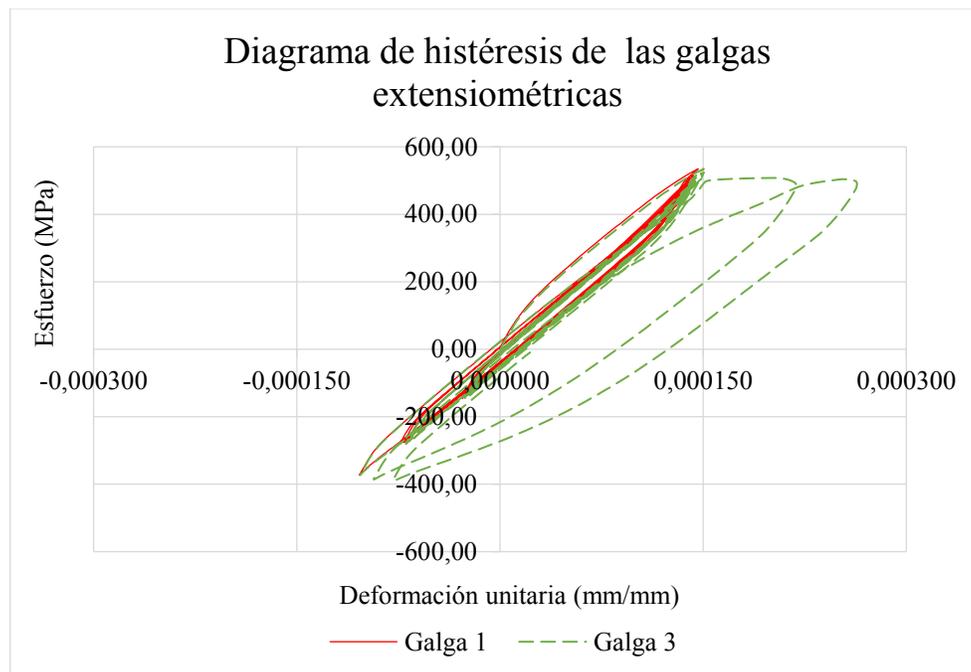
o desplazamientos en la zona de cendencia o plastificación, pero no se obtiene continuidad con las curvas de histéresis que registra la máquina de ensayo universal.

En la figura 117 se observa el diagrama de histéresis o curvas de histéresis que se conforma por los esfuerzos obtenidos del ensayo del disipador con la máquina universal, estos se grafican con la deformación unitaria obtenida de las galgas. El valor del esfuerzo máximo en tensión que registra la galga 1 es de 529,75 MPa con una deformación unitaria de 0,000144 mm/mm. El esfuerzo máximo en tracción de la galga 3 es de 521,22 MPa con una deformación unitaria de 0,000150 mm/mm.

La deformación unitaria máxima en la galga 1 en el sentido de la compresión presenta un valor de -0,000104 mm/mm y un esfuerzo de -373,09 MPa. La galga 3 en el sentido de la descarga registra un valor de -389,46 MPa y una deformación unitaria o equivalente de -0,000078 mm/mm.

Figura 117

Curvas de histéresis obtenidas con las galgas extensiométricas



Nota. Elaboración propia, 2023.

La figura 119 representa gráficamente los resultados obtenidos en la prueba de laboratorio con una línea sólida roja y el modelo virtual realizado en ANSYS con una línea discontinua de color negro, ambos presentan conductas similares con las curvas de histéresis. Las curvas de histéresis en el sentido de la tensión presentan un comportamiento similar, pero en el sentido de la compresión se notan pequeñas variaciones, sin embargo, los resultados de la prueba del laboratorio y el modelo virtual muestran valores similares.

Analizando las curvas de histéresis el modelo virtual en los últimos ciclos presenta menor rigidez que la prueba realiza en el laboratorio. Antes de la falla del modelo virtual la penúltima curva decrece antes de alcanzar la zona de cedencia, por lo tanto, presenta variaciones cuando se aplican las cargas axiales en compresión, la curva disminuye el valor de la deformación unitaria y el esfuerzo. Los resultados del modelo virtual utilizando el método de elemento finito son menos precisos en comparación con la prueba realizada en el laboratorio, lo anterior indica que los resultados del modelo virtual son válidos, pero los resultados muestran pequeñas diferencias.

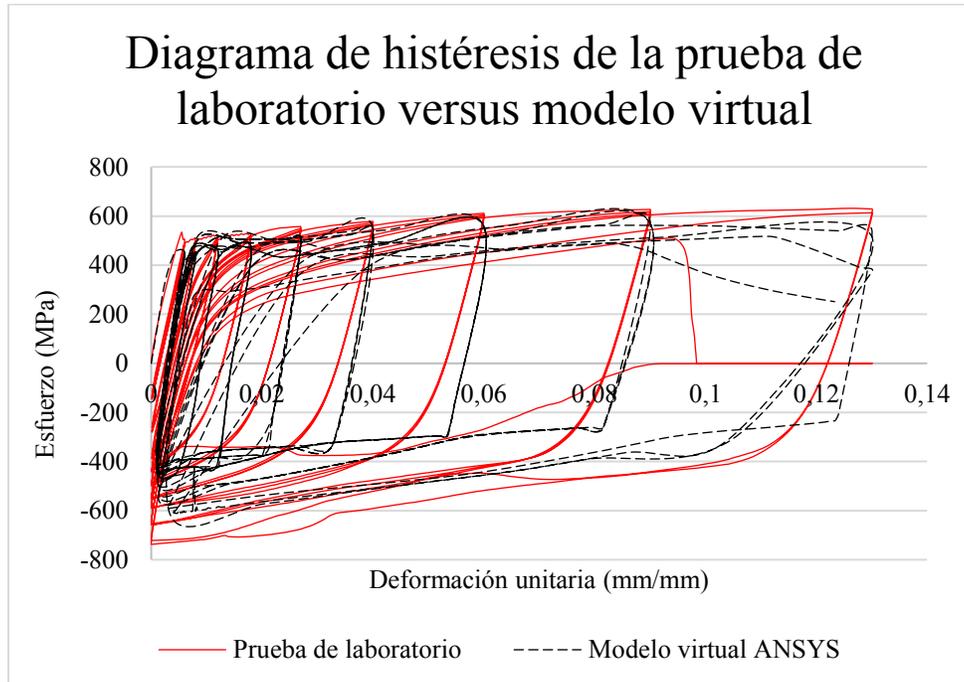
La falla del modelo virtual ocurre antes de la prueba de laboratorio, numéricamente el esfuerzo último del modelo virtual presenta el valor de 516,19 MPa con una deformación unitaria de 0,11 mm/mm. Mientras la prueba de laboratorio falla con un esfuerzo final de 510,30 MPa asociado a la deformación unitaria de 0,0940 mm/mm. Lo anterior indica que la curva de histéresis que muestra falla del modelo virtual presenta mayor esfuerzo y deformación que la prueba realizada en el laboratorio.

El disipador externo de energía en la prueba y modelo presenta la capacidad de disipar energía cuando se somete al protocolo de desplazamiento aplicado, las curvas de histéresis en la figura 119 demuestran que el disipador al someterse a grandes cambios cíclicos de carga axial en la zona inelástica este disipa energía antes de presentar la falla, esto indica que es la energía requerida para deformar plásticamente la prueba realiza en el laboratorio y el modelo virtual generado en el Software ANSYS.

La falla del disipador externo de energía para la prueba de laboratorio y el modelo virtual ocurren entre los ciclos 26 y 26,5 vistos en el protocolo de desplazamiento. Anteriormente se indica que la falla del modelo ocurre antes de la prueba, pero ambos fallan en el intervalo de ciclos mencionado, además es notable que presenta la misma curva de histéresis conforme incrementa la carga axial hasta lograr la falla.

Figura 119

Curvas de histéresis de la prueba de laboratorio versus modelo virtual ANSYS



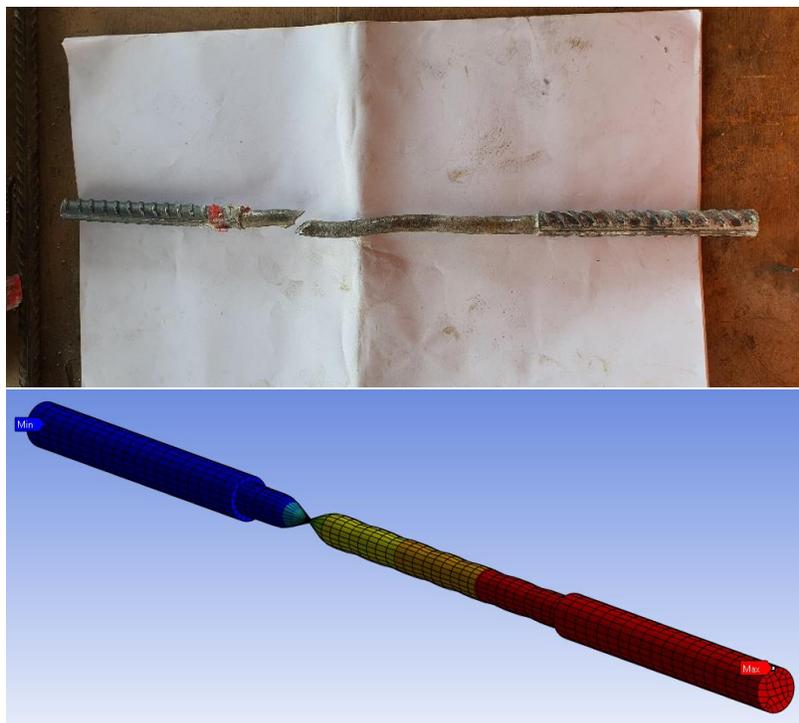
Nota. Elaboración propia, 2023.

La figura 120 muestra la comparación de fallas que presenta la prueba realizada en laboratorio y el modelo virtual, ambas producen la falla en el mismo punto. El dissipador externo de energía plástica en la parte central donde se localiza menor área o diámetro, generando un modelo elastoplástico en esta zona. Los extremos de la varilla #5 A706 en la prueba y el modelo presentan una deformación pequeña en los extremos, esto indica que la mayor energía disipada se produce en la zona central (reducción).

La deformación o desplazamiento máximo que registra la máquina de ensayo universal es de 2,342 cm y el modelo virtual 2,341 cm, esto indica que el %error es de 0,04%, por lo tanto el modelo cumple las mismas condiciones que la prueba del laboratorio. Lo anterior es notable en la figura 120, ya que se presenta la falla en el mismo punto o área producto del protocolo de desplazamiento aplicado.

Figura 120

Comparación de fallas de la prueba de laboratorio y el modelo virtual ANSYS



Nota. Elaboración propia, 2023.

Conclusiones

Se determina que la varilla #5 A706 al ser sometida al ensayo de tracción utilizando la norma ASTM A370, esto permite obtener las propiedades mecánicas aceptables de la misma, además establecer puntos específicos en el diagrama esfuerzo-deformación unitaria como el límite proporcional, esfuerzo de fluencia, deformación unitaria esperada, punto de fluencia, esfuerzo último, deformación unitaria última, esfuerzo de fractura y deformación unitaria de fractura, no obstante, los datos del diagrama al ser correctos se ingresan en el modelo virtual del disipador externo de energía.

Se demuestra que las galgas extensiométricas al compararse con la máquina de ensayo universal solamente miden desplazamientos en la zona elástica de la varilla #5 A706 con porcentajes de error de 92,2% con respecto a las deformaciones unitarias últimas, lo anterior indica que las galgas miden un punto específico mientras la máquina de ensayo universal registra los datos de desplazamientos en la longitud total de la varilla, por lo tanto, las galgas no registran desplazamientos en la zona de cedencia (plastificación) del material. Además, la varilla #5 A706 falla en el área donde se coloca la galga 2, por esa razón el registro de datos es menor.

El tubo A33 y el mortero Eucofast en el modelo virtual no presenta deformación total cuando se somete al protocolo de desplazamiento, pero la reducción de la varilla #5 grado 60 muestra la deformación máxima con un valor de 2,341 cm donde se produce la falla por estricción debido a las cargas axiales en tensión aplicadas.

Se obtiene en el modelo virtual que conforme incrementa la carga axial en tensión el tubo A33 presenta deformaciones elásticas unitarias o equivalentes, además el mortero Eucofast al estar completamente pegado al tubo de sección circular este tiende a “alargarse” y “encogerse” presentando deformaciones en el rango elástico, se ha observado que las mayores deformaciones elásticas equivalentes se obtienen en la parte central de la reducción de la varilla #5 A706, sin embargo, el extremo donde se aplican los desplazamientos presenta deformaciones elásticas equivalentes significativas, y el extremo que mantiene el soporte fijo no presenta ningún tipo de deformación elástica unitaria.

El modelo virtual del disipador externo de energía es elastoplástico debido a la concentración de deformaciones plásticas equivalentes que presenta la reducción (parte central) de la varilla #5 A706, además los extremos de la varilla #5, el tubo A33 y el mortero

Eucofast no muestran deformaciones en la zona de cendencia o plastificación. Asimismo, la concentración de esfuerzos equivalentes se establece en la zona central de la varilla #5 y el extremo donde se aplican los desplazamientos.

Se ha logrado comprobar que el disipador externo de energía al construirse con la varilla #5 A706 con la reducción en la parte central, el tubo A33 con sección circular y el mortero Eucofast, estos materiales permiten obtener un comportamiento histerético correcto para disipar energía, además se pueden instalar en estructuras de alta ductilidad.

La relación de esfuerzo-deformación unitaria por medio de las curvas de histéresis obtenidas en la prueba de laboratorio que se generan por el protocolo de desplazamiento aplicado al disipador externo de energía, permitiendo obtener un comportamiento elastoplástico correcto en parte central (reducción) de la varilla #5. Además, el disipador externo de energía en la prueba de laboratorio demuestra que conforme incrementa la carga axial en tensión y compresión, este acumula deformaciones residuales hasta alcanzar un alargamiento final de 2,342 cm.

Se demuestra que el tubo A33 y el mortero Eucofast evitan el pandeo lateral cuando el disipador externo se somete a cargas axiales en compresión, sin embargo, el daño por aplastamiento genera al tubo A33 produce que este se “hinche” o acumule el volumen del mortero lateralmente.

Las galgas extensiométricas insertadas en la parte central del disipador externo registran desplazamientos en la región elástica con porcentajes de error de 4,16% entre estas, sin embargo, la galga 3 mide deformaciones en la zona de cendencia o plastificación, pero no continúan el mismo comportamiento de las curvas de histéresis generadas por la máquina de ensayo universal esto se debe al pegamento utilizado, ya que es rígido y no flexible. Lo anterior indica que las galgas extensiométricas no funcionan para analizar alta plastificación del disipador externo de energía.

Se ha realizado la comprobación del modelo virtual del disipador externo de energía utilizando el Software ANSYS, obteniendo curvas de histéresis similares debido a los gráficos bilineales con respecto a la prueba realiza en el laboratorio, además se obtiene un valor similar de la deformación máxima con un porcentaje de error del 0,04% entre ambas pruebas, por lo tanto, el Software ANSYS simula de forma efectiva la prueba de laboratorio del disipador externo de energía utilizando el método de elemento finito. Lo anterior indica

que se pueden simular modelos virtuales utilizando otro tipo de calibre de varilla, tubo e incluso mortero.

La comparación de los esfuerzos últimos en tensión del modelo virtual y la prueba en laboratorio presentan un comportamiento similar con un porcentaje de error del 1,15%, pero en compresión el modelo virtual presenta variaciones, esto se debe a las propiedades mecánicas extraídas de SAP2000 del tubo A33 y el mortero Eucofast, ya que no se realizaron pruebas para obtener propiedades mecánicas de estos 2 materiales.

Se obtuvieron curvas de histéresis del modelo virtual con valores similares a la prueba realizada en el laboratorio, permitiendo demostrar que este dispositivo tiene la capacidad de disipar energía, por lo tanto, es factible implementarlos en estructuras de concreto prefabricado para reducir el daño estructural en vigas, columnas y placas, además que son reemplazables permitiendo desmontar y realizar el cambio por uno nuevo en un menor tiempo.

Recomendaciones

Para próximos modelos virtuales del disipador externo de energía se debe considerar la conexión entre el disipador y viga-columna o columna placa.

Se recomienda analizar disipadores externos de energía con varilla #6, #7 e incluso #8 con el mismo modelo virtual, también se sugiere utilizar un tubo circular con mayor grado, inercia y longitud, además se puede variar el mortero expansivo, así como un material antiadherente, por ejemplo: implementar grasa.

Desarrollar el mecanismo de conexión teórica y/o experimentalmente entre el disipador externo de energía y los elementos prefabricados, en otras palabras, se debe investigar el aporte que genera el disipador externo en temas de capacidad a la conexión de las estructuras de concreto prefabricado.

Se recomienda evaluar el sistema de instalación de las galgas extensiométricas, entre estos el pegamento, la marca de la galga, el material de protección, para mejorar el comportamiento.

Referencias

- 3M. (s.f). *Cinta Delimitadora Scotch 471*. Obtenido de
<https://multimedia.3m.com/mws/media/1567750/cinta-471.PDF>
- Alzate Rodríguez, E. J., Montes Ocampo, J. W., & Silva Ortega, C. A. (2007). *Medidores de deformaciones por resistencia: Galgas extensiométricas*. Obtenido de Universidad Tecnológica de Pereira:
<https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/5519>
- ANSYS Workbench. (2023). *ANSYS*. Obtenido de
<https://www.ansys.com/academic/students>
- Avecillas, J. (2015). *Análisis de factibilidad de la implementación de riostras de pandeo restringido como dispositivos disipadores de energía* [Tesis de licenciatura, Universidad de Cuenca]. Obtenido de
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/21672>
- Bavaresco, G. (s.f). *Torno*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/doc/204948769/Torno#>
- Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2010). *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill Education.
- Beer, F., Johnston, R., DeWolf, J., & Mazurek, D. (2017). *Mecánica de materiales*. McGraw-Hill Education.
- Boehm, Y. (2022). *Modelado no lineal de un disipador de energía sísmica de tipo histerético de origen mexicano*. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Ciudad de México.
 doi:<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/RepoFi/17926>
- Briceño, G. (8 de noviembre de 2022). *Ductilidad*. Obtenido de Euston96:
<https://www.euston96.com/ductilidad/>
- Bruneau, M., Uang, C., & Sabelli, R. (2011). *Ductile Desing of Steel Structures* . McGraw-Hili Companies.
- Cancelado, R. (2012). *Caracterización mecánica y modelamiento estructural de un disipador pasivo de energía de tipo arriostramiento de pandeo restringido. Parte 1*. [Tesis de Magister, Universidad Nacional de Colombia]. Bogotá.
 doi:<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7920>

- Cattanach, A., & Pampanin, S. (2008). *Prefabricados del siglo XXI: el detalle y la fabricación del primer edificio PRESSS de varios pisos de Nueva Zelanda*. NZ Concrete Industry Conference, Rotorua.
- Código Sísmico de Costa Rica . (2010). Colegio Federado de Ingenieros y de Arquitectos de Costa Rica. Costa Rica, Costa Rica: Tecnológica de Costa Rica.
- Dunn, K. (2021). *Comportamiento de estructuras con dispositivos antisísmicos* [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña]. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2117/346189>
- Ensayo a compresión de una varilla maciza de sección circular*. (3 de diciembre de 2017). Obtenido de Resistencia de los Materiales: http://rdlm2-2017.blogspot.com/p/blog-page_2.html
- Euclid Chemical. (2023). *Eucofast: Mortero de muy rápido fraguado para parcheo y reparación*. Obtenido de Euclid Chemical: <https://www.toxement.com.co/productos/portafolio-productos/reparaci%C3%B3n-de-placas-y-pavimentos-de-concreto/morteros-de-reparaci%C3%B3n-cementicios/?prodId=1678>
- Ferrari, D. (2018). *Cálculo de esfuerzos y deformaciones mediante método de elemento finito empleando el programa AUTOFEM®* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].
doi:https://ru.dgb.unam.mx/handle/DGB_UNAM/TES01000786517
- González, R. (2015). *Ensaye y gráficas esfuerzo-deformación de los materiales*. Obtenido de Academia: https://www.academia.edu/20231111/M%C3%A1quina_de_Ensaye
- Guirao Salmán, A. K. (2020). *Análisis experimental de deformaciones mediante video-extensometría* [Tesis de licenciatura, Universidad Politécnica de Cartagena]. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10317/8931>
- HBM. (2020). *¿Cómo funciona una galga extensométrica eléctrica?* Obtenido de HBM: <https://www.hbm.com/es/7328/como-funciona-una-galga-extensometrica-electrica/>
- Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill.
- Hibbeler, R. (2006). *Mecánica de materiales*. Pearson .

- Idrovo Urgiles, P. X., & Quintanilla Molina, L. M. (2010). *Aplicación de galgas extensiométricas en el laboratorio de mecánica de materiales de la carrera de Ingeniería Mecánica para la obtención de deformaciones en elementos sometidos a cargas combinadas* [Tesis de licenciatura, Universidad de Cuenca]. Obtenido de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/4482>
- INTACO. (2020). *Morteros expansivos y de inyección*. Obtenido de INTACO: <https://www.intaco.com/costa-rica/morteros-expansivos-y-de-inyeccion/>
- INTACO. (16 de julio de 2021). *Espuma de polietileno moldeada para juntas de expansión o de control*. Obtenido de https://www.intaco.com/costa-rica/wp-content/uploads/sites/2/2020/10/ft_backer_rod.pdf
- Jiménez, Á. (2015). *Comportamiento de un dispositivo disipador de energía por extrusión de plomo en edificaciones de concreto armado y acero*. [Tesis de licenciatura, Universidad Central de Venezuela]. Caracas. doi:<http://hdl.handle.net/10872/13591>
- Learnchannel-TV.com. (2022). *Puente de Wheatstone con galgas extensiométricas*. Obtenido de Learnchannel-TV.com: <https://learnchannel-tv.com/es/tecnologia-de-sensores/puente-de-wheatstone/puente-de-wheatstone-con-galga-extensometrica/>
- León, L. (2016). *Disipadores y aisladores, modelo de puente vehicular con disipadores y sin disipadores de energía, comparación de la respuesta Sísmica* [Tesis de licenciatura, Universidad Católica de Colombia]. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10983/13931>
- Limas, M. J. (2018). Dossier de resistencia de materiales I. *Universidad de las Regiones Autónomas de la Costa Caribe Nicaragüense (URACCAN)*. Obtenido de <https://repositoriosiidca.csuca.org/Record/RepoURACCAN574>
- Lorenzo, M., González, B., Matos, J., Aguado, L., Kharin, V., & Toribio, J. (2009). *Análisis del efecto Bauschinger en aceros de alta resistencia*. Obtenido de [Academi.edu: https://www.academia.edu/37492466/AN%C3%81LISIS_DEL_EFECTO_BAUSCHINGER_EN_ACEROS_DE_ALTA_RESISTENCIA](https://www.academia.edu/37492466/AN%C3%81LISIS_DEL_EFECTO_BAUSCHINGER_EN_ACEROS_DE_ALTA_RESISTENCIA)
- Mariaca, E. (2013). *Guía de ensayos de materiales metálicos, frágiles y dúctiles, para el laboratorio de ingeniería electromecánica*. *Revista Tecnociencia Universitaria Bolivia*, 35-38.

- Metalco. (2022). *Tubería redonda para estructuras cañería, malla y EMT*. Obtenido de Metalco: <https://metalco.net/tuberia-redonda-emt-caneria-malla/>
- Molina, A. (2009). *Evaluación y determinación experimental-numérica del endurecimiento por deformación y el efecto Bauschinger en las propiedades mecánicas de un acero inoxidable* [Tesis de Maestría, -Instituto Politécnico Nacional]. Obtenido de <http://www.repositoriodigital.ipn.mx/handle/123456789/14462>
- Monge Sandí, A. L., & Abarca Jiménez, A. (2013). *Comparación de determinación de propiedades mecánicas en barras de refuerzo para concreto con extensómetro axial convencional y extensómetro láser*. doi:<https://doi.org/10.15517/mym.v3i1.13481>
- Oviedo, J. A., & Duque, M. D. (2006). *Sistemas de control de respuesta sísmica en edificaciones*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372006000200010#fig2
- Pampanin, S. (2005). *El disipador "Plug&Play"*. New Zealand Society For Earthquake Engineering.
- Parada, J. E. (28 de Febrero de 2013). *Control de calidad del acero A706*. Obtenido de Scribd: <https://es.scribd.com/document/127836087/2ct-control-de-Calidad-Del-Acero-a-706-Didelco>
- Pietra, D., Pampanin, S., Lester, J., & Brown, A. (2012). *Pres-Lam In Practice - A Damage-Limiting Rebuild Project - Brown A., Lester J., Pampanin S. and Pietra D. (2012) "Pres-Lam In Practice - A Damage-Limiting Rebuild Project", SESOC NZ Conference 2-3 November 2012, Paper Number: 027*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/351443499_Pres-Lam_In_Practice_-_A_Damage-Limiting_Rebuild_Project_-_Brown_A_Lester_J_Pampanin_S_and_Pietra_D_2012_Pres-Lam_In_Practice_-_A_Damage-Limiting_Rebuild_Project_SESOC_NZ_Conference_2-3_November_2012_
- Popov, E. (2000). *Mecánica de sólidos*. Pearson.
- Ramos Trejo, E., Jacobo Armendáriz, V. H., Ortiz Prado, A., Cueva Güitrón, I., & Álvarez Lozano, G. (2017). *Manual de prácticas del laboratorio de Análisis experimental de esfuerzos*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.

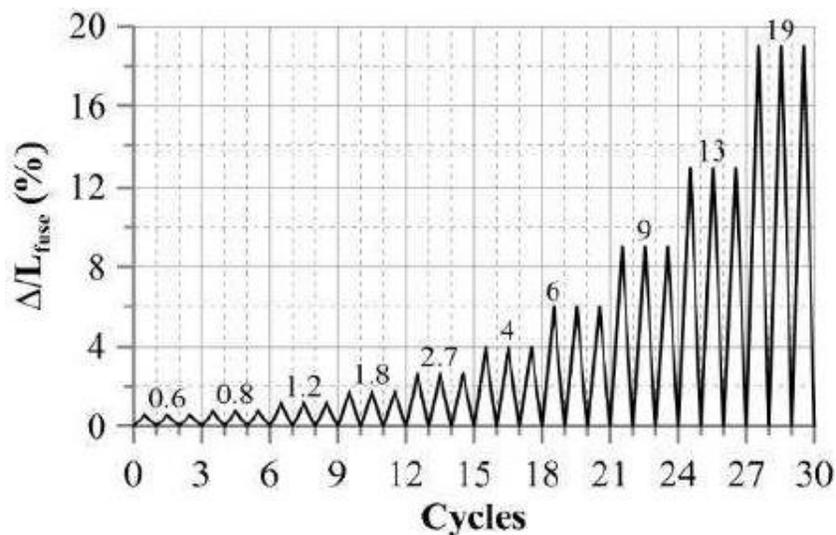
- Roda, V. (29 de Agosto de 2022). *Método de los elementos finitos*. Obtenido de http://www.mecapedia.uji.es/pages/metodo_de_los_elementos_finitos.html
- Rodríguez Rodríguez, G., Hernández González, A., López Llanusa, A., & Ramírez Beltrán, J. (2016). *Sistema para la medición de deformación usando galgas extensiométricas metálicas*. Obtenido de ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/308021619_Sistema_para_la_Medicion_de_Deformacion_usando_Galgas_Extensiométricas_Metalicas
- Sanabria Barboza, D. (2016). *Barras de acero corrugadas y lisas para refuerzo de elementos de concreto estructural en Costa Rica*. Obtenido de LANAMME UCR: <https://www.lanamme.ucr.ac.cr/repositorio/handle/50625112500/903>
- Sanabria, K. (2019). *Guía para la evaluación de daños en edificaciones después de un sismo en Costa Rica*. [Tesis de licenciatura, Tecnológico de Costa Rica]. Cartago. doi:<https://hdl.handle.net/2238/10986>
- Sarti, F., Smith, T., Palermo, A., Pampanin, S., & Carradine, D. (2013). *Estudio experimental y analítico de un dissipador reemplazable de acero dulce de tipo fusible con restricción de pandeo (BRF)*. NZSEE Conference, (p. 2).
- Segovia, J. (2016). *Diseño de dissipadores de energía metálicos para una edificación de baja altura de concreto armado*. [Tesis de Magíster, Pontificia Universidad Católica del Perú]. doi:<http://hdl.handle.net/20.500.12404/7120>
- SINOPEC. (s.f de octubre de 2012). *Grasa Multipropósito Sinopec*. Obtenido de <http://ttu.com.uy/wp-content/uploads/2018/02/Es-Grasa-MP.pdf>
- Solórzano, L. (2005). *Vulnerabilidad sísmica de estructuras de viviendas de uno y dos pisos en una zona piloto del Valle Central*. [Tesis de licenciatura, Universidad de Costa Rica]. doi:<https://hdl.handle.net/10669/16676>
- Tema 9 (II) - Máquinas*. (s.f). Obtenido de Docplayer: <https://www.scribbr.es/citar/generador/folders/3FUU4wPN6PbggrvbfzTd8B/lists/3kqyXpMBgFwu7xooSL1qdl/>
- Yépez, H. (s.f de 2014). *Resistencia de materiales IA*. Obtenido de Docplayer: <https://docplayer.es/77090890-Resistencia-de-materiales-1a-profesor-herbert-yepez-castillo.html>

Yizeng, I. (25 de junio de 2022). *Tubería estructural de acero al carbono A500*. Obtenido de <http://www.czyzindustry.com/info/a500-carbon-steel-structural-tubing-47046798.html>

Anexos

Anexo 1

Protocolo de carga según ITG-5.1-07



Nota. Tomado de “Estudio experimental y analítico de un disipador reemplazable de acero dulce de tipo fusible con restricción de pandeo (BRF)” (p. 3), F. Sarti, et al., 2013, NZSEE Conference.

Anexo 2

Cálculo del protocolo de desplazamiento modificado

Ciclos	ΔL _{fusi} (%)	Deformación unitaria (cm/cm)	L _{fusible} (cm)	Desplazamiento fusible (cm)	L _{librevarilla} (cm)	Desplazamiento varilla #5 (cm)	Desplazamiento total (cm)
0--3	0.6	0.006	18	0.108	0.5	0.001	1.09
3--6	0.8	0.008	18	0.144	0.5	0.001	1.45
6--9	1.2	0.012	18	0.216	0.5	0.001	2.17
9--12	1.8	0.018	18	0.324	0.5	0.001	3.25
12--15	2.7	0.027	18	0.486	0.5	0.001	4.87
15--18	4	0.04	18	0.720	0.5	0.001	7.21
18--21	6	0.06	18	1.080	0.5	0.001	10.81
21--24	9	0.09	18	1.620	0.5	0.001	16.21
24--27	13	0.13	18	2.340	0.5	0.001	23.41
27--30	19	0.19	18	3.420	0.5	0.001	34.21

Nota. Elaboración propia, 2023.

Anexo 3

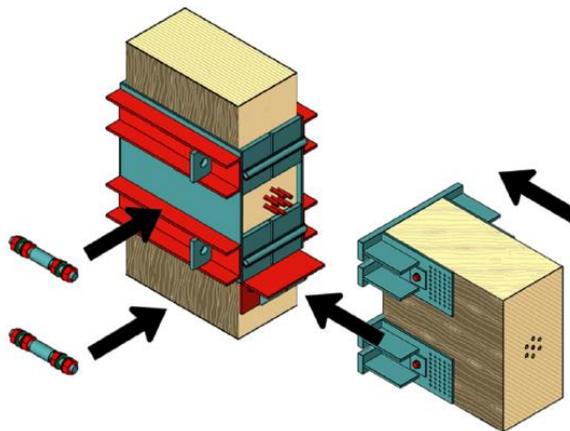
Primer edificio PRESSS de varios pisos en Nueva Zelanda con disipadores externos reemplazables



Nota. Tomado de “El disipador Plug & Play” (p .10), S. Pampanin, 2005, New Zealand Society For Easthquake Engineering.

Anexo 4

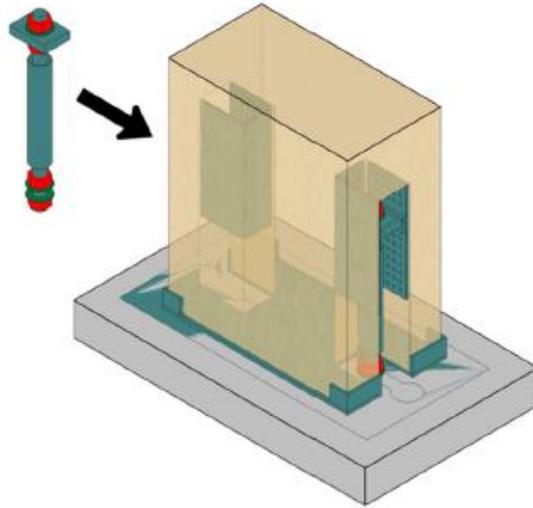
Vista 3D explotada de la articulación de la columna de viga del primer piso que muestra puntos de pivote fijos



Nota. Tomado de “Pres-lam in practice-a damage-limiting rebuild project”, D. Pietra, et al., 2012, SESOC NZ Conference.

Anexo 5

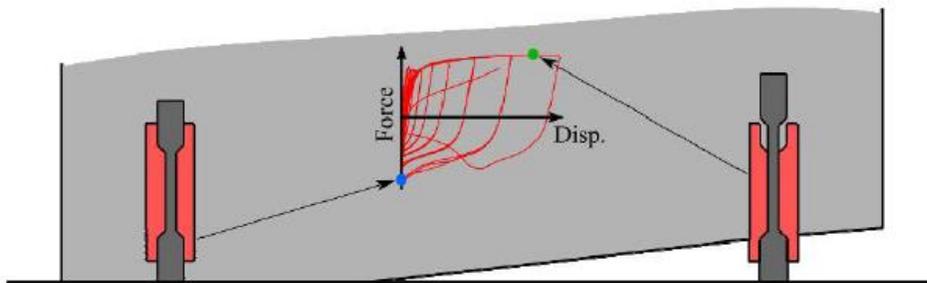
Vista 3D de la base de las columnas del marco que ilustra la inserción de los disipadores de energía reemplazables



Nota. Tomado de “Pres-lam in practice-a damage-limiting rebuild project”, D. Pietra, et al., 2012, SESOC NZ Conference.

Anexo 6

Aplicaciones de disipadores externos a juntas viga-columna (arriba a la izquierda) y juntas de cimentación de muros (arriba a la derecha). Detalle del comportamiento del disipador (abajo)



Nota. Tomado de “Estudio experimental y analítico de un disipador reemplazable de acero dulce de tipo fusible con restricción de pandeo (BRF)” (p. 2), F. Sarti, et al., 2013, NZSEE Conference.

Anexo 7

Costo general del dissipador externo de energía a base de acero A706 y la varilla #5

Cantidad	Descripción	Procedimiento	Precio Unitario ₡	Precio total ₡
1	Barra con carga cíclica hasta 30 ciclos	(No acreditado)	₡ 47,000	₡ 47,000
1	Medición de deformación unitaria con extensómetro	(ASTM A370, No acreditado)	₡ 22,000	₡ 22,000
1	Tensión de varillas S o W (#3 a #6)	(ASTM A370, acreditado)	₡ 24,000	₡ 24,000
1	Varilla #5 A706 de 6 metros	-	₡ 6,795	₡ 6,795
6	Galgas extensiométricas	-	₡ 24,000	₡ 24,000
1	Torno de varilla #5	-	₡ 5,000	₡ 5,000
-	Gastos logísticos + IVA (2%) de LANAMME	-	-	₡ 208,410
	Total			₡ 337,205

Nota. Elaboración propia, 2023.

Glosario

Eventos sísmicos: Los eventos sísmicos se producen en el interior de la tierra y se propagan en todas direcciones en forma de onda.

Sismo: Manifestación superficial de la liberación de energía interna de nuestro planeta.

Riesgo sísmico: Grado de pérdida, destrucción o daño esperado debido a la ocurrencia de un determinado sismo.

Ductilidad: Los materiales se clasifican dúctil cuando bajo la acción de una fuerza pueden deformarse plásticamente sin romperse.

Daño estructural: Es una afectación causada a los elementos estructurales (columnas, vigas, placas, entre otros) producto de los sismos.

Disipadores de energía: Son dispositivos que absorben la energía sísmica.

Mortero: Material plástico que se forma por la mezcla de agua, arena y cemento.

Varilla: Es una barra de acero bajo carbón, en los bordes presenta un corrugado.

Resistencia del material: Es la capacidad que tiene un material para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse.

Rigidez: Es la capacidad que presenta un objeto para resistir deformación cuando se aplica una carga o fuerza externa.

Deformación plástica: Es cuando al material se le aplica cierta fuerza y al retirar este esfuerzo ya no vuelve a su posición original.

Concreto prefabricado: Se elabora en plantas industriales para posteriormente transportarlo al sitio de construcción.

Comportamiento histerético: Se representa matemáticamente la relación entre fuerza-desplazamiento en una secuencia de carga y descarga.

Protección sísmica: Es una herramienta tecnológica que protege la estructura de los efectos destructivos del sismo.

Rango elástico: Los materiales obtienen un grado de rigidez alto, esto provoca que el material no tenga una alta capacidad para deformarse.

Pandeo: Es la curva de flexión que se produce en la longitud media de una viga, columna, entre otros.

Deformación: Es el cambio que sufre un cuerpo cuando se aplican fuerzas externas, ya sea de tensión o compresión y una variación su tamaño original.